

## Evoluzione recente del sistema dunale di Lido di Dante-Foce Bevano (Ravenna): fattori naturali ed impatto antropico

Paolo Ciavola e Clara Armaroli

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara - Via Saragat n. 1 - 44122 Ferrara,  
Tel.: +39 0532 974622, Fax +39 0532 974767, E-mail: cyp@unife.it, clara.armaroli@unife.it

### Riassunto

Il presente articolo descrive sei anni di monitoraggio della fascia dunale tra Lido di Dante e la Foce del torrente Bevano, una delle poche aree naturali della costa dell'Emilia-Romagna. Il monitoraggio ha identificato uno stato di degrado, ormai diventato irreversibile, di circa metà della fascia dunale, che tenderebbe a migrare verso l'entroterra, attualmente occupata da una pineta costiera. I rilievi effettuati hanno identificato che, in seguito alla progressiva riduzione dell'ampiezza della spiaggia a Sud delle opere di protezione di Lido di Dante, durante le mareggiate si osserva il contatto tra l'azione del moto ondoso ed il fronte della duna. Il processo genera una progressiva perdita di quota e la morte dell'ammofiletto, esponendo quindi la duna stabilizzata all'azione diretta delle onde e dello spray marino, in seguito all'obliterazione della duna mobile ad essa antistante. Sono stati identificati due meccanismi di erosione della duna, in funzione della quota della cresta al di sopra del l.m.m. e del volume in sezione: erosione del fronte della duna dovuta al crollo del lato esposto verso mare o scavalco della cresta e progressiva formazione di morfologie "a collinetta", che vengono erose lateralmente fino alla loro obliterazione durante eventi di washover. Si pensa che l'indiscriminato accesso dei bagnanti alla spiaggia attraverso i varchi presenti in punti dove il cordone è più basso sia un ulteriore fattore destabilizzante. Nonostante siano stati tentati due ripascimenti della spiaggia (2005 e 2007), il volume di sabbia utilizzato non è probabilmente stato sufficiente per dare respiro al sistema spiaggia-duna nelle zone più critiche, dove ad oggi le dune sono ormai scomparse.

**Parole chiave:** erosione dune, meccanismi erosivi, accesso utilizzatori.

### Abstract

*The current paper results from six years (2001-2007) of continuous topographic monitoring of the dunes between Lido and Foce Bevano, one of the few areas with natural dunes along the Emilia-Romagna coastline. An irreversible erosive trend was found, with a tendency of dunes to migrate inland. This migration cannot occur due to the direct contact between the dunes and a coastal pine forest. Degradation of the foredunes happens in two forms: either erosion of the dune front as progressive slumping or as crest overtopping with the formation of mounds which are laterally eroded until washover occurs. It is believed that indiscriminate access of bathers through places where the dune crest is lower acts as a further destabilizing factor. Despite of two beach replenishments, tempted in 2005 and 2007, in the most critical areas the dune ridge is currently no longer visible.*

**Keywords:** dune erosion, erosion mechanisms, access of users.

## Introduzione

I cordoni dunali costieri rappresentano una morfologia che funge da protezione contro l'azione delle onde e delle acque alte durante le tempeste e numerosi modelli numerici sono stati sviluppati per prevedere la risposta del profilo di spiaggia e lo scambio sedimentario tra la spiaggia e il fronte dunale (ad es. Vellinga, 1982; Larson e Kraus, 1989; Kriebel e Dean, 1993). Il maggior limite dei modelli attuali è la corretta riproduzione del ruolo della vegetazione nel dissipare l'energia dell'acqua del mare durante fenomeni di *washover* (scavalco). Fin dagli inizi degli anni '90 tali ambienti costieri sono diventati l'oggetto di attente politiche di gestione, così come descritto per il Regno Unito da Doody (1992). La ricostruzione delle dune ha cominciato a diventare diffusa in anni recenti, con l'introduzione di strutture di ingegneria naturalistica (fascinate e barriere frangivento) per favorire la deposizione dei sedimenti. In realtà tale tipo di interventi rimane ancora a carattere sperimentale, dato che non esistono dettagliate linee guida dal punto di vista progettuale (Matias et al., 2004). La forma, l'altezza e l'estensione delle dune costiere dipendono dalla direzione dei venti dominanti, dal rifornimento di sabbia e dalla vegetazione. Vari autori hanno tentato di presentare un modello evolutivo della morfologia in funzione della copertura della vegetazione. Attualmente la letteratura internazionale adotta per la morfodinamica spiaggia-duna il modello di Short ed Hesp (1982), che distingue una serie di morfologie che, nel caso di degrado della fascia dunale culminano nelle forme a collinetta, dove la vegetazione danneggiata dal *salt-spray* ricopre dei cocuzzoli sabbiosi. Rimane di grande interesse per la ricerca capire il ruolo dei fenomeni di sfondamento del cordone dunale (*blow-outs*) nell'instaurarsi della fase erosiva (Byrne, 1997; Jungerus e Van der Meulen, 1997; Fraser et al., 1998).

L'argomento della costruzione di una banca dati a scala nazionale sulle caratteristiche delle dune in Italia è stato affrontato da progetti di ricerca ministeriali come quello descritto da Valpreda (2006). Chiaramente lavoro di dettaglio sull'argomento può essere solo affrontato a scala regionale. Da un recente studio cartografico svolto a scala regionale da Calabrese e Lorito (2010), le dune in Emilia-Romagna si trovano ormai per solo il 48% della costa regionale, essenzialmente nelle provincie di Ferrara e di Rimini. Le quote della cresta si ergono in genere tra i 2 ed i 3 m sopra il livello medio mare e la massima continuità laterale del cordone dunale si raggiunge tra la foce del Fiume Bevano e la foce del Fiume Savio, per circa 3 km.

Secondo uno studio pubblicato da Ciavola et al. (2007b), quasi il 50% delle dune di questo cordone sono a rischio di erosione frontale durante eventi di mareggiata con periodo di ritorno di un anno. Il lavoro qui presentato analizza una banca dati pluriennale di rilievi topografici lungo varie reti di profili monitorati dal 2001 al 2007, integrati con modelli tridimensionali della fascia dunale ottenuti tramite rilievi DGPS e laser aereotrasportato (LIDAR).

Lo scopo della ricerca è stato di valutare l'evoluzione del cordone dunale in seguito ad una mareggiata estrema osservata in Settembre 2004, l'efficacia dei ripascimenti di spiaggia effettuati nel 2005 e nel 2007 ed, infine, identificare i principali meccanismi di erosione e di degrado morfologico del sistema spiaggia-duna.

## Descrizione del sito di studio ed interventi di protezione costiera

Lido di Dante è una piccola località turistica della costa emiliano - romagnola che si affaccia sul Nord Adriatico a Sud-Est della città di Ravenna; è situata nella zona più settentrionale del tratto di costa compreso fra la foce dei Fiumi Uniti, che derivano dall'unione dei fiumi Ronco e Montone, e la foce del torrente Bevano (Fig. 1). L'orientamento della linea di riva è prossimo alla direzione Nord-Sud con un leggero scostamento verso N-NO. L'area è caratterizzata da una zona di spiaggia protetta da strutture antropiche (pennelli e barriera soffolta) nella parte Nord di fronte all'abitato. I rimanenti 2 km di costa a sud delle strutture sono completamente naturali, caratterizzati dalla presenza di dune orlate da una pineta.

Come dimostrato da un'analisi dello spostamento della linea di riva basata sulla fotointerpretazione in ambiente GIS (Ciavola et al., 2003), la zona soffre di un processo di arretramento della spiaggia iniziato alla fine degli anni '70 e che perdura tuttora, nonostante siano state costruite, a partire dagli anni '80, le opere di protezione costiera. La zona antistante le strutture turistiche è stata difesa realizzando, a più riprese, strutture in roccia

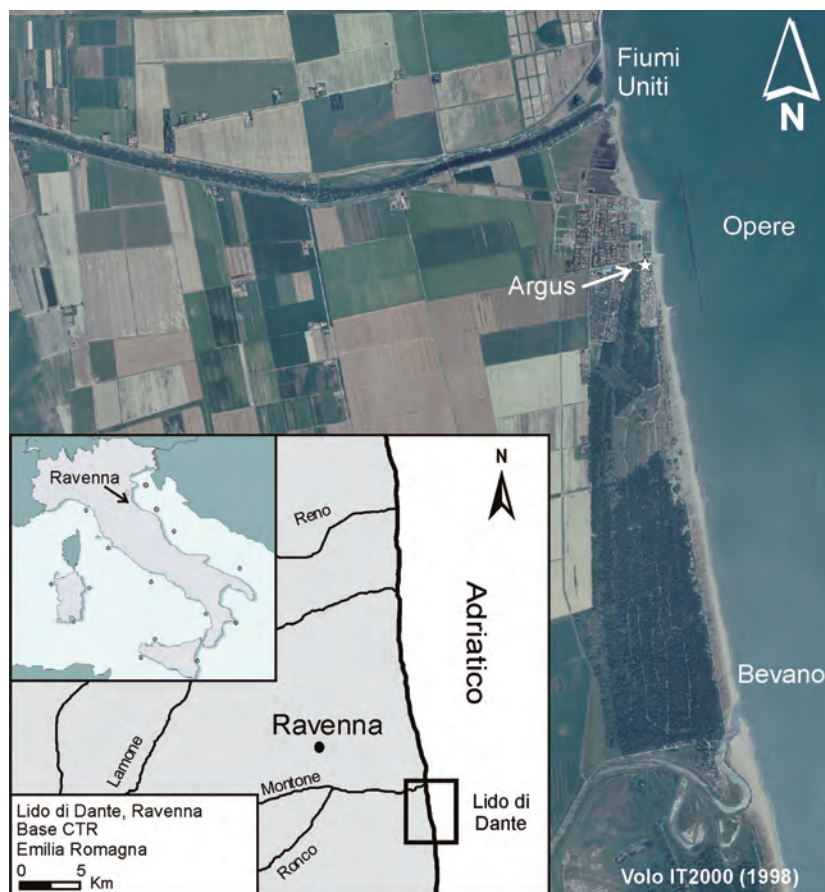


Figura 1 - Localizzazione del sito di studio.

come i pennelli, posizionando sacchi riempiti di sabbia sulla battigia ed effettuando dei ripascimenti con sabbia di granulometria simile a quella del luogo (Casadei et al., 1998). Una svolta nella politica gestionale della costa si è avuta alla fine degli anni '80, con la realizzazione di un significativo ripascimento a Lido di Dante (65000 m<sup>3</sup> nel 1986) con sabbie provenienti da cave a terra. Per ciò che riguarda l'area in prossimità delle opere di protezione di Lido di Dante, l'intervento di ripascimento più recente ha utilizzato sabbie provenienti da cava (33000 m<sup>3</sup>), per compensare la grave erosione avutasi nel tratto dunale a Sud del pennello più meridionale in seguito alle mareggiate di Settembre 2004 (Ciavola et al., 2007a). L'intervento si è però rivelato un palliativo, tanto che già, poche settimane dopo la chiusura dei lavori, i benefici sulla spiaggia emersa non erano visibili (Ciavola et al., 2007a). Le autorità hanno effettuato un ripascimento a larga scala in Maggio 2007, utilizzando sedimenti provenienti da cave di prestito sottomarine. Il ripascimento ha interessato sia la spiaggia all'interno delle opere di protezione sia quella subito a Sud (Fig. 2).

