

Variazioni morfologiche stagionali del sistema spiaggia-duna del Parco Nazionale del Circeo

Elena Pallottini¹, Sergio Cappucci², Andrea Taramelli¹, Carlo Innocenti¹ e Augusto Screpanti²

¹ ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - Via di Casalotti, 300 - 00145 Roma

² ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile -
Via Anguillarese, 301 - Casaccia

Riassunto

Il presente lavoro si pone come obiettivo quello di una caratterizzazione morfo-dinamica del sistema spiaggia-duna (sia nella fascia emersa che in quella sommersa) presente all'interno del Parco Nazionale del Circeo (Lazio meridionale) attraverso una integrazione tra diverse tecnologie di acquisizione di dati topografici utilizzate per caratterizzare l'assetto topografico del sistema spiaggia-duna e monitorare nel breve periodo le variazioni stagionali del sistema. Mediante l'utilizzo di un GPS differenziale e di un sensore LiDAR aviotrasportato, sono state analizzate le caratteristiche morfologiche del sistema spiaggia duna ed alcune variazioni stagionali. I rilievi DGPS sono stati acquisiti da marzo 2009 a gennaio 2010 lungo transetti perpendicolari alla linea di costa e rappresentativi della variabilità morfo-evolutiva del litorale oggetto di studio.

Il rilievo con il sensore LiDAR Hawk Eye II, è stato eseguito lungo la fascia costiera compresa tra Torre Astura e il Promontorio del Circeo, per un totale di 40 km², nei giorni 9 e 10 maggio 2009, coprendo sia la fascia emersa, fino ai laghi costieri, che quella sommersa, fino ad una profondità di 20 m. Nel presente lavoro verranno analizzati solo i dati relativi alla fascia emersa.

I risultati del monitoraggio topografico hanno permesso di evidenziare le variazioni morfologiche stagionali più rilevanti lungo il profilo spiaggia duna. Inoltre, l'analisi combinata tra i dataset DGPS e LiDAR relativi al mese di maggio è stata particolarmente utile per validare i rilievi eseguiti e mettere in evidenza le variazioni riconducibili ad una dinamica a brevissimo termine (a scala giornaliera) della spiaggia emersa, sulla base delle differenze riscontrate in corrispondenza della battigia e sulle dune nell'intervallo di tempo trascorso tra i due rilievi.

Parole chiave: sistema spiaggia-duna, dinamica stagionale, LiDAR, DGPS.

Abstract

The objectives of this work are a morphodynamic characterisation of Parco del Circeo (southern Lazio region) beach-dune system and an integration of different topographic datasets used to analyse and monitor the seasonal variability of the study site. The seasonal morphological analysis of the beach-dune system has been performed with topographic surveys using Differential GPS and LiDAR sensor. DGPS surveys have been performed from March 2009 to January 2010 along cross-shore transects representative of the morphodynamic variability of the system.

Hawk Eye II LiDAR survey has been carried out between Torre Astura and Circeo Promontory in a costal area of 40 km² on 9th and 10th May 2009.

Data acquired allowed the extraction of the dune perimeter from LiDAR dataset, the extraction of beach-dune cross-

shore profiles from the DGPS dataset and a combined analysis of both LiDAR and DGPS datasets.

Results from the seasonal monitoring activities outlined the most significant morphological variations along the beach-dune profile. The combined analysis between LiDAR and DGPS datasets was useful to validate the surveys and to outline the short term dynamics (daily scale) of the dry beach.

Keywords: *beach-dune system, seasonal variability, LiDAR, DGPS.*

Introduzione

Ai fini di una corretta gestione e pianificazione del territorio, in accordo con i principi del Protocollo ICZM (Integrated Coastal Zone Management), il sistema costiero deve essere studiato ed analizzato integralmente anche dal punto di vista morfologico ed ecologico-ambientale (Irish e White, 1998). Il monitoraggio e lo studio delle tendenze evolutive del sistema spiaggia-duna sono fondamentali per comprendere la dinamica del sistema litoraneo, lo stato di conservazione degli habitat naturali e, di conseguenza, per scegliere gli interventi compatibili con una corretta gestione e protezione della fascia costiera (Saye et al., 2005).

Spiaggia sommersa, spiaggia emersa e duna costituiscono tre distinti elementi di uno stesso sistema, strettamente dipendenti l'uno dall'altro. Per questo motivo i cambiamenti che interessano una di queste tre componenti, possono avere un'influenza diretta o indiretta sulle variazioni delle altre due (Psuty, 1988; Saye et al., 2005). L'analisi morfologica applicata alle diverse componenti della fascia costiera e la comprensione dei meccanismi di *feedback* esistenti tra di esse, opportunamente integrata con caratterizzazioni ambientali, si rivelano di fondamentale importanza per individuare le criticità presenti all'interno del sistema. In particolare, negli ultimi anni gli studi si sono concentrati sull'individuazione di indicatori morfologici che possono descrivere al meglio l'entità e la frequenza dei fenomeni di erosione/accrescimento e le variazioni del sistema a diverse scale spazio temporali (Bauer e Davidson-Arnott, 2002; Davidson-Arnott, 2005; Davidson-Arnott et al., 2005). Gli indicatori morfologici possono essere sito specifici o fortemente influenzati dalle condizioni oceanografiche e meteo marine agenti sul paraggio (Ruggiero, 2003; Parker, 2003). L'analisi morfometrica relativa alla spiaggia sommersa, alla spiaggia emersa ed alle dune costiere, permette di definire l'andamento topografico e batimetrico delle aree indagate utilizzando solitamente dati altimetrici lungo sezioni di riferimento e di eseguire computi areali e volumetrici. (Clark 1996; Beachmed, 2004). La comprensione delle tendenze evolutive dei sistemi costieri impone di condurre analisi a diverse scale temporali al fine di stimare input e output di sedimento all'interno del sistema. I rilievi periodici delle quote possono ad esempio fornire informazioni sull'efficacia di eventuali interventi di protezione della fascia costiera, come ad esempio la realizzazione di opere per il ripristino dunale (Vanhée, 2002). Questo tipo di approccio ha importanti ricadute nella gestione e pianificazione territoriale (Anthony et al., 2006).

Negli ultimi anni, molte regioni hanno utilizzato con successo la tecnologia LiDAR per lo studio della fascia costiera grazie alla possibilità che questa offre nel raccogliere dati su ampi tratti di superficie in breve tempo e con maggiore continuità spazio-temporale rispetto a qualsiasi altra tecnologia, nonché di realizzare modelli digitali della superficie emersa e sommersa, che possono essere di supporto per numerose applicazioni in campo ingegneristico e geo-morfologico (Coren et al., 2002).

Possono essere citate a questo proposito le esperienze di: Emilia Romagna (Ciavola et al., 2006), Toscana (nel 2006 e 2008), Veneto (Picchio, 2006), Campania (nel 2004 e 2005), Calabria (nel 2004) e Lazio (ISPRA, 2009; ISPRA, 2010).

Il presente lavoro si pone come obiettivi quello di una caratterizzazione morfo-dinamica del sistema spiaggia-duna presente all'interno del Parco Nazionale del Circeo e di una integrazione tra diverse tecnologie di acquisizione di dati topografici utilizzate per caratterizzare l'assetto topografico del sistema spiaggia-duna e monitorare nel breve periodo le variazioni stagionali del sistema.

Area di studio

Il litorale compreso tra Torre Astura e il Promontorio del Circeo (Fig. 1a) è sabbioso ed è caratterizzato da un sistema dunale parallelo alla linea di costa, che un tempo correva senza interruzioni lungo tutta l'unità fisiogra-

fica (Campo e La Monica, 2006), mentre oggi ne copre circa l'80% (25 km). L'origine di queste dune costiere sembra essere legata alla formazione di una barra sabbiosa in seguito all'innalzamento del livello del mare in età Versiliana (Blanc et al., 1953; Giovagnotti et al., 1980), accresciutasi nel tempo ad opera dell'azione eolica. Sia la quota che l'ampiezza di questi "tumoleti" aumentano da nord verso sud raggiungendo al massimo i 28 m di elevazione sul livello del mare e i 250 m di larghezza nei pressi di Torre Paola (Campo e La Monica, 2006). Dal punto di vista vegetazionale, le dune sono per la maggior parte consolidate da vegetazione costiera specializzata, tipica dell'ambiente mediterraneo (Giovagnotti et al., 1980; Pallottini e Cappucci, 2009; Pallottini et al., 2008; Pallottini et al., 2009). In ragione della differente esposizione ai venti e all'insolazione, è possibile distinguere due diversi settori: il versante rivolto verso i laghi costieri, caratterizzato dalla presenza di una vegetazione arbustiva ed arborea ben strutturata, e quello rivolto verso il mare, caratterizzato da una vegetazione prevalentemente cespugliosa xerofita ed alofita, in grado di stabilizzare le sabbie eoliche tramite apparati radicali specializzati, innescando così meccanismi di *feedback* positivo tra la componente biologica e quella sedimentologica, che conferiscono al sistema stabilità dinamica e resilienza (Beachmed-e, 2007).

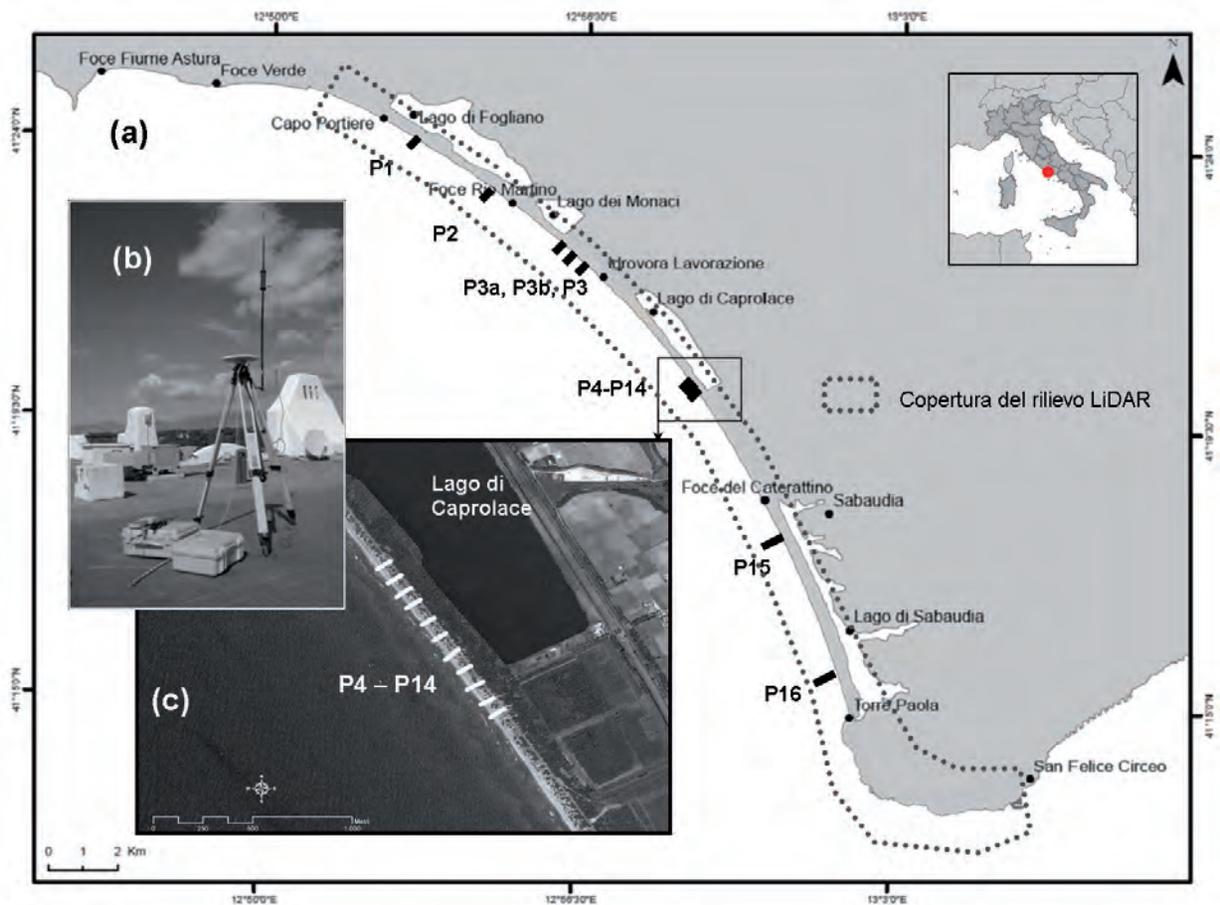


Figura 1 - (a) Area di studio e localizzazione dei rilievi topografici mediante DGPS e LiDAR; (b) DGPS a doppia frequenza Trimble 5700; (c) ingrandimento di una delle due aree selezionate per lo studio di dettaglio.

