

Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Collana diretta da:

Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze
Tel. 055 2479241 - Fax 055 2001618
E-mail: enzo.pranzini@unifi.it

Redazione: **Serena Ferri**
E-mail: serena.ferri@unifi.it

Comitato scientifico

Segreteria: **Pierluigi Aminti**
Dipartimento di Ingegneria civile
Via S. Marta, 3 - 50139 Firenze
Tel. 055 4796224 - Fax 055 495333
E-mail: aminti@dicea.unifi.it

Carlo Bartolini - Firenze
Edoardo Benassai - Napoli
Antonio Brambati - Trieste
Leandro D'Alessandro - Chieti
Giuliano Fierro - Genova
Leopoldo Franco - Roma
Giovanni Battista La Monica - Roma
Alberto Lamberti - Bologna
Gianfranco Liberatore - Udine

Elvidio Lupia Palmieri - Roma
Piero Ruol - Padova
Alberto Noli - Roma
Mario Calabrese - Napoli
Giulio Scarsi - Genova
Umberto Simeoni - Ferrara
Sandro Stura - Genova
Giuseppe Roberto Tomasicchio - Bari
Marcello Zunica - Padova

Stampato presso
Nuova Grafica Fiorentina
Via Traversari, 76
50126 Firenze

Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Numero 17

Indice

Presentazione	p. 3-4
Azioni di salvaguardia e strumenti di gestione delle dune del Lazio Silvia Bellacicco, Paolo Lupino, Elena Santini e Claudio Cattena	p. 5-17
Evoluzione recente del sistema dunale di Lido di Dante-Foce Bevano (Ravenna): fattori naturali ed impatto antropico Paolo Ciavola e Clara Armaroli	p. 19-37
Il progetto di riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di foce Bevano, Comune di Ravenna (RA) Claudio Miccoli, Mauro Ceroni, Ennio Malavolta e Mario Castelli	p. 39-51
Le dune costiere in Veneto: stato, gestione e prospettive Paola Virgili	p. 53-69
Le dune costiere dell'Emilia-Romagna: strumenti di analisi, cartografia ed evoluzione Luisa Perini e Lorenzo Calabrese	p. 71-84
Lenti d'acqua dolce nelle dune della costa Adriatico-Romagnola Marco Antonellini, Enrico Balugani, Giovanni Gabbianelli, Mario Laghi, Valentina Marconi e Pauline Mollema	p. 85-106
Variazioni morfologiche stagionali del sistema spiaggia-duna del Parco Nazionale del Circeo Elena Pallottini, Sergio Cappucci, Andrea Taramelli, Carlo Innocenti e Augusto Screpanti	p.107-126
Dune ed utilizzo del territorio a confronto per la stima della capacità virtuale di attuare l'adattamento al rischio costiero in Italia Edi Valpreda	p.127-140
Le attività di gestione nelle Riserve Naturali dello Stato nell'area di foce Bevano (Ravenna) Giovanni Nobili	p.141-148
Caratteristiche sedimentologiche e morfologiche, tendenza evolutiva della costa della Riserva Naturale di Sentina (Marche) e ruolo dell'Habitat dunale per la riqualificazione ambientale Carlo Bisci, Giancarlo Bovina, Gino Cantalamessa, Sergio Cappucci, Matteo Conti, Annalisa Sinatra e Emiliana Valentini	p.149-164
Azioni di tutela delle dune costiere del Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli (Toscana settentrionale) Luigi E. Cipriani, Antonio Perfetti, Enzo Pranzini e Giovanni Vitale	p. 165-179
Dal monitoraggio di un intervento pilota al protocollo operativo per la realizzazione della copertura vegetale di dune costiere Maria Speranza, Lucia Ferroni e Giuseppe Pritoni	p.181-195
Gli ambienti dunali della costa di Sterpaia Comune di Piombino (LI): interventi di riqualificazione degli habitat, controllo delle specie esotiche e razionalizzazione del carico turistico Enrico Bartoletti, Alessandro Bini, Leonardo Lombardi, Michele Giunti, Maurizio Bacci e Stefano Corsi	p.197-213
Norme per gli Autori	p. 215-216

Presentazione

In numerose zone costiere basse e sabbiose che si affacciano sul Mediterraneo, le fasce litoranee sono soggette a forti fenomeni di erosione e ad un elevato rischio di sommersione per eventi di mareggiata che, per effetto dei cambiamenti climatici in corso, risultano sempre più frequenti e intensi. Oltre alla diminuzione degli apporti sedimentari fluviali, al fenomeno della subsidenza, più o meno accentuato a seconda delle zone, alle modificazioni del clima meteo-marino, un importante fattore causa dell'aumento di esposizione al rischio è stato lo smantellamento progressivo degli apparati dunosi avvenuto di conseguenza ad uno sviluppo, spesso incontrollato, delle aree urbanizzate nei territori costieri.

Le dune costiere rappresentavano infatti, e rappresentano ancora oggi ove presenti, una naturale struttura di difesa dei territori litoranei e, al contempo, una riserva di sabbia per il ripascimento naturale delle spiagge, oltre a offrire un valido contrasto all'intrusione del cuneo salino a difesa degli acquiferi dell'immediato entroterra e a costituire preziosi habitat per specie animali e vegetali.

Per dare l'idea di cosa sia andato perso in termini di habitat e capacità di difesa, posso citare il caso della nostra Regione, la cui fascia costiera è stata soggetta nel corso del '900 ad una delle trasformazioni più intense e diffuse nel panorama nazionale. Nei primi decenni del secolo scorso, in Emilia-Romagna, i cordoni dunosi si estendevano con continuità lungo gran parte dei 130 km della fascia litoranea. Già sul finire degli anni '70 quasi due terzi di questi apparati erano stati completamente smantellati, mentre ad oggi risultano presenti rilievi dunosi solo su circa 34 dei 130 km di litorale regionale, quasi esclusivamente nei soli territori ferrarese e ravennate, per la maggior parte molto frammentati, in crisi incipiente o in avanzato stato di degrado morfologico e vegetativo. Nonostante siano in larga parte interessati da specifici strumenti di tutela, a livello nazionale ed europeo, le dune sono ancora oggi gli ecosistemi maggiormente minacciati. I meccanismi di degrado sono principalmente rappresentati dall'antropizzazione dei litorali, dall'erosione costiera, da una fruizione turistica incontrollata, fondamentalmente causati dalla carenza di specifici strumenti di pianificazione-programmazione e di corretta gestione, sia dei litorali che del territorio interno.

Le problematiche della conservazione degli ambienti dunosi attuali sono estese a larga parte dei territori costieri del bacino del Mediterraneo e dei Paesi Nord Europei, tanto che l'Unione Europea già li inserisce come oggetto di tutela, conservazione e recupero, nelle diverse direttive sul tema habitat (Direttiva Habitat 92/43/CEE, come capostipite, e successivi aggiornamenti e regolamenti) e come zone da comprendere nella rete Natura 2000, istituita con la prima direttiva nel 1992.

L'attenzione per le dune costiere come sistema di difesa della costa ha assunto negli anni sempre maggior importanza anche a livello regionale e nazionale italiano.

Lo stesso decreto legislativo 152/2006, indica fra le attività di programmazione, di pianificazione e di attuazione degli interventi di protezione delle coste e degli abitati dall'invasione e dall'erosione delle acque marine, la ricostituzione dei cordoni dunosi (art.56, comma 1, lettera g).

Le Linee Guida per la Gestione Integrata delle Zone Costiere (GIZC) della Regione Emilia-Romagna, approvate con la Delibera di Consiglio Regionale 645/2005, indicano, fra le varie azioni per la difesa e la riqualificazione dei litorali, anche la ricostruzione delle dune costiere, la tutela delle dune ancora esistenti, il loro recupero e riqualificazione funzionale (scheda 1, tema 3.2). In questi ultimi anni la Regione ha avviato interventi sperimentali di ricostruzione di apparati dunosi, fra i quali, quello di Foce Bevano di cui si tratta in due articoli di questa pubblicazione, rappresenta un'esperienza importante anche dal punto di vista della sua trasferibilità grazie alla messa a punto di un Protocollo per la realizzazione e restauro della copertura vegetale di dune sabbiose costiere.

Le esperienze di altre regioni come il Veneto, il Lazio, la Toscana, le Marche, solo per citare alcuni esempi contenuti in questo volume, in merito a tutela, ricostruzione e valorizzazione delle dune costiere, testimoniano l'attualità e l'importanza che questo tema riveste nel panorama nazionale. Consapevole di questa importanza, della necessità e del valore di un confronto fra le molte regioni attive su questi temi, la Regione Emilia-Romagna ha organizzato nel dicembre del 2009 un convegno nazionale dal titolo "*La ricostituzione delle dune costiere: un orizzonte possibile?*", che ha permesso di fare il punto, attraverso il contributo di tecnici, amministratori, ricercatori di strutture pubbliche, enti di ricerca e università, sulle numerose esperienze avviate e completate in Italia negli ultimi anni.

Questo numero speciale della rivista Studi Costieri, che ho il piacere di presentare, raccoglie i contributi portati in quella importante occasione di confronto, non come semplici atti del convegno, ma bensì come risultati di un lavoro di studio e di attività portato avanti, dai vari autori, nel corso di tutto il 2010 a completamento delle esperienze presentate nel 2009. Il volume costituisce quindi un quadro estremamente aggiornato sulle principali esperienze di studio, ricerca, ricostruzione, gestione e riqualificazione degli apparati dunosi costieri nel panorama nazionale.

Vi invito quindi alla lettura di questo volume con l'auspicio che queste e nuove esperienze possano trovare ulteriore sviluppo e continuità ai fini di migliorare l'ambiente costiero e mantenere alto il livello di sicurezza dei territori litoranei.

Paola Gazzolo

Assessore alla Sicurezza Territoriale
Difesa Suolo e Costa, Protezione Civile
Regione Emilia-Romagna

Azioni di salvaguardia e strumenti di gestione delle dune del Lazio

Silvia Bellacicco¹, Paolo Lupino¹, Elena Santini² e Claudio Cattena²

¹Centro Monitoraggio GIZC - Direzione Ambiente, Regione Lazio

²Area Conservazione Natura - Direzione Ambiente, Regione Lazio

Riassunto

La Regione Lazio affronta la gestione delle dune costiere con un'ottica integrata, coinvolgendo diverse Aree e Uffici della Direzione Ambiente. La gestione dell'ambiente dunale, infatti, non può essere distinta dalla gestione del sistema complesso Posidonia-spiaggia-duna, caratterizzato dal dinamismo morfologico ed ecologico tipico degli ambienti di transizione. Sulla base di tale principio, la Direzione Ambiente attua azioni di salvaguardia, protezione e gestione degli ambienti dunali oggetto di tutela ambientale (aree costiere protette o incluse nella Rete Natura 2000), svolge studi specifici per l'individuazione e l'implementazione di buone pratiche finalizzate alla conoscenza e al monitoraggio costiero di supporto alla gestione e alla pianificazione della costa regionale, sostiene inoltre la progettazione comunitaria su questo tema, al fine di confrontare la propria conoscenza con gli altri paesi e realizzare strumenti tecnici ed amministrativi comuni e coerenti con le politiche ambientali europee per l'ICZM.

Parole chiave: gestione dune, cambiamento climatico, rischio costiero, monitoraggio costiero.

Abstract

Lazio Region adopts an integrated approach for the management of coastal dunes, by involving different Areas and Offices of the Environmental Directorate. Management of dune environments cannot be separated from the management of the complex Posidonia-beach-dune system, characterised by the morphologic and ecologic dynamism of transition environments. According to this principle, the Environment Directorate safeguards, protects and manages dune environments which are environmentally protected (protected coastal areas or areas included in the Natura 2000 Network); it carries out specific studies for the identification and implementation of good practices, aimed at knowing and monitoring coasts so as to support regional coastal management and planning; and supports EU projects on this topic in order to compare knowledge with other countries and create common technical and administrative tools consistent with EU environmental policies for ICZM.

Keywords: *dune management, climate change, coastal risk, coastal survey.*

Premessa

La Regione Lazio vanta uno sviluppo dunale piuttosto importante lungo le proprie coste, la cui tutela e gestione è esercitata grazie a specifici e mirati interventi svolti da diversi uffici regionali appartenenti alla Direzione Regionale Ambiente. La competenza sulla difesa, tutela e gestione delle dune non è infatti assolta da un solo ufficio

regionale, ma bensì distribuita tra più servizi che si occupano di ambiente costiero e comunque afferenti alla Direzione Ambiente. Nonostante ciò, l'attenzione e la sensibilità regionale ha consentito negli anni l'esecuzione di numerose azioni di diversa natura con l'obiettivo comune di valorizzare, proteggere e meglio caratterizzare l'ambiente dunale. L'articolo descrive i risultati ottenuti dalla Direzione Ambiente sul tema della salvaguardia e gestione delle dune a seguito delle azioni più significative svolte dalla Direzione, integrate da nuove azioni proposte nell'ambito della cooperazione territoriale.

Stato delle dune nel Lazio

L'arco costiero regionale si sviluppa con andamento NW-SE per circa 350 km di lunghezza ed è costituito prevalentemente da spiagge (60%) (Eurosion, 2004). La presenza e lo stato delle dune lungo la costa laziale sono stati accertati dall'Università La Sapienza di Roma-DST nell'ambito del Progetto Nazionale PRIN "Depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna" del 2002, a cui si fa tuttora riferimento come base informativa e conoscitiva regionale, benché lo studio si sia basato sull'interpretazione di ortofoto del Volo Italia 1998-99.

Nonostante la presenza di ambienti dunali lungo gran parte dell'arco costiero regionale, il PRIN ha consentito di rilevare diversi aspetti critici relativamente alla qualità delle dune stesse. L'evidenza di tali emergenze è indispensabile all'Amministrazione che è chiamata a identificare gli obiettivi e programmare gli interventi finalizzati alla difesa, recupero e/o gestione delle dune. Lo studio quindi ha evidenziato che:

- tra i sistemi dunali cartografati non sono presenti dune integre o in un accettabile stato di naturalità;
- nessun cordone embrionale risulta essere in fase di crescita ma sono presenti solo accumuli temporanei di sabbia;
- i cordoni dunali, prevalentemente inattivi, occupano una superficie di circa 20 Km² distribuiti su 200 km di litorale;
- l'equilibrio del litorale laziale risulta quasi interamente intaccato dall'antropizzazione costiera.

Laddove invece gli interventi sul territorio - antropizzazione, urbanizzazione e fruizione turistica - sono ancora limitati (in genere aree sottoposte a tutela ambientale o vincolate) i cordoni dunali presentano un alto grado di naturalità:

- lungo la costa settentrionale, dalla foce del Chiarone a Bagni S. Agostino;
- a sud della foce del Tevere, nella Tenuta Presidenziale di Castel Porziano (Fig. 1);
- in corrispondenza del poligono militare di Nettuno.



Figura 1 - Dune nella Tenuta Presidenziale di Castel Porziano (Foto ISPRA, 2009).

Il litorale compreso tra Torre Astura e il Promontorio del Circeo è caratterizzato da un sistema dunale molto esteso che raggiunge quote anche superiori a 20 m presso Torre Paola, ma in condizione di evidente degrado dovuto principalmente all'elevato stato di antropizzazione di questo tratto di litorale (Campo e La Monica, 2006).

Le azioni di salvaguardia e gli strumenti di gestione regionali

La tutela ambientale delle dune laziali

Il sistema delle aree protette e la Rete Natura 2000 della Regione Lazio comprendono in buona parte gli ambienti dunali della costa regionale con un elevato valore ambientale.

Partendo da nord verso sud lungo la costa regionale si rinvencono infatti le seguenti aree sottoposte a tutela ambientale, seppur da parte di diversi livelli amministrativi (Tab. 1):

Tabella 1- Aree Naturali Protette costiere del Lazio.

Riserva Naturale Statale Saline Tarquinia	VT
Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda	RM
Monumento Naturale Palude di Torre Flavia	RM
Oasi WWF di Macchiagrande	RM
Riserva Naturale Statale del Litorale Romano	RM
Riserva Naturale Statale Tenuta di Castelporziano	RM
Riserva Naturale Regionale Tor Caldara	RM
Parco Nazionale del Circeo	LT

D'altra parte, la Rete Natura 2000 comprende alcuni SIC e ZPS lungo il litorale laziale (Figg. 2 e 3), a volte corrispondenti ad aree già sottoposte a livelli di tutela ambientale (es. Riserva Saline di Tarquinia e Parco Nazionale del Circeo), a volte ad aree non tutelate ma ad alta valenza ambientale soprattutto per la presenza di ambienti dunali, ed in particolare habitat a duna mobile, duna fissa, retroduna e interduna.

La Tabella 2 riporta l'elenco dei SIC e ZPS del Lazio che includono ambienti dunali.

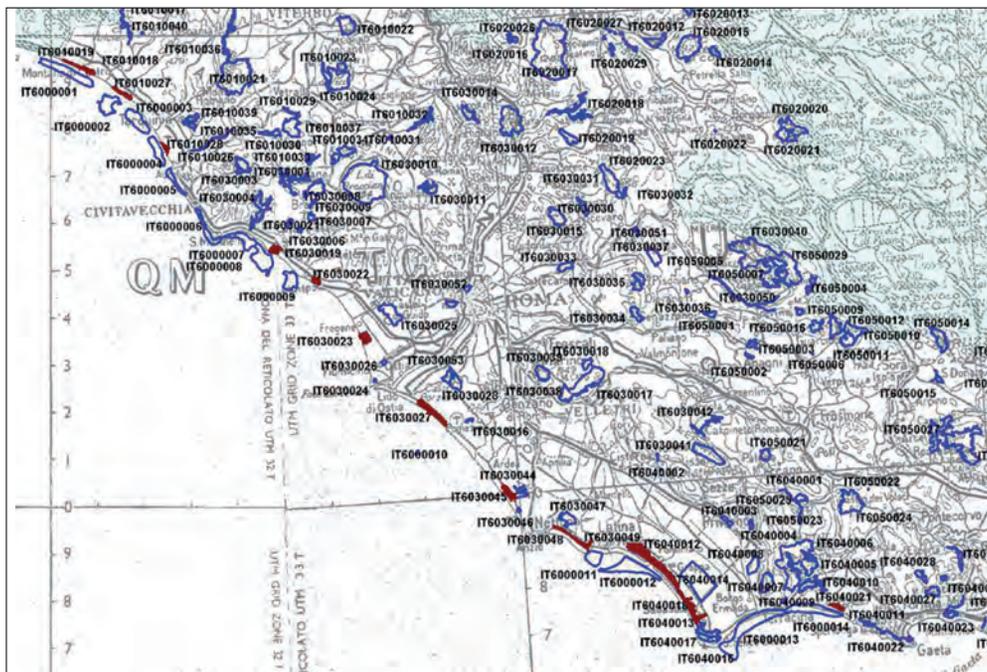


Figura 2 - SIC costieri del Lazio con habitat dunali in rosso (mod. www.minambiente.it).

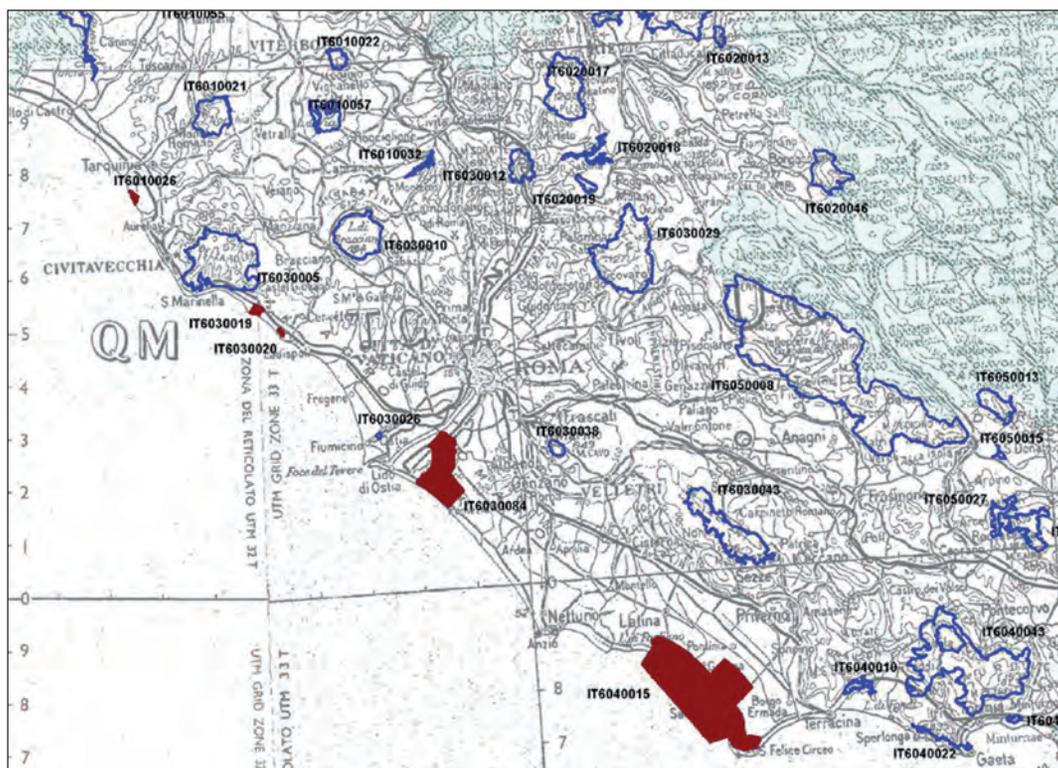


Figura 3 - ZPS costiere del Lazio con habitat dunali in rosso (mod. www.minambiente.it).

Tabella 2 - Aree SIC e ZPS del Lazio che includono habitat di ambiente dunale.

IT6010018	Litorale a Nord Ovest delle foci del Fiora	VT
IT6010019	Pian dei Cangani	VT
IT6010026	Saline di Tarquinia	VT
IT6010027	Litorale tra Tarquinia e Montalto di Castro	VT
IT6030019	Macchiatonda	RM
IT6030020	Torre Flavia	RM
IT6030022	Bosco di Palo	RM
IT6030023	Macchia grande di Focene e Macchia dello Stagneto	RM
IT6030027	Castelporziano	RM
IT6030045	Lido dei Gigli	LT
IT6030048	Litorale di Torre Astura	LT
IT6030084	Castelporziano (Tenuta presidenziale)	RM
IT6040011	Lago Lungo	LT
IT6040012	Laghi Fogliano, Monaci, Caprolace e Pantani dell'Inferno	LT
IT6040013	Lago di Sabaudia	LT
IT6040015	Parco Nazionale del Circeo	LT
IT6040018	Dune del Circeo	LT
IT6040021	Duna di Capratica	LT

La Regione Lazio sta approntando un sistema di monitoraggio specifico, come previsto dalla Direttiva Habitat, secondo le disposizioni della D.G.R. del 3 luglio 2007 n. 497 “Attivazione e disposizioni per l’organizzazione della rete regionale per il monitoraggio dello stato di conservazione degli habitat e delle specie della flora e della fauna (Direttiva 92/43/CEE, Legge Regionale 29/97)”.

Attività del CM-GIZC

Il Centro di Monitoraggio GIZC (Gestione Integrata delle Zone Costiere) nasce nel 2008 in seno alla Direzione come strumento per la Gestione Integrata delle Zone Costiere del Lazio, così come definito dal Regolamento ICZM (Integrated Coastal Zone Management) approvato il 21 gennaio 2008 a Madrid dagli Stati membri della Convenzione di Barcellona. La gestione della costa, infatti, necessita di un'attenzione e di una sensibilità particolare da parte dell'Amministratore, soprattutto per la fragilità degli ambienti che la caratterizzano e il dinamismo delle componenti di questa parte di territorio. Per questo motivo la conoscenza e il monitoraggio degli habitat e delle interazioni tra mare, costa ed entroterra risultano fondamentali per una pianificazione accorta e sostenibile, e per un approccio più corretto ai problemi costieri e marini, anche in relazione ad una sempre più spinta ed intensa collaborazione in ambito europeo con le altre regioni costiere del Mediterraneo. A questo proposito, il CM-GIZC cura le attività di progettazione in ambito europeo per l'ottenimento di ulteriori finanziamenti e per garantire la contestualizzazione europea delle attività svolte.

In questo contesto, il CM-GIZC ha dato avvio nel 2008 al Programma "Habitat Marini", che include una serie di attività finalizzate alla caratterizzazione ed individuazione di aree marine da sottoporre a tutela ambientale e alla Gestione Integrata delle Zone Costiere attraverso due assi principali:

Asse 1: promozione di attività di ricerca, rilievo e caratterizzazione delle zone marine protette mediante convenzioni e rapporti con altri Enti (Università, Istituti di Ricerca, Enti locali, ecc.);

Asse 2: promozione di progetti europei per la salvaguardia e la valorizzazione delle zone marine protette nell'ambito della gestione integrata delle zone costiere e tramite la collaborazione con i soggetti istituzionali coinvolti.

In merito all'Asse 1, sono state attivate 4 convenzioni di ricerca, e più precisamente:

- convenzione con l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza"-Dip. BAU per "Rilievo e caratterizzazione delle Praterie di Posidonia antistanti le coste della Regione Lazio e dei principali popolamenti marini costieri per la realizzazione di una Cartografia dei fondali marini costieri della Regione Lazio e la predisposizione di un Atlante degli Habitat Marini";
- convenzione con ISPRA per "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";
- convenzione con CNR-ISMAR di Venezia per "Aggiornamento e ricalibrazione del clima ondoso a largo delle coste laziali e bilancio sedimentario a scala regionale";
- convenzione con l'Università degli Studi della Tuscia-DECOS per "Valutazione dello stato di conservazione delle aree marine della Regione Lazio e analisi di fattibilità per l'istituzione di aree marine protette o di tutela biologica a livello regionale".

Tutte le convenzioni hanno come obiettivo la realizzazione di prodotti o di strumenti di supporto all'Amministrazione per la gestione della zona costiera regionale.

In merito alla gestione delle dune, i primi risultati delle attività svolte da ISPRA sono rilevanti: il monitoraggio dell'ambiente costiero emerso e sommerso attraverso l'impiego di tecnologie LIDAR sembra essere uno strumento sinottico, efficace ed affidabile, oltre che più economico e veloce rispetto ai tradizionali monitoraggi topografici e con tecniche multibeam/SSS, tanto più se pianificati in un'ottica di economia di scala (Figg. 4 e 5). La convenzione con ISPRA, attualmente in fase di analisi e interpretazione dei dati acquisiti, prevede di fornire valutazioni morfometriche e caratterizzazioni della spiaggia emersa, sommersa e delle dune costiere delle aree coperte dal LIDAR (litorale Montalto/Tarquini e litorale Torre Astura/Circeo); un modello della distribuzione granulometrica dei sedimenti; un modello della distribuzione delle classi mineralogiche; una cartografia della distribuzione dei principali habitat bentonici; la produzione di un dataset da utilizzare nel Sistema Informativo Territoriale CM-GIZC.

Per quanto riguarda l'Asse 2, il CM-GIZC è promotore, e spesso capofila, di progetti europei interregionali riguardanti l'ambiente marino-costiero e la sua gestione sostenibile, come BEACHMED (programma InterregIIB-Medoc) e BEACHMED-e (programma InterregIIC-Sud). Quest'ultimo, con il Sottoprogetto POSIDUNE (Interaction of Sand and *Posidonia oceanica* with the environment of Natural Dunes), ha consentito di affrontare il tema della gestione

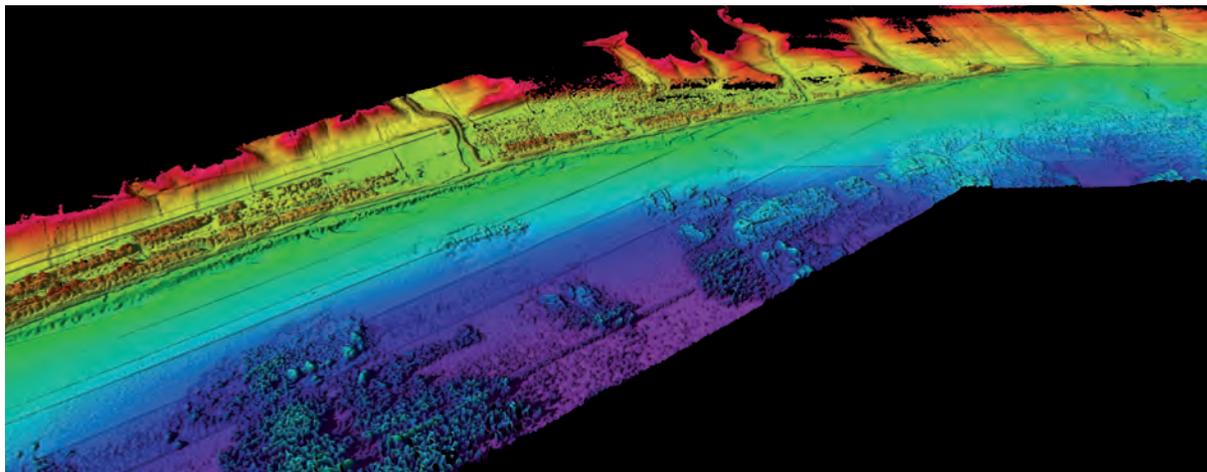


Figura 4 - Digital Elevation Model dell'area costiera di Montalto di Castro (elaborazione ISPRA, 2010).

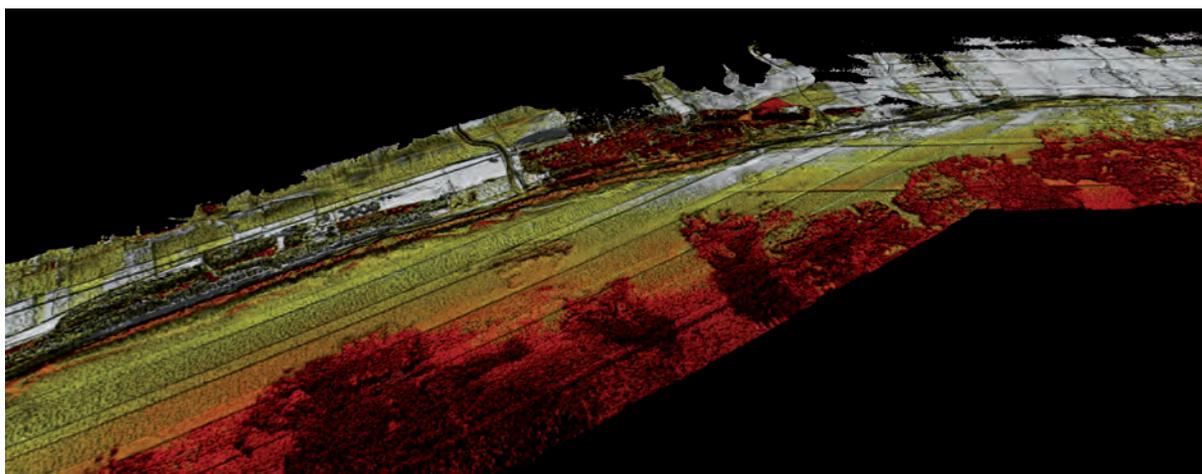


Figura 5 - Riflettanza dell'area costiera di Montalto di Castro (elaborazione ISPRA, 2010).

delle dune con un approccio innovativo. L'ambiente dunale, infatti, non può essere considerato una componente indipendente rispetto al sistema integrato Posidonia-spiaggia-duna, in quanto le dinamiche sedimentarie ed ecologiche delle tre componenti sono totalmente interdipendenti. L'evidenza di un problema (es. erosione della costa, erosione della duna, regressione della Posidonia) e la sua risoluzione, non può non tener conto degli effetti e delle influenze su tutto il sistema Posidonia-spiaggia-duna. Sulla base di tali considerazioni, il Sottoprogetto POSIDUNE ha prodotto un manuale per la caratterizzazione e la gestione delle dune costiere, che fornisce indicazioni precise per la caratterizzazione delle dune costiere, la gestione delle biomasse vegetali spiaggiate, e per il ripristino e il consolidamento delle dune costiere con tecnologie innovative. Il manuale è disponibile sul sito del progetto BEACHMED-e (www.beachmed.eu) alla sezione "Strumenti".

A supporto delle considerazioni sopraesposte in merito all'interconnessione profonda tra Posidonia-spiaggia-duna il CM-GIZC promuove ed è capofila del progetto POSEIDONE "Misure urgenti di conservazione delle *Praterie di Posidonia del Lazio settentrionale", la cui proposta è stata approvata dalla CE nel 2009 per il cofinanziamento dal programma LIFE+.

Attualmente il CM-GIZC è partner del progetto COASTANCE (Regional action strategies for coastal zone adaptation to climate change), approvato nel febbraio 2009 dal Programma MED, che ha come obiettivo l'identificazione di strategie regionali comuni nel Mediterraneo per l'adattamento delle zone costiere ai cambiamenti

climatici. Le coste caratterizzate da dune sono uno degli ambienti costieri presi a riferimento per l'individuazione degli scenari di rischio e adattamento agli effetti dei cambiamenti climatici, come l'innalzamento del livello marino, l'erosione, l'aumento dei fenomeni meteomarinari estremi (Fig. 6).

Il CM-GIZC, in particolare, è responsabile delle attività legate alla predisposizione di linee guida per gli studi di impatto ambientale delle opere e dei piani di difesa costiera, ove gli ambienti dunali giocano un ruolo primario (www.coastance.eu).

Da quanto finora riportato, quindi, risulta evidente il coinvolgimento e l'impegno del CM-GIZC nelle attività regionali riguardanti la gestione delle dune.

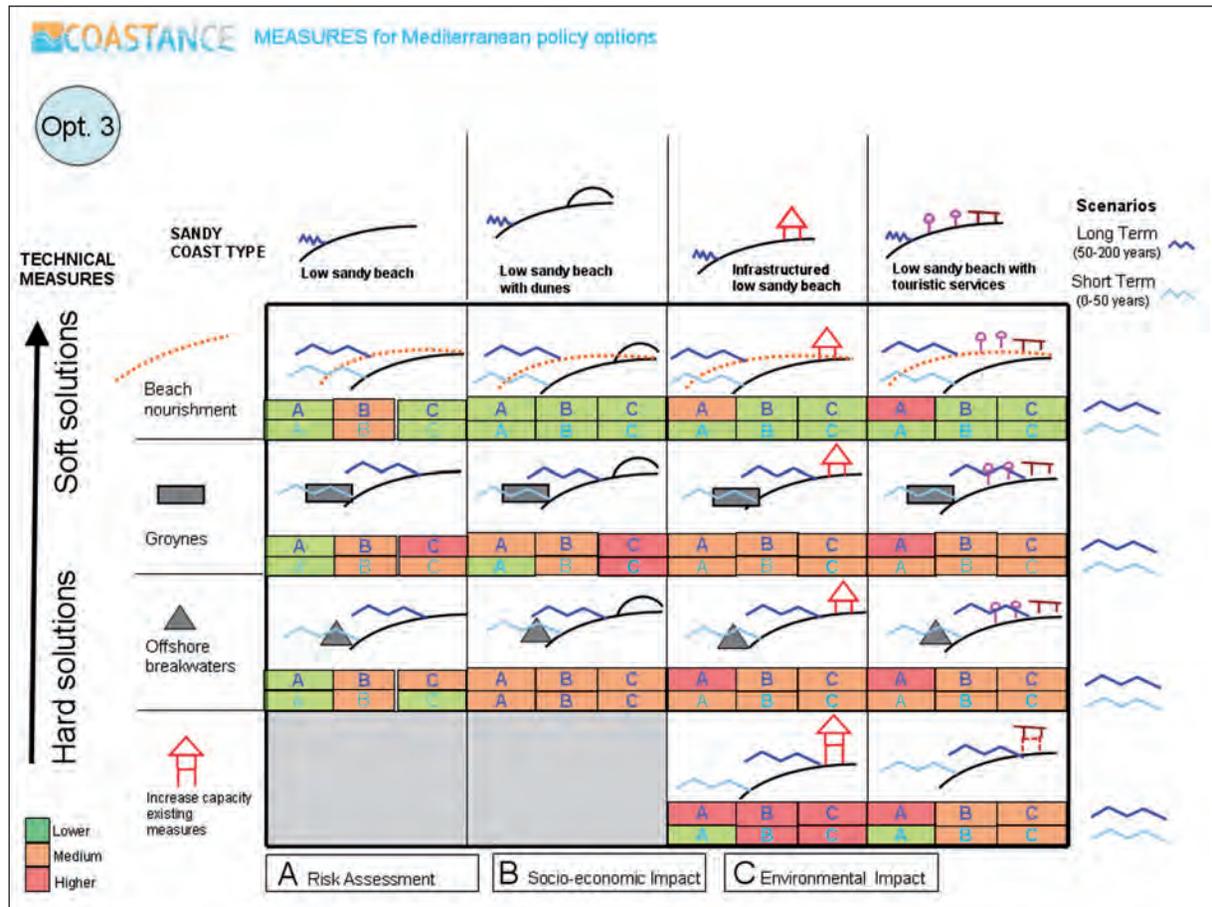


Figura 6 - Estratto del documento di lavoro COASTANCE "Strategie di adattamento al cambiamento climatico lungo le coste del Mediterraneo".

Commissione "SIDICAP" Provincia di Latina

La Provincia di Latina, ai sensi dell'art.18 (Contributo alla Provincia di Latina per interventi a difesa della costa in aree protette) della L.R. 16/2005, ha istituito una Commissione Tecnica "SIDICAP", integrata con tecnici della Regione Lazio, con il compito di svolgere attività finalizzate alla "realizzazione di studi e interventi di difesa della costa in aree protette". Il medesimo articolo di legge ha concesso alla Provincia un contributo per lo svolgimento delle suddette attività.

La Commissione SIDICAP ha preliminarmente posto l'attenzione sulla delimitazione di una fascia costiera di interesse prioritario, per quanto riguarda le problematiche di difesa dall'erosione, nell'ambito del tratto costiero di competenza della Provincia, e identificandolo con quello compreso tra Capo Portiere e Torre Paola.

Questo tratto di litorale, che si sviluppa per circa 24 Km interessando in parte il comune di Latina (7 Km) e tutta la costa del comune di Sabaudia, è particolarmente interessante sotto il profilo ambientale, inclusi gli ambienti dunali, e non a caso è inserito nel territorio del Parco Nazionale del Circeo. Per l'avvio di una procedura progettuale finalizzata alla ricostruzione ed alla difesa di questo litorale, la Commissione SIDICAP ha fornito delle indicazioni specifiche alla Provincia per l'impostazione delle attività tecniche da effettuare, ovvero:

- il monitoraggio e la caratterizzazione morfologica e granulometrica della spiaggia;
- uno studio di caratterizzazione morfologica ed ambientale e un'analisi degli scenari di intervento per la difesa della spiaggia.

Mentre le attività di monitoraggio e caratterizzazione sono state affidate al Centro di Monitoraggio della Regione Lazio, l'analisi degli scenari e lo studio ambientale sono stati affidati in convenzione all'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).

L'ISPRA ha quindi sviluppato i seguenti studi:

- caratterizzazione ambientale: analisi critica dei dati bibliografici relativamente ai principali parametri ambientali;
- campagne operative in mare per la verifica dei molluschi bivalvi di interesse commerciale presenti sulla fascia costiera;
- caratterizzazione dell'apparato dunale;
- climatologia, morfologia e dinamica litoranea, completa di simulazione degli scenari evolutivi con diverse tipologie di intervento e valutazione economica comparativa;
- predisposizione di documentazione per lo Studio Preliminare Ambientale.

L'analisi meteo-climatica e idrodinamica costiera ha evidenziato che il tratto prioritario in termini di difesa costiera è quello antistante il lago Monaci, tra Rio Martino e Idrovora Lavorazione per circa 3400 m, all'interno del Parco del Circeo (Fig. 7), formalmente confermato dalla Provincia di Latina. Questo tratto è interessato da un indebolimento ormai strutturale causato in origine dalla forte mareggiata dei primi anni ottanta che distrusse la strada litoranea in più tratti, costringendo l'interruzione del traffico veicolare lungo la strada stessa. Il sistema dunale non è più riuscito a ristabilire completamente la sua integrità, e da allora è soggetto durante le forti mareggiate a continui sbancamenti del piede della duna.

La strada litoranea che solca profondamente tutto il cordone dunale in senso longitudinale, inoltre, impedisce la naturale dinamica del sistema dunale: il naturale equilibrio dinamico del sistema di dune, e quindi la sua funzione di difesa della costa, è infatti limitato dall'imbrigliamento e dall'irrigidimento del corpo dunale causato dalla presenza della struttura stradale (manto d'asfalto, strato di stabilizzato e ciottolame).

Un opportuno intervento di rimozione di tale struttura, in parte già effettuata con l'eliminazione del manto superficiale d'asfalto (Progetto LIFE 1996-99), potrebbe garantire il ripristino delle condizioni necessarie all'in-



Figura 7 - Duna in evidente erosione nel tratto di litorale tra Rio Martino e Idrovora Lavorazione (LT) (Foto ISPRA, 2009.)

staurarsi delle dinamiche naturali del cordone dunale.

Su questo tratto è stato applicato un modello matematico per valutare gli effetti e l'evoluzione della costa rispetto a diversi scenari d'intervento, quali: l'intervento morbido con solo ripascimento, l'intervento con ripascimento protetto da pennelli, l'intervento con ripascimento protetto da barriera sommersa. Gli effetti negativi dell'intervento dato dalla combinazione degli ultimi due, ovvero la difesa "a celle", sono stati direttamente rilevati e registrati nel sito di Foce Verde, ove questo tipo di intervento è già stato realizzato ed è attivo.

Tutti gli scenari proposti prevedono anche la ricostruzione della duna, con ripascimento a sua protezione, nonché la realizzazione di opere accessorie quali:

- l'installazione di rete frangivento sulla prima fascia di antiduna (primi 10 m verso la riva);
- l'installazione di schermo frangivento a scacchiera per la protezione della seconda fascia di antiduna (fascia di 10 m retrostante la precedente);
- l'installazione di recinzione per la protezione della duna dal calpestio incontrollato e per ridurre il trasporto eolico verso le aree retrostanti (perimetro interno della fascia dunale);
- la preparazione alla vegetalizzazione del substrato e successiva vegetalizzazione con semi e talee (seconda fascia di antiduna);
- la realizzazione ex novo o ripristino di passerelle sopraelevate per l'accesso alla spiaggia, una ogni 300 m (10 accessi);
- la realizzazione di accessi per i disabili alle due estremità dell'area di intervento raggiungibili con automezzi;
- la realizzazione di accessi per la manutenzione alle due estremità dell'area di intervento raggiungibili dai mezzi.

In realtà, poiché il tratto costiero oggetto di studio ricade completamente in un'area protetta a livello nazionale (Parco del Circeo) ed è per di più sottoposta ad altre forme di tutela ambientale riferite alla normativa Europea, è evidente che il tipo di intervento di difesa ottimale è quello che non provoca modifiche nell'assetto fisico e nei caratteri di naturalità e paesaggio tipici di questo ambiente costiero, ma che garantisce il ripristino delle funzionalità dinamiche del sistema spiaggia-duna senza la realizzazione di nuove strutture naturalmente non presenti, come pennelli e barriere.

Il modello matematico prova, infatti, che l'interruzione o comunque la radicale modifica della dinamica sedimentaria ha come conseguenza la modifica dell'assetto della linea di riva e quindi i relativi effetti sulla duna e sulle infrastrutture litoranee, in particolare sottoflutto all'intervento, come si può facilmente rilevare a valle dell'intervento di Foce Verde (difesa "a celle"), a scapito in un primo momento della spiaggia, e di conseguenza del sistema dunale.

Queste considerazioni sono state riportate nella documentazione per lo Studio Preliminare Ambientale, che ha analizzato gli effetti degli scenari di intervento sulle componenti ambientali di questo tratto di litorale, al fine di supportare l'autorità competente nell'individuazione del tipo di intervento più opportuno su quest'area costiera.

Attività Agenzia Regionale Parchi

L'Agenzia Regionale Parchi-ARP, prima e finora unica Agenzia in Italia completamente dedicata al Sistema delle aree naturali protette regionali, è stata istituita nel 1993 ed è entrata ufficialmente in opera nel 2001, allo scopo di svolgere quelle attività tecnico-operative di interesse regionale volte ad assicurare lo sviluppo e l'adeguato funzionamento del Sistema regionale delle aree naturali protette. Una particolare iniziativa dell'ARP merita approfondimento, poiché è propedeutica all'istituzione di nuove aree costiere protette caratterizzate da dune. L'Assessorato all'Ambiente della Regione Lazio, infatti, nel 2009 ha richiesto all'ARP di effettuare delle prime valutazioni in merito allo stato di conservazione degli ambienti dunali costieri del Lazio e quindi di formulare delle ipotesi per l'individuazione di aree costiere protette. In collaborazione con l'Università degli Studi di Roma 3-Dipartimento di Biologia e lo Studio Associato Geosphaera, l'ARP ha analizzato la varietà di specie tipiche del sistema dunale ("specie focali") lungo il litorale laziale, evidenziando che gli ambiti meglio conservati

sono presenti all'interno dei seguenti comuni: Montalto di Castro, Fiumicino, Roma, Ardea-Anzio, Nettuno, Sabaudia, Fondi. È stato quindi calcolato un primo indice che considera la varietà delle specie tipiche dei sistemi dunali che ha consentito di zonizzare il litorale laziale, come si evince dalla Figura 8. Questo studio propedeutico consente una pianificazione sulla base di macroaree degli ulteriori interventi di analisi da parte dell'Assessorato all'Ambiente regionale, in particolare per le componenti ambientali, territoriali e socio-economiche.

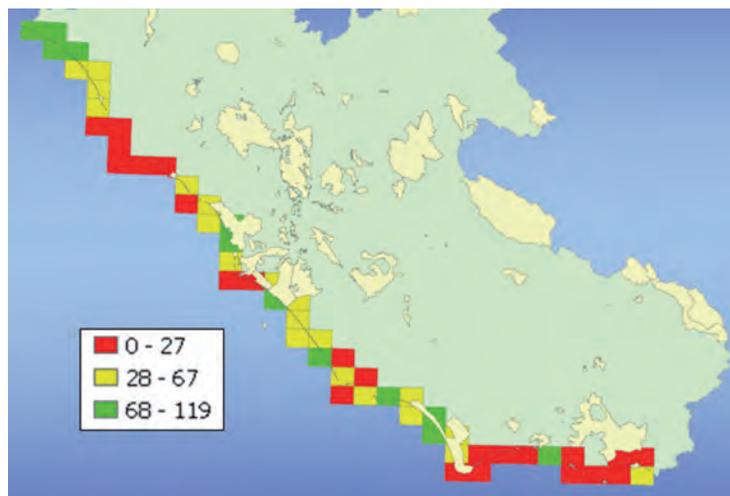


Figura 8 - Zonizzazione del litorale laziale sulla base della ricchezza di specie vegetali tipiche dei sistemi dunali (ARP, 2009).

Lo strumento comunitario LIFE per la gestione delle dune: il progetto COMEBIS

Il LIFE è uno strumento finanziario della UE che nasce nel 1992 per contribuire allo sviluppo, all'attuazione e all'aggiornamento della legislazione comunitaria nel settore dell'ambiente e, in particolare, per la conservazione della natura. I due strumenti legislativi di riferimento per la conservazione della natura sono la Direttiva 79/409/CEE, nota come "Direttiva Uccelli" (dal 15 febbraio 2010 abrogata e sostituita dalla Direttiva 2009/147/CE concernente la conservazione degli Uccelli) e la Direttiva 92/43/CEE, nota come "Direttiva Habitat".

Queste due Direttive comunitarie contengono le indicazioni per conservare l'avifauna, gli habitat e le specie di interesse comunitario elencate in appositi allegati presenti nel territorio degli Stati Membri; in particolare negli Allegati I e II della Direttiva Habitat sono elencati anche specie ed habitat considerati prioritari, ovvero maggiormente minacciati. La Direttiva "Habitat" individua la Rete Natura 2000 composta da Siti di Importanza Comunitaria (SIC), designati per la presenza di specie e habitat elencate negli Allegati I e II e Zone di Protezione Speciale (ZPS) designate per la presenza di specie ornitiche ai sensi della Direttiva "Uccelli".

Nella regione Lazio il programma LIFE ha cofinanziato diversi progetti riguardanti il recupero e la conservazione degli ambienti dunali regionali, come ad esempio il Progetto LIFE94 NAT/IT/602: Restauro e conservazione degli habitat del Parco Nazionale del Circeo; il Progetto LIFE95 NAT/IT/739: Completamento del programma per il recupero delle dune costiere del Parco Nazionale del Circeo; il Progetto LIFE02 NAT/IT/8523: Recupero ambientale della riserva naturale Saline di Tarquinia; il Progetto LIFE06 NAT/IT/50: Misure urgenti di conservazione per la biodiversità della costa centro-mediterranea (COMEBIS). Quest'ultimo progetto, concluso nel settembre del 2009, è stato proposto e coordinato dall'Area Conservazione Natura della Direzione Ambiente. Obiettivo principale del progetto era il ripristino e la valorizzazione degli habitat costieri e marini d'interesse comunitario caratteristici del litorale laziale e calabrese, parzialmente compromessi o degradati per azione diretta o indiretta dell'uomo, al fine di attuare una strategia gestionale "su larga scala" capace di avere una risonanza su altri siti Natura 2000 lungo la linea costiera (Fig. 9). Il progetto ha consentito di implementare su un territorio vasto la filosofia del programma LIFE utilizzando le metodologie e gli approcci più avanzati (es.: ICZM).

Molti sono i risultati del progetto utili alla gestione degli ambienti costieri regionali, inclusi quelli dunali.

Tra questi, di particolare interesse ed utilità, le "Linee guida per il restauro degli habitat costieri e marini



Figura 9 - Aree SIC di intervento del progetto LIFE COMEBIS (www.lifecomebis.eu).

della Rete Natura 2000” (Det. B3445 del 03/08/09); il “Piano d’azione per la conservazione dei siti costieri della Rete Natura 2000” (B4109 del 22/09/09) e i “Piani di gestione dei SIC” coinvolti nel progetto (DGR n. 960, 881, 882, 883, 885, 886, 887 del 2009). Tra le azioni del progetto, si cita quella riguardante il SIC “Litorale tra Tarquinia e Montalto di Castro”, ove è stato creato un “Giardino Botanico Dunale” per la conservazione e recupero di habitat dunali d’interesse comunitario. Maggiori informazioni sul progetto ed i suoi prodotti si possono trovare sul sito www.lifecomebis.eu.

Il Manuale di Ingegneria Naturalistica “strade, cave, discariche e coste sabbiose”

La Regione Lazio, al fine di assicurare la massima compatibilità ambientale nella realizzazione degli interventi di difesa del suolo e bonifica idraulica, ha dato un sostanziale impulso all’adozione ed alla diffusione delle tecniche d’ingegneria naturalistica. Sono state emanate norme e direttive specifiche e sono stati fissati i criteri progettuali cui devono attenersi gli interventi, volti alla mitigazione dell’impatto ambientale degli interventi nel campo della difesa del suolo.

In ambito tecnico, l’Area Difesa del Suolo della Direzione Ambiente ha realizzato un manuale di ingegneria naturalistica applicabile ai settori delle strade, cave, discariche e coste sabbiose (Fig. 10). Uno specifico capitolo è dedicato alle tecniche ed alle esperienze maturate nella Regione in merito alla stabilizzazione delle dune costiere, con la descrizione e valutazione delle tre tipologie di interventi di stabilizzazione delle dune i cui risultati sono risultati essere di maggior interesse anche in termini di esportabilità dell’esperienza in altri contesti del litorale regionale e nazionale:

- Tipologia 1. Protezione del piede dunale mediante barriera basale costituita da graticciata inclinata;
- Tipologia 2. Ricostruzione e protezione di depositi dunali embrionali mediante schermi frangivento a scacchiera;
- Tipologia 3. Ricostruzione e stabilizzazione del pendio dunale mediante consolidamento combinato costituito da viminate (graticciate) rivestite e schermi frangivento.

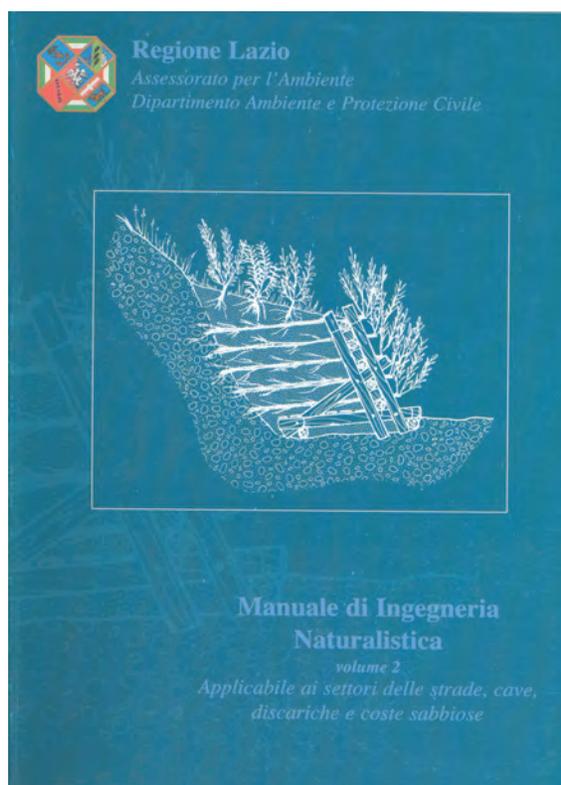


Figura 10 - Manuale di Ingegneria Naturalistica “strade, cave, discariche e coste sabbiose” (www.regione.lazio.it)

Conclusioni

Dalle attività sopra descritte si evince che la Regione Lazio ha sviluppato, nell’ambito della Direzione Regionale Ambiente, le basi informative e gli strumenti di tutela necessari a proteggere le dune del litorale laziale che le consentono di dare concretezza alle proprie competenze istituzionali.

Dalle esperienze realizzate è emerso che il monitoraggio periodico degli ambienti dunali è un’attività indispensabile nell’ottica della loro protezione e conservazione, ma anche per una pianificazione sostenibile della costa regionale. Solo un sistema di monitoraggio della costa, infatti, può garantire la conoscenza aggiornata del litorale laziale indispensabile per individuarne tendenze, evoluzioni e criticità, soprattutto in considerazione degli effetti sempre più evidenti dei cambiamenti climatici, aumento dei fenomeni meteo marini estremi, e quindi allagamenti delle piane costiere ed erosione della costa e delle dune. Il monitoraggio della spiaggia emersa e delle dune, associato al monitoraggio della spiaggia sommersa già effettuato dall’Osservatorio dei Litorali Laziali, garantirebbe la conoscenza necessaria e il supporto ad una buona gestione della zona costiera.

Il testo integrale del Manuale di Ingegneria Naturalistica è disponibile sul sito della Regione Lazio http://www.regione.lazio.it/web2/contents/ingegneria_naturalistica/

Bibliografia

- Campo V. e La Monica G.B. (2006) - *Le dune costiere oloceniche prossimali lungo il litorale del Lazio*. Studi costieri, 11: 31-41.
- Determinazione n. B4109 22/09/09 - *Piano d’azione per la conservazione dei siti costieri della Rete Natura 2000*.
- Determinazione n. B3445 03/08/09 - *Linee guida per il restauro degli habitat costieri e marini della Rete Natura 2000*.
- DGR n. 960/09 - *Piano di gestione SIC “Fondali tra le foci del Torrente Arrone e Fiume Marta”*.

- DGR n. 881/09 - *Piano di gestione SIC "Litorale di Torre Astura".*
- DGR n. 882/09 - *Piano di gestione SIC "Macchiatonda".*
- DGR n. 883/09 - *Piano di gestione SIC "Isola Sacra".*
- DGR n. 885/09 - *Piano di gestione SIC "Litorale tra Tarquinia e Montalto di Castro".*
- DGR n. 887/09 - *Piano di gestione SIC "Secche di Tor Paterno".*
- DGR n. 887/09 - *Piano di gestione SIC "Macchia Grande di Focene e Macchia dello Stagneto".*
- Montinaro S. e Tufano M. (2009) - *Prime valutazioni dello stato di conservazione degli ambienti dunali costieri del Lazio: ipotesi per il reperimento di Aree Protette costiere.* Presentazione al Convegno ISPRA-CATAP "SOS DUNE: Stato, problemi, interventi, gestione", Roma 23/10/09.
- Progetto Nazionale PRIN (2002) - *Depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna.*
- Progetto EuroSION (2004) - www.euroSION.org
- Regione Lazio (2007) - *Beachmed-e: la gestione strategica della difesa dei litorali per uno sviluppo sostenibile delle zone costiere del Mediterraneo.* 1° Quaderno Tecnico (Fase "A"), pp. 142.
- Regione Lazio (2008) - *Manuale di Ingegneria Naturalistica, Applicabile ai settori delle strade, cave, discariche e coste sabbiose*, 2: 363-393.
- Regione Lazio (2008) - *Beachmed-e: la gestione strategica della difesa dei litorali per uno sviluppo sostenibile delle zone costiere del Mediterraneo.* 2° Quaderno Tecnico (Fase "B"), pp. 144.
- Regione Lazio (2008) - *Beachmed-e: la gestione strategica della difesa dei litorali per uno sviluppo sostenibile delle zone costiere del Mediterraneo.* 3° Quaderno Tecnico (Fase "C"), pp. 160.

Ricevuto il 31/03/2010 , accettato il 21/07/2010.

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

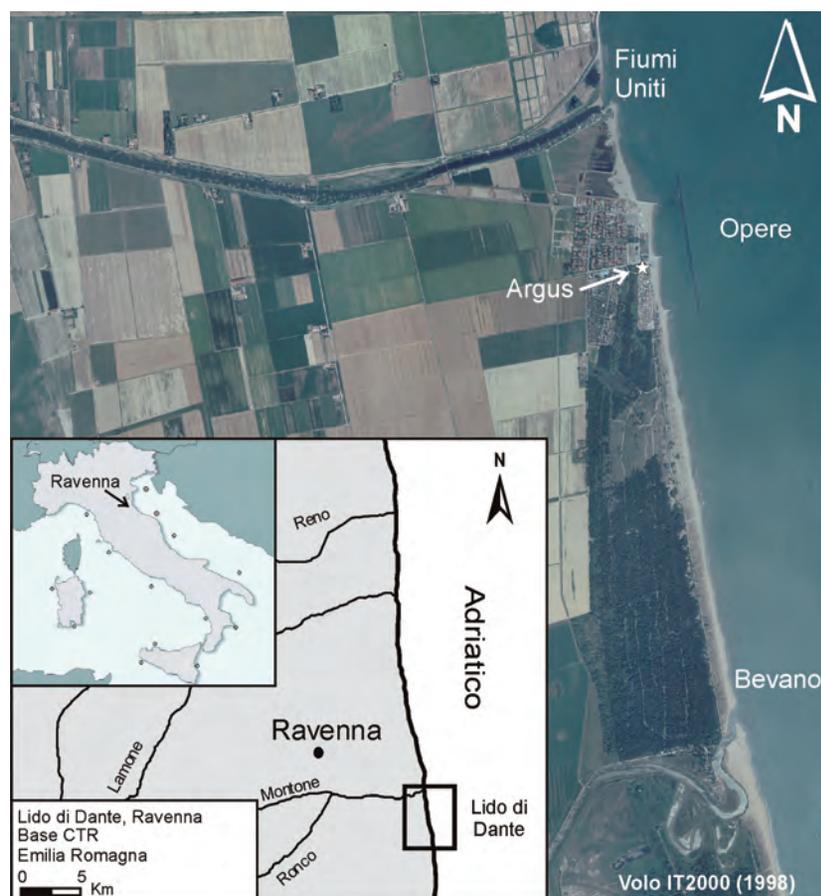


Figura 1 - Localizzazione del sito di studio.

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 m³ 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 m³), 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 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

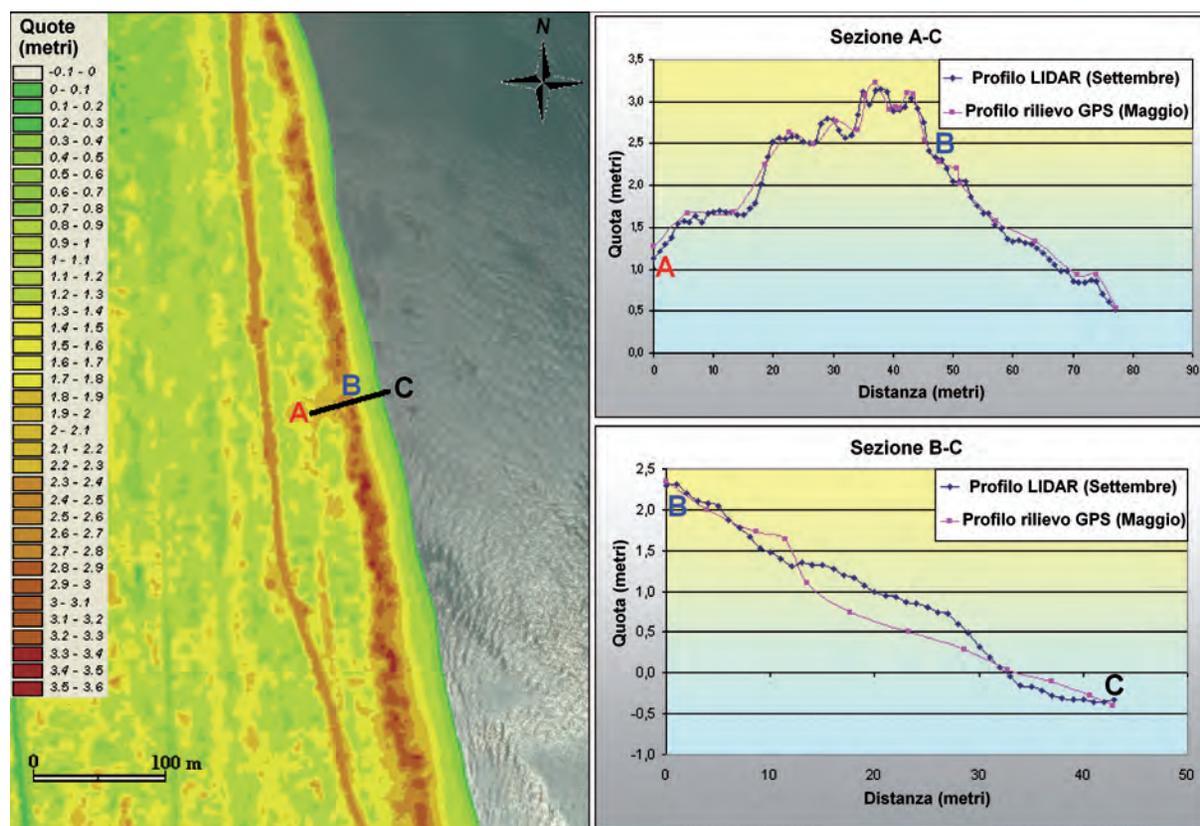


Figura 3 - Modello digitale del terreno del tratto di costa a Foce Bevano, prodotto con dati Lidar 2004 e sezioni topografiche: la Sezione A-C (in alto) mostra il confronto tra il dato Lidar ed il dato ottenuto con rilievo DGPS-RTK svolto contemporaneamente al volo; la Sezione B-C (in basso) rappresenta 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 GPS		GPS	GPS				GPS 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. Nuove 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.

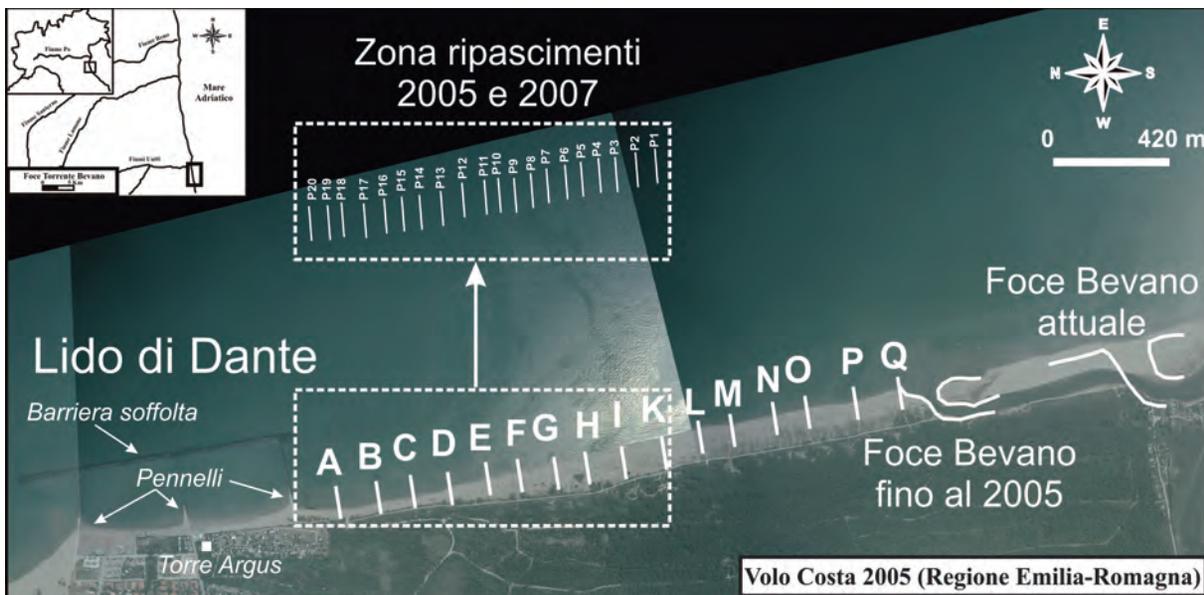


Figura 4 - Reti di profili topografici rilevati nel corso del monitoraggio 2001-2007. Da notare che oltre al monitoraggio a lungo termine (lettere maiuscole), nel febbraio- maggio 2005 e nel maggio 2007 sono stati svolti rilievi di dettaglio prima e dopo gli interventi di ripascimento.

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 m². 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.