La ripresa della telecamera è rivolta verso Sud.



Figura 2 - Confronto tra immagini ARGUS dell'area di studio pochi giorni dopo la mareggiata eccezionale di Settembre 2004 e dopo il ripascimento di Aprile-Maggio 2007 (livelli di marea comparabili, circa +0.1 m sul l.m.m.). Si noti l'allargamento della spiaggia emersa a Sud del pennello. La ripresa della telecamera è rivolta verso Sud.

Il Servizio Tecnico di Bacino della Regione indica un volume di sedimento apportato pari a  $107000 \text{ m}^3$ , per un tratto di 1 Km compreso tra la parte Sud della cella Nord dell'area protetta fino a circa 900 m dalla torre sulla quale è installato in sistema video denominato ARGUS (per dettagli sul sistema vedi Armaroli et al., 2005a, 2005b), ma non sono disponibili informazioni sui volumi parziali versati fuori e dentro le opere di protezione. Il tratto di costa oggetto del presente studio, che si estende per circa 2 Km, ha una spiaggia emersa con larghezza variabile. La zona a Nord, vicina al pennello, è la più ristretta ed è quella, assieme alla zona centro-settentrionale, in cui il piede della duna è sottoposto all'azione del mare durante eventi anche mediamente energetici, tanto che, in varie occasioni, le autorità comunali e regionali hanno eseguito operazioni di ripascimento, come già evidenziato in precedenza.

La caratteristica principale di questo tratto di costa ravennate è la presenza di un cordone dunale ben vegetato, intervallato da tratti in cui le dune sono degradate, soprattutto nella zona centro-settentrionale, in seguito a fenomeni di sfondamento in condizioni di mareggiata (Fig. 3). L'altezza delle dune è variabile ed aumenta verso Sud raggiungendo il massimo di altezza (poco più di 4 m sul livello del mare; Armaroli et al., 2005a) in prossimità della vecchia foce del fiume Bevano.

La vecchia foce del Bevano, attiva sino alla primavera del 2006, aveva una tendenza naturale a migrare verso Nord (Ciavola et al., 2003; Balouin et al., 2006a; Gardelli et al., 2007), con conseguente restringimento della sezione di foce, erosione delle dune a Nord ed ingressione di acque marine nella pineta retrostante. Queste problematiche hanno spinto la Regione Emilia-Romagna ad effettuare un intervento di chiusura della vecchia bocca, a primavera 2006, con apertura di una nuova foce circa 500 m più a Sud. La vecchia foce è stata chiusa utilizzando la sabbia dragata per aprire la nuova bocca e rimossa dalla zona dello "scolmatore", un canale in corrispondenza

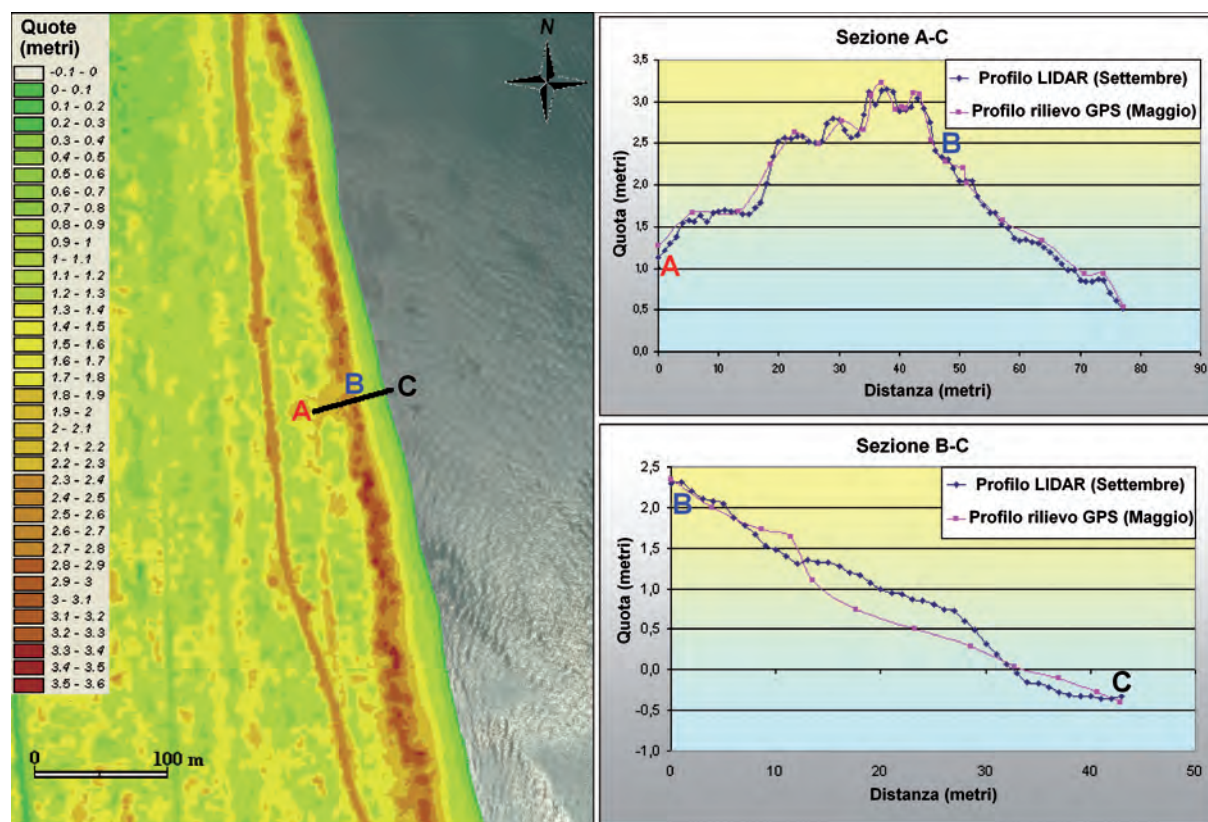


Figura 3 - Modello digitale del terreno del tratto di costa a Foce Bevano, prodotto con dati Lidar 2004 e sezioni topografiche: la Sezione A-C (in alto) mostra il confronto tra il dato Lidar ed il dato ottenuto con rilievo DGPS-RTK svolto contemporaneamente al volo; la Sezione B-C (in basso) rappresenta l'evoluzione della spiaggia intertidale in seguito alle mareggiate di Settembre 2004 (modificato da Ciavola et al., 2006).

dell'ultimo meandro del fiume con la quota di fondo corrispondente al medio mare e con funzione di facilitare lo smaltimento delle acque in caso di piena. In corrispondenza della nuova foce è stata costruita una palificata in legno posta sul lato Nord, che funge da protezione dell'intervento di ricostruzione della duna nella zona della vecchia foce realizzato tramite l'installazione di viminate morte e piantumazione di vegetazione.

### Materiali e metodi

#### *Monitoraggio morfologico del profilo spiaggia-duna tra Lido di Dante e Foce Bevano*

Il gruppo di ricerca COPRU (Coastal Processes Research Unit) dell'Università di Ferrara ha iniziato nel 2001 un dettagliato programma di monitoraggio delle variazioni morfologiche della spiaggia e del tratto dunale a Sud delle opere di protezione di Lido di Dante.

L'evoluzione morfologica delle dune e della spiaggia antistante è stata studiata analizzando i rilievi topografici svolti dagli autori nel periodo 2001-2007, inizialmente attraverso profili morfologici misurati con la stazione totale (dati sino al 2003) e successivamente tramite rilievi svolti utilizzando tecnologia DGPS in modalità RTK. Considerando che i due metodi di rilievo hanno precisioni differenti, le due banche dati vengono qui discusse in forma separata. I dati misurati sul campo sono stati integrati da rilievi LIDAR del 2003 (ENI) e del 2004 (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Reg. Em. Rom). La banca dati è presentata in Tabella 1.

Tabella 1 - Banca dati rilievi topografici. Legenda: STN=stazione totale; GPS=rilievo con DGPS-RTK; LIDAR=rilievo laser aereotrasportato.

| Anno/mese | 1 | 2          | 3   | 4   | 5   | 6   | 7     | 8 | 9            | 10  | 11  | 12  |
|-----------|---|------------|-----|-----|-----|-----|-------|---|--------------|-----|-----|-----|
| 2001      |   |            |     |     |     |     |       |   |              |     |     | STN |
| 2002      |   | STN        |     |     |     |     |       |   |              | STN | STN |     |
| 2003      |   |            | STN | STN |     |     | LIDAR |   |              | GPS |     |     |
| 2004      |   | STN<br>GPS |     | GPS | GPS |     |       |   | GPS<br>LIDAR |     |     |     |
| 2005      |   | GPS        |     |     | GPS | GPS |       |   | GPS          |     |     |     |
| 2006      |   |            |     |     |     |     |       |   |              |     |     |     |
| 2007      |   |            |     |     | GPS |     |       |   |              |     |     |     |

Le reti di profili rilevati nel corso degli anni sono indicate in Figura 4. Le misure a lungo termine sono state effettuate lungo sezioni spaziate 100 m. I rilievi sono stati svolti con cadenza non regolare nel corso di ogni anno, per poter osservare, oltre all'evoluzione stagionale della spiaggia, anche la sua risposta ad eventi di mareggiata. Il primo rilievo con stazione totale è stato fatto il 10 Dicembre 2001, seguito dal rilievo del 8 Febbraio 2002. La situazione "estiva" prima dell'inverno successivo può essere considerata il rilievo del 24 Ottobre 2002; successivamente è stato fatto un rilievo il 28 Novembre 2002, dopo un periodo di mareggiate. Il monitoraggio del profilo invernale è proseguito quindi con i rilievi del 20 Marzo 2003 ed il 22 Aprile 2003. In seguito al passaggio alla tecnologia DGPS i rilievi sono diventati più numerosi grazie alla maggiore rapidità con la quale si possono effettuare le misurazioni. Nove topografie sono state effettuate il 10 Ottobre 2003, l'11-13 Febbraio 2004 (svolte contemporaneamente ad un rilievo con la stazione totale), il 20 Aprile 2004, il 24 Maggio 2004. Il 28 Settembre 2004 è stato effettuato un rilievo dopo una forte mareggiata con periodo di ritorno di 25 anni (Ciavola et al.,

2007a), contemporaneamente al volo LIDAR svolto dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (Ciavola et al., 2006). Nell'inverno 2004-2005 è stato fatto un rilievo a larga scala in Febbraio. Dato che la zona è stata oggetto di un ripascimento in Marzo 2005, poco prima delle operazioni di sversamento della sabbia è stato fatto un rilievo della spiaggia e della fascia dunale (25 Febbraio). La densità dei profili è stata aumentata al fine di avere una sezione ogni 50 m, coprendo il tratto di spiaggia che si estende dal pennello più meridionale sino a circa 900 m più a Sud. Tali profili sono stati misurati nuovamente il 7 Maggio 2005 ed il 9 Giugno 2005 per monitorare l'evoluzione del ripascimento. A Maggio 2007 è stato eseguito un altro ripascimento, circa nella stessa zona, che è stato rilevato lungo le medesime 20 sezioni spaziate 50 m.