Negli anni '30 la dinamica del sistema ortogonale alla linea di riva è stata bloccata dalla costruzione della strada costiera in corrispondenza del suo asse longitudinale che, oltre ad impedirne la libera evoluzione morfologica (ossia il libero avanzamento ed arretramento che gli consentirebbe di limitare i danni prodotti dall'azione erosiva delle mareggiate), ha anche incrementato l'erosione dovuta a fenomeni di ruscellamento e contribuito a rendere l'intera area costiera più accessibile nella stagione estiva (Bovina et al., 2003). Alla fine degli anni '80 il tratto di strada compreso tra la foce del Rio Martino e l'Idrovora Lavorazione è stato seriamente danneggiato da

un evento di mareggiata a seguito del quale non è stato più aperto al traffico ed è stato oggetto di interventi di ripristino e conservazione del sistema spiaggia-duna.

Materiali e metodi

L'analisi delle variazioni morfometriche stagionali sistema spiaggia-duna è stata condotta tramite rilievi topografici e batimetrici in sito e da remoto (GPS differenziale e sensore LiDAR) secondo il crono programma riportato in Tabella 1.

Tabella 1 - Date dei rilievi eseguiti nell'area di studio.

	Marzo 2009	Aprile 2009	Maggio 2009	Luglio 2009	Ottobre 2009	Gennaio 2010
DGPS	12 e 13	15, 16 e 17	14 e 15	22 e 23	14, 15 e 16	26, 27 e 28
LiDAR	-	-	9 e 10	-	-	-

Rilievo DGPS

La strumentazione utilizzata per i rilievi topografici, di proprietà della Sezione "Prevenzioni Rischi Naturali e Mitigazione Effetti" dell'ENEA, consiste in due stazioni complete di ricevitori DGPS a doppia frequenza Trimble modello 5700 (Fig. 1b), associati all'antenna ricevente Zephyr Geodetic dotata della tecnologia per la riduzione del multipath, ossia di quegli errori di posizionamento dovuti allo sdoppiamento del segnale per riflessione contro ostacoli lungo il percorso.

Il rilievo topografico, con un minimo di 6 satelliti sempre visibili, è stato eseguito in modalità cinematica (RTK, Real Time Kinematics), utilizzando due ricevitori: una base, posta in un punto di coordinate note, ed un rover per l'esecuzione del rilievo.

A causa dell'ampia estensione del tratto di costa da rilevare, sono stati individuati due punti a coordinate note su cui posizionare la base: il più settentrionale si trova su un Bunker in corrispondenza di un caposaldo IGM mentre il più meridionale è stato posizionato sul tetto dell'albergo "Le Dune" trasponendo le coordinate da un caposaldo della Regione Lazio che si trova nelle vicinanze (Tab. 2).

I due capisaldi sono stati necessari per avere una distanza base-rover inferiore ai 10 km: infatti, il software con il quale si processano i dati (TGO = Trimble Geomatics Office), gestisce bene i vettori inferiori a questa distanza, minimizzando gli errori.

Tabella 2 - Coordinate piane in UTM-WGS84 dei capisaldi utilizzati per il rilievo topografico. I valori con (*) sono stati arrotondati al metro per motivi di copyright.

Nome del Caposaldo	Nord	Est	Quota ellissoidica
BUNKER	4580983 (*)	328598 (*)	55,540
HOTEL	4573267,403	333671,473	67,722

Il punto "BUNKER" è direttamente dell'IGM ed è stato utilizzato per rilevare i transetti 1, 2, 3a, 3b e 3. Il punto "HOTEL" è stato acquisito con una misura statica da un caposaldo della Regione Lazio ed è stato utilizzato per rilevare i transetti compresi tra il transetto 4 e il transetto 16. In questo caso, la durata dell'acquisizione statica è stata di 58 minuti e la distanza tra i due punti (caposaldo della regione - tetto dell'hotel "Le Dune") di poco superiore agli 843 m, garantendo così un'ottima determinazione.

La campagna di rilevamento topografico con DGPS è stata effettuata durante il 2009 (marzo, aprile, maggio, luglio e ottobre) e il 2010 (gennaio). Lungo il tratto di litorale tra Capo Portiere e Torre Paola sono stati eseguiti 18 profili topografici perpendicolari alla linea di riva, dalla battigia fino al ciglio della strada costiera (Fig. 1a).

I profili di spiaggia sono stati scelti per essere rappresentativi della variabilità morfo-evolutiva dell'area di studio.

A questo scopo è stato fatto riferimento all'analisi di Parlagraeco et al. (2008), condotta con l'obiettivo di suddividere la costa tra Foce Verde e Torre Paola in zone dal comportamento omogeneo rispetto ad una serie di parametri morfologici (ampiezza della spiaggia, quota del piede duna, ampiezza dei fondali) ed evolutivi (tasso di spostamento della linea di riva tra il 1998 e il 2005). E' stato quindi posizionato un transetto per ciascun settore e, al fine di procedere ad una analisi di dettaglio, sono state selezionate due aree in cui infittire il rilevamento, per un numero totale di transetti pari a 18.

All'interno della prima area, che si trova tra Rio Martino e Idrovora Lavorazione, lungo il tratto della strada litoranea interrotta, e che si estende per 500 m, sono stati eseguiti tre profili con un interasse di circa 250 m. Tale tratto è stato scelto in quanto è quello che maggiormente risente degli eventi estremi che si sono verificati nell'area.

All'interno della seconda area, che si trova all'estremità meridionale del lago di Caprolace e si estende per un chilometro lineare, sono stati acquisiti 11 transetti con un interasse di 100 m (Fig. 1c). Questo tratto è stato selezionato per la vivace dinamica litoranea che lo caratterizza, dovuta alla presenza di un doppio sistema di barre che lo rende particolarmente adatto all'analisi della variabilità a scala stagionale.

Ciascun profilo è stato rilevato da un punto localizzato lungo il lato mare della strada costiera, ed assunto come origine, fino alla battigia. Lungo il transetto sono stati acquisiti tutti i punti di discontinuità morfologica (ad es. berma, piede della duna, ecc.). I dati acquisiti in campo sono stati post-processati per le correzioni differenziali mediante il software Trimble Geomatics Office. In seguito le quote ellissoidiche sono state convertite in quote geodetiche utilizzando il software VERTO fornito dall'Istituto Geografico Militare IGM, mentre le coordinate planimetriche sono state riportate al sistema di riferimento WGS84, UTM fuso 33 Nord. Tutti i punti dei transetti sono stati quindi esportati nel formato *shapefile*, ed ad ogni punto sono state associate le informazioni riportate nella Tabella 3.

Tabella 3 - Informazioni associate a ciascun punto acquisito nel corso dei rilievi topografici mediante DGPS.

Nome	POINT_NAME
Coordinate geografiche	LAT_WGS84 e LON_WGS84
Coordinate metriche	NORD_WGS84 e EST_WGS84
Quota ellissoidica	H_ELL
Quota geoidica	H_GEOID
Differenza tra la quota del geoide e quella dell'ellissoide	DELTAH
Data di acquisizione	DATE_OBS
Ora di acquisizione	TIME_OBS
Precisione orizzontale	H_PREC_OBS
Precisione verticale	V_PREC_OBS

Rilievo topografico mediante LiDAR

Il rilievo con il LiDAR topografico e batimetrico Hawk Eye II (Steinvall et al., 1994; Koppari et al., 1994; Schnurr, 2010), è stato eseguito lungo la fascia costiera compresa tra Torre Astura e il Promontorio del Circeo (Fig. 1a), per un totale di 40 km², nei giorni 9 e 10 maggio 2009.

L'acquisizione è stata effettuata dalla BLOM-CGR mediante l'aeromobile ad ala fissa CGR CASA 212 C.

La campagna di acquisizione ha previsto la realizzazione di 42 sorvoli ad una velocità di 150 nodi (circa 290 km/h) ad una quota di circa 450 m. La quota massima raggiunta dal rilievo è pari a circa 347 m. Il rilievo topografico, eseguito utilizzando il sensore laser che opera nella lunghezza d'onda del rosso, ha garantito:

- una copertura del suolo con una distanza media fra i punti misurati pari a 0.9 m sul terreno;
- una sovrapposizione dei voli tale da assicurare copertura integrale delle aree di interesse;
- una scansione di acquisizione a 64 khz.

Per la navigazione del velivolo ed il posizionamento dei dati acquisiti è stato utilizzato il sistema GPS inerziale Applanix AV 410. I dati di posizione acquisiti in volo sono in seguito stati corretti in post processamento utilizzando i dati rinex ad 1Hz provenienti da due stazioni Italpos (Italian Positioning Service) localizzate entro 40 km dall'area del rilievo.

Durante l'acquisizione la costellazione GPS è stata costantemente monitorata. Le riprese sono state effettuate con un minimo di 6 satelliti sempre visibili, con un'elevazione minima di 12° e un PDOP < 3,5 (ISPRA, 2010). Nella Tabella 4 vengono sintetizzate le caratteristiche tecniche del sensore LiDAR HawkEye II.

I dati topografici sono stati pre-processati con software Leica Geomatics Office (LGO); le coordinate planimetriche sono state riportate al sistema di riferimento WGS84, UTM fuso 33 Nord.

La fase successiva ha previsto l'utilizzo del software TerraSolid OY in ambiente MicroStation v8 per il filtraggio e la classificazione dei punti in differenti classi di appartenenza (suolo nudo, vegetazione, edifici). I punti topografici sono stati trattati sia con processi automatici che manuali fino a costituire una serie di classi di appartenenza (suolo nudo, vegetazione, edifici). Dal dataset così elaborato è stato creato un DSM topografico con risoluzione pari a 2m x 2m.

Contestualmente sono state acquisite anche una serie di ortofoto mediante una Camera digitale integrata medi formato, modello uEye UCGA 2 MPixel 25 cm GDS.

Tabella 4 - Caratteristiche tecniche del sensore LiDAR topografico e del sistema di posizionamento.