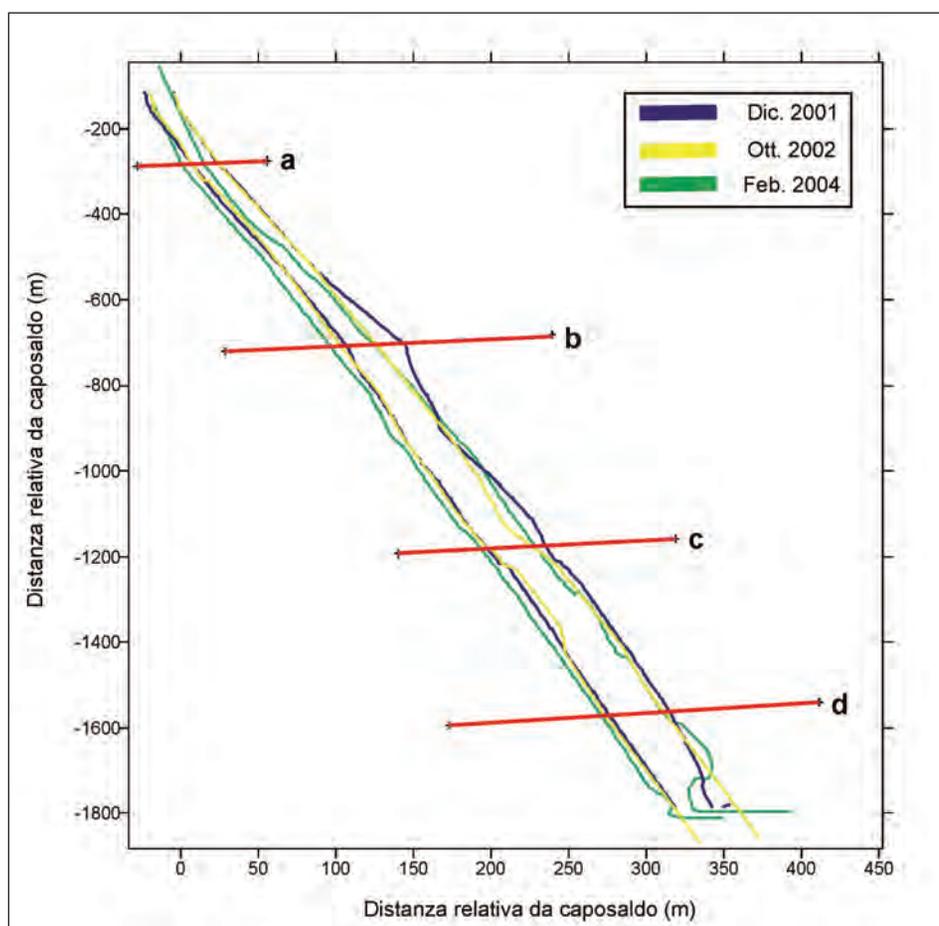


Figura 5 - Linee di riva e piede della duna a confronto da Dicembre 2001 a Febbraio 2004. Asse x, distanze in m dal caposaldo; asse y, distanze in m dal caposaldo. Poiché i rilievi erano stati effettuati con la stazione totale, le distanze sono riferite al caposaldo di inquadramento locale che era stato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

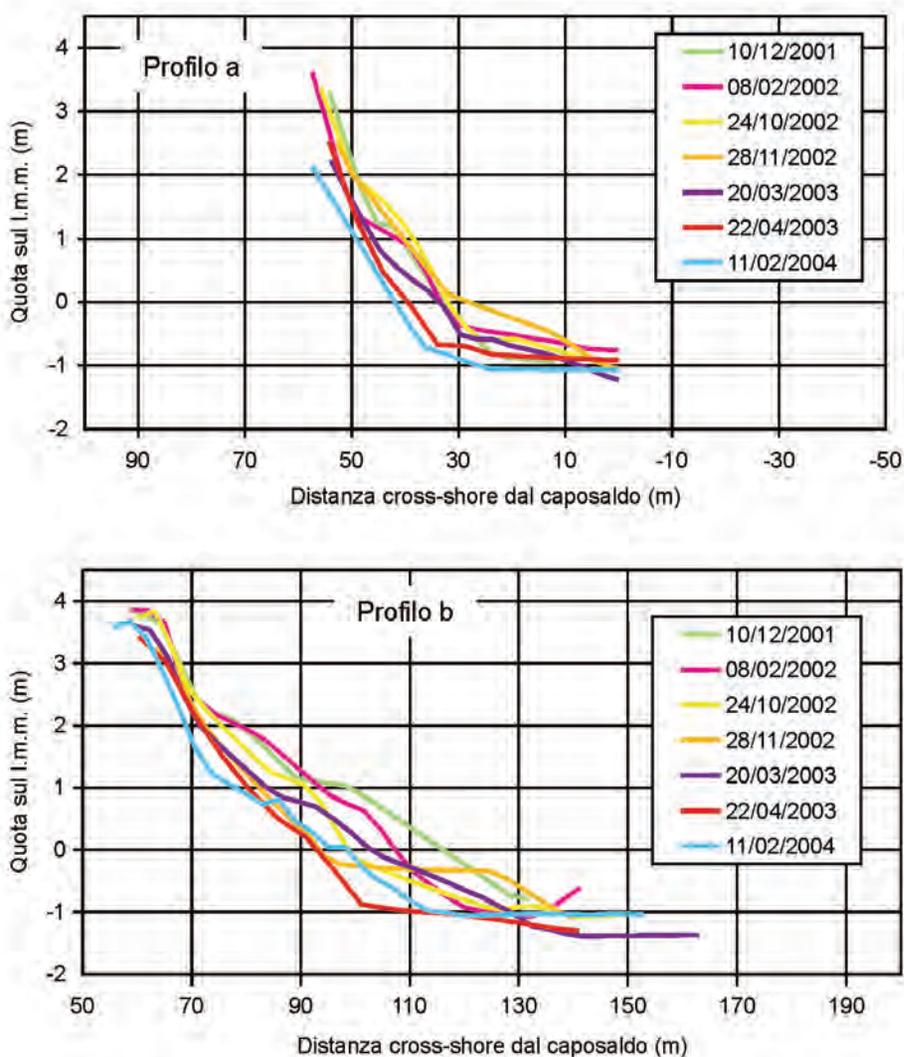


Figura 6 - Profili "tipo" scelti per descrivere l'evoluzione morfologica nel periodo 2001-2004 della parte centro-settentrionale del cordone dunale e della spiaggia. Profilo "a", adiacente al pennello Sud della zona protetta dalle strutture; profilo "b", localizzato nella parte centro-settentrionale. 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

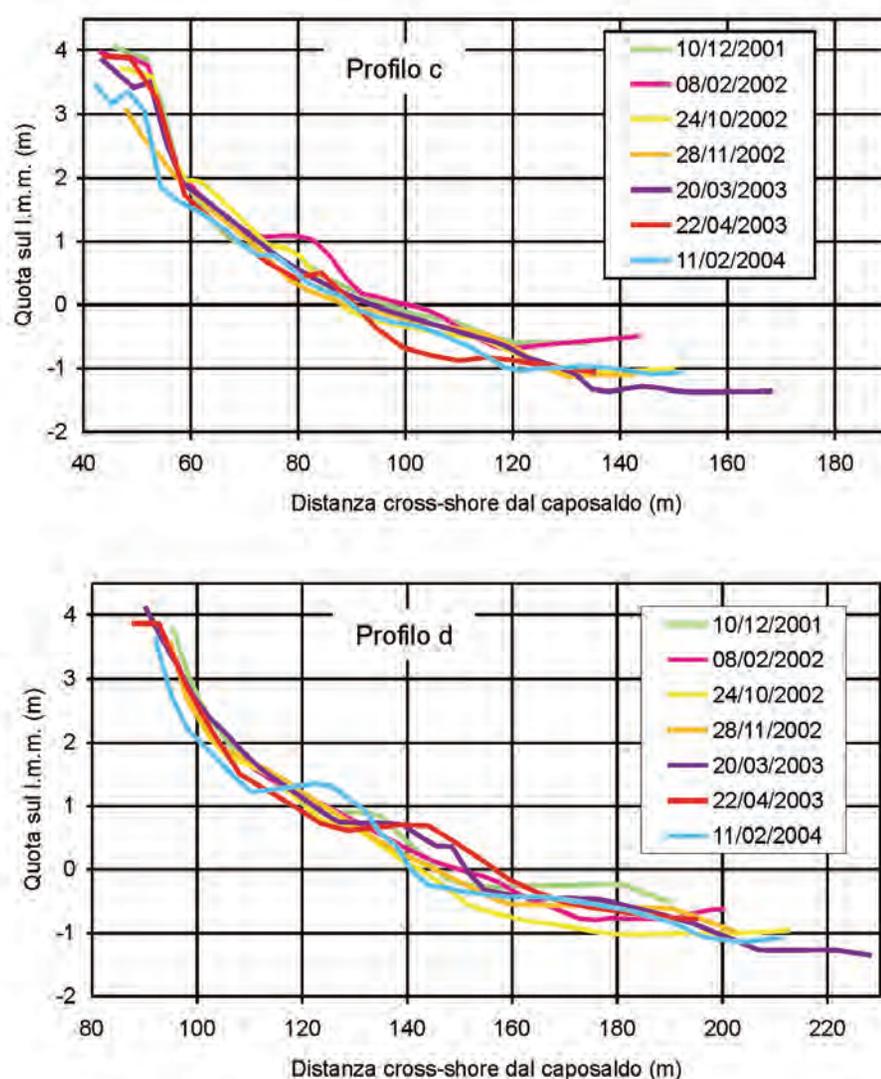


Figura 7 - Profili "tipo" scelti per descrivere l'evoluzione morfologica nel periodo 2001-2004. Profilo "c" localizzato nella zona centro-meridionale; profilo "d", localizzato nella zona Sud. Le distanze sono riferite al caposaldo di inquadramento locale che era stato installato in zona.

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)

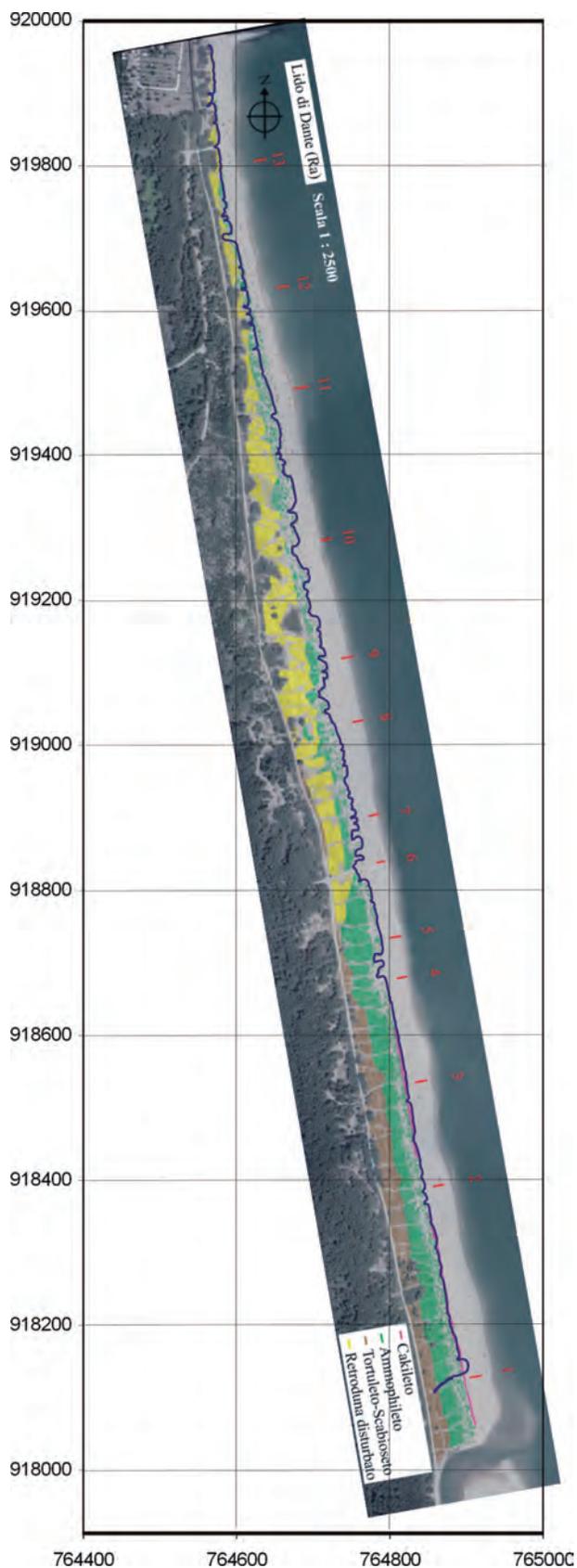


Figura 8 - Linea del piede della duna rilevato nel mese di Ottobre 2003 sovrapposta alla foto eseguita nel Giugno 2002; in rosso il numero dei profili fissati sul sito per lo studio ripetuto dell'area nel tempo. La mappatura della fascia di duna vegetata è stata svolta utilizzando questi ultimi profili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

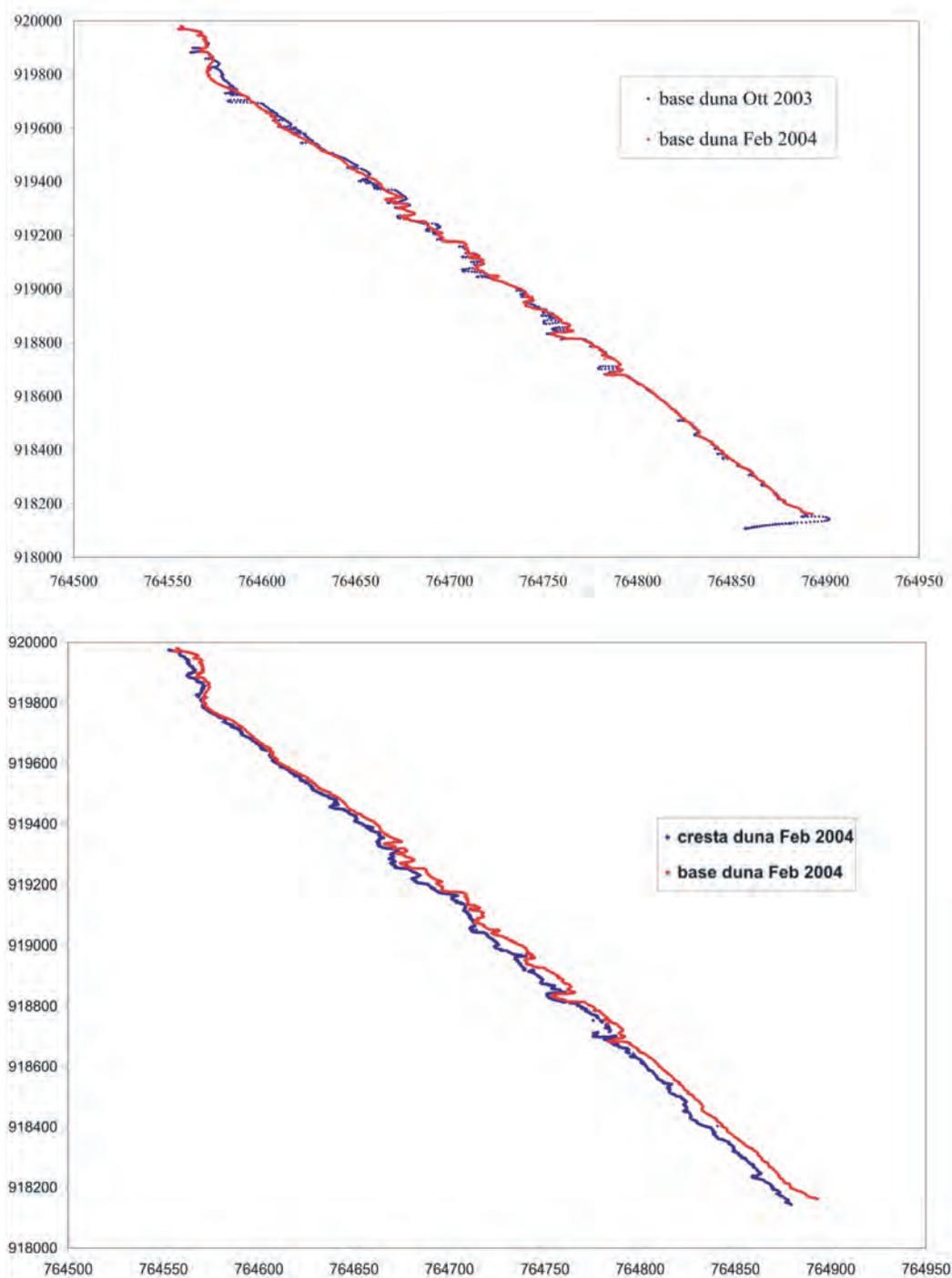


Figura 9 - Linea del piede e della cresta della duna rilevato tramite DGPS-RTK nei mesi di Ottobre 2003 e Febbraio 2004. Sistema di coordinate: UTM32* ED50.



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).

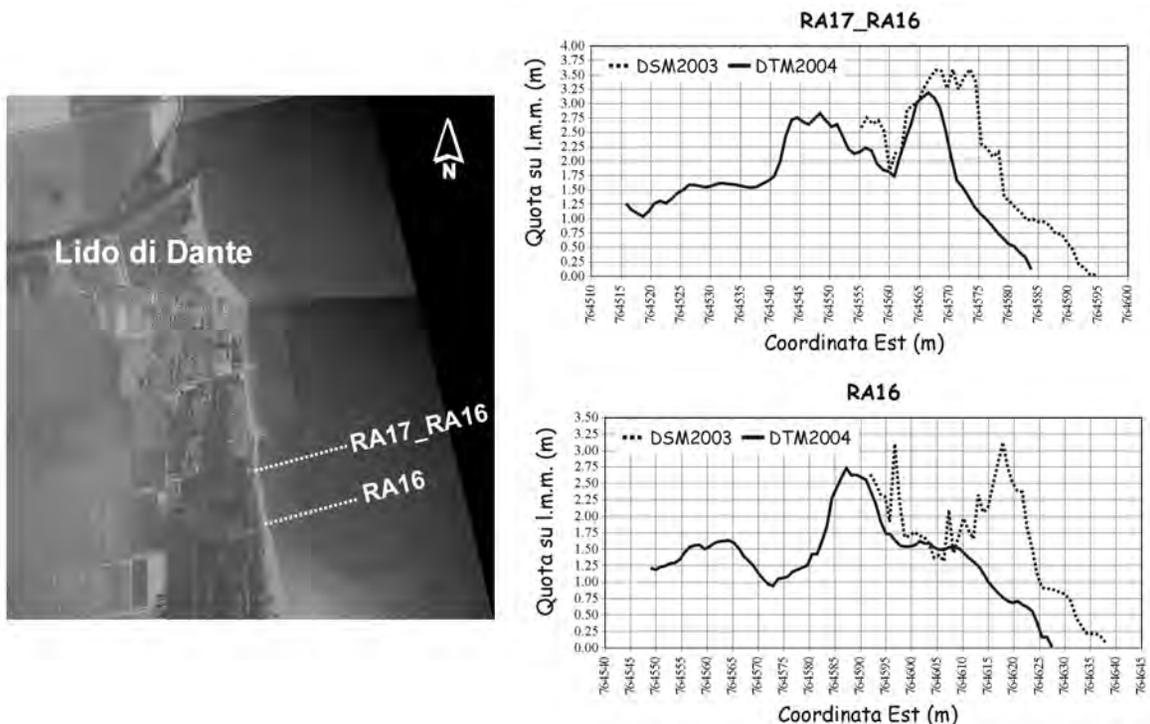


Figura 11 - Impatto della mareggiata di Settembre 2004 sulle dune e sulla spiaggia della zona Nord: confronto tra un rilievo Lidar del 2003 ed uno del 2004, effettuato immediatamente dopo l'evento estremo (dati da Ciavola et al., 2007a; Ciavola et al., 2007b).

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 m³), 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

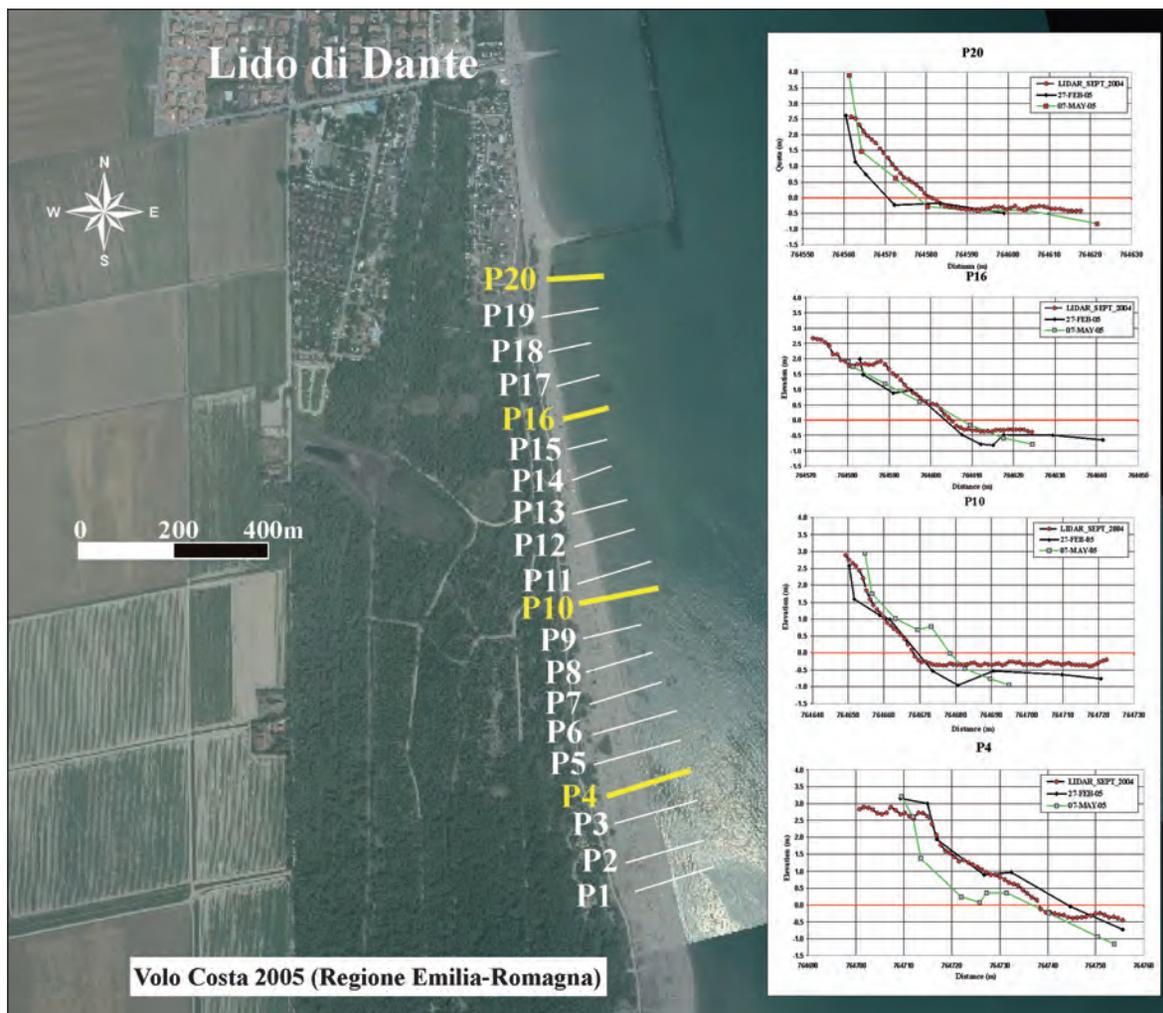


Figura 12 - Confronto tra quattro sezioni tipo pochi giorni dopo la mareggiata eccezionale di Settembre 2004 (linea rossa), prima del ripascimento nell'inverno 2004/2005 (linea nera) e qualche mese dopo l'intervento (linea verde).

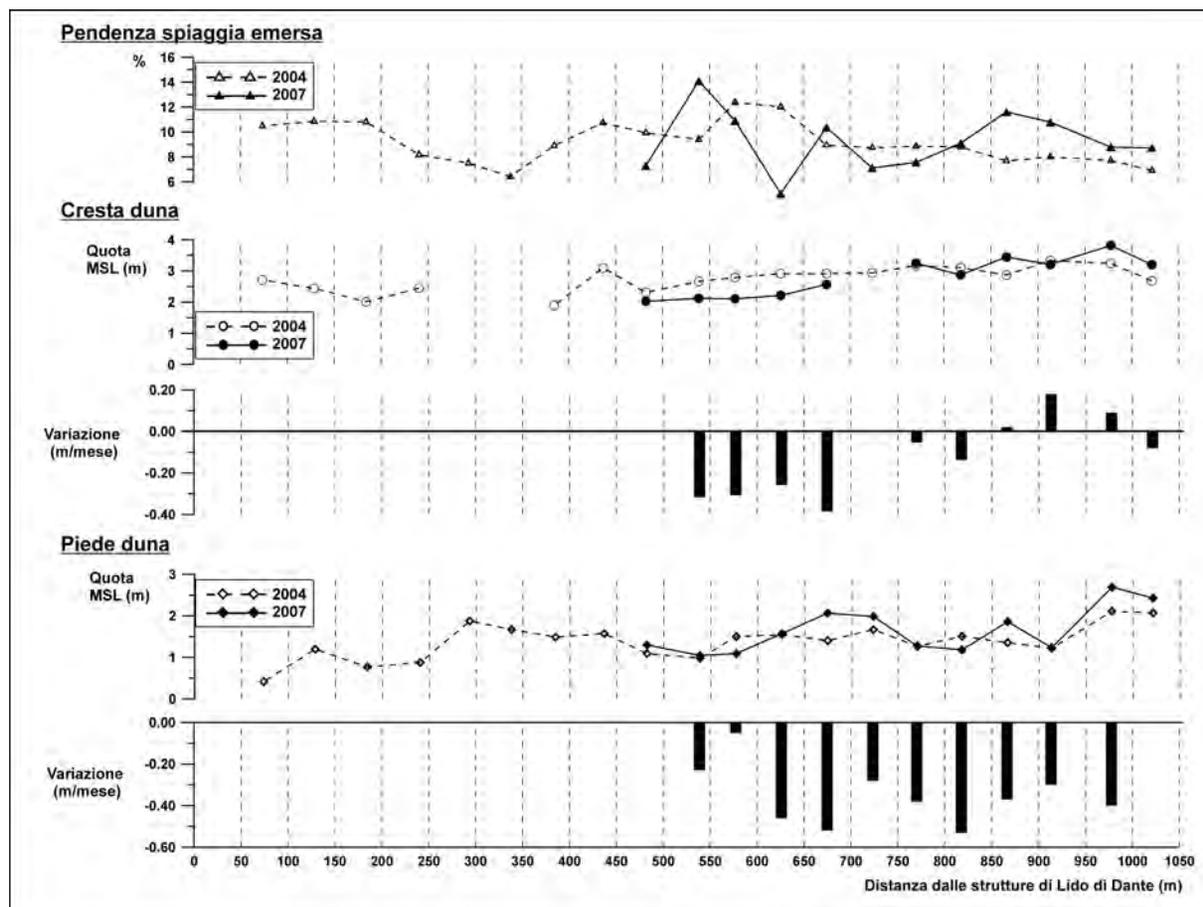


Figura 13 - Confronto tra le caratteristiche della spiaggia e del cordone dunale dopo la mareggiata eccezionale di Settembre 2004 e dopo il ripascimento del maggio 2007.

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 (≤ 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

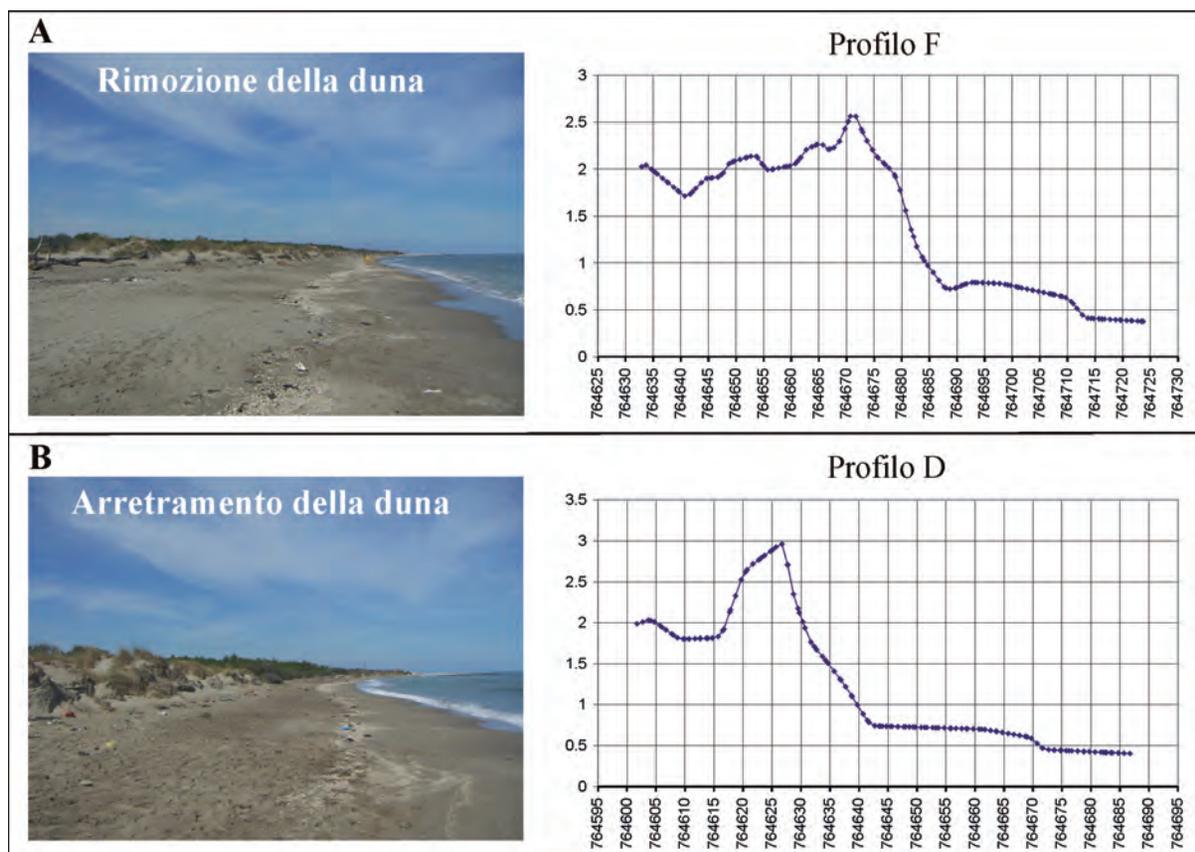


Figura 15 - Stati erosivi osservati nel corso del monitoraggio. Nel caso (A) la duna viene scavalcata durante le mareggiate; nel caso (B) si assiste ad una progressiva erosione frontale.

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.

Il progetto di riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di foce Bevano, Comune di Ravenna (RA)

Claudio Miccoli¹, Mauro Ceroni², Ennio Malavolta² e Mario Castelli²

¹ Regione Emilia-Romagna - Direzione Generale Ambiente, Difesa del Suolo e della Costa - via dei Mille 21 - 40121 Bologna Tel. +39-0544-249726 Fax +39-0544-249799

E-mail: cmiccoli@regione.emilia-romagna.it

² Regione Emilia-Romagna - Servizio Tecnico di Bacino Romagna, sede di Ravenna - Piazza Caduti per la Libertà 9 - 48121 Ravenna Tel. +39-0544-249711 Fax +39-0544-249799

E-mail: mceroni@regione.emilia-romagna.it

Riassunto

L'anomalo andamento del tratto terminale di foce del Torrente Bevano ha generato, soprattutto a partire dall'evento meteorologico del 1996, gravi fenomeni di erosione sia delle dune costiere che della retrostante pineta, a cui si deve aggiungere l'innalzamento del rischio di alluvione per i retrostanti territori a causa dell'impossibilità dello stesso Bevano di smaltire in tutta sicurezza eventuali ondate di piena. L'intervento di riqualificazione funzionale del tratto di foce del T. Bevano coniuga la necessità di garantire sicurezza idraulica con quella di tutelare un importante sistema ambientale presente alla foce del Bevano.

Dopo la fase di Valutazione di Impatto Ambientale e la valutazione delle alternative di progetto possibili è stata affrontata la fase operativa. Sono state realizzate due nuove foci (delle quali una entra in funzione solo in caso di piena) e con i materiali dragati per la loro realizzazione (sia nella spiaggia emersa che sommersa) è stata occlusa quella "naturale"; la riva di neoformazione è stata protetta con una palificata e tramite una gaveta (realizzata in legno) si è mantenuto il collegamento idraulico tra il corso d'acqua e la laguna interclusa; si è impostata, anche con fascinate morte e vive, la ricostruzione della duna.

L'intervento è stato quindi progettato con un basso impatto ambientale al fine di risolvere un problema idraulico, realizzando contemporaneamente la ricostruzione del sistema dunoso che rappresenta l'elemento caratterizzante della foce del T. Bevano. E' la prima volta che, in Emilia-Romagna, le dune riconquistano territorio in modo così importante e che si presenta l'occasione in cui sperimentare tecniche di ingegneria naturalistica in un vero e proprio laboratorio naturale, e per monitorare e migliorare in corso d'opera un intervento nato dalla collaborazione di tanti Enti con visioni e missioni diverse per lo stesso ambiente.

Parole chiave: duna, ambiente, fiume, spiaggia, lavori, studi, impatto ambientale.

Abstract

The project goal is to plan the management of watercourse works involving the mouth of river Bevano and its surroundings, on the north Adriatic Sea coast. The river mouth is located in a particularly important physiographic situation, where the hydrogeological water safety issue intersects with the need to manage an important environmental protected system.

The most important part of the protected area is set up around the territory near the mouth of river Bevano, but the influence of the system involves the entire basin of the river and all related inland territory and part of the coastal system. The project (carried out with the help of the University, and national and local authorities) took into account the need to synthesise such needs in "the achievable project." This project does not fulfil the criteria for a perfect classic hydraulic work because it partially ignores the durability of the work. This parameter is sacrificed as a result of typological choices and quality of materials more suitable to the particular environment. The reduced durability of works needed to plan the works with the policy of the need of constant maintenance of the works themselves in time. After undergoing environmental impact assessment and evaluation of work alternatives the active phase of such works took place in spring 2006. Two new river mouths were created, a primary mouth and a secondary one which comes into operation only when the hydrometric level of the river is high.

Sand material (dredged from emerged and submerged beach facing the new river mouths) was used to occlude the natural pre-existing river mouth and to rebuild the coastal dune eroded by the river mouth migration to the north. The newly-formed river bank was protected on the north side by a palisade. The remnant lagoon landlock maintains a hydraulic connection to the river and sea system through an opening breach which allows water exchange and oxygenation during tidal water movement.

A complex intervention, hence, to solve a major hydraulic problem while aiming at producing the lowest environmental impact possible. This fact has an added value, because the reconstruction criteria deal with the existing natural dune system that has always characterised the mouth of T. Bevano. This is the first time that dunes "re-gain" territory in this part of Italy. This experience has to be valued as a unique natural laboratory for testing techniques for bioengineering and environmental reconstruction, monitoring and improving a project and intervention born from the collaboration of many Public authorities with different visions and missions for the same environment.

The peculiar environmental situation brings out the need for constant adaptation of the actual and future maintenance works to the changes related to reactions of the river mouth in a highly dynamic system.

Keywords: river mouth, Bevano, dune, environment, beach, coastline, environmental impact.

Premessa

Il "Progetto esecutivo di Riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano (2005)" è stato redatto nella consapevolezza di effettuare un intervento in un'area molto delicata (Fig. 1).

Tutto il contesto di Foce Bevano era già da tempo caratterizzato da un evidente squilibrio a causa della progressiva erosione delle dune a nord e conseguente esposizione del retrostante territorio al rischio di ingressione marina (Fig. 2). In passato erano già stati ipotizzati diversi interventi, sempre rimandati nel timore di impattare eccessivamente su un'area di altissimo pregio ambientale. In occasione dell'evento alluvionale che ha colpito la Romagna nell'autunno 1996 l'intero sistema del Bevano ha dimostrato la sua criticità idraulica. Dopo questo evento sono stati stanziati fondi per la mitigazione del rischio idraulico, tra cui la sistemazione della foce del Bevano. Il Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli - sede di Ravenna (di seguito STB) è stato individuato dalla Regione Emilia-Romagna come soggetto attuatore dell'intervento in quanto dotato dei mezzi tecnici e della esperienza per realizzare tale opera. Il finanziamento proveniva da fondi stanziati con la Legge n. 226 del 13 luglio 1999 e la L. R. n. 5 del 2000, con i quali è stato attivato un programma di interventi strutturali di emergenza e di messa in sicurezza dei punti critici delle reti idrauliche e della costa, dando conto della rilevanza e della necessità di soluzione della problematica del bacino del torrente Bevano e dei relativi comprensori di bonifica, in cui sono localizzati numerosi centri urbani e risiedono attività produttive di notevole importanza.

In sede di valutazione preliminare da parte del STB, si è ritenuto opportuno ricercare una soluzione condivisa con tutti gli enti coinvolti nella gestione dell'area e si è convenuto sulla opportunità di attuare in modo volontario le procedure di valutazione di impatto ambientale, come previsto dalla legislazione regionale (LR 9/99), al fine di garantire la migliore valutazione degli impatti del progetto sull'ambiente e il confronto tra diverse scelte di intervento possibili.

Il STB ha quindi attivato un apposito gruppo di lavoro, con la partecipazione di tecnici di Enti diversi, (Auto-

rità dei Bacini Regionali Romagnoli, Provincia di Ravenna, Parco regionale Delta del Po, Università, Corpo Forestale dello Stato, Comune di Ravenna) al fine di predisporre lo Studio di Impatto Ambientale (*Studio di impatto ambientale: Riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano - 2005*).

La scelta operativa è stata quella di raccogliere tutto il materiale conoscitivo disponibile sulla zona interessata dagli effetti del progetto e valutare quali approfondimenti compiere, per individuare la soluzione ottimale al problema.

Il risultato del progetto doveva essere:

- 1 - velocizzare il deflusso a mare delle piene, migliorando le capacità di scolo dei territori a monte;
- 2 - ricostruire un tratto di 500 metri di duna costiera erosa dal movimento verso nord della foce;
- 3 - spostare verso sud la Foce del Bevano.

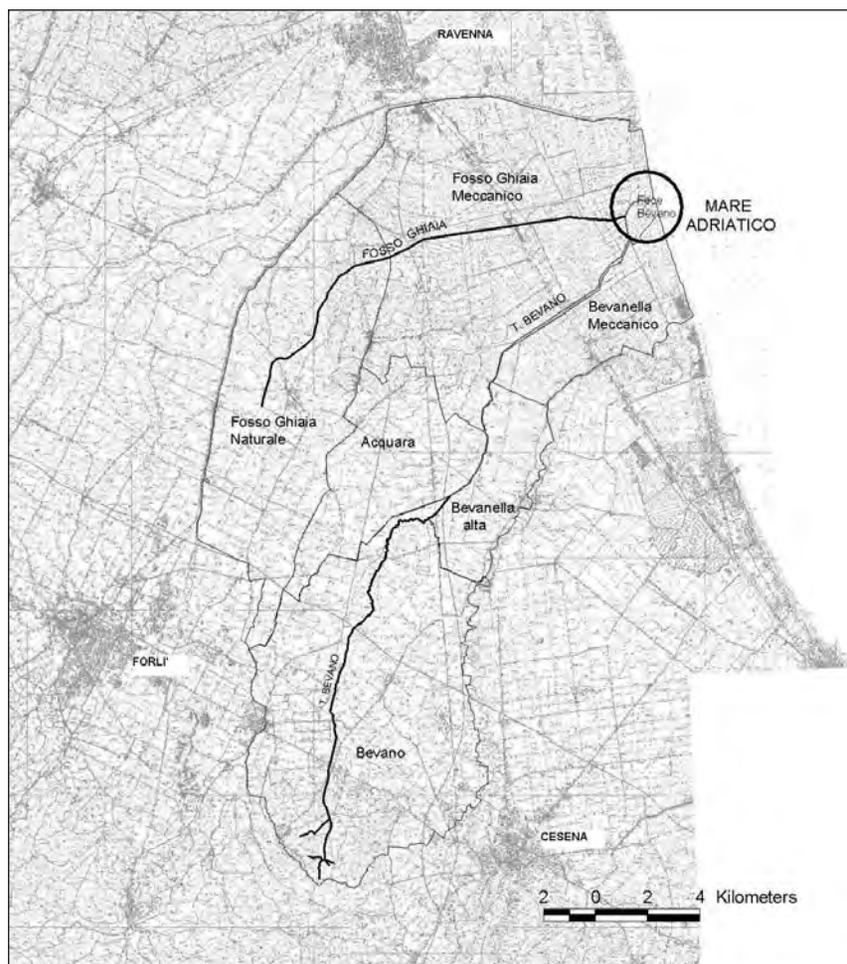


Figura 1 - Localizzazione della zona di intervento.

Il problema tecnico

L'intero bacino, costituito dal torrente Bevano, dal Fosso Ghiaia e dagli altri canali di bonifica, comprende il territorio situato tra il fiume Savio, a sud est, il fiume Ronco a nord ovest ed il crinale spartiacque che da Bertinoro va verso San Vittore di Cesena (a sud) e verso Forlimpopoli (a nord). Il territorio interessato, dall'estensione di circa 308 kmq, si sviluppa per circa il 30% nel territorio della provincia di Forlì e per il restante 70% nella provincia di Ravenna. E' quindi un bacino di piccola estensione e quasi esclusivamente di pianura, in quanto sia il suo ramo principale (Bevano), che i suoi affluenti, traggono origine dalle pendici delle colline sottostanti Bertinoro, ad altezze sui 150-170 metri sul livello del mare e, dopo un percorso di alcuni chilometri, entrano in

zona di pianura. Questi corsi d'acqua sono molto ripidi nel tratto iniziale e non hanno sorgenti proprie, per cui vanno in secca molto rapidamente nei periodi di scarsa piovosità.

Il Bevano, per le caratteristiche del suo bacino idrografico, è soggetto a piene improvvise ma brevi. Nella zona di foce la dinamica prevalente è per gran parte dell'anno quella marina, caratterizzata da un trasporto solido costiero direzionato da sud verso nord e da una forzante anemometrica dominante con direzione sud-est.

Queste condizioni sono quelle che provocano la migrazione della foce e la conseguente erosione della duna. Negli ultimi anni la foce del torrente Bevano ha quindi mostrato una crescente tendenza a migrare sempre più verso nord (Fig. 2). La foce deviata costituiva un ostacolo fisico al deflusso verso mare in occasione delle piene.



Figura 2 - La migrazione della foce del torrente Bevano nel tempo.

La direzione di movimento è passata progressivamente da sud a nord (notare la presenza di altri due meandri già tagliati in passato). Dal 1998 al 2005 il movimento verso nord è aumentato progressivamente di velocità.

La difficoltà dell'acqua a sfociare a mare si ripercuoteva a monte, facendo innalzare il livello dell'acqua nel fiume e contribuendo in modo particolare alla crisi dell'autunno del 1996 (Fig. 3).



Figura 3 - Il Bevano in occasione della rotta dell'autunno del 1996.

Considerato che parte del territorio retrostante è posto al di sotto o subito sopra il livello del mare, viene reso difficile lo scolo anche per i canali artificiali consorziali che drenano tutto il territorio retrostante.

Con simili condizioni anche una decina di centimetri di dislivello dell'acqua nel fiume obbligano la bonifica ad attivare sistemi di pompaggio al fine di mantenere asciutte queste aree. I calcoli idraulici derivanti dallo studio della Autorità di Bacino (*Piano stralcio per il rischio idrogeologico - 2003*) hanno individuato una possibilità di risalto idraulico di circa 20/25 cm, più che sufficiente a causare seri problemi al sistema di scolo dei territori retrostanti, come nel caso del canale Fosso Ghiaia, il cui scolo è totalmente a gravità e non aiutato da opere di sollevamento artificiale.

Per questo motivo le zone della Standiana e di Fosso Ghiaia (poste a 4 km a monte della foce) hanno avuto negli ultimi anni grossi problemi in caso di piogge ed a questo ha contribuito significativamente anche la difficoltà di sbocco a mare del torrente Bevano. I terreni agricoli posti subito ad ovest della pineta costiera hanno una quota di circa -0,50 m. s.l.m.m., che digrada fino ai -1,80 m. s.l.m.m. della zona Standiana.

In aggiunta a questo la foce del Bevano, migrando verso nord, continuava ad erodere la duna esponendo ad erosione e quindi ad ingressione marina il retrostante territorio caratterizzato anche da una importante pineta costiera (Fig. 4). In occasione di grosse mareggiate, senza la protezione della duna, il mare era già penetrato nei canali presenti all'interno della pineta, confermando le previsioni di rischio appena evidenziate.



Figura 4 - La zona di vecchia foce con l'erosione della duna e l'ingressione del mare verso la pineta retrostante.

Il problema ambientale

Tutta la zona di foce Bevano, che è uno dei pochissimi tratti non urbanizzati della costa Romagnola, è protetta con numerosi vincoli a tutela di flora, della fauna e come bellezza naturale nel suo complesso. Il problema principale di un intervento è quindi quello di non interferire con l'equilibrio che questa zona ha raggiunto. Sono presenti due meandri abbandonati con una vegetazione di palude, tra cui una specie molto rara, la "*Salicornia veneta*" (Figg. 5 e 6) e anche molte specie di animali rari e protetti.

L'area è un Sito di Importanza Comunitaria (SIC) ai sensi della Direttiva 92/43/CEE e anche una Zona di Protezione Speciale (ZPS) ai sensi della Direttiva 79/409/CEE.

Il Sito è denominato IT4070009 "Ortazzo, Ortazzino, Foce del Torrente Bevano".

Per valutare l'impatto dell'intervento da svolgere sull'Habitat e sulle specie protette (flora e fauna), all'interno dello Studio di Impatto Ambientale è stata predisposta una Valutazione di Incidenza, ai sensi del D.P.R. n. 357 dell'8 settembre 1997 (*Studio di impatto ambientale -Riquilificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano*, 2005).

Figura 5 - La *Salicornia veneta*.Figura 6 - I meandri con *Salicornia veneta* (foto: Massimiliano Costa).

Lo studio di impatto ambientale

Il contesto ambientale del progetto è stato analizzato sotto i molteplici punti di vista in precedenza evidenziati. Per la predisposizione dello Studio di Impatto Ambientale (*Studio di impatto ambientale - Riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano*, 2005), sono state valutate a livello preliminare, sette possibili ipotesi di intervento:

- 1 - taglio del penultimo e ultimo meandro attraverso il villaggio abusivo;
- 2 - taglio intermedio dell'ultimo meandro e chiusura foce attuale;
- 3 - taglio dell'ultimo meandro e chiusura foce attuale;
- 4 - nessun intervento;
- 5 - apertura di nuova foce e mantenimento dell'attuale;
- 6 - situazione a tre punti di uscita parziale;
- 7 - chiusura vecchia foce, apertura di foce intermedia e ulteriore uscita parziale a scolmatore.

Per ciascuna ipotesi sono stati valutati i pro e i contro dal punto di vista tecnico ed ambientale.

Data la particolarità della situazione, alcuni tipi di analisi sono stati compiuti a scala vasta (di bacino) in relazione all'influenza dei parametri da valutare, mentre altre analisi hanno necessariamente dovuto limitare l'ambito operativo ad una zona molto più ristretta, corrispondente all'area di intervento.

Sono stati raccolti ed analizzati tutti i dati disponibili nelle banche dati territoriali ed ambientali degli enti pubblici locali ed inoltre sono stati utilizzati dati tecnici specifici predisposti per progetti e studi nell'ambito territoriale di interesse.

Le valutazioni idrauliche hanno tenuto conto delle caratteristiche dell'intero bacino del torrente Bevano e del sistema di bonifica collegato. Le valutazioni sulla qualità delle acque fluviali, sulla geologia e idrologia sono state anch'esse formulate ad una scala vasta, in relazione al tipo di problematica esaminata.

I dati sul comportamento fisico dell'ambiente marino, sono stati raccolti per l'area che va da Lido di Savio a Lido di Dante, mentre per la qualità delle acque marine si sono ritenuti sufficienti i dati delle due stazioni di campionamento nei pressi della foce del torrente Bevano, monitorate da ARPA ed ubicate a sud e a nord della foce.

Le difficoltà principali sono dovute alla indeterminatezza del trasporto solido lungo costa, che ha influenzato lo spostamento della foce del torrente Bevano verso nord.

Trattandosi di un'opera che deve integrarsi con l'ambiente circostante, occorre prevedere la possibilità di interventi periodici per il mantenimento degli obiettivi raggiunti.

E' stata infine scelta soluzione N. 7 (Fig. 7), (*Studio di impatto ambientale: Riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano* - 2005) autorizzata con le Deliberazioni di Giunta regionale n. 2138 del 2 novembre 2004 e n. 842 del 6 giugno 2005, che prevedeva le seguenti azioni:

- apertura di una nuova foce in posizione intermedia tra quella attuale e l'ultimo meandro, la quale consente uno scambio continuo di acqua mare/fiume anche in caso di bassa marea;
- apertura di un canale scolmatore all'altezza dell'ultimo meandro (l'acqua vi passa solo in caso di alta marea o di piena del fiume);
- chiusura della foce esistente con il materiale sabbioso proveniente dallo scavo delle nuove foci e ricostruzione parziale della duna erosa a protezione della pineta.

Un significativo punto di pressione antropica sull'area è costituito dal villaggio abusivo della Bassona, (al centro della Fig. 7) un agglomerato di baracche e manufatti su cui sono pendenti ordinanze di demolizione e ricorsi al Consiglio di Stato contro di queste, con una situazione di stallo che dura da oltre 20 anni. La situazione di fatto è quella di un insediamento frequentato in estate da almeno un centinaio di persone, sprovvisto di servizi e di sistemi di depurazione efficienti, posto totalmente all'interno della zona protetta. Gli argini artificiali del torrente Bevano arrivano in sinistra idraulica sino a mare, attraversando il villaggio abusivo, raccordandosi (prima della erosione degli ultimi anni) con l'argine artificiale di retroduna a mare, circondando, in destra idraulica, tutta l'area dei meandri abbandonati.



Figura 7 - La zona di foce prima dell'intervento, con individuate le zone interessate dai lavori.

Il progetto esecutivo

Sulla base dei risultati della Valutazione di Impatto Ambientale e delle relative prescrizioni, il Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli ha istituito un gruppo di progettazione interdisciplinare ed ha predisposto il progetto esecutivo, che è stato approvato in data 29 luglio 2005 (*Progetto esecutivo di Riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano -2005*). I lavori si sono svolti dal 23 gennaio 2006 al 14 aprile 2006.

I lavori hanno comportato lo spostamento della sabbia ricavata dagli scavi realizzati per il nuovo inalveamento ed il suo trasferimento mediante rifluimento in corrispondenza della foce esistente al momento dell'inizio dei lavori, che è così stata chiusa. Il punto di apertura della nuova foce è stato protetto con una palificata in legno in sinistra idraulica per evitare la ripresa del movimento verso nord e tenere vincolata la posizione della nuova foce (Figg. 8, 9, 11 e 13).

La movimentazione della sabbia è stata effettuata con l'ausilio di una draga galleggiante munita di testa disgregante ed attrezzata con una tubazione di rifluimento diam. 200 mm. posizionata a terra, e con l'ausilio di altri



Figura 8 - La realizzazione della palificata in legno nella zona della nuova foce.



Figura 9 - La posa in opera del geotessile a tergo della palificata in legno nella zona della nuova foce.

mezzi meccanici di movimento terra. Il materiale proveniente dal dragaggio è stato ricollocato, come già riferito, sia nella zona della foce originale, in modo da determinarne la chiusura, sia per la costruzione del nucleo di una nuova duna posizionata in corrispondenza di quella esistente prima dell'erosione e del necessario raccordo tra questa e il cordone dunoso esistente dalla zona di foce verso nord.

La palificata è stata costruita con pali in legno di castagno della lunghezza variabile dai 3,00 ai 6,00 ml e diam. da 200 a 300 mm, a seconda delle previsioni di escavazione da parte del corso d'acqua. Sono inoltre stati realizzati dei tiranti ancorati a pali infissi sul retro della palificata principale in modo da garantire all'effetto ribaltante, mentre al limite est verso mare la palificata è stata prolungata per circa 20 ml verso nord in modo da proteggere da fenomeni di aggiramento da parte delle mareggiate.

Nella parte retrostante la palificata è stato posto in opera del geotessile (Fig. 9) al fine di ridurre al minimo la possibilità di asportazione del materiale sabbioso di riempimento per effetto dei fenomeni di trascinamento attraverso i varchi esistenti tra un palo e l'altro, da parte sia delle acque meteoriche che delle mareggiate, con effetto di sormonto dell'opera di contenimento.

Sono state inoltre realizzate viminate morte a protezione della duna di neoformazione, per cercare di limitare il più possibile il trasporto eolico e favorire l'accrescimento della duna.

La duna è stata ulteriormente protetta utilizzando materiale spiaggiato recuperato in zona e concordando con il Comune di Ravenna di lasciare la zona al di fuori delle operazioni di pulizia spiaggia, per favorirne la naturalità ed evitare erosioni al piede a causa dei mezzi meccanici di pulizia. La zona di fiume che è rimasta isolata dal

la chiusura della vecchia foce è stata mantenuta collegata al sistema mare-fiume tramite la realizzazione di una gaveta in legno, (Fig. 10) con quota di fondo allo 0,00 del medio mare, al fine di garantire un ricambio giornaliero di acqua con la marea e di evitare fenomeni di anossia.



Figura 10 - La gaveta vista da dentro il tratto di fiume abbandonato.



Figura 11 - Le opere di protezione della nuova foce e la gaveta appena completate. Vista da terra verso mare.

Le varie lavorazioni sono state sintetizzate nella Tabella 1, che riassume anche le quantità di ogni lavorazione principale. Il cantiere dei lavori è stato realizzato sulla spiaggia, per disturbare il meno possibile fauna e vegetazione delle dune e sono stati rispettati i periodi imposti dalla Valutazione di Impatto Ambientale al fine di non danneggiare le specie in riproduzione.

Tabella 1 - Sintesi delle lavorazioni effettuate e relative quantità.

Opere di tipo rigido	palificata in legname in corrispondenza dell'ultima curva della nuova foce intermedia.
Movimentazione di sabbia	circa 25.000 m ³ movimentati in loco, sia a terra tramite scavatore e camion (15.000 m ³), sia tramite rifluimento diretto (23.500 m ³)
Mezzi a mare	draga
Mezzi a terra	mezzi di scavo e camion per trasporto con utilizzo di tubo su battigia per rifluimento sabbia
Cantiere	temporaneo con ripristino totale dei luoghi e posizionato sulla battigia, senza interessamento delle dune
Zone di rispetto	individuate da progetto e recintate durante i lavori
Dune	sviluppo di nuove dune con fascinate o materiale spiaggiato
Monitoraggio	in corso d'opera e post opera sia a mare che a terra
Risultati attesi	spostamento della foce a sud della attuale e sua evoluzione verso il largo senza interessamento della duna; abbattimento del rigurgito idraulico in caso di piene; smorzamento moto ondoso vecchia foce e protezione pineta ed entroterra da ingressioni di acque marine
Tempistica	il periodo di esecuzione è previsto in modo da arrecare il minore disturbo alle specie presenti ed all'ambiente naturale nel suo complesso, sulla base delle considerazioni contenute nella valutazione di incidenza e quindi in periodo invernale

Il sistema è stato completato con la realizzazione a sud della nuova foce di uno "scolmatore di piena" destinato ad entrare in funzione nel caso in cui la nuova foce non fosse in grado di garantire sufficiente portata a mare in caso di piena.

Il livello di base dello scolmatore è stato impostato alla quota 0,00 del medio mare e garantito in questo da una soglia di fondo, anch'essa realizzata con pali in legno.

Nella zona tra la nuova foce e la vecchia foce chiusa a nord è stata ricostruita la duna (Fig. 12) con fascinate morte e utilizzo di materiale naturale legnoso spiaggiato, per una lunghezza di oltre 500 metri. Il materiale sabbioso utilizzato è stato quello risultante dallo scavo della nuova foce e dello scolmatore, senza apporti esterni.

L'intervento effettuato non rappresenta la soluzione definitiva del problema idraulico, ma vuole essere un ten-

tativo di indirizzare l'evoluzione di un sistema naturale (che risente fortemente da tutti i lati di influenze antropiche) verso una direzione che, mantenendo lo stesso livello di caratteristiche di naturalità, possa diminuire i problemi idraulici riscontrati nell'entroterra, nell'ottica di una gestione sostenibile di un territorio che presenta complesse interazioni tra aspetti naturali e pressioni antropiche.



Figura 12 - La zona di duna ricostruita. Vista da nord verso sud. Alla destra il tratto di fiume abbandonato e alla sinistra il mare.



Figura 13 - Le opere di protezione della nuova foce e la gaveta. Vista da mare verso terra.

Opere per la mitigazione ed il monitoraggio ambientale nella fase di esercizio

La filosofia dell'intervento è stata quella di riuscire ad ottenere un risultato significativo dal punto di vista della funzionalità idraulica, tramite azioni ed opere che interagissero il meno possibile con la situazione ambientale naturale nel suo complesso, cercando di garantire una stabilità futura del risultato finale dei lavori, (Figg. 10÷16) pur nella consapevolezza di agire in un ambiente di transizione tra due sistemi, dinamici per definizione, quello marino e quello fluviale.

Un'ulteriore azione di progetto è stata quella relativa all'utilizzo di materiale naturalmente spiaggiato a fini di protezione delle zone di nuova realizzazione della duna (Fig. 12) e di protezione della fauna. Questa azione si armonizza con le previsioni del progetto di Riqualificazione di habitat costieri nel SIC e ZPS "Ortazzo, Ortazzino, Foce del Torrente Bevano" gestito della Provincia di Ravenna.

In relazione alla complessità dei fattori in gioco, nel predisporre uno schema di intervento si è tenuto conto fin da subito della necessità di tenere controllata la futura evoluzione della foce anche dopo il termine dell'intervento, anche al fine di potere svolgere eventuali azioni correttive.

Tali azioni sono riassunte in Tabella 2.

Tabella 2 - Riassunto degli interventi effettuati nella zona della Foce Bevano a partire dal 2006.

Titolo intervento	Importo in €	Descrizione sintetica dei lavori	Durata
Riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano	361.519	Apertura di una nuova foce e di uno scolmatore mediante movimentazione di sabbia pari a circa m ³ 15.000, dragaggio dalla nuova foce con refluenmento di m ³ 23.500 utilizzati per la chiusura della vecchia foce e per il ripristino della duna costiera, protezione dell'argine sinistro mediante la posa di n. 950 pali di m 4 e n. 700 di m 6, realizzazione di una gaveta in legno per favorire l'interscambio dell'acqua con la zona chiusa, escuzione di m 600 di viminata di altezza pari a cm. 30 al piede della duna costiera con specie autoctone.	Dal 23/01/2006 Al 14/04/2006
Lavori di somma urgenza in località Foce Bevano in comune di Ravenna (RA)	30.000	Riapertura dello scolmatore con escavo di m ³ 350 e ripristino della palificata a difesa dell'argine sinistro del Bevano e costruzione di n. 5 pennelli deflettenti con pali di legno per un totale di m. 670.	Dal 11/10/2006 Al 15/11/2006
Lavori di ripascimento spiagge in località Lido di Dante e Foce Bevano in comune di Ravenna (RA)	20.000	Ripristino della palificata manomessa da mareggiate con la posa in opera, a tergo della stessa, di n.120 sacchi in tessuto sintetico riempiti di materiale sabbioso, costruzione di n.3 nuovi pennelli deflettenti con l'utilizzo di n. 120 pali da m 6 ciascuno.	Dal 04/04/2008 Al 28/10/2008
Lavori di somma urgenza per la messa in sicurezza della barriera a protezione della foce deviata in località Foce Bevano del comune di Ravenna (RA)	30.000	Costruzione di n. 4 nuovi pennelli deflettenti con l'utilizzo di n. 300 pali da m 5/6 ciascuno e ripristino della palificata con n. 21 sacchi.	Dal 23/03/2009 Al 07/04/2009
Interventi di manutenzione straordinaria anche con ripascimento della costa ravennate (RA)	30.000	Ripristino della palificata manomessa da mareggiate con sostituzione di 206 pali e la posa in opera, a tergo della stessa, di n. 88 sacchi in tessuto sintetico riempiti di materiale sabbioso.	Dal 10/05/2010 Al 31/05/2010

Va sottolineato che il tipo di intervento, che si attua in un ambiente soggetto a dinamiche di vario tipo, la cui prevedibilità è relativa, in quanto le condizioni ambientali sono soggette a variazioni e modificazioni, deve necessariamente essere corredato da azioni di controllo e monitoraggio.

Questo perché la dinamicità della situazione della interazione mare/fiume e la variabilità della situazione rende possibile evidenziare a livello generale le problematiche e rende interessante il lavoro svolto come caso di studio sotto molteplici aspetti.

La gestione

Le mareggiate, la corrente continua di marea, le piene fluviali hanno posto da subito il problema della necessità di sorveglianza e manutenzione continua (Fig 16).

Per quanto riguarda la sorveglianza si è instaurato un sistema di rapporti con il Corpo Forestale dello Stato e la Provincia di Ravenna, al fine di potere essere avvisati con tempestività di eventuali necessità di intervento. Infatti, come nelle previsioni, si è dovuto intervenire a più riprese in special modo sulla barriera in tronchi al fine di stabilizzarla. Per i vari interventi si veda la Tabella 2.

La causa è stata inizialmente una tendenza della corrente di marea a sottoescavare i pali, scalzandoli da sotto nonostante i tiranti. Si sottolinea che la foce del Bevano è prevalentemente controllata (tranne uno o due episodi l'anno di piena o morbida) dalla corrente di marea che in entrata e uscita tende ad erodere verso nord. A questo si è posto rimedio piantando, esternamente a quella esistente, una nuova fila di pali più profondi e in parallelo a quelli esistenti e realizzando alcuni pennelli trasversali (con effetto di repellenti idraulici) per allontanare i filetti idrici, generati principalmente dalla corrente di marea, lontano dalla barriera e diminuirne l'effetto di asporto di sabbia e quindi di scalzamento (Figg. 14 e 15).



Figura 14 - Vista della zona di foce nel 2008 con particolare dei repellenti dentro la zona di foce.



Figura 15 - Vista dall'alto della zona di foce nel 2008, con i repellenti già realizzati nel corso degli interventi di manutenzione (foto: Giovanni Gabbianelli - CIRSA, RA).



Figura 16 - La situazione della foce a partire dal 2009 (foto: Giovanni Gabbianelli - CIRSA, RA).

Dopo la realizzazione dei primi pennelli ed il rinforzo dei pali, l'effetto di scalzamento si è trasferito in modo sempre meno intenso verso monte, mentre nel tratto caratterizzato inizialmente da scalzamento ora è presente una stabilizzante spiaggia.

In occasione di mareggiate si è avuto il superamento in quota della barriera in pali con conseguente erosione provocata dalle acque di ritorno. Anche a queste situazioni si è posto rimedio ripristinando il tessuto non tessuto posto a tergo dei pali e riposizionando il materiale sabbioso.

Con le mareggiate del dicembre 2008 -aprile 2009, collegate ad alti livelli di marea, si è avuto per la prima volta il superamento della duna di neoformazione tra nuova e vecchia foce, con sua parziale erosione e formazione di *washover* nella zona di meandro morto interna. Su questa situazione si è valutato, d'intesa con gli altri Enti, di non intervenire per lasciare il sistema alla sua evoluzione e non influire sugli studi in corso relativamente all'evoluzione della duna.

A circa cinque anni dalla conclusione dei lavori, sono stati realizzati interventi per complessivi 110.000 €, cioè circa 22.000 €/anno, che rappresentano il 6% del valore dell'intervento iniziale e quindi un più che accettabile costo di manutenzione per un intervento di questa tipologia.

Ringraziamenti

Si ringraziano tutti gli Enti e Istituzioni che hanno collaborato e continuano a collaborare agli studi, alle verifiche e al controllo della zona di Foce Bevano, in un'ottica di partecipazione fra amministrazioni forse unica nel suo genere.

Un ringraziamento particolare a Rita Boarini per i consigli per la stesura definitiva del testo.

Bibliografia

Autorità dei bacini regionali romagnoli (2003) - *Piano stralcio per il rischio idrogeologico*. Approvato con Delibera della Giunta Regionale n. 350 del 17 marzo 2003.

Regione Emilia-Romagna, Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, sede di Ravenna (2005) - *Progetto esecutivo di Riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano*. Approvato con determinazione n. 11032 del 29 luglio 2005.

Regione Emilia-Romagna, Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, sede di Ravenna (2005) - *Studio di impatto ambientale: Riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano*. Presentato in data 10 settembre 2003 e approvato con Deliberazioni di Giunta Regionale n. 2138 del 2 novembre 2004 e n. 842 del 6 giugno 2005.

Ricevuto il 12/04/2010, accettato il 04/11/2010.

Le dune costiere in Veneto: stato, gestione e prospettive

Paola Virgilietti

Regione del Veneto - Servizio Forestale Regionale per le Province di Padova e Rovigo

Passaggio Gaudenzio, 135131 - Padova. Tel. 049-8778212, Fax: 049-8778227

E-mail: paola.virgilietti@regione.veneto.it

Riassunto

I litorali veneti, caratterizzati da ampie spiagge sabbiose, sono stati utilizzati intensamente a scopo turistico, con la conseguente distruzione degli ecosistemi costieri. Ad oggi rimangono un numero limitato di siti in cui è ancora possibile osservare gli habitat dunali e le loro peculiarità. Si stima la presenza di circa 1500 ettari di habitat riconducibili alle tipologie dunali costiere, per uno sviluppo lineare di 40 chilometri (che comprendono anche gli scanni del delta del Po).

I sistemi costieri alto-adriatici hanno caratteristiche uniche, dovute al clima, alla loro collocazione geografica e alla presenza delle foci di numerosi fiumi, che portano alla compresenza, negli stessi ambienti, di specie alpine, mediterranee e a distribuzione orientale, oltre a numerosi specifici endemismi.

Lo status di protezione delle aree ad elevato livello di naturalità è molto buono, essendo tutte incluse in siti Natura 2000, ma permangono comunque alcune criticità legate alla frammentazione, con il conseguente aumento dei margini e la penetrazione di specie aliene, al disturbo antropico da cui derivano locali fenomeni di erosione e danneggiamento diretto degli habitat e all'erosione costiera che può determinare la scomparsa fisica e irreversibile delle dune.

I siti sono per lo più gestiti attivamente con forme e modalità diverse che vedono il coinvolgimento della Regione del Veneto (Servizio Forestale Regionale per le Province di Treviso e Venezia, Servizio Forestale Regionale di Padova e Rovigo), dell'Azienda Regionale Veneto Agricoltura e di associazioni ambientaliste (WWF e LIPU).

Numerose competenze si intrecciano a livello di gestione del litorale coinvolgendo soggetti diversi, dai Comuni fino alla Regione, rendendo più complessa l'attuazione di forme di gestione integrata. A seguito della crescita della consapevolezza del valore ecologico delle dune costiere e di esperienze sviluppate di recente tra cui la realizzazione di uno specifico progetto LIFE ("Azioni concertate per la salvaguardia del litorale veneto; www.lifedune.it) si è cercato di attenuare la frammentazione almeno a livello di soggetti gestori, anche attraverso l'individuazione di linee comuni di intervento. La costituzione di un net-work veneto sulla gestione integrata delle dune costiere, collegato a analoghe esperienze italiane e europee, costituisce il naturale proseguimento di quest'esperienza e pone le basi per una più attiva collaborazione e scambio di conoscenze tra quanti operano in questi ambienti.

Parole chiave: litorale veneto, ambienti costieri, gestione integrata dei litorali.

Abstract

Veneto Region coasts are characterised by long sandy beaches, intensively used for coastal tourism. After Second World War most dunes were destroyed to leave place to buildings and tourist infrastructures. Only a few places remained

almost untouched where it is still possible to observe the natural succession of pioneer, shifting and fixed dunes and of interdunal lowlands. There is estimation of circa 1500 hectares of Nature 2000 habitats in the dune category, for a linear development of about 40 kilometres of coasts with dune habitats (including the dunes in the long sandy islands of Po delta).

North Adriatic dune systems have peculiar ecological characteristics, due to climate (temperate instead of Mediterranean), geographical location and the presence of many river mouths. Vegetation is characterized by the contemporary presence of alpine, Mediterranean and eastern species. A large number of endemic species are present. Veneto coasts are very important also for fauna, as they are the final destination point of shelter in a plain, which is becoming more and more urbanised, and are located along the migratory route from Africa to Northern Europe.

The protection status of these relict areas is very high and they are all included in Nature 2000 sites, but a few threats still remain due to fragmentation, with the consequent increase of border areas and penetration of invasive species, by anthropic disturbance (including local environmental losses and direct damages to habitats), and coastal erosion that can cause irreversible dune destruction.

Naturalistic coastal areas are generally well managed, mostly by Veneto Region (Forestry Regional Service for Padova and Rovigo provinces; Forestry Regional Service for Treviso and Venezia provinces) and by Azienda Regionale Veneto Agricoltura and environmental associations (WWF and LIPU).

A large number of different competences and subjects are involved in coastal management, from local Municipalities to Province and Regional administrations, making implementation of an integrated approach to management more complicated. With the increased consciousness regarding the ecological value of dune ecosystems and after some experiences that involved Veneto coastal sites (among which the LIFE Project "Concerted actions for the protection of Venetian coastline"), there was an effort to reduce management fragmentation also by the Identification of common guidelines.

The implementation of a regional network for integrated management of coastal dunes, connected to similar experiences developed in Italy and Europe, represents the natural continuation of LIFE's experience and the starting point for more active collaboration and exchange of knowledge among people and institutions acting and studying these environments.

Keywords: *North Adriatic coasts, dune management, dune network, dune ecosystems, coastal habitats.*

Introduzione

Lungo il litorale nord adriatico coesistono un utilizzo antropico intenso ed un elevato valore naturalistico. Vi si possono ancora osservare complessi dunali ben conservati, con caratteristiche ecologiche che li rendono unici nel panorama nazionale, che rappresentano però delle isole in un paesaggio litoraneo dominato da un intenso uso turistico, con la conseguente banalizzazione degli arenili, spianati e attrezzati per i bagnanti, e con una diffusa urbanizzazione che non ha risparmiato gli ambienti retrodunali. Molti studi e ricerche hanno interessato questi siti, nondimeno il quadro generale non è ancora chiaro, e diverse tematiche richiederebbero ulteriori specifici approfondimenti.

Il presente articolo si propone di fornire un quadro descrittivo il più completo possibile sullo stato attuale delle dune costiere in Veneto. Sulla base delle conoscenze disponibili vengono fornite delle indicazioni sintetiche sulle peculiarità degli ecosistemi costieri, sulla loro localizzazione e sulle possibili cause di alterazione e disturbo. Particolare attenzione viene posta agli aspetti gestionali, elemento chiave per la futura conservazione di questi ambienti, e alle modalità con cui, seppure faticosamente, si sta avviando un percorso di superamento delle problematiche derivanti anche dalla frammentarietà gestionale.

In un momento in cui, anche a livello nazionale, si assiste ad una crescita dell'attenzione e dell'interesse verso i vulnerabili ecosistemi costieri, si è ritenuto interessante fornire una descrizione il più completa possibile dei particolari ambienti del litorale Veneto, con puntuali riferimenti descrittivi ai siti meglio conservati.

Il lavoro si basa sull'elaborazione e la sistematizzazione di dati e ricerche già disponibili, e riflette quindi i limiti derivanti da carenze dei dati di partenza, come anche dall'assenza di specifici approfondimenti sul campo.

Il punto di vista rappresentato è quello di chi si trova direttamente coinvolto nelle problematiche della gestione, per il quale è importante disporre di dati di sintesi sulle dinamiche in atto negli ecosistemi costieri per poter prendere le opportune decisioni, ma che difficilmente può assumersi l'onere di attuare specifiche ricerche su argomenti che richiedono competenze specialistiche.

Caratteristiche del litorale veneto

Il litorale veneto è caratterizzato da ampie spiagge sabbiose, derivate dall'apporto dei sedimenti da parte dei numerosi fiumi che sfociano nell'alto Adriatico e dall'azione delle maree e dei venti, tra cui prevale nettamente la bora proveniente da nord est.

L'intenso sfruttamento turistico, a partire dall'inizio del secolo scorso, e soprattutto nel secondo dopoguerra, ha però drasticamente ridotto i lembi di costa caratterizzati dalla tipica morfologia delle dune e gli ambienti naturali ad esse associati. Rimangono comunque ancora alcuni tratti di litorale, meno disturbati dalle attività antropiche, che ancora conservano un'elevata naturalità e ospitano comunità con importanti emergenze floristiche e endemismi. Al di fuori di questi siti, tra gli stabilimenti balneari e le aree attrezzate per il turismo, solo alcuni ridotti frammenti testimoniano la passata presenza delle dune costiere.

A rendere unici questi ambienti contribuisce notevolmente il clima: il tratto di costa che dall'Emilia - Romagna arriva al Friuli è l'unico settore costiero del bacino mediterraneo a non rientrare nella regione climatica mediterranea, bensì in quella temperata (Rivas e Martínez, 2004). Lungo il litorale si riscontrano ulteriori differenziazioni microclimatiche, per la presenza o meno di lagune alle spalle delle coste, per la collocazione rispetto al vento di bora e la vicinanza delle foci fluviali. A determinare le peculiarità della flora litoranea veneta (Fig. 1) non è però solo il clima. Il Veneto, per la sua collocazione geografica ha rappresentato, nel corso dei millenni ed in particolare nei più recenti periodi di oscillazione termica tra il III e il I millennio a. C., un crocevia rispetto agli spostamenti delle specie vegetali: si trovano così a condividere gli stessi ambienti specie alpine, specie termofile mediterranee e specie a distribuzione orientale. Inoltre i numerosi fiumi che sfociano nell'alto adriatico hanno svolto un ruolo non secondario di corridoio ecologico, consentendo la diffusione di specie, in particolare montane, anche lontano dal proprio habitat originario (Filesi et al., 2006).