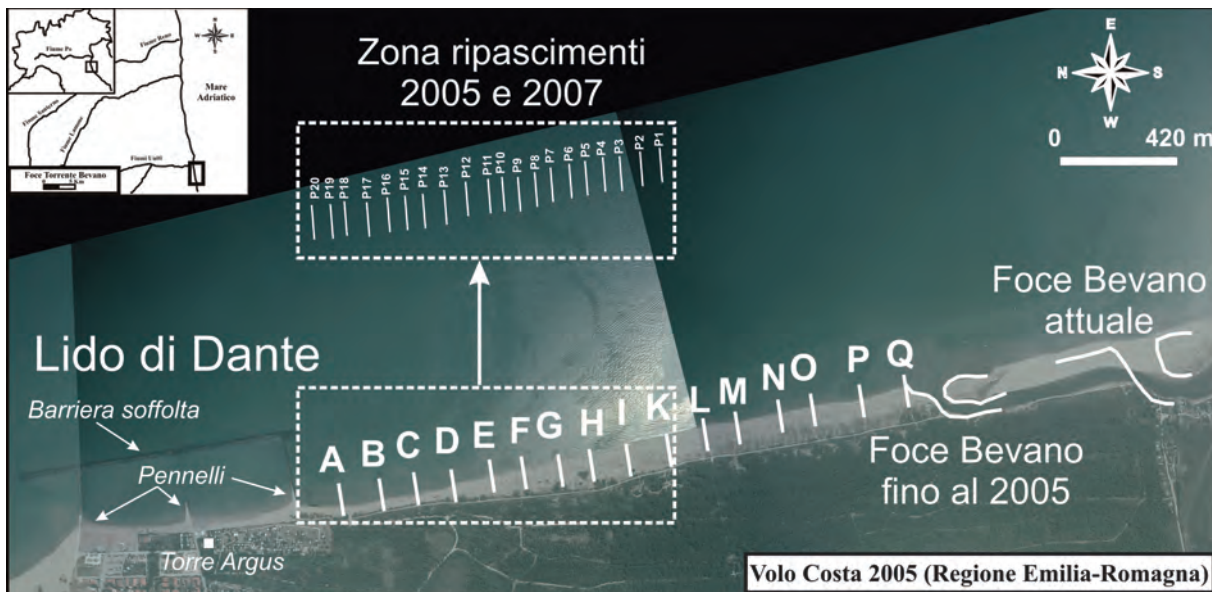


Figura 4 - Reti di profili topografici rilevati nel corso del monitoraggio 2001-2007. Da notare che oltre al monitoraggio a lungo termine (lettere maiuscole), nel febbraio- maggio 2005 e nel maggio 2007 sono stati svolti rilievi di dettaglio prima e dopo gli interventi di ripascimento.

### *Mappatura della fascia dunale*

Ad inizio del periodo di monitoraggio è stato commissionato alla ditta Geosystem s.r.l. un volo aereo a bassa quota per poter mappare la fascia dunale e la copertura vegetazionale. Il volo è stato effettuato in Luglio del 2002. Il piede della duna è stato mappato tramite rilievo DGPS-RTK il 10 Ottobre 2003, l'11 Febbraio 2004 ed il 24 Maggio 2004. In occasione del rilievo del 13 Febbraio 2004 è stata misurata anche la quota della cresta del cordone dunale.

La copertura vegetazionale è stata mappata il 17 Luglio 2003, effettuando un rilievo floristico al fine di censire le specie vegetali presenti e la loro distribuzione sia all'interno di singoli profili dunali che lungo tutta la zona di studio. La vegetazione è stata studiata secondo il metodo di Braun e Blanquet (1964) su aree di campionamento aventi superficie variabile fra i 5 e i 20 m<sup>2</sup>. La scelta dei punti di campionamento è stata soggettiva e basata su criteri morfologici ma sempre con lo scopo di descrivere tutte le possibili variazioni vegetazionali che si osservavano dalla spiaggia adiacente il fronte duna sino al retroduna vegetato. L'ordinamento dei rilievi floristici è stato eseguito applicando il metodo dell'analisi delle componenti principali (PCA).

## **Risultati**

### *Variabilità del profilo spiaggia-duna nel periodo 2001-2004*

Grazie alle campagne topografiche svolte, è stato possibile evidenziare per ogni rilievo l'andamento del piede della duna (definita come la linea posta a quota + 2.00 m sul l.m.m.) e la linea di riva (linea posta alla quota di 0.00

m sul l.m.m.), in modo da poterle sovrapporre come in Figura 5 e valutare il loro spostamento durante il tempo. La Figura 5 mostra l'andamento della linea di riva e della linea del piede della duna ricavato dalle topografie effettuate durante le campagne di Dicembre 2001, Ottobre 2002 e Febbraio 2004. Questo grafico non tiene conto delle campagne di Febbraio 2002, Ottobre e Novembre 2002, Marzo e Aprile 2003 per motivi di comprensibilità grafica, ma queste topografie sono presenti nelle quattro successive figure che rappresentano i profili di spiaggia più significativi, indicati con le lettere a, b, c e d.

Ad un primo sguardo il grafico evidenzia l'erosione della parte settentrionale della zona di studio nel periodo 2001-2004, in particolare l'area che si estende dal pennello meridionale fino a 800 m verso Sud. Nella parte centrale (compresa fra 800 e 1500 m a Sud del pennello) si notano delle oscillazioni della linea di riva misurata in Febbraio 2004 che indicano come ci siano dei punti di regressione e dei punti di progradazione ravvicinati gli uni agli altri. Il piede della duna è sostanzialmente stabile pur accennando un lieve arretramento.

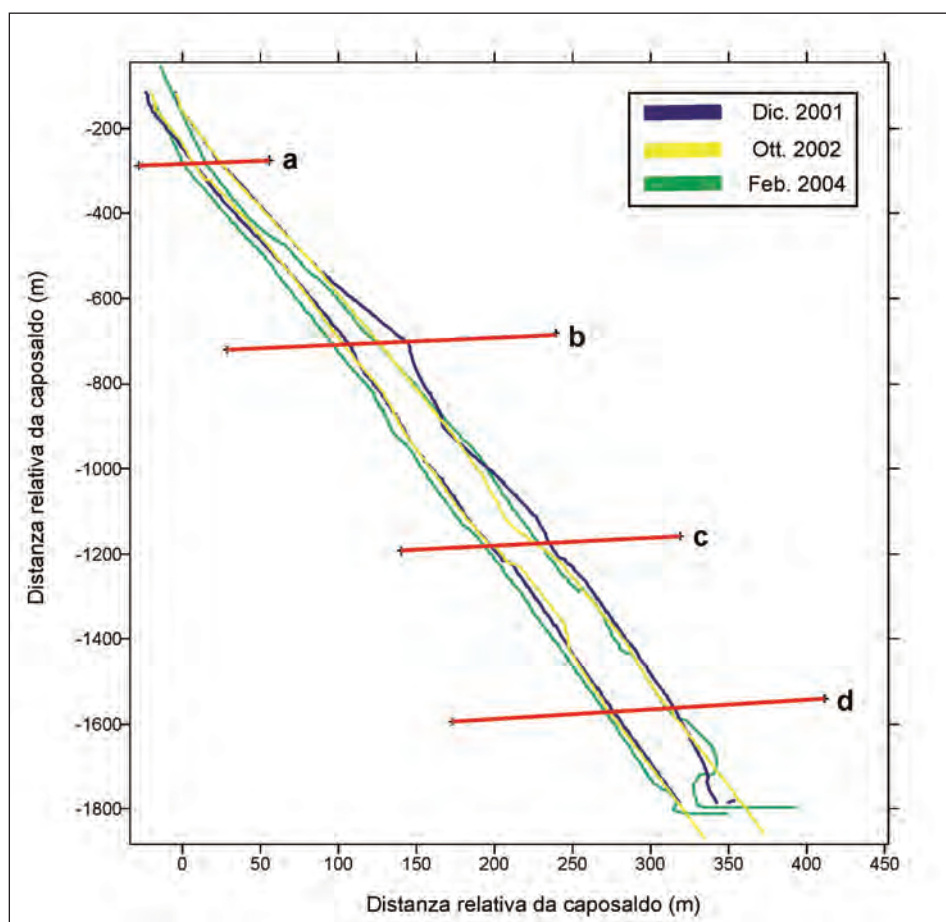


Figura 5 - Linee di riva e piede della duna a confronto da Dicembre 2001 a Febbraio 2004. Asse x, distanze in m dal caposaldo; asse y, distanze in m dal caposaldo. Poiché i rilievi erano stati effettuati con la stazione totale, le distanze sono riferite al caposaldo di inquadramento locale che era stato installato in zona.

La zona meridionale (compresa tra 1500 m a Sud del pennello e la foce del fiume Bevano) ci dà invece un'immagine di stabilità di entrambi gli elementi sotto osservazione. In special modo risulta molto stabile nel tempo il piede della duna. Analizzando ora i quattro profili "tipo" indicati in Figura 5, la sezione "a" indica il profilo di spiaggia più settentrionale (Fig. 6). La spiaggia è molto ripida, con una pendenza maggiore del 10%. Ne consegue quindi che qui è presente una zona intertidale molto stretta. Il confronto tra le sezioni sottolinea chiaramente come, sia la spiaggia emersa, sia quella sommersa fino a -1 m circa, abbiano subito ampie oscillazioni che

si sono tradotte in una netta erosione, anche se i 3 profili riferiti al primo periodo di studio (Dicembre 2001, Febbraio 2002 e Ottobre 2002) mostrano stabilità o addirittura un lieve avanzamento.