Sensore LiDAR HawkEye II	
Frequenza LiDAR topografico	64,000 Hz
Altitudine nominale	Dai 250 ai 500 m
Abbracciamento	Dai 100 a 330 m
Densità di punti dei dati topografici	Tipicamente da 1 a 4 punti per m ²
Accuratezza rilievo topografico	Orizzontale: ± 0,5 m Verticale: ± 0,15 m

Perimetrazione della duna dai dati lidar

La definizione dell'estensione e della geometria dei depositi eolici presenti all'interno delle aree costiere rilevate sono state effettuate a partire dal DSM estraendo la posizione del piede della duna (versante marino). I principali elementi morfologici sono stati identificati tramite il computo della pendenza (*slope*) e della quota (*elevation*), già utilizzato in precedenti studi per l'analisi morfometrica di dune tramite l'utilizzo di dati LiDAR (Mitasova et al., 2005). Soprattutto per l'individuazione del piede della duna, *slope* e *elevation* si rivelano utilissimi indicatori in quanto è proprio nella zona di transizione spiaggia emersa-duna che si registrano le maggiori variazioni dei loro valori.

La procedura per l'estrazione del perimetro della duna è stata eseguita mediante le seguenti fasi di lavoro:

1. calcolo dei valori di *slope* sul DSM creato mediante il tool "Surface analysis/slope" presente nell'estensione Spatial Analyst in ArcGIS® 9.3;
2. calcolo delle isolinee con passo pari a 0,5 m per l'*elevation* e pari a 0,5° per la *slope*;
3. visualizzazione dei valori di *slope* ed *elevation* (Fig. 2a e 2b);
4. posizionamento dei limiti della duna: il piede della duna (versante marino) è stato posizionato mediante visualizzazione contemporanea delle ortofoto, dei valori di *elevation* e dei valori di *slope*; il limite interno della duna: è stato posizionato in corrispondenza della strada costiera, che corre parallelamente alla linea di costa lungo la cresta della duna, limitando al solo versante marino la porzione veramente attiva (nella dinamica a breve-medio termine) del cordone dunale.

Digitalizzazione del poligono della duna mediante la creazione di uno shapefile poligonale in ArcGIS® 9.3.

Validazione e correzione del poligono mediante visualizzazione tridimensionale dello shapefile poligonale sulle ortofoto. Per la visualizzazione in 3D è stato utilizzato il software ArcSCENE, che ha permesso di esagerare la scala delle quote al fine di evidenziare le morfologie rilevate rispetto al livello del mare. In questo caso la scala di esagerazione verticale del rilievo è stata impostata con una proporzione di 1:5.

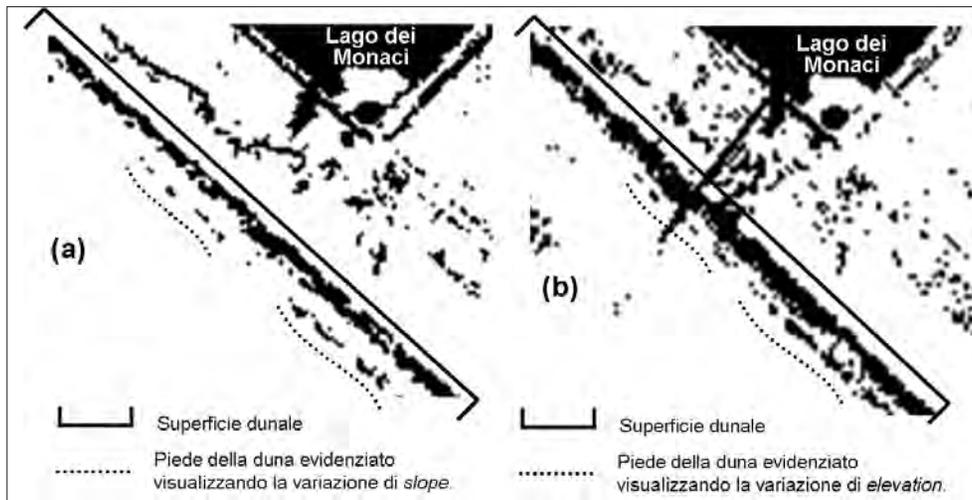


Figura 2 - Visualizzazione del piede della duna tramite i valori di *slope* (a) e di *elevation* (b) associati al DSM LiDAR.

La visualizzazione delle ortofoto associate ai valori di quota è stata utilizzata anche per l'individuazione delle diverse tipologie di discontinuità morfologiche delle dune e della fascia costiera in generale (Fig. 3).

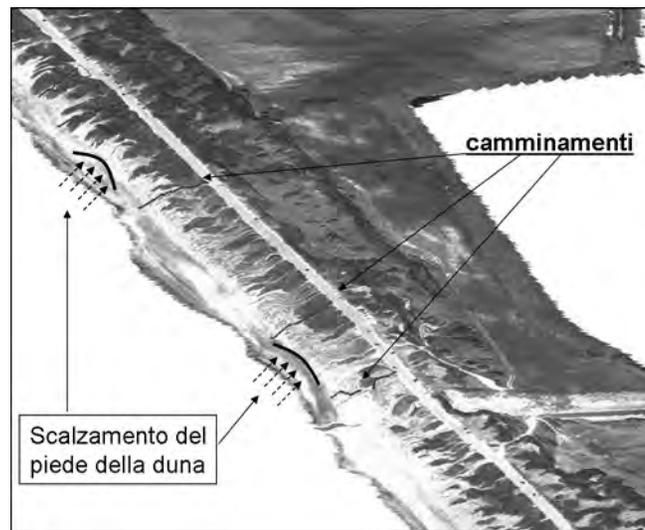


Figura 3 - Visualizzazione in ArcSCENE® delle ortofoto associate ai valori di quota rilevati dal LiDAR.

Estrazione dei profili dai dati acquisiti mediante DGPS

Per elaborare un profilo topografico, a ciascun punto è necessario associare la distanza da un punto di riferimento preso come origine (asse x) e la quota (asse y).

Gli shapefile relativi ai punti acquisiti in campo dal DGPS contengono l'informazione della quota (Tab. 2) ma non la distanza rispetto all'origine. Per calcolare questo valore è stata seguita la seguente procedura:

- importazione degli shapefile relativi ai profili e ai "punti origine" in ArcGIS 9.3;
- selezione dei punti appartenenti ad un singolo profilo;
- calcolo della distanza tra ciascun punto del profilo X rispetto alla propria origine mediante il tool "Point Distance". Questo procedimento è stato replicato per ciascun profilo e per ciascun rilievo eseguito.

I grafici relativi ai profili sono stati elaborati mediante il software Grapher applicando la seguente procedura:

- predisposizione di un foglio excel contenente, per ciascun profilo, la distanza dall'origine (calcolata secondo il metodo sopra descritto) e la quota (rilevata in campo);
- Importazione del foglio excel in Grapher e costruzione dei profili di spiaggia e duna.

Infine, per procedere ad una valutazione della dinamica stagionale del sistema spiaggia-duna in termini di perdita/acquisto di sedimenti, è stata calcolata l'area sottesa a ciascun profilo rispetto ad una linea di riferimento (*baseline*) fatta coincidere, in questo lavoro, in corrispondenza dello zero geodetico (IGM95).

Le aree così individuate rappresentano la media delle variazioni di volume lungo il transetto, idealmente largo 1m, realizzatesi nel periodo intercorso tra i due rilievi ed espresse in m³. Per effettuare tale stima, è stata operata una somma algebrica dei volumi ottenuti nei diversi rilievi.

Confronto dati LiDAR/dati DGPS

Per effettuare un'analisi combinata utilizzando i due differenti dataset a disposizione, è stato necessario operare un confronto tra il rilievo topografico LiDAR e quello RTK, per escludere la presenza eventuali distorsioni ed errori sistematici tra i due set di dati.

Per confrontare le quote dei due rilievi, utilizzando ArcGIS, è stato eseguito un *join* spaziale che ha permesso di associare ad ogni punto RTK il più vicino nodo della griglia del DSM. Tramite il *join* spaziale in ogni punto dei transetti rilevati si è ottenuta una doppia quota geodetica, ottenuta trasformando le quote ellissoidiche dei rilievi RTK e LiDAR, e la distanza orizzontale dal nodo DSM più vicino. Calcolata la differenza tra le due quote e selezionando solo i punti RTK che cadono a meno di 50 cm dal nodo più vicino del DSM, è stato calcolato l'istogramma degli scarti di Figura 4 e le statistiche descrittive della Tabella 5.

Nella Figura 5 le quote misurate dai due sistemi sono confrontate in un grafico *scatter plot*.

Il risultato, mostra che la quasi totalità dei punti della superficie topografica acquisiti con le due differenti metodologie ha uno scarto dei valori di quota entro i 30 cm per punti LIDAR che non si discostano di oltre 50 cm rispetto a quelli acquisiti con il DGPS. In particolare, le due classi più frequenti all'interno della statistica sono

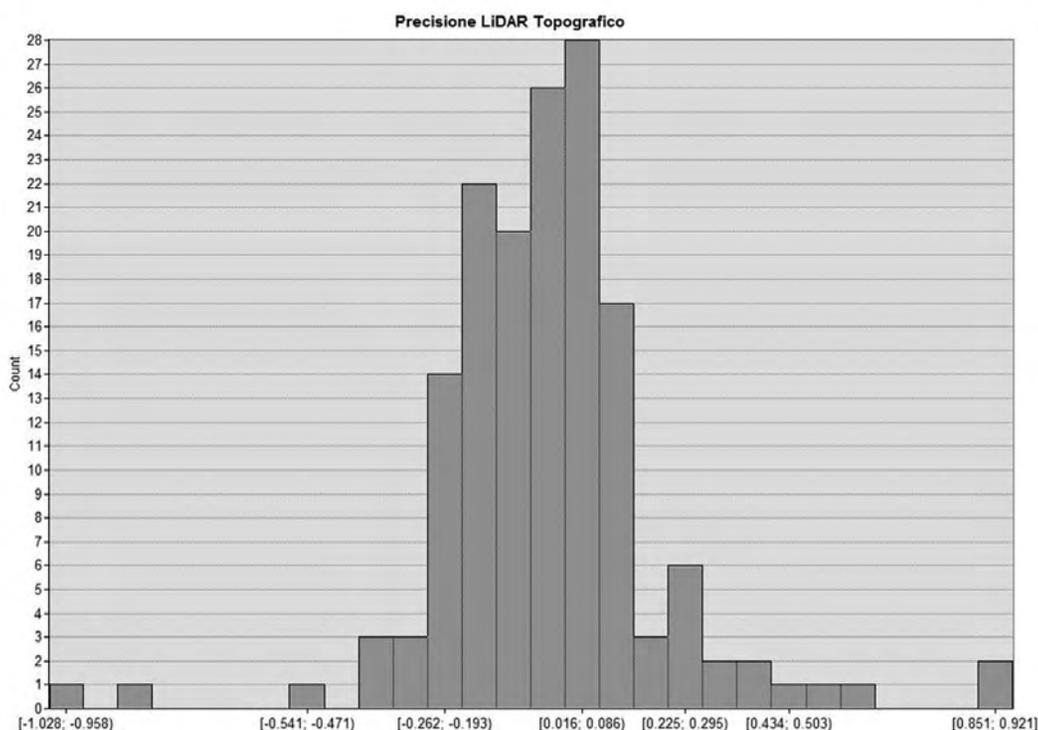


Figura 4 - Istogramma degli scarti.

Tabella 5 - Statistiche relative alla differenza di quota rilevata dal DGPS e dal LiDAR.