Alla ricchezza della vegetazione corrisponde una altrettanto elevata varietà faunistica. I litorali veneti sono infatti ambienti di grande interesse per la fauna poichè sono le ultime zone di rifugio presenti in una pianura sempre più urbanizzata e sono situati sulla rotta migratoria che dall'Africa porta al Nord Europa (Perlasca e D'Alterio, 2006). Molte sono le specie rare o in via d'estinzione, tra cui va ricordato l'anfibio *pelobate fosco* (Fig. 2), la cui presenza presso il litorale di Caleri (Rosolina - RO) è stata documentata per la prima volta nel 2005 (Boschetti et al., 2006) e di cui i successivi studi e monitoraggi hanno confermato vi sia una consistente popolazione autoctona (Richard, 2007).

Le porzioni di litorale meglio conservate sono completamente inserite in siti della rete Natura 2000.

Gli studi e le ricerche effettuati per caratterizzare tali siti e per predisporre i piani di gestione hanno consentito di disporre di dati di tipo quantitativo sulla presenza e la conservazione dei diversi habitat. Il recente "Atlante dei siti Natura 2000 del Veneto" (Buffa e Lasen, 2010) riporta una stima delle superfici e della diffusione degli habitat dunali nella categoria dune marittime ed interne (Tab. 1).



Figura 1 - *Centaurea tommasinii*, endemismo delle coste alto-adriatiche.

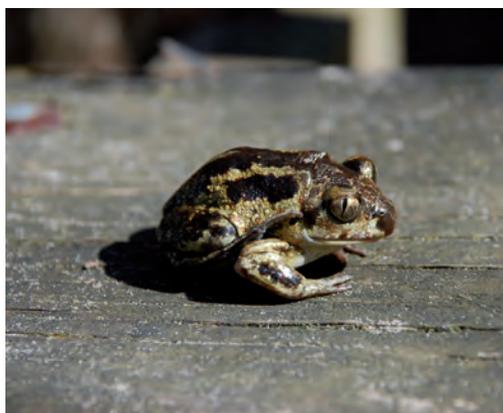


Figura 2 - *Pelobate fosco*.

A completare la serie vegetazionale costiera concorrono altri due habitat, inclusi in categorie diverse rispetto alle dune: l'habitat 1210 "Vegetazione annua delle linee di deposito marine", con una superficie di circa 280 ettari, e le leccete litoranee (habitat 9340 "Foreste di *Quercus ilex*") che costituiscono, nella seriazione vegetazionale, la formazione forestale climax sulle dune più interne consolidate e che nelle zone litoranee coprono circa 140 ettari. Complessivamente, lungo il litorale veneto, compresi le dune fossili e gli scanni, sono quindi presenti circa 1500 ettari di habitat dunali, di cui più della metà sono costituiti da pinete di origine artificiale.

Tabella 1 - Superficie e diffusione degli habitat costieri nei siti Natura 2000 del Veneto.

Codice habitat	Denominazione	Superficie (ettari)	Diffusione percentuale ¹
2110	Dune mobili embrionali	circa 50	< 0,1 % circa
2120	Dune mobili del cordone litorale con presenza di <i>Ammophila arenaria</i> (dune bianche)	circa 100	< 0,1 % circa
2130*	Dune costiere fisse a vegetazione erbacea (dune grigie)	circa 160	< 0,1 % circa
2160	Dune con presenza di <i>Hippophaë rhamnoides</i>	circa 0,5	< 0,05 % circa
2230	Dune con prati dei <i>Malcomietalia</i>	circa 70	< 0,1 %
2250*	Dune costiere con <i>Juniperus</i> spp.	circa 10	< 0,1 %
2270*	Dune con foreste di <i>Pinus pinea</i> e/o <i>Pinus pinaster</i>	circa 630	< 0,5 %

¹ Indicazione della diffusione all'interno della rete dei siti natura 2000 del veneto, mediante il rapporto, espresso in percentuale, tra la superficie dell'habitat e l'estensione complessiva degli habitat natura 2000.



Figura 3 - Dune costiere con ginepro.

I dati, peraltro scarsi, disponibili a livello nazionale sulla qualità e l'estensione dei litorali naturali sono normalmente espressi in termini di sviluppo lineare. Una valutazione indicativa dello stato di antropizzazione del litorale italiano, stima che in Veneto siano presenti circa 14,4 km di dune, di cui 7,3 antropizzate e 7,1 km non antropizzate (Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero, 2006). Al fine di verificare e approfondire tale dato, potendo usufruire delle cartografie degli habitat messe a disposizione dalla regione Veneto (<http://www.regione.veneto.it/Ambiente+e+Territorio/Territorio/Reti+Ecologiche+e+Biodiversità>), si è proceduto

a stimare la lunghezza complessiva dei litorali caratterizzati dagli habitat sopra riportati, la cui presenza è stata quindi assunta come indice di un buon livello di naturalità e conservazione (Tab. 2).

Dalla stima sono esclusi i frammenti di habitat dunali esterni ai siti Natura 2000. Il dato è puramente indicativo e andrebbe completato con rilievi sul campo, soprattutto per poter distinguere i contesti in cui è ravvisabile l'intera serie vegetazionale naturale da quelli in cui, a causa soprattutto dell'utilizzo della battigia per la balneazione, la serie risulta incompleta e per stimare il valore naturalistico. Approfondimenti in proposito sono stati condotti per singole stazioni (si veda ad esempio Buffa et al., 2005) ma mancano per l'intero complesso del litorale.

Tabella 2 - Lunghezza dei litorali in cui sono presenti gli habitat Natura 2000 della categoria "dune".

Sito	Provincia	Lunghezza (m)
Foce del Tagliamento	VE	2000
Bibione pineta	VE	270
Vallevecchia	VE	5100
Laguna del Mort	VE	1900
Penisola del Cavallino	VE	3300
Lido di Venezia	VE	2900 ¹
Bacucco	VE	700
Litorale di Caleri	RO	3200
Totale litorale		19.370
Scanni del delta del Po	RO	20.500
TOTALE		39870

¹ Il dato dei siti del lido di Venezia è stato fornito dal Servizio Forestale Regionale di Treviso e Venezia, non essendo ancora disponibile la cartografia degli habitat.

Le informazioni riportate, riferite agli habitat Natura 2000 forniscono solo un'indicazione di massima della complessità dei sistemi vegetazionali presenti. Gli habitat classificati dalla Comunità Europea (Allegato I della direttiva 92/43/CE) rappresentano infatti una decisa semplificazione rispetto alla complessità e alla varietà del paesaggio vegetale e sebbene costituiscano uno strumento fondamentale per la gestione dei Siti della rete Natura 2000, non consentono di cogliere ed evidenziare pienamente le peculiarità degli ecosistemi vegetali presenti (Fig. 4). Tracciare una corrispondenza tra gli habitat Natura 2000 e le associazioni vegetali individuate con cri-



teri fitosociologici non è peraltro semplice. Fermo restando che le finalità e le modalità di individuazione e classificazione delle associazioni vegetali e degli habitat sono diversi, si propone comunque, anche allo scopo di evidenziare la ricchezza vegetazionale presente lungo il litorale veneto, una tabella (Tab. 3) di corrispondenza tra gli habitat e le associazioni vegetali tipiche dei litorali veneti.

Figura 4 - L'associazione *Tortulo ruralis* - *Scabiosetum gramuntietum* è endemica dell'alto adriatico.

La tabella si basa sulle corrispondenze individuate da Bianco e Menegoni (2009a) e da Buffa et al. (2007); le denominazioni delle associazioni sono quelle riportate da Bianco e Menegoni (2009a).

Di difficile collocazione risultano due altre associazioni - endemiche del litorale alto adriatico di recente individuazione - e che costituiscono il mantello e il pre-mantello del bosco a *Quercus ilex*: *Viburno lantanae-Phylliretum* e *Erico carnae - Osyridetum* (Gamper et al., 2008).

Le principali aree dunali venete

In Veneto la maggior parte degli habitat dunali con caratteristiche di naturalità si concentra in poche stazioni, tra loro poco o per nulla collegate e circondate da una matrice territoriale fortemente antropizzata. In quasi tutti i casi le aree sono vincolate e tutelate e sono soggette a una forma attiva di gestione, finalizzata ad impedire un ulteriore degrado.

Tabella 3 - Corrispondenze tra habitat Natura 2000 e associazioni vegetazionali venete.

Habitat Natura 2000	Associazione vegetazionale
1210 Vegetazione annua delle linee di deposito marino	<i>Salsolo kali - Cakiletum maritimae</i>
2110 Dune mobili embrionali	<i>Sporobolo arenari - Elymetum farcti</i>
2120 Dune mobili del cordone litorale con presenza di <i>Ammophila arenaria</i> (dune bianche)	<i>Echinophoro spinosae - Ammophiletum arenariae</i>
2130 * Dune costiere fisse a vegetazione erbacea (dune grigie)	<i>Tortulo ruralis - Scabiosetum gramuntietum</i>
2160 Dune con presenza di <i>Hippophae rhamnoides</i>	<i>Junipero communis - Hippophaetum fluviatilis</i>
2220 Dune con prati del <i>Malcomietalia</i>	<i>Sileno coloratae - Vulpietum membranaceae</i>
2250 Dune costiere con <i>Juniperus</i> spp.	<i>Junipero-Hippophaetum fluviatilis</i>
2270* Dune con foreste di <i>Pinus pinea</i> e/o <i>Pinus pinaster</i>	I popolamenti a <i>Pinus</i> del litorale veneto hanno pressochè tutti origine artificiale, e rappresentano pertanto una tipologia di sostituzione rispetto alla vegetazione naturale potenziale, riconducibile ai boschi termofili di leccio (<i>Quercetea ilicis</i>) o a associazioni tipiche delle dune consolidate (Fiorentin, 2007)
9340 Foreste di <i>Quercus ilex</i>	<i>Quercetea ilicis</i> Recenti studi riconoscendo l'autonomia sintassonomica delle leccete del litorale veneto, hanno portato ad individuare una specifica associazione, endemica dei cordoni dunali nord-adriatici dal Tagliamento alla Mesola: <i>Vincetoxico - Quercetum ilicis</i> (Gamper et al, 2008)

Un censimento e una descrizione delle principali aree, con le loro caratteristiche e l'individuazione dei principali soggetti coinvolti nella gestione è stata attuata nell'ambito del progetto LIFE "Azioni concertate per la salvaguardia del litorale veneto (Perlasca e D'Alterio, 2006; AA. VV, 2007). Percorrendo il litorale veneto dalla foce del Tagliamento al Delta del Po, le zone più rilevanti per la presenza di habitat dunali sono:

- la foce del Tagliamento (Comune di San Michele al Tagliamento - Bibione - VE). E' un ambiente di foce caratterizzato da un mosaico di biotopi assai diversificato, con sistemi dunosi recenti ed antichi, una pineta

frammista a praterie aride, arbusteti con elementi mediterranei e bassure umide. Molto interessante è la presenza di alcuni elementi floristici microtermi, come l'*Erica carnea*, che caratterizza la particolare associazione vegetale *Erico carnae - Osyridetum albae* (Gamper et al., 2008). La pineta, a differenza delle altre pinete litoranee venete, è in parte di origine naturale e composta prevalentemente da pino nero, il cui seme è stato probabilmente portato dal Tagliamento. Negli ultimi anni la spiaggia è stata soggetta ad una forte erosione che ha ridotto l'estensione degli habitat delle dune bianca e grigia. Interventi di gestione, volti soprattutto al miglioramento dei parametri della pineta, sono regolarmente attuati dal Servizio Forestale Regionale di Treviso e Venezia in collaborazione con il Comune di San Michele al Tagliamento.

- Vallevicchia (Comune di Caorle - VE). E' un'ampia area (circa 800 ettari) collocata nel tratto centrale della costa sabbiosa tra la foce dei fiumi Livenza e Tagliamento. Lungo il lato meridionale uno stretto cordone sabbioso di circa 5 km separa il mare dalla laguna di Caorle, in parte bonificata negli anni '60. E' presente un significativo sistema di dune sabbiose e avvallamenti interdunali e retrodunali (Vallerani et al., n.d.). Il litorale costituisce la più lunga spiaggia libera veneta, che attrae ogni anno migliaia di bagnanti, con un impatto non trascurabile su ambienti ancora ben conservati. L'area è interamente gestita dall'Azienda Regionale Veneto Agricoltura che nel corso degli anni ha anche realizzato imponenti interventi di ripristino dell'area lagunare posta alle spalle del litorale, oltre che azioni mirate di conservazione delle dune e di miglioramento delle fitte pinete artificiali che in parte le copre.

- litorale della laguna del Mort (Comune di Eraclea - VE). Situato alla foce del Piave, è costituito da uno stretto cordone sabbioso che separa il mare da una laguna di limitata estensione e da un sistema di dune relitte (Fig. 5). La laguna è aperta verso il mare da un unico accesso mentre verso l'entroterra è delimitata da una duna consolidata con una pineta di origine artificiale. La parte più interessante è quella a sud della laguna che presenta un ricco mosaico di biotopi, seppur di limitata estensione. L'area è gestita dal Servizio Forestale per le Province di Treviso e Venezia che ha realizzato, tra l'altro, interventi di diradamento selettivo nella pineta.



Figura 5 - Litorale della laguna del Mort (Eraclea - VE).

- Penisola del Cavallino, Ca' Ballarin (Comune di Cavallino Treporti - VE). Il biotopo è costituito da una fascia litoranea dominata da una pineta monospecifica a pino domestico, insediata su un sistema povero di avvallamenti interdunali. Nella fascia verso il mare sono presenti delle dune artificiali in fase di colonizzazione.
- Penisola del Cavallino, Ca' Savio (Comune di Cavallino Treporti - VE). E' una significativa area litoranea che comprende un vasto sistema di dune stabilizzate con estese praterie retrodunali, bassure umide e una pineta con ampie zone di latifoglie igrofile.
- Penisola del Cavallino, Punta Sabbioni (Comune di Cavallino Treporti - VE). E' un articolato sistema di

dune (Fig. 6) formato per accumulo di sabbia a ridosso della diga settentrionale della bocca di porto di Lido della laguna di Venezia. Rilevanti sono le estese praterie umide retrodunali e la pineta, con lembi di vegetazione igrofila. Nel sito, come nei precedenti della penisola del Cavallino, il Servizio Forestale Regionale di Treviso e Venezia attua regolari interventi di gestione.



Figura 6 - Penisola del Cavallino, Punta Sabbioni (Cavallino Tre Porti - VE).

- Lidi di Venezia, dune degli Alberoni (Comune di Venezia - VE). L'area è situata in prossimità della bocca di porto di Malamocco. La zona si è formata dopo la costruzione della diga foranea, conclusa nel 1872: a ridosso di questo imponente manufatto la corrente marina ha accumulato grandi quantità di sabbia e l'azione dei venti ha modellato un sistema di dune tra i meglio strutturati e con le dune più alte della Provincia di Venezia. E' evidente la successione vegetazionale tipica dei litorali. Notevole è il complesso boschivo (circa 30 ettari). L'area è gestita attualmente come Oasi Naturalistica dal WWF e dal Comune di Venezia, in collaborazione con il Servizio Forestale di Treviso e Venezia.
- Lidi di Venezia, Ca' Roman di Pellestrina (Comune di Venezia - VE). E' un'area di origine recente ed in forte dinamismo, in cui è possibile osservare molto bene la successione degli habitat dalla battigia alle dune consolidate. E' gestita come oasi naturalistica dalla LIPU e dal Comune di Venezia in collaborazione con il Servizio Forestale di Treviso e Venezia.
- Dune residue del Bacucco (Comune di Chioggia - VE). Sono un sottile lembo di terra compreso tra le foci del Brenta e dell'Adige, che si interpone tra il litorale di Sottomarina a nord e quello di Rosolina a sud. Si tratta di un sistema dunoso residuale, in cui mancano completamente gli stadi più evoluti, dune fisse e retroduna umidi, scomparsi per far posto alle colture orticole (Buffa e Lasen, 2010).
- Litorale di Caleri (Comune di Rosolina - RO). Posta nella porzione settentrionale del delta del Po, all'interno del Parco Regionale Veneto del delta del Po, la penisola di Caleri, con la lunga spiaggia libera di circa 3 km di lunghezza, ospita pregevoli esempi di habitat costieri molto ben conservati. Spicca in particolare l'arbusteto a ginepro, con la particolare associazione a *Hyppophae rhamnoides*. L'area, di complessivi 136 ettari, è gestita dal Servizio Forestale Regionale per le Province di Padova e Rovigo e include il Giardino Botanico Litoraneo del Veneto (Fig. 7).

All'estremità opposta del litorale, alla foce dell'Adige e separato della penisola di Caleri dall'abitato di Rosolina Mare, si trova l'area boscata di Porto Fossone, una zona di dune consolidate coperte da pini e lecci con radure e zone umide. Un campeggio interrompe la continuità delle dune verso la costa che nella zona è in evidente erosione.

Habitat riconducibili alle tipologie caratteristiche delle aree costiere sono presenti anche in due altri particolari contesti, geograficamente distinguibili dal litorale vero e proprio: le dune fossili e gli scanni.



Figura 7 - Dune bianche con fioritura di *Trachomitum venetum* presso il Giardino Botanico litoraneo del Veneto (Rosolina - RO).

Le dune fossili, collocate a qualche chilometro dall'attuale linea di costa, sono il residuo degli antichi cordoni dunali che nel tempo hanno segnato l'avanzare del delta del Po verso il mare. Comprendono alcuni siti di elevatissimo interesse per la presenza delle comunità delle dune grigie, degli ambienti delle praterie e delle depressioni infradunali umide, oltre che di ampie aree boscate.

Da nord a sud si incontrano:

- bosco Nordio (Comune di Chioggia - VE), una significativa testimonianza dell'ampia fascia boscata che un tempo caratterizzava gran parte del litorale veneto;
- dune di Donada e Contarina (Comune di Porto Viro - RO);
- dune di Rosolina e Volto (Comuni di Loreo e Rosolina - RO);
- dune di Ariano Polesine (Comune di Ariano nel Polesine - RO).

Gli scanni litoranei (Fig. 8), a differenza delle dune fossili, sono ambienti di recente formazione in continua e dinamica evoluzione. Si formano per il deposito dei sedimenti trasportati dal Po alla foce dei bracci del Po e rappresentano la linea di demarcazione tra il mare aperto e le retrostanti lagune. La loro limitata larghezza non consente l'affermarsi dell'intera successione di habitat dunali, ma solo la presenza delle effimere associazioni caratteristiche della battigia e delle dune embrionali (Fig. 9).



Figura 8 - Scanni del delta del Po.



Figura 9 - Localizzazione dei principali siti di interesse naturalistico.

Problematiche

Le coste venete non hanno rappresentato un'eccezione rispetto ai fenomeni che hanno interessato nell'ultimo secolo l'intero complesso dei litorali italiani, portando ad una drastica diminuzione degli habitat naturali e alla frammentazione delle fasce dunali.

Spesso luoghi insicuri e malsani, le coste hanno da sempre concentrato attività produttive, industriali, agricole e portuali. Nel corso dei secoli, con il succedersi di civiltà diverse e di modalità più o meno intense di utilizzo del territorio, lungo le coste predominarono tendenze evolutive differenti:

nel periodo classico la linea di costa rimase sostanzialmente stabile;

nel periodo imperiale i litorali sabbiosi avanzarono anche in modo rilevante in conseguenza del maggior apporto di sedimenti, resi disponibili dalle bonifiche e disboscamenti che determinarono azioni erosive diffuse, trasporto fluviale e distribuzione selettiva dei depositi;

nel medioevo, caratterizzato dall'abbandono dei centri abitati, molte aree divennero sede di lagune e stagni costieri, anche a causa di fenomeni di ingressione marina determinata dal diminuito apporto di sedimenti causato dalla ripresa dei boschi (Fierro, 1990).

Durante il XVIII e per gran parte del XIX secolo tutte le coste sabbiose d'Italia erano in notevole avanzamento. (Bianco e Menegoni, 2009 b).

A partire dal 1800 l'intervento antropico lungo le coste italiane mutò pesantemente le condizioni naturali del trasporto solido a mare e lungo i litorali. Le modificazioni furono indotte dallo sviluppo dell'agricoltura, dalla realizzazione di strade e ferrovie, dalle opere di sistemazione idraulica e forestale dei bacini, dall'estrazione di inerti negli alvei, dalla costruzione di opere di sbarramento e di opere a mare. Il bilancio sedimentario è diventato sempre più deficitario e si sono innescati processi erosivi sempre più marcati (Fierro, 2006).

Dal secondo dopo guerra fortissimo è stato l'impatto diretto derivante dallo sviluppo dell'industria del turismo, con lo spianamento sistematico delle dune per lasciar spazio agli insediamenti turistici e agli stabilimenti balneari.

Erosione

L'erosione costiera è una manifestazione naturale, in un sistema in cui si crea un equilibrio dinamico tra l'apporto e l'asporto di sabbia, legato all'azione di trasporto solido dei fiumi, delle correnti marine e dei fenomeni di mareggiata. I fenomeni assumono carattere patologico quando questo equilibrio viene alterato, sottraendo in maniera definitiva il materiale sedimentario dal ciclo di deposito/asportazione naturale della sabbia.

Attualmente a livello nazionale si riscontra una situazione preoccupante, con circa il 40% delle spiagge in arretramento (Fierro, 2006) e anche il litorale veneto non è stato risparmiato da fenomeni erosivi significativi che hanno reso indispensabili interventi di recupero e ripascimento.

Escludendo i litorali completamente dedicati all'attività turistica e balneare e considerando solo le stazioni a elevata naturalità si riscontra comunque che nella maggior parte dei siti si ha una situazione di equilibrio, in cui non sono osservabili fenomeni attivi di formazione delle dune ma peraltro non vi è un rischio immediato di riduzione degli habitat a causa dell'erosione. Fa eccezione la foce del Tagliamento dove da anni, nella porzione più a sud, è in corso un processo erosivo che ha portato alla sparizione di tutta la fascia dunale, per cui la pineta si trova diretto contatto con il mare con conseguenze negative sulla sua vitalità. Recentemente è stato realizzato un sistema di pennelli, che ha portato ad un accumulo di sabbia particolarmente evidente nell'area più prossima alla foce.

Altra situazione particolare è quella degli scanni del delta del Po, ambienti per loro natura estremamente dinamici e soggetti a rapide variazioni (Figg.10 e 11). I fenomeni di subsidenza che nel dopo guerra hanno interessato il polesine e il delta del Po hanno però portato ad un accentuarsi dei fenomeni erosivi rispetto a quelli sedimentari, rendendo necessaria la realizzazione di notevoli opere di ripristino funzionale degli scanni al fine di ripristinare il loro ruolo di protezione nei confronti degli ambienti lagunari retro stanti. Attualmente la situazione è più stabile, anche per l'attenuazione dei fenomeni di subsidenza dopo la chiusura dei pozzi di estrazione del metano avvenuta nel 1963 (Colombo e Tosini, 2009).

Il processo di formazione attiva delle dune è osservabile in pochi siti: all'estremità meridionale della penisola di Caleri, presso il Giardino Botanico Litoraneo del Veneto e nei siti del lido di Venezia in località Alberoni e Ca' Roman (Tab. 4).



Figura 10 - Evidenti fenomeni di erosione a scanno Barricata.



Figura 11 - Interventi di ricostituzione dunale a scanno Palo.

Frammentazione

Le aree rimaste sono quelle conservatesi ai margini di un processo di urbanizzazione che ha coinvolto l'intero litorale veneto. I siti rimasti sono tra loro distanti, separati da chilometri di litorale in cui rimangono poche o nulle tracce della vegetazione originale. Anche spostandosi verso l'interno, in direzione perpendicolare alla

Tabella 4 - Sintesi della situazione dei principali siti rispetto all'erosione.

Aree	Bilancio sedimentario
Foce del Tagliamento	Fenomeni accentuati di erosione nella parte meridionale Presenza di pennelli di protezione
Vallevecchia	Stabile
Litorale della Laguna del Mort	Fenomeni di erosione Presenza di pennelli di protezione
Litorale del Cavallino: Ca' Ballarin	Stabile
Litorale del Cavallino: Ca' Savio	Stabile
Litorale del Cavallino: Punta Sabbioni	Stabile, tendenzialmente in deposito
Lidi di Venezia: dune degli Alberoni	Tendenzialmente in deposito
Lidi di Venezia: Ca' Roman di Pellestrina	Tendenzialmente in deposito
Litorale di Caleri	Stabile, in deposito nella parte meridionale

costa, raramente i siti costieri sono in collegamento con altri ambienti, considerata l'intensa antropizzazione dei limitrofi territori pianeggianti.

Processi di frammentazione interessano però anche i singoli siti, dove uno stabilimento balneare, una strada o altre strutture possono interrompere la continuità degli habitat (Fig. 12).

Le conseguenze della frammentazione sono notevoli e possono mettere a repentaglio la sopravvivenza stessa di habitat e specie. L'aumento dei margini, conseguenza diretta della frammentazione in piccole aree, favorisce l'invasione da parte di specie esotiche e/o ruderali, estranee alle condizioni originarie, con una conseguente banalizzazione degli habitat. (Buffa et al., 2005).

Le strategie di conservazione, per essere efficaci, devono considerare la qualità dell'intero paesaggio, attraverso la ricostruzione dei «tessuti» e l'apertura dei «varchi», in modo da salvaguardare la continuità dei territori naturali e seminaturali, consentendo i normali processi di dinamica ecologica che sono alla base della biodiversità (D'Alterio, 2006; Buffa e Lasen, 2010).



Figura 12 - Uno stabilimento balneare interrompe la continuità delle dune.

Pressione antropica

Le basse coste sabbiose venete sono state determinanti nello sviluppo di un'industria del turismo balneare che è fondamentale per l'economia, richiamando ogni anno milioni di visitatori. E' stato proprio lo sviluppo del turismo la prima causa della rapida scomparsa degli habitat naturali lungo le coste, sostituiti da insediamenti di tipo urbano e stabilimenti balneari. Le aree conservatesi hanno uno status di protezione piuttosto alto, per cui è difficile ipotizzare drastici ulteriori mutamenti nella loro destinazione d'uso. Al di là della distruzione diretta degli habitat, permane però una pressione derivante dalla frequentazione turistica che può avere pesanti ripercussioni sugli habitat se non viene opportunamente gestita. Paradossalmente è proprio la naturalità dei siti ed in particolare la presenza di spiagge "libere", a richiamare numerosi visitatori. Emblematico è il caso di Vallevicchia: rappresenta la più ampia spiaggia libera del Veneto e ospita, nel corso dell'estate, migliaia di bagnanti. Le dune consolidate alle spalle della battigia subiscono una pressione indiretta, i cui effetti non sono però trascurabili: sentieramento diffuso, abbandono di rifiuti e innesco di incendi. L'estensione delle dune embrionali viene ridotta dall'espansione delle zone dedicate ai bagnanti, con un'erosione graduale delle prime dune che si amplifica quando, per la pulizia dell'arenile, vengono utilizzati mezzi meccanici.

Non a caso, in tutte le aree, tra i primi interventi per la gestione sono state attuate azioni volte a incanalare i flussi, attraverso l'individuazione di percorsi preferenziali e dissuadendo il calpestio fuori dai percorsi (Fig.13). Una situazione particolare è quella delle aree meta di forme di turismo naturalistico che per sua stessa natura è maggiormente rispettoso dell'ambiente, ma che può comunque comportare un impatto su questi ecosistemi così vulnerabili. Esempio significativo è il Giardino Botanico Litoraneo del Veneto a Rosolina (RO), visitato annualmente da circa 10.000 persone. A metà degli anni '90 i visitatori avevano superato le 20.000 unità, con effetti evidenti soprattutto di erosione della duna grigia e di disturbo nei confronti della fauna. Sono quindi stati presi provvedimenti volti a proteggere direttamente le dune lungo i percorsi (costruzione di passerelle e camminamenti), a sensibilizzare il pubblico (depliant e cartelli), ma anche a stabilizzare il numero di visitatori attraverso l'introduzione di un biglietto d'ingresso e di un calendario di apertura a giorni alterni. Attualmente si sta operando anche per stimolare una più uniforme distribuzione delle visite che tendono a concentrarsi nel periodo tardo primaverile.



Figura 13 - Passerella sopraelevata nel Giardino Botanico Litoraneo di Porto Caleri.

Penetrazione di specie invasive e impoverimento della vegetazione

Una recente indagine sulla qualità e il grado di conservazione del paesaggio litorale sabbioso del veneto ha evidenziato come complessivamente le comunità vegetali di maggiore interesse floristico-vegetazionale e conservazionistico si concentrino nelle porzioni aride delle dune stabilizzate, le quali perciò meritano una gestione particolarmente attenta alla loro conservazione (Fig. 14). Più critica appare la situazione delle dune mobili in cui preoccupa la grande diffusione che diverse specie ruderali ed esotiche hanno ormai raggiunto (Buffà et al., 2007). L'alterazione, anche relativa, dello stato degli habitat, porta alla veloce penetrazione di queste specie. La loro gestione a livello locale non è affatto semplice; gli interventi di eradicazione, ipotizzabili solo per le specie arboree ed arbustive, sono complessi e onerosi e i risultati spesso inferiori alle attese. L'unica azione effettivamente efficace è quella preventiva, volta a ridurre il più possibile le alterazioni e il disturbo a carico di questi ecosistemi.



Figura 14 - Gruppo di yucche (*Yucca gloriosa*) tra le dune.

Gestione

I siti principali sono per lo più soggetti ad una gestione attiva, attuata con forme e modalità diverse soprattutto dalla Regione del Veneto, attraverso i Servizi Forestali Regionali e l'Azienda Regionale Veneto Agricoltura. A questi si affiancano, in determinati siti, associazioni ambientaliste (WWF e LIPU), amministrazioni comunali e il Parco Regionale del Delta del Po. I singoli gestori hanno attuato le proprie politiche di conservazione in modo autonomo l'uno rispetto all'altro fino al 2003, quando venne avviato un progetto LIFE Natura ("Azioni concertate per la salvaguardia del litorale veneto") che, avendo tra i propri obiettivi anche il superamento della frammentazione gestionale, offrì l'occasione di un confronto diretto tra i gestori consentendo la messa a punto di linee guida e strumenti comuni. Vennero realizzati anche numerosi interventi concreti, che interessarono molti dei siti sopra riportati e che consentirono il ripristino e il recupero di habitat. Le azioni di sensibilizzazione (materiale divulgativo, cartelli, incontri) hanno ulteriormente accresciuto la consapevolezza che al di là delle oggettive differenze locali, i siti costieri veneti rappresentano una realtà unitaria, da conservare e valorizzare nel loro complesso.

Il gestore che concretamente opera in un determinato territorio deve a sua volta relazionarsi con numerosi soggetti, dai Comuni fino alle Province e alla Regione (con diversi settori e uffici), per la molteplicità di competenze che si incrociano e si sovrappongono in questi ambienti: difesa costiera, tutela del paesaggio, turismo, pesca.

Un ruolo determinante viene svolto dai Comuni che, anche se marginalmente coinvolti negli interventi diretti, possono stimolare l'adozione di strumenti attenti alla tutela dei litorali e valorizzare, anche a fini turistici, la presenza di queste aree o, al contrario, percependo le aree dunali solo come vincolo, ostacolare la realizzazione di azioni volte alla loro conservazione.

Il controllo, il livello di tutela e l'attuazione di sistemi attivi di gestione variano da sito a sito, e risultano maggiori per le aree almeno in parte di proprietà del soggetto gestore quali Vallevecchia (Azienda Regionale Veneto Agricoltura) e il Giardino Botanico Litoraneo del Veneto (Regione del Veneto).

Prospettive

Le coste dell'alto adriatico rappresentano, nel panorama nazionale, un "punto caldo" di biodiversità e di endemismo, a livello sia floristico che faunistico, per cui è fondamentale che vengano fatti tutti gli sforzi possibili per salvaguardare gli ecosistemi sabbiosi superstiti (Audisio et al., 2002).

Lo status di protezione delle principali aree litoranee venete ad alto livello di naturalità è attualmente molto buono, essendo tutte inserite in siti Natura 2000 e, in alcuni casi (Litorale di Porto Caleri; dune fossili), nel Parco Regionale Veneto del Delta del Po; pur non trattandosi di vincoli assoluti, è in tal modo garantita almeno un'attenta valutazione dell'impatto di eventuali interventi.

La loro localizzazione, a diretto contatto con zone altamente antropizzate e urbanizzate, congiuntamente ad una loro intrinseca vulnerabilità, le rende comunque sempre esposte al rischio di venire alterate, anche pesantemente, a seguito di interventi di diverso tipo, finalizzati alla fruizione o alla difesa costiera. Fondamentale, per prevenire danni irreversibili, è la sensibilizzazione a livello di amministratori e gestori.

A livello non specialistico è infatti diffusa una visione che attribuisce scarso valore a questi ambienti, considerati marginali, selvatici e poco attraenti. Non a caso storicamente un contributo importante alla salvaguardia delle dune è stato dato dagli impianti artificiali di pino: le pinete, pur rappresentando un'alterazione della naturale e originaria composizione floristica delle dune, hanno da sempre goduto di una forma di tutela molto più forte rispetto alle formazioni erbacee, consentendo la conservazione di importanti ecosistemi dunali nel piano dominato. Anche oggi suscita una reazione pubblica molto maggiore il taglio delle pinete, considerate elemento fondamentale del paesaggio litoraneo, rispetto allo spianamento delle dune.

Con il progetto LIFE - Natura era stata realizzata una capillare azione di sensibilizzazione verso il pubblico e gli amministratori locali che spesso percepiscono la presenza di ambienti dunali esclusivamente come un vincolo. Si tratta di un'azione che andrebbe proseguita con costanza, ma che è affidata ai contatti e alle relazioni dirette che i singoli gestori instaurano con le relative amministrazioni.

Per assicurare a tutti i siti lo stesso livello di tutela e l'effettiva attuazione di una gestione integrata, in grado di assicurare una valutazione degli interventi e dei progetti che consideri la complessità degli equilibri di questi ecosistemi e attribuisca un corretto valore alla loro unicità, sarebbe utile l'individuazione di un soggetto referente a livello regionale con competenze multi-settoriali. Tale soggetto non dovrebbe sostituirsi ai singoli soggetti gestori nell'attuazione concreta degli interventi, bensì svolgere un'attività di supervisione e coordinamento, adoperandosi per assicurare l'applicazione di linee guida comuni.

I gestori devono affrontare situazioni estremamente varie e diversificate che richiedono spesso di prendere decisioni in tempi brevi e sulla base di un quadro conoscitivo non sempre chiaro. Di fronte a problemi nuovi, o che assumono improvvisamente carattere d'urgenza, è peraltro difficile individuare e sperimentare modalità di azione diverse da quelle sperimentate e consolidate. I tecnici che operativamente predispongono i progetti e attuano gli interventi dovrebbero avere competenze specifiche nei campi più disparati, dalla botanica fino alle metodologie di comunicazione. Con la crescita della consapevolezza della complessità e della vulnerabilità di questi ambienti, è sempre più sentita, tra chi opera in questi ambienti, l'esigenza di condividere conoscenze e informazioni. In particolare fondamentali sono gli scambi tra chi conduce studi e ricerche (soprattutto a livello universitario, ma non solo) e i tecnici che sono direttamente responsabili dell'attuazione degli interventi nei siti costieri.

A livello europeo e nazionale questa esigenza ha trovato un riscontro nella costituzione di *net-work* e gruppi di lavoro, quali il *dune net-work* europeo che fa riferimento alla Liverpool Hope University (<http://www.hope.ac.uk/coast>) e il costituendo *net-work* nazionale in cui referente è il Parco Regionale Toscano di Migliarino San Rossore Massaciuccoli.

L'8 ottobre 2009, in occasione della giornata tecnica sulla tutela e la valorizzazione degli ecosistemi costieri, tenutasi presso il Giardino Botanico Litoraneo del Veneto, è stata proposta la costituzione, anche in Veneto, di un gruppo di lavoro sulla gestione integrata delle dune costiere, al quale hanno aderito tecnici, professori universitari, ricercatori, liberi professionisti e altri soggetti interessati a queste tematiche.

La sfida è ora quella di riuscire a trovare tempi e modi per rendere il *net-work* attivo e in grado di produrre quello scambio di esperienze che rappresenta l'obiettivo principale della sua costituzione.

Conclusioni

Nel secondo dopoguerra le coste venete hanno subito un veloce ed irreversibile processo di trasformazione che le ha trasformate da ambienti naturali a componenti fondamentali di un'industria del turismo che vede proprio nelle lunghe spiagge sabbiose, attrezzate con tutti i servizi, il principale motivo di attrazione per migliaia di turisti.

I tratti di litorale rimasti integri testimoniano il valore di ecosistemi unici lungo le coste del mediterraneo, per la compresenza di elementi temperati e mediterranei e la conseguente ricchezza di endemismi. Il rischio che tali siti vengano ulteriormente ridotti a seguito di interventi antropici diretti, è limitato, per l'alto livello di tutela di cui sono oggetto, anche se numerose problematiche - tra cui per alcuni siti, i fenomeni dell'erosione costiera ne rendono complessa la gestione.

Diversa è la situazione dei frammenti di dune che sono ancora presenti in molte zone turistiche. In questo caso mancano informazioni e dati sulla loro estensione, ma è certo che la loro esistenza è molto precaria, anche perché non sempre vi è, soprattutto a livello di amministrazioni locali, un'adeguata consapevolezza del loro valore naturalistico.

La gestione attiva dei siti ad elevato valore naturalistico è attuato da un numero limitato di soggetti, che fanno per lo più capo alla Regione e che si sono adoperati per condividere conoscenze ed esperienze, adottando anche comuni linee guida di intervento.

Ulteriori strumenti per l'attuazione di forme di gestione integrata possono essere l'individuazione di un soggetto unico referente a livello regionale con funzione di coordinamento, supervisione, identificazione di linee guida come anche la costituzione di gruppi di lavoro informali (*net-work*): esperienze che in forme diverse si stanno attuando tanto a livello europeo che nazionale e regionale.

Bibliografia

- AA. VV. (2007) - *Progetto LIFE Natura "Azioni concertate per la salvaguardia del litorale veneto" Gestione di habitat nei siti Natura 2000*. Lineagrafica Ed., Castelfranco Veneto. pp. 235.
- Audisio P., Muscio G. e Pignatti S. (2002) - *Problemi di conservazione e gestione*. In Ruffo S. (a cura di) *Quaderni habitat. Dune e spiagge sabbiose. Ambienti tra terra e mare*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio. Museo Friulano di Storia Naturale. Pp. 119-145.
- Bianco P.M. e Menegoni P. (2009) a - *Inquadramento fitosociologico della vegetazione costiera italiana*. In Onori L. (a cura di) ISPRA - *Il ripristino degli ecosistemi marino-costieri e la difesa delle coste sabbiose delle aree protette Rapporti 100/2009*, pp 75-139.
- Bianco P. M. e Menegoni P. (2009b) - *Trasformazioni e degrado dei paesaggi costieri*. pp 176 - 177. In Onori L. (a cura di) ISPRA *Il ripristino degli ecosistemi marino-costieri e la difesa delle coste sabbiose delle aree protette Rapporti 100/2009*.
- Boschetti E., Richard J., Bonato L. (2006) - *Una popolazione relitta di *Pelobates fuscus insubricus* in un sito litoraneo veneto (*Amphibia: pelobatidae*)*. Gortania, Atti Museo Friulano di Storia naturale, 27: 339-345.
- Buffa G., Mion ., Gamper U., Ghirelli L., Sburlino G. (2005) - *Valutazione della qualità e dello stato di conservazione degli ambienti litoranei: l'esempio del SIC Penisola del Cavallino: biotopi litoranei (Venezia, NE-Italia)*. *Fitosociologia*, 42 (2): 3-13.
- Buffa G., Filesi L., Gamper U. e Sburlino G. (2007) - *Qualità e grado di conservazione del paesaggio vegetale del*

- litorale sabbioso del Veneto (Italia settentrionale)*. Fitosociologia, 44 (1): 49-58.
- Buffa G. e Lasen C. (2010) *Atlante dei siti natura 2000 del Veneto. Regione del Veneto*. Direzione Pianificazione e Parchi. Venezia, pp 394.
- Colombo P. e Tosini L. (2009) - *1950 - 2010 60 anni di bonifica nel delta del Po. Consorzio di Bonifica Delta Po Adige*. Papergraf Ed. Piazzola sul Brenta. pp. 242.
- D'Alterio S. (2007) - *Il valore ecologico del sistema delle aree naturali litoranee*. in AA. VV. Progetto LIFE Natura "Azioni concertate per la salvaguardia del litorale veneto" Gestione di habitat nei siti Natura 2000. Lineagrafica Ed., Castelfranco Veneto, pp. 27-29.
- Fierro G. (1990) - *L'erosione costiera. La difesa del mare e delle coste metodologie, obiettivi, attività*. Consorzio Pelagos.
- Fierro G. (2006) - *Il degrado dei litorali*. Scienzaonline, pp. 28-29.
- Filesi L., Buffa G., Gamper U., Sburlino G. (2006) - *La vegetazione del sistema costiero veneto: peculiarità, rischi, conservazione e possibilità di riqualificazione*. In Zecza F. (a cura di) "La riqualificazione delle città e dei territori: Architettura e Scienze a confronto". Quaderni IUAV 48: 123-128.
- Fiorentin R. (2007) - *Habitat dunali del litorale veneto*. pp. 75 - 127. in AA. VV. Progetto LIFE Natura "Azioni concertate per la salvaguardia del litorale veneto" Gestione di habitat nei siti Natura 2000. Lineagrafica Ed., Castelfranco Veneto.
- Gamper U., Filesi L., Buffa G. e Sburlino G. (2008) - *Diversità fitocenotica della dune costiere nord adriatiche 1 - Le comunità fanerofitiche*. Fitosociologia, 45: 3-21.
- Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero (2006) - *Lo stato dei litorali italiani* Studi costieri, Vol. 10/2006.
- Perlasca P. e D'Alterio S. (2006) - *Le dune dei litorali altoadriatici*. Progetto LIFE "Azioni concertate per la salvaguardia del litorale veneto". Grafiche V. Bernardi, pp. 26
- Richard J. (2007) - *Pelobate fosco Pelobates fuscus (Laurenti, 1768)*. In Bonato L., Fracasso G., Pollo R., Richard J., Semenzato M. (a cura di) *Atlante degli Anfibi e dei Rettili del Veneto*. Associazione Faunisti Veneti, Nuovadimensione Ed. Portogruaro. Pp. 78-81.
- Rivas-Martinez S. (2004) - *Global bioclimatics. Classificación Bioclimática de la Tierra*. Versione 27-08-04
- Vallerani F., Vianello F. e Zanetti M. (nd) - *Vallevecchia la natura ritrovata*. Grafiche Vianello ed. Ponzano TV. Pp.138.

Siti internet

<http://www.regione.veneto.it/Ambiente+e+Territorio/Territorio/Reti+Ecologiche+e+Biodiversità>

Ricevuto il 31/03/2010, accettato il 06/07/2010.

Le dune costiere dell'Emilia-Romagna: strumenti di analisi, cartografia ed evoluzione

Luisa Perini e Lorenzo Calabrese

Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, Regione Emilia-Romagna, Viale della Fiera 8 - 40122 Bologna, Tel: 051 5274212
Fax: 051-5274208, E-mail: lperini@regione.emilia-romagna.it, lcalabrese@regione.emilia-romagna.it

Riassunto

Le dune costiere sono elementi morfologici di estrema importanza per la fascia costiera emiliano-romagnola caratterizzata da vaste aree con quote al di sotto del livello del mare. Oltre ad essere il serbatoio naturale per il ripascimento delle spiagge, esse costituiscono la principale linea di difesa dall'ingressione marina durante gli eventi di mareggiata associati al fenomeno dell'acqua alta. Attualmente le dune sono preservate solo lungo il 28% del litorale regionale, e spesso si presentano in condizione di forte frammentazione e degrado.

Per questi motivi si è ritenuto fosse indispensabile monitorarne lo stato di conservazione e l'evoluzione nel tempo attraverso un dettagliato lavoro di fotointerpretazione di tutti gli elementi morfo-deposizionali della fascia costiera realizzato sulla base degli ortofotopiani relativi agli anni 1943, 1982, 1998 e 2005. Le dune sono state classificate in funzione del loro grado di maturità distinguendo le dune attive, quelle semi-stabilizzate e quelle stabilizzate, in relazione al diverso livello di inerbimento e/o di vegetazione osservabili da foto aerea. La cartografia 2005 è stata collaudata attraverso il rilevamento in campo e con l'uso di dati altimetrici ad alta risoluzione, acquisiti con sistema di telerilevamento LIDAR (Light Detection and Ranging), che si sono dimostrati fondamentali nell'analisi dei rischi costieri, permettendo una chiara individuazione dei varchi e delle quote delle singole porzioni di duna. L'attività di mappatura e classificazione delle dune rientra nei progetti di cartografia e di studio effettuati per la creazione del Sistema Informativo del Mare e della Costa da parte del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Parole chiave: duna, spiaggia, Sistema Informativo del Mare e della Costa, opere di difesa costiera, geodatabase, erosione della costa.

Abstract

Coastal dunes are very important morphological features along the Emilia-Romagna coastal area, characterised by large areas below sea level. These elements form a part of the sand reservoir needed for natural nourishment of beaches and also represent the main natural defence line against sea flooding during storm events associated to surges that frequently reach the coastal zone. Unfortunately only 28% of the coastline are currently protected by dunes, which are highly fragmented and deeply damaged as consequence of human impacts.

Monitoring the status and evolution of the dune system over time was performed in this study using very detailed cartography of morpho-depositional littoral features, in GIS environment, by means of photo-interpretation of orthophoto-mosaics dated from 1943, 1982, 1998, 2005. Dunes were mapped in detail in terms of their maturity,

and 3 classes were defined: active, semi-stabilized and stabilized dunes, corresponding to the many different levels of plant coverage observed in airborne photos. The most recent cartography was also tested in the field and integrated with high-resolution topography obtained through remote sensing technique, the LIDAR (Light Detection And Ranging), which was crucial in the analysis of coastal hazards and allowing clear identification of gaps and elevation of each dune portion. The activity was carried out within the framework of the project for the creation of the Emilia-Romagna Coastal and Marine Information System developed by the Geological, Seismic and Soil Survey of Emilia-Romagna Region.

Keywords: *dune, beach, Marine & Coastal Information System, coastal defences, geodatabase, coastal erosion.*

Introduzione

La duna costiera costituisce uno degli elementi morfologici più significativi per descrivere lo stato di salute dei litorali (Macchia et al., 2005) e per definire il livello di rischio a cui essi sono esposti in occorrenza di eventi di mareggiata (Ciavola et al., 2007, Corbau et al. 2008) o per effetto dell'innalzamento del livello marino (Gambolati et al., 1998, Simeoni e Corbau, 2008).

Lo studio delle dune costiere dell'Emilia-Romagna ha recentemente beneficiato di nuovi strumenti di analisi, offerti dall'acquisizione di dati telerilevati, che sono stati utilizzati per l'elaborazione delle carte geomorfologiche e dell'uso del suolo della fascia costiera e per la costruzione di modelli altimetrici ad alta risoluzione. Tali informazioni hanno consentito di definire la distribuzione, lo stato e l'evoluzione delle dune lungo la costa regionale mentre, per comprendere la loro origine, si è considerato opportuno fare riferimento al quadro conoscitivo esistente. Il contesto geologico, in cui le dune della regione Emilia-Romagna vanno collocate, è descritto dai Fogli CARG (progetto di Cartografia Geologica d'Italia 1:50000). Le carte, le sezioni geologiche e le ricostruzioni paleo-ambientali testimoniano che la variazione del clima ha fortemente influenzato l'assetto della piana costiera e quindi la configurazione delle dune antiche e recenti, come oggi le possiamo osservare.

La storia olocenica di questo territorio, a partire da circa 12000 anni fa, è segnata da una rapida risalita del livello marino come conseguenza dello scioglimento dei ghiacciai wurmiani. Tale fenomeno ebbe l'effetto di innescare un brusco arretramento della linea di riva che migrò da una posizione posta all'altezza di Pescara fino a raggiungere località ubicate a circa trenta chilometri ad ovest rispetto a quella attuale, come testimoniato dai depositi sepolti della pianura romagnola (Veggiani, 1973; Amorosi et al., 2008). All'annegamento della piana alluvionale pleistocenica si accompagnò una riduzione dell'apporto solido dei fiumi, che, solo partire da circa 5500 anni fa, quando il livello del mare si stabilizzò, ricominciarono a trasportare materiale sufficiente a produrre il progressivo riempimento delle zone allagate e l'avanzamento del sistema litorale e della linea di riva verso est, fino a raggiungere l'attuale posizione. Questa evoluzione sedimentaria trasgressivo-regressiva ha creato un cuneo di depositi costieri spesso fino ad una trentina di metri ed esteso per decine di chilometri nell'entroterra del delta padano, sia recente che antico, mentre è limitato ad una fascia ampia circa un chilometro nel settore meridionale più prossimo al margine appenninico. I sedimenti regressivi sono frequentemente affioranti e sono databili, su basi storico-archeologiche, soprattutto a partire dall'Età Romana. Queste informazioni, accompagnate dalla ricostruzione dei rapporti geometrici tra gli antichi lobi deltizi, hanno reso possibile una buona ricostruzione dell'evoluzione della piana costiera alla scala secolare.

Le dune attuali costituiscono solo una piccola percentuale dell'intero sistema costiero olocenico, la loro evoluzione si realizza alla scala annuale e decennale e mostrano un'estensione decisamente inferiore ai grandi complessi dunosi fossili. La necessità di nuovi strumenti di analisi, con un grado di risoluzione superiore a quello offerto da un approccio strettamente geologico, ha portato il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna ad intraprendere il progetto di 'Cartografia geomorfologica della costa', in cui si è realizzata la mappatura su base foto-interpretativa degli elementi morfologici del sistema costiero, tra cui le dune attuali; in particolare, si è deciso di interpretare come "duna" solo quella porzione di cordone litorale nella posizione più avanzata verso mare (duna primaria, avanduna) e che, dall'analisi della cartografia storica e dalle foto aeree, risultasse di 'recente formazione', ovvero riferibile agli ultimi 50-100 anni.

Strumenti e Metodi

La mappatura delle dune costiere rientra nel lavoro di “Cartografia geomorfologica della costa” dell’Emilia-Romagna che è stato avviato nel 2002 con la creazione del “Sistema Informativo del Mare e della Costa”, strumento di elaborazione e di gestione dei dati a supporto delle attività di programmazione e di progettazione degli interventi (Perini et al., 2007). In tale ambito sono stati realizzati numerosi studi e prodotti cartografici di dettaglio finalizzati a migliorare le strategie di difesa della costa della Regione Emilia-Romagna.

La metodologia di analisi e di mappatura è stata messa a punto nell’ambito di una convenzione con l’Università di Ferrara (Ciavola et al., 2003) grazie alla quale è stata attuata una sperimentazione in tre aree campione della costa regionale. La procedura è stata successivamente migliorata grazie alla disponibilità dei nuovi dati altimetrici acquisiti con sistema laserscan LIDAR (Light Detection and Ranging) nel 2004.

Nella prima fase, come approccio metodologico per la classificazione delle dune ci si è riferiti ai lavori presenti in letteratura (Pranzini, 2005; Pranzini e Simeoni, 2005), tra cui l’Atlante delle Dune Costiere Nazionali (Valpreda, 2006; Simeoni et al., 2006).

Come per gli altri elementi morfologici, anche la mappatura delle dune è stata realizzata confrontando varie fonti di dati, acquisiti in periodi diversi, al fine di produrre una dettagliata analisi evolutiva di tale elemento morfologico. I principali strumenti cartografici e i dati utilizzati sono stati:

- la Carta Geologica della Pianura dell’Emilia-Romagna in scala 1: 250 000;
- le carte storiche: 1° impianto IGM del 1893 e la Carta storica regionale 1:50.000, derivata dalla ‘Carta austriaca scala 1:86400’ del 1850 (Foschi et al., 1999);
- le foto aeree ortorettificate relative agli anni 1943-45, 1982, 1998, 2005;
- i dati altimetrici LIDAR 2004;
- immagini e dati rilevati in campo.

La metodologia operativa adottata per la mappatura degli elementi morfologici della costa può essere schematizzata nel modo seguente:

- fotointerpretazione in ambiente GIS e creazione dei poligoni;
- coerenza dell’attribuzione tra i vari periodi analizzati;
- calibrazione con i modelli digitali del terreno ad alta risoluzione.

La mappatura e la classificazione delle dune costiere

La cartografia della duna costiera è stata elaborata attraverso la fotointerpretazione degli ‘Ortofotomosaici della costa’ relativi agli anni 1943-45, 1982, 1998 e 2005, prodotti nell’ambito del Sistema Informativo del Mare e della Costa (Luciani e Perini, 2009). Il criterio di classificazione utilizzato fa riferimento a quello dell’Atlante delle Dune Costiere Nazionali (Simeoni et al., 2006, 2010), adattato al caso delle coste emiliano-romagnole. L’approccio è stato quello di creare i poligoni delle aree che, all’occhio del fotointerpretatore, racchiudessero le zone più elevate rispetto alla quota della spiaggia e di retroduna e che contestualmente risultassero ricoperte dalla tipica vegetazione dunale.

Sulla base della densità e della tipologia della copertura vegetazionale si sono ulteriormente suddivisi i poligoni, attribuendo a ciascuno di essi l’informazione relativa al grado di maturità della duna (Fig. 1), ottenendo così la seguente classificazione:

- duna attiva: è priva di vegetazione o con vegetazione sparsa di tipo erbaceo; è definita tale perché è in continua evoluzione morfo-sedimentaria e in costante scambio litologico con la spiaggia emersa, da intendersi come area sorgente di sedimento;
- duna semi-stabilizzata: presenta una vegetazione di tipo arbustivo abbastanza diffuso, ma intervallata da tratti con vegetazione di tipo erbaceo o privi di vegetazione;
- duna stabilizzata: è caratterizzata da una vegetazione prevalente di tipo arboreo che impedisce o diminuisce i cambiamenti della duna (legati all’azione del vento).

E’ da sottolineare che, per quanto concerne la duna stabilizzata, sono sorti numerosi dubbi sulla posizione del limite interno.

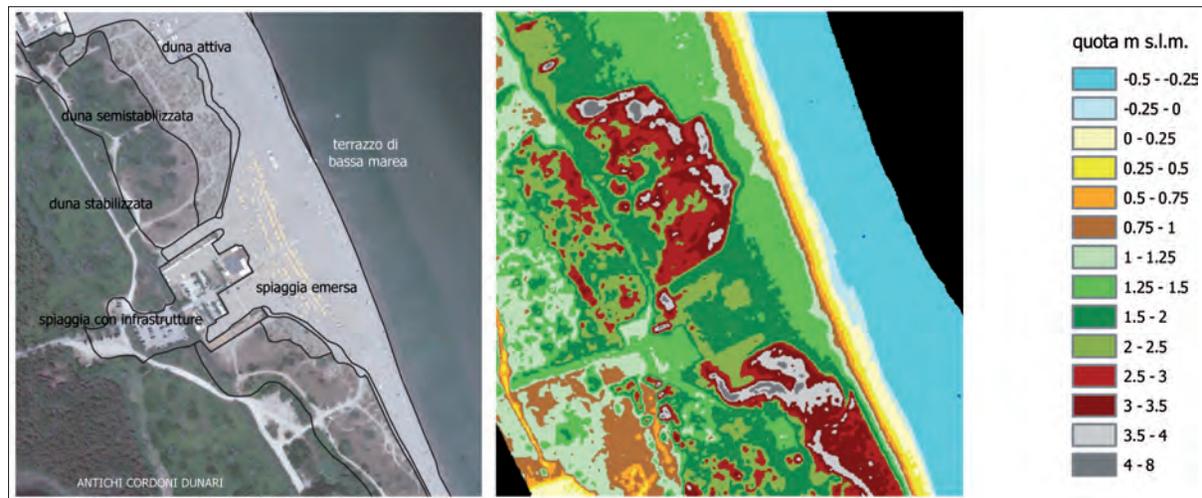


Figura 1 - Esempio di cartografia della duna e della spiaggia emersa; la duna è distinta in attiva, semi-stabilizzata e stabilizzata; con l'utilizzo di un modello digitale del terreno (DTM) è possibile evidenziare le caratteristiche morfologiche del sistema duna/spiaggia: risaltano chiaramente l'andamento della cresta della duna e l'interruzione del rilievo dovuto allo spianamento della duna per opera dell'uomo (da Calabrese e Lorito, 2009).

Frequentemente, infatti, il passaggio all'ambiente di retroduna con fitta vegetazione arborea, tipica di molte pinete regionali costiere, risulta piuttosto sfumato e di difficile interpretazione poiché si sovrappone ad antichi complessi di duna.

Per risolvere queste situazioni sono stati effettuati confronti con tutti i voli aerei disponibili e con la cartografia storica che hanno chiarito molti dubbi soprattutto nelle situazioni in cui le dune risultavano di nuova formazione rispetto all'epoca della cartografia. Sono risultati infine cruciali i rilievi in campo presso i punti di controllo (Fig. 2), che hanno permesso di collaudare i livelli cartografici più recenti (2000 e 2005).



Figura 2 - Duna del litorale emiliano-romagnolo; si notano le porzioni parzialmente vegetate e stabilizzate e le lingue di sabbia di porzioni attive.

L'uso dei dati altimetrici ad alta risoluzione

I poligoni ottenuti dalla fotointerpretazione sono stati incrociati con la griglia altimetrica al fine di verificare l'elevazione degli elementi morfologici e di analizzare, con maggiore chiarezza, i diversi settori che caratterizzano l'intero sistema deposizionale spiaggia-duna definendone anche gli stadi evolutivi (Fig. 3).

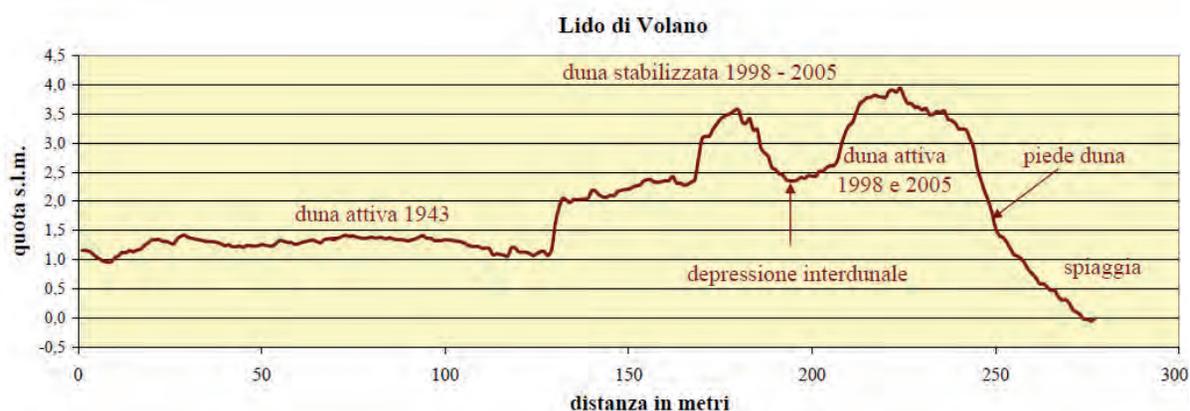


Figura 3 - Sezione altimetrica trasversale alla spiaggia di Lido di Volano realizzata sulla base del DTM LIDAR 2004, si possono osservare le diverse porzioni del sistema duna-spiaggia negli ultimi 60 anni.

Uno strumento molto efficace per questo tipo di analisi è rappresentato dal DTM (Digital Terrain Model) ad alta risoluzione (grid con cella 1 m x 1 m) ottenuto con tecnica LIDAR, già utilizzata con successo nell'ambito di studi costieri dei litorali italiani (Bresci et al., 2006; Pranzini, 2007). Nel caso del rilievo LIDAR 2004, effettuato dalla Regione Emilia-Romagna in collaborazione con l'Istituto Cartografico della Catalogna, i valori misurati attraverso il sistema di telerilevamento sono stati verificati con misure dirette in campo che hanno dimostrato un grado di accuratezza altimetrica nettamente superiore a quella nominale che è di circa 1 metro in planimetria e 20 cm in altimetria (Perini, 2005). La disponibilità dei dati LIDAR acquisiti dal 2003 al 2009, da parte di vari Enti, ha consentito di posizionare accuratamente e di confrontare l'evoluzione nel tempo di alcuni elementi caratteristici delle dune costiere quali: il piede della duna, il fronte, la cresta, le depressioni interdunali e i varchi. Tali controlli, effettuati sovrapponendo in GIS i grid dei diversi DTM, hanno permesso di evidenziare dove le dune si sono mantenute più o meno stabili negli ultimi 6 anni e dove si sono registrate variazioni volumetriche. Altra analisi molto importante che si può ottenere con tali dati è quella sullo stato dei varchi che rappresentano le vie preferenziali di ingressione dell'acqua marina durante i fenomeni di mareggiata e/o di acqua alta. I varchi sono per lo più generati dagli spianamenti artificiali e dai numerosissimi camminamenti verso le spiagge antistanti, più raramente dallo sfondamento da parte di mareggiate e dall'azione del vento.

Caratteristiche della duna costiera a scala regionale ed evoluzione recente

I risultati del lavoro di cartografia e di classificazione delle dune costiere dell'Emilia-Romagna offrono un quadro chiaro dell'estensione, dello stato di attività e del grado di conservazione di questi corpi sedimentari. Il confronto tra le cartografie relative ai diversi anni ha permesso inoltre di ricostruire l'evoluzione delle dune negli ultimi 60 anni (si veda Tab. 1 e Fig. 4) e di comprendere la loro dinamica in rapporto con l'intero sistema spiaggia-duna. L'estensione della duna costiera all'epoca del volo R.A.F. 1943-45 era di circa 90 km ed era

Tabella 1 - Lunghezza dei tratti di costa protetti da duna nei tre anni di osservazione 1943, 1982 e 2005.

Provincia	Lunghezza totale tratto costiero	Lunghezza tratto costiero con duna 1943-45	Lunghezza tratto costiero con duna 1982	Lunghezza tratto costiero con duna 2005
Ferrara	Circa 30 km esclusa laguna	26.6	23.1	17.8
Ravenna	47.4 km	42.2	26.2	18.3
Forlì	9.4 km	3.8	1.12	0.18
Rimini	35.0 km	18.2	0.4	0.4

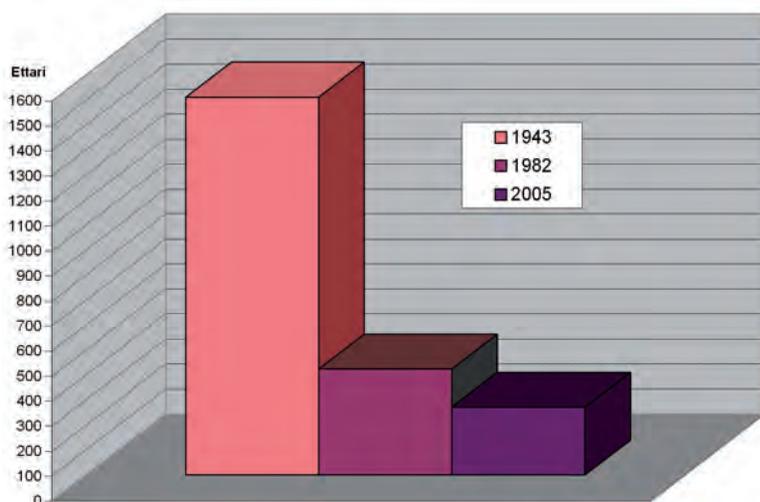


Figura 4 - Variazione della superficie della duna costiera dal 1943 al 2005 (da Lorito et al., 2009).

ampiamente presente anche nel territorio della provincia di Rimini, interessando oltre il 50% di questo litorale. Le stesse foto aeree mettono chiaramente in evidenza che, all'epoca del volo, era già avviato un intenso sfruttamento delle dune utilizzate come cave di sabbia e, in molte zone, furono spianate per far spazio alle nascenti strutture turistiche e balneari. I decenni successivi, e in particolare fino agli anni '80, sono stati caratterizzati da una progressiva riduzione della duna che, in parte, è stata spianata anche al fine di aumentare la superficie utile di spiaggia, come si evince dai diagrammi della cartografia dell'uso del suolo tratti dal lavoro 'Uso del suolo della Costa' (Lorito et al., 2009). La combinazione dell'evoluzione naturale e degli interventi antropici hanno

inesorabilmente ridotto l'estensione delle dune lungo le coste dell'Emilia-Romagna al punto tale che all'anno 2005 solo il 28% del litorale regionale, equivalente a circa 37 km, presenta porzioni di duna preservata. Esse si concentrano quasi esclusivamente nelle province di Ravenna e Ferrara, mentre lungo la costa delle province di Rimini e Forlì-Cesena, la duna è rilevabile solo in piccoli tratti (Fig. 5). Le dune attuali, mostrano chiare caratteristiche di dinamicità naturale anche se risentono fortemente della pressione antropica che limita la loro crescita areale e altimetrica.

Solo nei tratti di costa privi di centri abitati si possono riscontrare apparati dunosi con lunghezza superiore a 1 km. L'area in cui si osserva la massima continuità è quella compresa tra Foce Savio e Foce Fiumi Uniti, lungo la costa ravennate, dove le dune, pur intaccate da frequenti camminamenti, si estendono con continuità per circa 5 km.

Le quote altimetriche dei corpi più recenti sono generalmente comprese tra 1,5 e 3 metri e solo localmente, lungo il litorale ferrarese, si osservano porzioni di duna con quote che raggiungono i 5-6 m s.l.m.



Figura 5 - Distribuzione della duna nelle quattro province costiere.

Le osservazioni condotte in campo lungo sezioni di duna messe a nudo dalle mareggiate evidenziano la presenza di materiale di origine antropica, come per esempio bottiglie di plastica, anche in porzioni di duna stabilizzata. Ciò indica un ciclo di formazione, evoluzione ed erosione molto rapido, realizzatosi nell'ultimo cinquantennio. Con riferimento alla 'Carta Geomorfologica Costiera 2005' (Calabrese e Lorito, 2009), la distribuzione in classi di attività dei 250 ettari di duna mappati risulta la seguente:

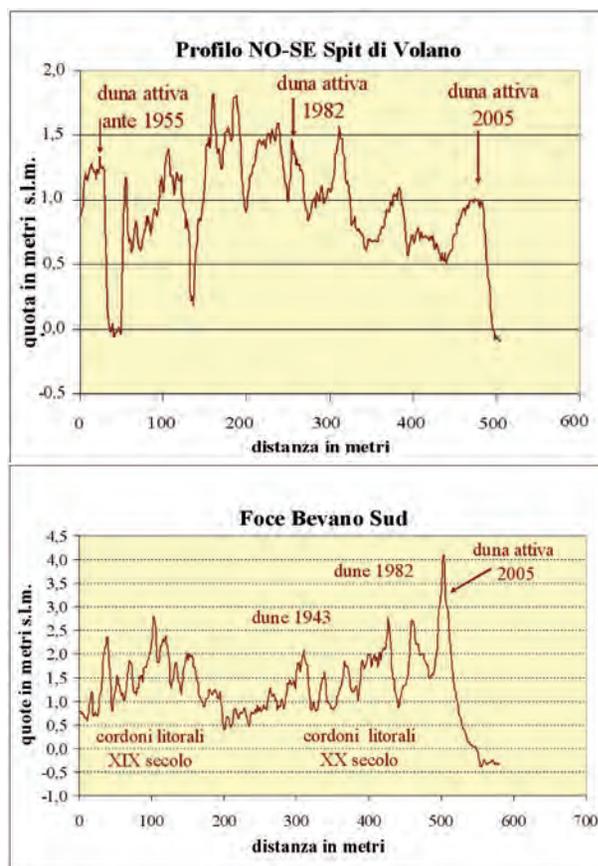
- 9% duna attiva;
- 32% duna semi-stabilizzata;
- 59% duna stabilizzata.

L'assetto e l'estensione delle dune attuali nei diversi tratti della costa regionale è ben osservabile, oltre che su base planimetrica, anche in sezione lungo profili topografici (Fig. 6a e b). Questi ultimi forniscono informazioni chiare circa la posizione reciproca dei complessi di duna riferibili alle diverse età e consente di determinare anche l'ampiezza e le quote dei singoli corpi sedimentari.

Con riferimento alla costa Ferrarese e Ravennate, si può osservare che nelle aree dove il retroduna è urbanizzato ed impostato sui cordoni più antichi, la duna recente è estremamente ridotta in ampiezza da pochi metri a poche decine di metri. In altre situazioni, più conservative, tra la duna attuale e l'urbano è interposta invece una pineta, artificialmente piantata sui vecchi depositi di cordone litorale spianati.

Nelle aree naturali, come la freccia litorale di Volano, l'ampio tratto costiero a nord e a sud di Foce Reno e l'area di Foce Bevano, le zone di retroduna sono caratterizzate da zone umide e ampie pinete, o da aree agricole molto sviluppate. In questi settori sono generalmente ben riconoscibili le diverse tappe di sviluppo delle dune e l'estensione delle porzioni riferibili al dopoguerra è generalmente di alcune centinaia di metri.

Il confronto tra l'evoluzione della duna recente con quello della spiaggia, effettuato sulla base della cartografia GIS, dimostra la naturale coincidenza tra la tendenza evolutiva della linea di riva e quella del fronte dunale.



Lungo i tratti in forte arretramento, come le foci di F. Reno e Fiumi Uniti, si è manifestato lo smantellamento completo di corpi di duna anche di recente formazione, come quelli riportati sulla cartografia geomorfologica relativa al volo 1943-45. Tale tendenza si osserva in tutti i tratti critici, come il litorale di Lido delle Nazioni, a sud di Foce Lamone o a sud di Lido di Dante dove, parallelamente all'arretramento della linea di riva, si registra una forte erosione del fronte della duna più recente.

Analogamente, i pochi tratti di litorale regionale dove ad una ampia spiaggia in accrescimento si abbina anche la presenza di duna attiva, come per esempio a Marina Romea o Marina di Ravenna nord, si osserva la tendenza all'accrescimento verso mare della duna con uno spostamento del piede anche di 4-5 m/a. In queste zone durante la primavera la vegetazione dunale tende ad attecchire in porzioni di spiaggia antistanti il piede della duna, favorendo così l'intrappolamento della sabbia trasportata dal vento e gettando le basi per il futuro accrescimento della duna stessa.

Figura 6 - Sezioni topografiche realizzate sulla base dei dati LIDAR 2004 in corrispondenza dello 'spit' di Volano e a sud di Foce Bevano.