In particolare il fronte della duna è arretrato di > 10 m da Dicembre 2001 a Febbraio 2004 e il tratto di spiaggia sommersa antistante ha un andamento caratterizzato da pendenza molto elevata. Si nota la totale assenza di barre intertidali. In Dicembre 2001 inoltre è presente una berma ben pronunciata. La forte pendenza della spiaggia intertidale, in corrispondenza e al di sopra del medio mare, indica un profilo riflettente secondo la classificazione di Wright e Short (1984). Nei successivi due rilievi (Febbraio e Ottobre 2002) la berma non è presente e la spiaggia è molto più ripida. Vi è un accumulo di sedimento nella zona al di sotto del medio mare della spiaggia intertidale, in quanto la sua quota aumenta rispetto al profilo di Dicembre 2001. Anche nel rilievo successivo (Novembre 2002) continua il trend positivo di aumento dell'elevazione di tale porzione della spiaggia, ma, nel periodo seguente, si innesca un processo erosivo che tende progressivamente ad abbassarla fino ai livelli iniziali di Dicembre 2001.

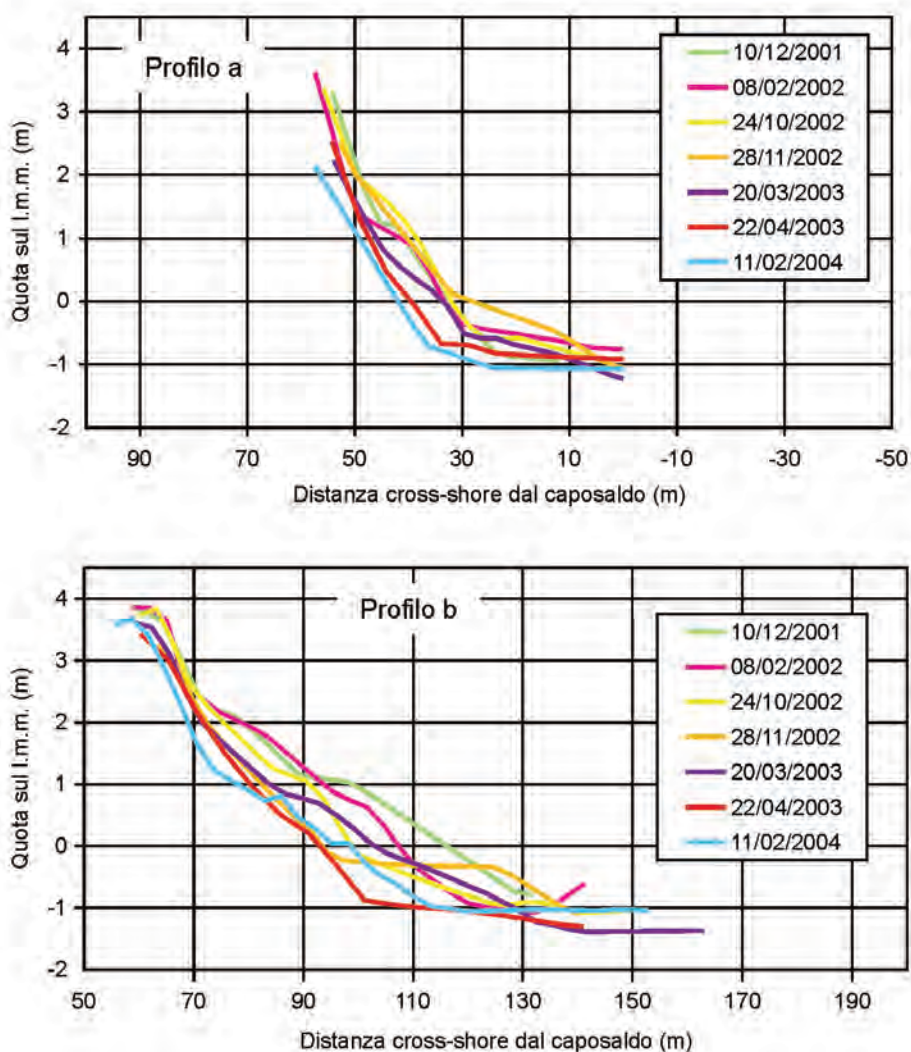


Figura 6 - Profili "tipo" scelti per descrivere l'evoluzione morfologica nel periodo 2001-2004 della parte centro-settentrionale del cordone dunale e della spiaggia. Profilo "a", adiacente al pennello Sud della zona protetta dalle strutture; profilo "b", localizzato nella parte centro-settentrionale. Le distanze sono riferite al caposaldo di inquadramento locale che era stato installato in zona.



Nell'ultimo rilievo (Febbraio 2004) il profilo si degrada ulteriormente ed anche il piede della duna, che non aveva finora evidenziato arretramenti significativi, comincia ad essere eroso.

Il profilo "b" (localizzato nella zona centrale) presenta invece il piede della duna marcatamente più stabile nel tempo rispetto alla sezione precedente (Fig. 6), anche se è ugualmente in regressione di qualche metro. Da notare che l'altezza della cresta della duna resta sostanzialmente invariata. Anche qui un iniziale avanzamento della spiaggia emersa cede il passo ad una consecutiva erosione che rende il profilo della parte inferiore della battigia molto più pendente. Un altro punto in comune col precedente profilo è la totale assenza di barre intertidali. Il primo profilo (Dicembre 2001) ha una berma molto accentuata. Nei due successivi rilievi (Febbraio 2002 e Ottobre 2002) la berma è ancora presente ma si sposta verso terra. Questo spostamento della berma continua fino al penultimo rilievo (Aprile 2003). Per ciò che riguarda la duna, i primi tre profili indicano una buona stabilità del piede, mentre notiamo che, a partire da Marzo 2003, esso comincia a retrocedere leggermente ma con continuità. L'ultima sezione (Febbraio 2004) evidenzia due berme distinte. Il piede della duna è ulteriormente

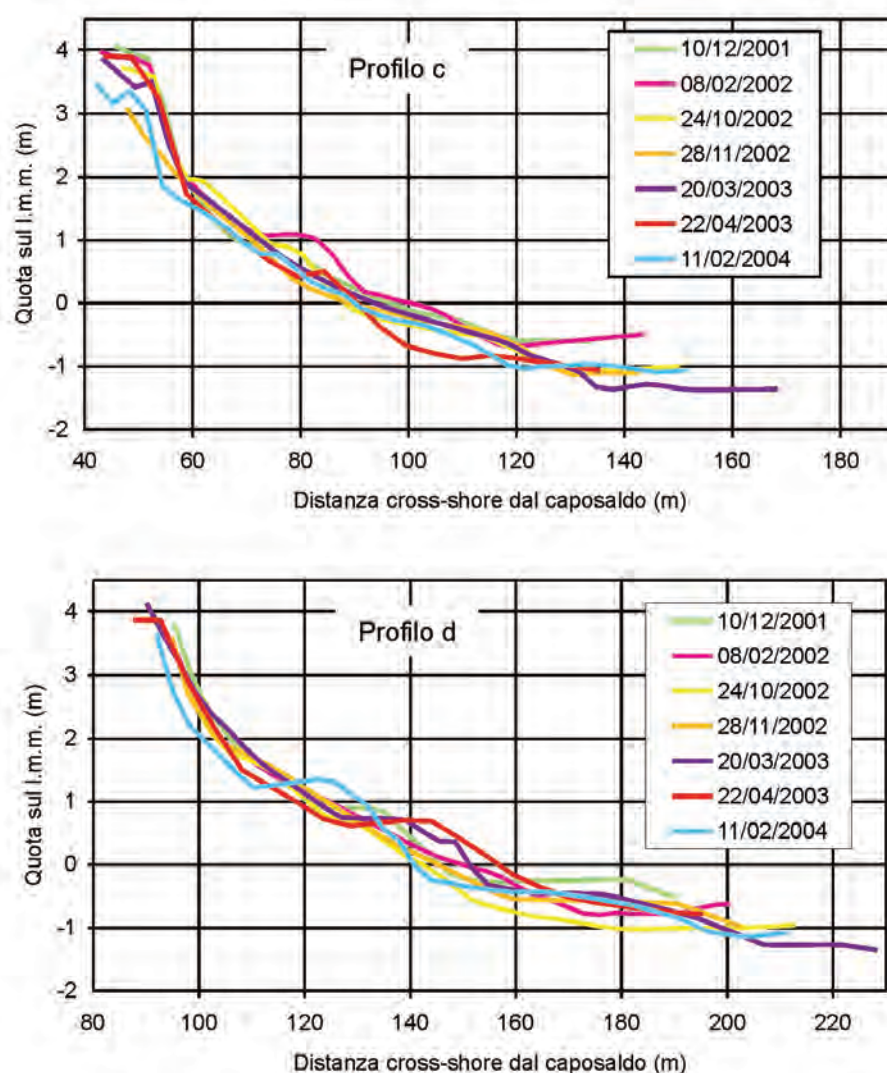


Figura 7 - Profili "tipo" scelti per descrivere l'evoluzione morfologica nel periodo 2001-2004. Profilo "c" localizzato nella zona centro-meridionale; profilo "d", localizzato nella zona Sud. Le distanze sono riferite al caposaldo di inquadramento locale che era stato installato in zona.

arretrato rispetto ai rilievi iniziali. Il profilo "c" (Fig. 7) mostra una buona stabilità della duna; essa mantiene la sua posizione nel tempo, ma l'ultimo rilievo (Febbraio 2004) evidenzia un lieve arretramento ed abbassamento. In questo profilo si nota un andamento più complesso della zona intertidale al di sotto del medio mare rispetto alle aree più settentrionali. E' presente una variazione di stato tra una situazione in cui sono presenti le barre intertidali ed una situazione priva di esse. In generale questa sezione può dirsi abbastanza stabile durante il periodo di studio. Da Dicembre 2001 fino a Ottobre 2002 compaiono le berme anche in numero superiore all'unità in entrambi i profili (Febbraio e Ottobre 2002). La situazione però cambia già il mese successivo (Novembre 2002) in cui avviene una marcata erosione di tali conformazioni. La situazione cambia di nuovo a partire da Marzo 2003 in cui i profili presentano delle berme e hanno un andamento più dolce della zona intertidale.