Numero Punti:	154
Scarto minimo (m)	-1.028
Scarto massimo (m)	0.921
Scarto medio (m)	-0.019
Deviazione standard degli scarti (m)	0.228

quelle i cui punti fanno registrare uno scarto compreso fra 1,6 cm e 8,6 cm. Un'altra indicazione della buona corrispondenza tra i due set di dati si ha analizzando lo scatter plot di Figura 5: l'equazione della regressione lineare ($Quota LiDAR = 0.9877 \times Quota RTK + 0.0505$) è pressoché coincidente con la bisettrice del I quadrante ($y=x$) che descrive la relazione tra due set di dati identici, ed inoltre il valore $R^2 = 0.9971$ indica che la stessa si adatta molto bene ai dati osservati.

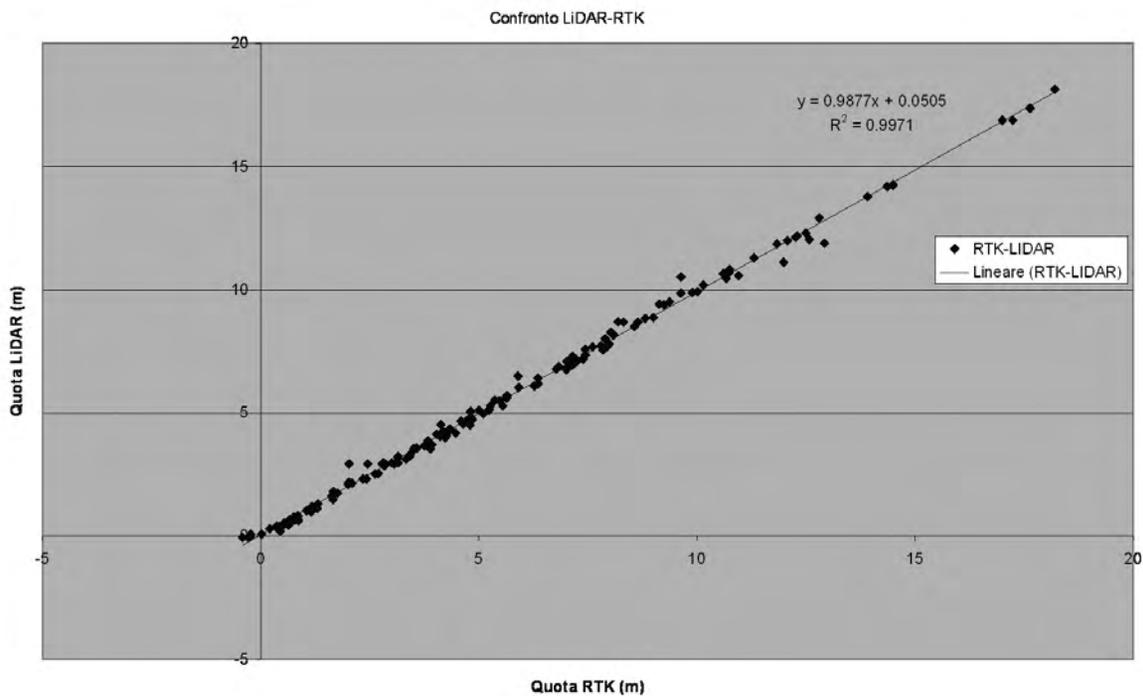


Figura 5 - Quote misurate dai due sistemi (LiDAR e DGPS in RTK).

Risultati

Il rilievo LiDAR ha permesso non solo l'individuazione della posizione del piede della duna, consentendone così la perimetrazione e l'estrazione della superficie occupata, ma anche una caratterizzazione di dettaglio delle forme (ad esempio quelle erosive).

Il monitoraggio topografico ha permesso di evidenziare le variazioni morfologiche stagionali più rilevanti lungo il profilo spiaggia-duna. Inoltre, l'analisi combinata tra i dataset DGPS e LiDAR relativi al mese di maggio è stata particolarmente utile per validare i rilievi eseguiti da remoto, quantificando il grado di affidabilità dei dati LiDAR utilizzati nel presente lavoro, e mettendo in evidenza le variazioni riconducibili ad una dinamica a brevissimo termine (scala giornaliera) della spiaggia emersa.

Le ortofoto hanno infine permesso una valutazione sulla vegetazione. E sulla descrizione di alcune caratteristiche dei diversi settori, quali ad esempio l'andamento della linea di riva.

I risultati relativi al monitoraggio e alla caratterizzazione morfologica verranno esposti per praticità suddividendo il litorale in quattro settori, numerati progressivamente procedendo da NW a SE. Nelle figure 6, 7 e 8 vengono riportati esclusivamente i Profili 2, 3, 6, 10, 15 e 16, selezionati tra tutti poiché ritenuti più rappresentativi.

Settore 1: Capo Portiere - Rio Martino

Il settore che da Capo Portiere si estende sino alla foce di Rio Martino si sviluppa in direzione NO-SE per un totale di 6,5 km e si estende in corrispondenza del Lago di Fogliano.

Dall'analisi del dato LiDAR, in questo settore la duna costiera presenta una superficie di 17,01 ettari, ampiezza media di 35-38 m, altezze variabili da 7 m a 12 m con una quota media di 9,5 m.

Il cordone dunale, che si estende lungo tutto il settore e presenta un asse di allungamento parallelo alla linea di riva, mostra una copertura vegetale discontinua nel versante quello marino, che va progressivamente diminuendo procedendo verso la foce di Rio Martino.

La spiaggia antistante presenta un'ampiezza media di 20 m, variabile da un minimo di 12/14 m e un massimo di 40 m. I valori minimi si riscontrano in prossimità della Foce Nuova di Fogliano.

Osservando le ortofoto, la linea di riva, nel tratto iniziale piuttosto regolare, procedendo verso SE mostra un andamento festonato caratterizzato da ondulazioni aventi ampiezza e lunghezza irregolari.

In questo settore sono stati eseguiti due transetti (P1 e P2, Fig. 1a). In entrambi i casi, si può osservare come tra marzo e gennaio si sia registrata una riduzione dell'area sottesa ai profili (perdita di sedimento dal sistema spiaggia emersa-duna), tradottasi in un arretramento della linea di riva rispetto all'origine del profilo. Le variazioni significative osservate non si riferiscono alla porzione di duna stabile/fissa: la zona più attiva risulta essere, quindi, la spiaggia emersa ed il retro spiaggia, fino al piede della duna. Focalizzando l'attenzione sulla dinamica spiaggia-duna, si osserva come l'arretramento registrato riguardi esclusivamente la spiaggia emersa, che tra marzo e gennaio ha visto una riduzione areale complessiva di $-47,6 \text{ m}^3$ di sedimento per il P1 e di $-13,6 \text{ m}^3$ per il P2 contro un incremento dell'area sottesa alla duna costiera pari a $35,77 \text{ m}^3$ per il P1 e $5,7 \text{ m}^3$ per il P2 (sebbene il piede sia arretrato, in maniera più evidente lungo il P2; Fig. 6a).

Nel caso del P1, osservando i profili relativi ai diversi mesi, si nota come un significativo cambiamento della morfologia della spiaggia emersa si sia registrato tra luglio ed ottobre (arretramento della linea di riva) a seguito del quale, tra ottobre e gennaio, è seguito un adattamento del profilo lungo l'intera fascia attiva.

Relativamente al P2 (Fig. 6a), l'andamento del profilo resta sostanzialmente invariato tra i mesi di marzo e luglio e si notano cambiamenti leggeri solo nella fascia di battigia e afitoica della spiaggia emersa. Tra luglio ed ottobre si assiste ad un ampliamento della spiaggia emersa sia in termini di avanzamento lineare della linea di riva che in termini volumetrici (aumento di quota) mentre nel periodo immediatamente successivo (tra ottobre e gennaio) si assiste ad una tendenza opposta che porta la spiaggia ad un significativo arretramento ed aumento di pendenza con conseguente (ed evidente) scalzamento del piede della duna.

Settore 2: Rio Martino - Idrovora Lavorazione

Il litorale che si estende dalla foce di Rio Martino all'Idrovora Lavorazione si sviluppa in direzione NO-SE per un totale di 3,5 km e si estende parzialmente in corrispondenza del Lago dei Monaci.

Si tratta del settore che presenta le ampiezze minime di tutta la falcata e che ha di conseguenza subito in maniera più evidente gli effetti delle mareggiate che si sono abbattute sul litorale negli ultimi decenni.

La duna, sempre parallela alla linea di riva e costituita da un unico cordone, presenta un'estensione di 7,48 ha, ampiezza media di 22 m, altezze variabili da 7 m a 17 m con una quota media di 8 m.

Fatta eccezione per il primo tratto, in cui il versante interno della duna è piuttosto ampio e uniformemente vegetato, il cordone dunale ha ampiezze modeste e scarsa copertura vegetale.

In più punti sono evidenti discontinuità morfologiche e varchi riconducibili a differenti processi, tra cui fenomeni di dilavamento e crolli lungo il versante marino della massicciata stradale, che costituiscono le forme erosive più evidenti. Non mancano anche tracce di camminamenti e gradini al piede della duna di oltre 1,5 m di altezza.

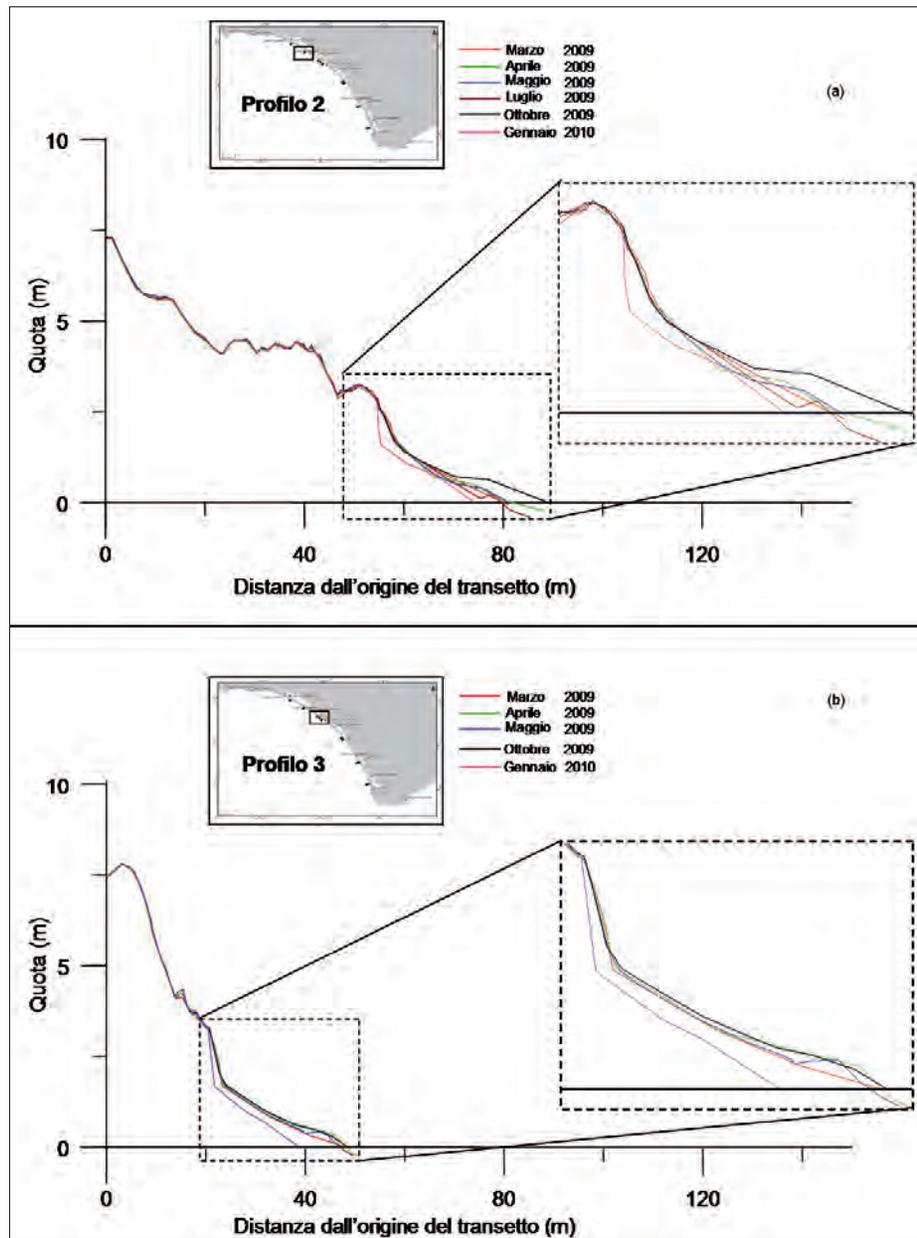


Figura 6 - Variazioni stagionali rilevate lungo il Profilo 2 (settore 1) e lungo il Profilo 3 (settore 2).