L'evoluzione e le caratteristiche della duna a scala locale

Quando dalla scala regionale si passa a quella locale, le caratteristiche delle dune lungo il litorale emiliano-romagnolo diventano molto diversificate ed articolate. Il sistema regionale duna-spiaggia mostra una grande variabilità geomorfologica che riflette la complessa tipologia degli ambienti morfo-deposizionali costieri e la loro diversa storia evolutiva. E' possibile quindi riconoscere: grandi complessi di duna antica fittamente vegetati che, per erosione, si trovano direttamente fronte mare, come nel tratto settentrionale della costa ferrarese (Fig. 7a); la compresenza di duna e *beach-ridge* presso le principali foci fluviali regionali, quali foce Reno (Fig. 7b) e foce F. Uniti; i complessi progradanti di dune, oggi stabilizzate dalla vegetazione del XIX-XX secolo, come quelli presso Lido degli Estensi, Marina di Ravenna e foce Bevano (Fig. 7c); le dune associate alle frecce litorali di Volano (Fig. 7d) e di Goro (Scanno di Goro).

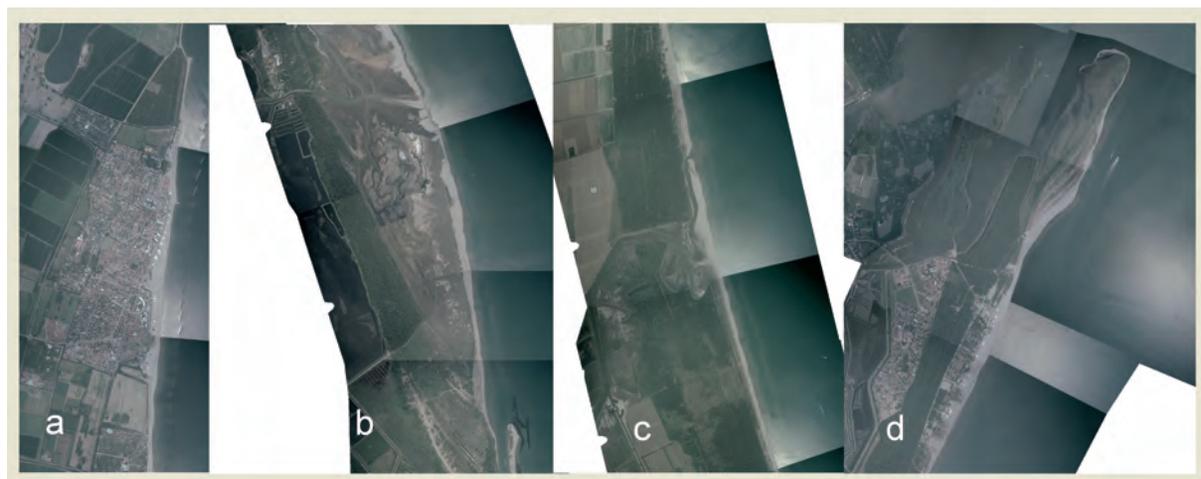


Figura 7 - a)-cordoni dunosi antichi presso Lido delle Nazioni; b)- cordoni dunosi antichi, dune recenti, beach ridge e zone umide presso foce Reno nord; c)- cordoni dunosi antichi e recenti presso foce Bevano; d)- cordoni dunosi presso la freccia di Volano.

Negli ultimi 50 anni, la complessa evoluzione della duna è stata fortemente condizionata oltre che dalla varietà del paesaggio naturale anche dall'azione dell'uomo che ha modificato artificialmente e profondamente la sua dinamica e la sua forma. Si registrano variazioni profonde dell'uso del suolo e si osservano camminamenti, varchi, scavi e spianamenti, sia parziali che totali, con la scomparsa definitiva del rilievo dunoso.

Un esempio molto efficace di questa complessa evoluzione della duna, è stato recentemente studiato nel tratto a nord di Lido delle Nazioni, dove, la forte erosione del fronte dunale, ha messo a nudo una sezione stratigrafica molto rappresentativa (Fig. 8).

In questo tratto, i depositi attuali di spiaggia e di duna sono organizzati verticalmente in una sequenza di facies caratterizzata, a partire dal basso, da sedimenti limoso-argillosi lagunari, sovrastati da sabbie di spiaggia a loro volta ricoperte da limi di palude e da depositi di mareggiata e sabbie di duna. Sovente quest'ultimo intervallo presenta una struttura caotica e screziature probabilmente dovute ad aratura e a processi di pedogenesi incipienti. L'intervallo più alto è costituito da sabbie sciolte di duna con intercalati rifiuti plastici di diverso tipo, appoggiati su una superficie irregolare erosiva. Questo record sedimentario, e il confronto con le carte topografiche storiche degli ultimi 200 anni, le foto aeree degli ultimi 60 anni (Fig. 9) e la datazione dei principali complessi antichi di spiaggia/duna, testimoniano una complessa evoluzione del sistema costiero, con fasi di avanzamento ed arretramento, che hanno profondamente influenzato la formazione e la dinamica della duna.

Una possibile interpretazione di questa successione è che i depositi lagunari siano associati alle fasi di attività e di progradazione del delta del Po di Volano del XV-XVI secolo, mentre, i depositi di spiaggia in cui si riconoscono facies appartenenti al *beach ridge*, ai canali e ai depositi di mareggiata, rappresentino una fase di abbandono del delta e la conseguente migrazione verso terra del cordone litorale. I depositi limosi di palude e quelli sabbiosi

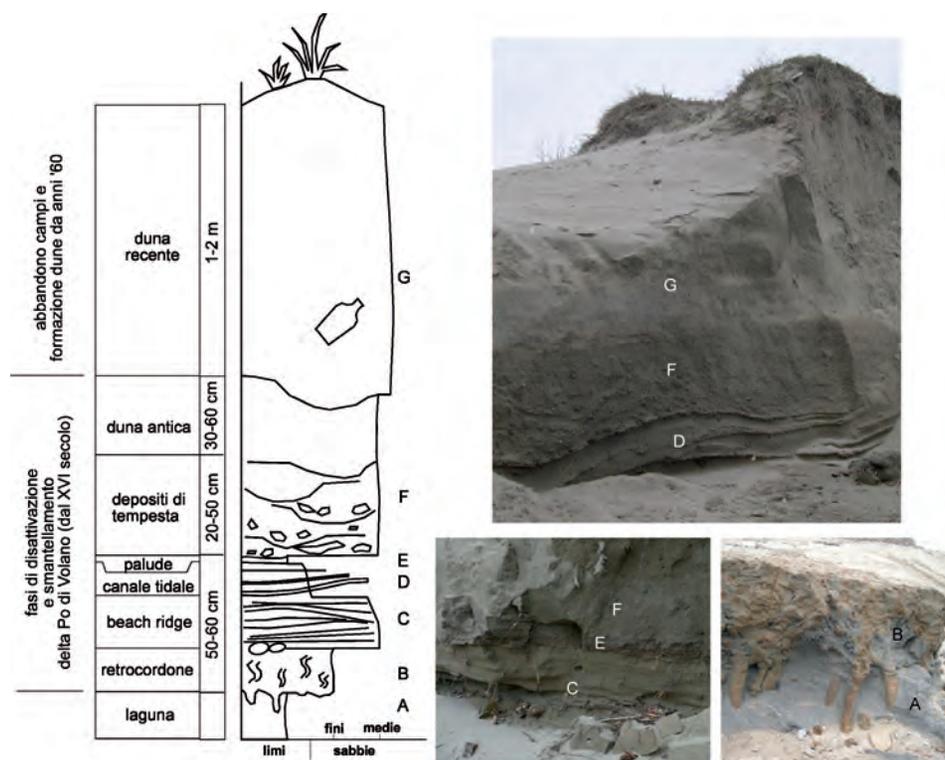


Figura 8 - Sequenza ricostruita delle litofacies affioranti a nord di Lido delle Nazioni e loro interpretazione ambientale; i sedimenti sabbiosi della spiaggia attuale appoggiano direttamente sui depositi lagunari. Per maggiori dettagli si veda il testo.



Figura 9 - a)- carta topografica del 1814: il punto di affioramento osservato (stella rossa) cade su un cordone litorale che segue le geometrie dell'antico delta del Po di Volano; b) Volo GAI (1953-1954): lo stesso punto è ubicato sopra aree coltivate; c)- Ortofotoaima 2008: attualmente il punto di affioramento si trova sopra rilevati dunosi paralleli alla costa stabilizzati dalla vegetazione.

di duna pedogenizzata rappresenterebbero il rallentamento e la stasi del severo smantellamento della cuspidè deltizia; l'alterazione di questo intervallo sarebbe legata invece alla diffusione di campi agricoli, presenti dalla fine del XIX secolo alla prima metà del XX secolo. L'abbandono dei campi e la formazione di una duna recente

sarebbero avvenuti infine a partire dalla metà del XX secolo, come testimonia il più alto intervallo stratigrafico. Come esempio della complessità delle forme delle dune, che oggi si rilevano a scala locale lungo il litorale, vengono illustrati di seguito tre casi che mostrano la morfologia dettagliata di tratti costieri di circa 400-500 metri ottenute tramite rilievo LIDAR (vedi sopra) in cui è possibile apprezzare la profonda diversità della configurazione della duna e della spiaggia.

Il primo caso (Fig. 10) ritrae l'andamento del terreno nel settore a sud di foce Bevano dove è osservabile una prima duna continua ed elevata (superiore ai 4 metri) immediatamente a tergo di una spiaggia emersa molto sottile. Nel retro della prima duna si sviluppa un complesso di dune più antico in cui le quote sono generalmente più basse, lo sviluppo è discontinuo e sono presenti ampi settori di interduna con quote prossime al livello del mare. Il tratto fa parte di un settore di costa naturale e progredante con continuità dal XIX secolo.

Il secondo caso (Fig. 11) interessa un tratto costiero presso Marina Romea dove si può osservare una configurazione simile alla precedente ma con significative differenze: la spiaggia emersa è ampia e la prima duna è spesso

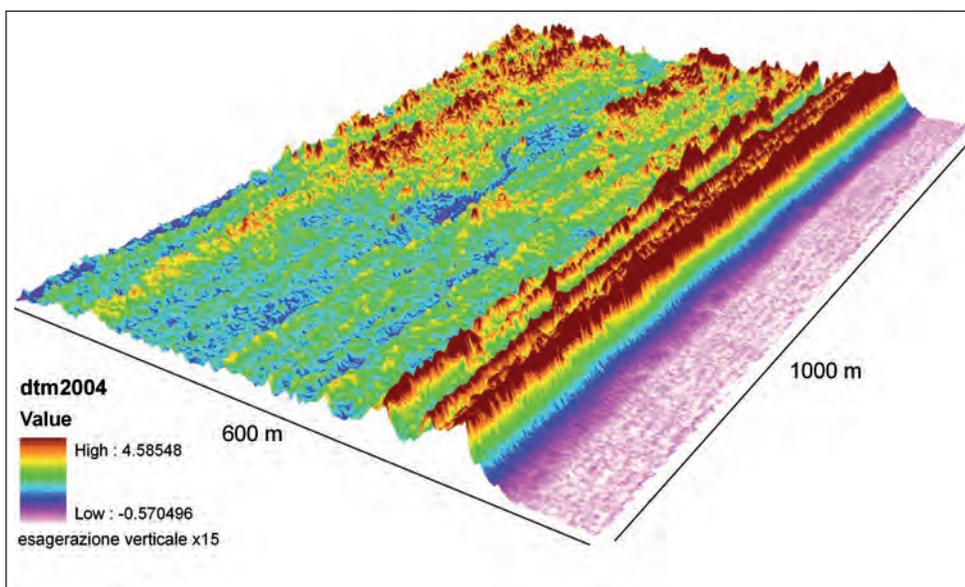


Figura 10 - DTM da LIDAR 2004 che evidenzia la duna presso Foce Bevano sud.

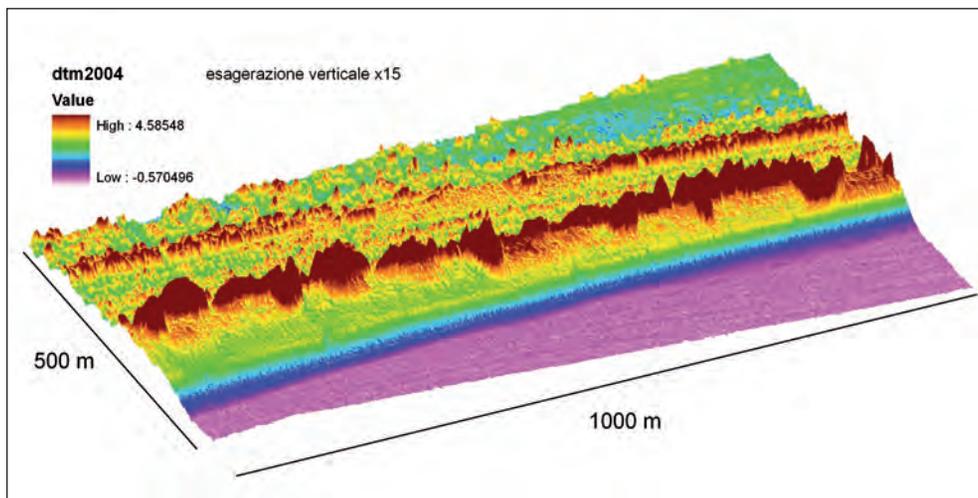


Figura 11 - DTM da LIDAR 2004 che evidenzia la duna presso Marina Romea.

interrotta da profondi varchi che ne compromettono la continuità. Questo tratto di costa, naturalmente in crescita, presenta un medio impatto antropico.

Il terzo caso (Fig. 12) illustra la situazione presso Punta Marina dove la configurazione è molto differente rispetto alle precedenti: il sistema è fortemente antropizzato con locali dune ben sviluppate ed estesi spianamenti occupati da strutture turistiche, camminamenti e varchi; l'ampiezza della spiaggia è variabile. Questo tratto ricade in un settore costiero in naturale arretramento, con diffusi sistemi di opere di difesa costiera.

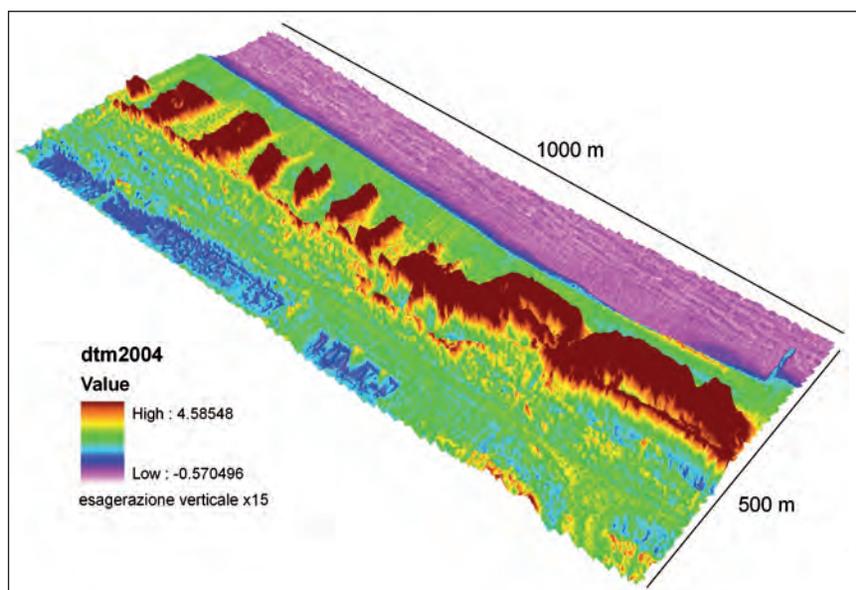


Figura 12 - DTM da LIDAR 2004 che evidenzia la duna presso Punta Marina.

Mettere in evidenza queste differenze e caratterizzare dettagliatamente il sistema duna-spiaggia dal punto di vista altimetrico e morfologico è indispensabile ai fini della progettazione degli interventi e per affrontare in modo adeguato l'analisi dei rischi costieri relativamente ai fenomeni di erosione dei litorali e di ingressione marina. In particolare, la visione tridimensionale dei corpi dunali offerta dai DTM ottenuti con sistema LIDAR permette di valutare i volumi dei corpi sedimentari, di caratterizzare i settori più critici e di identificare le caratteristiche delle principali discontinuità. La possibilità di confrontare due o più modelli morfologici di dettaglio della duna consente inoltre di quantificare le perdite e i guadagni in termini di volumi, di localizzare e caratterizzare gli aspetti morfologici di queste variazioni e di interpretarne le cause. In Figura 13 è rappresentato il risultato dell'analisi sulla dinamica della duna presente a sud di Lido di Dante, effettuata combinando in GIS le morfologie ricavate con il rilievo LIDAR del 2004 e quelle del 2009. Le aree dove si sono verificati dei cambiamenti sono rappresentate nei toni del rosso, per esprimere la perdita di sedimento, e nei toni di blu, per evidenziare il guadagno. In questo caso, che si riferisce ad un tratto di costa naturale, sono chiaramente intuibili l'effetto erosivo da parte del mare che ha causato perdita di volume del fronte dunoso e processi di *overwashing* e i fenomeni di trasporto eolico che hanno trasferito verso terra parte del cumulo sabbioso osservabile a tergo della duna. Nel margine superiore si osserva l'accumulo corrispondente agli interventi di ripascimento eseguiti a Lido di Dante.

Nell'esempio di Figura 14, che ritrae un tratto costiero presso Punta Marina, si osserva una diversa conformazione della spiaggia e della duna tra i dati LIDAR del 2009 (c) e quelli del del 2004 (b) (per maggior chiarezza, in (a) è stata riportata la foto aerea del 2005). Si può osservare un generale aumento di quota dei rilievi attribuibile per lo più ai naturali processi di cattura della sabbia da parte delle dune; un'altra parte delle modificazioni avvenute sono invece da ricondurre all'opera dell'uomo. In questo caso, si distinguono rilievi particolarmente elevati e circoscritti attribuibili ad accumuli e depositi di sabbia e la presenza di argini artificiali, costruiti durante l'inverno 2008-2009 per la difesa dall'acqua alta, che comportano una massiccia movimentazione delle sabbie.

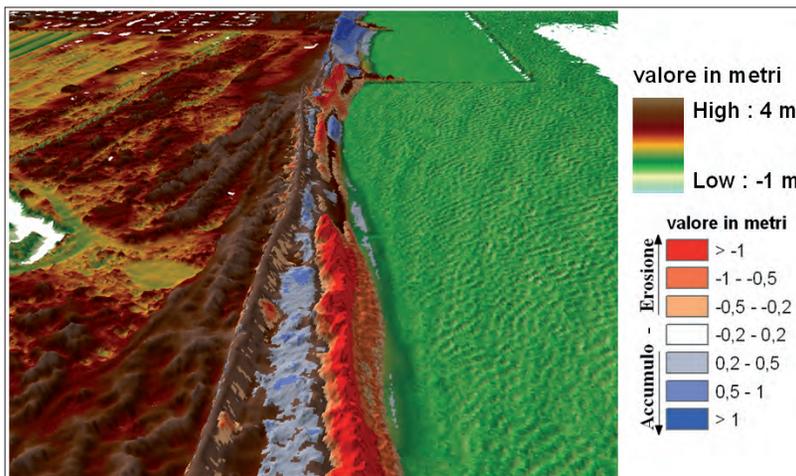


Figura 13 - DTM da LIDAR 2004 e aree dove vi è stata perdita e guadagno dal confronto con DTM da LIDAR 2009.

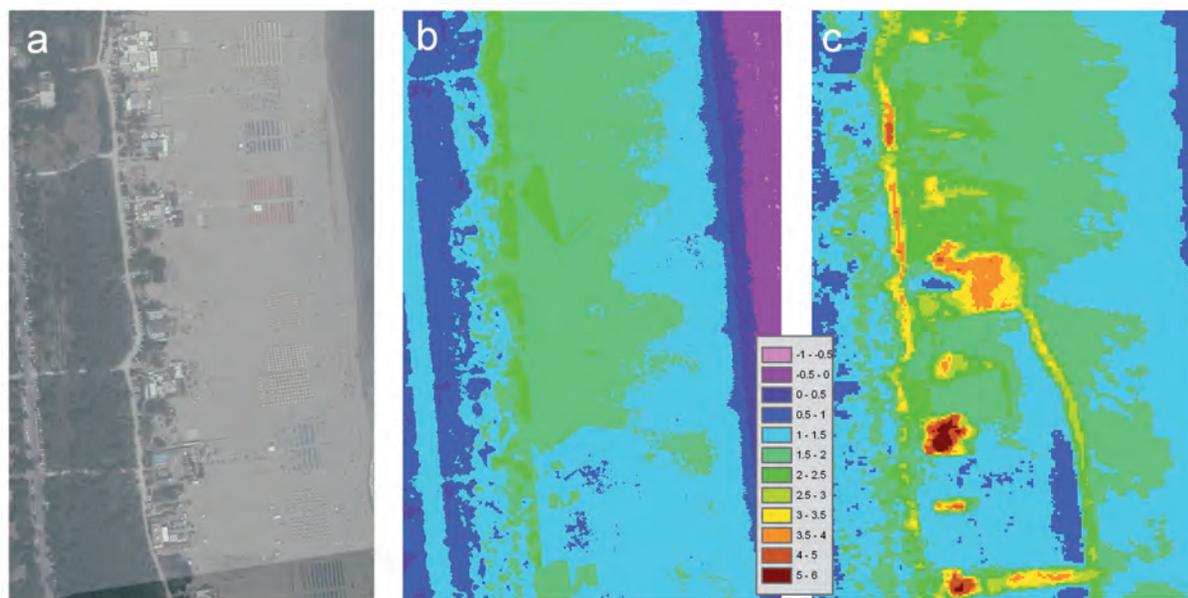


Figura 14 - a)- foto aerea 2005 di un tratto del litorale di Punta Marina; b) DTM da LIDAR 2004; c)- DTM da LIDAR2009.

Conclusioni

Lo studio delle dune costiere dell'Emilia-Romagna, realizzato nell'ambito dello sviluppo di un Sistema Informativo del Mare e della Costa, si è basato sull'uso di strumenti GIS e sulla creazione di cartografie tematiche che hanno consentito di effettuare uno studio a scala regionale e locale molto accurato. La metodologia di analisi fondamentale è stata la foto-interpretazione delle immagini aeree georeferenziate ed ortorettificate riferite agli anni 1943-45, 1982, 1998 e 2005, sulla base delle quali sono state prodotte altrettante cartografie geomorfologiche della fascia costiera che contengono la classificazione delle dune in base al grado di copertura vegetale e al relativo stato di attività. Questi strumenti cartografici, combinati con l'analisi morfologica dei modelli digitali del terreno ad alta risoluzione, recentemente acquisiti, e con attente osservazioni in campo, hanno fornito un quadro chiaro e completo dell'evoluzione delle dune negli ultimi 60 anni, dei loro rapporti stratigrafici con gli altri depositi costieri, delle loro caratteristiche geometriche e dello stato di conservazione sia a scala regionale che a scala locale.

I risultati dell'analisi evidenziano che le dune costiere sono attualmente presenti quasi esclusivamente nelle province di Ravenna e Ferrara, per una lunghezza pari al 28% del fronte mare regionale, poiché nelle restanti aree sono state completamente spianate o urbanizzate. Le dune attuali, presentano porzioni molto ridotte di duna attiva, ovvero di quella parte del sistema in cui avviene il maggiore interscambio di sedimento con la spiaggia, quantificato solo nel 9% della superficie totale.

Le dune costiere si sono continuamente ridotte a partire dal dopoguerra ad oggi sia in corrispondenza dei tratti dove è avvenuto un intenso sfruttamento del litorale ed un aumento sensibile delle infrastrutture turistiche, sia in corrispondenza dei tratti in cui si è manifestata una forte tendenza all'arretramento del sistema costiero. Quest'ultima situazione si riscontra principalmente in corrispondenza delle cuspidi deltizie, dove è l'erosione esercitata dal mare il principale fattore di distruzione della duna. In entrambi i casi, tuttavia, l'analisi della dinamica dell'uso del suolo effettuata sui settori di retroduna mostra che l'occupazione antropica ha sottratto ovunque lo spazio necessario alla migrazione della duna verso terra.

La crescita di tali morfologie, quindi, avviene prevalentemente verso mare, in quei rari settori del litorale regionale dove si osserva un importante avanzamento della linea di riva e della spiaggia. Questo fenomeno indica che, almeno nelle aree dove le spiagge non sono in deficit sedimentario, adeguate politiche di conservazione delle dune potrebbero favorire la loro conservazione ed il loro sviluppo.

A scala locale si è rivelata fondamentale l'analisi dei modelli morfologici ad altissima risoluzione per evidenziare la forma della duna nei dettagli e per comprendere la dinamica recente e i processi geomorfologici dominanti. Lo studio della duna a scala locale ha beneficiato anche di rilevamenti stratigrafico-sedimentologici di campagna che hanno permesso di ricostruire dinamiche morfo-sedimentarie locali assai complesse, alla scala delle decine e centinaia di anni, difficilmente interpretabili attraverso il solo telerilevamento.

Bibliografia

- Amorosi A., Dinelli E., Rossi V., Vaiani S.C. e Sacchetto M. (2008) - *Late Quaternary palaeoenvironmental evolution of the Adriatic coastal plain and the onset of Po River Delta*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 268: 80-90.
- Bresci E., Carli S., Pranzini E. e Rossi L. (2006) - *Studio geomorfologico delle dune costiere di Marina di Cecina (Toscana) con rilievi Lidar da aereo*. *Studi Costieri*, 11: 121- 132.
- Calabrese L. e Lorito S. (2009) - *Geomorfologia costiera*. In: *Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna*. A cura di: L. Perini e L. Calabrese, Pendragon Editore. Pp. 87-107.
- Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna in scala 1:250.000 (1999) - Regione Emilia-Romagna.
- Ciavola P., Corbau C., Cibin U. e Perini L. (2003) - *Mapping of the coastal zone of the Emilia-Romagna region using Geographical Information Systems*. *Proceedings of MEDCOAST 2003 Conference*, E. Ozhan (ed.), MEDCOAST, Ravenna (Italy), pp. 2363-2374.
- Ciavola P., Armaroli C., Chiggiato J., Valentini A., Deserti M., Perini L. e Luciani P. (2007) - *Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna: the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy)*. *Journal of Coastal Research*, 50: 540-544.
- Corbau C., Simeoni U., Tessari U., Martinelli L., Brunelli V. e Utizi K. (2008) - *Approcci metodologici per la valutazione della propensione alla sommersione della costa ferrarese e ravennate*. *Atti del Convegno "Coste: Prevenire, Programmare, Pianificare"*, Maratea, 15-17 Maggio 2008, pp. 45-54.
- Foschi M., Gavaruzzi R., Orlandi F., Pezzoli S. e Venturi S. (1999) - *Immagini raster ad alta qualità per la realizzazione digitale della Carta storica regionale 1:50.000 in Emilia-Romagna*. In *Atti 3ª Conferenza Nazionale ASITA 9 - 12 novembre 1999*, Napoli.
- Gambolati G., Giunta G., Putti M., Teatini P., Tomasi L., Betti I., Morelli M., Berlamont J., De Backer K., Decouttere C., Monbaliu J., Yu C.S., Broeker I., Kristenser E.D., Elfrink B., Dante A. e Gonella M. (1998) - *Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise, and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*. CENAS, Kluwer Academic (ed.), Dordrecht, The Netherlands: 1-34.

- Lorito S., Calabrese L., Perini L. e Cibin U. (2009) - *Uso del suolo della Costa*. In: Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna. A cura di: L. Perini e L. Calabrese, Pendragon Editore. Pp. 109-118.
- Luciani P. e Perini L. (2009) - *Ortofotomosaici della Costa*. In: Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna. A cura di: L. Perini e L. Calabrese, Pendragon Editore. Pp. 19-28.
- Macchia U., Pranzini E. e Tomei P. (2005) - *La duna costiera in Italia. La natura, il paesaggio*. Felici Ed., Pp. 200.
- Perini L. (2005) - *Rilievo della fascia costiera emiliano-romagnola con sistema LIDAR aerotrasportato*. Relazione di attività del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli: http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/web_gis_costa
- Perini L., Calabrese L., Cibin U., Lorito S. e Luciani P. (2007) - *Il Sistema Informativo della Costa e i prodotti cartografici di supporto agli studi e alle strategie di difesa*. In: Ambiente e Territorio, 127. Terzo Forum Nazionale. Pianificazione e tutela del territorio costiero: questioni, metodi, esperienze a confronto. A cura di Erminio M. Ferrucci, Maggioli Editore, pp. 71-88.
- Pranzini E. (2004) - *La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli Ed., Bologna, pp. 2445.
- Pranzini E. (2007) - *Airborne LIDAR survey applied to the analysis of the historical evolution of the Arno River delta (Italy)*. Journal of Coastal Research, SI 50: 400 - 409.
- Pranzini E. e Simeoni U. (2005) - *Morfologia delle dune costiere*. In: Macchia U., Pranzini E. e Tomei P. "La duna costiera in Italia. La natura, il paesaggio." Felici Ed., Pisa, pp. 200.
- Simeoni U., Valpreda E. e Corbau C. (2010) - *A National database on coastal dunes: Emilia-Romagna and Southern Veneto littorals*. Coastal System e Continental Margin, 13, 1: 87-96.
- Simeoni U. e Corbau C. (2008) - *Coastal vulnerability related to sea-level rise*. Geomorphology, 107: 64-71.
- Simeoni U., Valpreda E., Schiavi C. e Corbau C. (2006) - *Le dune costiere dell'Emilia-Romagna*. Studi Costieri, 11, 121- 132.
- 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 e il loro utilizzo.* Studi Costieri, 1: 121-132.
- Veggiani A. (1973) - *Le trasformazioni dell'ambiente naturale del Ravennate negli ultimi millenni*. Studi Romagnoli, 24: 3-26.

Ricevuto il 14/04/2010, accettato il 15/09/2010.

Lenti d'acqua dolce nelle dune della costa Adriatico-Romagnola

Marco Antonellini, Enrico Balugani, Giovanni Gabbianelli, Mario Laghi,
Valentina Marconi e Pauline Mollema

Integrated Geoscience Research Group, University of Bologna, Via San Alberto, 163 - 48100 Ravenna
E-mail: m.antonellini@unibo.it

Riassunto

Studi condotti negli ultimi sette anni sulle dune costiere relitte della costa Adriatico-Romagnola hanno rilevato l'esistenza di lenti di acqua dolce al loro interno. Queste lenti di acqua dolce sono importanti per l'ecosistema delle zone umide costiere e per contrastare l'intrusione di acqua salina nell'acquifero freatico. Studi geochimici delle acque di falda contenute nelle dune indicano che è in atto una tendenza alla progressiva salinizzazione di questa risorsa idrica che peraltro è soggetta a forti oscillazioni in quantità e qualità durante le diverse stagioni dell'anno. Le ragioni di questa progressiva salinizzazione delle acque contenute nelle dune sono da ricercarsi nel drenaggio della zona costiera, nella presenza di vegetazione non in equilibrio con il locale ecosistema, nella subsidenza, nell'innalzamento del livello marino e nel progressivo smantellamento degli apparati di dune rimasti a causa di fattori antropici e naturali. Studi di modellistica analitica e numerica indicano che le dune costiere romagnole sarebbero ancora in grado di mantenere una lente di acqua dolce spessa alcuni metri se esse non fossero costantemente drenate. Dove la duna costiera è stata ricostituita, come è il caso di Foce Bevano, almeno per un anno dopo l'intervento si è registrata una tendenza alla formazione di una nuova lente di acqua dolce all'interno della duna artificiale. Le dune costiere per le loro caratteristiche di ottimi serbatoi, date la loro alta conduttività idraulica e porosità, sono dei luoghi ideali per interventi di ravvenamento artificiale dell'acqua sotterranea. Un ravvenamento artificiale in una duna oltre ad immagazzinare acqua che può poi essere utilizzata in periodi di siccità dall'ecosistema circostante permette anche la formazione di un battente d'acqua sopra il livello del mare che come previsto dalla legge di Ghyben-Herzberg costituisce una forte barriera contro l'intrusione di acqua salina negli acquiferi dell'entroterra.

Parole chiave: dune, intrusione salina, ricarica naturale, variazione stagionale, Ravenna, Italia

Abstract

The fresh water lenses in the dunes along the Adriatic coast in the Emilia-Romagna region (Italy) were studied with different methods including hydrologic monitoring, geochemistry, analytical, and numerical modelling over a period of time of seven years. This paper is a summary of the results of the studies done until now and discusses the issues that are still unresolved. There are two dune belts along the Adriatic coast south of the Po-delta. A so-called "paleo dune

belt" that used to be directly on the coast until about 300 years ago and that is now at a distance of 4 to 6 km from the current coastline. The second dune belt formed 300 years ago and is now adjacent to the beach. This paper considers the last, current coastal dunes. In many places pine trees were planted on top of the dune belts since Roman times. Exploitation of the coast and coastal erosion reduced the dunes in many places and subsidence in the area lowers the general topography. Although salt water invaded many of the waterways and surface waters and aquifers along the coast, lenses of fresh water still exist in the dunes. The fresh water lenses change size and shape along the seasons. The climate of the area is characterised by wet and cold winters and warm and relatively dry summers, which results in less natural recharge of the aquifer in summer. Irrigation water, however, may also feed the freshwater lenses as in Lido di Dante. Here the size of the freshwater lens is larger in summer rather than in winter. Drainage and evapotranspiration by pine forests greatly influence the size of freshwater lenses. Tides are proven to have a small influence on the size of the lens. Freshwater from the dunes has not been considered for a long time as a resource for human use, but from a few years it has been acknowledged that freshwater lenses do support vegetation and that they may form a barrier against further saltwater intrusion.

Three study sites are discussed in detail: (1) Marina Romea, (2) Lido di Dante - Bevano river mouth, and (3) Milano Marittima. In Marina Romea the dune topography was studied in detail using Lidar data. Although many of the dunes along the coast have been destroyed to create place for bathing establishments, there is enough topography left in the pine forest of Marina Romea to allow for a freshwater lens to exist, at least in theory. Analytical calculations show that even with a very small recharge the existence of a freshwater lens could be possible. Piezometer monitoring, however, shows that there is very little freshwater which is only present in summer directly at the back of the dunes opposite to the waterline. It has become clear by detailed water budget calculations that pine tree water use and drainage in Marina Romea during many months take out more freshwater than comes in with rainfall. In the stretch of coast between Lido di Dante and Bevano river mouth, a hydrogeochemical study based on the analysis of the BEX indicator, confirmed that the aquifer is under a salinisation trend. There is Arsenicum of natural origin in the groundwater that is present in higher concentrations during the summer due to evaporation of surface water.

Water level monitoring and salinity measurements by piezometers on and at the back of a dune at Milano Marittima show that the aquifer underneath the crest of that first dune undergoes more rapid changes in salinity than the aquifer at the back of the dunes. Salt spray and wave action from the open sea may be the cause of that. The water table below the crest, on the other hand, does not rise as much in autumn with rainfall as it does at the back of the dune.

The consequences of greenhouse warming will pose more severe threats to the freshwater lenses than those that already exist. Sea level rise will move the fresh-saltwater interface inland and will shrink the freshwater lenses that are surrounded by saltwater as in the Marina Romea site. Longer periods of drought and higher temperatures will further reduce the continuous natural recharge affecting the size of the lenses. In order to manage dune freshwater better, it is important to determine priorities and a management strategy that also includes the available fresh water.

Keywords: *dunes, saltwater intrusion, seasonal variations, natural recharge, Ravenna, Italy.*

Introduzione

Le dune costiere, grazie alle loro caratteristiche d'alta porosità e permeabilità, rappresentano un ottimo serbatoio d'acqua dolce facilmente ricaricabile dalle precipitazioni meteoriche (Stuyfzand 1989). Date la topografia rilevata e la buona capacità infiltrante, l'accumulo d'acqua piovana porta la superficie freatica sopra il livello del mare, formando uno strato o bolla d'acqua dolce che si estende anche sotto il livello del mare. Questo fenomeno è simile al galleggiamento di un iceberg, di cui si vede solo una piccola parte sopra il livello del mare, mentre la parte maggiore, grazie alla minore densità del ghiaccio, si trova sotto la superficie del mare. Lo spessore della lente d'acqua dolce dipende, così come previsto dalla "legge di Ghijben-Herzberg-Dupuit (Herzberg, 1901; Fetter, 2001) dalla differenza in densità fra l'acqua dolce e quella salata, dalla conduttività idraulica dell'acquifero e dalla ricarica. Questa bolla d'acqua dolce contrasta l'intrusione di acqua marina nell'acquifero costiero (Fig. 1; Bear, 1999; Scheidleger et al., 2004).

L'acqua salata, più densa, s'incunea sotto l'acqua dolce. In una situazione naturale esiste un'interfaccia stabile

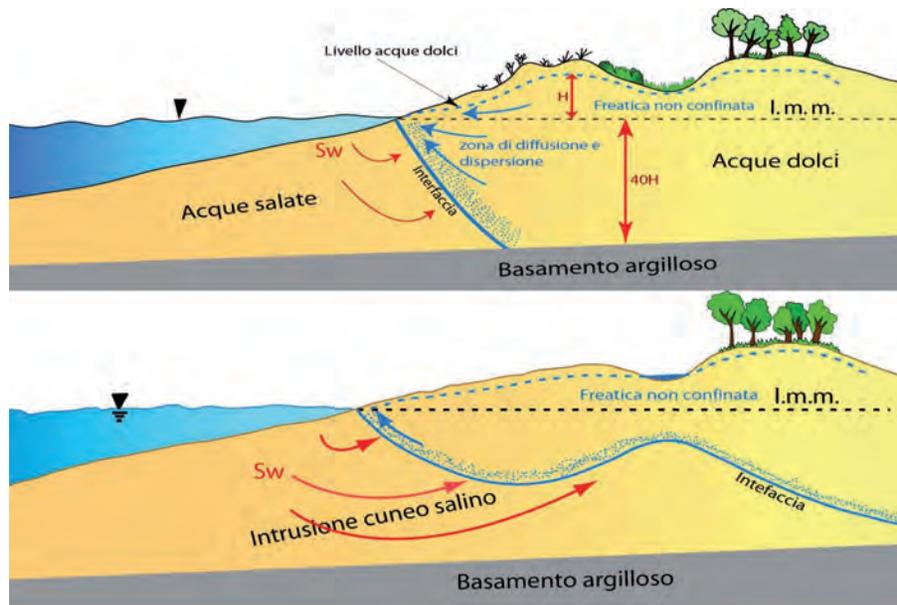


Figura 1 - Effetto barriera della bolla d'acqua dolce connesso alla presenza di un buon sistema di dune costiere naturali (condizione in alto) e di un sistema degradato (in basso).

fra acqua dolce e acqua salata che nella realtà è un'ampia zona di diffusione raramente in condizioni statiche. L'acqua si muove in senso circolare a partire dal fondo del mare (vedi frecce in Fig. 1). In prima approssimazione ed in termini idrostatici, l'interfaccia acqua dolce-acqua salata, per gli acquiferi costieri emiliano-romagnoli, si sviluppa quasi sempre fino ad una profondità dell'ordine di oltre 30 volte l'altezza del livello piezometrico rispetto alla superficie del mare; ciò significa che un abbassamento di 1 cm del carico idraulico causa la risalita di oltre 30 cm circa dell'interfaccia e viceversa (Fig. 1).

Lungo la costa dell'Emilia-Romagna il progressivo e costante incremento dell'attività antropica durante gli ultimi decenni ha ormai quasi completamente destabilizzato l'equilibrio idrostatico tanto che l'interfaccia acqua dolce-salata sta ovunque risalendo (Antonellini et al., 2007, 2008; Antonellini e Balugani, 2008; Gabbianelli e Antonellini, 2007; Marconi et al., 2010; Mollema, 2010; Ulazzi et al., 2007). Il territorio è frammentato da tante vie d'acqua: canali, fiumi rettificati, canali d'irrigazione che fanno defluire una grande quantità d'acqua dolce al mare invece di farla entrare negli acquiferi costieri.

Il problema dell'intrusione dell'acqua salata nel sistema idrico costiero è venuto alla ribalta della cronaca ed all'attenzione della pubblica opinione e degli amministratori (per esempio Repubblica, 2006) allorché, a causa delle scarse precipitazioni e delle basse portate fluviali, la risalita dell'acqua di mare lungo i rami del Po ha raggiunto diverse decine di km nell'entroterra, compromettendo l'attività agricola (impossibilità di irrigare colture e frutteti) e portando talora al blocco delle centrali elettriche per mancanza di acqua dolce da usare per il raffreddamento. La risalita dell'acqua di mare lungo i fiumi è, però, solo un aspetto del problema che sta profondamente modificando tutto il sistema idrologico-ecologico costiero emiliano-romagnolo che include le acque superficiali nelle zone umide e vallive, i boschi, i cordoni di dune, i fiumi e i canali, il reticolo idrico della bonifica e gli acquiferi freatici (Fig. 2).

Anche per questo, i modesti sistemi superstiti di dune ancora esistenti tendono ad avere sempre maggiori ed importanti funzioni di adattamento e resilienza; non solo in termini di contrasto ai fenomeni di erosione costiera ma anche rispetto a quelli di intrusione salina.

Il previsto innalzamento del livello marino come conseguenza dei cambiamenti climatici in combinazione con la subsidenza di origine antropica contribuirà ad esacerbare ancora di più questi fenomeni. Per questo motivo le autorità amministrative regionali hanno iniziato degli studi per la ricostituzione delle dune costiere (Regione Emilia-Romagna, 2009).



Figura 2 - Schematico assetto topografico- idrogeologico superficiale della zona costiera ravennate- ferrarese. I tre siti di studio dettagliati sono indicati.

L'acqua dolce contenuta negli acquiferi superficiali non confinati, tra cui le dune ha grande importanza per il mantenimento degli habitat costieri, per la biodiversità delle zone umide, per le caratteristiche geo-pedologiche ed agronomiche dei terreni coltivati (Antonellini e Mollema, 2010; Gabbianelli et al., 2007, 2008).

Una delle grosse differenze fra l'idrologia delle dune adriatiche e quella delle dune dell'Europa del Nord, sono le variazioni in ricarica naturale durante l'anno. Con una temperatura alta e precipitazioni limitate nell'estate, la ricarica delle dune nel bacino mediterraneo è minima durante la stagione calda e avviene prevalentemente durante l'autunno e l'inverno. Questa variabilità causa delle variazioni stagionali nella grandezza e forma delle lenti d'acqua dolce nelle dune adriatiche.

I primi studi idrogeologici negli acquiferi della nostra zona di studio sono stati fatti per stabilire dove c'è l'acqua salata e quali sono le possibili cause per la salinizzazione (Antonellini et al., 2008; Giambastiani et al., 2007; Ulazzi et al., 2007). Gli

ultimi studi sono fatti per migliorare i metodi di monitoraggio (Balugani e Antonellini, 2010) e soprattutto per quantificare i fattori che influenzano la grandezza delle lenti d'acqua dolce (fra altro Antonellini e Mollema, 2010; Laghi, 2010; Marconi et al., 2010 Mollema et al., 2010) Ad esempio domande importanti a cui si dovrebbe rispondere sono: quanto è l'evapotraspirazione? Quanto è la ricarica naturale? Quanto è il drenaggio? Quanto è l'influenza della marea? Quanto aiuta l'irrigazione a sostenere le lenti d'acqua dolce? Come sono le variazioni stagionali di tutti questi fattori e della grandezza delle bolle d'acqua dolce? Quali potenziali serbatoi di acqua dolce ci sono in zona costiera e come possono le dune aiutare a formare una barriera all'intrusione salina?

Questo articolo riassume gli studi fatti su tre aree: Marina Romea, Lido di Dante - Foce Bevano e Milano Marittima (Fig. 2). I metodi usati per rispondere alle domande elencate sopra sono diversi: monitoraggio idrologico, analisi chimiche, modellistica analitica e numerica, Lidar, rilievi geofisici e perforazione di pozzi. Non possiamo in questa sede descrivere in dettaglio tutti i metodi usati e le collezioni di dati acquisiti. Dove appropriato, peraltro, abbiamo inserito i riferimenti bibliografici agli articoli pubblicati e alle tesi di laurea e di dottorato a cui rimandiamo il lettore interessato.

Il contributo originale di questo articolo sta nei dati idrogeologici acquisiti nelle dune costiere. Dopo una descrizione generale dell'assetto geologico-morfologico della zona costiera romagnola presentiamo area per area (a partire da nord) i dati geoidrologici e idrogeochimici che si sono potuti acquisire nelle diverse zone. Per motivi pratici e logistici, I dati acquisiti non sono omogenei in tutte e tre le zone; ad esempio l'idrogeochimica è stata eseguita solo nell'area centrale (Lido di Dante-Foce Bevano), gli studi di fisiologia vegetale in quella settentrionale (Marina Romea) ed in quella meridionale, mentre la modellistica numerica è stata fatta solo a Marina Romea. Nella discussione cercheremo di integrare tutti questi diversi aspetti per trarre conclusioni di carattere generale.

Aspetto geologico- geomorfologico

La morfologia costiera, ovunque bassa e piatta, così come lungo tutta la costa Emiliano-Romagnola, è caratterizzata dalla presenza di spiagge sabbiose che, con modesto spessore, ricoprono materiali limoso-argillosi corrispondenti a più antichi depositi palustri, alluvionali o marini (Amorosi et al., 1999).

Lungo la costa ravennate è possibile individuare una serie di antichi cordoni dunosi, costituiti da sabbie di spiaggia e di duna, che rappresentano la “traccia” sedimentaria e paleomorfologica delle numerose linee di costa formatesi nel processo di progressiva progradazione che ha interessato queste aree durante l’Olocene (Ciabatti, 1968; Bondesan, 1988; Regione Emilia-Romagna, 2002).

Sotto il profilo altimetrico la maggior parte del retrospiaggia presenta quote generalmente molto prossime al livello medio mare o inferiori ad esso. E’ quindi diffusa la presenza di ampie aree depresse che includono zone umide generalmente salmastre. Sono ormai pressoché del tutto assenti i bacini naturali d’acqua dolce, in precedenza particolarmente diffusi sino al completamento della bonifica meccanica. La zona di transizione e i residui cordoni dunosi (antichi o attuali) sono quindi caratterizzati da quote medie di poco superiori al metro (tra 1 e 5 metri al massimo).

La stratigrafia del cuneo costiero di spiaggia include tre unità principali: (1) una sabbia di spiaggia superiore con spessore variabile fra 6 e 22 metri, (2) dei depositi limosi di prodelta con spessore variabile dai 2 ai 15 metri ed una irregolare distribuzione rispetto alla linea di costa attuale e (3) un deposito di spiaggia sabbioso subito sopra la trasgressione post-Flandriana con uno spessore di 1-2 metri. Nel suo complesso l’acquifero ha uno spessore variabile fra gli 11 ed i 28 metri (Fig. 3a e b).

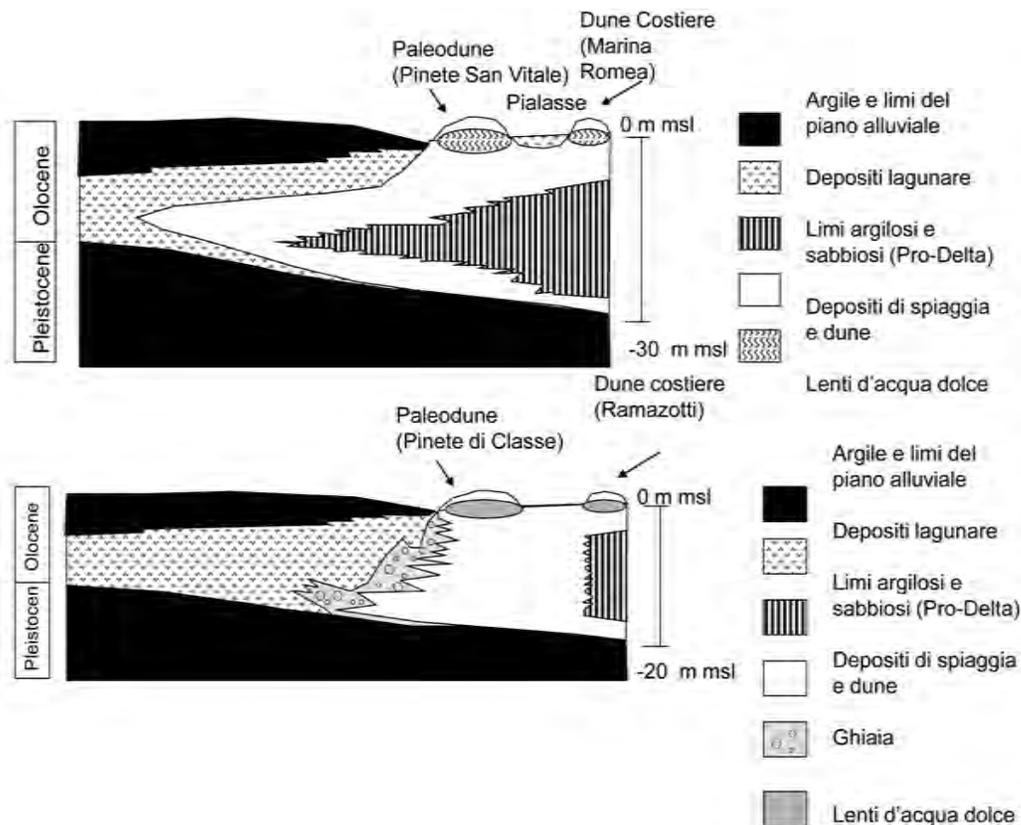


Figura 3 - Litostratigrafia schematica: sopra sezione perpendicolare alla costa vicino a Marina Romea (modificato da Amorosi et al., 1999 e Giambastiani et al., 2007); sotto sezione perpendicolare alla costa di Foce Bevano basata su dati della Regione Emilia Romagna (2002).

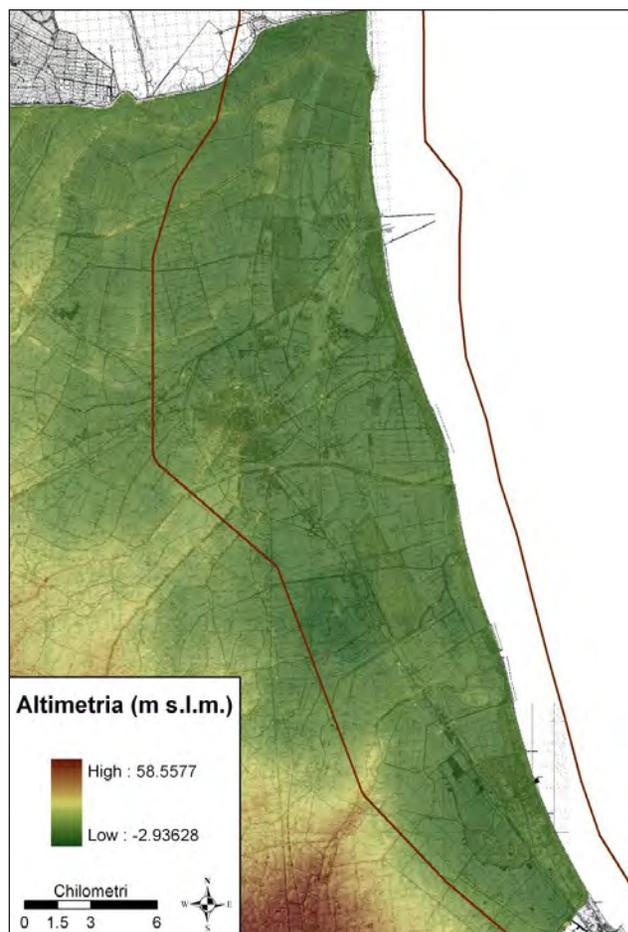


Figura 4 - Schematico assetto topografico e altimetrico della costa ravennate (DEM della Provincia di Ravenna).

La subsidenza naturale nell'area è 0,5 mm/anno ed è causata dalla compattazione naturale dei sedimenti (Carbognin e Tosi, 1995; Carminati et al., 2005). La componente maggiore della subsidenza, però, è quella antropica che è causata dall'estrazione d'acqua potabile (Teatini et al., 2006), di gas naturale (Bau' et al., 2000) e dal drenaggio per la bonifica. La subsidenza totale nel periodo 1950-1990 è arrivata fino a 1,0 m (Fig. 4). Anche se l'estrazione d'acqua dal sottosuolo è ora molto ridotta, la subsidenza, seppur in minor misura, continua. Se consideriamo anche l'innalzamento del livello marino, la subsidenza relativa è ancora maggiore. Teatini et al. (2005) e Simeoni et al. (2003), prevedono che a causa della subsidenza e dell'innalzamento del livello del mare, nel 2020 il 48 % del territorio costiero si troverà sotto il livello del mare invece del 15% rilevato nel 2003.

Area 1 - Marina Romea

Marina Romea è un bacino idrografico isolato in una penisola circondata da acqua marina. Al confine nord del bacino c'è il fiume Lamone che

porta acqua salina fino a 8 km dal mare (Laghi, 2010). Ad ovest ci sono le Pialasse che separano le dune costiere di Marina Romea dalle paleo-dune di San Vitale.

Le Pialasse sono una zona umida salata, ma poco profonda, in comunicazione col mare. Durante l'estate la salinità può superare quella del mare. A sud di Marina Romea c'è il canale Candiano che collega Ravenna ed il suo porto col mare ed ad est c'è il Mar Adriatico (Fig. 2).

Il cordone di dune a Marina Romea è stato fortemente frammentato e disarticolato per far posto agli stabilimenti balneari (Fig. 5). Una gran parte delle dune più interne è coperta da una pineta (*Pinus pinaster* e *Pinus maritimum*). In mezzo alla pineta c'è un'area topograficamente ribassata bassura che contiene uno scolo per il drenaggio; lo scolo è collegato alla vicina idrovora di Porto Corsini.

Idrogeologia delle dune a Marina Romea

Variazioni stagionali del livello freatico e della salinità nell'acquifero

Il monitoraggio della profondità e della salinità della falda mettono in luce forti variazioni stagionali Fig. 6a,b,c. In sintesi, possiamo dire che la falda è leggermente sopra il livello del mare nei mesi invernali e leggermente sotto il livello del mare (almeno nel centro delle pineta) durante l'estate. La salinità dell'acqua, invece, è elevata durante tutto l'anno e talora raggiunge 18 g/l. Solo al retro della prima fila di dune si trova acqua dolce durante il periodo invernale (salinità < 1,5 g/l).

Per sapere in che modo l'interruzione delle dune vicino a riva abbia influito sulla salinità della falda, abbiamo condotto uno studio usando i dati altimetrici LIDAR (AA. VV. 2004) e il modello numerico SEAWAT (Guo e Langevin, 2002). SEAWAT è un modello per la simulazione in tre dimensioni di flusso con densità variabile basato su due codici (MODFLOW e MT3D). I dati LIDAR hanno rilevato che la topografia delle dune sotto

la pineta e nel retroduna è ancora abbastanza elevata, con dune alte fino a 3 m sopra il livello del mare (Fig. 5). Per controllare se il fatto che la prima fila di dune direttamente a mare sia interrotta possa spiegare in sé lo stato di salinizzazione della falda, abbiamo importato in SEAWAT la topografia basata sui dati LIDAR di un'area di 360 per 520 m appartenente all'area nord est di Marina Romea. In pratica l'area esaminata rappresenta la metà verso mare della penisola di Marina Romea. Abbiamo assunto che la situazione sia simmetrica, perciò come confine del modello ad ovest abbiamo imposto un confine a carico costante di 0,2 m, che sarebbe uguale alla massima altezza della tavola d'acqua misurata nei piezometri. Questo modello, quindi, per isolare l'effetto della topografia ignora le variazioni stagionali nella tavola d'acqua. Lungo il confine superiore del modello è stata applicata una condizione di ricarica che dipende dall'uso del suolo: 15 mm/anno per le pinete, basato su i calcoli del bilancio idrologico (Antonellini et al., 2008) e 200 mm/anno sulle dune vicino al mare.

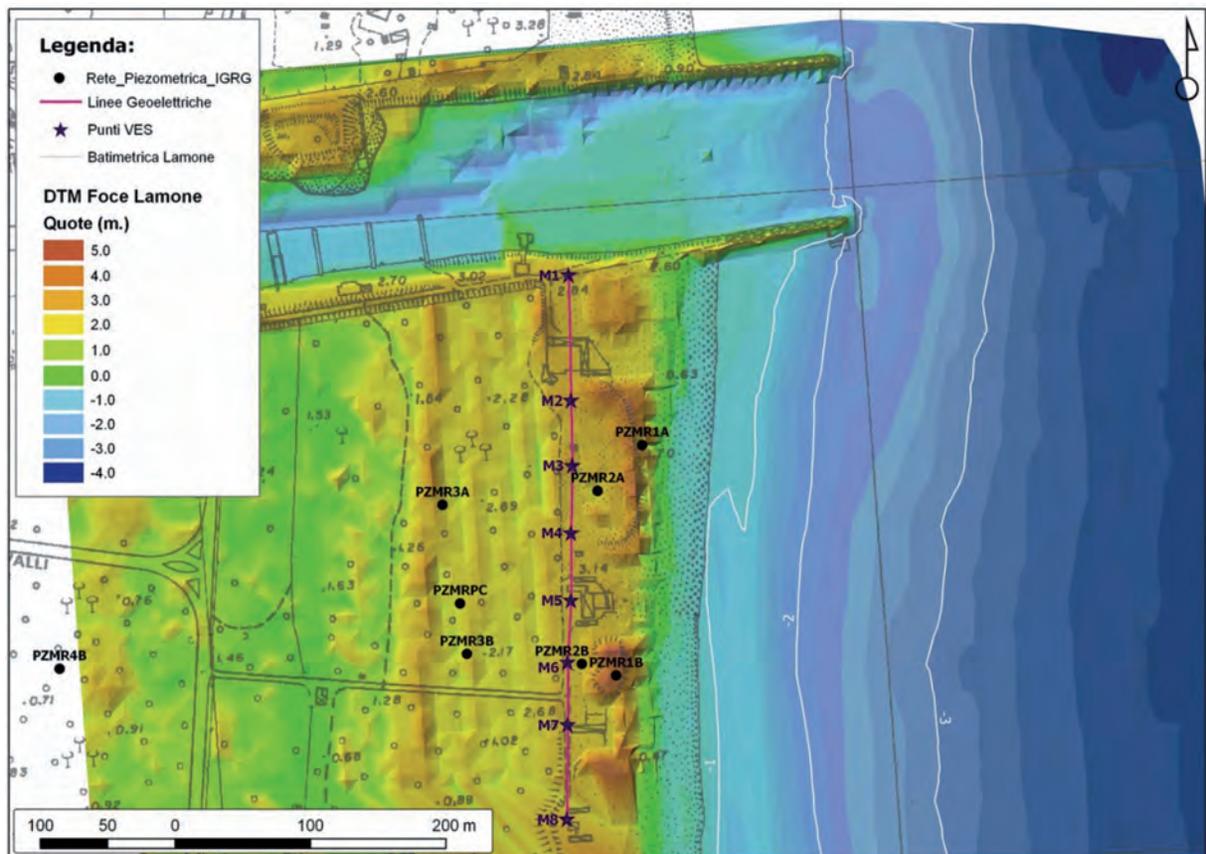


Figura 5 - Sito di Marina Romea. Topografia derivata dal rilievo LIDAR del 2003.

Al confine di alcuni modelli è stata aggiunta una condizione al contorno di drenaggio (*drain*) in direzione nord-sud, per simulare l'effetto del canale scolante esistente (conduttanza 10 m²/giorno). Tutti i modelli, con alta o bassa concentrazione salina iniziale e con o senza drenaggio, mostrano che dopo 60 anni si forma uno strato d'acqua dolce sotto le dune che però non si è ancora stabilizzato. Nei modelli col drenaggio, l'acqua salina si muove verso lo scolo ma, dopo 60 anni, non lo ha ancora raggiunto (Mollema et al., 2008). Questo suggerisce che la topografia e la ricarica attuale dalla pioggia dovrebbero essere sufficienti per mantenere uno strato d'acqua dolce sotto le dune. Il secondo cordone di dune, che è molto continuo, sembra avere un ruolo importante nel fermare l'intrusione salina. La salinità misurata nei piezometri sia in area di duna che nella pineta è in genere molto più alta di quella prevista dai modelli. Solo in due piezometri nelle dune (Fig. 6a) è stata osservata, per un periodo di alcuni mesi, una salinità più bassa di 1 g/l rispetto a quanto calcolato.

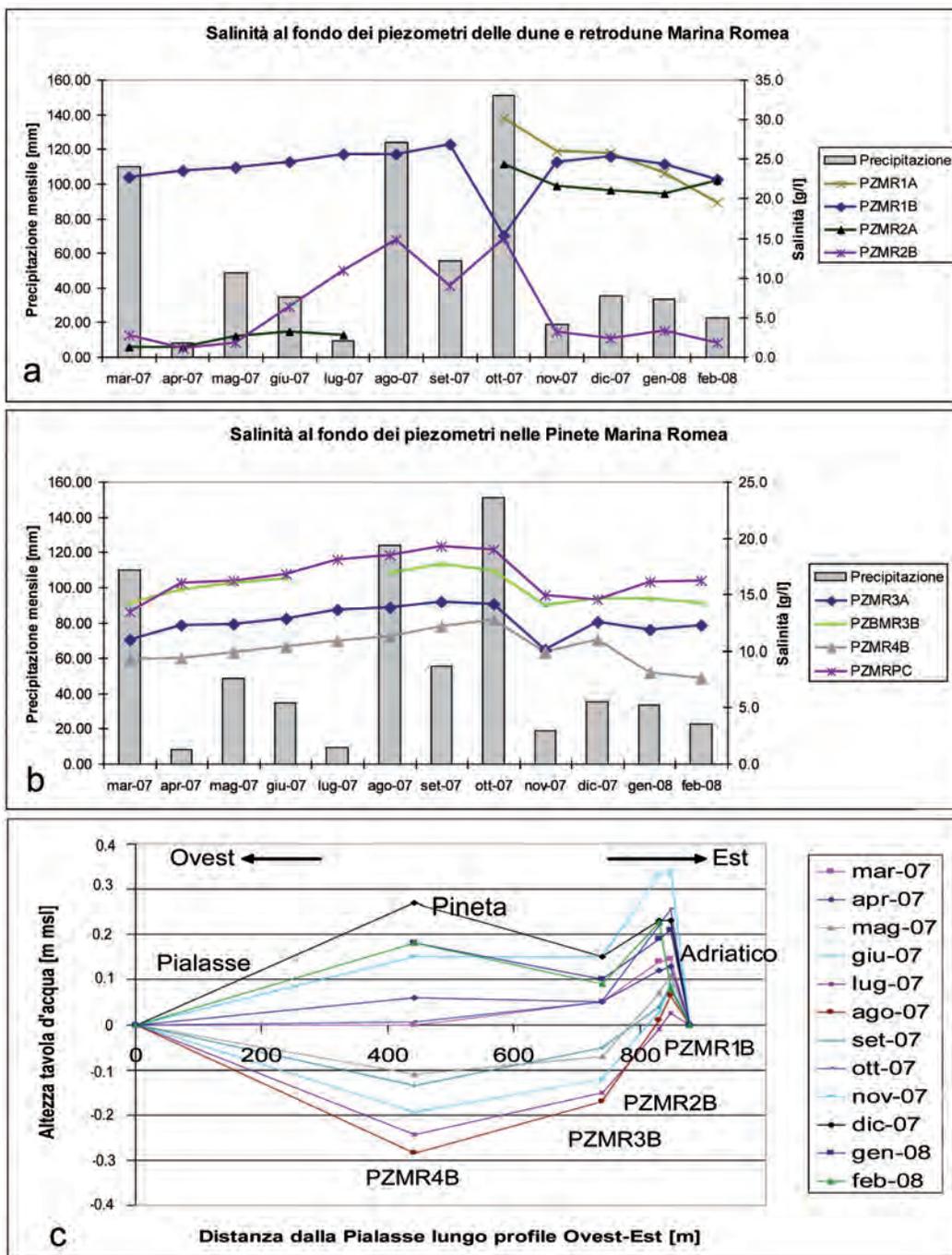


Figura 6 - (a) Andamento della salinit  superficiale nei piezometri monitorati mensilmente messi a confronto con la piovosit  nelle prime dune e (b) nella pinete retrostante. (c) Variazione mensile della falda monitorata lungo un profilo est-ovest nei piezometri PZMR1AB, PZMR2B, PZMR3B, PZMR4B. Sono stati aggiunti dei punti di riferimento per il mare e le Pialasse.

L'influenza della ricarica e dell'innalzamento del livello del mare sullo spessore delle lenti d'acqua dolce

Quando la topografia   sotto il livello del mare, non ci pu  neanche essere una falda con la tavola d'acqua dolce sopra il livello del mare e di conseguenza non si pu  formare la lente d'acqua dolce. Questo, in sintesi,   quanto prevede la legge di Ghijben-Herzberg. Dato che Marina Romea   circondata da acqua marina, possiamo considerarla un'isola oceanica allungata (Mollema et al., 2010).

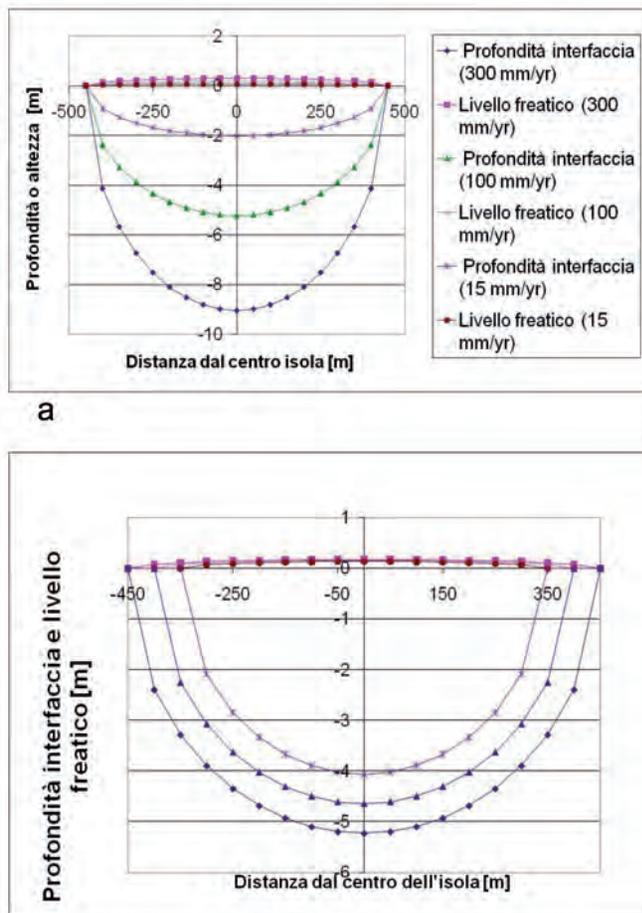


Figura 7 - (a) Grafico che mostra la profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata ed il livello freatico previsto con la relazione di Ghyben-Herzberg-Dupuit, con diversi valori per la ricarica. (b) La stessa relazione ma questa volta variando la larghezza dell'isola simulando un livello del mare più alto (ed una Marina Romea più piccola).

La ricarica naturale e la conduttività idraulica dell'acquifero (K) determinano, in questo caso, la grandezza della lente d'acqua dolce. Assumendo che la lente sia stazionaria nel tempo e sia in equilibrio con ricarica naturale, flusso verso mare e pressione idrostatica nel mare, si può stimare lo spessore della lente con la relazione Ghyben-Herzberg-Dupuit (Herzberg, 1901; Vacher 1988; Oude Essink, 2001).

Usando una larghezza per l'isola di 900 m (che è la larghezza della penisola di Marina Romea), una differenza relativa fra densità dell'acqua salina e dolce di 0.033, una conduttività idraulica di $6.9E-4$ m/s e una ricarica che varia fra 15 e 300 mm/anno otteniamo che l'altezza della tavola d'acqua al centro dell'isola varia fra 0.07 m (m.s.l.) con una ricarica di 15 mm/anno e 0.3 m (m.s.l.) con una ricarica di 300 mm/anno (Fig. 7a). La profondità dell'interfaccia fra acqua dolce e salata varia fra -2 a -9 m

(m.s.l.). Una ricarica di 300 mm corrisponde, in pratica, alla metà delle precipitazioni annuali. Non è probabile che quella sia una ricarica realistica. Una ricarica più realistica potrebbe essere 15 mm/anno che è stata calcolata da Giambastiani et al. (2007). Un effetto possibile dell'innalzamento del livello del mare è che la larghezza dell'isola diminuisce e di conseguenza l'area di ricarica anche. Figura 7b mostra come diventerà più piccola la lente d'acqua dolce se la spiaggia si ritrae di 100 o 200 m, assumendo che la ricarica rimanga costante. Un limite di questo metodo è che non è possibile inserire variazioni temporali o spaziali nella ricarica. Si tratta sempre di una situazione stazionaria.

Contributo della traspirazione dei pini e del drenaggio artificiale al bilancio idrologico di Marina Romea

Usando dati del pompaggio all'idrovora di Porto Corsini, informazioni sul consumo d'acqua dei pini basati sul flusso di linfa misurato e pubblicato da Teobaldelli et al. (2004), dati sul livello della falda misurata mensilmente durante il periodo 2007-2008, Mollema et al. (2010) hanno calcolato un bilancio idrologico per ogni mese dell'anno 2007-2008 entro il bacino idrografico di Marina Romea. I pini sono capaci di traspirare fino a 30 litri al giorno per pianta. La distanza media fra i pini nella pineta è solo 5 m. Se facciamo un confronto fra la quantità d'acqua di precipitazione che cade nell'intorno di un pino e la quantità d'acqua che l'albero traspira, vediamo che nei mesi estivi i pini traspirano più acqua di quella fornita dalla pioggia. Poi si deve prendere in considerazione il fatto che una gran parte della pioggia evapora dalla superficie delle piante e dal suolo, prima ancora di raggiungere la falda. I volumi drenati artificialmente dall'impianto di sollevamento sono più grandi dei volumi di pioggia nel bacino durante ogni mese dell'anno monitorato. Questo suggerisce che in tanti mesi del periodo di monitoraggio, non c'è stata nessuna ricarica della lente d'acqua dolce sotto Marina Romea.