La cresta della duna durante il periodo Dicembre 2001 - Marzo 2003 presenta piccole oscillazioni nella sua altezza, ma la posizione del piede rimane sempre la medesima, mostrando una buona stabilità. Sia il profilo di Aprile 2003 sia quello di Febbraio 2004 mostrano invece un più accentuato abbassamento della cresta. Inoltre l'area intertidale dell'ultimo profilo, in prossimità della battigia, si eleva rispetto a quello mostrato dal penultimo rilievo, probabilmente a spese del piede della duna che infatti risulta sensibilmente arretrato in contrasto alla precedente condizione di stabilità. Il profilo "d" (Fig. 7), il più meridionale della serie, ci mostra una sezione della duna decisamente stabile. Essa infatti mantiene invariata nel tempo la sua altezza e la sua pendenza verso mare. Ampie oscillazioni si notano invece nella spiaggia intertidale, sintomo di una vivace evoluzione nel tempo delle barre che qui si presentano anche in numero superiore all'unità. Nei tre rilievi successivi rispetto a quello iniziale (Dicembre 2001) vi è la scomparsa della berma e il graduale abbassamento del fondale immediatamente antistante la battigia. La situazione si ribalta nuovamente considerando i rilievi di Marzo e Aprile 2003 in cui la spiaggia presenta la berma e raggiunge quota più elevata nella fascia intertidale. Ciò è evidenziato dal penultimo rilievo, in cui vediamo una berma di grandi dimensioni. Si potrebbe pensare che essa sia stata creata a spese del piede della duna che ha una quota lievemente inferiore rispetto ai profili precedenti. Questo trend erosivo continua anche nell'ultimo rilievo (Febbraio 2004) in cui la berma e la battigia risultano in accrescimento, mentre si manifesta l'arretramento del fronte della duna.

Balouin et al. (2006b) hanno mostrato che in questa zona, prima che la foce del Bevano venisse spostata a Sud, si formavano delle barre intertidali che, in condizioni di bassa energia del moto ondoso, si univano alla spiaggia esclusivamente per effetto dello *swash* (definito come la lama d'acqua che risale sulla battigia quando le onde arrivano a riva) e favorivano l'ampliamento della spiaggia emersa.

In conclusione quindi, in base all'analisi del monitoraggio topografico presentato, la parte Nord e la zona centrale, fino a 1000 m a Sud del pennello meridionale, sono in arretramento o presentano oscillazioni. Anche il piede della duna segue tale andamento, con un'erosione più marcata nella zona adiacente al pennello. La spiaggia più prossima alla vecchia foce del Fiume Bevano è invece in leggero avanzamento e anche il relativo piede della duna sembrava stabile.

#### *Arretramento del piede della duna nel periodo 2001-2004*

Per valutare lo stato delle dune si è sovrapposta alla foto aerea in Figura 8 (volo 2002) la linea che rappresenta il piede della duna (in blu) che è stata ottenuta, durante una campagna di misure dirette in Ottobre 2003 (con GPS-RTK), camminando lungo la base della duna, seguendo tutti i punti in cui c'erano arretramenti del fronte dunale. Si noti la forte migrazione della bocca del fiume Bevano (Balouin et al., 2006a; Gardelli et al., 2007) e la corrispondenza tra la base della duna da fotointerpretazione e la linea mappata con il GPS. Da tale confronto si evince che nel periodo da Giugno 2002 fino ad Ottobre 2003 la base della duna è rimasta invariata, almeno nella parte centro-meridionale della zona. Si nota solo un certo arretramento in prossimità dei profili settentrionali (11 e 12 in rosso in Fig. 8). E' interessante notare l'erosione della duna attorno al punto di accesso alla spiaggia, corrispondente al sesto profilo (numero 6 in rosso in Fig. 8), dove il fronte della duna è interrotto.

Dal confronto tra i due rilievi effettuati con il GPS in modalità RTK nel mese di Ottobre 2003 e Febbraio 2004, eseguiti camminando lungo il piede della duna, è possibile identificare l'evoluzione delle zone in cui l'acqua ha oltrepassato il fronte della duna creando punti di *overwash* anche estesi (Fig. 9). Come ampiamente discusso da Armaroli et al. (2005b)

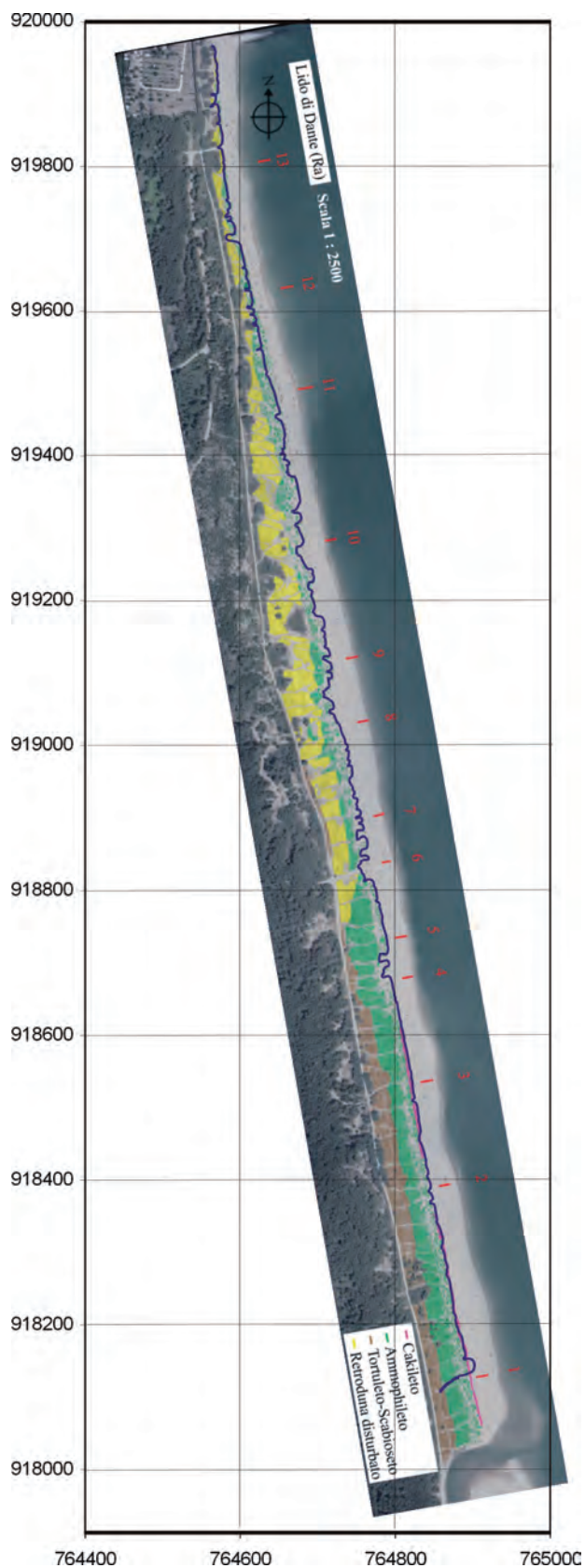


Figura 8 - Linea del piede della duna rilevato nel mese di Ottobre 2003 sovrapposta alla foto eseguita nel Giugno 2002; in rosso il numero dei profili fissati sul sito per lo studio ripetuto dell'area nel tempo. La mappatura della fascia di duna vegetata è stata svolta utilizzando questi ultimi profili come riferimento. Sistema di coordinate: UTM32\* ED50.

utilizzando dati da videomonitoraggio raccolti dalla stazione Argus di Lido di Dante, nel Dicembre 2003 era avvenuto un evento ad elevata energia ( $H_s$  di circa 3 m) da Scirocco che aveva portato all'erosione della spiaggia emersa, delle dune e che aveva modificato profondamente la spiaggia sommersa. Dall'analisi dell'andamento del piede dunale rappresentato in Figura 9 si vede come la parte centro-settentrionale del cordone fosse la più colpita.

In corrispondenza della linea con coordinata Nord pari a 919800 (UTM 32\*, ED50), la Figura 8 mostra un accentuato arretramento arcuato della linea del piede dunale. Tale andamento è rappresentato nella foto di Figura 10 nella quale la vegetazione arbustiva di origine retrodunale si trovava a diretto contatto con la spiaggia a causa dell'obliterazione della linea di dune frontali. Dal confronto fra le due linee del piede dunale si evince inoltre una stabilità nel tempo delle posizioni spaziali dei fenomeni di *overwash*.

Tutta la parte centrale della zona di studio, localizzata tra le linee di coordinata Nord 919400 e 918600, è molto frastagliata perché fortemente soggetta al fenomeno di *overwash*; l'azione del mare ha trasformato la duna in un insieme senza continuità formato da basse cuspidi dai lati subverticali, come mostra la Figura 10.

Al contrario il lato Sud, che sembra essere più stabile, ha un fronte duna meno acclive. Il piede della duna del rilievo di Febbraio 2004 si sovrappone quasi completamente a quello di Ottobre 2003, mantenendo un andamento continuo, che viene interrotto solo raramente da modesti arretramenti dovuti alla morfologia propria della duna e non ad eventi erosivi, che sono qui ostacolati sia dalla buona copertura vegetazionale sia dall'altezza della conformazione rispetto al medio mare (fino a 5 m, Armaroli et al., 2005a). Il 24 Maggio 2004 è stato effettuato un ulteriore rilievo del piede della duna che però non ha evidenziato cambiamenti significativi e che, per tale ragione, non è stato rappresentato in Figura 9.

*L'impatto delle mareggiate dell'inverno 2004/2005*

Lavori presenti in letteratura (Ciavola et al., 2007a; Ciavola et al., 2007b), usando due rilievi LIDAR, facenti parte della banca dati utilizzata nel presente articolo (Luglio 2003 e 27 Settembre 2004), hanno discusso ampiamente come la mareggiata avvenuta tra il 24 e il 26 Settembre 2004 abbia provocato l'obliterazione della duna della zona Nord,