A seguito della rimozione dell'asfalto nel tratto della strada costiera interdetto al traffico negli anni novanta, si è assistito ad una progressiva "ricolonizzazione" delle comunità vegetali tipiche dell'ambiente dunale che in parte hanno ristabilito una continuità tra il versante marino ed il versante interno del cordone.

La spiaggia emersa, non interrotta da foci armate, presenta un'ampiezza media di circa 20 m, variabile da un minimo di 12 m e un massimo di 32 m nel periodo di riferimento. I valori minimi si riscontrano nella porzione centro-settentrionale del settore, poco più a SO della foce del Rio Martino. La linea di riva appare caratterizzata nel primo tratto da un andamento cuspidato che, procedendo verso l'Idrovora Lavorazione, appare sempre meno evidente con "ondulazioni" di ampiezza e lunghezza irregolare.

In questo settore sono stati eseguiti tre transetti: il P3a e P3b (da Aprile 2009) e il P3 (da Marzo 2009; Fig. 1a). Anche in questo caso la tendenza evolutiva registrata è all'arretramento, la cui entità aumenta procedendo verso

SW passando da $-4,15$ m ($-1,3$ m³) a $-9,47$ m ($-7,8$ m³). Si assiste ad un lieve arretramento del piede della duna ($-0,28$ / $-1,53$ m) mentre diminuiscono ampiezza e volume della spiaggia emersa.

Lungo il transetto P3a, si osservano processi alternati di erosione ed accrezione di ma di ridotta entità che fanno variare la linea di riva di circa 4 m complessivamente e che si traducono in lievi variazioni della posizione e della quota della berma, nonché della pendenza della battigia.

Nel caso del P3b si è rilevata una ridotta variazione della linea di riva (± 4 m) con perdita di sedimenti dalla spiaggia emersa ($-1,8$ m³) a favore della duna ($19,9$ m³) il cui piede arretra, da luglio ad ottobre, di circa 3 m aumentando la pendenza della spiaggia emersa.

Nel P3 (Fig. 6b) tra marzo ed aprile si assiste ad un avanzamento della linea di riva; tra aprile ed ottobre la situazione appare stazionaria; tra ottobre e gennaio, al contrario, si assiste ad un arretramento (circa -10 m) e aumento di pendenza della spiaggia emersa che si traduce in una perdita di sedimento di circa $-11,2$ m³. L'arretramento durante il periodo invernale comporta una demolizione della duna che si manifesta con la formazione di una scarpata subverticale alta più di 2 m.

Settore 3: Idrovora Lavorazione - Foce del Caterattino

Il litorale che si estende dall'Idrovora Lavorazione alla foce del Caterattino si sviluppa in direzione NNO-SSE per un totale di circa 8 km. Anch'esso è caratterizzato dalla presenza di un litorale sabbioso bordato da un cordone dunale continuo che separa la spiaggia emersa dal lago retrostante, il Lago di Caprolace.

Dall'analisi del dato LiDAR, la duna presenta una superficie di 40,26 ha e altezze variabili da 10 m a 16 m con una quota media di 13 m. Analogamente a quanto osservato in precedenza, anche in questo tratto sono visibili discontinuità morfologiche dovute sia a causa naturali che antropiche. Tra le ultime, oltre alla strada costiera, alle passerelle e ai camminamenti, troviamo evidenze di ruscellamento, erosione eolica e marina (*overwash*). Dal punto di vista della copertura vegetale, il versante dunale marino è caratterizzato da una vegetazione prevalentemente arbustiva.

La spiaggia emersa, più estesa rispetto al precedente settore, presenta un'ampiezza media di circa 40 m, variabile da un minimo di 25 m e un massimo di 60 m. La maggiore ampiezza della spiaggia antistante si traduce nella presenza di piccole avandune incipienti in alcuni tratti del settore, conseguenza di una condizione favorevole al trasporto e alla deposizione di sabbie da parte del vento. I valori minimi si riscontrano nella porzione settentrionale del settore, in prossimità dell'Idrovora Lavorazione e la linea di riva appare caratterizzata da un andamento cuspidato con ondulazioni contraddistinte da ampiezze e lunghezze irregolari.

In questo settore sono stati eseguiti 11 transetti (P4 - P14; Fig. 1a) lungo circa 1 km di costa. La dinamica osservata è analoga a quanto rilevato e descritto per i profili precedenti: ad un periodo di avanzamento/stabilizzazione della spiaggia emersa tra marzo ed ottobre segue un arretramento significativo tra ottobre e gennaio. Osservando gli 11 profili consecutivi si nota come tra il P4 e il P8 l'arretramento autunno-invernale abbia interessato anche il versante marino della duna costiera, comportando evidenti modificazioni morfologiche (ad esclusione del P7, per il quale c'è anche un problema di area sottesa al profilo di gennaio, sovrastimata rispetto ai calcoli relativi ai mesi precedenti); Dal P9 al P14, sebbene in arretramento evidente tra ottobre e gennaio, non si rileva un coinvolgimento della duna retrostante. Nelle Figure 7a e 7b vengono mostrati i Profili 6 e 10, selezionati tra gli 11 transetti eseguiti all'interno del settore 3 poiché ritenuti rappresentativi della dinamica osservata.

Settore 4: Foce del Caterattino - Torre Paola

Il litorale antistante il Lago di Sabaudia, che si estende da foce del Caterattino a Torre Paola, si sviluppa per un totale di 7 km in direzione NNO-SSE. Esso è caratterizzato dalla presenza di una spiaggia sabbiosa bordato da un cordone dunale continuo che separa la spiaggia emersa dal lago retrostante.

Dall'analisi del dato LiDAR, la duna presenta la maggiore complessità morfologica oltre che le maggiori dimensioni, sia per quanto riguarda le quote raggiunte (da 13 a 27 m) che per quanto riguarda l'estensione (64,47 ha). Si tratta tuttavia del settore più compromesso dall'impatto antropico, sia diretto che indiretto. Le dune costiere infatti, sebbene più elevate e sviluppate, sono completamente irrigidite dalle costruzioni o dai recinti dei giardini di case private che spesso coincidono con il piede della duna stessa oppure si spingono addirittura nella prima

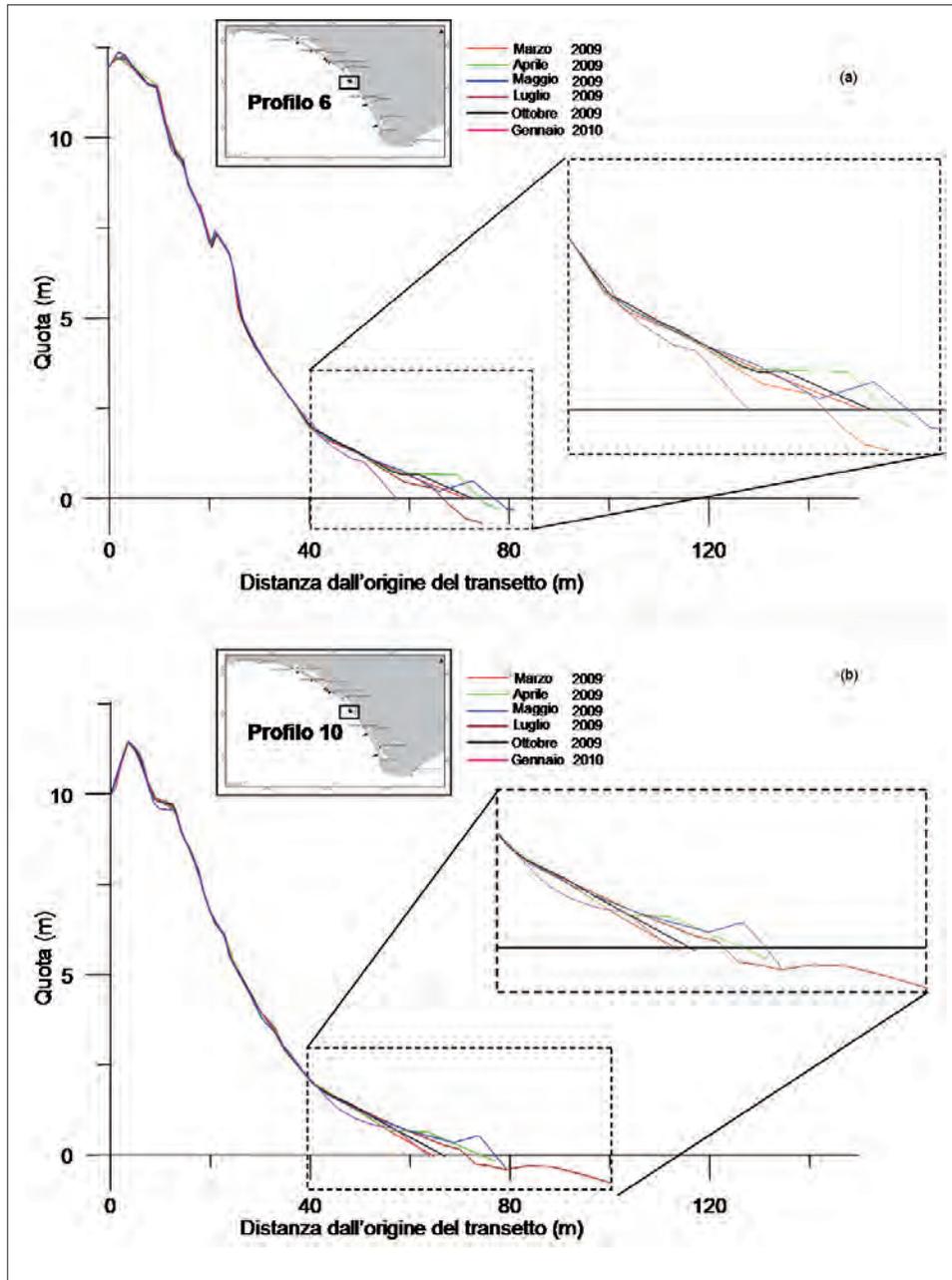


Figura 7 - Variazioni stagionali rilevate lungo il Profilo 6 e 10 (settore 3).

fascia di retro spiaggia. La spiaggia emersa presenta un'ampiezza media di circa 40 m, variabile da un minimo di 15 m e un massimo di 60 m. La linea di riva appare caratterizzata da un andamento cuspidato con ondulazioni contraddistinte da ampiezze e lunghezze irregolari.