Il fatto che i pini sono capaci di traspirare più della pioggia fa supporre che ogni pino in tempi di siccità funzioni come una piccola pompa causando la risalita dell'acqua salina nella falda.

Area 2 - Lido di Dante, Foce Bevano e Lido di Classe

Le dune costiere fra i Fiumi Uniti a nord e Lido di Classe a sud che includono il Lido di Dante, la Pineta Ramazzotti, la foce del Fiume Bevano, e la continuazione della pineta Ramazzotti (Figg. 2 e 8), si trovano in un'area meno urbanizzata di Marina Romea o Milano Marittima. Quest'area ha un'elevata valenza naturalistica (Zona SIC/ZPS, Parco del Delta RER). Nella prima metà del 2006, è stato effettuato un intervento di

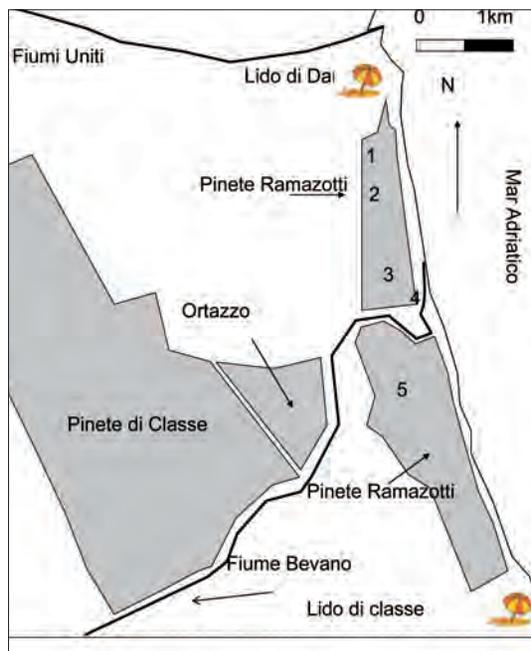


Figura 8 - Carta indice dell'area intorno alla foce Bevano. I numeri indicano dove sono stati fatti gli studi: 1) caratterizzazione geochemica; 2) relazione densità pini e salinità; 3) ricostruzione falda nella duna nuova; 4) studio dell'effetto di marea nella falda freatica.

diversione della foce fluviale del fiume Bevano, integrato dalla costruzione di un segmento di duna artificiale lungo oltre 700 m (Ciavola et al., 2005; Gardelli et al., 2007; Regione Emilia-Romagna, 2009). Quest'ultima condizione ha permesso anche una prima verifica sulla progressiva ricostituzione ed efficienza della falda dolce all'interno di questa duna artificiale e, nel contempo, confrontarla con quanto esistente nel contiguo sistema di dune naturali. Prima dell'intervento, la foce del Bevano era l'ultima foce naturale della costa romagnola. Il fiume è arginato ma non rettificato nella zona di foce avendo una serie di meandri fino al suo sbocco in mare.

Gli studi di monitoraggio ed elaborazioni dei dati idrologici e geochemici fatti in quest'area hanno stabilito come si ricostituisce la tavola d'acqua e la lente d'acqua dolce in una nuova duna, l'influenza della marea sulla tavola d'acqua, la tendenza della concentrazione salina nel tempo (tendenze alla salinizzazione o al raffrescamento della falda), la caratterizzazione della distribuzione dell'Arsenico naturale, un confronto fra osservazioni fatte ed un modello analitico che calcola l'infiltrazione di acqua nel suolo e nella falda, e la relazione fra salinità e la biodiversità.

Idrogeologia delle dune nella zona Lido di Dante - Lido di Classe

Caratterizzazione Idrogeochemica di Lido di Dante

Le analisi chimiche ed il monitoraggio della profondità e della conduttività elettrica di falda nell'area vicino a Lido di Dante (Fig. 8 n. 1) hanno incluso la raccolta di 22 campioni di acqua presi dalla superficie della falda e 3 campioni alla base dell'acquifero (Marconi et al., 2010). Le analisi chimiche mostrano che esiste una sottile lente d'acqua dolce nella zona di retrospiaggia; questa lente d'acqua dolce varia in grandezza e spessore con le stagioni. Il livello freatico medio nell'estate 2008 era - 0.4 m (m.s.l.) e + 0.1 m (m.s.l.) nell'Inverno 2009. La salinità misurata nelle trivellate (*auger holes*) varia da 1 g/l, nelle zone di retrospiaggia a 36 g/l vicino al laghetto pinetale (in estate) e da 0.6 g/l fino a 29 g/l durante l'inverno. La concentrazione media di arsenico alla superficie dell'acquifero è molto più grande durante l'estate (0.011 mg/l) che nell'inverno (0.002 mg/l).

L'intrusione salina e la sua tendenza possono in genere essere rivelati dai processi di scambio cationico (Stuyfzand, 1986). Ci sono certi indici di base che possono indicare se una falda sta diventando più salata o invece sta diventando più dolce. Stuyfzand (2008) trova che l'indice

$$\text{BEX} = \text{Na} + \text{K} + \text{Mg} - 1.0716 \text{Cl} \text{ (meq/L)}$$

è l'indice migliore per acquiferi che non contengono dolomite residuale o autigenica. Applicando questo indice ai campioni di Lido di Dante, Marconi et al. (2010) rilevano che la maggior parte dell'acquifero ha un BEX negativo il che indica un'attuale progressiva tendenza alla salinizzazione dell'acquifero (Fig. 9).

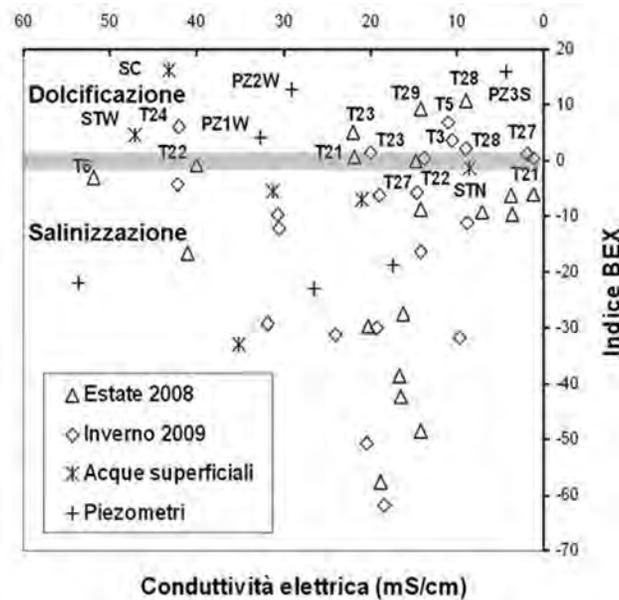


Figura 9 - L'indice di BEX, (*Base Exchange Index*; Stuyfzand, 2008), rivela una marcata tendenza alla salinizzazione ($BEX < 0$) per gran parte dei siti campionati in Estate 2008 e Inverno 2009. I campioni etichettati mostrano un processo di dolciificazione ($BEX > 0$) o di equilibrio ($BEX = 0$) in corso.

L'arsenico è un contaminante naturale di questi acquiferi e la sua mobilizzazione è controllata da un cambiamento nel potenziale di ossidoriduzione. Il rilascio di arsenico è legato a processi che hanno luogo all'interfaccia fra acqua sotterranea e superficiale. Questi processi includono l'evaporazione, l'accumulo di materia organica e la risalita di acqua sotterranea stagnante ricca in Fe bivalente e arsenico dal fondo dell'acquifero.

L'effetto della marea sulle acque sotterranee a Lido di Classe.

Nella zona della foce Bevano è stata effettuata una misura dei possibili effetti della marea sulla falda freatica. Come noto le variazioni del livello marino hanno un impatto significativo sulla falda freatica costiera, poiché le fluttuazioni di marea sono una tra le principali forze in gioco a ridosso della linea di riva: al variare del livello marino, seppur smorzata, si osserva una variazione simile nel livello freatico dell'acquifero (Mao et al, 2006; Nielsen, 1990). In base alle proprietà dei sedimenti, l'onda di marea verrà infatti modificata in ampiezza e fase in funzione dell'entità del percorso effettuato all'interno dell'acquifero. Nel caso in esame, caratterizzato da un regime microtidale, i sedimenti porosi attraverso cui si trasmette l'onda di marea sono costituiti da sabbie ben cernite con alta conduttività idraulica (10-100 m/d). Per poter osservare ed interpretare l'oscillazione della marea e la risposta delle tavola d'acqua nella falda a Lido di Classe, Balugani (2008) ha raccolto dati sulla quota di falda in continuo per un periodo di alcuni mesi in due piezometri a diversa distanza dal mare. I piezometri scelti sono stati ubicati ad una distanza di 25 e 50 m dalla riva (PZBEV1F e PZBEV2F, no 5 in Fig. 8). In ognuno dei piezometri è stata posizionata una sonda in grado di prendere misure di livello dell'acqua ogni 20 minuti per un periodo di tempo che va dal 5 settembre al 13 novembre 2008. Dovendo lasciare la sonda in posto per tutta la durata del periodo di misura, si è resa necessaria la costruzione e la messa in posto di cappotti d'acciaio di protezione. I dati rilevati hanno mostrato come l'effetto della marea si propaghi nell'acquifero fino alle prime dune. Risulta visibile un'oscillazione con periodo di sei ore, fase di 6 ore e ampiezza tra il 5% ed il 10% dell'ampiezza di oscillazione di marea a 30 m dalla linea di costa. A 60 m dalla linea di costa l'ampiezza è di circa 1-2 cm (la fase

non risulta quantificabile). Si nota anche un'oscillazione di lungo periodo del livello di falda dovuto alla componente meteorologica delle maree che è quindi fortemente correlata a come la pressione atmosferica o la forza e direzione del vento influiscono sull'Adriatico (non necessariamente in eventi di tempesta). La variazione nel livello di falda dovuto a quest'ultima causa è sicuramente la più importante, dell'ordine di 20 cm in soli 3 giorni a 30 m dal mare (Balugani, 2008).

Idrogeologia della duna artificiale alla foce del Fiume Bevano

Un segmento di duna artificiale è stato costruito a nord dell'attuale foce del Bevano (Fig. 10). In questa zona sono stati monitorati 3 piezometri di cui la Fig. 11a riporta i livelli della falda mentre la Figura 11b mostra la salinità. I valori di TDS (*Total Dissolved Solids*) da cui abbiamo ricavato la salinità dell'acqua, evidenziano un marcato trend di progressiva ricostituzione di una falda di acqua dolce, galleggiante sopra quella salata. Nelle dune a sud della foce del fiume Bevano i dati mostrano che in prossimità del retroduna, si ha un marcato approfondimento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata.

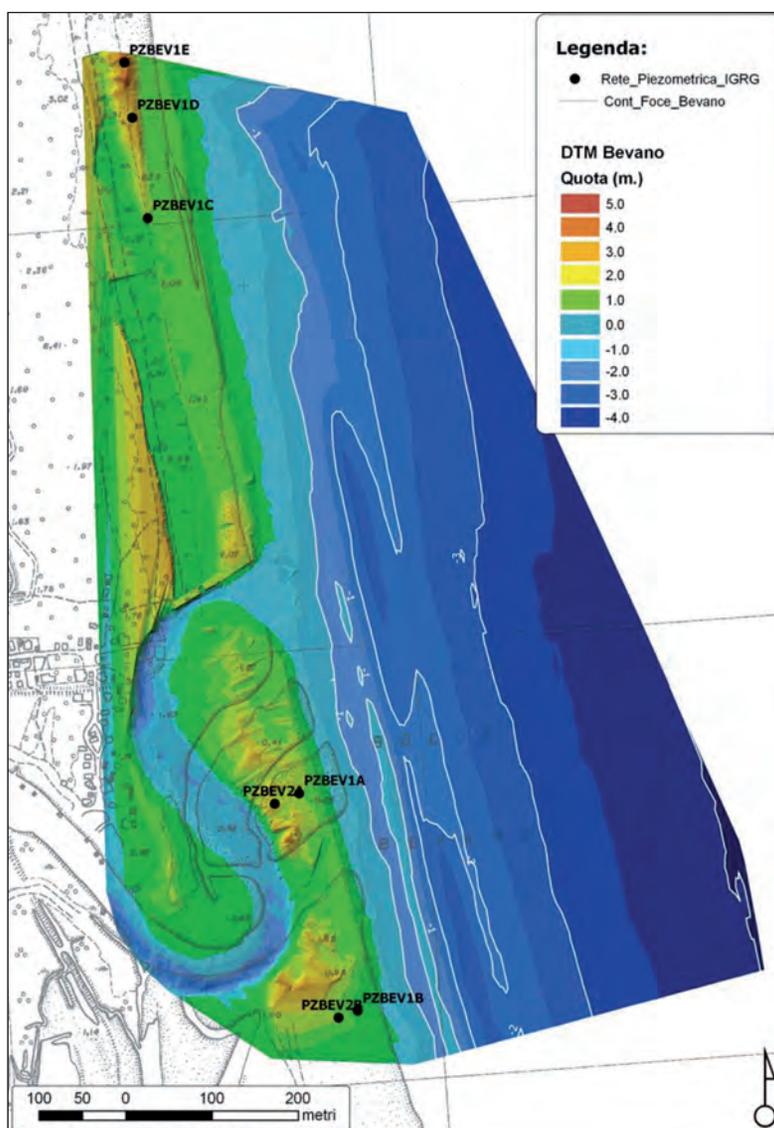


Figura 10 - Sito di Foce Bevano, dati LIDAR del 2003 con ubicazione dei piezometri.

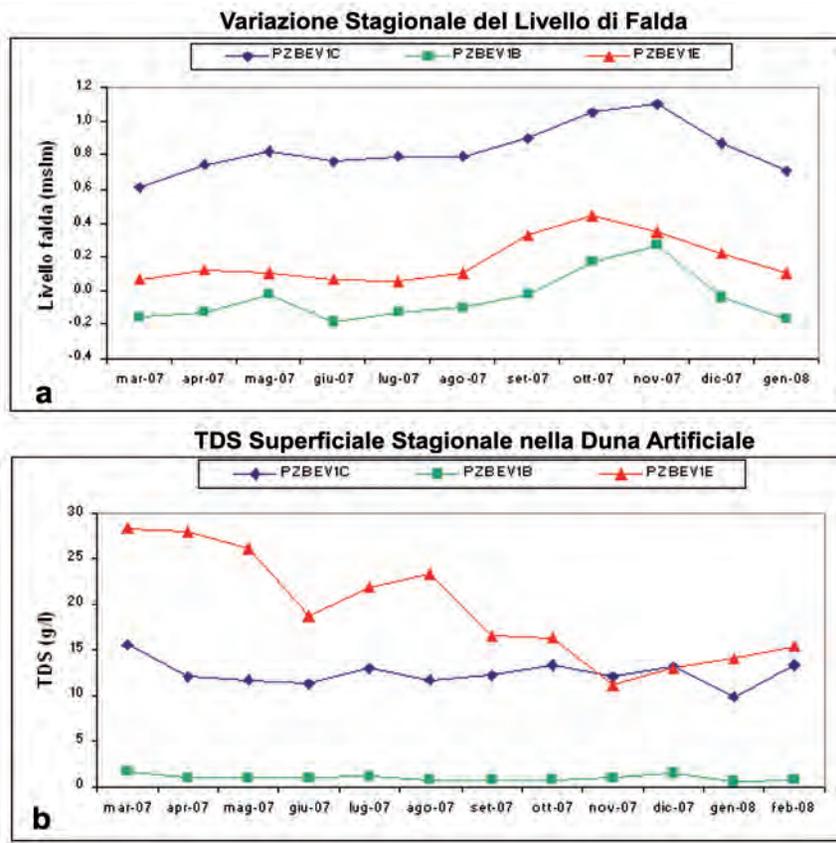


Figura 11 - (a) Sito di Foce Bevano. Andamento della falda nei piezometri entro la duna artificiale dal momento della costruzione. Il piezometro PZBEVIC è traslato di circa +0,5 m in quota. (b) Andamento del TDS nei piezometri entro la duna artificiale dal momento della costruzione.

Ricarica effettiva dell'acquifero freatico

I dati di monitoraggio dai piezometri nella zona di Marina Romea e Foce Bevano insieme con i dati meteorologici sono stati usati per calcolare la ricarica della falda usando il metodo di Lerner et al. (1990). Questo metodo, basato sulle oscillazioni di falda registrate in un piezometro, è riassunto dalla seguente formula:

$$\text{Ricarica netta (mm)} = \Delta h * S_y$$

dove Δh è l'escursione annua di livello in un piezometro (mm) e S_y è il coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero freatico. La Fig. 12a riporta i valori di ricarica per i piezometri di Foce Bevano e Marina Romea calcolati con questo metodo; notare che i valori di ricarica effettiva sono compresi fra 100 e 200 mm/anno corrispondenti al 15-30% delle precipitazioni.

I dati di ricarica ottenuta sono stati verificati usando il modello MODBUD che permette di calcolare la ricarica naturale potenziale. Questo modello richiede in ingresso i dati giornalieri di precipitazione e temperatura, la porosità dell'acquifero, la quantità di acqua di ritenzione, il tipo di vegetazione e la profondità delle radici delle piante. Il modello calcola l'evapotraspirazione potenziale giornaliera sulla base delle formula di Hamon (1961) e calcola la traspirazione dell'acqua nella zona delle radici dei pini. L'output di MODBUD Marconi et al. (2008) sono l'infiltrazione potenziale e la relativa variazione del livello di falda. Questi parametri sono stati invertiti per ottenere i livelli di falda registrati durante il monitoraggio nei vari piezometri della zona (Fig. 12b). In questo modo si sono potute calibrare le proprietà del suolo quali la porosità e la ritenzione di acqua specifica. L'inversione dei dati misurati col modello mostra che la porosità dell'acquifero varia fra 0,28 e 0,35. Il livello della

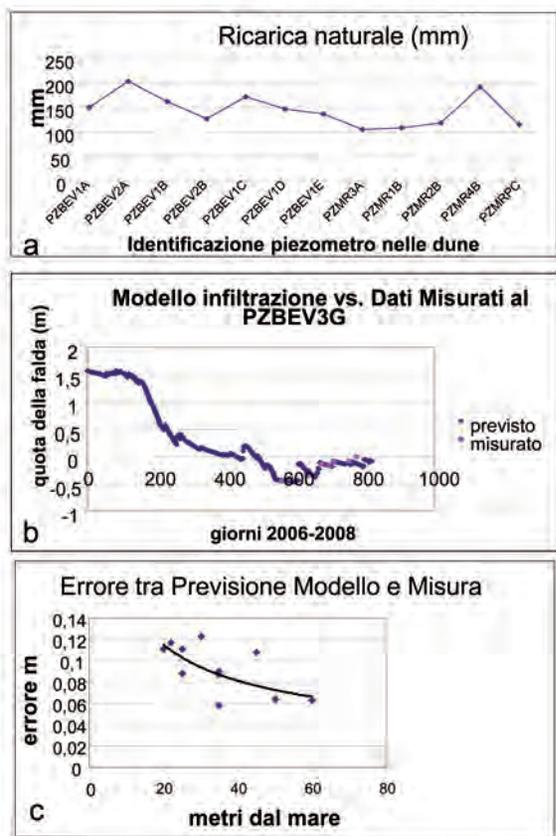


Figura 12 - (a) Ricarica media annuale calcolata per i piezometri di Marina Romea e la zona Bevano. (b) Livello di falda modellato con MODBUD (in blu) e misurato al piezometro PZBEV3G (punti in rosa) nella Pineta di Lido di Classe. (c) Scostamento fra il dato modellato e quello rilevato in funzione della distanza dal mare.

falda è direttamente correlato alle precipitazioni, mentre lo scostamento fra il dato modellato e quello misurato aumenta con la vicinanza della costa (Fig. 12c); questo è quasi certamente da imputarsi all'effetto delle maree e delle onde sul livello di falda che si risente per alcune decine di metri dalla linea della massima alta marea.

Relazione fra salinità della falda e biodiversità vegetale

Antonellini e Mollema (2010) hanno dimostrato che nelle foreste costiere e nelle zone umide vicino a Ravenna, un calo drammatico in numero delle specie vegetali avviene quando l'acqua sotterranea a contatto con le radici delle piante supera il livello soglia di 3 g/l; livello oltre il quale molte delle specie arboree vanno in crisi. L'eccezione è per le comunità di specie di *Pinus pinaster* e *Pinus pinea* che possono tollerare una salinità dell'acqua fino a 5 g/l (Fig. 13). Basandosi su studi di campagna e su una ricerca bibliografica, Antonellini e

Mollema (2010) concludono che I pini soffrono meno per la salinità dell'acqua che altre specie presenti in zona. Le loro osservazioni di campagna mostrano che quando la falda è superficiale (meno di 1 m), la biodiversità vegetale è grande ma la densità dei pini è bassa. Questo fatto suggerisce che una tavola d'acqua superficiale ha un'influenza più grande sulla salute dei pini che la siccità o la salinità dell'acqua nel sottosuolo. Antonellini e Mollema (2010) suggeriscono che la presente pratica di drenare le foreste di pini causa la salinizzazione dell'acqua sotterranea e mentre favorisce lo sviluppo dei pini essa causa anche una diminuzione della biodiversità vegetale.

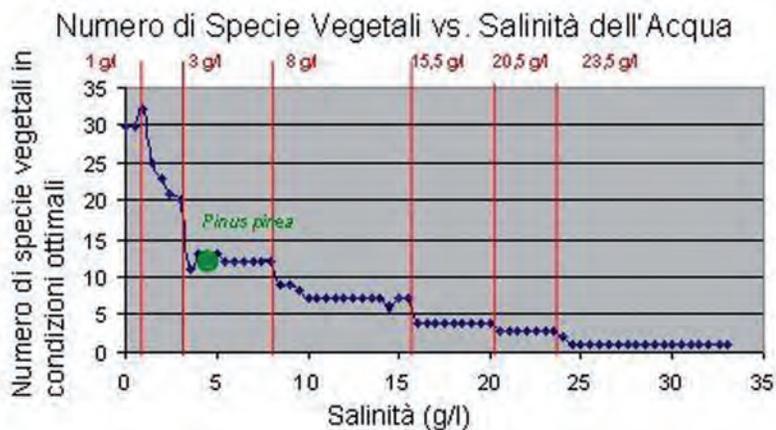


Figura 13 - Il grafico mostra il numero di specie vegetali su un totale di 39 tipiche per la zona di studio che tollerano una salinità dell'acqua sotterranea espressa sull'asse delle ascisse. Notare che I valori soglia di tolleranza per le specie vegetali si trovano a 1, 3, 8, 15,5, 20,5 e 23,5 g/l.

Area 3 - Milano Marittima

La colonia di Varese a Milano Marittima contiene un relitto di dune costiere. Tutto il primo cordone di dune a ridosso della spiaggia sia a Milano Marittima che a Cervia è stato distrutto per creare spazio a seconde case, alberghi e stabilimenti balneari.

Dal 1911 al 2003 la linea di costa adriatica è generalmente arretrata (Calabresi e Lorito, 2010) ma molti studi (Simeoni et al., 2003; Stecchi, 2009) mostrano come la costa cervese sia in progradazione o stabile, mentre la costa oltre il portocanale si trova in erosione; quest'ultima zona include Milano Marittima fino alla foce del Savio. Per contrastare questa erosione si sono costruite delle opere di difesa quali pennelli paralleli o perpendicolari alla costa come nella zona a nord del Savio o come nel resto della costa romagnola dove nel 2007 è stato eseguito un ripascimento di circa 40 m, nelle zone in erosione come Milano Marittima. Tre rilievi topografici delle dune alla colonia di Varese, che abbiamo eseguito nel gennaio 2007, giugno 2007 e gennaio 2008 (Fig. 14 e 15a e b) mostrano che l'attività erosiva non si è fermata ed il fronte della duna è già stato eroso (Rossi, 2007).

Idrogeologia delle dune a Milano Marittima

Quattro piezometri sono stati messi sulla duna della Colonia Varese (Fig. 14) per studiare il livello e la salinità della falda in relazione con le precipitazioni. Inoltre abbiamo caratterizzato la granulometria del sedimento sabbioso nella duna ed i cambiamenti nella sua topografia durante il periodo di monitoraggio fra il dicembre 2007 ed il marzo 2008 (Rossi, 2007).

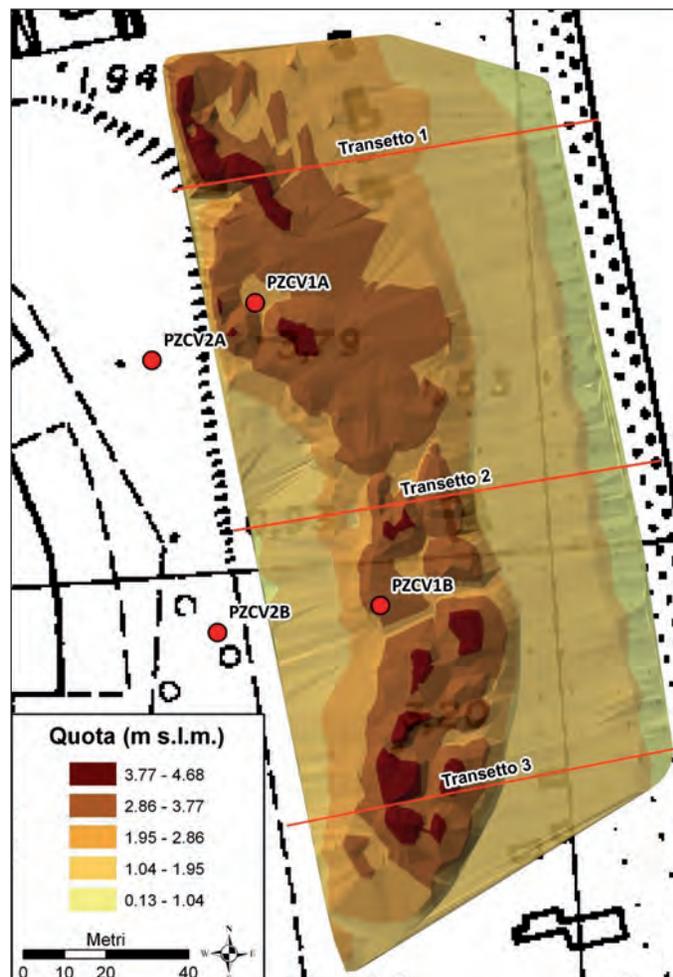


Figura 14 - Sito di Milano Marittima. Immagine LIDAR rappresentante la topografia del sito di studio e ubicazione piezometri.

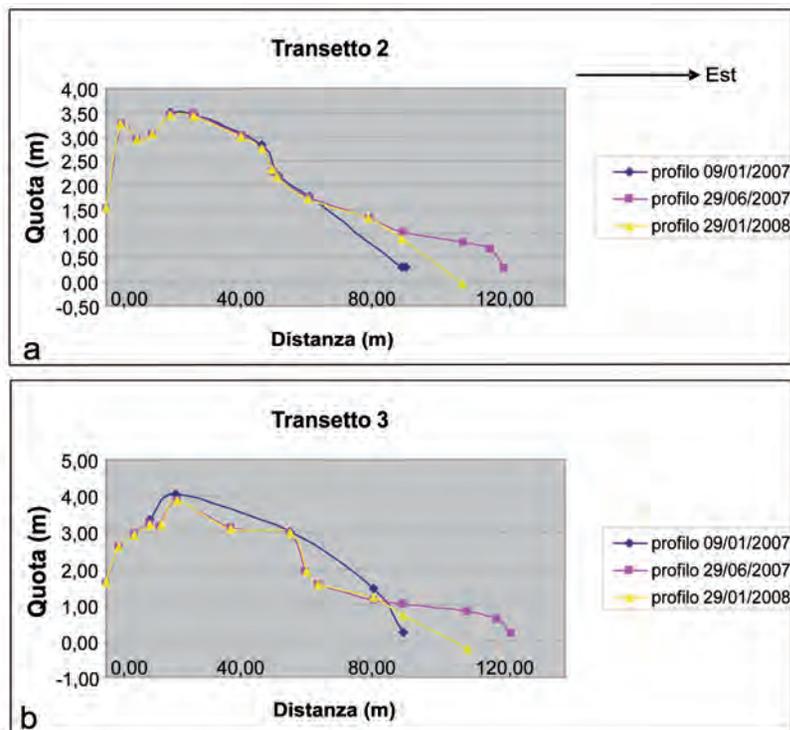


Figura 15 - (a) e (b) profili topografici a Milano Marittima.

Due dei piezometri si trovano sulla cresta della duna (PZCV1A e PZCV2A, Figg. 14 e 16) e due piezometri si trovano dietro la prima duna (PZCV2A e PZV2B). Nonostante la brevità del periodo di monitoraggio, i dati raccolti mostrano che la falda sotto la cresta della duna si comporta diversamente dalla falda nel retro duna. La tavola d'acqua misurata nel retro duna sale da -0.25 m (m.s.l.) a $+0.15$ m (m.s.l.) fra il dicembre 2007 e il marzo 2008, una differenza di $0,4$ m. Invece la tavola d'acqua sotto la cresta della duna scende da $+0,2$ m (m.s.l.) a $+0.09$ m (m.s.l.), una differenza di solo $-0,11$ m.

Nello stesso periodo la salinità misurata alla superficie della tavola d'acqua sotto la cresta della duna aumenta nel PZCV1A da 0.5 g/l fino a 6 g/l e nel PZCV1b sale dal 6.3 fino 7.5 poi scende fino a 0.5 g/l (Fig. 16). La salinità profonda nel PZCV1A sale da 0.5 g/l fino a 10 g/l e invece nel PZCV1B la salinità scende drasticamente da 11 g/l fino a 0.5 g/l (Fig. 16).

La salinità superficiale e profonda nei piezometri del retroduna, invece, non varia molto ed è sempre intorno a 0.5 g/l (Fig. 16). Queste osservazioni fatte da Rossi (2007) suggeriscono che i flussi e la concentrazione salina nell'acquifero sottostante la cresta della duna sono diversi da quelli nell'acquifero sottostante il retroduna. I dati raccolti a Marina Romea mostrano, in modo simile, che i cambiamenti nella piezometria vicino al mare sono più improvvisi dei cambiamenti nei piezometri più lontani dal mare (Fig. 6). Figura 17 riporta i diversi processi che possono giocare un ruolo nella duna vicino al mare.

Dato che la topografia della duna è moderata e la conduttività idraulica grande, le precipitazioni si infiltrano subito, si muovono rapidamente verso mare e terra in modo che la tavola d'acqua non può alzarsi più di tanto. Il retro duna, invece, nel tempo si ricarica anche con acque che provengono dalla cresta delle dune e la falda si alza di più che sotto la cresta. La Fig. 7 esemplifica questo fenomeno: l'altezza della tavola d'acqua massima nel centro dell'isola (che potrebbe rappresentare un buon modello della duna) calcolata con la relazione di Ghjben-Herzberg-Dupuit non cambia molto con la ricarica o la larghezza dell'isola; la sabbia è talmente conduttiva dal punto di vista idraulico che non sostiene una tavola d'acqua molto alta sul livello del mare. Gli sbalzi nella salinità sotto la cresta della duna possono probabilmente essere spiegati con l'acqua salata delle mareggiate che arriva sulle dune durante le tempeste invernali. Inoltre c'è anche l'effetto dello spray marino, le minute gocce d'acqua marina e aerosol che raggiungono la cresta della prima duna ed il retroduna (Fig. 17).

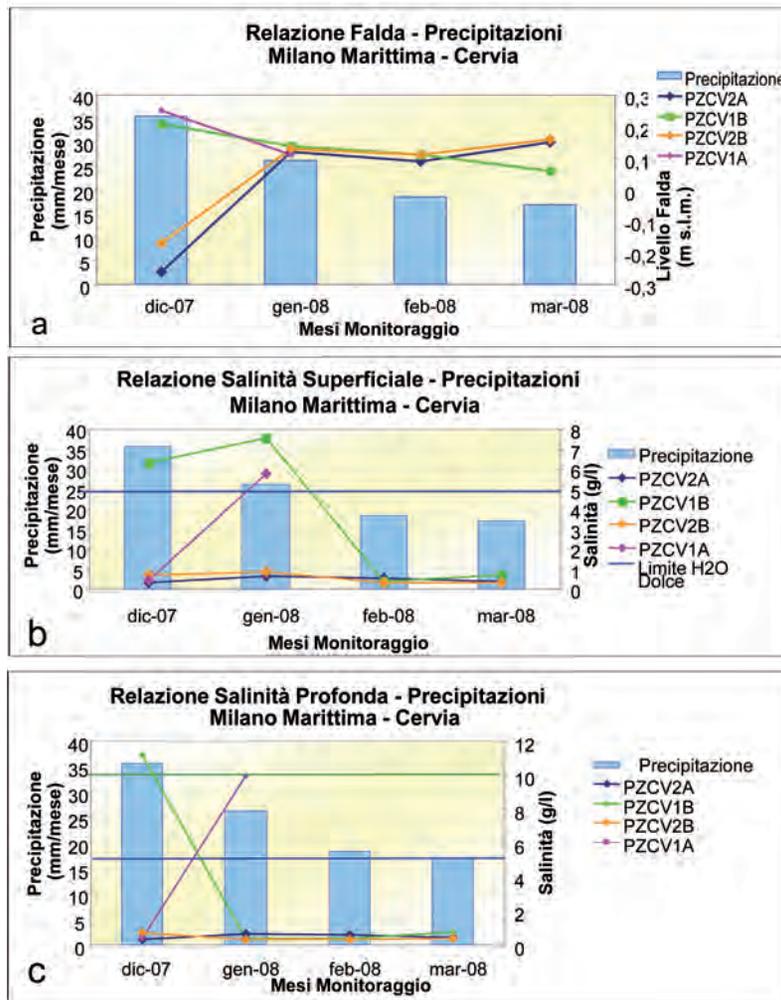


Figura 16 - (a) Livello della falda nella duna a Colonia Varese. (b) Salinità superficiale misurata alla tavola d'acqua. (c) Salinità profonda dei piezometri. In tutti e tre grafici sono riportate le precipitazioni.

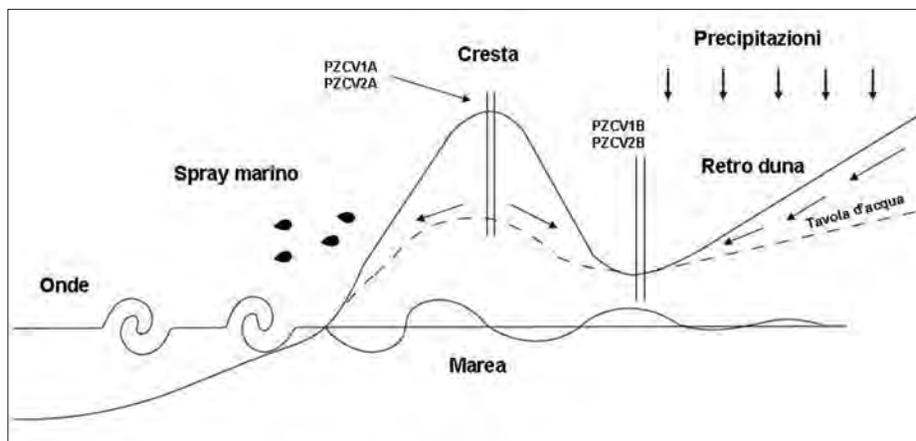


Figura 17 - Disegno schematico che raffigura i processi che avvengono sulla prima fila di dune e che contribuiscono alla salinizzazione dell'acqua sotterranea.

Discussione

Con gli studi descritti in questo articolo abbiamo individuato la presenza di lenti d'acqua dolce nelle dune della costa Adriatica dell'Emilia-Romagna e ne abbiamo studiate alcune caratteristiche. Tra queste, la più rilevante è che queste lenti sono molto variabili in spessore ed estensione durante l'anno. Inoltre, abbiamo anche appreso che le lenti si stanno evolvendo con una tendenza pluriennale indicante una loro progressiva salinizzazione. Molto rimane ancora da studiare su questi accumuli di acqua dolce nelle dune. I calcoli analitici che abbiamo fatto, ad esempio, ci danno facilmente e rapidamente una stima di quanta acqua dolce ci potrebbe essere in teoria sotto una certa duna ma non prendono in considerazione la geometria reale, le variazioni sedimentologiche, e le variazioni spaziali o la tempistica della ricarica. In questo studio abbiamo appurato che anche questi ultimi parametri sono molto importanti: le variazioni nella ricarica naturale e forse anche quella incidentale (artificiale) proveniente dall'irrigazione sono critici come importante sono le variazioni spaziali tridimensionali in forma dell'acquifero. Una situazione relativamente semplice dove non vi sono forti interazioni con acque superficiali è quella di Marina Romea dove la lente d'acqua dolce freatica è influenzata dalla vicinanza del mare e della Pialassa nonché dalla presenza del corpo sedimentario di prodelta all'interno dell'acquifero. All'altezza della foce del Fiume Bevano, invece, il prodelta non si estende tanto nell'entroterra dell'acquifero ma le dune con le lenti d'acqua dolce sono collegate per via sotterranea con una serie di acque superficiali dolci o salmastre quali cave e zone umide. Queste variazioni spaziali e la tempistica della ricarica, in teoria potrebbero essere studiati meglio con un modello numerico a doppia densità come SEAWAT in tre dimensioni (Guo e Langevin, 2002). La modellizzazione numerica di questo tipo di corpi idrici non è una cosa facile: uno dei parametri importanti da conoscere è la concentrazione salina iniziale. Il sale si sposta lentamente per avvezione e con processi di dispersione e diffusione. Le concentrazioni attuali del sale non sono ancora in equilibrio e si stanno aggiustando ai cambiamenti della linea della costa, agli spostamenti delle foci dei fiumi ed al cambiamento in uso del suolo che è iniziato centinaia di anni fa, per non parlare dei cambiamenti antropici più recenti. Per sapere, ad esempio, come si muoverà il sale nell'acqua nei prossimi 40 anni, dovremmo avere un punto di riferimento per lo stato iniziale. In altre parole dovremmo avere una distribuzione del sale misurata precisamente ad oggi. Forse siamo sulla buona strada per avere un'idea di questa distribuzione iniziale del sale, dato che abbiamo cominciato a raccogliere una notevole quantità di dati anche a livello storico. I nostri studi, però, mostrano che le variazioni stagionali sono così grandi che è difficile scegliere il punto di riferimento anche nel presente. A Marina Romea, con una lente d'acqua dolce molto contenuta ed una situazione simile a quella di un'isola oceanica, non è molto importante la conoscenza della distribuzione salina iniziale (come mostrano i risultati del modello numerico) ma per le lenti d'acqua dolce nelle altre spiagge che sono collegate con l'acquifero semi-confinato più profondo o con le acque superficiali dolci queste condizioni di concentrazione salina iniziale sono critiche. Sebbene cominciamo a capire la dinamica locale di queste lenti di acqua dolce, le tendenze su scala regionale a tempi lunghi non sono ancora studiate come pure poco compresa è la situazione della parte più profonda dell'acquifero e la sua tendenza evolutiva.

Un altro tipo di studio non ancora fatto ma che potrebbe aiutare molto a capire la provenienza delle acque saline è un'analisi geochemica del cosiddetto idrosoma o sistema idrochimico sotterraneo (Stuyfzand, 1999). Un'idrosoma è una unità coerente, tridimensionale di acqua sotterranea che ha la stessa specifica origine. Una simile divisione geochemica dei corpi d'acqua permette di scoprire l'origine e la provenienza dell'acqua, le modalità del processo di ricarica naturale, il mescolamento di diversi tipi d'acqua e l'età dell'acqua. In Olanda, Stuyfzand (1999) ha dimostrato che le fonti d'acqua per le dune costiere sono: (1) Acque sotterranee di duna costiera ricaricate direttamente dalle precipitazioni; (2) intrusione di acqua marina; (3) acqua fluviale ricaricata direttamente in falda; e (4) acque delle zone di bonifica. Queste acque di origine diversa formano degli idrosomi di età diversa che si sono accumulate in un periodo che va dagli ottomila anni fa al presente.

Nella nostra zona, oltre alla presenza di analoghi per molti di questi tipi di acque, ci sarebbe anche da considerare come origine l'acqua fluviale usata per l'irrigazione. Gattaceca et al. (2009) hanno concluso che l'acqua d'irrigazione causa un *freshening trend* (tendenza alla dolciificazione delle acque) nel Veneto; osservazione fatta anche da Marconi et al. (2010) nella nostra area di studio su scala locale e con tempistiche stagionali. Analisi di questo tipo

aiuterebbero anche a capire da dove viene e dove sta andando il sale.

Un'altra cosa non ancora completamente compresa è l'interazione fra vegetazione ed acqua di falda. Abbiamo stabilito che la vegetazione (i pini soprattutto) contribuiscono al ciclo idrologico in modo sostanziale consumando anche più della pioggia e che la salinità e il livello della falda determinano che tipo di vegetazione può sopravvivere nella zona costiera a ridosso delle dune (Antonellini e Mollema, 2010) ma altri parametri che inducono effetti nella qualità delle acque di duna come la presenza o meno di calcite nella sabbia ed il loro cambiamento nel tempo debbono ancora essere studiati (Stuyfzand, 1998).

Fino ad ora abbiamo dato per scontato che le componenti del ciclo idrologico sono conosciute e permanenti però, molto probabilmente, esse stanno cambiando a causa del riscaldamento globale (IPCC, 2007). Per esempio, l'evaporazione delle acque superficiali potrebbe aumentare a causa delle temperature più alte ma anche diminuire se il vento diminuisce e l'umidità dell'aria aumenta (Mollema et. al in press). Questo fatto influenza enormemente quanta acqua dolce rimane nel suolo.

Una delle problematiche da approfondire è quella della ricarica artificiale nelle dune costiere. Questo ci permetterebbe di usare l'acqua piovana invernale e che adesso sparisce nel mare. Quest'acqua dolce potrebbe essere usata per proteggere certi habitat come le foreste di pini, per immagazzinare acqua dolce che può poi essere usata in periodi di siccità o anche per contrastare l'intrusione salina nell'acquifero.

Conclusioni

Alcuni dei metodi usati in questo studio sono stati molto efficaci per la caratterizzazione delle dune costiere, delle loro risorse idrogeologiche e della loro tendenza evolutiva. Il LIDAR ha aiutato a stabilire in dettaglio la topografia delle dune. L'indice geochimico BEX è molto utile per stabilire se esista o meno un trend di salinizzazione a lungo termine nelle acque delle dune, cosa che non è facile fare da un semplice studio stagionale di variazione della conduttività elettrica. I modelli analitici basati sulla legge di Ghijben-Herzberg-Dupuit possono rapidamente fornirci una stima dell'acqua dolce contenuta in una duna costiera ma questa è anche fortemente influenzata da altri parametri difficili da quantificare quali le variazioni spaziali e la stagionalità della ricarica, nonché la forma tridimensionale dell'acquifero. La modellizzazione numerica aiuta a quantificare gli effetti dei diversi processi che contribuiscono alla salinizzazione ma questi sono talmente tanti che fino ad ora non è stato possibile costruire un modello completo per l'idrogeologia delle dune costiere.

Per quanto riguarda le località studiate possiamo dire che a Marina Romea la topografia ed estensione delle dune è sufficiente per formare una lente d'acqua dolce ma il drenaggio e l'evapotraspirazione sono talmente alti che lo rendono impossibile. Inoltre, in questa località la distribuzione dell'acqua salina è fortemente influenzata dalla stagionalità e non è stabile, perchè si sta ancora adattando alle modificate condizioni di uso del suolo e della costa. L'acquifero freatico a Lido di Dante e Foce Bevano mostra un trend geochimico di salinizzazione a lungo termine. Qui le lenti d'acqua dolce sono ricaricate anche dall'irrigazione nell'adiacente area agricola e le mareggiate invernali spesso provocano una salinizzazione più spinta dell'acquifero durante l'inverno.

Le dune di Milano Marittima ci hanno mostrato come la provenienza del sale nell'acqua di falda sia di origine diversa e si abbia un flusso sotterraneo di acqua dolce dalle zone in cresta alle dune verso l'entroterra.

Le dune costiere oltre ad essere una barriera naturale contro l'azione erosiva del mare sono un serbatoio d'acqua dolce che è importante per la vegetazione e per gli ecosistemi costieri. Studi futuri dovranno essere mirati ad una gestione integrata di quest'acqua dolce anche in vista della possibilità di immagazzinare nelle dune acque in surplus che poi possano essere usate nei periodi di siccità. Sarà anche molto importante caratterizzare in maggior dettaglio le interazioni fra quantità d'acqua dolce, ricarica effettiva ed uso dell'acqua da parte delle piante nelle dune costiere.

Ringraziamenti

Questo studio è in parte fatto nell'ambito del Progetto BeachMed "POSIDuNe ed in parte nell'ambito del progetto WATERKNOW, finanziato da CIRCLE-MED. Inoltre ringraziamo L' Hera di Ravenna, La Regione Emilia-Romagna, e l'Azienda Marani per condividere alcuni dati che ci hanno permesso di fare questo studio. In

particolare siamo riconoscenti al Comune di Ravenna e al Parco del Delta del Po per averci messo a disposizione il rilievo LIDAR 2003 della costa e alla Provincia di Ravenna per il DEM altimetrico della costa ravennate. Per i lavori in campagna e l'elaborazione dati siamo grati ad Andrea Minchio, Donato Capo, Laura Caruso, Beatrice Giambastiani, Nicolas Greggio, Valentina Rossi, Devarghes Savelli e Francesco Stecchi.

Bibliografia

- AA. VV. (2004) - *Master Plan del delta del Po; Regione Emilia-Romagna* - <http://www.parcodeltaipo.it/er/parco/il-master-plan/index.html>.
- Amorosi A., Colalongo M.L., Pasini G., Preti D. (1999) - *Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Roagna coastal plain (northern Italy)*. *Sedimentology* 46: 99-121.
- Antonellini M., Minchio A., Gabbianelli G. (2007) - *L'Intrusione salina negli acquiferi costieri emiliano-romagnoli*. Atti Terzo Forum Nazionale sulla Pianificazione e Tutela del Territorio Costiero. Relazioni ad Invito. Volume 127 Collana "Ambiente e Territorio", pp. 8- 14, Maggioli Ed.
- Antonellini M., Mollema P., Giambastiani B., Banzola E., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia, M., Ulazzi E. and Gabbianelli G. (2008) - *Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po-plain, Italy*. *Hydrogeology Journal* 16 (8) 1541-1556.
- Antonellini M. and Mollema P. (2010) - *Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal Pine forests and wetlands of Ravenna, Italy*. In press by Ecological Engineering doi:10.1016/j.ecoleng.2009.12.007.
- Balugani E. (2008)- *Caratterizzazione idrogeologica del sistema di dune tra foce Bevano e Lido di Classe*. Tesi di Laurea, Corso di Laurea in Sc. Ambientali, Università di Bologna- Campus di Ravenna.
- Balugani E. e Antonellini M.(2010) - *Measuring salinity within shallow piezometers: comparison of two field methods*. *Journal of Water Resource and Protection*, Paper ID 9401040.
- Bau' D, Gambolati G, Teatini P (2000) - *Residual land settlement near abandoned gas fields raises concern over Northern Adriatic coastland*. *EOS Trans Am Geophys Union* 81: 245-249.
- Bear J., A.H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, and Herrera I. (1999) - *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers - Concepts, Methods and Practices*, in *Theory and Application of Transport in Porous Media*, edited by J. Bear, pp. 625, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Bondesan M. (1988) - *Aspetti e problemi geomorfologici del territorio deltizio padano: 2a Escursione Delta del Po*. In: Bondesan M., Elmi C., Nesci O., Dal Cin R. e Veggiani A. (a cura di), *Guida alle escursioni*. Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia, riunione annuale: Riccione - Delta del Po, 21-24 giugno 1988: 31-58.
- Calabrese L. e Lorito S. (2010) - *Geomorfologia costiera*, in *Il Sistema Mare-Costa dell'Emilia-Romagna*, a cura di L. Perini e L. Calabrese, Pendragon.
- Carbognin L., Tosi L. (1995) - *Analysis of actual land subsidence in Venice and its hinterland (Italy)*. In: *Land subsidence*. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 129-137.
- Carminati E., Dogliosi C., Scrocca D. (2005) - *Magnitude and causes of natural subsidence of Venice*. In: Fletcher C Spencer T (eds) *Flooding and environmental challenges for Venice and its lagoon*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 21-28.
- Ciabatti M. (1968) - *Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano*. *Giornale di Geologia*, XXXIV: 318- 410.
- Ciavola, P., Billi, P., Armaroli, C., Preciso, E., Salemi, E. e Balouin, Y. (2005) - *Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo*. *Geologia Tecnica ed Ambientale*, pp. 41-57.
- Fetter C W (2001) *Applied hydrogeology*, 4th edn. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Gabbianelli G. e Antonellini M. (2007) - *Scenari di adattamento ai Cambiamenti Climatici negli usi della risorsa idrica in ambito costiero*. Atti Conferenza "Cambiamenti climatici e ambiente marino – costiero: scenari futuri per un programma nazionale di adattamento", Palermo. http://www.conferenzacambiamenticlimatici2007.it/site/it/Sezioni/workshop_e_convegni/Live/presentazioni/workshoppalermo.html

- Gabbianelli G., Antonellini M., Mollema M., Minchio A., Stecchi F., Balugani E., Savelli D. (2008) - *Caratterizzazione idrologico-idrogeologica delle dune costiere ravennati*. Atti Convegno "BeachMed in Emilia. Romagna: i risultati". pp. 45-48, Bologna.
- Gardelli, M., Caleffi, S., Ciavola, P. (2007) - *Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano*, Studi Costieri, 13: 53-74.
- Gattacceca J. C., Vallet-Coulomb C., Mayer A, Claude C, Radakovitch O, Conchetto E, Hamelin B. (2009) *A Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: The southern Venice Lagoon coastland* Journal of Hydrology 378: 46-61.
- Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G.H.P., Stuurman R. J. (2007) - *Salt water intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model*. Journal of Hydrology 340: 94-104.
- Guo W. and Langevin C. D. (2002) - *User's Guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three dimensional variable-density ground water flow*: Techniques of Water-resources investigations Book 6, Chapter A7, 77pp.
- Hamon W.R. (1961) *Estimating Potential Evapotranspiration*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE. 87(HY3):107-120.
- Herzberg A. (1901) - *Die Wasserversorgung einiger Nordseebaeder* [The water supply of selected North Sea towns]. Z F Gasbeleucht Wasserversorg 44: 815-844.
- IPCC (2007) - *Climate Change 2007, the Fourth IPCC Assessment Report*. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/index.htm>
- Laghi M., Mollema P. and Antonellini A. (2010) - *The influence of river bottom topography on salt water encroachment along the Lamone River (Ravenna, Italy), and implications for the salinization of the adjacent coastal aquifer*. proceedings of 2010 World Environmental & Water Resources Congress in Providence, Rhode Island, May 16-20, 2010.
- Laghi M. (2010) - *L'interazione tra acque fluviali superficiali e acque sotterranee in zona costiera: il sistema dell'estuario del fiume Lamone*. Tesi di Dottorato, Università di Bologna.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. and Simmers I., (1990) - *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge*, vol. 8. International Contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise, Hannover
- Mao X., Enot P., Barry D.A., LI L., Binley A., Jeng D.-S. (2006) - *Tidal influence of a coastal aquifer adjacent to a low relief estuary*. Journal of Hydrogeology 327: 110-127.
- Marconi V., Antonellini M., Laghi M, Minchio A., Savelli D. (2008) - *A water table fluctuations model in sandy soil below a coastal pine forest* Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-00000.
- Marconi V., Antonellini M., Balugani E., Dinelli E. (2010) - *Hydrogeochemical Characterization of Small Coastal Wetlands and Forests in the Southern Po Plain (Northern Italy)*. Submitted manuscript.
- Mollema P. N., Antonellini M., Minchio A., Giabbianelli G. (2008) - *Studio 3D dell'intrusione salina nelle dune a nord di Ravenna: monitoraggio e modellizzazione usando dati LIDAR e SEAWAT*. IN: Coste Prevenire, Programmare, Pianificare. Atti del Convegno Maratea 15-17 maggio 2008. No. 9 Collane dell'autorità del bacino basilicato. <http://www.adb.basilicata.it/adb/pubblicazioni/vol9/saggi/639.pdf>
- Mollema P. N., Antonellini A., Gabbianelli G., Galloni E. and Oude Essink G.H.P. (2010) - *Pine tree water use and artificial drainage in a Mediterranean catchment (Marina Romea, Ravenna, Italy)*. Submitted manuscript.
- Nielsen P. (1990) - *Tidal Dynamics of the Water Table in Beaches*. Water Resources Research 26, no. 9: 2127-34.
- Oude Essink G. H. P. (2001) - *Density Dependent Groundwater Flow: Salt Water Intrusion and Heat Transport* Lecture Notes Utrecht University Interfaculty Centre of Hydrology Utrecht Institute of Earth Sciences Department of Geophysics.
- Regione Emilia Romagna (2002) - *Carta Geologica d'Italia scala 1: 50.000* - Foglio 223, Ravenna.
- Regione Emilia Romagna (2008) - *BeachMed in Emilia. Romagna: i risultati*. Stampa Tipografia Moderna, Bologna. http://www.ermesambiente.it/wcm/difesauolo/news/2008/News02/BEACHMED-e_in_ER_def_LQ.pdf

- Regione Emilia-Romagna (2009) - *Foce Bevano, l'area naturale protetta e l'intervento di salvaguardia*. Pubblicazione a cura del Servizio Difesa del Suolo della Costa e Bonifica. 56 pp.
- Repubblica (2006) - *Il sale invade il delta del Po. Acqua dolce per fermarlo*. 29 giugno 2006 pagina 31 sezione: CRONACA
- Rossi V. (2007) - *Analisi ed evoluzione a breve medio termine del sistema costiero di Cervia e dintorni*. Tesi di laurea in geologia Marina Applicata, Università di Bologna.
- Scheidleger A., Grath J., Lindinger H. (2004) - *Saltwater intrusion due to groundwater over-exploitation-EEA inventory throughout Europe*. In: 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena, Spain, pp. 125
- Simeoni U., Del Grande C. e Gabbianelli G. (2003) - *Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo*. Studi costieri, 7: 81-93.
- Stuyfzand P.J. (1986) - *New hydrochemical classification of watertypes: principles and application to the coastal dunes aquifer system of the Netherlands*. In: Proceedings 9 Salt water Intrusion Meeting: Delft 12-16 May 1986: 641-655.
- Stuyfzand P.J. (1989) - *Quality changes of River Rhine and Meuse water upon basin recharge in the Netherlands' coastal dunes: 30 years of experience*. In: Johnson, A.I. and Finlayson, D.J. Editors, 1989. *Artificial Recharge of Groundwater* American Society of Civil Engineering, pp. 235-247.
- Stuyfzand P. J. (1998) - *Decalcification and acidification of coastal dune sands in the Netherlands*. Water-Rock Interaction, Proc. 9th Intern. Symp. on WRI, Taupo New Zealand, G.B. Archart & J.R. Hulston (eds), Balkema, pp. 79-82.
- Stuyfzand P.J. (1999) - *Patterns in groundwater chemistry reflecting groundwater flow*. Hydrogeol. J. 7, Theme issue 'Groundwater as a geologic agent', J. Tóth (ed), Hydrogeology J. (7): 15-27.
- Stuyfzand P.J. (2008) - *Base exchange indices as indicators of salinization or freshening of (coastal) aquifers*. In *Proceedings 20 Salt water Intrusion Meeting: Naples FL USA, 23-27 June 2008*
- Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carboognin, L., Wegmüller, U., Rizzetto, F., (2005) - *Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system*. Remote Sensing of Environment (98) 403-413.
- Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Gonella M. (2006) - *Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: modeling the past occurrence and the future trend*. Water Resources Research 42: 1-19.
- Teobaldelli M., Mencuccini M., and Piussi P. - (2004). *Water table salinity, rainfall and water use by umbrella pine trees (Pinus pinea L.)* Plant ecology 171: 23-33.
- Ulazzi E., Antonellini M., Gabbianelli G. (2007) - *Saltwater intrusion in a unconfined aquifer: the case study of Cervia (North Adriatic sea, Italy)*. In: P. Meire et. al. (eds), *Integrated Watermanagement: Practical Experiences and case Studies*, Springer, pp. 295-308.
- Vacher H.L. (1988) - *Dupuit-Ghyben-Herzberg analysis of strip-island lenses*. Geological Society of America Bulletin 100: 580-591.

Ricevuto il 31/03/2010 , accettato il 22/07/2010.

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).

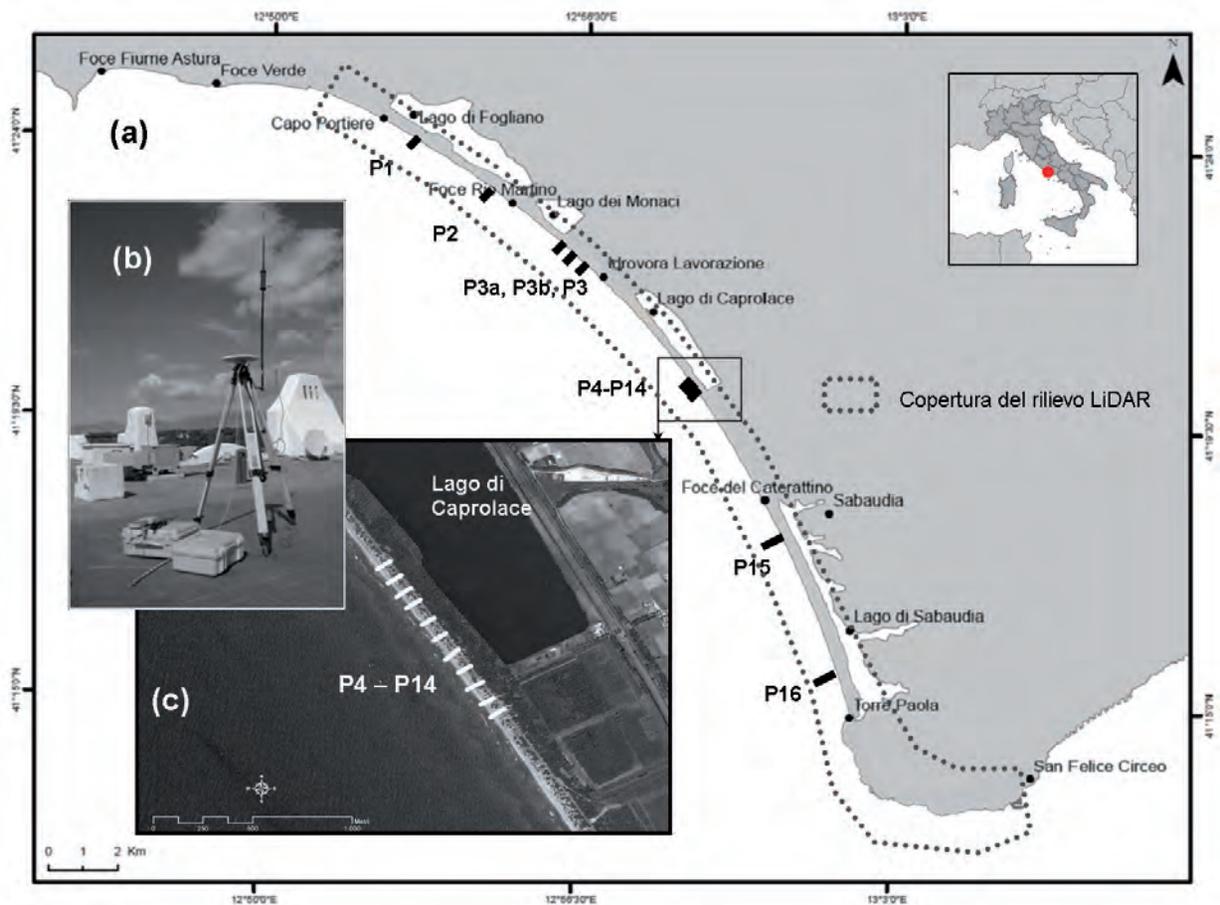


Figura 1 - (a) Area di studio e localizzazione dei rilievi topografici mediante DGPS e LiDAR; (b) DGPS a doppia frequenza Trimble 5700; (c) ingrandimento di una delle due aree selezionate per lo studio di dettaglio.

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 Parlareco 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). È 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 la 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.

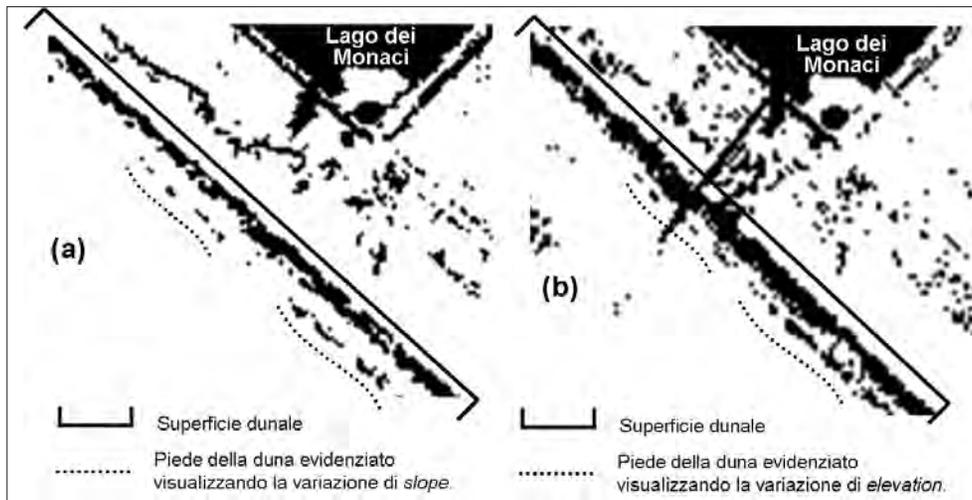


Figura 2 - Visualizzazione del piede della duna tramite i valori di *slope* (a) e di *elevation* (b) associati al DSM LiDAR.

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).

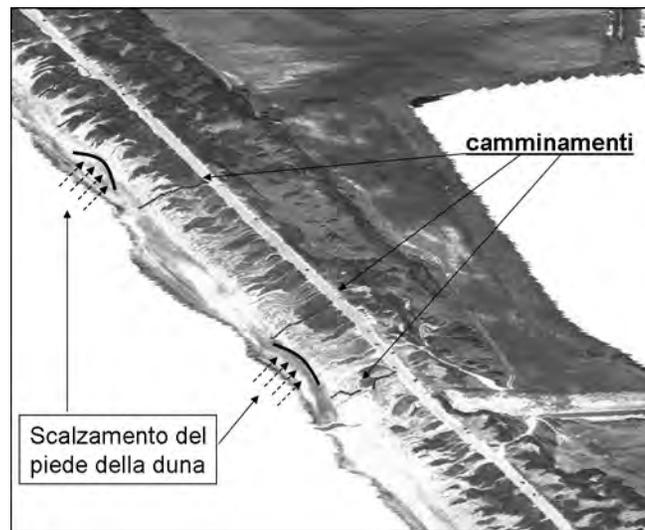


Figura 3 - Visualizzazione in ArcSCENE® delle ortofoto associate ai valori di quota rilevati dal LiDAR.

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

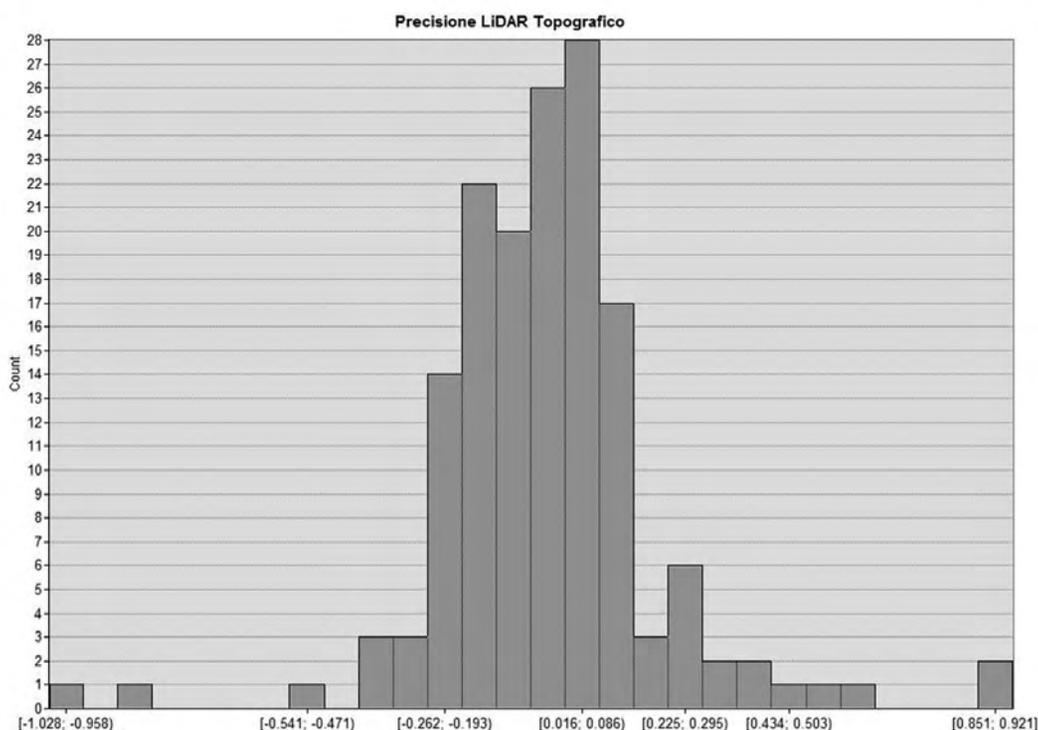


Figura 4 - Iistogramma degli scarti.

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.

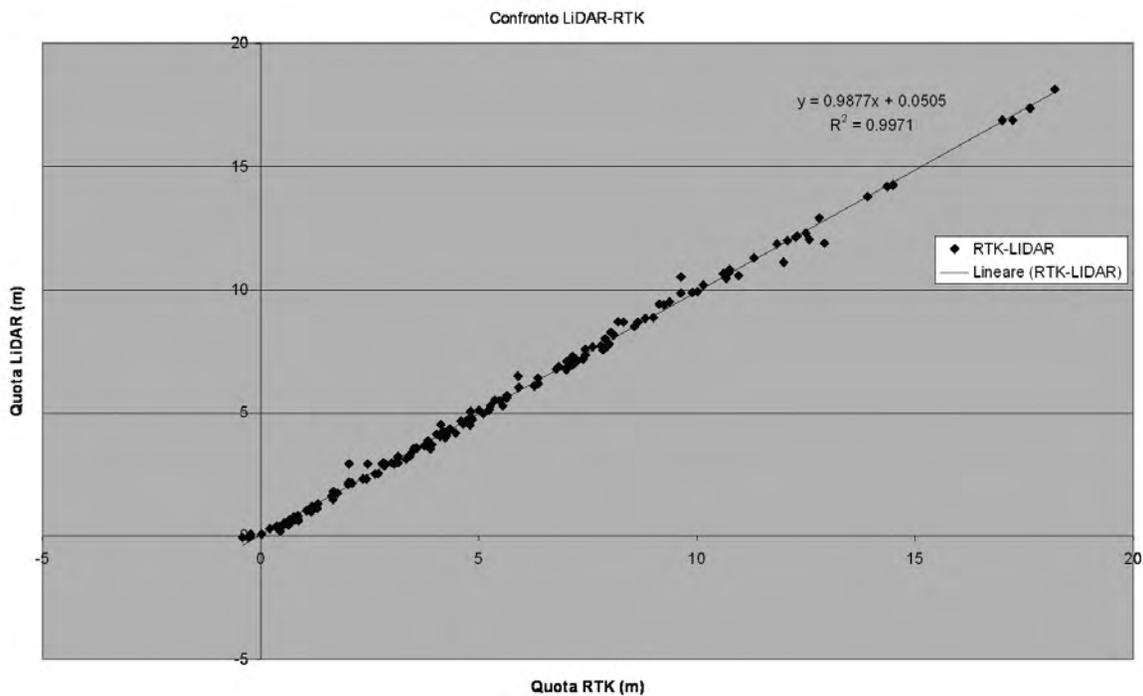


Figura 5 - Quote misurate dai due sistemi (LiDAR e DGPS in RTK).

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.

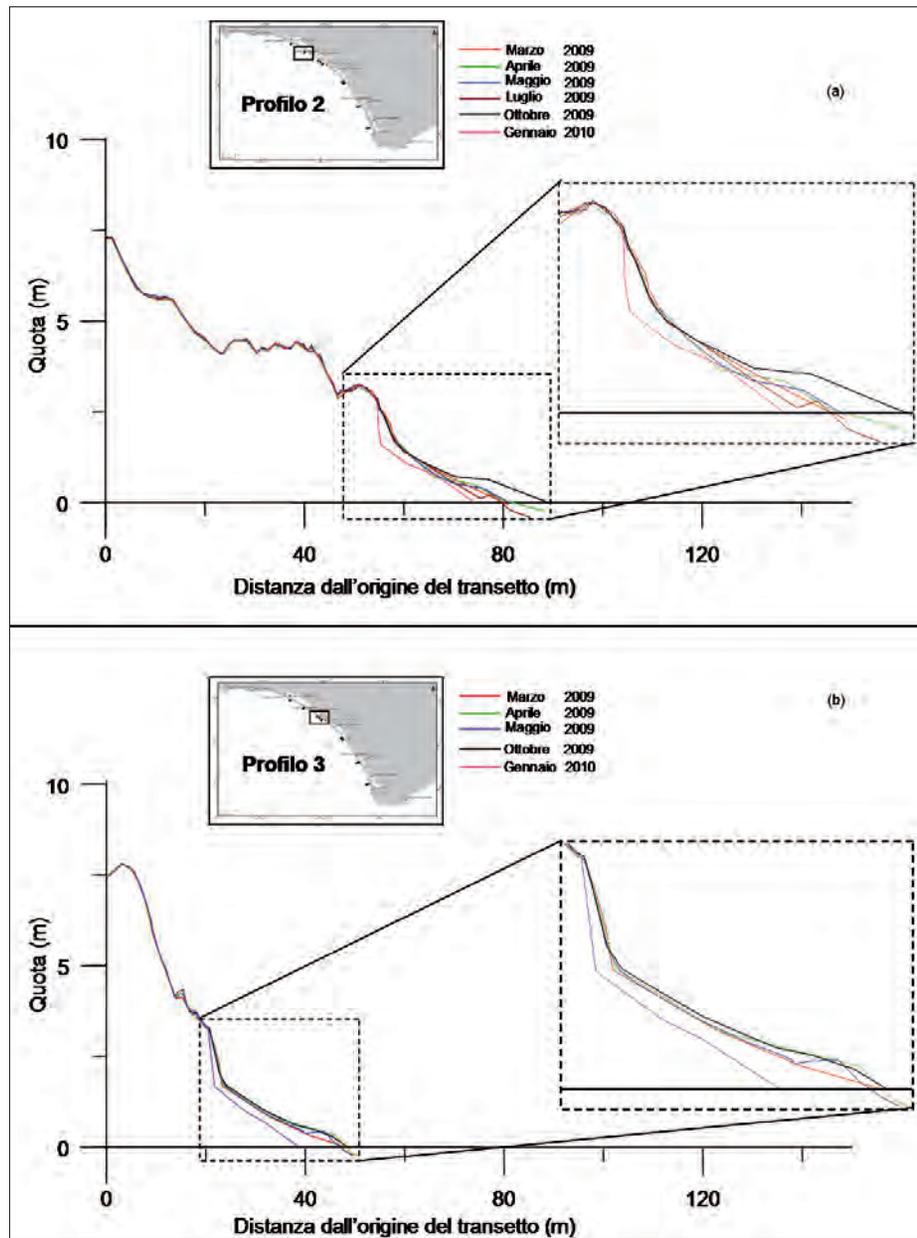


Figura 6 - Variazioni stagionali rilevate lungo il Profilo 2 (settore 1) e lungo il Profilo 3 (settore 2).