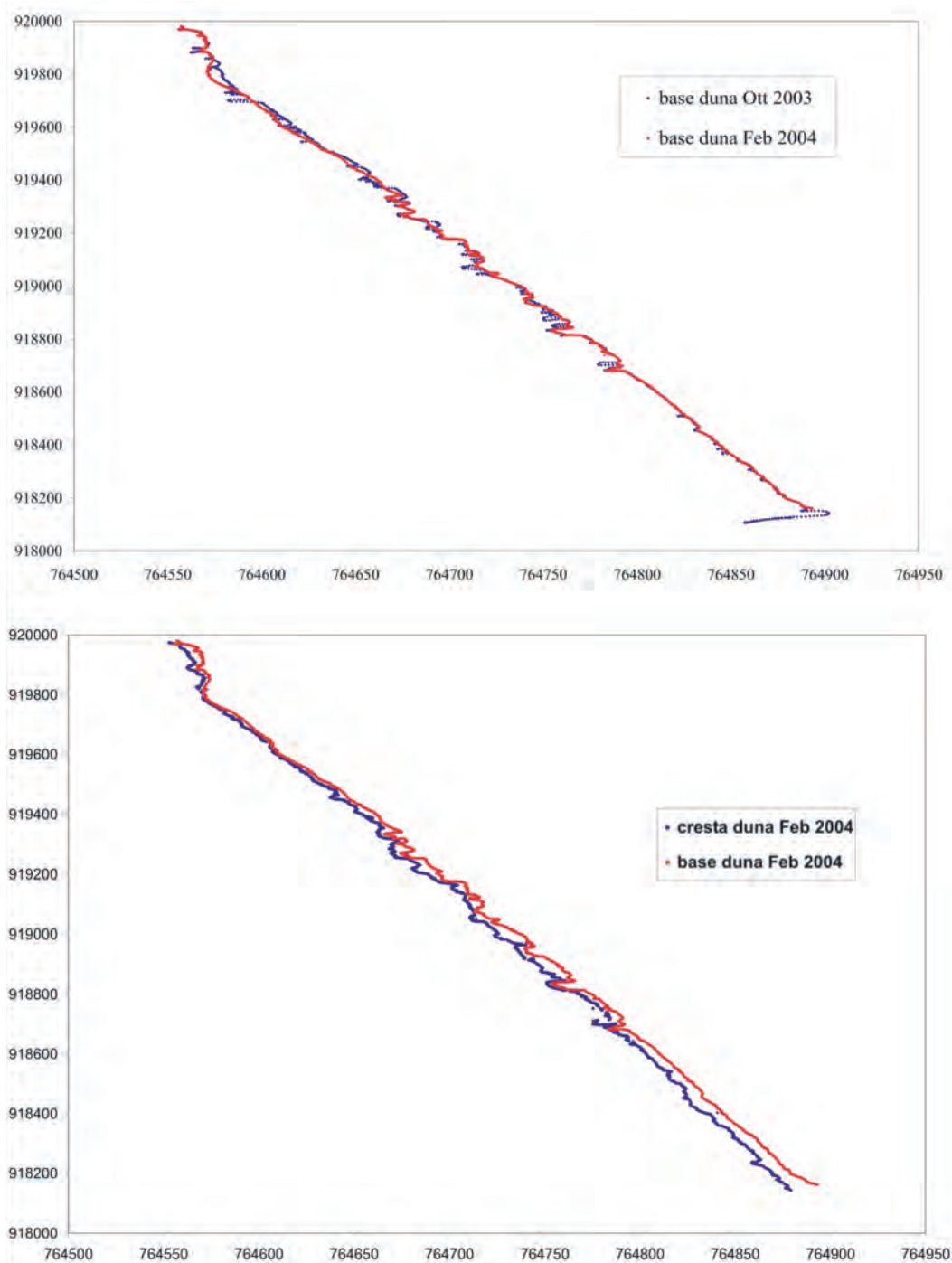


Figura 9 - Linea del piede e della cresta della duna rilevato tramite DGPS-RTK nei mesi di Ottobre 2003 e Febbraio 2004. Sistema di coordinate: UTM32\* ED50.



Figura 10 - Erosione del fronte della duna osservato nella zona centrale il 28 novembre 2002.

vicina al pennello e come essa abbia inoltre danneggiato la spiaggia nel suo complesso, provocando aree di *overwash* e erodendo fortemente il piede della duna. In Figura 11 vengono presentate due sezioni della fascia dunale immediatamente a ridosso delle opere di protezione.

Secondo gli autori citati sopra, l'evento in questione aveva un periodo di ritorno di circa 25 anni ( $H_s$  di 5.6 m) e può quindi considerarsi estremo. L'evento era la cosiddetta "bora scura" e cioè di un vento inizialmente da Sud e che ha poi cambiato la direzione di

provenienza da Nord-Nordest. Secondo gli autori non vi è quindi stata coincidenza tra picco di mareggiata e picco di sovrizzo atmosferico del livello del mare.

Dal confronto tra profili in Figura 11 è però evidente come in seguito alla mareggiata si sia persa o perlomeno fortemente danneggiata tutta la parte esterna del cordone dunale. Secondo gli autori citati sopra, l'area meridionale invece è riuscita a mantenersi inalterata anche dopo il passaggio dell'evento estremo, poiché "protetta" dalla morfologia più dissipativa della spiaggia, grazie alla grande ampiezza della spiaggia emersa, all'esistenza di forme intertidali dinamiche ed alla presenza di barre sommerse in grado di dissipare l'energia delle onde (Armaroli et al., 2005a).

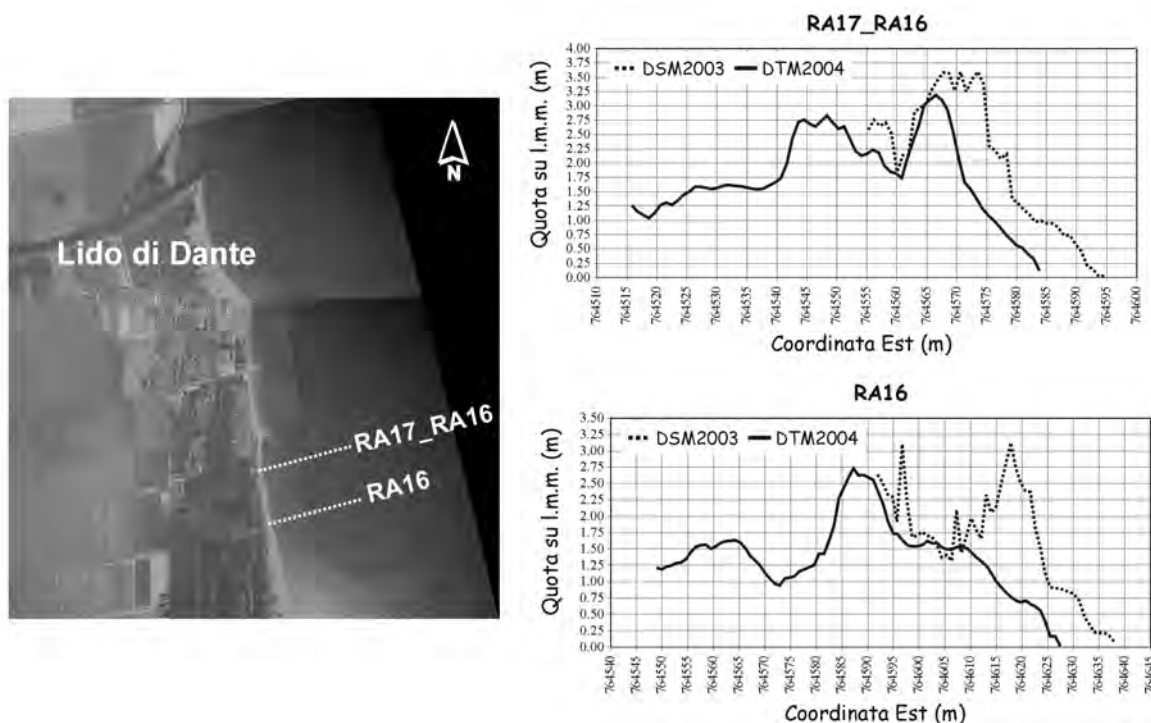


Figura 11 - Impatto della mareggiata di Settembre 2004 sulle dune e sulla spiaggia della zona Nord: confronto tra un rilievo Lidar del 2003 ed uno del 2004, effettuato immediatamente dopo l'evento estremo (dati da Ciavola et al., 2007a; Ciavola et al., 2007b).

**Interventi di ripascimento ed evoluzione dal 2005 al 2007**

Come citato in precedenza, nel 2005 la Regione Emilia-Romagna ha eseguito un ripascimento utilizzando sabbie da cava (33000 m<sup>3</sup>), dal pennello più meridionale della zona protetta, fino a circa 500 m più a Sud, qui analizzato tramite due rilievi GPS (pre e post-lavori) ripetuti lungo 20 sezioni (da P1 a P20, Fig. 4). Come si può vedere in Figura 11, le mareggiate dell'inverno 2004/2005 hanno completamente obliterato la spiaggia a Sud delle strutture producendo un'azione diretta del moto ondoso in fase di run-up sulle dune stesse. Pochi mesi dopo il ripascimento la sabbia si era spostata verso Sud (cf. profilo 20, 16 e 10 in Fig. 12). Osservazioni dirette sul campo indicano che con l'arrivo dell'estate il volume di ripascimento non era più facilmente rintracciabile sui profili. A Maggio 2007 è stato effettuato un altro ripascimento, circa nella stessa zona, che è stato ugualmente monitorato lungo le medesime 20 sezioni.

La Figura 13 mostra alcuni risultati ottenuti dal confronto delle suddette sezioni nei rilievi del 2004 (dopo la mareggiata di Settembre) e subito dopo il ripascimento di Maggio 2007. Si nota come nei primi 400 m a Sud delle opere la duna, che presenta quote tra 2 e 3 m, nel 2007 non è più presente. I dati raccolti confermano che già nei primi mesi del 2005 l'erosione è stata pressoché completa. Verso Sud le creste delle dune sono state erose di 30-70 cm, arretrando con una velocità media di circa 30 cm/mese e diventando discontinue e molto