In questo settore sono stati eseguiti due transetti (P15 e P16; Fig. 1a). La tendenza generale rilevata è di lieve accrescimento per quanto riguarda il profilo più settentrionale (+3,7 m, +1,78 m³) e all'arretramento per quello più meridionale (-14,1 m, -7,2 m³).

In corrispondenza del P15 (Fig. 8a), si assiste ad un iniziale avanzamento della linea di riva (circa +9 m) e un aumento del volume di sedimento nel sistema (circa +11 m³) tra marzo/aprile e maggio. Tra maggio e ottobre il volume di sedimento nel sistema si mantiene stabile mentre le variazioni morfologiche riscontrate riguardano

sia la spiaggia alta (retro spiaggia/piede della duna) che la spiaggia bassa.

Nel primo caso si tratta di un avanzamento (+ 2,36 m) e diminuzione di quota (-0,498 m) del piede della duna, che si traduce in un lieve aumento del volume di sedimento sotteso alla duna (+ 5,4 m³). Nel secondo caso, si tratta di variazioni nella pendenza della spiaggia, oltre che della posizione della linea di riva (che avanza di 8,284 m tra maggio e luglio) e posizione e quota della berma, che raggiunge la posizione più avanzata e meno elevata a luglio.

Tra ottobre e gennaio il sistema arretra (-8 m /-6 m³ circa) perdendo la maggior parte di sedimenti della spiaggia emersa.

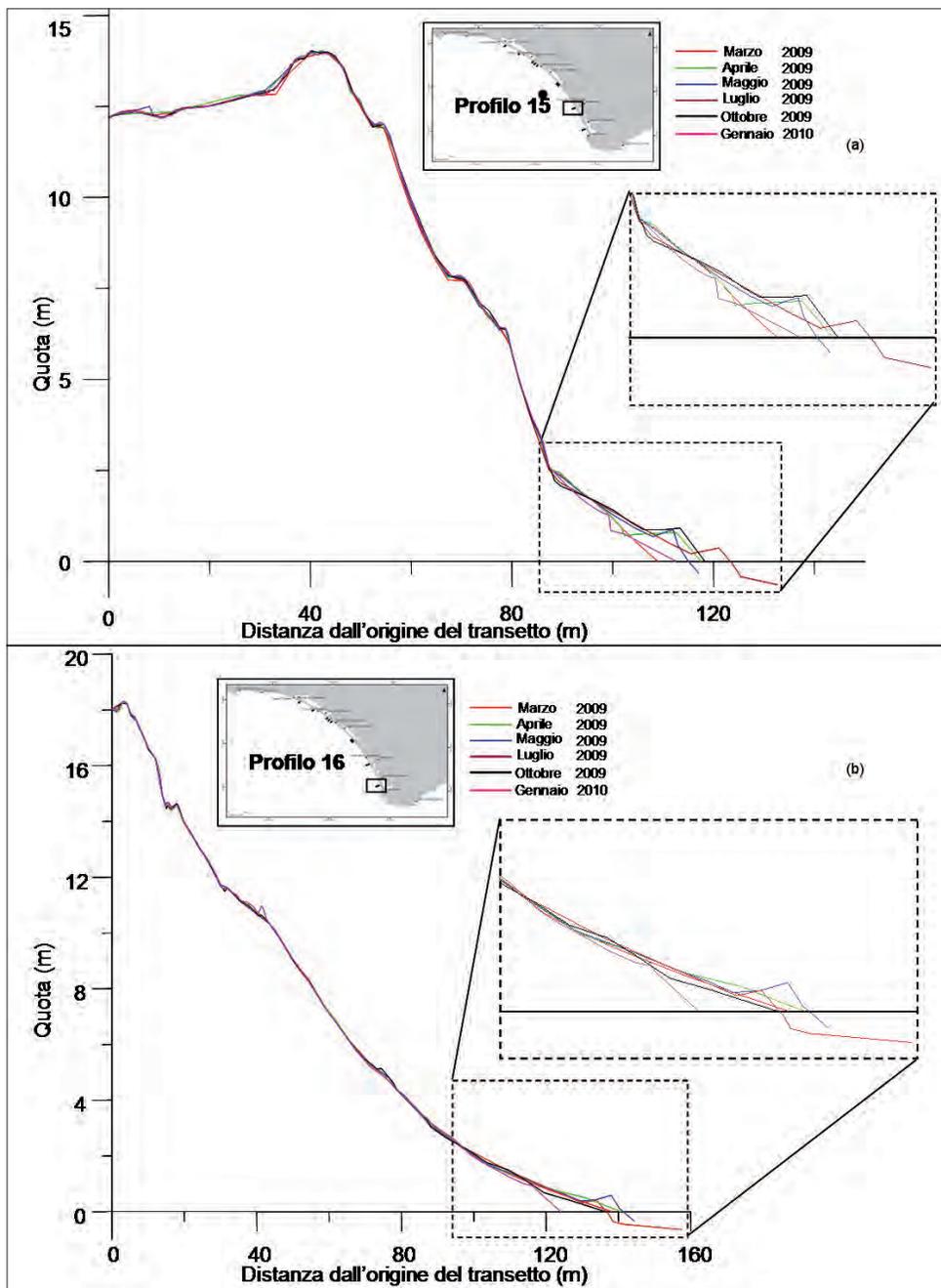


Figura 8 - Variazioni stagionali rilevate lungo il Profilo 15 (settore 4) e lungo il Profilo 16 (settore 4).

Il P16 (Fig. 8b) mostra una stabilità tra marzo ed ottobre (a meno di variazioni nella parte bassa della spiaggia emersa tra aprile e maggio) e un arretramento tra ottobre e gennaio, che coinvolge sostanzialmente solo la spiaggia emersa e si traduce in un aumento della pendenza della battigia. Il bilancio finale, a livello di volumi, è di -7.2 m^3 (pari al -5.2%) persi soprattutto dalla spiaggia emersa tra ottobre e gennaio.

Discussione

Il monitoraggio condotto nel 2009 in corrispondenza dei 18 transetti distribuiti lungo il litorale ha permesso evidenziare le principali variazioni morfologiche del sistema spiaggia-duna intercorse tra marzo 2009 e gennaio 2010. La fascia più attiva lungo il profilo trasversale del sistema spiaggia-duna monitorato è quella compresa tra la battigia ed il piede della duna: le maggiori variazioni rilevate lungo la fascia attiva registrate sono quelle della spiaggia emersa, che possono essere collegate alla dinamica della spiaggia sommersa, caratterizzata dalla presenza di un doppio sistema di barre. Al contrario, la porzione di duna stabilizzata dalla vegetazione, quella compresa dal piede alla cresta, può essere ritenuta "fissa", nel senso che non è soggetta a variazioni morfometriche significative nell'evoluzione stagionale del sistema. Unica eccezione degna di nota è l'arretramento anche della porzione di duna retrostante il piede registrata tra ottobre e gennaio nella maggior parte dei profili monitorati.

La perdita media di sedimenti calcolata sulla base dei rilievi eseguiti con DGPS è di $-8,54\%$ (rispetto alla superficie sottesa ai profili nel mese di marzo 2009), con i valori massimi rilevati nel settore 1 ($-12,06\%$) e i valori minimi rilevati nel settore 4 ($-1,79\%$). Tali risultati dimostrano chiaramente come il tratto più compromesso sia quello settentrionale dell'area di studio, mentre gli effetti erosivi più contenuti si manifestano nel settore meridionale (litorale antistante il Lago di Sabaudia). I tassi di avanzamento/arretramento riscontrati nel settore 2 sono inferiori a quelli rilevati nelle altre porzioni del paraggio di costa monitorato. Il settore di litorale più colpito dal processo erosivo è quello in cui sono stati rilevati i Profili 3a, 3b e 3 (soprattutto quest'ultimo). In questo tratto il sistema spiaggia-duna (Fig. 10b) ha un'ampiezza estremamente ridotta (mediamente inferiore ai 50 m), che lo rende particolarmente esposto ad eventi di mareggiata più intensi (come già verificatosi negli anni '80) e che, nel corso del presente monitoraggio, è stato interessato da un parziale crollo del versante marino di un tratto di duna tra Rio Martino ed Idrovora Lavorazione.

Riguardo il confronto tra i dati DGPS e quelli LiDAR, alcuni esempi significativi di sezioni del profilo spiaggia-duna ricavate utilizzando entrambi i dataset sono riportati nella Figura 9a, 9b, 9c, 9d, 9e e 9f. Nel settore 1, il confronto DGPS/LiDAR ha evidenziato come i transetti 1 e 2 (Fig. 9a) mostrino una sottostima delle quote rilevate con tecnologia LIDAR in prossimità della battigia e dal piede della duna alla cresta, rispettivamente di circa 10 cm e di circa 20-60 cm.

Un buon grado di corrispondenza è stato riscontrato lungo tutto il settore di spiaggia emersa.

Il confronto DGPS/LiDAR eseguita nel settore 2 ha evidenziato come le quote rilevate con il LIDAR in corrispondenza della battigia siano leggermente sovrastimate, mentre lungo la spiaggia emersa coincidono molto bene, ad eccezione del transetto 3a (il più settentrionale) dove il DGPS mostra un profilo più elevato della spiaggia emersa (da +5 m a +20 cm) rispetto a quello ricavato da remoto.

Dal piede alla cresta della duna il DGPS mostra quote in prevalenza inferiori a quelle LIDAR lungo il transetto 3 (il più meridionale) ed in prevalenza più elevate in corrispondenza del transetto 3a e 3b (la porzione centro settentrionale del settore; Fig. 9b).

Per quanto riguarda nel settore 3, il confronto DGPS/LiDAR ha evidenziato come le quote rilevate in prossimità della battigia con il DGPS siano più elevate rispetto a quelle rilevate con il LIDAR in corrispondenza del tratto settentrionale (transetti 4-9; Fig. 9c), mentre in corrispondenza del tratto meridionale il confronto mostra un andamento opposto (transetti 10-14; Fig. 9d). Lungo tutta la spiaggia emersa, ed in alcuni casi anche lungo l'avanduna (transetti 10 e 12 in particolare) è stata osservata una buona corrispondenza tra i valori di altezza rilevati.