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

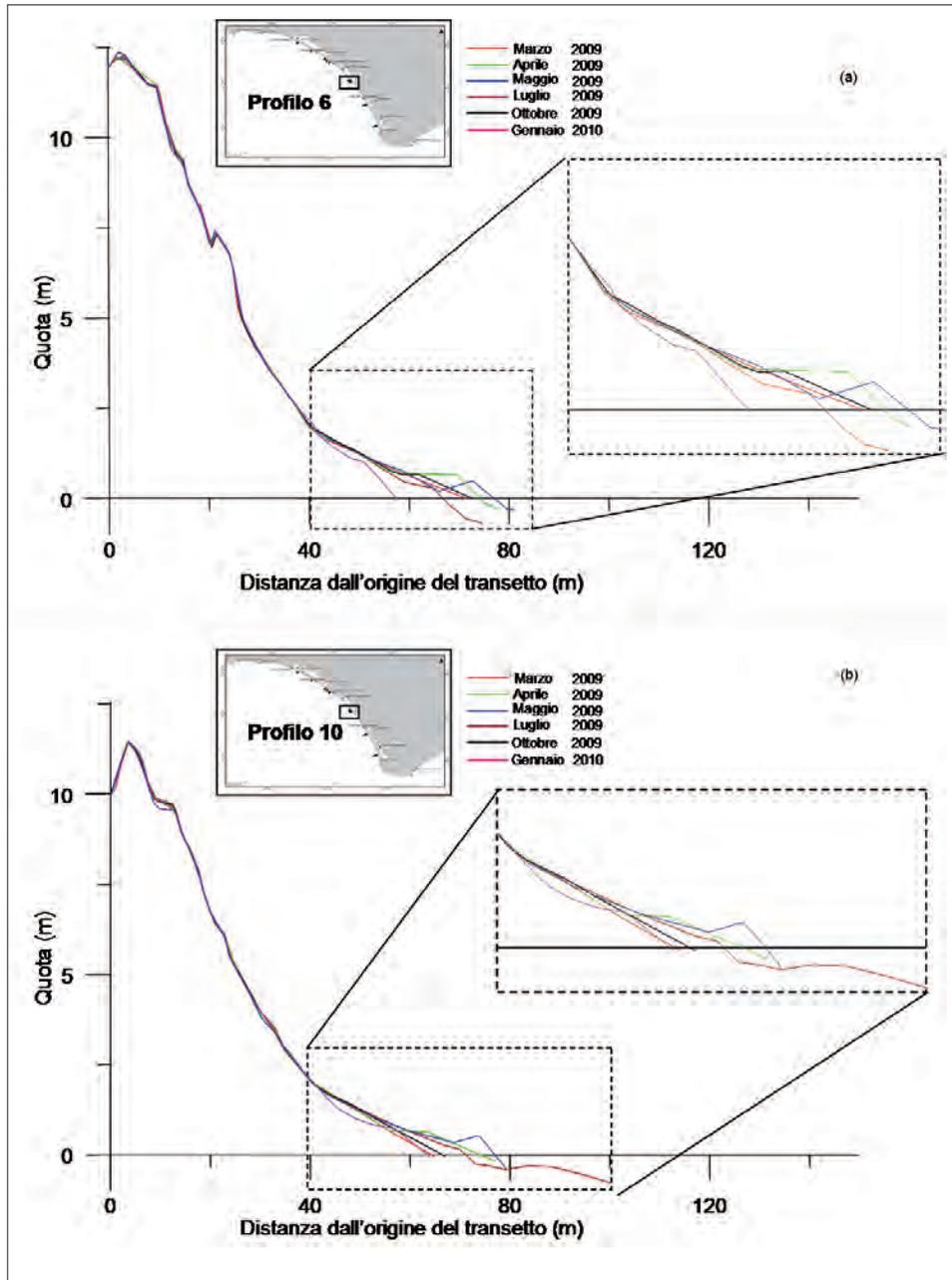


Figura 7 - Variazioni stagionali rilevate lungo il Profilo 6 e 10 (settore 3).

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.

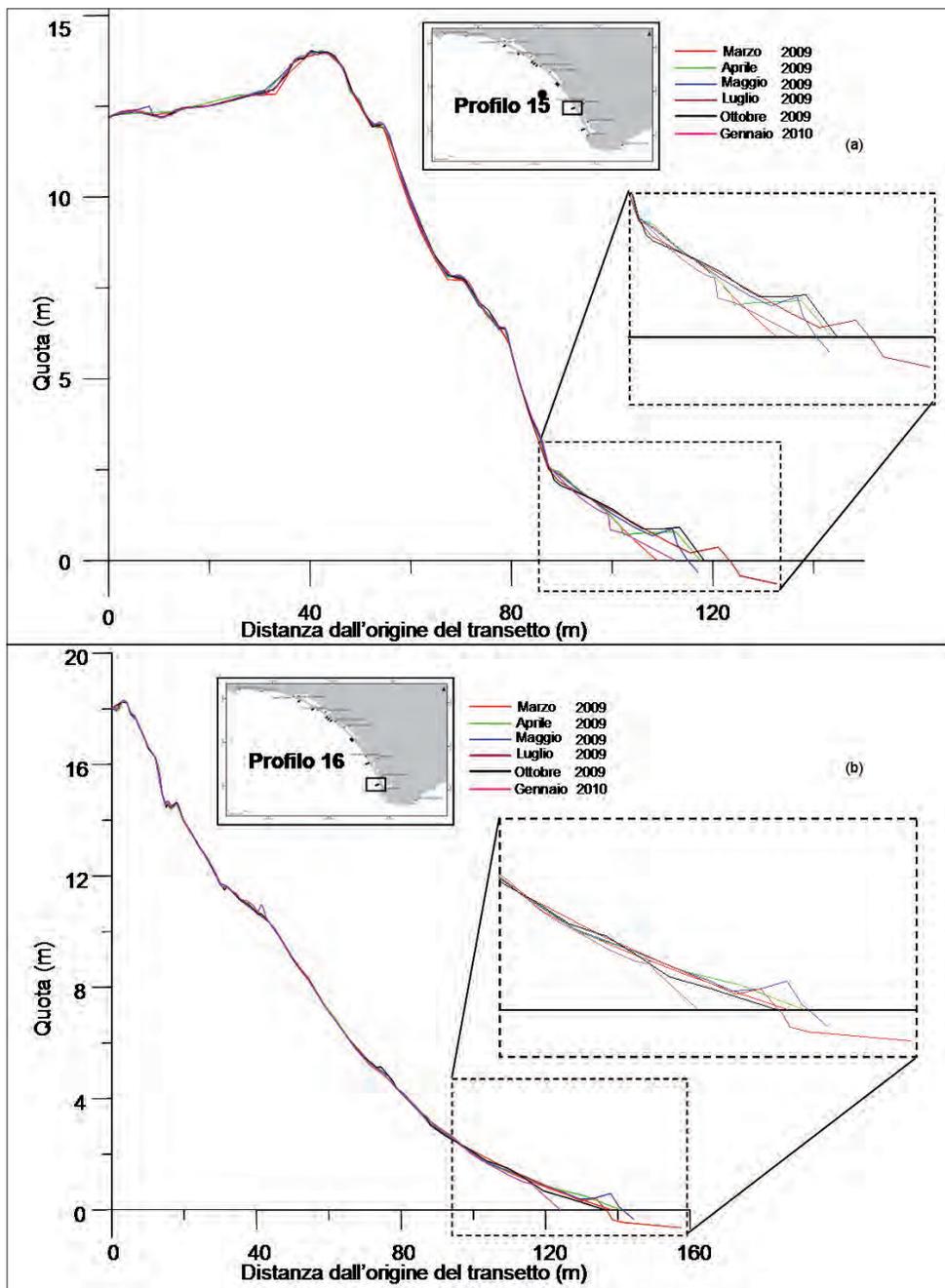


Figura 8 - Variazioni stagionali rilevate lungo il Profilo 15 (settore 4) e lungo il Profilo 16 (settore 4).

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

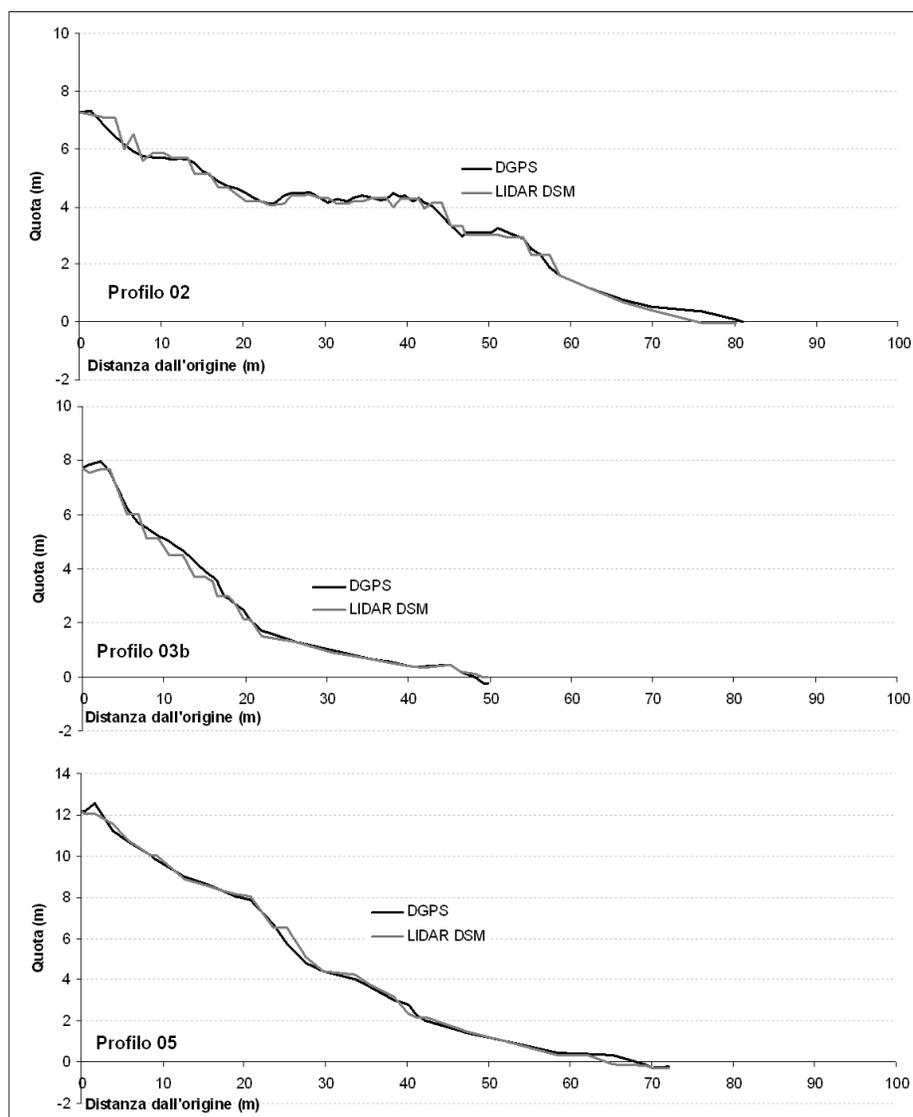


Figura 9a, b, c - Sezioni di alcuni profili spiaggia-duna significativi, elaborati a partire dai dati DGPS e dal DSM LiDAR. (a) Profilo 02, (b) Profilo 3b, (c) Profilo 05.

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

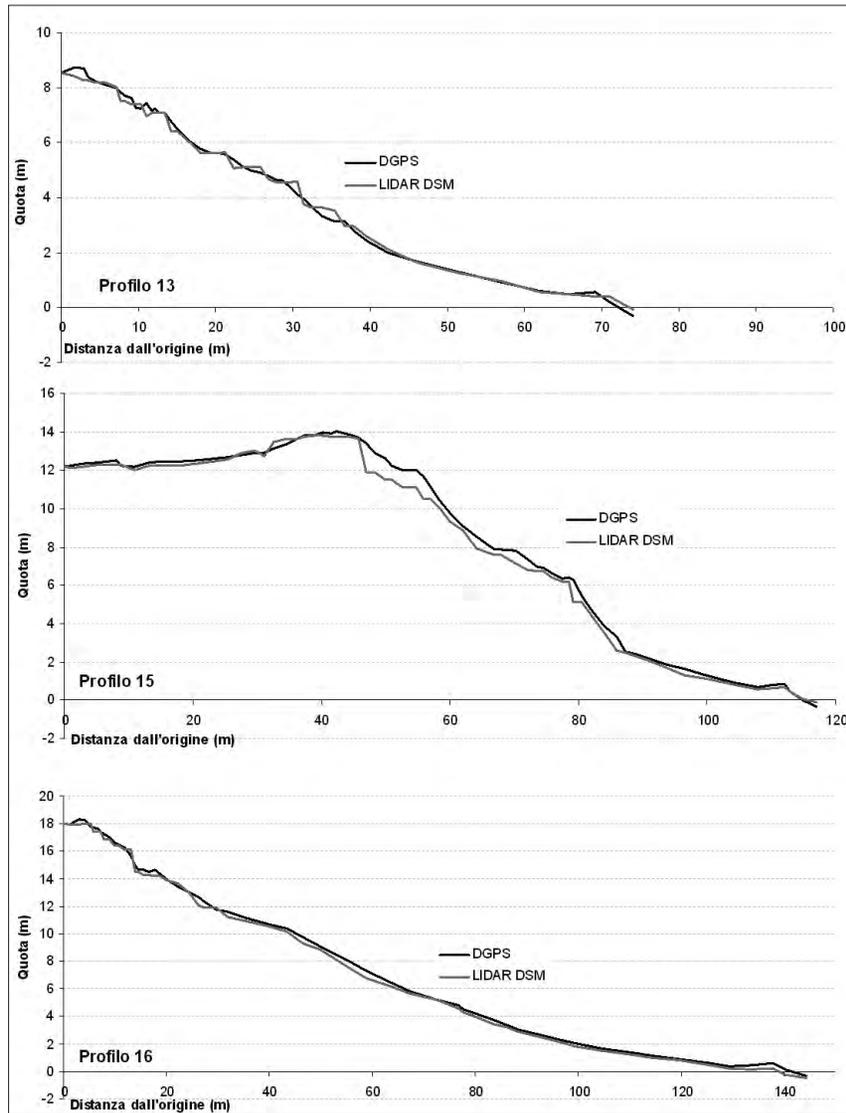


Figura 9d, 9e, 9f - Sezioni di alcuni profili spiaggia-duna significativi, elaborati a partire dai dati DGPS e dal DSM LiDAR. (d) Profilo 13, (e) Profilo 15, (f) Profilo 16.

(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.

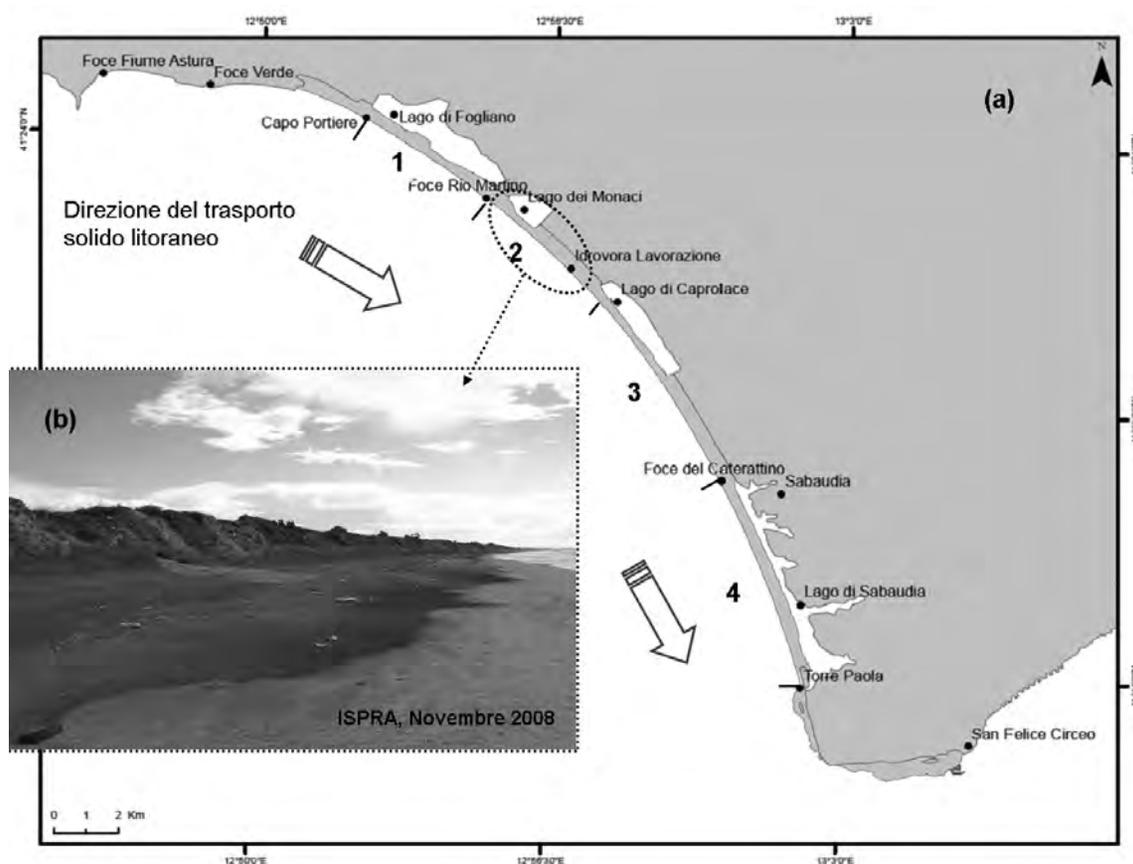


Figura 10 - (a) Dinamica dell'area di studio. (b) foto relativa al settore 2, il tratto di litorale in cui il sistema spiaggia-duna ha un'ampiezza estremamente ridotta che lo rende particolarmente esposto ad eventi di mareggiata più intensi.

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.
- Steinvall 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.

Dune ed utilizzo del territorio a confronto per la stima della capacità virtuale di attuare l'adattamento al rischio costiero in Italia

Edi Valpreda

Agenzia per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo economico sostenibile (ENEA)
Centro di Ricerca Ezio Clementel, Bologna

Riassunto

L'opportunità di utilizzare le dune costiere quali strumenti di adattamento al rischio costiero viene proposta con sempre più convinzione in ambito europeo ed internazionale. In Italia il loro utilizzo è elemento di politiche reali di mitigazione del rischio costiero solo in alcuni ambiti regionali, tra cui quelli dell'Emilia-Romagna e della Toscana, ma non viene percepita come un'opportunità dal sistema imprenditori-amministratori o, ancor meno, fa parte di una strategia nazionale per l'adattamento al rischio costiero.

In Italia, si hanno oltre 8000 km di costa, circa 5000 di questi sono di costa bassa, circa il 40% di quest'ultima, risulta già in erosione e tutta è, potenzialmente, soggetta ad erosione negli scenari di cambiamento climatico dei prossimi decenni (GNRAC, 2006). Questo presume l'esistenza nel paese di una reale necessità di strategie nazionali (oltre che regionali) di gestione del rischio costiero in cui in particolare venga considerato il ruolo delle dune costiere e governata l'antitesi attuale tra sviluppo e conservazione.

In assenza di un piano strategico per l'adattamento al rischio costiero in Italia, si è quindi ritenuto di effettuare, in una prospettiva nazionale, un'indagine che valorizzasse la possibilità di disporre di territori costieri (e di dune) adatti a scelte di gestione costiera non incentrate sulla concezione di sviluppo come sinonimo esclusivo di aumento della pressione antropica.

Questo articolo propone la sintesi di questa indagine condotta su scala nazionale nello spazio costiero delimitato dalla distanza di 100 metri dalla riva, in riferimento ai vincoli contenuti nel Protocollo di Madrid per la gestione integrata delle zone costiere (ICZM) nel Mediterraneo.

A tal fine, in questo spazio costiero sono state analizzate la distribuzione e frammentazione di alcuni tipi di uso del suolo, tra cui le dune costiere, e la contiguità spaziale tra usi potenzialmente conflittuali: dune, Siti di Importanza Comunitaria (SIC), infrastrutture balneari, aree agricole. Questo ha consentito valutazioni quantitative comparate su scala locale e nazionale ed anche considerazioni sugli effetti delle diverse politiche locali sul territorio costiero.

Parole chiave: antropizzazione, urbanizzazione, agricoltura, erosione, SIC, ICZM, GIS, pianificazione, monitoraggio.

Abstract

The possibility of using coastal dunes as a tool in the adaptation to coastal risk has been more emphasized internationally and in other European countries than in Italy. The use of dunes as an element of real coastal risk political mitigation occurs only in a few Italian regions, including Emilia-Romagna e Tuscany. Usually, this is not perceived as a real

opportunity by administrators e coastal entrepreneurs. Dunes are not considered as an effective new possibility in the mitigation of coastal risks e neither are dunes a part of a national strategy for the adaptation to coastal risk.

In Italy, there are over 8000 km of coastline, with 5000 km of low coasts, circa 40% of which are already retreating. These low coasts are all potentially subject to erosion in climate change scenarios for the next decades. This emphasizes the need for a national (e a regional) strategy for risk management in coastal areas where the role of coastal dunes are strengthened e not ruled by the current antithesis between development e conservation.

In the absence of a strategic plan for the adaptation to coastal risk in Italy, we considered carrying this research in a national perspective, enhancing the availability of coastal areas (e also dunes) suitable for sustainable planning e not focused on coastal development as synonym of increased human pressure.

This article provides a summary of this investigation, performed on a national scale, within a coastal fringe of 100 meters width from the shoreline, in reference to the restrictions contained in the Madrid Protocol for Integrated Coastal Zone Management (ICZM) in the Mediterranean. The Protocol was signed by Italy e identifies the non edificabile nature of a 100 meter wide (or wider) strip contiguous to the sea, except for installations destined to public services or to economic activities, which require the immediate proximity of water. For this goal, in this coastal space, some classes of use including coastal dunes were classified as to their fragmentation in space e their spatial proximity with other potential conflicting uses: dunes, Environmental Protected Sites (SIC), bathing facilities, crops. This allowed comparative e quantitative assessments, both locally e nationally, as well as considerations on the effects of various policies over the local coastal territory.

In addition to methodology, the paper presents the results of its application to a large number of regional areas (9) in which regional differences emerge e help define a national framework that clearly shows the potential enduring e the need for more e better integration between experience e local knowledge. The results presented here aim to highlight the need for changes in future coastal planning in Italy, e the need to consider new forms of interaction among regions e with the National government, in order to share innovation in methodology e technology e to effectively involve regional governments. Among possible solutions the paper considers the suggestion of capacity building through a “bottom to bottom” Italian model: regions that are already more advanced regarding innovation e integrated coastal planning involve all other regions within ad-hoc national programmes (data production e sharing, risk impact e adaptation scenarios, risk education e perception, etc) aiming at a shared national potential for adaptation in coastal areas.

Keywords: *dunes, le use, coastal risk, ICZM, GIS, coastal planning, adaptation, monitoring.*

Introduzione

Lo scopo di questo studio è fornire dei dati per una concreta riflessione sulla applicabilità teorica del principio di non ulteriore edificabilità sancito dall'art.5 del recente Protocollo di Madrid per l'ICZM nel Mediterraneo. E' difficile disporre oggi di un quadro nazionale su questo argomento: la conoscenza dell'uso del suolo limitrofo alla linea di costa è quella fornita dal *Progetto Corine Coastal Le Use* (APAT, 2005) che non ha le caratteristiche necessarie al dettaglio ed ai fini di questa indagine.

Infatti, l'interesse principale non consiste nel produrre una mappatura dell'uso del suolo ma piuttosto di disporre di elementi utili a valutare la potenzialità nel paese di avvio di una pianificazione costiera meno impattante dal punto di vista infrastrutturale. Si è quindi voluto verificare quanto territorio costiero “libero” da usi commerciali o antropici il paese abbia ancora a disposizione, le sue caratteristiche geomorfologiche e gli eventuali elementi geomorfologici quali le dune costiere e le aree umide: la presenza di quest'ultime è una condizione importante per la realizzazione di progetti di adattamento al rischio costiero, come lo è il frazionamento dell'uso del territorio costiero e la compatibilità tra sviluppo costiero e rispetto delle singolarità naturalistiche- ambientali soggette a vincoli.

Questi obiettivi hanno indirizzato lo studio che propone l'analisi del territorio costiero finalizzata ad evidenziare queste caratteristiche su basi statistiche e quantitative.

Il confronto effettuato tra ambiti geografici ed amministrativi bene mette in risalto gli effetti delle diverse strategie di gestione dei territori costieri e l'impellenza in Italia di una strategia omogenea di adattamento al rischio

per gli ambiti costieri.

L'ipotesi che questo lavoro affronta e sostiene è che, a fronte di una crescente perdita di territorio costiero libero, destinata ad aumentare nei prossimi anni stante le previsioni degli studi europei (BLUE PLAN, 2008), questa tendenza debba essere modificata e vi siano ancora delle concrete possibilità di farlo. Poiché questa possibilità dipende in modo rilevante anche dalla capacità di produrre, monitorare e diffondere conoscenza completa a scala nazionale, adeguata ed utile per questo tema, il lavoro fornisce elementi conoscitivi ed un metodo trasferibile di analisi e di monitoraggio, che potrebbero essere i presupposti di un progetto nazionale per la costruzione di una strategia italiana di adattamento al rischio costiero.

Oltre alla metodologia, vengono presentati i risultati della sua applicazione ad un numero rilevante di ambiti regionali, in cui emergono specificità regionali che contribuiscono a delineare un contesto nazionale non ancora integrato con le esperienze locali, sebbene se ne evidenzino le potenzialità. I risultati qui esposti potranno sollecitare riflessioni sulla futura pianificazione territoriale costiera in Italia e sull'esigenza di considerare anche nuove forme di interazione tra amministrazioni regionali ("*bottom to bottom*") per giungere anche nel nostro paese ad un progetto nazionale condiviso sull'adattamento nelle aree costiere.

Il lavoro presenta una sintesi del significato dell'adattamento al rischio costiero in termini di azioni possibili e di contesto necessario alla sua attuazione. Descrive poi la metodologia, gli indici sviluppati e i risultati ottenuti in 9 regioni italiane, riporto i dati specifici delle singole realtà e un'analisi comparata finale. Questa esperienza viene rapportata al contesto delle azioni che l'Europa sta attuando nell'ambito dell'adattamento ai rischi costieri e della gestione costiera sostenibile.

Adattamento al rischio costiero in Italia

Il significato del termine adattamento in relazione al rischio ha avuto una storia travagliata e ambigua: da accettazione passiva di un evento esterno, dominante negli anni '70, questo termine è stato usato per definire concetti diversi e talora anche conflittuali, come sinonimo di mitigazione o prevenzione (Glantz, 2007).

Il problema del significato associato agli stessi termini da soggetti di diversa formazione culturale è ben noto: "...è frequente che nel linguaggio la stessa parola abbia significati diversi ed anche che parole diverse abbiano lo stesso significato ...questo induce una enorme confusione..." (Wittgenstein, 1918).

Solo nel 2007 si è giunti con l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) a definire il significato dell'adattamento in modo univoco, con una enunciazione composita in modo da contenerne le ambiguità di interpretazione. Adattamento viene definito il processo che "consente ad un sistema di adeguarsi ad un cambiamento riducendone e/o eliminando i possibili effetti negativi; si associa l'aggettivo proattivo o reattivo se l'adattamento anticipa o fa seguito all'evento dannoso".

Pur non avendo ancora una consistenza interpretativa interdisciplinare, in ambito internazionale si è giunti a definire nel dettaglio le possibili azioni di adattamento per diversi tipi di rischio indotti dai cambiamenti climatici: per l'ambito costiero, ad esempio, le possibili azioni di adattamento sono ben codificate in letteratura (Gilbert e Vellinga, 1990) e prevedono le seguenti possibili opzioni:

- la difesa rigida in loco (*hold the line*);
- il ri-allineamento controllato della linea di costa (*managed realignment*) al fine di produrne l'avanzamento, oppure consentire un limitato e guidato arretramento. In questo tipo di azioni rientrano sia lo smantellamento di precedenti opere di difesa rigida, sia il ricorso a ripascimenti per estendere gli ambiti intertidali (Shoreline Management Plan guidance for Engle e Wales, 2006);
- la rinuncia alla difesa (*do nothing*);
- la costruzione di nuove difese più avanzate (*move seaward*);
- interventi limitati di ricostruzione ed adeguamento morfologico ed idraulico di ambienti costieri di transizione (aree umide e dune) per contenere e mitigare gli effetti delle mareggiate riducendo i danni alle zone più interne (*limited intervention*).

E' evidente che queste possibili scelte si basano su una forte capacità di pianificazione territoriale integrata a medio-lungo termine; queste scelte infatti non solo dipendono dalle possibilità e modalità di sviluppo economico,

ovvero dal valore del territorio costiero, ma anche dalle aspettative e dal tipo di fruizione della popolazione che insiste su quel territorio, la quale dovrebbe comprendere e, se non condividere, almeno accettare tali scelte.

I presupposti di una politica di adattamento, in particolare in ambito costiero, coincidono quindi con la capacità di conoscere gli elementi che determinano (oggi e in futuro) i cambiamenti di rischio e di valutare queste condizioni, nonché gli effetti di possibili scelte di intervento in una sfera non solo locale: essi infatti dipendono da fattori che non sono confinati in ambiti univoci amministrativi oppure geografici (costa, mare, pianura, montagna, ecc). Questa capacità si basa su conoscenza, scambio ed accesso ai dati, responsabilizzazione e comunicazione, innovazione di tecniche e aspettative.

Fare azioni di adattamento significa rendere verosimile, in termini economici, la gestione del rischio costiero anche negli anni a venire (Carraro et al., 2009; Richards e Nicholls, 2009). In Italia si hanno circa 8000 km di costa di cui circa 5000 km sono costa bassa: di questi, il 40% circa è già in erosione (GNRAC, 2006). Negli scenari di cambiamento climatico dei prossimi decenni, per le nostre latitudini, il fenomeno sicuramente erà aumentato e tutta la costa bassa diventa virtualmente soggetta ad erosione. Si prefigurano, quindi, costi per la gestione del rischio costiero difficilmente sostenibili senza un programma di adattamento strategico nazionale, che consenta scelte differenziate di intervento e che ancora manca nel nostro paese, a differenza di quanto accade in quasi tutti i paesi Europei (Valpreda e Corsini, 2008).

L'attuazione delle diverse azioni di adattamento richiede anche una condizione di fattibilità intrinseca, che dipende dalla disponibilità di territorio libero o non occupato da infrastrutture stabili. Sono stati in particolare considerate alcune condizioni favorevoli o sfavorevoli su cui lo studio ha prodotto elementi conoscitivi: 1) la disponibilità di territorio libero da strutture fisse: de-localizzare beni infrastrutturali a rischio (di erosione o allagamento) è teoricamente possibile ma è certamente complesso in termini sociali ed economici; 2) la continuità laterale delle classi di uso del suolo: la frammentazione di aree di pregio ambientale e infrastrutturali (che spesso si rileva nell'ambito costiero) è elemento di maggiore problematicità rispetto ad interventi in ambiti omogenei con una gree continuità laterale; 3) le dune costiere: la presenza e la frammentazione di dune costiere rappresentano elementi di maggiore o minore possibilità potenziale di realizzare "interventi limitati di contenimento dei fenomeni di danno potenziale" o di "allontanamento del limite terra-mare".

Il presente lavoro applica un metodo di valutazione di queste condizioni di fattibilità intrinseca, e ne discute i risultati sia come occasione di valutazione di uno stato di fatto, sia come potenzialità di monitoraggio di future condizioni del paese.

Utilizzo delle aree costiere italiane e adattamento

Sono state distinte alcune caratteristiche di uso del suolo che consentono, sinteticamente, di esprimere e comparare in diversi territori costieri la potenziale fattibilità di azioni di adattamento che non presumano esclusivamente la "difesa in loco".

L'indagine ha preso in esame la fascia di territorio di 100 metri di ampiezza dal limite terra-mare in riferimento alla zona a vincolo di edificazione sancito dall'art.5 del Protocollo di Madrid. Questa fascia è stata delimitata in base ad un buffer originato entro GIS dalla linea di costa tracciata su orto immagini del 2006, le stesse da cui sono derivate le classificazioni di uso del suolo.

Sono state utilizzate le cartografie del Portale del Ministero Italiano dell'Ambiente e del Territorio tramite protocollo WMS (*Web Map Service interface steard*). Le informazioni sono state estratte in forma vettoriale e organizzate, classificate e rielaborate entro una banca dati GIS, e riferite al Sistema WGS84, UTM 32-33N.

L'indagine considera solo la fascia di litorale compresa entro 100 metri dal mare. I risultati possono pertanto descrivere una condizione che non rappresenta in modo completo la condizione di sviluppo dell'ambito litorale regionale evidenzio, ad esempio, condizioni di naturalità in ambienti costieri (come ad esempio accade in Emilia Romagna) in cui, a ridosso della fascia considerata dei "100 metri dal mare" verso l'entroterra si collocano, stabilimenti attrezzati, infrastrutture turistiche, ecc.

Questa considerazione non inficia l'analisi, anzi rivela che, nell'ipotesi di attuazione di quanto stabilito nel Pro-

raccolto, in queste condizioni sarebbe possibile una attuazione, senza forti impatti sul sistema attuale di sviluppo del litorale stesso. Questo fatto rende evidente come politiche strategiche su medio e lungo periodo di gestione del rischio di erosione costiera (con pratiche di ricostruzione delle spiagge) hanno creato questi presupposti. Bisogna poi tenere in considerazione il margine di errore del metodo: la classificazione dell'uso del litorale tramite interpretazione di immagini a video, consente di effettuare analisi su aree vaste con buona conformità alla realtà con però alcuni limiti di accuratezza posizionale in funzione della scala di lavoro. In questo caso la scala adottata per l'acquisizione rende plausibile un errore di posizionamento valutabile in circa il 10-20% in termini lineari. La fascia di territorio costiero esaminata è stata classificata in base alla pertinenza amministrativa, alle caratteristiche geomorfologiche (costa bassa/costa alta), alla presenza di aree SIC ed alla tipologia prevalente di uso del territorio. Sono state definite le seguenti 13 classi:

1. Area urbana;
2. *Sprawling* urbano;
3. Zona Antropizzata (stabilimenti balneari fissi, strutture fisse di campeggi);
4. Area urbanizzata-costa alta;
5. Porto;
6. Ferrovia;
7. Area industriale;
8. Terreno agricolo;
9. Pineta;
10. Spiaggia;
11. Dune costiere;
12. Area Naturale- Costa Alta;
13. Foce fluviale.

In alcune delle elaborazioni presentate, per esigenze di sintesi, alcune classi sono state unite: ad esempio l'insieme "Naturale" è costituito dalle classi: Area Naturale-Costa Alta, Foce fluviale, Spiaggia e Pineta.

E' stata esaminata la fascia costiera di 8 regioni: Friuli, Veneto, Emilia Romagna, Toscana, Marche, Molise, Lazio e Basilicata.

Sono stati messi a punto degli indici qualitativi e quantitativi per valutare e confrontare la potenzialità di attuare azioni di adattamento, in base a condizioni intrinseche del territorio costiero ritenute vincolanti o predisponenti: disponibilità di suolo libero da infrastrutture, presenza di dune, limitata frammentazione delle aree "naturali". I parametri dimensionali delle diverse categorie di uso del territorio (area, lunghezza del tratto di costa interessato) sono stati utilizzati per elaborazioni statistiche e spaziali.

E' stato, in particolare, elaborato il rapporto tra la lunghezza della costa regionale di pertinenza e la distribuzione spaziale delle diverse categorie di uso del territorio, calcolo la percentuale di presenza, per ogni categoria, in base alla lunghezza totale della costa regionale (Fig.1).

Risulta che il territorio costiero è generalmente poco urbanizzato in Basilicata Tirrenica e Toscana (con valori tra il 6% ed il 10%), la zona sino a 100 metri da costa risulta abbastanza antropizzata o urbanizzata (con valori intorno a circa il 20%) in Emilia-Romagna, Veneto e Marche, con valori tra il 30% ed il 40% in Molise, Lazio ed Abruzzo e con i massimi valori in Friuli, pari a circa il 50% della lunghezza del litorale regionale.

E' interessante rilevare la generalizzata pressione antropica, ben evidenziata dalla diffusa presenza di forme di urbanizzazione oltre i confini dei nuclei abitati, per lo più sviluppate lungo la rete stradale (*sprawling*): le Regioni Abruzzo, Lazio, Molise, Veneto ed Emilia-Romagna risultano tutte interessate da questo fenomeno con percentuali significative (tra circa il 10% ed il 15%). E' però interessante osservare l'aumento di *sprawling* in presenza di una percentuale minore di insediamenti urbani costieri e viceversa. Questo fatto sembra evidenziare una tendenza ad inglobare in contesti urbani veri e propri le forme di insediamento urbano irregolare del territorio; l'indagine non riesce a rilevare la tempistica di questa evoluzione che sarà necessario esaminare su scala nazionale e valutare su dati multitemporali.

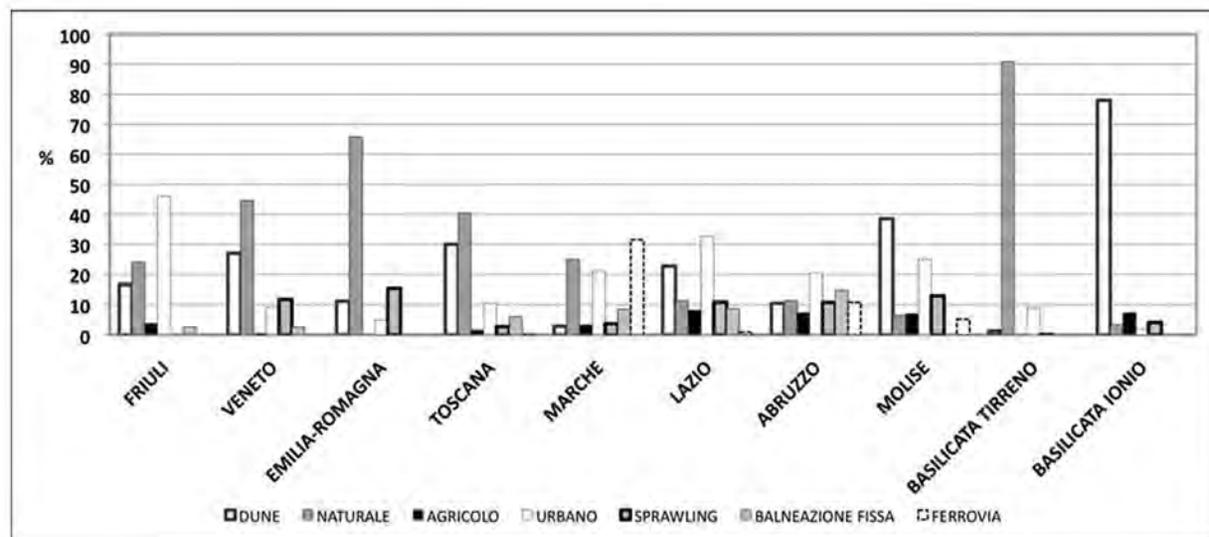


Figura 1 - Uso del territorio costiero: percentuale rapportata alla lunghezza delle rispettive coste regionali.

Le attività agricole costiere sono in genere poco presenti, con percentuali tra il 3% (Friuli e Marche) e l'8% circa (Lazio, Abruzzo, Molise e Basilicata); talora sono pressoché assenti (Emilia-Romagna, Toscana, Veneto).

La presenza di dune è ancora una componente morfologica rilevante, con percentuali di presenza variabili tra il 10% e il 78% laddove la conformazione geomorfologica del litorale la rende verosimile; fa eccezione la Regione Marche (2,9%). Una parte consistente del territorio costiero esaminato è ancora "naturale": per esigenze di analisi questa categoria associa le classi di uso Spiaggia, Pineta, Foce, Laguna, Costa alta non edificata.

Dalla sovrapposizione di questa categoria con la presenza delle dune risulta che nelle regioni esaminate la disponibilità di litorale libero da usi vincolanti a fini antropici è ancora notevole: tra l'80 e il 90% in Basilicata (Ionica e Tirrenica), supera il 70% in Veneto, Emilia-Romagna e Toscana, risulta essere oltre il 40% in Molise e Friuli e tra il 20 ed il 30% in Abruzzo e Marche.

E' interessante notare come nelle regioni che si affacciano sul Mare Adriatico lo spazio di litorale esaminato sia caratterizzato costantemente dalla presenza dell'infrastruttura ferroviaria (Linea Adriatica) con percentuali sino al 30% in Molise, Abruzzo e Marche. E' anche singolare rilevare che spesso (ad eccezione della Regione Marche) le dune costiere siano confinate tra il mare e la rete ferroviaria la cui presenza, limitando la fruizione della spiaggia e la qualità di un potenziale sviluppo urbano, ha in qualche modo sinora preservato questi apparati, pur isolandoli dal contesto retrostante (Fig. 2).



Figura 2 - Dune a ridosso della ferrovia Adriatica in un tratto di costa molisana in erosione e compreso in area SIC.

E' da rilevare però che negli ultimi anni l'accentuarsi dei processi di arretramento e il conseguente restringimento delle spiagge emerse ha compromesso questa azione di difesa, anzi, l'asse ferroviario ora si pone come elemento di irrigidimento del sistema spiaggia-dune e mette a rischio la sopravvivenza di questi ambienti costieri.

Frammentazione e pianificazione sostenibile

Un altro elemento rilevante per valutare la fattibilità di azioni di adattamento è la frammentazione spaziale dell'utilizzo del territorio.

Da tempo il concetto di frammentazione geografica, nato nell'ambito ecologico (Forman et al., 1997; Battisti e Romano, 2007), viene riconosciuto come elemento chiave della pianificazione sostenibile in senso più ampio ed è stata proposta la sua introduzione nei piani locali (Paolinelli, 2003, 2005).

La frammentazione geografica di elementi del paesaggio costiero non è quindi solo una condizione di limite alla connettività geografica su basi ecologico-naturalistiche, ma esprime anche la potenzialità di preservare le specificità di un ambiente complesso (quale è quello costiero) riferite alle sue peculiarità e fragilità morfologiche, socio economiche, culturali ed ecologiche.

La misura della frammentazione dell'uso del territorio a livello regionale è stata pertanto analizzata e utilizzata in questo studio come elemento valutativo della predisposizione di un determinato ambito territoriale ad attuare scelte di pianificazione sostenibile, su scala vasta, nel territorio costiero. Per trasformare l'idea teorica di valutazione della frammentazione spaziale in uno strumento di misura e di monitoraggio, la frammentazione è stata espressa attraverso un Indice di Frammentazione Spaziale (IFS), che esprime la frammentazione sul litorale di tratti omogenei per ciascuna classe di uso del territorio. Questo indice è costituito da un numero adimensionale dato dal rapporto tra la media della lunghezza di tutti i singoli tratti di una determinata classe di uso del suolo e la lunghezza totale della costa della regione di pertinenza (Fig.3). In questo modo, al crescere del valore dell'indice, cresce la frammentazione spaziale.

Anche se la dimensione della particella di uso del suolo assume di per sé un significato proprio in termini di suo potenziale uso e gestione integrata, si è ritenuto utile affrontare prioritariamente il tema in modo più generale, privilegiando criteri di comparabilità a quelli di dettaglio: l'integrazione di questi consentirà poi di passare dall'analisi e monitoraggio di uno stato alla formulazione di proposte di pianificazione.

L'applicazione dell'Indice di Frammentazione Spaziale nelle aree litorali delle regioni indagate ha evidenziato condizioni di continuità degli ambienti naturali e antropici molto variegata. I valori risultanti sono infatti molto variabili (da valori di circa 500 sino a valori inferiori a 20), e questa variabilità è presente nell'insieme generale, nelle singole categorie e nelle singole regioni, ad eccezione della Regione Molise in cui i valori dell'indice per tutte le classi di uso del territorio esaminate si attestano tra 20 e 60.

Analizzando in dettaglio la situazione si nota che in Lazio (ed, in misura minore, anche in Abruzzo, Toscana e Marche) si rileva una generalizzata frammentazione degli utilizzi del territorio litorale; al contrario in Friuli, Emilia Romagna, Molise e Basilicata (ionica e tirrenica) i valori indicano una minore, generalizzata, frammentazione.

Seppure in generale non si evidenzino relazioni dirette tra la presenza percentuale di utilizzo del territorio costiero e la relativa frammentazione, esse talora si manifestano, come nel caso delle dune nelle regioni Marche e Abruzzo, i cui valori massimi di frammentazione si osservano laddove la presenza percentuale di queste morfologie costiere risulta inferiore, a differenza delle altre regioni esaminate (cfr. Fig. 1).

La continuità laterale non denota invece di per sé una presenza diffusa sul territorio litorale di quella classe di uso, come bene evidenzia il confronto tra le dune nelle regioni Basilicata ionica ed Emilia-Romagna: in entrambe, le dune costiere risultano avere una elevata continuità laterale. In un caso però sono ancora diffusamente presenti nell'intero tratto di litorale considerato (Basilicata), nell'altro caso sono ormai presenti solo in ambiti confinati del territorio litorale regionale (Emilia-Romagna).

E' evidente però che valori di frammentazione elevata in ambienti dunari, come anche in quelli più genericamente non antropizzati ("naturale"), coincidono con una maggiore fragilità di questi ambienti rispetto alle esigenze di sviluppo locale dei litorali. Questa condizione si rileva soprattutto nelle Marche (ed in misura minore

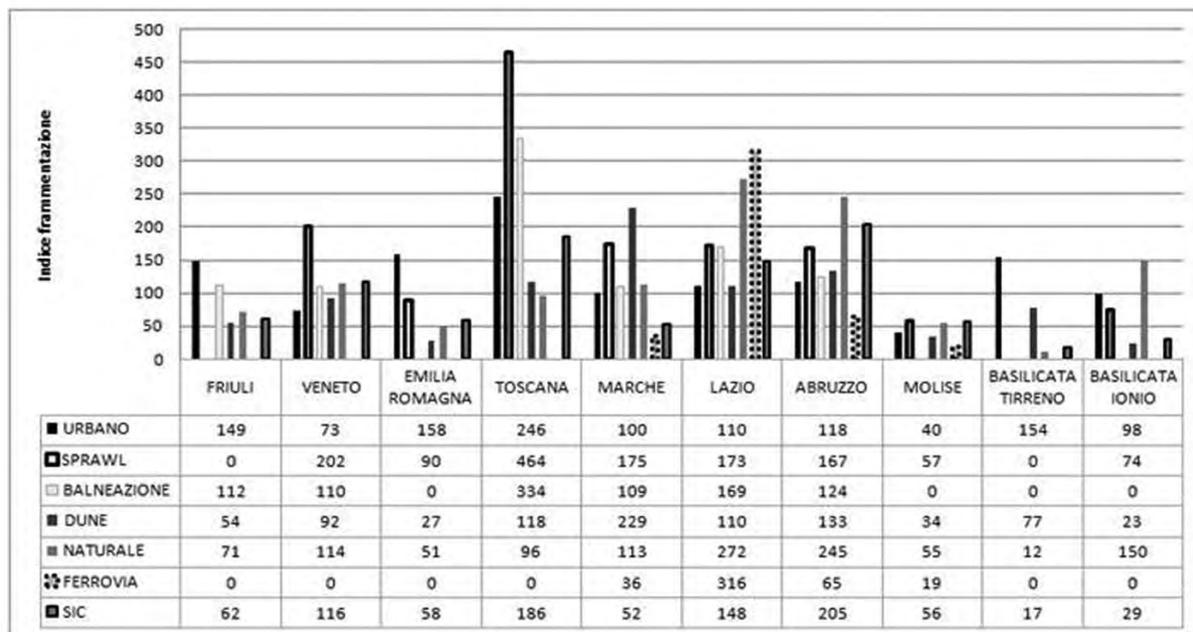


Figura 3 - Indice di Frammentazione Spaziale applicato alle principali classi di uso del territorio ed alle aree SIC nelle diverse regioni.

in Toscana, Lazio ed Abruzzo) per gli ambienti dunari e in Lazio, Abruzzo e Basilicata ionica (ed in misura minore in Veneto, Marche, Basilicata ionica) per gli ambienti non antropizzati.

I valori di frammentazione degli insediamenti urbani sono estremamente variabili (con valori massimi in Toscana) ma bene evidenziano una tendenza generalizzata ad essere inglobati nei centri urbani: la minore frammentazione degli insediamenti urbani esterni evidenzia un processo di progressiva fusione con i centri urbani. La maggiore frammentazione della categoria sprawling urbano si rileva dove la presenza percentuale di queste forme di consumo del territorio è più bassa, come ad esempio in Toscana (cfr. Fig. 1).

Anche la presenza delle linee ferroviarie e delle aree SIC sono state stimate in termini di continuità litorale, al fine di fornire elementi quantitativi a riflessioni sulla pianificazione di questi territori costieri.

I tracciati ferroviari presenti nei primi 100 metri di territorio litorale (nelle Marche, Molise ed in Abruzzo) hanno una elevata continuità spaziale ed anche percentuali di presenza rilevanti rispetto alla lunghezza dei litorali stessi (cfr. Fig. 1). Le aree SIC risultano fortemente frazionate in Veneto, Toscana, Lazio ed Abruzzo mentre hanno una elevata continuità laterale laddove coincidono con morfologie di costa alta (Basilicata tirrenica e Marche) oppure dove la loro percentuale di presenza sul litorale regionale è molto elevata (Basilicata, Molise) con percentuali superiori al 70% (Tab. 1).

Uso del territorio costiero, protezione ambientale e morfologia

L'ambito costiero è una naturale sede di conflitti che si possono ricondurre alla protezione ed allo sviluppo; queste due tendenze sono spesso percepite come inconciliabili. La protezione è infatti quasi sempre sinonimo di impedimento di fruizione e, in un paese con circa 8000 km di costa con peculiarità ambientali, geologiche e culturali diffusamente presenti, questo fatto rende spesso più problematico rispettare i dettami di protezione ribadita dalla legislazione europea (Direttiva Europea n.42 del 1992) e sancite da quella nazionale (D.P.R. n. 357/1997) anche prima che esse vengano trasformate in Zone di Protezione Speciale (ZPS).

Ciò avviene in particolare per i Siti di Importanza Comunitaria (SIC) facenti parte della Rete Natura 2000, che rappresentano ambiti ad alta valenza ecologica e naturalistica per cui la normativa nazionale e comunitaria pone vincoli di intervento, ma che possono essere soggetti ad utilizzo previa valutazione di incidenza (VI) di competenza regionale.

Nel presente lavoro si è ritenuto quindi interessante ragionare non solo sulla distribuzione spaziale dei SIC nella

Tabella 1 - Presenza percentuale di aree SIC nei territori litorali delle regioni considerate; percentuali di utilizzo del territorio litorale discriminate in base alla loro inclusione (o esclusione) nelle aree SIC.

Regione	SIC	Urbano		Sprawl		Balneazione		Naturale		Dune		Agricolo		Ferrovia	
		N SIC	SIC	N SIC	SIC	N SIC	SIC	N SIC	SIC	N SIC	SIC	N SIC	SIC	N SIC	SIC
E-Romagna	32,7	5		14,5	1			46,2	31,2	5,2	6				
Toscana	31,3	15,7	0,1	2,7	0,1	5,9	0,03	39,8	30,6	17,7	12,3	1,6			0,2
Marche	17,3	20,5	0,5	4,6		10		3,4	15,6	1,7	0,9	4,2		29,1	1,1
Abruzzo	13	20,2	0,1	10,1	0,7	15		7,2	4,2	7,3	3,2	5	2,4	9,7	1,1
Molise	73,7	9,5	15,5	1	4,6			4,6	32	0	38,5	0	7		5,2
Basilicata I.	70	2		2,6	1,5			0	3,4	13	65	2,9	4,4		
Basilicata T.	90	4,3	5,7		0,1			6,9	84,5	1,3					
Veneto	31,7	9,5		9,6	1,7	2,6		35,6	8,9	7	20	0,5			
Friuli	33,6	43	0,3			2,7		8,3	15,7	0,8	15,9	2,7	1,1		
Lazio	25	30,8	1,9	9,3	1,6	7,47	1,4	9,7	1,7	6,8	15,9	6,3	1,9		0,9

fascia litoranea e sulla loro frammentazione spaziale, ma anche verificare il loro utilizzo reale alla data dei riferimenti cartografici utilizzati (2006). Questo approccio integrato ha permesso di rilevare, ad esempio, una certa correlazione tra la percentuale di presenza delle aree SIC nei litorali ed “il rispetto” dei vincoli di limitazione del loro uso come previsto dalla normativa. Questo esprime anche una differente sensibilità ai temi della sostenibilità ambientale da parte delle diverse autonomie locali.

La percentuale di SIC all'interno della fascia di litorale considerata varia dal 13% ad oltre il 70% con una media del 42% (cfr. Tab. 1).

Considerando i vincoli che la legislazione impone per queste aree, è abbastanza evidente che esistano dei conflitti di utilizzo maggiori laddove le proporzioni di aree SIC sul litorale regionale sono più elevate. Dall'analisi dell'effettivo utilizzo in queste aree risulta che in alcune realtà non si è probabilmente ancora riusciti ad ottimizzare il rapporto tra le esigenze di tutela e le aspettative di fruizione sociale ed economica; non a caso, infatti, le percentuali di presenza regionale di aree a vincolo SIC sono circa il 30% in tutte le regioni esaminate, con una consuetudine maggiore e una prassi consolidata di gestione integrata del territorio costiero dove si nota (cfr. Tab.1) un rispetto al vincolo di urbanizzazione pressoché generalizzato. Diverso avviene nel resto del campione dove addirittura l'urbanizzazione principale si trova in parte significativa all'interno di queste aree a vincolo: 15% in Molise e circa il 6% in Basilicata tirrenica.

Le attività agricole sono spesso presenti in area SIC (sino al 7% in Molise): questo di per sé non è impraticabile, ma evidentemente richiede che vi siano, ad esempio, vincoli sul tipo di produzione.

Emilia-Romagna, Veneto, Lazio, Basilicata ed Abruzzo evidenziano percentuali di *sprawling* tra l'1% ed il 2% non rilevanti di per sé, ma significative se indicatori di una tendenza in atto. Un caso a parte evidenzia il Lazio in cui, anche a fronte di una percentuale “ottimale” di rapporto tra litorale vincolato e non, presenta percentuali non insignificanti di utilizzo delle aree SIC del proprio litorale, sia per urbanizzazione primaria (circa il 2%), *sprawling* e presenza di stabilimenti balneari (3% complessivo).

La Tabella 2 evidenzia le relazioni tra uso del territorio costiero in esame e morfologia delle coste, discriminate tra coste basse (L) e coste alte (H). Anche la presenza delle aree SIC è stata considerata in questa analisi.

Nella metà delle regioni considerate, l'intero territorio litorale si sviluppa con costa bassa per lo più sabbiosa (in Emilia-Romagna, Basilicata, Veneto e *de facto* anche in Molise).

Le aree SIC risultano, proporzionalmente alla disponibilità regionale di costa bassa, maggiormente presenti nei litorali con questa caratteristica morfologica. Nei casi esaminati, la condizione di naturalezza delle coste alte, intesa come assenza di antropizzazione insediativa, è invece proporzionalmente molto più elevata di quella delle coste basse, tranne che in Abruzzo.

Tabella 2 - La distribuzione dell'uso del suolo e delle aree SIC nei litorali regionali in base alla morfologia della costa (H= costa alta; L= costa bassa).

Regione	Tipo Costa %		SIC %		Urbano %		Naturale %		Ferrovia %	
	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L
E- Romagna		100		32,7		5		77,4		
Toscana	55	45	15,3	16	5,3	10,6	18,6	51,8	0,2	
Marche	16,3	83,7	12,4	4,9	21		13,8	5,2		30,2
Abruzzo	20,8	79,2	2,2	10,8	1,6	18,7	1,1	10,3	1,1	9,9
Molise	1	99		73,7	1	25		36,6		5,2
Basilicata I.		100		80		2		3,4		
Basilicata T.	98,4	1,6	100		8,9	0,1	89,5			
Lazio	2,9	97,1	2,9	22,1	1,5	55,7	1,4	10	0	0,9
Veneto		100		31,7		9,5		44,5		
Friuli	15,5	84,5	3,4	30,2	6	37,3	9,5	14,5		

La presenza di insediamenti antropici interessa in modo indifferenziato le coste basse e le coste alte, anche dove nell'ambito regionale sono presenti entrambe le tipologie di costa. In questo caso però le percentuali di utilizzo a scopo insediativo delle coste basse risultano superiori di un fattore variabile tra 2 e 2,5 (in Emilia-Romagna e Friuli) e sino a 6 volte (in Abruzzo) rispetto alla presenza relativa delle due morfologie di costa nelle singole realtà regionali.

Potenziale capacità di attuare l'adattamento nel territorio costiero

Il Protocollo di Madrid per l'ICZM nel Mediterraneo, sottoscritto anche dall'Italia nel Gennaio 2008, indica all'articolo 5 la "non ulteriore edificabilità" per la striscia di litorale compresa entro 100 metri da riva (fatto salvo specifici casi), ed individua rigide prescrizioni per lo sviluppo del territorio compreso tra 1 e 10 km da riva.

Con l'obiettivo di valutare su basi oggettive la potenzialità di attuare diverse opzioni di adattamento ed di applicare l'articolo 5 del Protocollo ICZM nelle nostre aree litorali, si è voluto mettere a punto ed applicare un criterio multiparametrico di valutazione di prerequisiti, utilizzabile come riferimento per un successivo monitoraggio delle tendenze ed applicabile sull'intero territorio nazionale o su ambiti geografici specifici.

La potenzialità di attuare forme di adattamento al rischio nelle aree costiere dipende da una complessa serie di fattori di diversa natura, di cui solo in minima parte si è entrati nel merito in questo studio. A ciò si è inteso ovviare facendo riferimento ad indicatori significativi di questa complessa interazione tra processi di pianificazione, elementi fisiografici intrinseci, pressione socioeconomica, peculiarità geografiche e storiche, elementi culturali e politici. Sono stati considerati tre indicatori:

- la disponibilità di territorio libero da usi antropici e quindi da evidenti vincoli di natura economica: espresso in base alla percentuale presente sui territori regionale entro 100 metri da costa (Fig. 4);
- la frammentazione delle aree naturali espressa dall'Indice di Frammentazione Spaziale della classe di uso composita "Naturale";
- la frammentazione delle aree classificate come dune costiere espressa dall'Indice di Frammentazione Spaziale della classe "Dune".

L'ipotesi a cui si fa riferimento è che questi elementi siano in grado di condizionare la fattibilità di quelle pratiche di adattamento meno usuali in quanto prevedono interventi compositi che dovranno invece in futuro sempre più essere valutate tra le azioni possibili; queste azioni infatti, non limitandosi alla difesa in loco dei beni, richiedono non solo condizioni di accettazione e condivisione culturale, ma anche alcuni presupposti sostanziali tra cui la possibilità di fruire liberamente di territorio costiero per lo spostamento nell'entroterra di difese,

l'inserimento o ampliamento di aree di transizione, il cambiamento di uso del territorio.

Il confronto tra i valori dei tre indicatori si basa su una classificazione che applica criteri qualitativi e quantitativi, e che esprime la potenzialità complessiva di adattamento di un territorio in base a valutazioni di distribuzione e di frequenza dei valori derivati dall'indagine, nonché di elementi oggettivi rispetto alla presenza/assenza delle condizioni ritenute ottimali per attuare pratiche di adattamento al rischio costiero (Tab. 3).

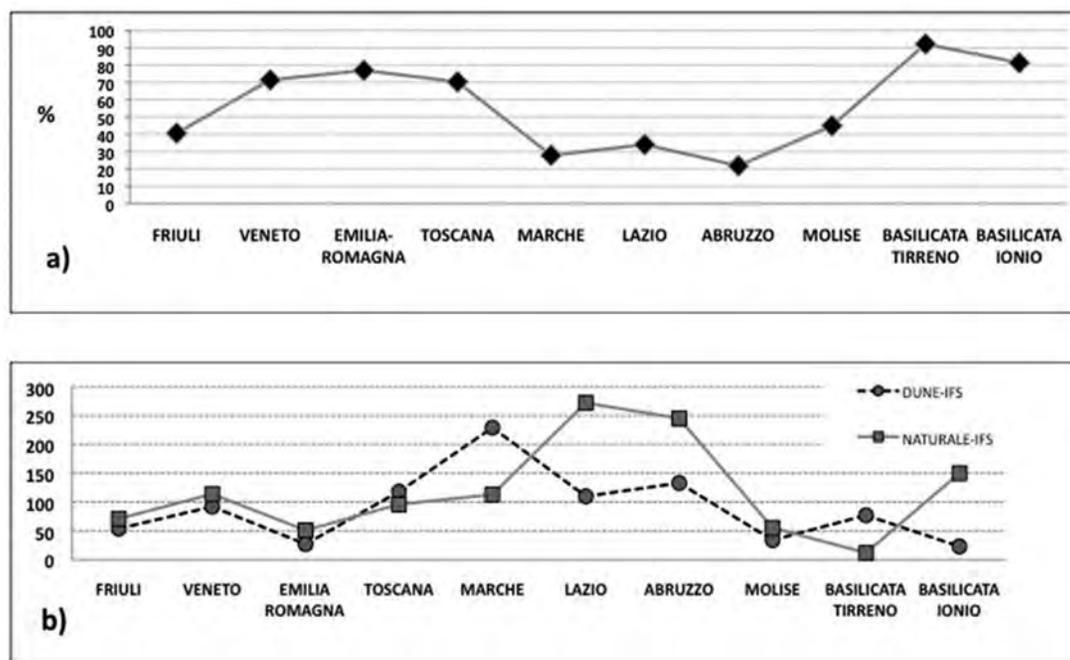


Figura 4 - I valori degli indicatori della capacità potenziale alle pratiche di adattamento in area costiera: la disponibilità di territorio "libero" da usi antropici (a); la frammentazione delle zone naturali e delle dune costiere (b).

Ne risulta un quadro generale abbastanza consistente (Tab. 4), anche se analizzato il risultato in dettaglio è evidente che la classificazione rileva una buona potenzialità virtuale di praticare i concetti dell'adattamento, soprattutto in relazione ad una diffusa medio-alta disponibilità di territorio libero.

L'analisi in dettaglio individua, pertanto, delle condizioni vincolanti su cui potrebbe essere più utile intervenire: laddove la disponibilità di territorio libero risulta ormai molto ridotta (Marche ed Abruzzo), sono più urgenti politiche di deframmentazione costiera in termini di uso del territorio e di pianificazione, ma certamente cambiamenti di politiche di sviluppo del litorale saranno più problematici che in altre condizioni. La piena applicazione della Direttiva sull'ICZM (EEA, 2006), ad oggi in Italia pienamente applicata solo nella regione Emilia-Romagna, è un obiettivo fondamentale da raggiungere, a fronte della necessità di disporre, anche nel nostro paese, di strumenti e metodi di gestione che consentano una reale capacità di scelte e prospettive di sviluppo, al cui raggiungimento possono contribuire le pratiche di ICZM.

Tabella 3 - Criteri usati per valutare la capacità potenziale alle pratiche di adattamento.

Capacità potenziale	Territorio libero	IFS "Naturale"	IFS "dune costiere"
Molto bassa (LL)	< 20%	>150	>150
Bassa(L)	20%-30%	100-150	100-150
Media (M)	30%-50%	50-100	50-100
Alta(H)	50% - 70%	20-50	20-50
Molto alta (HH)	>70%	<20	<20

Tabella 4 - Capacità potenziale alle pratiche di adattamento.

Regione	Potenziale dovuto alla disponibilità territorio libero	Potenziale dovuto alla frammentazione delle zone naturali	Potenziale dovuto alla frammentazione delle aree dunari	Capacità potenziale complessiva
Toscana	H	M	M	M
E-Romagna	HH	H	H	H
Marche	L	L	LL	L
Abruzzo	L	LL	L	L
Molise	M	M	H	M
Basilicata I.	HH	L	H	H
Basilicata T.	HH	HH	M	H
Lazio	M	LL	L	L
Friuli	M	M	M	M
Veneto	H	L	M	M

Conclusioni

I risultati evidenziano una differenziata capacità locale di gestione dei conflitti sul territorio costiero, e mettono in evidenza che la zona costiera in Italia ha rigidi confini di tipo amministrativo, queo invece sarebbero auspicabili dei vincoli derivanti solo dal principio di reciprocità e continuità territoriale, sia verso l'entroterra, sia lungo costa, tenendo conto rispettivamente dei limiti di bacino e delle unità fisiografiche.

Ciò evidenzia il limite di un approccio totalmente volontaristico nella gestione del territorio, che ha caratterizzato la legislazione italiana nel settore della pianificazione del territorio e della gestione del rischio, in particolare costiero.

Una sistematicità nazionale è invece necessaria per poter affrontare gli scenari di rischio che si prefigurano e contenere i costi relativi alla gestione della sicurezza da questi derivanti, come bene individuano i risultati del progetto Europeo PESETA (Ciscar et al., 2009): si tratta quindi di immaginare percorsi nuovi, non centralizzati e non sostitutivi del complesso sistema di concertazione vigente (come quanto avviene attraverso la Conferenza Unificata Stato e Regioni), ma funzionali al coinvolgimento generale e reale degli enti territoriali (almeno regionali) su temi inerenti la gestione integrata del rischio nel territorio costiero.

Potrebbe essere interessante sperimentare la fattibilità del modello *capacity building* applicato al sistema italiano regionale. Si tratterebbe di avviare dei progetti nazionali finalizzati ad obiettivi strategici che coinvolgano i settori di competenza dei governi locali, ed in cui le amministrazioni che di volta in volta esprimono le maggiori capacità ed esperienza assumano il ruolo di capofila di progetto (modello "bottom to bottom").

L'indagine ha evidenziato l'urgenza di gestire condizioni molto diverse di potenzialità di attuare forme di pianificazione strategica in ambito costiero, e un suo futuro sviluppo multi temporale potrebbe rendere ancora più evidente l'urgenza di gestire nel modo migliore possibile il territorio, nonché di creare delle condizioni e degli strumenti di ottimizzazione di gestione integrata ed innovativa nelle aree in cui le condizioni sono già critiche. La pressione sulle coste nazionali continuerà ad aumentare nel prossimo decennio (Blue Plan, 2008) e la capacità di gestione del problema sul territorio nazionale sarà sempre meno adeguata, se perdureranno le attuali limitate capacità di condivisione delle esperienze innovative sviluppate negli ambiti della ricerca europea, unite ad una scarsa sensibilità nazionale alla condivisione e scambio di conoscenza applicata, ed infine allo scarso interesse politico al finanziamento di programmi nazionali di produzione dati e supporto alla pianificazione strategica nazionale.

La produzione di conoscenza (completa ed omogenea a scala nazionale) correlata ai temi del rischio costiero in Italia è veramente molto scarsa: dopo l'Atlante Nazionale delle Coste (AA.VV., 1997) i cui dati e rilievi

sono aggiornati sino al 1981 e che, seppure precedente all'epoca delle banche dati geografiche, fu un progetto caposcuola in Europa, la realizzazione dell'Atlante GIS Nazionale Dune Costiere (Progetto COFIN 2002 "I depositi eolici delle spiagge italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-dune") è stato l'unico successivo studio in Italia condotto su scala nazionale che abbia interessato il rischio di erosione o temi a questo concernenti, producendo inoltre una banca dati geografica comune conforme alle specifiche del programma INSPIRE per sistema di riferimento e meta-informazione. È rilevante ricordare che questa iniziativa è stata concepita dal gruppo di coordinamento (non a caso lo stesso dell'Atlante Nazionale delle Coste redatto negli anni '80) come risultato aggiuntivo di un progetto avente altri obiettivi e finalità principali. Allo stesso modo, indipendentemente da una strategia nazionale di produzione regolare e finalizzata di conoscenza, sono state realizzate dal mondo accademico italiano le principali iniziative di costruire, ex-post, un quadro nazionale di conoscenza tematica sul rischio nelle aree costiere italiane: ne sono rilevanti esempi le mappe del rischio dei litorali (D'Alessero, La Monica, 1999; APAT, 2007) e la raccolta di elaborati sullo stato dei litorali italiani (GNRAC, 2006). Questa stessa ricerca nasce sugli stessi presupposti.

La produzione di dati per temi strategici nazionali come il rischio costiero viene invece realizzata con sistematicità e finalizzazione in moltissimi paesi nel mondo e quasi in tutti i paesi europei. Con questa ricerca ci auguriamo di portare un contributo per accrescere la consapevolezza dell'importanza e della fattibilità di questo tipo di approccio anche in Italia.