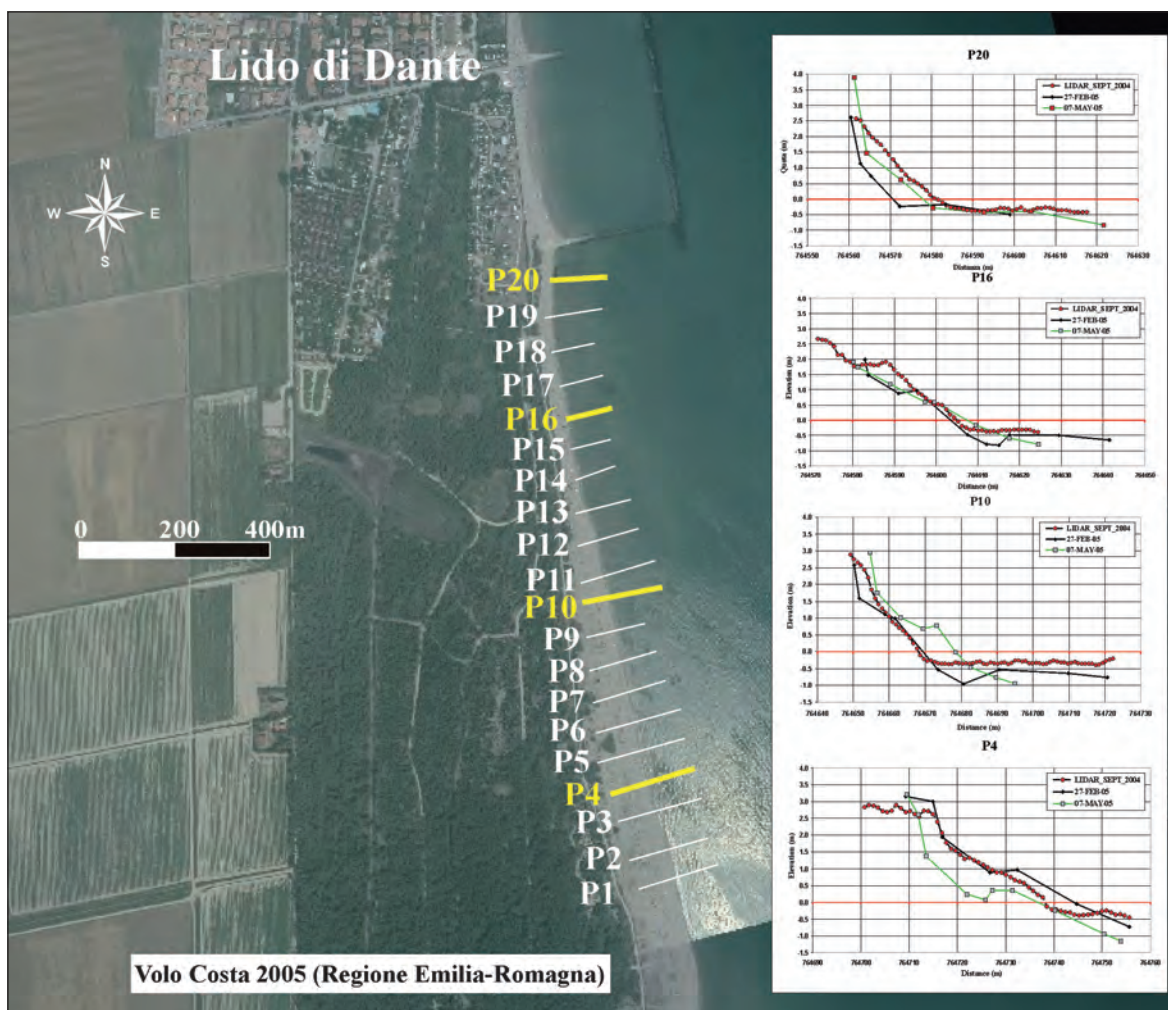


Figura 12 - Confronto tra quattro sezioni tipo pochi giorni dopo la mareggiata eccezionale di Settembre 2004 (linea rossa), prima del ripascimento nell'inverno 2004/2005 (linea nera) e qualche mese dopo l'intervento (linea verde).

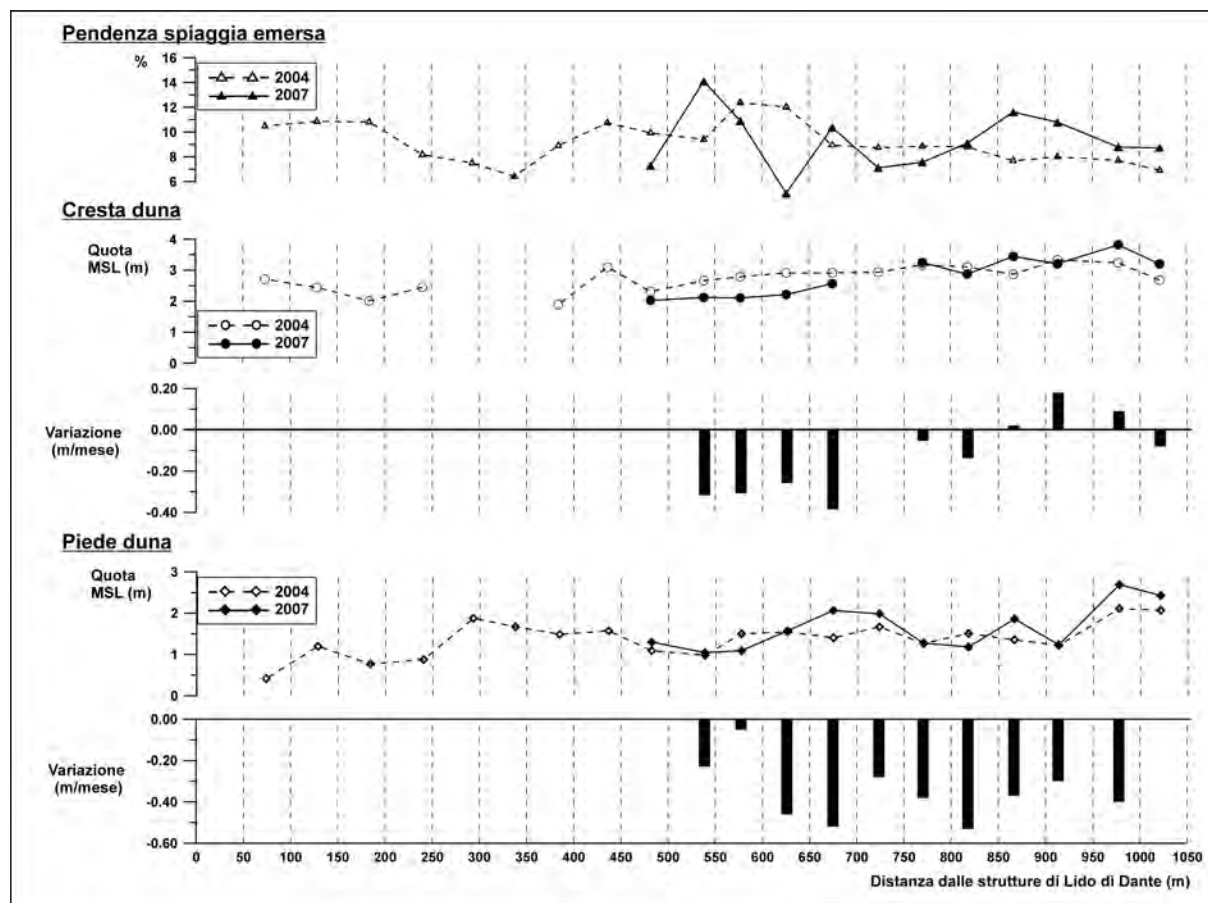


Figura 13 - Confronto tra le caratteristiche della spiaggia e del cordone dunale dopo la mareggiata eccezionale di Settembre 2004 e dopo il ripascimento del maggio 2007.

degradata, in seguito a fenomeni di *overwash* e *blow-out*. Anche il piede della duna è arretrato velocemente, aumentando nel complesso la sua quota. Tra i 750 e i 900 m dal pennello, la cresta è arretrata più lentamente, mentre il piede è stato eroso e continua a retrocedere, creando un fronte duna con una maggiore pendenza. A 1 km dal pennello si nota una certa stabilità della cresta dunale, anche perché questa raggiunge una quota maggiore. Secondo Armaroli et al. (2007), in tale zona il serbatoio di sabbia all'interno della duna riesce a garantire una certa capacità di assorbimento dell'effetto delle mareggiate estreme.

## Discussione

### Degradazione del cordone dunale

Il cordone dunale in questione non rappresenta il classico esempio di cordone continuo (vedi Carter, 1988), con duna mobile vegetata da specie pioniere, una *foredune* debolmente stabilizzata da piante che vivono su fondo relativamente mobile (ad es. *Ammophila* o *Agropyron*) ed infine retroduna ampio che separa la fascia attiva dalla pineta marittima.

Sin dall'inizio del monitoraggio si era notata una situazione di sofferenza del tratto a Sud del pennello, dato che, a causa della limitata ampiezza della spiaggia, durante le mareggiate l'azione del moto ondoso incideva direttamente sul fronte duna. Il progressivo degrado della fascia dunale è osservabile confrontando la mappatura della vegetazione sulla foto aerea del 2002 (Fig. 8) con la documentazione fotografica in Figura 14. Si può vedere come, con il passare del tempo, in seguito all'erosione della spiaggia, le onde abbiano eroso il piede della duna. In seguito anche la vegetazione, essendo esposta al *salt-spray* si è seccata e la duna è progressivamente scomparsa.



Figura 14 - Sequenza di fotografie riprese ad una distanza di 500 a Sud delle opere nel periodo 2002-2008. Si può notare che con il passare degli anni la vegetazione dunale è sempre più danneggiata dal salt-spray. Nel 2008 la cresta della duna è in pratica inesistente e le dune stabilizzate iniziano ad essere erose.

Secondo la classificazione di Short e Hesp (1982) tale morfologia dunale viene classificata come “Fd”: 20-45% di copertura vegetale; aree “sfondate” dall’azione del mare e lato sopravvento in cedimento.

Il confronto tra l’andamento della cresta e del piede mappati a Febbraio 2004 confermano, nelle zone in cui la duna era stata danneggiata, le morfologie descritte. Dove la duna viene scavalcata il fronte dunale ha il lato verso mare molto ripido e la cresta ha bassa elevazione.

Come presentato in Figura 15 (schema-A) esistono due meccanismi dominanti di erosione del fronte duna. Nella parte settentrionale del cordone dunale si osserva una progressiva erosione della parte posta verso il mare. Poiché la cresta ha una quota relativamente bassa ( $\leq 2.5$  m), le mareggiate sfondano la duna o ne sovrastano la cresta. Al contrario dei processi di sfondamento controllati dal vento o *blow-out* (Hesp, 2002), il processo di origine marina causa anche un’erosione laterale della cresta, lasciando nel tempo una morfologia a “cocuzzoli”, che nel tempo vengono erosi dando luogo a vasti ventagli di *washover*. Il *run-up* durante le mareggiate trova vie preferenziali nei punti più bassi della cresta, che nel periodo estivo diventano vie di accesso alla spiaggia da parte dei bagnanti e che impediscono alla vegetazione di fissarsi e nel tempo, probabilmente anche in seguito al camminamento, agiscono da fattore destabilizzante. Nel caso di una cresta più alta (Fig. 15-schema B), o meglio di quello che Armaroli et al. (2007) considerano un serbatoio di sabbia “in sicurezza”, l’erosione frontale si esplica sotto forma di franamento del fronte della duna. Questa sabbia può venire rimossa sulla zona intertidale andando

ad alimentare il terrazzo di bassa marea, ma con l’instaurarsi del profilo estivo ritorna alla parte della spiaggia proteggendo il piede della duna. Qui specie pioniere come il *Cakile* riescono ad installarsi e a favorire piccoli depositi eolici.