In prossimità delle creste ed eccetto i transetti 4 ed 11 anche lungo l'avanduna, il DGPS ha rilevato quote più elevate rispetto al LIDAR. Nel settore 4, il confronto ha evidenziato come le quote rilevate dal DGPS siano nella maggior parte dei casi più elevate rispetto a quelle acquisite dal LiDAR, sia lungo il P15 (Fig. 9e) che lungo il

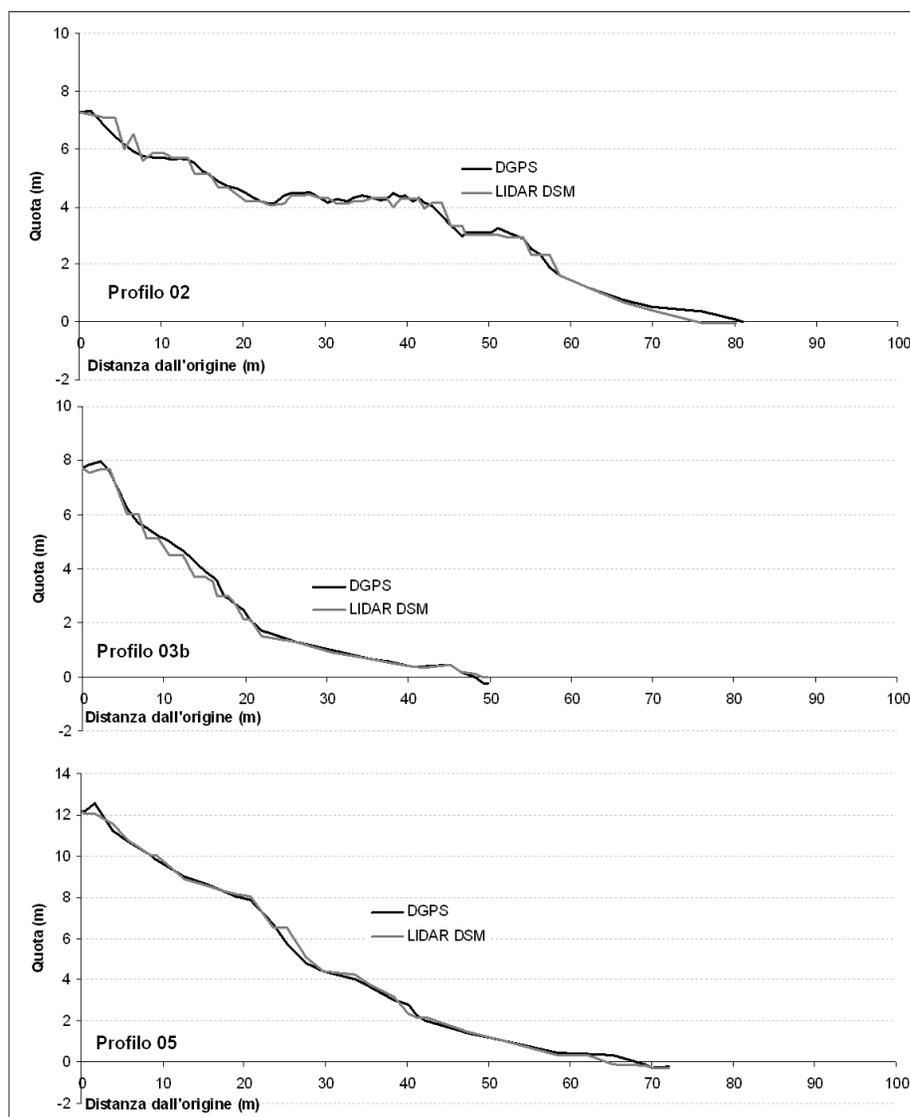


Figura 9a, b, c - Sezioni di alcuni profili spiaggia-duna significativi, elaborati a partire dai dati DGPS e dal DSM LiDAR. (a) Profilo 02, (b) Profilo 3b, (c) Profilo 05.

P16. Nel caso del P15 lo scarto è trascurabile alla battigia e va sempre più aumentando verso la cresta oltre la quale diminuisce nuovamente. Nel caso del P16 (Fig. 9f) è quasi sempre trascurabile fino alla prima fascia dunale. In generale, i maggiori scarti tra i valori di quota sono stati rilevati nelle zone della battigia, dell'avanduna e della cresta dunale. Le discrepanze in corrispondenza della linea di riva potrebbero in parte essere dipese dal breve periodo di tempo (4 giorni) intercorso tra un rilievo e l'altro (e, quindi, indicare delle reali differenze legate alla dinamica a brevissimo termine della spiaggia emersa).

Tuttavia, la differenza nel trend evolutivo non può essere verificata attraverso un'analisi morfodinamica di breve periodo (Pallottini et al., 2009) in quanto la boa di Ponza appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale è in avaria dal 2008 (Corsini, pers. comm.).

Per quanto riguarda l'avanduna (in particolare la fascia compresa tra la cresta e il piede della duna), è stata osservata, ad eccezione di soli due casi, una differenza significativa delle quote tra i due dataset. Tale differenza è da attribuirsi alla complessa morfologia dell'avanduna ed alla copertura vegetale (Fig. 5).

Nel primo caso le differenze plano-altimetriche relative ai punti messi a confronto possono dare luogo a scarti di alcuni decimetri, soprattutto in casi dove le geometrie di sviluppo longitudinale dei blowout o di altri passaggi che interrompono la continuità laterale dei depositi dunali sono particolarmente complesse ed articolate

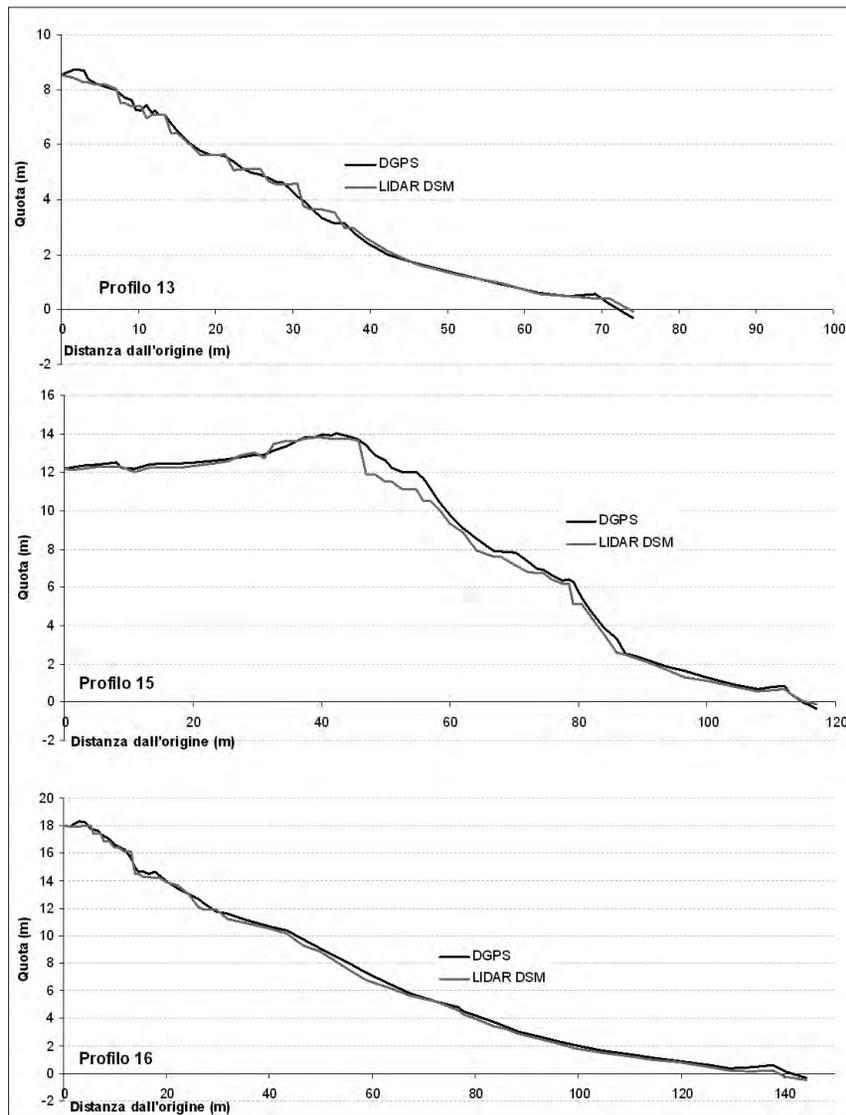


Figura 9d, 9e, 9f - Sezioni di alcuni profili spiaggia-duna significativi, elaborati a partire dai dati DGPS e dal DSM LiDAR. (d) Profilo 13, (e) Profilo 15, (f) Profilo 16.

(Ciavola et al., 2006) rispetto alla risoluzione spaziale del DSM utilizzato (2 m x 2 m). Lo scarto più ampio tra i due dataset in relazione alla tipologia e all'intensità della copertura vegetale sarà oggetto di ulteriori approfondimenti (ISPRA, 2010; Barilotti et al., 2004; Barilotti et al., 2005).

Considerazioni conclusive

Lo studio condotto ha permesso di formulare le seguenti considerazioni conclusive:

Il sistema, osservando le tendenze rilevate nel corso delle stagioni, sembra aver subito una evoluzione in accordo con la "tipica" dinamica stagionale. Infatti, nel periodo primaverile-estivo (da marzo a luglio, con locali eccezioni), si è verificato un avanzamento della spiaggia emersa con concomitante diminuzione di quota e pendenza.

Questa fase è seguita da un periodo di assestamento e poi da un arretramento autunnale-invernale. Questo trend stagionale si traduce nella perdita di sedimento dalla porzione emersa della spiaggia che va ad alimentare le barre sommerse che si sviluppano lungo tutto il litorale le quali, a loro volta, sono poi responsabili della formazione delle ondulazioni più o meno regolari che caratterizzano la linea di riva durante fasi di maggiore dinamicità. Le variazioni riscontrate sono dunque principalmente riconducibili alla dinamica della spiaggia emersa mentre il piede della duna viene attivamente coinvolto nella dinamica nel periodo che va da ottobre a gennaio.

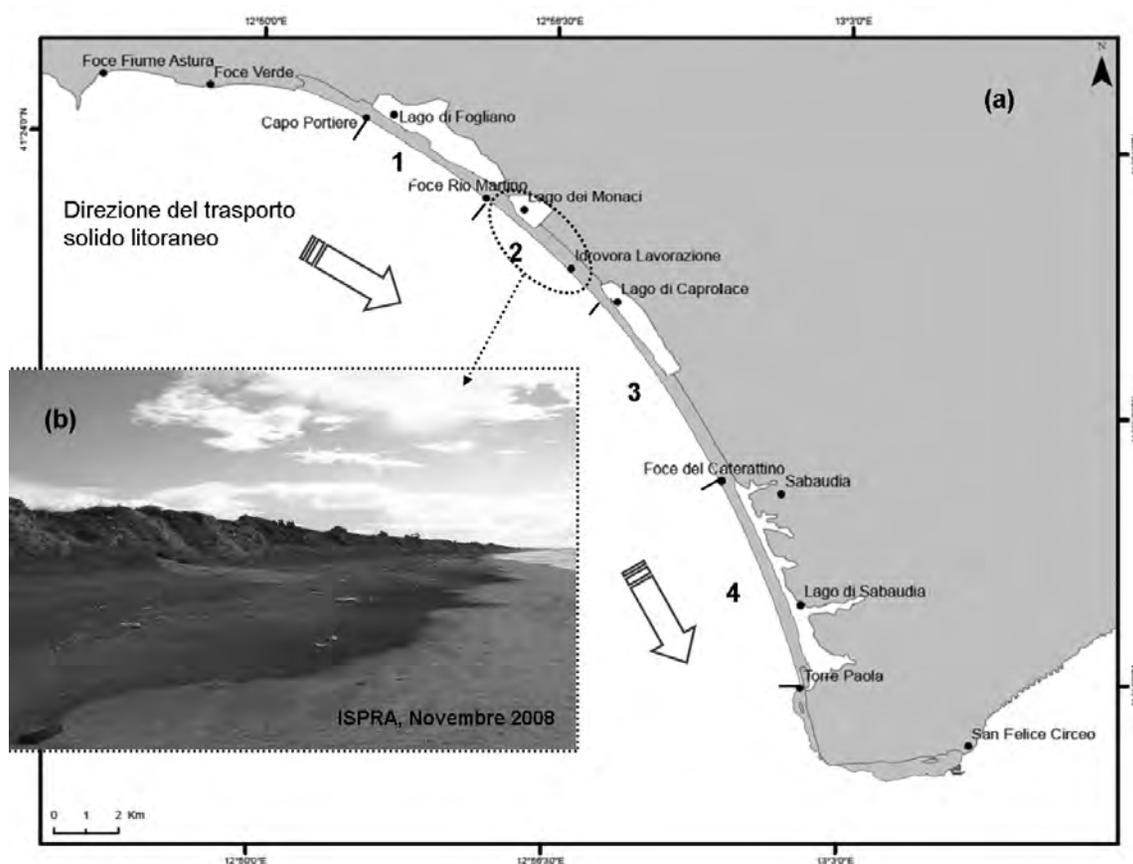


Figura 10 - (a) Dinamica dell'area di studio. (b) foto relativa al settore 2, il tratto di litorale in cui il sistema spiaggia-duna ha un'ampiezza estremamente ridotta che lo rende particolarmente esposto ad eventi di mareggiata più intensi.