Bibliografia

- AAVV (1997) - *Atlante delle spiagge Italiane*. SELCA, Firenze.
- Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici-APAT (2005) - *La realizzazione in Italia del progetto europeo CORINE Le Cover 2000*. APAT, Report n. 36/2005, Roma.
- APAT (2007) - *Annuario Dati ambientali 2007- Cap.5- Rischio Ambientale*. APAT, Roma, pp. 170-201.
- Battisti C., Romano B. (2007) - *Frammentazione e connettività: dall'analisi ecologica alla pianificazione ambientale*. Pp. 465, Città Studi Ed., Milano.
- Caravita B. (2010) - *The Italian challenge between federalism e subsidiarity*. In: www.federalismi.it, n.5/2010.
- Carraro C., Crimi J, Sgobbi A (2009) - *La valutazione economica degli impatti dei cambiamenti climatici in Italia e delle relative misure di adattamento*. In: "Cambiamenti climatici e strategie di adattamento in Italia. Una valutazione economica", Ed. Il Mulino, Bologna, 13-87.
- Cecchetti M. (2002) - *Riforma del Titolo V della Costituzione e sistema delle fonti: Problemi e prospettive nella materia "tutela dell'ambiente e dell'ecosistema"*. Diritto e gestione dell'ambiente, Napoli, Jovene.
- Ciscar J.C., Soria A, Iglesias A., Garrote L., Pye S., Horrocks L., Watkis P., Nicholls R., Roson R., Bosello F., Feyen L., Dankers R., Moreno A., Amelung B., Labeaga J. M., Labeceira X., Christensen O. B., Goodess C. e Van Regemorter D. (2009) - *Effects of climate change in Europe: Results from the PESETA study*. IOP Conf. Series: Earth e Environmental Science, 6, IOP Publishing Ltd, London.
- Committee on Strategic Directions for the Geographical Sciences in the Next Decade; National Research Council (2010) - *Understeering the Changing Planet: Strategic Directions for the Geographical Sciences*. 220 pp., The National Academy Press, Washington DC.
- D'Alessero L., La Monica G.B. (1999) - *Rischio per erosione dei litorali italiani*, in: "Il rischio idrogeologico e la difesa del suolo". Atti dei Convegni Lincei, 154, Accademia Nazionale Lincei, pp. 251-256.
- Defra (2001) - *Shoreline Management Plans*. Department for Environment, Food e Rural Affairs, London.
- Environment European Agency (2006) - *The changing faces of Europe's coastal areas*. EEA Report No 6/2006 EEA, Copenhagen, 2006.
- Forman, R. T. T., A. M. Hersperger (1997) - *Ecologia del paesaggio e pianificazione: una potente combinazione*. Urbanistica 108: 61-66.
- Gilbert, J.T.E., Vellinga, P. (1990) - *Strategies for adaptation to Sea Level Rise*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Response Strategies Working Group (III).

- Glantz M.H. (2007) - *Lost in translation: Society's adaptation" to climate change*. In: www.fragileecologies.com, 01/07.
- Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'ambiente Costiero (GNRAC) (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. Studi Costieri, 10: 174 pp., Firenze.
- Paolinelli G. (2003) - *La frammentazione del paesaggio periurbano - Criteri progettuali per la riqualificazione della piana di Firenze*. Firenze University Press, Firenze.
- Paolinelli G. (2005) - *L.O.T.O. Lescape Opportunities for Territorial Organization Frammentazione paesistica: permanenze e interferenze* - Anno 3, 3: gennaio-giugno 2005.
- Plan Bleu (2008) - *Climate Change e Energy in the Mediterranean*. Regional Activity Center, Sophia, Antipolis.
- Richards J. A., Nicholls R.J. (2009) - *Impacts of climate change in coastal systems in Europe. PESETA- Coastal Systems study*. Office for Official Publications of the European Communities, EUR – Scientific e Technical Research series, Luxembourg.
- Valpreda E., Corsini S. (2008) - *Climate changes adaptation in coastal zone: preparedness in Italy e Europe*. Proceedings of 9th International Conference Littoral 2008, 25-28 Novembre, Venezia.
- Wittgenstain L. (1922) - *Tractatus Logicus Philosophicus*. Routledge e Kegan Paul Eds., London.
- http://www.federalismi.it/ApplyOpenFilePDF.cfm?dpath=document\editoriale&dfile=The+italian+challenge+between.pdf&content=The+italian+challenge+between+federalism+e+subsidiarity&content_auth=Beniamino+Caravita
- Wittgenstain L <http://www.kfs.org/~jonathan/witt/tlph.html>

Ricevuto il 15/04/2010, accettato il 20/05/2010.

Le attività di gestione nelle Riserve Naturali dello Stato nell'area di foce Bevano (Ravenna)

Giovanni Nobili

Corpo Forestale dello Stato - Ufficio territoriale per la Biodiversità di Punta Marina (RA)

Riassunto

Vengono illustrati i criteri gestionali delle Riserve Naturali dello Stato nella fascia litoranea dal Lido di Dante al Lido di Classe (Ravenna). Sono illustrati i recenti interventi realizzati nella pineta a prevalenza di pino marittimo nell'ambito del Progetto LIFE Natura "Tutela di siti Natura 2000 gestiti dal Corpo Forestale dello Stato" (LIFE04NAT/IT/000190) ed il ripristino della vegetazione dunale nell'ambito del sottoprogetto POSIDUNE dell'OCR INTERREG III C BEACHMED-e, in collaborazione con l'Università di Bologna. Viene illustrata la recente regolamentazione delle modalità di accesso turistico alle Riserve.

Parole chiave: pineta costiera, vegetazione dune, modalità fruizione turistica.

Abstract

Management criteria for the public coastal pine forests near the mouth of Bevano torrent (Emilia-Romagna Region - Ravenna - Italy) are reported in the present study.

New actions were introduced by the National Forest Corps during a LIFE-Natura Project (LIFE04NAT/IT/000190) for the conservation of the coastal areas designed as "Natural Reserves of the State". To enhance the complexity of forest ecosystem, characterised by a prevalence of maritime pine, new operations were applied.

Moreover, according to the UE subproject POSIDUNE of OCR INTERREG IIIC Beachmed-e, new approaches for the restoration of the sand dune vegetation were performed in collaboration with University of Bologna.

New rules and management of tourist access to the natural areas are proposed and illustrated, as they were chosen with the main goal of protecting and promoting conservation of the natural site.

Keywords: *maritime pine, tourist access, sand dune vegetation.*

Introduzione

Il comprensorio naturale situato lungo il litorale di Ravenna tra le località di Lido di Dante e di Lido di Classe (Fig. 1) è tutelato dalla Riserva Naturale dello Stato "Duna costiera ravennate e foce del torrente Bevano" con una superficie di circa 60 Ha (istituita con D.M. 5 giugno 1979) e dalla retrostante pineta litoranea demaniale, per ulteriori 173 Ha circa, costituita dalle sezioni "Ramazzotti" (a nord della foce del Bevano) e "Savio" (a sud della foce) della R.N. "Pineta di Ravenna" (D.M. 13 luglio 1977).

La gestione è affidata al Corpo Forestale dello Stato ai sensi della L. 6 dicembre 1991 n. 394 per il tramite dell'Ufficio territoriale per la Biodiversità di Punta Marina (RA).

presenta circa il 20% della superficie del SIC e della ZPS “Ortazzo, Ortazzino e foce del torrente Bevano”.

Tra le diverse tipologie forestali rappresentate nelle pinete costiere ravennati, la porzione a nord del Bevano è caratterizzata essenzialmente da una pineta di tipo xerofilo, tipica delle sommità dunali. Si tratta di pinete relativamente aperte, che occupano le dune più recenti, sia pure consolidate ma spesso vicine al litorale, o dune antiche non livellate, anche nelle zone più interne. Oltre al pino marittimo e domestico, sono presenti talvolta il leccio e l’orniello in maniera meno costante. Nello strato arbustivo è abbondante la fillirea, in misura minore anche rovo, ginepro e leccio, l’erbaceo è quasi sempre povero di specie.



Figura 2 - Anni '30 del secolo scorso, giovane rimboscimento (Archivio C.F.S. - U.T.B. di Punta Marina).

Inclusa nella precedente tipologia si rileva la pineta delle depressioni umide. Si tratta di inclusi nella pineta caratterizzati dalla presenza di specie igrofile (pioppo o frassino ossifillo), dove il pino può essere denso (bassure di limitata estensione) o rado fino ad assente (bassure più estese e profonde, con presenza di acqua temporanea). Occupa le depressioni delle antiche dune e gli argini dei canali. Ai bordi di queste piccole zone umide, in maniera più o meno abbondante, sono sviluppati arbusti (rovo, fillirea, ginepro), mentre la parte centrale può essere occupata da specie igrofile (erianto, giunchi). Quest’ultima tipologia di pineta è presente sia a nord che a sud del Bevano.

Dal punto di vista prettamente naturalistico gli habitat di maggior pregio e rarità sono tuttavia presenti tra il mare e la pineta e presso la foce del Bevano. Sono rappresentati habitat di ambienti dunosi, codice Natura 2000: 1210, 2110, 2130 (habitat prioritario), 2160, 2270 (habitat prioritario); ambienti alofili: 1150 (habitat prioritario), 1310, 1320, 1410, 1420. In particolare si evidenzia la presenza di praterie e fruticeti alofili mediterranei e termo-atlantici (*Salicornietea fruticosae*) (codice 1420), che, come risulta dall’appendice “Carta degli Habitat dei Sic e delle ZPS dell’Emilia Romagna”, pubblicata con Determinazione regionale n. 12584 del 2 ottobre 2007, rappresenta l’ambiente tipico per la nidificazione di molte specie di uccelli. Importante inoltre la presenza di dune embrionali mobili (codice 2110).

Azioni intraprese

L’opportunità di operare a livello territoriale venne evidenziata dal Piano d’azione per la conservazione della Natura del Delta del Po, progetto LIFE di LIPU (Gariboldi et al., 1997) che individua le spiagge e le pinete costiere come elementi di raccordo per favorire le connessioni ecologico funzionali tra aree di elevato valore naturalistico (come il Bosco della Mesola e le pinete storiche ravennati).

Dal punto di vista selvicolturale (Cantiani et al., 2009), sono stati realizzati interventi finalizzati a migliorare la struttura verticale ed orizzontale del popolamento arboreo, considerato che - almeno a tratti - tende a presentare un’eccessiva densità ed uniformità.

In ambienti di pineta ormai matura, una copertura eccessiva può infatti limitare lo sviluppo delle latifoglie e la

presenza di arbusti, mentre interventi mirati di diradamento migliorano la struttura del bosco nonché la stabilità meccanica delle piante. Gli interventi di diradamento possono inoltre sortire effetti positivi nell'innescare processi di rinaturalizzazione per mutamento delle condizioni ecologiche al suolo (luce, umidità ecc.), accrescendo la funzionalità complessiva del sistema.

Per la verifica della migliore tecnica da adottare sono state predisposte apposite aree campione permanenti, per consentire raffronti futuri tra le diverse tipologie di trattamento.

In alcuni casi il diradamento è stato ottenuto tramite cercinatura, limitando in tal modo il rischio di danni dovuti all'abbattimento e rilasciando nel bosco una dotazione di legno morto in piedi, utile per favorire in particolare la presenza di Picidi e/o di altre specie di avifauna favorite dalla presenza di cavità nei tronchi.

Sono stati poi tagliati e/o cercinati circa 200 esemplari di pino silvestre, da considerare specie alloctona, presenti discontinuamente nell'area, allo scopo di limitare la copertura di conifere, lasciando i tronchi in terra come dotazione di legno morto. I tronchi abbattuti e/o caduti vengono sramati (per diminuire il rischio di incendio boschivo) ed abbandonati in loco affinché si decompongano naturalmente. In tal modo i nutrienti tornano nel ciclo di detrito nei tempi necessari affinché si instauri una comunità di organismi in grado di contribuire all'incremento della biodiversità presente. La disponibilità di legno marcescente innalza i livelli di umidità nei microhabitat prossimi al suolo, con effetti positivi considerata l'aridità ambientale dovuta al clima ed al suolo sabbioso. Il legno marcescente lasciato in terra crea nascondigli e rifugi utili a diverse specie di vertebrati (ad esempio il rospo smeraldino) e di invertebrati (molluschi terrestri, artropodi).

La pratica descritta consente altresì di garantire lo smaltimento senza costi di un materiale che altrimenti sarebbe economicamente oneroso allontanare. Nell'attuale fase di mercato, infatti, la vendita di legname di pino difficilmente garantisce introiti tali da coprire i costi della manodopera utilizzata.

Dove la pineta si presenta ancora giovane (piante di altezza di 2 - 4 m) sono stati tagliati ed allontanati i rami bassi ormai secchi. Questa tipologia di intervento favorisce e ad accelera la strutturazione in senso verticale della vegetazione, facendo giungere più luce allo strato arbustivo ed al suolo, con effetti positivi sul sottobosco e sull'erpetofauna (Fig. 3).

Le ramaglie così ottenute vengono accatastate lungo la viabilità esistente (oppure in aree libere da vegetazione) e successivamente sminuzzate mediante mezzi meccanici (trinciasarmenti). In tal modo viene garantita la conservazione in loco della sostanza organica che resta distribuita al suolo.

Interventi di sfollo sono stati condotti dove la pineta è stata di recente percorsa da incendi ed il pino marittimo presenta una rinnovazione naturale sovrabbondante (Fig. 4).



Figura 3 - Intervento di spalcatura in un tratto di pineta ancora giovane per favorire la strutturazione verticale della vegetazione.



Figura 4 - Sfollo in area recentemente percorsa da incendio, con rinnovazione sovrabbondante di pino marittimo.

I tratti di pineta impiantati nel passato nelle aree di bassura interdunale risentono all'attuale degli effetti della subsidenza che, provocando l'innalzamento della falda, contribuisce al cedimento degli apparati radicali dei pini. In questi casi si è intervenuto liberando dal pino le bassure umide, caratterizzate da una vegetazione di ele-



vato valore naturalistico (Fig. 5). Complessivamente gli interventi appena descritti hanno interessato circa 20 ettari di pineta. Tra gli interventi gestionali volti alla tutela ed alla salvaguardia del sistema dunale e degli habitat di spiaggia, una misura adottata già da diversi anni impedisce la rimozione della legna spiaggiata, che costituisce uno scheletro utile per mitigare gli effetti erosivi dell'azione marina. Evidenti effetti positivi di tale misura sono visibili in particolare nel tratto di spiaggia a sud della foce del Bevano mentre in prossimità del Lido di Dante la spiaggia risente della scarsità di apporto solido. I rifiuti di origine antropica vengono raccolti manualmente ed allontanati su mezzi meccanici. Interventi di ricostituzione della vegetazione degli ambienti di duna sono stati realizzati con le maestranze a disposizione dell'Ufficio territoriale per la Biodiversità di Punta Marina in collaborazione con l'Università di Bologna - Dipartimento di Scienze e tecnologie Agroambientali, nell'ambito del sottoprogetto Comunitario POSIDUNE - INTERREG III C BEACHMED-e.

Figura 5 - Pino rovesciato per effetto dell'innalzamento della falda, sramato e lasciato in sito come dotazione di legno morto.

Gestione del flusso turistico

Come già evidenziato, l'area in prossimità di foce Bevano è costituita da un mosaico di diversi habitat, tutti di particolare pregio naturalistico. Un progressivo stato di degrado è stato evidenziato durante gli ultimi anni con perdita di biodiversità peculiare ed aumento di specie estranee o banali, osservato sia tra le specie vegetali che tra quelle animali. Causa prima di questo degrado è stata senza dubbio una diffusa, intensa e non controllata



presenza antropica (Fig. 6).

Le problematiche di conservazione del sito dagli effetti del disturbo provocato dall'eccessiva presenza umana, in particolare durante il periodo primaverile ed estivo, sono particolarmente critiche. Si tratta infatti di biotopi fortemente specializzati che sono dotati di scarsa capacità di autoriparazione dopo aver subito un danno.

Figura 6 - 1° maggio 2010: frequentazione incontrollata della duna.

Il disturbo esercitato dai turisti, certamente in maniera inconsapevole, negli anni ha però mostrato di rappresentare un fattore non più sostenibile per gli effetti negativi prodotti che vanno ad interferire sulla geomorfologia dei luoghi, sulla vegetazione (per il calpestio delle dune) ma anche sulla componente faunistica di questi delicati ecosistemi costieri.

La presenza umana, difficilmente controllabile specie nei mesi di aprile, maggio, giugno e luglio, da considerarsi sensibili per la nidificazione, provoca il disturbo di specie di interesse naturalistico che per la nidificazione utilizzano il piede delle dune e la spiaggia. Il fratino, specie un tempo frequente nell'area, attualmente è in forte declino (solo 9 coppie censite lungo i 6 km di spiaggia considerata nella primavera del 2010) mentre il turismo balneare impedisce di fatto la presenza di specie che potenzialmente potrebbero occupare questi ambienti come la beccaccia di mare ed il fraticello. La Rete Natura 2000 prevede, in tali situazioni, particolari misure di conservazione. Per fronteggiare questa situazione l'Ufficio territoriale per la Biodiversità di Punta Marina, a partire dal giugno del 2010, ha quindi adottato una regolamentazione delle modalità di accesso alla spiaggia.

Una strategia solamente repressiva (nei Decreti istitutivi è stabilito il divieto assoluto di accesso senza però prevedere alcuna sanzione) non è infatti stata sufficiente né idonea a superare le problematiche appena descritte, essenzialmente per l'elevato numero di presenze e per l'ampiezza e la diffusione del fenomeno.

E' stata invece perseguita una regolamentazione delle modalità di fruizione in linea con le finalità di salvaguardia della normativa vigente (gli stessi Decreti istitutivi, le norme della Rete Natura 2000) e con gli strumenti di pianificazione territoriale locali, in particolare il Piano Territoriale della Stazione "Pineta di Classe e Salina di Cervia" (adottato con deliberazione del Consiglio provinciale n. 11 del 7 marzo 2006) ma anche con le indicazioni del "Piano Faunistico Venatorio della Provincia di Ravenna" e del "Piano dell'arenile" del Comune di Ravenna.

Con la regolamentazione sono state individuate aree specifiche, in accordo con gli Enti locali interessati, dove viene consentito l'utilizzo della spiaggia, così come della pineta, al fine di escludere le restanti porzioni di Riserva dall'accesso incontrollato (Fig. 7).



Figura 7 - Nella carta, in verde, le aree e la viabilità principale della pineta consentite all'accesso.

I tratti di spiaggia dove non è consentita la balneazione sono percorribili a piedi restando entro 4 m dalla battigia. Un'ampia attività di sensibilizzazione è stata svolta direttamente sul posto da parte di personale del Corpo Forestale dello Stato e di volontari (Fig. 8).

La regolamentazione è stata accettata anche se permane in alcuni la percezione che quest'area rimanga una "spiaggia libera", mentre in realtà si tratta di una Riserva Naturale con precise finalità conservazionistiche. In una visione strettamente utilitaristica dell'ambiente naturale, la spiaggia viene vista come un luogo improduttivo e/o di svago, mentre la novità e l'originalità della proposta del Corpo Forestale dello Stato è proprio nella necessità di tutelare questa sottile fascia di sabbia, importante area di transizione tra il mare e l'entroterra ed habitat peculiare di specie che stanno scomparendo da altri siti proprio per la forte presenza dell'uomo.

La proposta del Corpo Forestale dello Stato, a soli alcuni mesi dall'inizio della regolamentazione, è stata accolta e rispettata da migliaia di cittadini che frequentano la spiaggia tra il Lido di Dante ed il Lido di Classe. Diversi sono i segnali di apprezzamento che pervengono dalle Associazioni Ambientaliste e da singoli appassionati. Numerosi turisti interpellati, soprattutto se provenienti da altre realtà, hanno apprezzato lo sforzo fatto e sono rimasti affascinati dalla bellezza di un luogo lasciato, anche in piena alta stagione, libero da sdraio, ombrelloni e teli colorati (Fig. 9).



Figura 8 - L'attività di informazione svolta sulla spiaggia.



Figura 9 - Domenica 13 giugno 2010: il divieto di sosta in spiaggia presso la foce già sostanzialmente rispettato.

L'area cui viene fatto riferimento non è da considerarsi preclusa alla visita. Ciascun cittadino può accedervi con il rispetto dovuto, godendone la bellezza e preservandone, con il proprio comportamento corretto, le caratteristiche. Quanti desiderano frequentare quest'area per il turismo balneare possono liberamente farlo nelle aree adibite a tale pratica, nel completo spirito delle norme in materia, che auspicano entro la aree naturali protette un'integrazione positiva tra la presenza delle attività umane e l'ambiente tutelato.

In prospettiva, la strategia adottata potrà raggiungere i risultati sperati solo nel medio-lungo termine e dovrà coinvolgere necessariamente il maggior numero di portatori di interesse locali.

Bibliografia

- AA.VV. (2008) - *Le pinete demaniali litoranee dell'Alto Adriatico*. Progetto LIFE-Natura 2004 "Tutela di siti Natura 2000 gestiti dal Corpo Forestale dello Stato" (LIFE04NAT/IT/000190). Corpo Forestale dello Stato - Ufficio territoriale per la Biodiversità di Punta Marina, Ravenna, pagg. 150.
- A.S.F.D. (1960) - *L'Azienda di Stato per le Foreste Demaniali*. Volume I. Soc. A.B.E.T.E.. Roma.
- Cantiani P., Ferretti F., Pignatti G., Andreatta G., Nobili G. (2009) - *Le pinete demaniali costiere di Ravenna e Ferrara: analisi dei tipi forestali e strutturali per la scelta del trattamento selvicolturale nel processo di pianificazione*. Ann. CRA - Centro Ric. Selv. Arezzo - Vol. 35, 2007-2008: 6 -68.

- Gariboldi A., Lambertini M., Tallone G. (1997) - *Delta del Po: verso un futuro sostenibile, Piano per la conservazione della natura del Delta del Po (Sintesi)*. Unione Europea DG XI - Ministero dell'Ambiente Servizio Conservazione Natura, realizzato da LIPU, Parma, pp. 112.
- Longhi G. (1969) - *Foresta "Pineta di Ravenna". Piano di Assestamento esecutivo per il decennio 1970-1979*. Azienda di Stato per le Foreste Demaniali.
- Nobili G. (2007) - *Le pinete demaniali litoranee dell'Alto Adriatico: interventi per un ruolo ecologico attuale. Progetto LIFE - Natura 2004 "Tutela di siti Natura 2000 gestiti dal Corpo Forestale dello Stato"*. Atti del Convegno "La selva antica di Ravenna a cento anni dalla legge Rava", Fondo per l'Ambiente Italiano, 3 dicembre 2005, Ravenna. Longo Editore, Ravenna.

Ricevuto il 31/03/2010, accettato il 27/09/2010.

Caratteristiche sedimentologiche e morfologiche, tendenza evolutiva della costa della Riserva Naturale di Sentina (Marche) e ruolo dell'Habitat dunale per la riqualificazione ambientale

Carlo Bisci¹, Giancarlo Bovina², Gino Cantalamessa¹, Sergio Cappucci³,
Matteo Conti⁴, Annalisa Sinatra⁵ e Emiliana Valentini⁴

¹ Università di Camerino

² Studio Associato Geosphaera

³ ENEA, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo Sviluppo sostenibile

E-mail: sergio.cappucci@enea.it, Tel: 06-30483415, Fax: 06-30483028

⁴ ISPRA, Istituto Superiore Protezione e Ricerca Ambientale

⁵ Comune di San Benedetto del Tronto

Riassunto

Nel presente lavoro vengono esposti i risultati della caratterizzazione morfologica ed evolutiva della fascia costiera della Riserva Naturale di Sentina (Regione Marche, Mar Adriatico Centrale), la riserva è caratterizzata da un litorale sabbioso lungo circa 1,7 km, con dune di modeste dimensioni e zone umide retrodunali. Il presente articolo spiega come si sia eseguito un ripascimento della spiaggia emersa in regime di somma urgenza per mitigare l'impatto dell'erosione costiera sulla duna presente nell'area di studio e ridurre la vulnerabilità degli habitat naturali nel breve termine. Tale scelta si è basata sui risultati delle analisi sedimentologiche, stratigrafiche, topografiche e batimetriche svolti per caratterizzare l'area ed individuare interventi di riqualificazione ambientale del litorale sia nel breve che nel lungo termine. La tendenza evolutiva del sistema spiaggia-duna è stata analizzata attraverso la *Surface Variation Analysis* (SVA) relativa all'intervallo 1985-2007, e basandosi sulla interpretazione delle ortofoto, è stata rilevata la scomparsa di oltre 8 ha di riserva a tutela integrale.

Parole chiave: gestione delle dune, habitat costieri, interventi di ripascimento, banche dati, SVA, DSAS.

Abstract

In this paper we present a multitemporal analysis of the coastal system in the Sentina area (Marche Region, Central Adriatic Sea) that is characterised by a ca. 1.7 Km long sandy beach with small dunes and backshore wetland habitat. A beach nourishment project, executed as an emergency action for short term mitigation of coastal erosion impacts on the natural habitat, is described. This project was based on sedimentological, stratigraphic, and topobathymetric surveys that had been carried out with the scope of characterising the area and generating suitable short and long term scenarios regarding wetland restoration, dune protection and beach replenishment.

The evolution of the beach-dune system was quantified through Surface Variation Analysis (SVA), overlapping the most representative polygons from the 1985-2007 time interval. Interpretation of orthophoto images highlighted the erosion trend of the beach, the disappearance of the dune system, and the loss of over 8 ha of a full protection Natural Reserve.

Keywords: dune management, coastal habitat, beach nourishment, database, SVA, DSAS.

Introduzione

Ubicazione, dimensione e caratteristiche morfologiche dei depositi eolici costieri sono fortemente influenzate da complessi meccanismi deposizionali che risentono sia delle condizioni meteorologiche agenti lungo il paraggio che dell'azione dell'uomo (Carter, 1980; Pye, 1990, Carter et al., 1990). Le dune sono parte integrante del sistema spiaggia e costituiscono una riserva di sedimento che svolge il duplice ruolo di proteggere gli acquiferi costieri dall'intrusione del cuneo salino e di costituire una riserva di sabbia che può essere rimaneggiata durante gli eventi estremi. La loro demolizione può avvenire anche nel breve termine, in poche ore o giorni, mentre una successiva ricostruzione richiede un lungo periodo che dura anche per mesi o anni (Davidson-Arnott, 1988; Wal e Mc Manus, 1993). Lo sviluppo di una duna richiede un'ampiezza minima della spiaggia antistante che, quando viene a mancare, può portare alla sua, regressione, alla riduzione della copertura vegetale o anche alla sua scomparsa (Carter e Wilson, 1993; Psuty, 1988; Brecciaroli e Onori, 2009). Per tale ragione è di fondamentale importanza per le amministrazioni procedere alla caratterizzazione e monitoraggio dal punto di vista fisico e biologico delle dune che, essendo habitat naturali, dovrebbero essere preservate con ogni strumento gestionale possibile. Negli ultimi decenni, una serie di fattori antropici hanno modificato l'assetto del litorale Adriatico, soprattutto in prossimità delle foci fluviali (Dal Cin e Simeoni, 1987) come quelle del Fiume Tronto a nord della quale si trova la Riserva Naturale della Sentina, che soffre di riduzioni significative del trasporto solido, di cui purtroppo non esistono stime attendibili. Tale processo, sebbene sia comune a molti dei corsi d'acqua italiani (Cappucci et al., 2008; Rinaldi e Simoncini, 2006; Siviglia et al., 2004), è ritenuto il fattore che ha influenzato maggiormente l'evoluzione di questo tratto di costa insieme alla realizzazione di opere di difesa costiera utilizzate a partire dagli anni '60 per proteggere l'abitato di San Benedetto del Tronto a nord e l'armatura della Foce del Fiume Tronto a sud (ISPRA, 2008). Il litorale della Sentina, situato nella parte più meridionale della Regione Marche (Comune di San Benedetto del Tronto), lasciato esposto alle mareggiate, negli ultimi decenni è stato soggetto allo smantellamento del delta di foce e ad un tasso di arretramento della linea di riva significativo. La protezione e riqualificazione degli habitat dunali e retrodunali, sono stati al centro di un progetto di risanamento ambientale del Comune di San Benedetto del Tronto di concerto con il comitato di indirizzo della Riserva.

Il presente lavoro, ha contribuito a caratterizzare la fascia costiera dal punto di vista sedimentologico-stratigrafico, topografico batimetro ed evolutivo. I risultati della caratterizzazione ha fornito il supporto necessario alle pubbliche amministrazioni per l'individuazione dei tratti di litorale più compromessi e per la formulazione di ipotesi di salvaguardia con interventi ambientalmente compatibili alle caratteristiche dell'area, anche nel lungo termine (Bisci e Cantalamessa et al 2008; Cappucci et al., 2009; Conti et al., 2009; Valentini et al., 2010). Il carattere interdisciplinare di questo studio e dei relativi risultati costituisce un esempio di come il personale che opera nel mondo della pubblica amministrazione, della professione e della ricerca riesca, grazie ad una proficua collaborazione, ad individuare efficaci indirizzi di gestione del territorio e delle sue risorse.

Area di studio

La Riserva Naturale Regionale della Sentina, inclusa nel territorio della regione Marche, confina a nord con l'abitato di Porto d'Ascoli, a sud con il Fiume Tronto che segna il confine regionale con l'Abruzzo, ad est con il Mare Adriatico e ad ovest con la ferrovia Bologna-Bari (Fig. 1). Istituita con Delibera Regionale 156 del 14/12/2004, ha una superficie di 177,5 ha ed è suddivisa in tre ambiti diversi:

- A - Zona di Protezione Integrale di ambiti naturali fragili di 24,5 ha;
- B - Zona di Tutela con lo scopo di mitigare gli impatti su habitat e specie, 67,2 ha;
- C - Area di Promozione Economica e Sociale delle attività antropiche, 85,7 ha.

Per le sue peculiarità ambientali, 90 ha della Riserva sono stati definiti Sito di Interesse Comunitario (IT5340001) ai sensi della Direttiva Habitat 92/43/CEE e 121 ha Zona a Protezione Speciale (IT5340022) ai sensi della Direttiva Uccelli 79/409/CEE. Il Piano Difesa Costa della Regione Marche, ripartisce la costa regionale in 27 settori e colloca il litorale della Sentina nel tratto costiero di 6,75 km che si estende dal Porto di San Benedetto del Tronto alla foce del Fiume Tronto. Tale settore presenta opere su 4,6 km (69% del totale), principalmente barriere emerse (3,6 km) e sommerse (circa 1 km) oltre a 2 pennelli.



Figura 1 - Foto aerea (2007) dell'area di studio.

La spiaggia emersa è costituita per l'11% di ghiaia, il 33% di ghiaia sabbiosa, il 23% di sabbia ghiaiosa e il 33% di sabbia (Regione Marche, 2005; Bisci e Cantalamessa, 2008; Dal Cin e Simeoni, 1994). La presenza di ghiaia e ciottoli, abbondanti lungo la battigia, è ascrivibile in parte al materiale solido trasportato in passato dal fiume Tronto e, in parte, allo smantellamento di opere di difesa ubicate lungo il litorale soprattutto alla Sentina (Fig. 2). La parte sommersa della spiaggia è costituita da materiale di granulometria progressivamente più fine allontanandosi dalla riva con fondali che hanno pendenza compresa fra 0,6% e 0,9% ed il trasporto sedimentario netto diretto da sud verso nord (AA.VV., 1999, Bisci e Cantalamessa, 2008). La profondità di chiusura, calcolata nell'area utilizzando la formula di Hallermeier (1978,1981) riferita al clima ondoso registrato dalla boa di Ortona nel periodo 1989-2005, è risultata pari a 7,57 m (ISPRA, 2009). Il tratto di litorale incluso nel perimetro della Riserva si sviluppa per 1,7 km ed è stato caratterizzato negli ultimi decenni da una forte tendenza all'arretramento rispetto al passato in cui ampie ed estese aree inondate, collegavano la transizione terra mare in mezzo alle sabbie delle più ampie spiagge adiacenti al detrito fluviale. All'interno del SIC, nel 2003, una superficie pari al 10% è rappresentata dalle dune e dalle spiagge (Cod. 1150), insieme 15% di lagune costiere (Cod. 2240, 2120) residue, in corrispondenza della spiaggia antistante che mostra ampiezze non superiori a 10 m (Tab. 1).



Figura 2 - Tratto di litorale della Sentina caratterizzato da sedimentazione misto. Notare la presenza di ciottoli.

Tabella 1 - Codice habitat, denominazione e percentuale di estensione percentuale all'interno del SIC.

Codice habitat	Denominazione	Estensione Superficiale
1310	Vegetazione annua pioniera a <i>Salicornia</i> e altre specie delle zone fangose e sabbiose	25%
1410	Pascoli inondati mediterranei (<i>Juncetalia maritimi</i>)	25%
1420	Praterie e fruticeti mediterranee e termo-atlantici (<i>Sarcocornetea fruticosi</i>)	25%
1150	Lagune costiere	15%
2240	Dune con prati dei <i>Brachypodietalia</i> e vegetazione annua	5%
2120	Dune mobili del cordone litorale con presenza di <i>Ammophila arenaria</i> ("dune bianche")	5%

Metodologia

La parte sperimentale del presente studio si articola in una analisi della tendenza morfo-evolutiva attraverso l'interpretazione di immagini aeree relative all'intervallo 1985-2007 e nella caratterizzazione sedimentologica e topo-batimetrica dell'area, con lo scopo di individuare le zone con maggiore vulnerabilità.

Le immagini aeree relative agli anni 1985, 1995 e 2007 sono state utilizzate per eseguire un'analisi diacrona del sistema spiaggia/duna. Usando ESRI ArcGIS 9.2, le ortofoto (scala 1:10.000) sono state georiferite nel sistema UTM WGS 84 con fuso di riferimento 33N e rese sovrapponibili e confrontabili tra loro mediante sistema di controllo a punti fissi. Per la caratterizzazione delle forme presenti sull'arenile è stato creato un database utilizzando gli stessi elementi riportati nella banca dati nazionale scaturita dal PRIN "I depositi eolici ed il flusso dei sedimenti spiaggia duna" del 2002 poi implementata nel protocollo internazionale del Report Tecnico di Fase B del sottoprogetto POSIDUNE - *Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles* (Cappucci et al., 2007), dell'OCR BeachMed-e (www.beachmed.it). Sono stati così determinati l'estensione dei cordoni dunali, lo stato di attività della duna, la delimitazione delle aree con copertura vegetale e la presenza di elementi di discontinuità (varchi) sia naturali che antropici nonché altri attributi e classi riportati in Tabella 2.

L'immagine del 2007 è stata considerata rappresentativa dello stato attuale di conservazione delle dune e dell'arenile della Riserva in relazione al termine dei lavori (estate 2008). L'estensione delle dune è delimitata da un poligono il cui limite è stato definito basandosi su rilievi diretti condotti durante i sopralluoghi (per l'immagine del 2007) e sull'analisi delle curve di livello disponibili e dei contrasti cromatici (per le immagini relative al 1985 e 1995). Per la definizione dei poligoni si è fatto riferimento anche alla continuità della copertura vegetazionale (Bianco e Menegoni, 2009). Successivamente, mediante l'utilizzo di una specifica applicazione GIS denominata DSAS - *Digital Shoreline Analysis System* (Thieler et al., 2005), è stata eseguita un'analisi dell'ampiezza della duna e della spiaggia emersa. A tale scopo, è stata definita una linea di riferimento in corrispondenza del sentiero che corre sub-parallelo alla costa e che, per parte del suo sviluppo, corrisponde al limite interno della riserva a protezione integrale. Sono stati poi considerati una serie di transetti trasversali alla costa aventi interasse di 25 m (Fig. 3). Lungo ciascun transetto è stata calcolata l'ampiezza dell'arenile (distanza tra la linea di riva e il piede antedunale) e l'ampiezza della duna (distanza tra il piede antedunale e il piede retrodunale).

La caratterizzazione sedimentologica è stata condotta attraverso l'analisi di 90 campioni prelevati nella spiaggia emersa e sommersa, lungo 7 transetti perpendicolari alla linea di costa (Fig. 2), in corrispondenza della battigia e a distanza di 1, 2, 5 e 10 metri da questa (spiaggia emersa) ed in corrispondenza delle isobate -1, -2, -3, -5, -7, -10 metri (spiaggia sommersa). A completamento della campagna sono stati prelevati ulteriori campioni alla profondità di 13 m e di 15 m che dista da costa circa 5 km. In ambiente subaereo, ovvero fino alla linea di battigia, i campioni sono stati prelevati manualmente, mentre sui fondali sono stati acquisiti facendo uso del *Benthic sediment bottom grab sampler*® della Rickly Hydrogeologic (Bisci e Cantalamessa, 2008).

Dal punto di vista stratigrafico, sono stati eseguiti 6 sondaggi manuali con trivella per pedologia (punta elicoidale e campionatore del diametro di 80 mm), spinti sino alla profondità di circa 2 m dal p.c. (Fig. 3).

Tabella 2 - Legenda e struttura del database.

ELEMENTO	TIPOLOGIA	ATTRIBUTI	CLASSI
Duna	Elemento poligonale	Stato di attività	Duna attiva o riattivata
			Duna inattiva
		Vegetazione	Vegetazione arborea
			Vegetazione arbustiva
			Vegetazione erbacea
			Vegetazione arborea rada (<20%)
			Vegetazione arbustiva rada (<20%)
		Antropizzazione	Vegetazione assente
			Arce urbane
			Urbanizzato sparso
		Tendenza evolutiva del litorale	Antropizzato generico
			Litorale in avanzamento
			Litorale stabile
		Ampiezza della spiaggia	Litorale in arretramento
			0-20 metri
20-60 metri			
		>60 metri	
Cresta della duna	Elemento lineare		
Quota della cresta	Elemento puntuale		
Varchi	Elemento puntuale		Sentieri e strade
			Varchi naturali
Vento	Elemento puntuale		
Opere	Elemento lineare		Ripascimenti
			Opere aderenti
			Ripascimenti associati ad opere aderenti
Uso della spiaggia	Elemento lineare		Attività di balneazione temporanee
			Attività di balneazione permanenti

Quattro di essi (S1, S4), sono stati effettuati nell'area retrodunale, lungo un fronte di circa 600 m e a circa 80-100 m dalla linea di riva; gli altri due sono stati realizzati sulla spiaggia (S5) ed in prossimità del retroduna (S6). Tentativi di carotaggio effettuati più verso mare sono falliti per la diffusa presenza, nei primi 30-40 cm, di abbondanti ciottoli immersi in una matrice sabbiosa che hanno impedito il campionamento (ISPRA, 2008). I rilievi topo-batimetrici sono stati condotti dal limite del retroduna fino ad una distanza di circa 5 km. Le quote sono state rilevate utilizzando la Stazione Totale Topcon GPT 1001°, mentre il fondale antistante è stato rilevato (in condizioni di mare calmo) utilizzando due ecoscandagli professionali a doppia frequenza (Furuno GP 7000F° e Furuno LS 4100°) installati nell'imbarcazione di proprietà dell'Università di Camerino. Per la correzione relativa all'escursione della marea si è fatto riferimento ai dati rilevati dalle boe ondametrische ubicate al largo del Conero e del litorale di Pescara, che sono stati automaticamente aggiunti o sottratti alle misure rilevate dallo strumento in relazione alle variazioni di livello mareali.

I punti di rilevamento topo-batimetrico acquisiti per ricostruire l'andamento tridimensionale dell'area indagata sono stati elaborati in ambiente ESRI ArcGIS® 9.1, tramite l'estensione 3D Analyst, ricostruendo il modello TIN (Triangular Irregular Network) ed un DTM raster (Bisci e Cantalamessa, 2008).

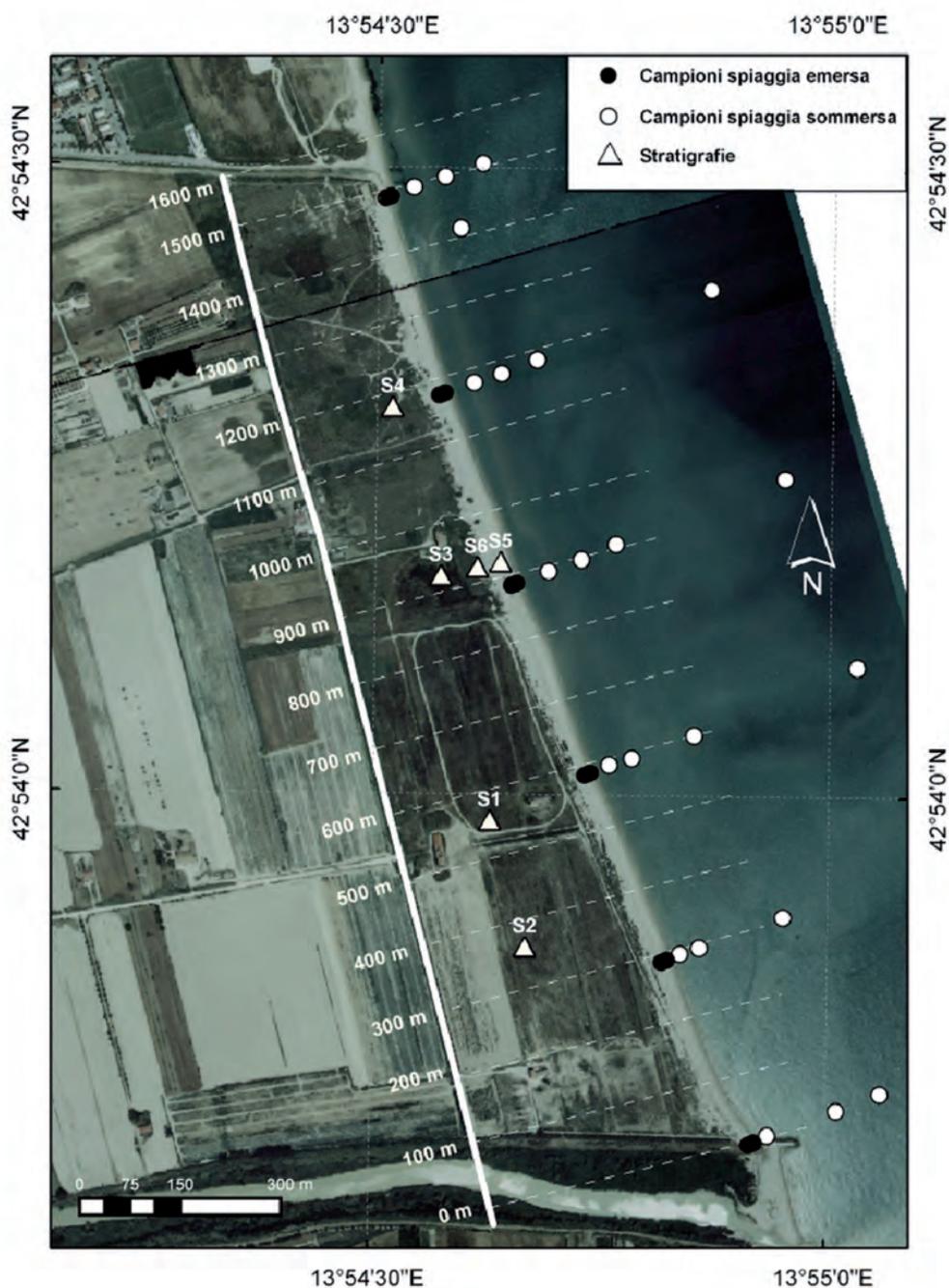


Figura 3 - Ubicazione dei transesti DSAS, dei campioni di sedimento e dei sondaggi stratigrafico-deposizionali.

Risultati

Alcuni degli elementi considerati nel database (Tab. 2), e considerati i più significativi per mostrare il trend evolutivo subito dal sistema spiaggia duna, sono stati riportati in Figura 4. Nei 22 anni intercorsi tra il 1985 ed il 2007 è stata osservata una forte contrazione del sistema spiaggia-duna con un arretramento medio della linea di riva di circa 50 m (Fig. 4a) che ha avuto forti ripercussioni sull'evoluzione delle retrostanti forme di accumulo. L'analisi condotta ha rilevato una variazione della forma che mostra una evidente riduzione dell'estensione delle dune con scomparsa degli specchi d'acqua retrostanti (Fig. 4a), mentre dall'osservazione delle immagini

si è osservata una riduzione della continuità di copertura vegetazionale. L'area di studio, nell'intervallo 1985-2007, ha subito una perdita di circa 8.5 ha di territorio della "Zona di Protezione Integrale di ambiti naturali fragili", con un tasso di riduzione medio di circa 0.4 ha/anno, mentre la posizione delle dune, come si evince dai poligoni riportati in Fig. 4b, è migrata gradualmente verso l'entroterra.

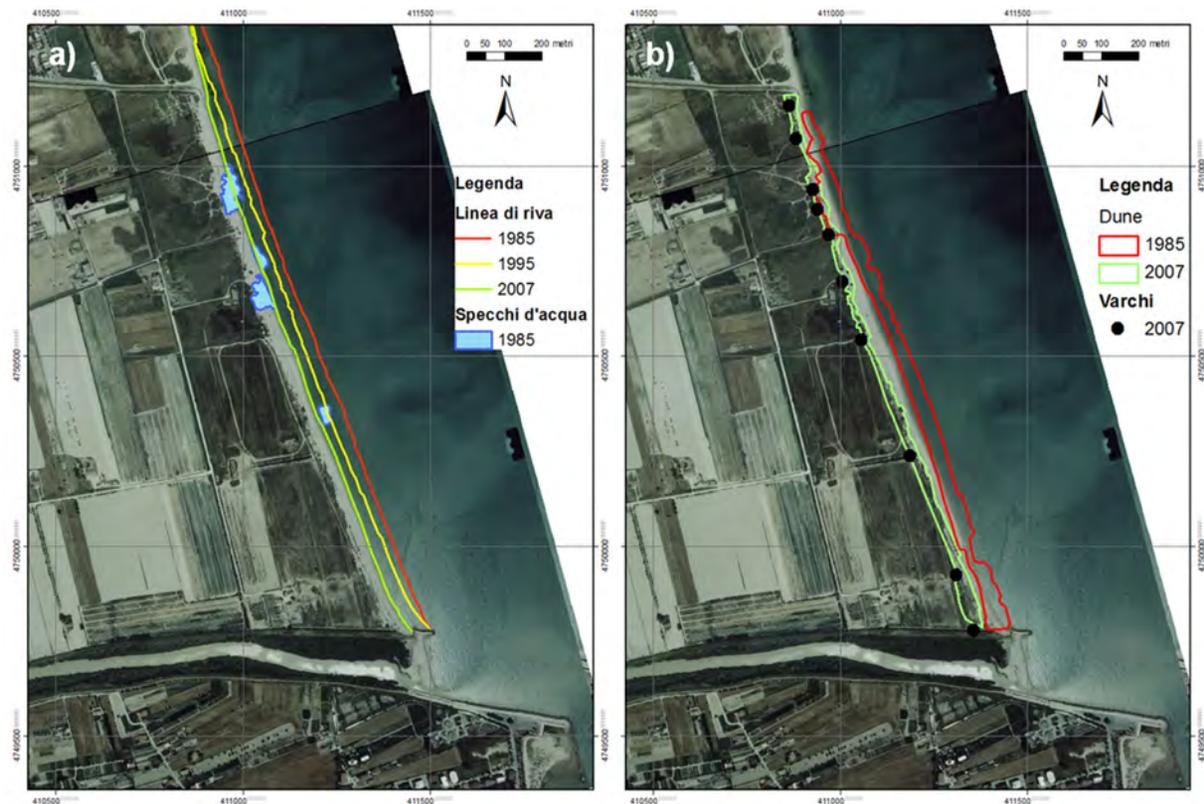


Figura 4 - Visualizzazione di alcuni degli elementi analizzati sullo sfondo dell'ortofoto relativa al 2007. In a) posizione delle linee di riva del 1985, 1995, 2007 e gli specchi d'acqua del 1985; in b) posizione delle dune del 1985 e 2007 e dei varchi del 2007.

Dall'analisi eseguita con l'applicazione *DSAS* è emerso che l'ampiezza media della duna è passata da 40,3 m nel 1985, a 23,2 m nel 1995 a 23,6 m nel 2007. In Figura 5a è diagrammata la variazione complessiva di ampiezza della fascia di litorale caratterizzata dalla presenza di dune nell'intervallo di tempo 1985-2007. Tale grafico mostra chiaramente come, lungo l'intero tratto di litorale considerato, il piede della duna sia arretrato di circa 60 m sul versante rivolto verso mare e di circa 45 m sul versante rivolto verso terra, subendo così una riduzione di superficie. In particolare, nel periodo 1985-1995, il piede dell'anteduna è arretrato mediamente di 28,3 m, mentre il piede retrodunale è arretrato di circa 12 m. Nell'intervallo 1995-2007 si è verificato un arretramento complessivo del sistema lungo l'intero tratto di litorale in esame (su entrambi i versanti) di circa 31 m. In Figura 5b, sono state diagrammate le variazioni di ampiezza subite dalle dune e dalla spiaggia emersa nell'intervallo 1985-2007. Il diagramma a barre è stato particolarmente utile per distinguere 4 settori lungo l'area di studio sulla base di tendenze evolutive distinte del sistema. I settori 1 e 3, sono caratterizzati da una riduzione dell'ampiezza della spiaggia emersa e della duna, mentre i settori 2 e 4 sono caratterizzati da una riduzione dell'ampiezza della duna ed un aumento della superficie di spiaggia emersa (anche se la posizione assoluta della linea di riva è, ricordiamo, arretrata).

Mediante l'analisi delle ortofoto è stato valutato anche lo stato di copertura della vegetazione dunale. Il primo dato emerso è la riduzione della copertura, diminuita da 34.580 m² del 1985 a 21.900 m² del 1995 a 18.920 m² del 2007. Nel 1985 le aree vegetate avevano una estensione molto variabile e nel settore settentrionale (da pro-

gressiva 1000 a 1500 di Fig. 3), dove vi era ancora la presenza di specchi d'acqua, si sviluppavano su circa 1.000 m² (Fig. 4a). Nel 1995 si osserva una drastica riduzione della superficie vegetata e della sua continuità strutturale. Nel settore settentrionale non sono più rilevabili gli specchi d'acqua presenti nel 1985 e sono osservabili zone vegetate estremamente rade, indice di una fragilità strutturale delle dune.

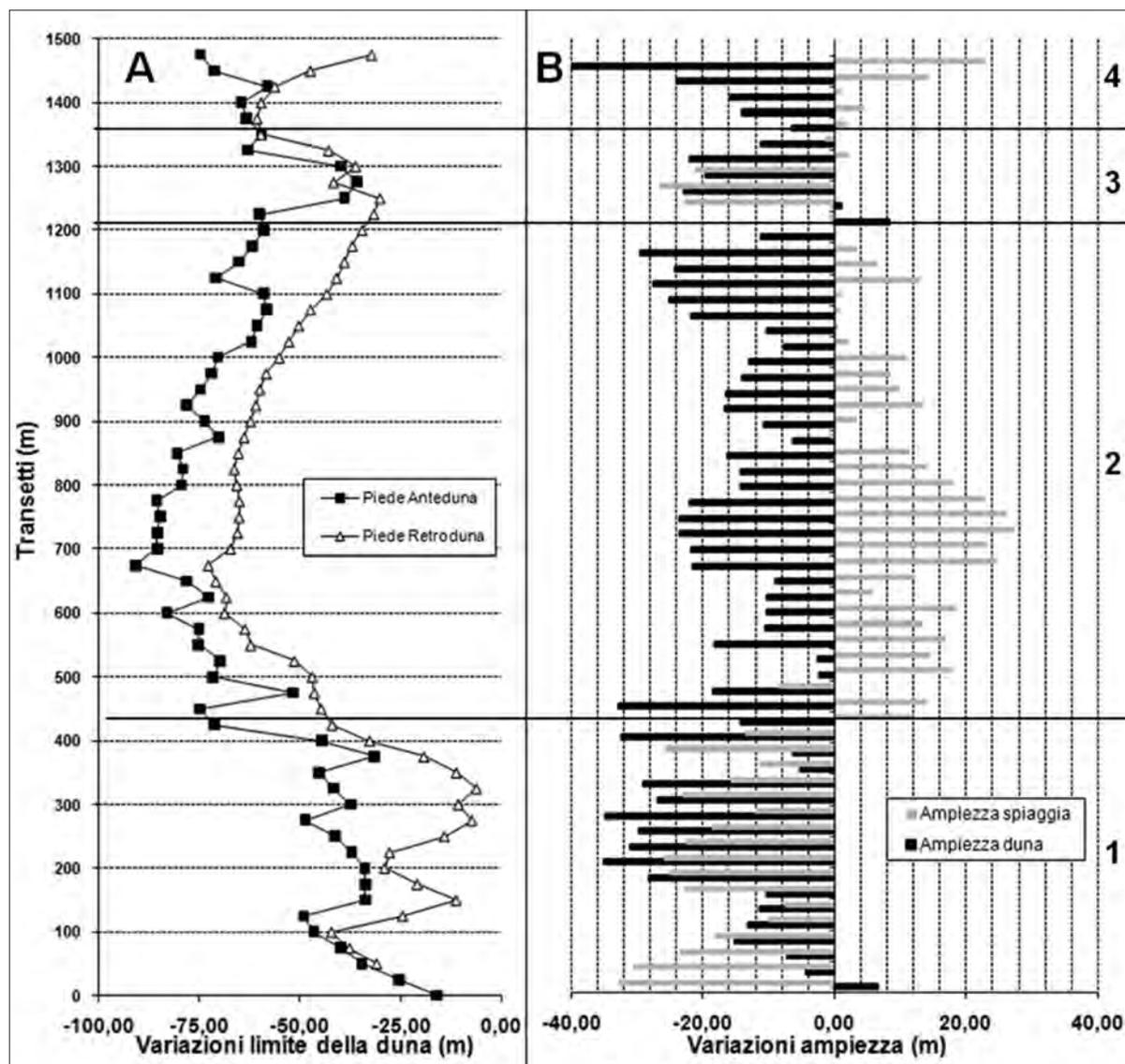


Figura 5 - (a) Variazione dell'ampiezza della duna nell'intervallo 1985-2007. (b) Variazioni di ampiezza della spiaggia emersa e del poligono della duna nell'intervallo 1985-2007.

Procedendo verso sud, la fascia vegetata di arenile appare estremamente assottigliata fino a scomparire del tutto in un tratto di circa 300 m. Nel 2007 si osserva un ulteriore decremento della superficie vegetata (3.000 m² in meno rispetto al 1995), che appare molto sottile e si osservano aree di diradamento assai ampie, in particolare nel settore settentrionale della Riserva. In Tabella 3 sono riportati i principali parametri considerati per descrivere l'evoluzione temporale del sistema dunale nell'area della Riserva, quale sintesi dei risultati ottenuti.

Le analisi sedimentologico-stratigrafiche hanno rivelato che la duna, secondo la classificazione di Nota (1958),

è costituita da sabbia fine molto classata, a luoghi con diametro pari a 0,250 mm per il 99% del peso, mentre la spiaggia emersa ha granulometrie variabili dalle sabbie ($D_{50} \approx 0,500$ mm) alle ghiaie ($D_{50} \approx 32$ mm); anche la spiaggia sommersa presenta, in alcuni campioni, una frazione ghiaiosa fino alla profondità di circa 3 m che rende il materiale estremamente eterogeneo, con D_{50} variabile tra 0,125 mm e 22 mm (Bisci e Cantalamessa, 2008). La frazione grossolana, aumenta significativamente procedendo da sud verso nord, mentre la frazione silt-argillosa, assai scarsa fino alla profondità di 2 m, aumenta verso le maggiori profondità fino a costituire anche oltre il 30% dei campioni (Fig. 6; Bisci e Cantalamessa, 2008).

Tabella 3 - Principali elementi morfologici utilizzati per la caratterizzazione delle dune nell'intervallo 1985-2007.

	1985	1995	2007
Superficie poligono duna (m ²)	57.661	35.688	34.632
Ampiezza media poligono duna (m)	40,27	23,21	23,60
Superficie aree vegetate (m ²)	34.576	21.898	18.920
Numero dei varchi	9	8	10
Sviluppo lineare sentieri (m)	2.197	2.262	1.907
Estensione specchi d'acqua (m ²)	10.021	Assenti	Assenti
Opere di difesa	Assenti	Assenti	Assenti

Dal punto di vista composizionale, le indagini mineralogico-petrografiche basate su osservazioni al microscopio hanno evidenziato un contenuto in carbonati di circa il 60%. Anche il quarzo ed i frammenti di roccia sono presenti in quantità rilevanti; subordinatamente compaiono miche, dolomie, feldspati potassici e plagioclas. La frazione ghiaiosa è costituita in prevalenza da ciottoli calcarei, talora fossiliferi, appiattiti e ben smussati; subordinatamente si rinvenivano calcari selciferi, selci, breccie ed arenarie. Per quanto riguarda i carbonati, l'esame ottico ha consentito di riconoscere carbonati clastici e tritume organogeno con resti sia interi che in frammenti di Molluschi, Lamellibranchi e Gasteropodi (Bisci e Cantalamessa, 2008).

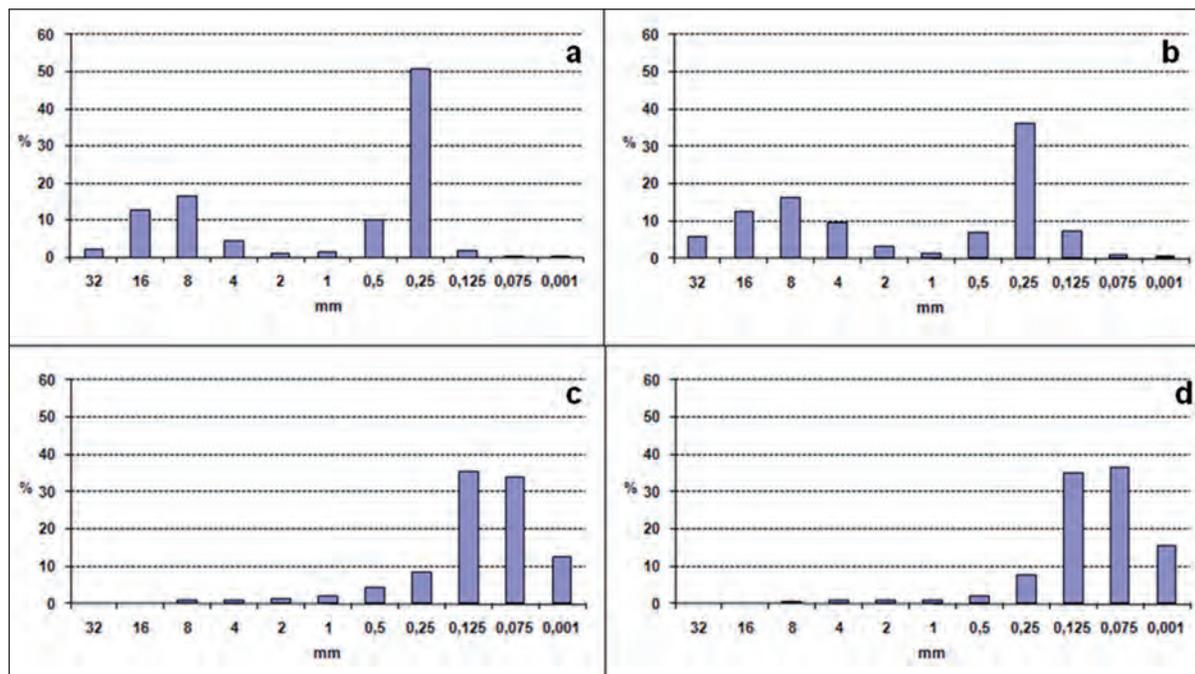


Figura 6 - Visualizzazione tramite istogrammi a barre della composizione granulometrica media dei campioni di sedimento raccolti sulla spiaggia emersa (a), lungo l'isobata - 1m (b), -5m (c), -10m (d).

In Figura 7 sono riportati gli schemi stratigrafici rilevati lungo un transetto ortogonale alla linea di riva da cui si evince il seguente assetto stratigrafico:

- retroduna (S3): sabbie nocciola limose o argillose per spessori di circa 0,5 m; al di sotto di questo strato è stato osservato l'incremento della frazione argillosa (argille sabbioso limose di colore nocciola) sino a profondità di circa 1-1.2 m, oltre questa quota sono state osservate sabbie grigie limose o argillose;
- piede del retroduna (S6): dopo pochi centimetri di terreno palustre, sino a circa 0,7 m di profondità, si sono incontrate sabbie grigie con piccoli ciottoli; al di sotto di queste sono state osservate argille torbose da grigie a marroncine. Il campionamento è stato effettuato sul fondo di una piccola depressione immediatamente a tergo della spiaggia (impaludata sino a pochi giorni prima del rilievo in oggetto).
- cresta della duna (S5): sino a circa 0.8 m di profondità sono presenti sabbie fini; al di sotto, sino a circa 1,1 m, sono comparse argille nocciola seguite sino a circa 1,5 m di profondità da sabbie grigie.

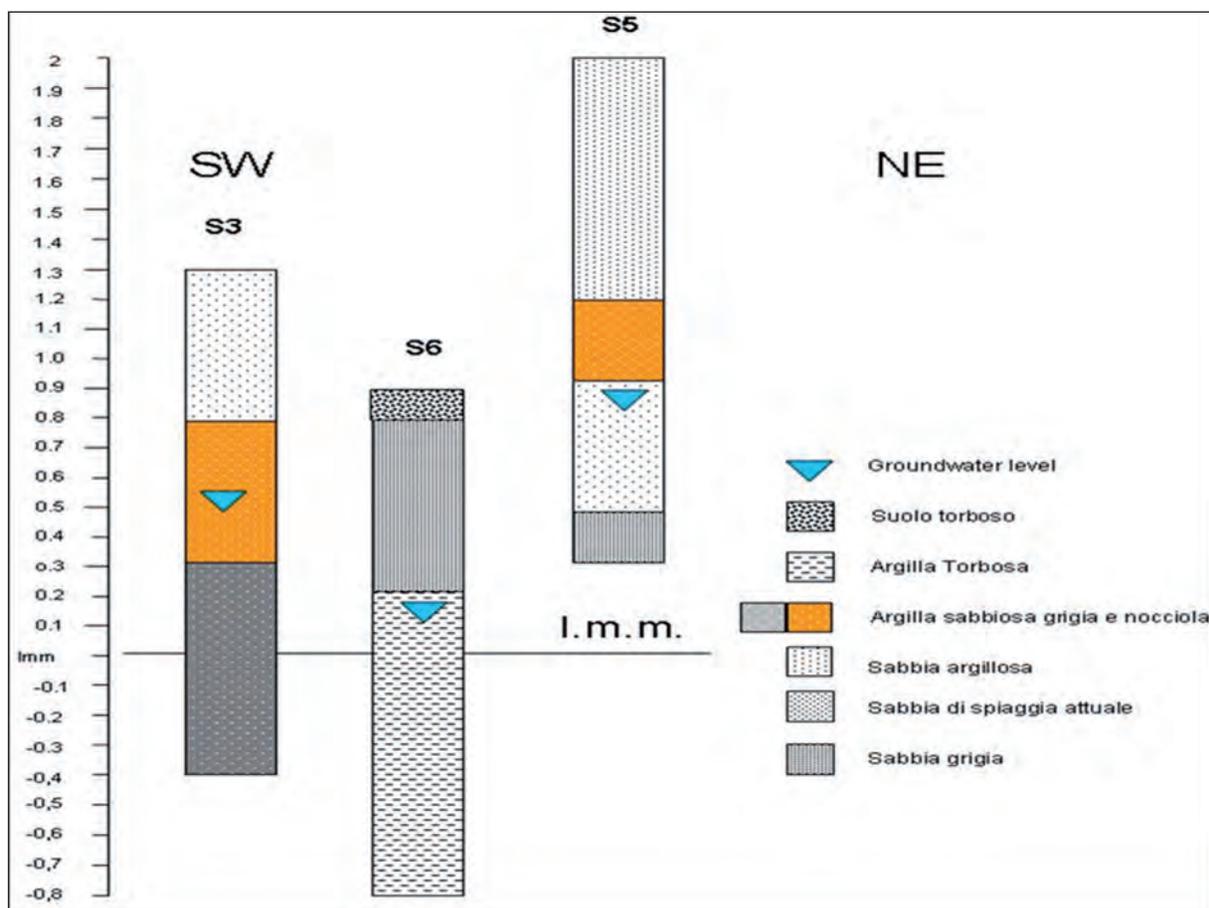


Figura 7 - Colonne Stratigrafiche semplificate di tre sondaggi eseguiti lungo un transetto SE-NW (vedi Fig. 3), ortogonale alla linea di riva.

In tutti i sondaggi è stata riscontrata la presenza di una falda epidermica posta a profondità comprese tra 0.8 m e 1.4 m dal piano campagna, caratterizzata da una leggera sovrappressione che si manifesta attraverso la progressiva risalita dei livelli. Le misure di conducibilità hanno evidenziato il carattere salmastro della falda epidermica con salinità variabili da 2,5 g/l (retroduna - S3) a 10 g/l (avanduna - S5).

I rilievi topografici condotti tra la foce del Fiume Tronto e l'abitato di Porto d'Ascoli dimostrano come l'area sia delimitata a monte da un sistema dunale vegetato, posto ad una distanza dalla linea di riva compresa fra i 50 m nella porzione meridionale ed i 20 metri in quella settentrionale (Bisci e Cantalamessa, 2008). Nella maggior parte dell'area, la duna ha un'altezza variabile da quasi 1,9 a quasi 2,5 m (Fig. 8a).

La spiaggia sommersa antistante la Riserva ha un andamento morfologico regolare, con isobate che corrono parallelamente alla linea di costa e profondità che aumentano sempre più lentamente allontanandosi dalla battigia (Fig. 8b). L'unica eccezione a questo andamento monotono è la presenza di una incisione sottomarina ubicata all'incirca di fronte alla foce del Fiume Tronto (Bisci e Cantalamessa, 2008).

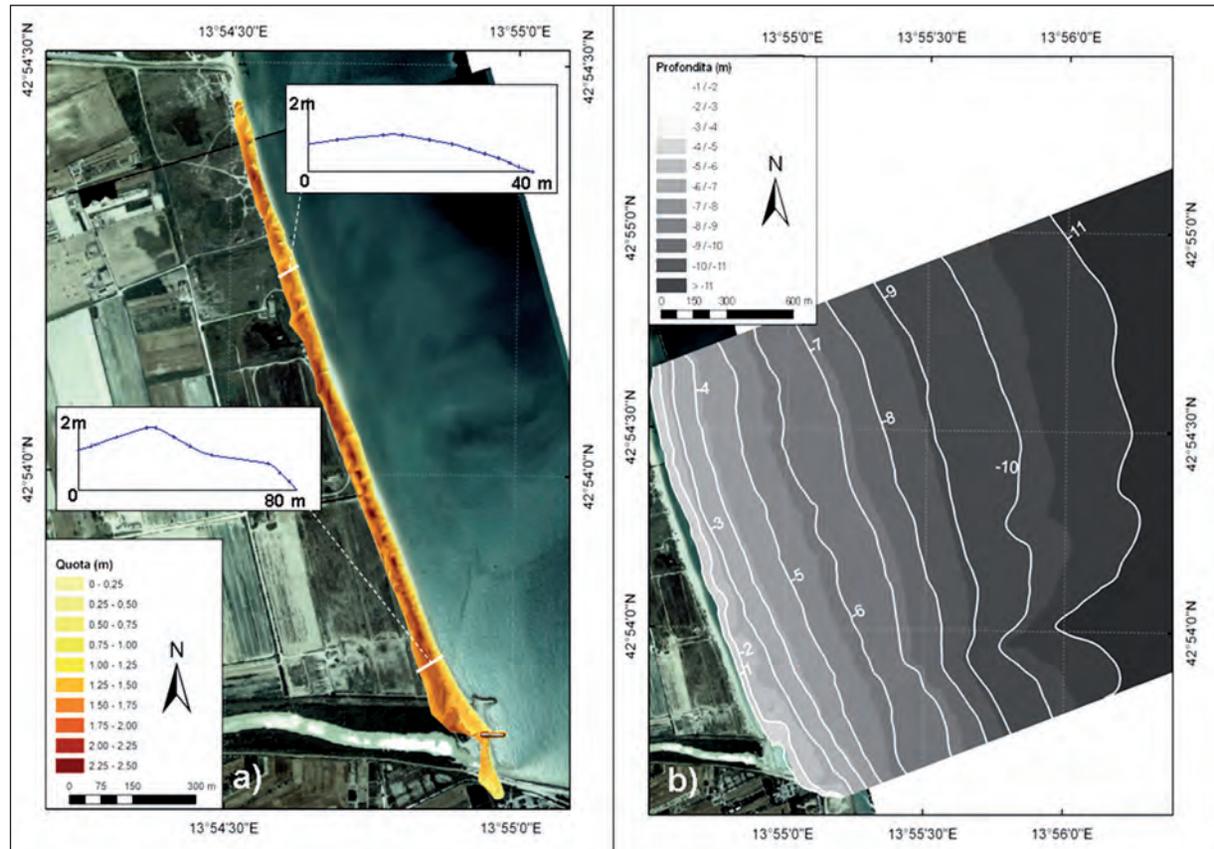


Figura 8 - Assetto topografico (a) e batimetrico (b) della Riserva Naturale di Sentina.

Discussione ed ipotesi di intervento

All'interno della riserva naturale della Sentina, la duna è oggi fortemente compromessa dal punto di vista morfologico e vegetazionale. A luoghi, su di essa, sono presenti strutture sedimentarie (*ripples*) che indicano un'attività di trasporto eolico verso l'entroterra. La spiaggia emersa ha una forte tendenza all'arretramento ed i depositi di retro spiaggia hanno uno sviluppo molto limitato sia verticalmente (quota massima di 2,5 m) sia orizzontalmente (ampiezza massima di 50 m). La presenza delle argille torbose rinvenute nel sondaggio S6 costituiscono la prova sedimentologico-stratigrafica che in passato il retroduna era caratterizzato dalla presenza di specchi d'acqua e zone umide che hanno conferito alla riserva naturale della Sentina un ruolo di stepping stone strategico lungo le rotte migratorie dell'avifauna eurasiatica da e verso il continente Africano. L'area Sentina, s' inserisce infatti lungo le rotte migratorie adriatiche, soprattutto autunnali, poiché attualmente risulta essere l'unica area umida residuale tra le valli del Po' ed il promontorio del Gargano. Le fluttuazioni dei livelli idrici della falda superficiale, ormai divenuti vulnerabili all'intrusione del cuneo salino ed il conseguente assetto vegetazionale influenzano la struttura fisica dell'habitat, la presenza di roost e siti di nidificazione sicuri e dunque, influenzano la possibilità di sosta e la diversificazione della comunità ornitica e biologica nel complesso. La riserva comprendeva un ambiente umido costiero, ma sempre più frequentemente esposta ad una carenza idrica estiva che ha ridotto l'estensione superficiale delle zone umide, è ora caratterizzata dalla presenza di specchi d'acqua effimeri

e stagionali con ridotta estensione (Valentini et al., 2010).