### Conclusioni

Lo studio qui presentato ha documentato che nel corso degli anni 2002-2007 si è assistito ad un progressivo degrado della parte settentrionale del cordone di dune tra Lido di Dante e la Foce del torrente Bevano. Dai dati sembra che il fattore che ha agito da “catalizzatore” nell’accelerare l’erosione del sistema siano state le mareggiate estreme dell’inverno 2004/2005. Rilievi svolti dagli autori nell’ambito del progetto MICORE nel corso degli



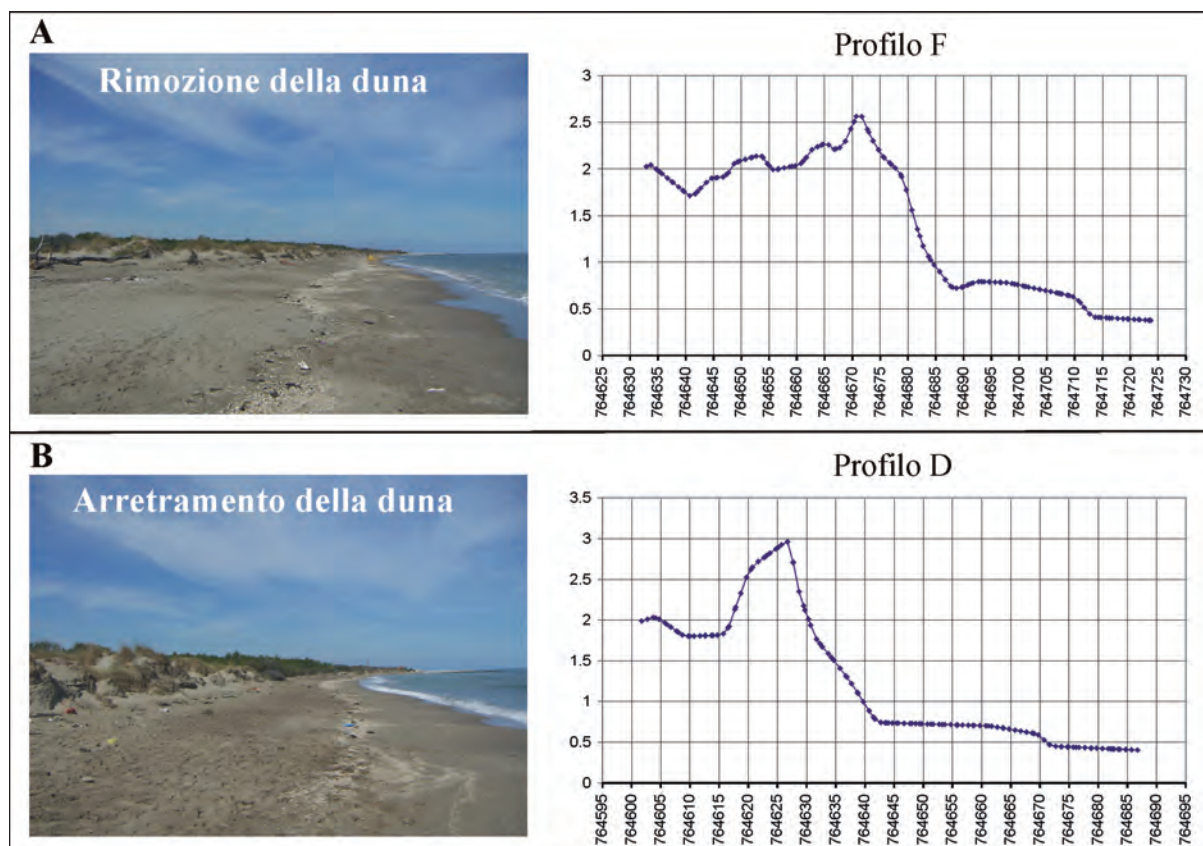


Figura 15 - Stati erosivi osservati nel corso del monitoraggio. Nel caso (A) la duna viene scavalcata durante le mareggiate; nel caso (B) si assiste ad una progressiva erosione frontale.

inverni 2008/2009 e 2009/2010 sembrano indicare che il processo si stia progressivamente allargando verso Sud. Le cause del degrado morfologico sono molteplici. Innanzitutto lo scarso apporto sedimentario lungo costa e probabili perdite a largo di sedimenti durante le mareggiate. La scarsa mobilità del sistema, in seguito all'assenza di una sequenza vegetativa e morfologica da cordone esterno mobile a pineta costiera. Infine un indiscriminato accesso di utilizzatori della spiaggia in qualunque stagione dell'anno attraverso varchi che agiscono da punti di ingresso della lama d'acqua durante le mareggiate. Futuri interventi di ricostruzione del cordone dunale, se considerati, dovranno mirare ad ottenere un serbatoio sedimentario che garantisca un assorbimento delle fasi erosive durante le mareggiate. Si raccomanda inoltre di regolamentare l'accesso alla spiaggia attraverso varchi delimitati da recinzione e di costruire passerelle per minimizzare l'impatto del camminamento.

### Ringraziamenti

Si ringrazia il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli per la fornitura del rilievo LIDAR 2004 nell'ambito delle attività del progetto MICORE, l'ENI per la fornitura del rilievo LIDAR 2003. Si ringraziano inoltre tutte le persone che negli anni hanno partecipato ai rilievi ed aiutato nell'analisi dati ed in particolare Yann Balouin e Manuela Gardelli. Si ringrazia Dario Capatti per l'identificazione della vegetazione sul campo. L'articolo è un contributo al progetto MICORE (contratto EU-202798), finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro (coordinatore P. Ciavola).

### Bibliografia

Armaroli C., Balouin Y., Ciavola P., Capatti D. (2005a) - *Nearshore Bars as a Natural Protection of Beaches, Field Evidence from Lido di Dante Beach, Adriatic Sea*. Atti di: ICCM'05 Conference, Tavira, Algarve, Portogallo, pp. 295-303.

- Armaroli C., Balouin Y., Ciavola P., Gardelli M. (2005b) - *Bar changes due to storm events using ARGUS: Lido di Dante, Italy*. Atti di: Coastal Dynamics 2005, ASCE, New York, USA, ISBN: 0-7844-0855-6.
- Armaroli C., Ciavola P., Perini L., Luciani P. (2007) - *Morfologia delle spiagge ravennati e vulnerabilità per fenomeni di inondazione*. Atti di: Terzo Forum Nazionale di Rimini, Pianificazione e tutela del territorio costiero. Questioni, metodi, esperienze a confronto, Maggioli (Ed.), 127: 363-389.
- Armaroli C. e Ciavola P. (2011) - *Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: A video-based morphological classification*. *Geomorphology*, 126: 201-216.
- Balouin Y., Ciavola P., Michel D. (2006a) - *Support of subtidal tracer studies to quantify the complex morphodynamics of a river outlet: the Bevano, NE Italy*. *Journal of Coastal Research*, SI39: 602-607.
- Balouin Y., Ciavola P., Anfuso G., Armaroli C., Corbau C., Tessari U. (2006b) - *Morphodynamics of intertidal sand bars: field studies in the northern Adriatic, NE Italy*. *Journal of Coastal Research*, SI39: 323-328.
- Byrne M. L. (1997) - *Seasonal sand transport through a trough blow-out at Pinery Provincial Park, Ontario*. *Canadian Journal of Earth Sciences* 34(11):1460-1466.
- Braun-Blanquet J. (1964) - *Pflanzensoziologie*. Grundzüge der Vegetationskunde, 631 S.
- Calabrese L. (2010) - *Geomorfologia costiera*. In Perini, L. e Calabrese, L. (a cura di): *Il sistema are-costa dell'Emilia-Romagna*. Pendragon, pp. 87-107.
- Carter R.W.G. (1988) - *Coastal environments - An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*. Academic Press, 617 pp.
- Casadei C., Drei E., Lamberti A. (1998) - *Evoluzione di un litorale protetto da barriere sommerse: Lido di Dante*. Atti di: XXVI Convegno di Idraulica e di Costruzioni Idrauliche, Catania, Volume III, pp. 245-256.
- Ciavola P., Gatti M., Armaroli C., Balouin Y. (2003) - *Valutazione della variazione della linea di riva nell'area di Lido di Dante (RA) tramite GIS e monitoraggio con DGPS cinematico*. Atti di: Convegno dei Lincei, 205: 113-121.
- Ciavola P., Perini L., Luciani P., 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 della spiaggia*. *Hydrogeo*, Febbraio 2006, pp. 18-25.
- Ciavola P., Armaroli C., Chiggiato J., Valentini A., Deserti M., Perini L., Luciani P. (2007a) - *Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna: the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy)*. *Journal of Coastal Research*, SI50: 540-544.
- Ciavola P., Armaroli C., Perini L., Luciani P. (2007b) - *Evaluation of maximum storm wave run-up and surges along the Emilia-Romagna coastline (NE Italy): A step towards a risk zonation in support of local CZM strategies*. In: *Integrated Coastal Zone Management (ICZM)- the global challenge*. Singapore: Research Publishing Services, pp. 505-516.
- Doody J.P. (1992) - *Nature conservation on the coast-The role of coastal zone management* In: Carter, R.G.W., Curtis T.G.F. e Shelley-Skeffington M.J., *Coastal Dunes*, Balkema, Rotterdam, pp. 495-502.
- Fraser G.S., Bennett S.W., Olyphant G.A., Bauch N.J (1998) - *Windflow circulation patterns in a coastal dune blowout, south coast of Lake Michigan*. *Journal of Coastal Research* 14(2): 451-460.
- Gardelli M., Caleffi S., Ciavola P. (2007) - *Evoluzione morfodinamica della foce del torrente Bevano*. *Studi Costieri*, 13: 55-76.
- Hesp P. (2002) - *Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics*. *Geomorphology*, 48: 245-268.
- Jungerius P. D., e Van der Meulen F. (1997) - *Aeolian dynamics in a blowout complex in the Meijendel dunes, The Netherlands*. *Journal of Coastal Conservation*, 3(1): 63-70.
- Kriebel D.L. e Dean R.G. (1993) - *Convolution method for time-dependent beach-profile response*. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(2): 204-226.
- Larson M. e Kraus N.C. (1989) - *SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change*. Report 1. Technical Report CERC 89-9, US Army Corps of Engineers.
- Matias A., Ferreira Ó., Dias J.A. e Vila-Concejo A. (2004) - *Development of indices for the evaluation of dune recovery techniques*. *Coastal Engineering*, 51: 261-276.

- Short A.D., Hesp P.A. (1982) - *Wave, beach and dune interactions in south-eastern Australia*. Marine Geology, 48: 259-284.
- Valpreda E. (2006) - *La banca dati geografica delle dune costiere in Italia: uno strumento per valutare l'interazione tra queste morfologie costiere, l'evoluzione di litorali ed il loro utilizzo*. Studi Costieri, 11: 3-16.
- Vellinga P. (1982) - *Beach and dune erosion during storm surge*. Coastal Engineering, 6: 361-387.
- Wright L.D., Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches*. Marine Geology, 56: 93-118.

**Ricevuto il 20/04/2010 , accettato il 21/07/2010.**