Osservazioni dirette compiute dagli autori durante il periodo di monitoraggio, suggeriscono che le cuspidi si formano con maggiore efficacia e regolarità a seguito di eventi meteo marini che provengono dal secondo e terzo quadrante, ma tale studio è lontano dagli obiettivi del presente lavoro e sarà oggetto di approfondimenti specifici. Questo modello evolutivo proposto per l'area di studio, seppur semplificato per non tenere conto di variazioni o anomalie rilevate a piccola scala, prima del presente lavoro non è mai stato documentato quantitativamente con questo grado di dettaglio (attraverso l'uso combinato di tecnologia LiDAR e RTK). L'alternarsi di periodi di accrescimento ed arretramento del sistema è fortemente controllato dalla frequenza e provenienza delle mareggiate più intense e non appena saranno ripristinate e rimesse in funzione le boe ondometriche della Rete Ondametrica Nazionale (RON), saranno riavviati gli studi finalizzati alla calibrazione ed implementazione dei modelli numerici utilizzati per simulare l'evoluzione morfologica a breve termine del sistema spiaggia-duna (Pallottini et al., 2009).

Le perdite di sedimento, espresse in % rispetto al volume presente in corrispondenza di ciascun transetto all'inizio del monitoraggio, registrano l'entità maggiore nel settore più settentrionale e quella minore nel settore più meridionale. Il settore 2 è quello che presenta le maggiori criticità morfologiche (minore ampiezza rispetto a quella di tutto il paraggio e dissesti morfologici più gravi) e che quindi può essere considerato il tratto con minore resilienza del sistema. Questa situazione trova una spiegazione nel limitato spazio che il sistema ha a disposizione per rispondere dinamicamente alle forzanti ambientali, a differenza di altri tratti della falcata, in cui il sistema spiaggia-duna è più ampio, e che hanno registrato oscillazioni (in termini di ampiezza di spiaggia e duna) di maggiore entità.

Infine, il dato LiDAR ha permesso di ottenere una migliore delimitazione del sistema di dune presenti nell'area

di studio ma soprattutto una migliore caratterizzazione delle discontinuità morfologiche. L'analisi combinata dei 2 dataset ha evidenziato come in quasi tutti i casi il profilo duna-spiaggia emersa possa essere suddiviso in 3 porzioni a seconda del grado di corrispondenza tra i dati rilevati con i differenti strumenti: una buona corrispondenza è stata riscontrata sulla spiaggia emersa al contrario della zona di battigia e del corpo dunale, dove il grado di precisione altimetrica di questa tecnica potrebbe offrire ancora margini di miglioramento. La discrepanza rilevata può essere attribuibile nel primo caso a differenze reali o differenze legate alle proprietà fisiche dei sedimenti, nel secondo caso alla maggiore acclività e irregolarità morfologica data anche dalla presenza della vegetazione.

Ringraziamenti

Il rilievo LiDAR è stato effettuato per conto della Regione Lazio, nell'ambito della Convenzione di ricerca tra ISPRA e Regione Lazio "Rilievo di dettaglio della batimetria costiera laziale con tecnologie LiDAR e valutazione delle caratteristiche fisiche e biologiche in aree marine della costa laziale di specifico interesse ambientale".

Bibliografia

- Anthony E. J., Vanhee S. e Ruz M. (2006) - *Short-term beach-dune sand budgets on the north sea coast of France: Sand supply from shoreface to dunes, and the role of wind and fetch*. Geomorphology, 81: 316-329.
- Bauer B.O., Davidson-Arnott R.G.D. (2002) - *A general framework for modelling sediment supply to coastal dunes including wind angle, beach geometry, and fetch effects*. Geomorphology, 49: 89-108.
- Barilotti A., Beinat A., Prearo G. e Sepic F. (2004) - *Confronto tra tecniche classiche e metodi diretti multirisoluzione per la produzione di modelli digitali del terreno da scansioni LiDAR*. Atti 8a Conferenza nazionale ASITA. Roma 14-17 dicembre 2004, 6 pp.
- Barilotti A., Turco S., Napolitano R. e Bressan E. (2005) - *La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali*. XV Congresso della Società Italiana di Ecologia, Torino. 6 pp.
- Beachmed (2004) - *Il Progetto Beachmed: Recupero ambientale e mantenimento dei litorali in erosione con l'utilizzo di depositi sabbiosi marini*. 2° Quaderno Tecnico (Fase "B"). 202 pp.
- Beachmed-e (2007) - *La gestion stratégique de la défense des littoraux pour un développement soutenable des zones côtières de la Méditerranée*. 1er Cahier Technique Phase A. Pp. 131 - 139.
- <http://www.beachmed.it/Beachmede/SousProjets/POSIDUNE/tabid/99/Default.aspx>
- Blanc. A. C. e Segre A. (1953) - *Le quaternarie del Monte Circeo*. Livret guide, IV Congrès INQUA. Roma. pp. 23-108.
- Bovina G., Callori Di Vignale C. e Amodio M. (2003) - *L'approccio dell'ingegneria naturalistica nella conservazione degli ambienti dunali*. In: Regione Lazio Ed. - Manuale di Ingegneria Naturalistica, 2: 367-381.
- Campo V. e la Monica G.B. (2006) - *Le dune costiere oloceniche prossimali lungo il litorale del Lazio*. Studi Costieri, 11: 31-42.
- Ciavola P., Perini L., Luciani P. e Armaroli C. (2006) - *Il rilievo Lidar della costa dell'Emilia-Romagna: uno strumento per la valutazione dell'impatto delle mareggiate sulle zone costiere e per la caratterizzazione della morfodinamica delle spiagge*. Rilevamento del territorio, 9 pp.
- Clark J.R. (1996) - *Coastal Zone Management Handbook*. CRC Press Inc., Lewis Publisher, 694 pp.
- Coren F., Plos D., Sterzai P. e Vidmar R. (2002) - *Valutazione del sistema LIDAR per generazione di modelli digitali del terreno e monitoraggio ambientale in diversi scenari operativi*. Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA. Perugia. pp. 891- 896.
- Davidson-Arnott R.G.D. (2005) - *Beach and nearshore instrumentation*. Encyclopedia of Coastal Science, Schwartz, M. (Eds) Springer, Dordrecht: 130-138.
- Davidson-Arnott R.G.D., MacQuarrie K. e Aagaard T. (2005) - *The effect of wind gusts, moisture content and fetch length on sand transport on a beach*. Geomorphology, 68: 115-129.
- Giovagnotti C., Rondelli F. e Pascoletti M.T. (1980) - *Caratteristiche geomorfologiche e sedimentologiche delle formazioni quaternarie del litorale laziale tra Tre Astura e il M. Circeo*. Estratto degli Annuali della Facoltà di Agraria dell'Università di Perugia Volume XXXIV - Nota I - Geologia, morfologia e dinamica del litorale, 173-235.

- Gorman L., Morang A. e Larson R.. (1998) - *Monitoring the coastal environment; Part IV: Mapping, shoreline changes and bathymetric analysis*. Journal of Coastal Research, 14(1): 61-92.
- Irish J.L. e White T.E. (1998) - *Coastal engineering applications of high-resolution LiDAR bathymetry*. Coastal Engineering, 35: 47-71.
- ISPRA (2009) - *Rilievo di dettaglio della batimetria costiera laziale con tecnologie lidar e valutazione delle caratteristiche fisiche e biologiche in aree marine della costa laziale di specifico interesse ambientale - Fase 1b: Acquisizione e groundthruting*. Convenzione di Ricerca ISPRA - Regione Lazio, 119 pp.
- ISPRA (2010) - *Rilievo di dettaglio della batimetria costiera laziale con tecnologie lidar e valutazione delle caratteristiche fisiche e biologiche in aree marine della costa laziale di specifico interesse ambientale - Fase 2 - Caratterizzazione morfologica*. Convenzione di Ricerca ISPRA - Regione Lazio, 34 pp.
- Koppari K., Karlsson U. e Steinvall O. (1994) - *Airborne laser depth sounding in Sweden*. Proc. U.S. Hydro. Conf. The Hydrographic Society Spec. Pub. n. 32, 124-133.
- Laetherman S.P. (2003) - *Shoreline change mapping and management along the US East Coast*. Journal of Coastal Research, SI, 38: 5-13.
- Mitasova H., Overton M. e Harmon R.. S. (2005) - *Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina*. Geomorphology, 72: 204-221.
- Pallottini E. e Cappucci S. (2009) - *Beach - dune system interaction and evolution*. Rendiconti online Soc. Geol. It., 2: 87-97
- Pallottini E., Campo V., Cappucci S., Rossi L., La Monica G. B., Simeoni U., Gabellini M. (2008) - *Multitemporal analysis of the beach-dune system of Circeo National Park (Italy)*. EGU 2008, Vienna, 13-18 Aprile.
- Pallottini E., Cappucci S., Screpanti A., Conti M., Tondello M., Simeoni U., Gabellini M. (2009) - *Seasonal sediment exchange and beach-dune system interaction: a case study in the Circeo National Park, Lazio Region (Italy)*. 27° meeting IAS, Alghero, 20-23 Settembre.
- Parker B.B. (2003) - *The difficulties in measuring a consistently defined shoreline - the problem of vertical referencing*. Journal of Coastal Research, SI, 38: 44-56.
- Parlagreco L., Devoti S., Mastracci M. e Silenzi S. (2008) - *Zonazione costiera finalizzata all'analisi del rischio: il caso del litorale Pontino (Lazio meridionale)*. Atti Congr. "Coste: prevenire, programmare, pianificare", Maratea, 15-17 Maggio. 105-112.
- Picchio, S. (2006) - *Analisi delle variazioni altimetriche in un'area studio del delta del Po*. ASITA, 200630.
- Pranzini E. (2004) - *La forma delle coste. Geomorfologia costiera impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli Ed.: 245 pp.
- Psuty N. P. (1988) - *Sediment budget and dune/beach interaction*. Journal of Coastal Research, SI, 3: 1-4.
- Ruggiero P., Kaminsky G.M. e Gelfenbaum G. (2003) - *Linking proxy-based and datum-based shorelines on high energy coastline: implication for shoreline change analysis*. Journal of Coastal Research, SI, 38: 57-82.
- Saye S.E., Van Der Wal D. e Pye K. e Blott S.J. (2005) - *Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LiDAR data*. Geomorphology, 72: 128-155.
- Schnurr D. (2010) - *How low can you go? Maximum depth achieved with Hawk Eye II during project in 2009*. International LiDAR mapping forum, ILMF 2010, Denver, Colorado, USA. 3-5 March.
- Steinval O., Koppari K. e Karlsson U. (1994) - *Airborne laser depth sounding: system aspects and performance*. Proc. SPIE Ocean Optics XII, 2258: 392-412.
- Vanhée S. (2002) - *Processus de transport éolien à l'interface plage macrotidale-dune bordière : Le cas des plages à barres intertidales, Côte d'Opale, Nord de la France*. Thèse de Doctorat de Géographie Physique, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque. 232 pp.

Ricevuto il 31/08/2010, accettato il 01/12/2010.