Il forte arretramento della linea di riva, registrato negli ultimi 22 anni, ha portato alla scomparsa di oltre 8 ha di superficie della riserva naturale e durante il corso delle mareggiate invernali del 2008 il processo erosivo ha demolito porzioni significative delle dune costiere (Fig. 9a). Nel presente lavoro sono stati implementati due distinti approcci di risanamento ambientale: un primo approccio, basato su interventi di ripascimento dell'arenile antistante le dune costiere è dettato dalla somma urgenza con l'obiettivo di proteggere l'habitat nel breve termine; il secondo, di lungo termine, si è invece basato su studi approfonditi di modellistica numerica al fine di individuare interventi ottimali di ripascimento protetto e non protetto (ISPRA, 2009), la cui trattazione esula però dagli obiettivi del presente articolo e da quelli del volume speciale in cui è pubblicato. In relazione alla prima tipologia di interventi, bisogna sottolineare come i settori che dall'analisi morfometrica risultano maggiormente in crisi sono il settore 1 e 3 (Fig. 5b). In questi settori, la diffusa tendenza all'arretramento della linea di riva, rende le dune costiere maggiormente esposte all'azione delle mareggiate. Pertanto, il ripascimento stesso può essere considerato un'azione di somma urgenza in un contesto di tutela e conservazione di habitat come le dune con prati dei *Brachypodietalia* e le dune mobili con *Ammophila arenaria* presenti nell'area. Esso è stato realizzato nel mese di Giugno 2008 per ampliare temporaneamente l'ampiezza della spiaggia antistante le dune della riserva naturale (o almeno parte delle stesse) in modo da ridurre l'intensità del processo erosivo in atto e la vulnerabilità costiera. Tale intervento di ripascimento ha avuto come obiettivo principale il temporaneo ampliamento della spiaggia antistante i tratti di duna maggiormente compromessi dal processo erosivo in atto. Lo scopo è stato dunque quello di proteggere gli habitat classificati all'interno del SIC ai sensi della Direttiva 92/43/CEE. La stessa urgenza con la quale si sono realizzati gli interventi non ha permesso di eseguire dei monitoraggi volti a valutare l'efficacia degli stessi attraverso analisi quantitative.



Figura 9 - Foto di uno dei tratti più compromessi del litorale della Riserva Naturale della Sentina individuato nel corso del presente Studio (settore 3 di Fig. 5). In a) l'ampiezza della spiaggia prima (marzo 2008) e in b) durante (giugno 2008) l'intervento di ripascimento.

Per realizzare l'intervento sopradescritto, che vista la natura emergenziale non è stato accompagnato da alcun monitoraggio volto a verificarne la reale tenuta ed efficacia, sono stati utilizzati circa 10.000 m³ dragati dal Porto di San Benedetto del Tronto. Il materiale utilizzato è stato preventivamente caratterizzato e dichiarato compatibile dall'ARPAM in quanto elemento non peggiorativo dell'ecosistema sotto il profilo chimico, microbiologico ed eco-tossicologico. Rispetto al sedimento nativo, il colore del materiale di riporto è risultato più scuro (a causa delle condizioni anossiche dell'area di prelievo) e la composizione granulometrica più fine, in quanto priva di ciottoli e ghiaia presenti lungo la battigia ed i bassifondali.

In particolare, la differenza di colore ha suscitato qualche perplessità durante le operazioni di sversamento. Numerosi accorgimenti sono stati adottati per ridurre al minimo l'impatto dell'intervento, tra cui la decantazione del materiale per la separazione della frazione fine ed il trasporto su mezzi gommati lungo l'arenile, al fine di evitare danni al piede della duna. Tale problematica è comune a molti interventi e dal punto di vista tecnico non è ancora stato individuato un approccio metodologico condiviso dalla comunità scientifica e dagli enti preposti a rilasciare le autorizzazioni per certificare la compatibilità cromatica dei materiali (Pranzini, 2009).

L'incisione orientata ortogonalmente rispetto la costa e rilevata sul fondo marino antistante la riserva si sviluppa tra gli 8 m ed i 14 m di profondità arrivando ad un'ampiezza massima di circa 500 m. La presenza di questa depressione, che dà luogo ad un dislivello massimo rispetto al fondo marino di circa 1,5 m a profondità comprese tra gli 11 ed i 12 metri, non condiziona l'efficacia degli interventi di ripascimento in quanto si sviluppa oltre la profondità di chiusura. L'irregolarità del fondale potrebbe influenzare la dinamica sedimentaria delle frazioni granulometriche più fini, ma lo studio e la dinamica dei sedimenti coesivi non rientra tra gli obiettivi del presente lavoro e si può comunque ritenere che l'influenza di tale processo sia trascurabile rispetto alle ipotesi di riqualificazione ambientale proposte sia nel breve che nel lungo periodo.

Nell'ambito della convenzione che ha finanziato il presente studio, sono state condotte anche analisi previsionali dell'evoluzione della linea di riva sul lungo termine (circa 30 anni) attraverso l'utilizzo del modello GENESIS. Gli 8 scenari realizzati nello studio hanno preso in considerazione l'esecuzione di interventi di ripascimento protetto (sia da pennelli che da scogliere) e non protetto, le correnti di *rip* in prossimità delle strutture di difesa previste, ed una granulometria del materiale di riporto con un D_{50} di 0,200 mm. Quest'ultima è forse la limitazione più significativa dell'approccio metodologico utilizzato in quanto la spiaggia emersa presenta oggi una granulometria sensibilmente più grossolana visibile anche ad occhio nudo (Fig. 2), mentre quella utilizzata per le simulazioni ha un diametro dei granuli più simile a quello del sedimento accumulato lungo il retroduna, che è soggetta a frequenti processi di trasporto eolico verso l'entroterra e di alcuni settori della spiaggia sommersa. Per ridurre al minimo gli effetti di questa incongruenza, le simulazioni hanno tenuto conto di interventi di manutenzione finalizzati a mantenere nel lungo periodo l'ampiezza della spiaggia emersa prossima ai 30 m o ai 60 m. Entrambi i valori sono sufficienti per garantire sia la fruibilità turistica della costa che l'integrità e la protezione degli habitat dunali dagli effetti dannosi delle mareggiate anche se la seconda condizione morfologica sarebbe la più promettente per ridurre la vulnerabilità della zona a lungo termine e favorire anche la ricostruzione degli habitat dunali presenti (ISPRA, 2009).

Qualora infatti fosse possibile eseguire ampliamenti durevoli della spiaggia di oltre 40 metri (Simeoni et al., 2008), questi dovrebbero essere accompagnati dalla realizzazione di opere di protezione con tecniche naturalistiche, che consentano l'accumulo di sedimento e la successiva stabilizzazione mediante diffusione di vegetazione psammofila (Bovina, 2004, Speranza, 2008; Grosset e Heurtefeux 2008, AA.VV., 2009).

A tale proposito, considerate le peculiarità dell'area sono stati proposti interventi per il ripristino del corpo dunale, mediante tecniche compatibili con la vocazione naturalistica del sito, iniziando dalla posa in opera di cannucciate orizzontali e schermi frangivento a scacchiera (Bovina et al. 2003; Bovina et al., 2007; Bovina et al., 2009). Si tratta di strutture modulabili, economiche perché di facile e rapida realizzazione, che, qualora risultassero inefficaci, non presenterebbero particolari controindicazioni ambientali. Tali interventi sono infatti realizzati con materiali naturali che rendono l'opera flessibile ma non troppo fragile, consentendo anche l'esposizione a mareggiate ad elevata energia. La disposizione delle opere può variare in funzione delle condizioni anemometriche e morfo-topografiche locali al fine di ottimizzarne la resa in termini di accumulo di sedimento.

E' comunque opportuno evidenziare che le ipotesi di intervento formulate sebbene siano state ampiamente testate in diversi siti possono garantire dei risultati significativi solo nel caso in cui la spiaggia antistante le dune sia sufficientemente ampia (Scottish Natural Heritage, 2000; Bovina et al., 2003; IRPA, 2008). Il ripascimento della spiaggia antistante, e la sua manutenzione nel tempo, dovrà pertanto costituire la fonte di approvvigionamento sedimentario per effetto del trasporto eolico e proteggerà i depositi dall'azione del moto ondoso durante le mareggiate con maggiore sovrizzo.

Conclusioni

La Sentina è caratterizzata da una ristretta fascia vegetata che separa l'arenile dai retrostanti terreni coltivati; tale fascia è compresa fra le propaggini più avanzate della vegetazione che colonizza i depositi eolici ed il sentiero che si sviluppa parallelamente alla linea di riva nel retrospiaggia. La forma di accumulo presente in questa porzione dell'arenile non è sempre esclusivamente ascrivibile a processi di trasporto eolico tale da generare una vera e propria duna, ma anche ad una serie di mareggiate che hanno fatto arretrare l'intero sistema spiaggia (battigia-berma-spiaggia interna) ed a luoghi hanno formato, attraverso l'azione del moto ondoso incidente, un unico elemento morfologico riconducibile ad una berma di tempesta (Bracci et al., 2008). La riduzione e destrutturazione della vegetazione dell'area, che ad oggi si presenta con una copertura arborea e arbustiva discontinua, è una diretta conseguenza della dinamica del litorale, il cui perpetuarsi genererà l'irreversibile compromissione delle forme d'accumulo presenti e della vegetazione relitta in assenza di interventi.

L'arenile della Sentina ha subito nel periodo 1985-2007 un processo di erosione variabile nello spazio e nel tempo il cui tasso sembra essersi attenuato a partire dall'anno 1995. Tuttavia l'erosione è ancora in atto ed ha causato la perdita di oltre 8 ettari di area della riserva a protezione integrale. Il forte tasso di erosione ha infatti ridotto la superficie delle forme di accumulo di circa 2,2 ha riducendone l'estensione attuale a circa 3,5 ha rispetto ai 5,8 ha del 1985.

L'implementazione del geodatabase e l'interpretazione delle ortofoto esaminate attraverso il *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* ha permesso di individuare 4 settori principali lungo l'arenile della Riserva Naturale della Sentina nei quali il sistema mostra evidenze morfologiche della tendenza all'ampliamento/contrazione della duna e della spiaggia emersa alternate. Tale tendenza evolutiva, dovuta allo scambio di sedimento tra la spiaggia e la duna, è stata analizzata in dettaglio, permettendo di individuare i tratti di litorale più vulnerabili, attuare interventi di ripascimento di somma urgenza utili per la tutela e la conservazione a breve termine degli habitat dunali retrostanti (SIC) presenti nell'area e raccogliere tutti i dati e le informazioni necessarie per l'implementazione di modelli numerici utili per simulare scenari di risanamento ambientale del litorale nel lungo periodo (ISPRA, 2009).

I risultati di questo lavoro costituiscono il punto di partenza dal quale le Autorità competenti per la salvaguardia della costa dovrebbero prendere spunto per pianificare gli interventi necessari per gestire il territorio in un'ottica di sviluppo sostenibile, cercando di prendere in considerazione le tendenze evolutive del litorale, le vocazioni naturalistiche, il crescente flusso turistico nell'area e lo svolgimento di attività economiche, soprattutto quelle legate alla portualità e la pesca. Quanto presentato nel presente lavoro costituisce un'esperienza innovativa nel panorama nazionale e, sebbene non vi sia ancora un quadro normativo chiaro relativo alla gestione dei sedimenti lungo la fascia costiera, e gli obblighi cui sono soggette le amministrazioni per conservare gli habitat naturali presenti sul loro territorio di loro competenza, la parte sperimentale dello studio ha contribuito ad intraprendere azioni di breve e lungo periodo sulla base di principi scientifici dando vita ad un processo decisionale innovativo che altre amministrazioni possono considerare come riferimento.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato preparato grazie al finanziamento del Comune di San Benedetto del Tronto ed del Comitato della Riserva Naturale di Sentina e con il contributo della Regione Emilia Romagna per le spese di stampa. Si ringraziano l'Assessore Paolo Canducci ed il Presidente Pietro D'Angelo per il supporto e la fiducia rinnovata in numerose occasioni nonché la concessione alla pubblicazione dei dati.

Bibliografia

- AA.VV. (1999) - *Atlante delle spiagge italiane - tav. 133-134, Ascoli Piceno-Giulianova*. MURST e CNR, Selca, Firenze.
- AA.VV. (2009) - *Repertorio Nazionale degli interventi di ripristino dunale*. In : il ripristino degli ecosistemi marino - costieri e la difesa delle coste sabbiose nelle aree protette. Rapporto ISPRA n.100: 393-674.
- Bianco P.M. e Menegoni G. (2009) - *Lineamenti floristico-vegetazionali del paesaggio costiero italiano*. In: il ripristino degli ecosistemi marino - costieri e la difesa delle coste sabbiose nelle aree protette. Rapporto ISPRA n.100: 75-182.
- Bisci C. e Cantalamessa G. (2008) - *Analisi delle caratteristiche morfologiche e sedimentologiche del litorale di pertinenza della Riserva Naturale Regionale Sentina e dei fondali ad esso antistanti entro le tre miglia nautiche*. Relazione tecnico-scientifica ad uso della Riserva Naturale Regionale Sentina, San Benedetto del Tronto.
- Bovina G. (2004) - *Professione geologo*. Notiziario dell'ordine dei geologi del Lazio, 5: 8-11.
- Bovina G, Callori di Vignale C. e Amodio M. (2003) - *L'approccio dell'ingegneria naturalistica nella conservazione degli ambienti dunali*. Manuale di ingegneria naturalistica, Vol.2(19) Regione Lazio, pp. 367-381.
- Bovina G., Cappucci S., Pallottini E. (2007) - *La gestion des biomasses vegetales de plage*. In: POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique de Phase B. pp. 37-54.
- Bovina G., Amodio M. e Callori di Vignale C. (2009) - *L'approccio naturalistico nella conservazione e restauro degli ambienti dunali*. In : il ripristino degli ecosistemi marino - costieri e la difesa delle coste sabbiose nelle aree protette. Rapporto ISPRA n.100: 393-674.
- Bracci G., Carli A., Conti A. e Sarti G. (2008) - *Recuperation et reconstruction des systemes de dunes dans la localite Gombo*. In: POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique de Phase C. Pp. 47-70.
- Brecciaroli B. e Onori L. (2009) - *Repertorio nazionale degli interventi di ripristino dunale*. In : il ripristino degli ecosistemi marino-costieri e la difesa delle coste sabbiose nelle aree protette. Rapporto ISPRA n.100: 393-674.
- Cappucci S., Lisi I., Modesti V., Scarcella D., Corsini S., Del Gizzo M. e Colonna P. (2008) - *Stima del trasporto solido del Fiume Magra*. Atti del Convegno Nazionale: "Coste: prevenire, programmare, pianificare". 15-18 Maggio, Maratea: pp. 10.
- Cappucci S., Pallottini E., Devoti S., La Monica G.B., Campo V. (2007) - *Caracterisation des dunes cotieres*. In: POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique de Phase B. Pp. 3-11.
- Cappucci S., Conti M., Valentini E., Bovina G., Lalli F., Pesarino V., Gabellini M., Corsini S. e Maffucci M. (2009) - *Coastal erosion and restoration of the Sentina Natural Reserve (Marche, Italy)*. In: Book of Abstract del 27° meeting di IAS: pp. 2.
- Carter R.W.G. (1980) - *Vegetation stabilisation and slope failure on eroding sand dunes*. Biological Conservation 18: 117-122.
- Carter R.W.G., Hesp P.A. e Nordstrom K.F. (1990) - *Coastal Dunes: Form and Process*. Nordstrom K.F., N.P. Psuty e R.W.G. Carter (eds.). John Wiley e Sons Ltd, pp.390.
- Carter R.W.G. e Wilson P. (1993) - *Aeolian Processes and Deposits in Northwest Ireland*. In: The Dynamics and Environmental Context of Aeolian Sedimentary Systems, Pye K.(ed.). Geological Society, Special Publication No. 72, London, pp. 173-190.
- Conti M., Valentini E., Bovina G., Gabellini M. e Cappucci S. (2009) - *Morphometric change and management hypothesis of coastal system within Sentina natural reserve (Marche, Italy)*. Epitome, FIST. Vol. 3: 136 – 137.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1987) - *Analisi ambientale quantitativa dei litorali marchigiani fra Gabicce ed Ancona. Livello del rischio naturale e del degrado, distribuzione dei sedimenti e loro possibile impiego per rinascimenti artificiali*. Boll. Soc. Geol. It, 106: 377-423.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1994) - *A model for determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy)*. Journal of Coastal Research, 10: 18-29.
- Davidson-Arnott R.G.D. (1988) - *Temporal and Spatial Controls on Beach/Dune Interaction, Long Point, Lake Erie*. In: Dune/beach interaction, Journal of Coastal Research - Special Issue 3: 131-136.
- Grosset S. e Heurtefeux H. (2008) - *Experimentation de differentes techniques de vegetalisation en milieu dunaire (Grande Maïre)*. In: POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des

- Dunes Naturelles. Cahier Technique de Phase C, pp. 149-167.
- Hallermeier R.J. (1978) - *Uses for calculated Limit Depth to beach Erosion*. Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers. New York, pp 1493-1512.
- Hallermeier R.J. (1981) - *A profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from wave climate*. Coastal Engineering, 4, pp. 253-277.
- IRPA (2008) - *Valutazione dello stato di compromissione delle dune costiere e ipotesi di ripristino morfologico con interventi e tecniche naturalistiche*. RRNS-DC-01.08. Pp.47.
- ISPRA (2008) - *Valutazione dello stato ambientale della zona umida retrodunale e individuazione dei criteri di progettazione per la salvaguardia/ripristino dell'habitat mediante ricostruzione-manutenzione di laghetti costieri permanenti o effimeri/stagionali*. RRNS-ZU-01.08. 112 pp.
- ISPRA (2009) - *Implementazione di modelli numerici per l'analisi dei problemi della fascia costiera prospiciente la riserva naturale della Sentina*. RRNS-FC-01.07. Pp. 77.
- Nota D.J.G. (1958) - *Sediments of the western Guyana shelf. Report of Orinoco shelf expedition*, 2. Mendedel, Landbomvhogedrool, Wegeningen, pp. 58-98.
- Pranzini E. (2009) - *Il colore della sabbia: percezione, caratterizzazione e compatibilità nel rinascimento artificiale delle spiagge*. Studi costieri 15: 89-108.
- Pye K. (1990) - *Physical and human influences on coastal dune development between the Ribble and Mersey estuaries, northwest England*. In: Nordstrom, K.F., N.P. Psuty & B. Carter (eds.): Coastal dunes. Form and processes. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 339-359.
- Psuty, N.P. (1988) - *Sediment budget and dune/beach interaction*. Journal of Coastal Research, Special Issue N° 3, Dune/Beach Interaction, edited by N.P. Psuty, pp.1- 4.
- Regione Marche (2005) - Piano di gestione integrata delle aree costiere. Elaborati Tecnici. Atti della Regione, deliberazione amministrativa n.169.
- Rinaldi M. e Simoncini C. (2006) - *Studio geomorfologico del Fiume Magra e del Fiume Vara finalizzato alla gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità*. Atti Giornate di Studio "Nuovi approcci per la comprensione dei processi fluviali e la gestione dei sedimenti. Applicazioni nel bacino del Magra." Sarzana, Ottobre 2006, Autorità di Bacino del Fiume Magra, pp. 93-109.
- Scottish Natural Heritage (2000) - *A guide to managing coastal erosion in beach/dune systems*. <http://www.snh.org.uk/publications/on-line/heritagemanagement/erosion/2.shtml>
- Simeoni U., Corbau C., Brunelli V., Gragnaniello S., Tessari U. (2008) - *Transport eolien*. In: POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique de Phase C, pp. 71-107.
- Siviglia A., Federici B., Becchi I. e Rinaldi M. (2004) - *Sediment transport and morphodynamics of the Tanaro River, North-western Italy*. In: Sediment Transfer through the Fluvial System, IAHS Publ. 288, 308-315.
- Speranza M., Venturi G., Monti A., Pritoni G., Merloni N., Pellizzari M., Ferroni L. (2008) - *Vegetalisation de la dune artificielle de Foce Bevano (Ravenna, Italie)*. In: POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique de Phase C, pp. 131-147.
- Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L. e Miller T.L. (2005) - *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2005-1304.
- Valentini E., Conti M., Bovina G., Cappucci S. e Gabellini M. (2010) - *Integrating ecological and hydrological features to assess Coastal Wetland restoration*. In EURAC book, 57, Analisi spazio - temporali: dinamiche e processi a confronto, pp. 113-122.
- Wal A. e Mc Manus J. (1993) - *Wind regime and sand transport on a coastal beach-dune complex, Tentsmuir, eastern Scotland*. In: The Dynamics and Environmental Context of Aeolian Sedimentary Systems, Pye K. (ed.), Geological Society, Special Publication No. 72, London. Pp.159-171.

Ricevuto il 16/04/2010, accettato il 06/11/2010.

Azioni di tutela delle dune costiere del Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli (Toscana settentrionale)

Luigi E. Cipriani¹, Antonio Perfetti², Enzo Pranzini³ e Giovanni Vitale³

¹ Regione Toscana D.G. Politiche Territoriali, Ambientali e della Mobilità - Via di Novoli, 26 - 50127 Firenze.

² Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli - Cascine Vecchie di San Rossore - 56122 Pisa.

³ Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze - Borgo Albizi 28 - 50123 Firenze.

Riassunto

L'ambiente delle dune costiere ha, nel Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli, una estensione ed una valenza ecologica e paesaggistica di primaria importanza. Nel presente lavoro, vengono illustrate le caratteristiche morfologiche e vegetazionali del sistema dunare, le pressioni che su esso si esercitano e che ne minacciano l'integrità, nonché le azioni intraprese per la sua salvaguardia. I risultati ottenuti dai vari interventi dimostrano l'efficacia di una gestione della fascia costiera basata sulla conoscenza dei processi in atto, su di un approccio olistico anche ai problemi puntuali e sulla comunicazione e il coinvolgimento dei portatori d'interesse locali.

Parole chiave: dune costiere, erosione dei litorali, difesa dei litorali, Direttiva Habitat, pulizia delle spiagge, ricostituzione delle dune, zone umide, comunicazione.

Abstract

Migliarino San Rossore Massaciuccoli Regional Park is characterised by the presence of a coastal dune system which, due to its large area and unique landscape and ecological value, represents a site of prime importance in Tuscany. In this paper, morphological and vegetation characteristics of coastal dunes are described, together with natural and human-induced pressures that threaten their preservation. Examples of coastal dune restoration are also analysed. Field results demonstrate the effectiveness of coastal zone management based on a) detailed knowledge of the coastal processes involved; b) holistic approach even to punctual problems; and c) communication and involvement of local stakeholders.

Keywords: *coastal dunes, coastal erosion, coastal restoration, Habitats Directive, beach cleaning, coastal dune restoration, wetlands, communication.*

Introduzione

I 63 km di costa della Toscana settentrionale, compresi tra la foce del Fiume Magra (Liguria) e Livorno, sono caratterizzati da ambienti sabbiosi per la maggior parte antropizzati. Il settore meridionale di questo tratto, tuttavia, mantiene la porzione più ampia di aree naturali di tutta la costa toscana, con due siti Natura 2000 ed il Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli, esteso su circa 23.000 ha. Ciò non toglie tuttavia, che anche in queste aree vi siano fattori che potrebbero pregiudicarne l'integrità ambientale, dovuti principalmente alla pressione antropica conseguente al turismo balneare e alla vicinanza di centri urbani di media grandezza (in

particolare Marina di Pisa e Viareggio), alla forte erosione costiera nella parte centrale del Parco, all'invasione delle specie esotiche, alla subsidenza e all'ingressione del cuneo salino. Nel presente studio vengono analizzati alcuni di questi fattori e illustrate le strategie messe in atto per limitarne l'effetto.

Inquadramento geografico e morfologia

Il Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli si sviluppa lungo la pianura costiera compresa fra Livorno e Viareggio (Fig. 1), costruita dagli apporti sedimentari del F. Arno e, in misura decisamente inferiore, da quelli del F. Serchio. I sedimenti portati dall'Arno alimentano un flusso sedimentario diretto verso sud, dalla foce fino a Livorno, e verso nord dalla foce fino a Marina di Pietrasanta (LU), 8 km a nord di Viareggio, dove vi è una convergenza con un flusso sedimentario opposto proveniente dalla foce del F. Magra (Pranzini, 2004). Buona parte dell'area di studio è costituita dal delta dell'Arno, formatosi negli ultimi 2500 anni grazie agli intensi apporti sedimentari di questo fiume, dovuti alla

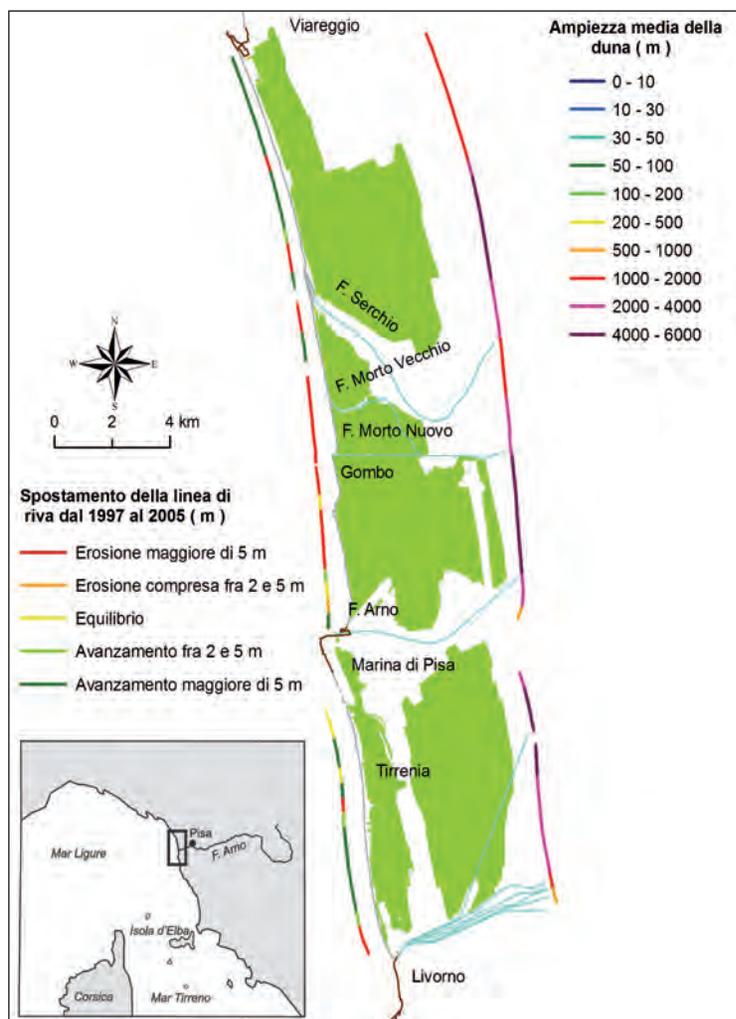


Figura 1 - Larghezza del sistema dunare ed evoluzione recente della spiaggia del Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli.

acqua salata di invadere le cosiddette "lame" (aree umide interdunari) durante le mareggiate.

Alle spalle del sistema dunare è presente una vasta zona depressa, caratterizzata da quote comprese tra -3 m e +1 m s.l.m.m. (Devoti et al., 2003), che ospita, fra l'altro, il Padule e Lago di Massaciuccoli, che fa parte del Parco e costituisce un'area palustre frequentata dall'uomo fin dal Neolitico (Caselli, 1981). Il Lago di Massaciuccoli,

La crescita, e le rare fasi di erosione, di questo apparato deltizio sono state studiate da Kukavcic e Pranzini (2003) sulla base di immagini Landsat e Ikonos e da Pranzini (2007) con dati Lidar, mettendo in evidenza come lo sviluppo e il calo demografico nel bacino dell'Arno abbiano influenzato le fasi di progradazione e di erosione del delta. Durante le fasi di rapido accrescimento si svilupparono numerosi cordoni dunari di quota piuttosto bassa, mentre nelle fasi di lenta progradazione i cordoni, in numero inferiore, poterono svilupparsi in altezza (Fig. 2).

L'ampiezza del sistema dunare raggiunge anche i 5800 m (Fig. 1) e le singole dune, con quota media di circa $2 \div 3$ m, arrivano anche a superare gli 8 m nei tratti in cui la stabilità della costa ha consentito il loro sviluppo verticale, senza che nuovi cordoni andassero ad intercettare il flusso di sabbia proveniente dalla spiaggia, come previsto dal modello concettuale di Psuty (1992). L'erosione della cuspidè deltizia, iniziata nella seconda metà dell'800 (Toniole, 1910), ha fatto sì che il sistema cordoni/bassi interdunari fosse aperto verso mare, consentendo quindi all'

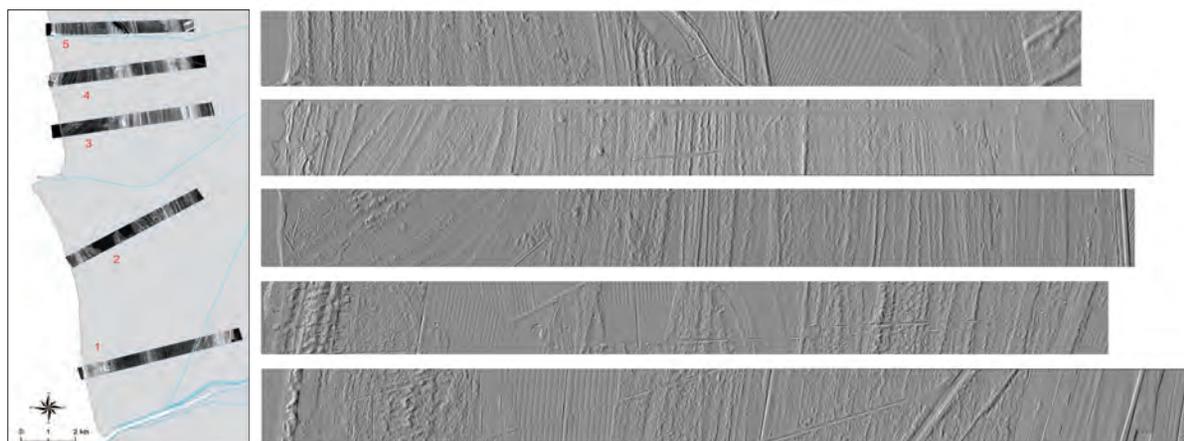


Figura 2 - I cordoni dunari del delta dell'Arno in shaded relief prodotti da dati Lidar (da Pranzini, 2007; modif.)

che si estende per circa 12.100 ha tra il Fosso Camaiole, a nord, e il Fiume Serchio, a Sud, mantiene assieme al Padule di Fucecchio l'unica zona umida interna estesa dei molti stagni e acquitrini che si rinvenivano lungo tutta la pianura fino al XVI secolo d.C. (Azzari, 1993).

Dinamica evolutiva della costa

L'erosione costiera è iniziata all'apice del delta del Fiume Arno ed è andata progressivamente ad interessare tratti di litorale sempre più ampi (Pranzini, 1989). Dai primissimi anni del XX secolo si è provveduto a costruire difese costiere a protezione dell'abitato di Marina di Pisa, fino alla situazione attuale, in cui i due chilometri di costa antistanti il paese sono difesi da 10 scogliere parallele pressoché continue, da una scogliera aderente in massi naturali e da alcuni pennelli che collegano le opere aderenti a quelle distaccate: ogni km di costa è difeso da 2.3 km di scogliere (Aminti et al., 2003). Il lobo settentrionale del delta, lasciato libero di erodersi per l'assenza di insediamenti, è arretrato di circa 1300 m dal 1881 ad oggi in prossimità della foce, cosa che ha determinato una asimmetria rispetto a quest'ultima e ha reso necessaria la costruzione di un pennello sulla sponda destra, per evitare che l'Arno sfociasse in una zona riparata dal "promontorio" di Marina di Pisa, con conseguenti problemi di insabbiamento della foce e difficoltà di smaltimento delle piene (Pranzini, 2008).

Altri interventi di difesa sono stati effettuati al Gombo, dove la forte erosione stava riducendo la spiaggia antistante la Villa Presidenziale. Qui sono state costruite, fra il 1962 ed il 1965, cinque scogliere parallele, poi modificate nel 1985, che hanno portato all'ampliamento dell'arenile ma anche incentivato l'erosione sul tratto di litorale posto sottoflutto (Bowman e Pranzini, 2003).

Più a nord è stata armata la foce di un canale artificiale, detto Fiume Morto Nuovo, con lo scopo di impedirne l'insabbiamento ma con il risultato di interrompere il flusso sedimentario diretto verso nord. La struttura ha favorito la deposizione della sabbia su di un breve tratto di litorale posto sopraflutto, ma ha incentivato l'erosione sottoflutto, dove il tasso di arretramento è ora di circa 5 m/anno (Cipriani et al., 2001).

Sulla spiaggia de Le Lame, dove, come abbiamo visto, le mareggiate favorivano l'ingressione di acqua salata, rendendo salmastri questi specchi di acqua dolce, facendo scomparire l'originaria vegetazione igrofila, sono stati realizzati, tra il 2001 ed il 2003, nove pennelli, i più meridionali lunghi 60 m, gli altri 80 m. Di questi ultimi, quattro sono estesi verso il largo come setti sommersi per altri 80-90 m (Fig. 3). In aggiunta, è stato effettuato un ripascimento con 65.000 m³ di ghiaia nel tratto vicino a Bocca d'Arno, nelle tre celle identificate dai pennelli più meridionali.

Fra il 2003, data in cui è terminato l'intervento, ed il 2007, nella zona si è ottenuta l'inversione del trend erosivo che aveva caratterizzato il periodo precedente. Oltre all'avanzamento dovuto al ripascimento (nelle celle in cui è stato effettuato) si riscontrano dei tassi di spostamento della linea di riva positivi, laddove erano negativi. I trat



Figura 3 - Pennelli emersi, prolungati a mare come setti sommersi, e ripascimento in ghiaia per la difesa della spiaggia de Le Lame.

ti posti sottoflutto ai pennelli sono rimasti in erosione, anche se con tassi decisamente inferiori a quelli mostrati negli anni precedenti (Pranzini, 2008).

L'intervento più recente realizzato sul litorale del Parco consiste nella costruzione di un tombolo artificiale in geotubi per collegare in modo stabile le scogliere del Gombo alla terraferma (Fig. 4), in modo da evitare che il loro distacco possa innescare la formazione di un'ampia insenatura che avrebbe come punti fissi il pennello

di foce dell'Arno e i moli guardiani del Fiume Morto Nuovo, cosa che sarebbe accompagnata da un notevole arretramento della costa nella parte centrale.

Ecosistemi

Gli ecosistemi dunari costieri presenti nel Parco, a prevalente vegetazione erbacea-arbustiva, costituiscono uno dei più estesi esempi in Italia ed il più esteso della Toscana. Essi comprendono 15 habitat di interesse comunitario secondo la definizione prevalentemente vegetazionale della direttiva Habitat (92/43/CEE e succ. mod.; vedi Tab. 1). Tali habitat, in assenza di dinamiche erosive o progressive della costa, formano una successione catenale di ecosistemi i cui determinanti ecologici principali sono la distanza dal mare, la soggiacenza della falda di acqua dolce,



Figura 4 - Schema del progetto di costruzione di un tombolo artificiale in geotubi e dei setti sommersi al Gombo (a sinistra) e radice del geotubo settentrionale (in alto).

Tabella 1 - Habitat d'interesse conservazionistico presenti nelle aree dunari ed interdunari della Toscana settentrionale.

Habitat di interesse comunitario o prioritario* (nome di cui alla Direttiva 92/43/CEE, DM 20 gennaio 1999)	Codice Corine Biotopes	Codice Natura 2000
Vegetazione annua delle linee di deposito marine	17,2	1210
Dune mobili embrionali	16,211	2110
Dune mobili del cordone litorale con presenza di <i>Ammophila arenaria</i> ("dune bianche")	16,212	2120
Dune fisse del litorale del <i>C. maritima</i> e	16,223	2210
Dune con prati dei <i>Malcolmietalia</i>	16,228	2230
Dune con prati dei <i>Brachypodietalia</i> e vegetazione annua	16,229	2240
Dune costiere con <i>Juniperus</i> spp.*	16,27	2250
Dune con formazioni arboree a dominanza di <i>P. pinea</i> e/o <i>P. pinaster</i> *	16,29 x 42,8	2270
Pascoli inondati mediterranei (<i>Juncetalia maritimi</i>)	15,5	1410
Depressioni umide interdunari	16,31	2190
Acque oligo-mesotrofe calcaree con vegetazione bentica di <i>Chara</i> sp.pl.	(22,12 o 22,15) x 22,44	3140
Laghi eutrofici naturali con vegetazione del Magnopotamion o Hydrocharition	22,13 x (22,41 o 22,421)	3150
Praterie umide mediterranee con piante erbacee alte del <i>Molinio-Holoschoenion</i>	37,4	6420
Paludi calcaree con <i>C. mariscus</i> e specie del <i>C. davallianae</i> *	53,3	7210
Foreste alluvionali di <i>Alnus glutinosa</i> e <i>Fraxinus excelsior</i> (<i>Alno - Padion</i> , <i>Alnion incanae</i> , <i>Salicion albae</i>)*	44,3 e 44,2	91E0

l'altezza dei rilievi dunari, le diverse pressioni antropiche (vedi sotto), il regime dei venti e l'apporto sedimentario netto. Quest'ultimo fattore, in particolare, determina l'erosione o l'accrescimento della spiaggia e dei cordoni dunari. A questa diversità ecosistemica sono legati numerosi servizi e funzioni, che le azioni di conservazione qui descritte vogliono tutelare. Queste sono dirette essenzialmente al riequilibrio della dinamica costiera, alla formazione di nuovo suolo, al contrasto dell'avanzamento del cuneo salino e al mantenimento di una specifica diversità biologica che forma ecosistemi a mosaico in stretta associazione con la seguente tendenza generale: dal mare verso l'interno sono presenti formazioni erbacee rade alo-nitrofile dell'arenile e della zona di anteduna con *Cakile maritima*, *Euphorbia peplis*, ecc., passando poi a formazioni di duna mobile con *Agropyron junceum* seguite dagli ammoreti ad *Ammophila arenaria* ed infine, sulle dune stabilizzate, elicriseti ad *Helicrisum stoechas* e l'habitat prioritario costituito dai ginepri costieri a ginepro coccolone *Juniperus oxycedrus* subsp. *Macrocarpa*. In essi vi si trovano numerose specie endemiche o rare di provenienza corologica diversificata: Mediterranea, Centroeuropea, Atlantica e Boreale, a causa delle vicende climatiche storiche passate, della grande disponibilità idrica, della ricchezza microclimatica e per la straordinaria bassa antropizzazione se messa in relazione con le altre coste non rocciose mediterranee europee dove, molto raramente, potremmo incontrare coste sabbiose estese per molti chilometri senza insediamenti ed infrastrutture. Tra le numerose specie, particolarmente significative vi sono la *Periploca graeca* che è un'entità termoigrofila costiera comune nel Mar Nero, *Eleocharis geniculata* specie rarissima per i litorali italiani; le specie endemiche come *Stachys recta* var. *psammofila* (litorale tirrenico), *Solidago litoralis*, *Centaurea subciliata* (litorali versiliesi-pisani) con areale particolarmente ridotto per l'uso balneare delle spiagge.

I valori paesaggistici, associati anche al clima salubre ed in generale alla presenza del mare, rendono poi estremamente apprezzati questi ambienti con uno straordinario riflesso sull'economia dell'area costiera e sulla necessità della loro conservazione. Gli impatti sugli ecosistemi legati alla concentrazione di attività umane sono quindi molto intensi, ed in particolare legati al flusso turistico che, nei mesi primaverili-estivi, porta ad un uso massivo di tali aree. In effetti, come detto sopra, i valori e le funzioni degli ecosistemi sopra sommariamente descritti, a causa dell'antropizzazione del suolo delle aree costiere, si sono di fatto conservati con una certa completezza quasi solo nei 32 km meridionali della Toscana settentrionale tutelati, negli ultimi trentuno anni, dall'istituzione del Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli. Le tendenze evolutive degli ecosistemi dunari ed interdunari costieri ancora presenti, sono determinate da pressioni biologiche, fisiche ed antropiche che, in maniera dinamica, producono specifici processi, molto spesso regolati da feedback positivi e negativi, che rendono difficile la valutazione dei loro effetti sul lungo termine.

Conservazione della Natura

Negli ultimi cinque anni sono stati eseguiti interventi sulle spiagge e sulle dune del Parco per iniziare un percorso di restauro che inverta i fenomeni di degrado sopradescritti. Essi sono riassumibili come segue:

1. *Riduzione del sovracalpestio*. La razionalizzazione degli attraversamenti che è stata realizzata con la chiusura dell'80% dei sentieri spontanei precedentemente presenti e attrezzando 26 sentieri, di cui 20 realizzati direttamente dall'Ente Parco MSRM con finanziamenti propri, della Regione Toscana e della Unione Europea, ha portato ad una consistente riduzione del sovra calpestio. La Figura 5 mostra visivamente la diminuzione della densità di sentieramento.

La sola superficie dei sentieri chiusi è di almeno 4 ha su circa 80 ha di aree dunari, e il monitoraggio messo in atto ha dimostrato la pronta reazione della vegetazione, che tende ad eliminare i numerosi *blowout* e spianamenti dunari, dando così avvio, dove l'apporto sedimentario lo consente, al rimodellamento dunare e alla ripresa della successione vegetale verso cenosi meno resistenti al calpestio. A titolo d'esempio il n° di specie psammofile in queste aree è passato da 0,25 specie/m² prima degli interventi (2006) a 0,52 specie/m² nella seconda stagione vegetativa successiva ai lavori (Fig. 6, Lombardi, 2010).



Figura 5 - Vista aerea di alcune delle aree dunari sottoposte ad intenso sovracalpestio prima degli interventi (a sinistra) e due anni dopo la chiusura dell'80 % dei sentieri (Archivio Parco, sinistra e Foto Luca Puglisi, a destra).

2. *Eliminazione delle cenosi esotiche*. Numerose sono le specie esotiche presenti negli ecosistemi litoranei. Alcune di esse, talora, assumono un carattere invasivo e pongono il problema della conservazione della biodiversità di tali zone. Nelle aree di progetto la diffusione di *Amorpha fruticosa* (leguminosa nordamericana) nelle zone umide retrodunari e della *Yucca gloriosa* (agavacea nordamericana) aveva condotto alla sostituzione delle cenosi locali, con effetti negativi anche nella evoluzione delle comunità verso stadi seriali più maturi.



Figura 6 - Vista a terra degli effetti del sovracalpestio sulla crescita della vegetazione psammofila (a sinistra) e ricolonizzazione della vegetazione dopo dell'intervento di chiusura del medesimo sentiero già nella prima stagione vegetativa post-intervento (Foto Leonardo Lombardi).

In particolare, ma non solo, la loro diffusione avveniva a discapito degli habitat d'interesse conservazionistico prioritario (*sensu* direttiva Habitat) rispettivamente delle Paludi calcaree con *C. mariscus* e specie del *C. davaliana* e di Dune costiere con *Juniperus* spp.

Sono state quindi eliminate 5,5 ha di cenosi in cui era dominante o presente l'*Amorpha fruticosa* (Fig. 7 e 8) nelle aree retrodunari della Riserva Naturale della Lecciona (Viareggio) e 8 ha di cenosi con presenza di *Y. gloriosa* (tra Viareggio e Bocca di Serchio). Tale operazione, avvenuta tramite l'asportazione sia della parte aerea sia di quella ipogea delle piante, ha avuto un buon successo per l'*A. fruticosa* (meno del 2% di copertura nella seconda stagione vegetativa dopo l'intervento), mentre non ha avuto il successo sperato nel caso della *Y. gloriosa* (oltre il 30% di copertura nella seconda stagione vegetativa dopo l'intervento) nelle aree di monitoraggio. Per quest'ultima operazione è previsto nel Piano di conservazione post-LIFE (Progetto LIFE Dunetoscia in www.parcosanrossore.org) una serie di interventi con asportazione più profonda dell'apparato radicale nel terreno (Perfetti, 2010a; Perfetti et al. 2011; Logli, 2010; Lombardi, 2010).



Figura 7 - Cenosi di zona umida retrodunare invasa dall'*Amorpha fruticosa* (Foto Leonardo Lombardi).

3. *Restauro delle zone umide interdunari.* Circa 6 ha di zone umide retrodunari sono stati portati a stadi seriali giovanili (con acque aperte) diminuendo la quota del piano di campagna fino ad intercettare la falda superficiale per la maggioranza dei mesi dell'anno (Fig. 8).

Quest'ultima operazione ha avuto anche un effetto indiretto di recupero a scala ampia delle zone umide dulciacquicole perse per l'erosione sul fronte mare o per le bonifiche e l'eutrofizzazione delle zone umide interne. Di fatto, sono numerose le estinzioni di specie vegetali igrofile, di anfibi, di insetti e di molluschi in queste aree.



Figura 8 - Zona umida ricreata dopo l'intervento di controllo dell'*Amorpha fruticosa* (Foto Leonardo Lombardi).

Qui, invece, le condizioni ristabilite di oligo- o mesotrofia con acque aperte hanno ricreato le condizioni per una loro diffusione massiva (Perfetti, 2010a). A titolo di esempio, durante il monitoraggio intrapreso con il progetto LIFE Dunetosca, sono stati descritti due nuovi habitat per il SIC Dune Litoranee di Torre del Lago: cod. 3140 e 3150 nella Tabella 1 (Lombardi, 2010), mentre 3 specie di anfibi, precedentemente non segnalati, sono state censite con ampie popolazioni riproduttive; inoltre, alcune specie di uccelli acquatici hanno prontamente colonizzato tali nuovi habitat (Colligiani e Puglisi, 2010; Zuffi, 2010).

4. *Ricostituzione di aree dunari.* E' stata ricostituita la continuità dunare con 69 interventi di chiusura dei sentieri e 400 m di microinterventi di ingegneria naturalistica (Figg. 9, 10, 11 e 12). Inoltre, sono stati ricostituiti grandi rilievi dunari in tre diverse aree (uno nella Riserva Naturale della Lecciona, a Viareggio, e due a San Rossore) (Perfetti, 2010a; Porchera, 2010).



Figura 9 - Intervento di ricostituzione della duna in un'area intensamente frequentata (a sinistra). Le viminate impediscono il passaggio e innescano l'accumulo di sabbia come farebbero i tronchi spiaggiati. La stessa zona dopo pochi mesi (a destra).



Figura 10 - Duna erosa per l'effetto del trasporto del vento (*blowout*) innescato in un'incisione provocata dall'uso turistico dell'area; a destra la situazione successiva all'intervento (Foto Oreste Giorgetti).

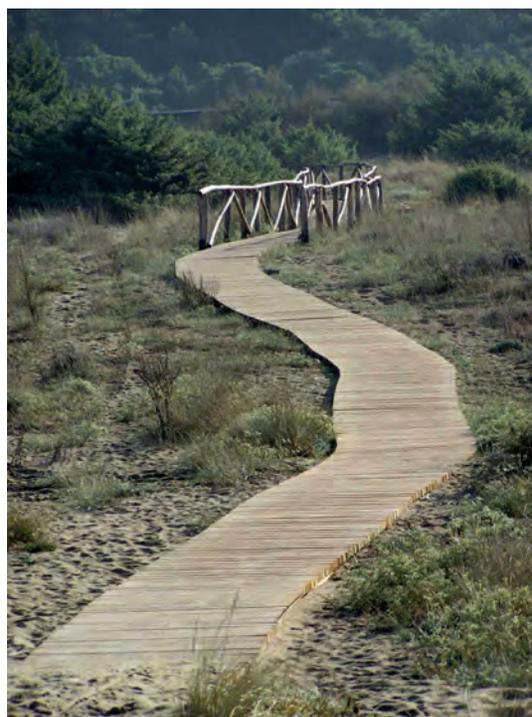


Figura 11 - Sentiero a terra per indirizzare e concentrare il calpestio in area dunare (Foto Andrea Porchera).



Figura 12 - Sentiero sopraelevato per ovviare agli effetti mostrati in Figura 10 (Foto Oreste Giorgetti).

5. *Pulizia delle spiagge.* Approvazione da parte dell'Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli di un documento con valore legale perché collegato agli strumenti pianificatori di governo dell'area protetta, con l'adozione di misure per la pulizia delle spiagge che riducano fortemente la pulizia meccanizzata (Fig. 13 e 14) ed i suoi effetti nelle aree di Riserva Naturale e nelle zone con stabilimenti temporanei del Parco (Perfetti et al. 2010).

6. *Comunicazione.* Sono state organizzate, tra il gennaio 2006 ed il dicembre 2009, decine di incontri pubblici locali e nazionali, sia con finalità divulgative che scientifiche. Inoltre, sono state organizzate attività di volontariato (Fig. 15), costruito un sito internet, posti oltre 130 cartelli sia d'informazione che indicativi su norme e orientamento e consegnati e raccolti quasi 450 questionari per informare e coinvolgere l'opinione pubblica.

Nella parte meridionale del Parco, invece, sono state avviate già prima del progetto LIFE azioni di tutela come quelle che riguardano alcune decine di ettari di dune a Tirrenia da parte del WWF di Pisa e dell'adozione simbolica delle dune di Calambrone da parte delle scuole della zona (Comune di Pisa).



Figura 13 - Effetti di scavo al piede dunare e di eliminazione dell'associazione vegetale pioniera del cakileto dovuti alle operazioni meccanizzate di pulizia e di transito meccanizzato in area dunare e di spiaggia (Foto Leonardo Lombardi).



Figura 14 - Pulizia meccanizzata della spiaggia (Foto Andrea Porchera).



Figura 15 - Costruzione di "fascinate artigianali" da parte di volontari per innescare lo sviluppo di dune incipienti in luogo dell'utilizzo di mezzi meccanici per la "pulizia" che eliminano le dinamiche naturali di evoluzione dunare.

7. Pianificazione. Gli interventi descritti si inseriscono nella grande differenziazione di antropizzazione delle coste del Parco (Tav. 1). La pianificazione vigente di per sé di fatto elimina la possibilità di costruzione di edifici lungo circa 16 km di costa, ed elimina la possibilità di ampliamenti di volume nelle aree dunari residuali in zone parzialmente urbanizzate. Inoltre fa proprie le prescrizioni delle Linee Guida per la Pulizia delle Spiagge all'interno dei singoli Piani di Gestione (Perfetti, 2010a).

Gli effetti di tali operazioni sono monitorati da un sistema di stazioni fisse (oltre 70) e di transetti (circa 10 km) dove, dal 2006, vengono rilevati numerosi parametri, quali la diffusione di specie esotiche, la copertura e la densità di specie (n/m^2) delle specie vegetali ed animali, la produttività di alcune specie animali, la sperimentazione di nuove tecniche di monitoraggio basato su parametri fisiologici (Zuffi, 2010), soggiacenza e conducibilità elettrica delle acque superficiali. Inoltre, è consegnato periodicamente un questionario a un campione casuale di frequentatori delle spiagge per verificarne l'evoluzione della conoscenza delle problematiche ambientali e del senso di responsabilità verso le tematiche ambientali (vedi p.e. Perfetti et al., 2011).

Tale complesso di misure, attuate su circa 8 km di costa e oltre 80 ha di habitat dunari, consente di avere un quadro dinamico dell'evoluzione della vitalità degli ecosistemi e delle specie, così come richiesto dalle normative che discendono dalla direttiva Habitat e costituisce un raro esempio in Italia di restauro ecologico e monitoraggio a lungo termine per fini di gestione e conservazione della biodiversità (Perfetti, 2010a). In altri paesi europei, soprattutto in Francia, Olanda, Gran Bretagna e Spagna esistono esempi simili con tradizioni applicative ben più antiche; si veda ad esempio: AA.VV. 2001, 2006; Esselink et al., 2003; Houston et al., 2001; Rooney, 2010; Skovog Naturstyrelsen, 2003; van Duinen et al., 2006; Vega de Seoane et al., 2007. Ad oggi, tali rilevazioni hanno consentito la stima dei successi e dei limiti delle azioni poste in campo, costituendo al contempo una guida e un valido mezzo di comunicazione delle tematiche ambientali da parte del Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli (Fig. 16).

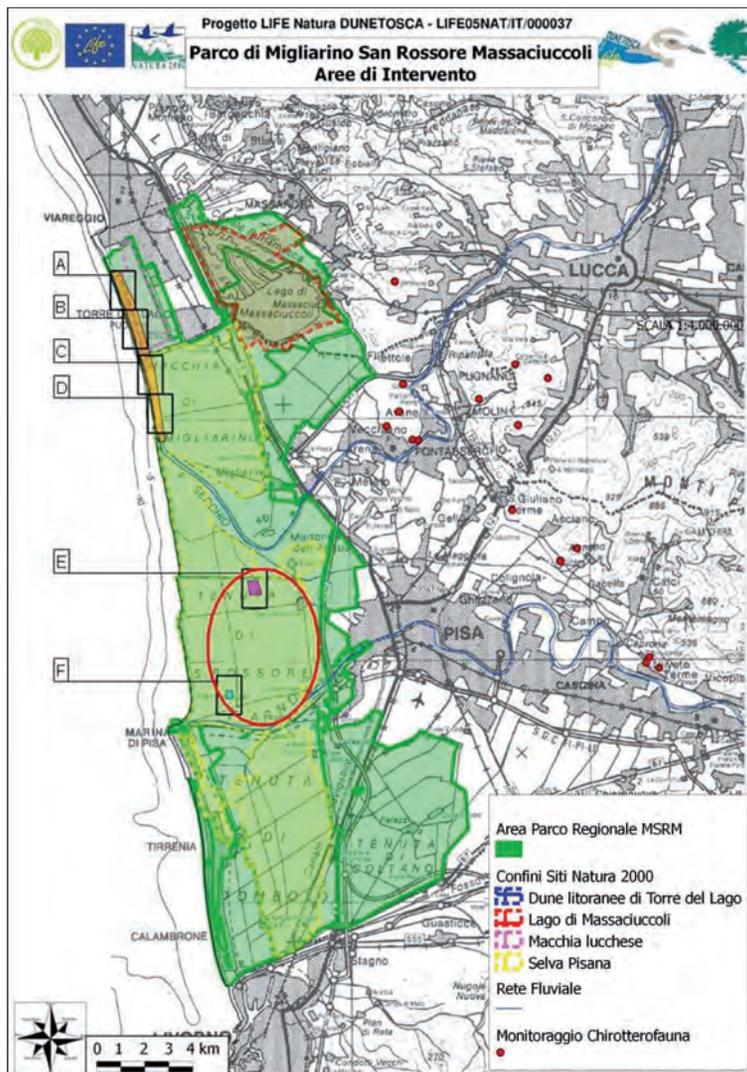


Figura 16 - Tavola con le aree di intervento: A, B, C, D sono le zone con il maggior numero di interventi in ambito dunare descritti nel presente lavoro. In particolare:
 A ÷ D = riduzione del sovracalpestio, eliminazione delle cenosi esotiche, ricostruzione di aree dunari, Linee guida per la pulizia delle spiagge, pianificazione.
 A ÷ B = restauro delle aree interdunari.
 A ÷ F = comunicazione.
 E ÷ F = l'ellisse ed i punti si riferiscono alle aree d'intervento per la conservazione di un'importante popolazione di chiroterro, *Rhinolophus ferrumequinum*, e ad altri interventi non descritti nel presente lavoro (restauro zone umide interne a compensazione della loro perdita per l'erosione della costa di San Rossore).

Zona	Lungh. (km)	N° sent.	N°sent. /km	Utilizzo	Valori naturali
1. Confine Nord del Parco - Marina di Levante	0,73	0*	-	- Stabilimenti balneari fissi, - strada asfaltata con esercizi commerciali che divide longitudinalmente le aree dunari con vegetazione dunare consolidata,	- Spiagge naturali stabili o in avanzamento, artificializzazione delle aree dunari, - presenza significativa di aree retrodunari umide con Habitat d'importanza comunitaria prioritari
2. Marina di Levante - Ris. Nat. della Lecciona (nord)	0,17	2	11,7	- Uno stabilimento temporaneo in concessione - uso abusivo delle aree dunari. - strada asfaltata con esercizi commerciali che divide longitudinalmente le aree dunari con vegetazione dunare consolidata, - danni rilevanti derivanti da pulizia meccanizzata spiagge.	- Spiagge naturali stabili o in avanzamento, artificializzazione parziale delle aree dunari, - presenza significativa di aree dunari e retrodunari con Habitat d'importanza comunitaria prioritari: mancano gli habitat di anteduna
3. Ris. Nat. della Lecciona	2,22	4	1,8	- Spiaggia naturale ad uso libero. - uso abusivo delle aree dunari. - massicciata stradale senza asfalto che divide longitudinalmente le aree dunari con vegetazione dunare consolidata, - danni contenuti, derivanti da pulizia meccanizzata spiagge.	- Spiagge naturali stabili o in avanzamento, serie completa della vegetazione dunare, - presenza significativa di aree dunari e retrodunari con Habitat d'importanza comunitaria prioritari: manca la vegetazione pioniera
4. Ris. Nat. della Lecciona (sud) - Stabilimenti temporanei di Marina di Torre del Lago (sud)	0,9	7	7,8	- Stabilimenti temporanei in concessione in gran parte dell'area, - strada asfaltata con esercizi commerciali che divide longitudinalmente le aree dunari con vegetazione dunare consolidata, - danni importanti, derivanti da pulizia meccanizzata spiagge.	- Spiagge naturali stabili o in avanzamento, artificializzazione parziale delle aree dunari, - presenza significativa di aree dunari e retrodunari con Habitat d'importanza comunitaria prioritari: manca la prima parte delle aree dunari
5. Stabilimenti fissi di Marina di Torre del Lago - Ris. Nat. della Bufalina (nord)	0,48	0*	-	- Stabilimenti balneari fissi, - strada asfaltata con esercizi commerciali che divide longitudinalmente le aree dunari con vegetazione dunare consolidata.	- Spiagge naturali stabili o in avanzamento, artificializzazione delle aree dunari, - presenza significativa di Habitat d'importanza comunitaria prioritari
6. Ris. Nat. della Bufalina	1,57	6	3,8	- Spiaggia naturale ad uso libero. - uso abusivo delle aree dunari. - massicciata stradale senza asfalto che divide longitudinalmente le aree dunari con vegetazione dunare consolidata, - danni importanti, derivanti da pulizia meccanizzata spiagge.	- Spiagge naturali stabili, serie completa della vegetazione dunare, - presenza significativa di aree dunari con Habitat d'importanza comunitaria prioritari: manca la vegetazione pioniera
7. Ris. Nat. Bufalina (sud) - Ris. Nat. Bocca di Serchio	0,97	5	5,2	- Spiaggia naturale ad uso libero, - uso abusivo delle aree dunari, - massicciata stradale asfaltata e parcheggi che dividono longitudinalmente le aree dunari con vegetazione dunare consolidata, - danni importanti, derivanti da pulizia meccanizzata spiagge.	- Spiagge naturali stabili o in avanzamento, serie completa della vegetazione dunare, - presenza significativa di aree dunari con Habitat d'importanza comunitaria prioritari: manca la vegetazione pioniera

8. Ris. Nat. Bocca di Serchio (nord) - Penisola dei Gabbiani (sud)	1,44	1	0,7	- Spiaggia naturale ad uso libero, - uso abusivo delle aree dunari/lagunari, - massicciata stradale senza asfalto che attraversa longitudinalmente e artificializza le aree dunari/umide, - danni importanti, derivanti da pulizia meccanizzata spiagge.	- Spiagge naturali stabili, serie completa della vegetazione dunare, - presenza significativa di aree dunari con Habitat d'importanza comunitaria prioritari: è molto arretrata e ridotta la vegetazione pioniera - barene naturali ad alta dinamicità in area fluviale terminale, - importante sito per l'ornitofauna.
9. Penisola dei Gabbiani (sud) - F. Morto Nuovo	5,27	2	0,4	- Spiaggia naturale senza uso antropico, - presenza saltuaria di imbarcazioni ancorate a riva e uso pervasivo delle spiagge, - presenza di rifiuti spiaggiati.	- Spiagge naturali, serie incompleta della vegetazione dunare con ampie modifiche dovute alla forte erosione, - presenza significativa di aree dunari con Habitat d'importanza comunitaria prioritari: materiale naturale spiaggiato non asportato.
10. F. Morto Nuovo - Bocca d'Ano (nord)	6,52	1	0,2	- Spiaggia in parte artificializzate per la protezione della costa senza uso antropico, - presenza saltuaria di imbarcazioni ancorate a riva e uso abusivo delle spiagge, - presenza di rifiuti spiaggiati.	- Serie incompleta della vegetazione dunare con ampie modifiche dovute alla forte erosione e all'artificializzazione delle coste, - presenza significativa di aree dunari con Habitat d'importanza comunitaria prioritari: materiale naturale spiaggiato non asportato.
11. Bocca d'Ano (sud) - Vione della Bigattiera	4,2	30*	-	- Spiagge artificiali, - stabilimenti fissi, - strada provinciale ed esercizi commerciali nelle "aree retrodunari"	- Spiaggia in erosione protetta da elementi rigidi di difesa, - presenza di habitat naturali a partire dalla vegetazione mediterranea consolidata retrodunare.
12. Vione della Bigattiera - fine zona attrezzature balneari (Tirrenia)	3,4	41*	-	- Stabilimenti balneari fissi, - strada asfaltata con esercizi commerciali che divide longitudinalmente con vegetazione dunare consolidata.	- Spiagge naturali stabili o in erosione, artificializzazione delle aree dunari, - presenza significativa di aree retrodunari umide con Habitat d'importanza comunitaria prioritari.
13. Fine zona attrezzature balneari (Tirrenia) - Scolmatore d'Ano	3,6	25	0,69	- Stabilimenti temporanei in concessione in gran parte dell'area, - artificializzazione parziale delle aree dunari con stabilimenti e le colonie di epoca fascista, - strada asfaltata con esercizi commerciali che divide longitudinalmente le aree dunari con vegetazione dunare consolidata, - danni importanti, derivanti da pulizia meccanizzata spiagge e dall'uso delle aree dunari.	- Spiagge naturali stabili o in erosione, - presenza significativa di aree dunari di grande dimensione con Habitat d'importanza comunitaria prioritari: manca la prima parte delle aree dunari
Intero tratto dal confine nord del Parco - Scolmatore d'Ano	31,527**	53	-	-	-

Tavola 1 - Caratterizzazione gestionale delle aree presenti nelle dune del Parco Regionale MSRM.

* zone dunari urbanizzate con stabilimenti fissi e aree dunari pressoché assenti (Marina di Levante e Marina di Torre del Lago - Viareggio), con scogliere artificiali (Marina di Pisa e 30 stabilimenti - Pisa); o con aree dunari delimitate verso mare dagli stabilimenti (Tirrenia e 41 stabilimenti - Pisa).

** 22,5 km sono le aree dunari attraversate da sentieri.

Conclusioni

Il Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli, con i suoi 23.000 ha di estensione ed un fronte mare lungo 32 km (a cui sono da aggiungere i 2,2 km di Marina di Pisa - tecnicamente fuori dal Parco ma di cui parliamo), costituisce una realtà ambientale ed economica di valenza nazionale. Il suo valore è ancora più elevato se si considera che è inserito in un'area intensamente sfruttata da agricoltura, industria, turismo e sede di importanti insediamenti antropici, come Marina di Pisa e Viareggio, elementi tutti che possono minacciarne l'integrità. E' per questo che da tempo sono state adottate misure ed azioni volte al recupero ambientale delle zone che più sono state oggetto di pressione antropica e strategie di gestione idonee alla salvaguardia delle diverse componenti biotiche ed abiotiche e, ancor più importante, alla loro integrazione.

Gli interventi normativi e bioingegneristici sono stati sempre accompagnati da azioni di divulgazione e di partecipazione degli stakeholders, rendendo più facile il recepimento delle direttive e delle restrizioni che è stato necessario attuare.

Un monitoraggio continuo dell'evoluzione fisica e biologica del "sistema" parco, unitamente alla valutazione della risposta e della percezione dei frequentatori, ha consentito di valutare positivamente le azioni intraprese e di implementare quelle che hanno inizialmente dato risultati meno incisivi.

Ad oggi, sono numerose le iniziative che proseguono queste azioni sia per ciò che concerne la difesa costiera, impostata a criteri di sostenibilità che per il monitoraggio, la manutenzione ed il restauro ecologico degli habitat dunari come i progetti strategici COREM e RESMAR del programma transfrontaliero Italia - Francia Marittimo, la costituzione di una rete italiana sulla gestione e conservazione degli ambienti dunari (Perfetti, 2010b) ed il tentativo di allargare il partenariato per i futuri progetti a varie aree dunari toscane con interventi sinergici nell'organizzazione, nell'esperienza e nell'efficacia delle azioni messe in campo per la conservazione degli ecosistemi costieri della Toscana.

Bibliografia

- AA.VV. (2001) - *La restauración del las dumas litorales de la devesa de l'Albufera de Valencia*. Ajuntament de Valencia, 68 pp.
- AA.VV. (2006) - *Progetto LIFE Natura Azioni concertate per la salvaguardia del litorale veneto* - Gestione degli habitat nei siti natura 2000. Veneto Agricoltura e Regione Veneto, 240 pp.
- Aminti P.L., Cipriani L.E. e Pranzini E. (2003) - *'Back to the beach': converting seawalls into gravel beaches*. In *Soft Shore Protection, Coastal Systems and Continental Margins Volume 1*, C. Goudas et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, 2003, pp 261-274.
- Bartolini C. e Pranzini E. (1979) - *Le alterazioni del bilancio sedimentario dei litorali toscani*. Convegno sulla Difesa del suolo. Firenze, maggio 1979, 8 pp.
- Bowman, D., Pranzini, E. (2003) - *Reversed response within a segmented detached breakwater - the Gombo case, Tuscany coast, Italy*. *Coastal Engineering*, 49: 263-274.
- Caselli R. (1981) - *Indagini sulle zone umide della Toscana. XVII. Le industrie neolitiche ed eneolitiche del lago di Massaciuccoli*. In: "Il Bacino del Massaciuccoli II". Consorzio Idraulico II Categoria, Canali Navigabili Burlamacca, Malfante, Venti e Quindici. Pp 33-37.
- Cipriani L.E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F., Pranzini E. (2001) - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale*. *Studi costieri* 15: 119-150.
- Colligiani L e Puglisi L. (2010) - *Uccelli*. In Perfetti A. (a cura di) - *La Conservazione degli ecosistemi costieri della Toscana settentrionale*. Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli pp. 246.
- Devoti S., Fulvio Nisi M., Silenzi S. (2003) - *Caratteri geologici ed evoluzione paleogeografica della pianura versiliese*. *Studi Costieri* 6: 73-89.
- Esselink H., Nijssen M. and Beusink P. (2003) - *Searching for key-factors to restore characteristic flora and fauna communities in coastal dunes*. In Skov-og Naturstyrelsen 2003. Report International Workshop restoration of dune habitats along the Danish west coast.
- Houston J. A., S.E. Edmondson and P.J. Rooney (eds.). (2001) - *Coastal dune management: shared experience of european conservation practice*. Liverpool University Press, 458 pp.

- Kukavicic M. and Pranzini E. (2003) - *Beach ridges and dunes of the Arno River delta*. In: E. Ozhan (Ed.), Proceedings of the Sixth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 03, 7-11 October, 2003, Ravenna, Italia. Volume 3, 1413-1424.
- Logli L. (2010) - *L'eliminazione delle cenosi di Yucca gloriosa*. In Perfetti A. (a cura di) - *La Conservazione degli ecosistemi costieri della Toscana settentrionale*. Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli pp. 246.
- Lombardi L. (2010) - Monitoraggio botanico degli interventi. In Perfetti A. (a cura di) - *La Conservazione degli ecosistemi costieri della Toscana settentrionale*. Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli pp. 246.
- Perfetti A. (a cura di) (2010a) - *La Conservazione degli ecosistemi costieri della Toscana settentrionale*. Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli, 246 pp.
- Perfetti A. (2010b, in stampa). *Il Progetto LIFE Conservazione degli ecosistemi costieri della Toscana settentrionale: dalle azioni locali alla proposta un network per la conservazione delle dune in Italia*. Atti Convegno SOS DUNE, ISPRA-CATAP Nov. 2009 Roma, in corso di pubblicazione su Geologia Ambientale.
- Perfetti A., Lombardi L., Logli F. e Cavalli S. (2011, in press) - *A large-scale control of an alien invasive plant coenosis in a Mediterranean Psammophilic coastal area: one project, two case studies and results*. EPP0 Bulletin.
- Perfetti A, Porchera A. e Lombardi L. (2010) - *Linee Guida per le operazioni di pulizia delle spiagge del Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli - Area Nord (tra Bocca di Serchio e Viareggio)*. In Perfetti A. (a cura di) - *La Conservazione degli ecosistemi costieri della Toscana settentrionale*. Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli, 246 pp.
- Porchera A. (2010) - *La riduzione del carico turistico in ambito dunare*. In Perfetti A. (a cura di) - *La Conservazione degli ecosistemi costieri della Toscana settentrionale*. Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli pp. 246.
- Pranzini E. (1989) - *A model for cusped delta erosion*. 6th Symp. on Coastal and Ocean Management/ASCE. Charleston, SC. Coastal Zone '89. Pp. 4345-4357.
- Pranzini E. (2001) - *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy)*. *Geomorphology*, 1-2: 125-132.
- Pranzini E. (2004) - *Caratteristiche morfologiche e sedimentologiche di una zona di convergenza del trasporto litoraneo (Versilia, Toscana)*. *Studi costieri*, 8: 135-149.
- Pranzini E. (2007) - *Airborne LIDAR survey applied to the analysis of the historical evolution of the Arno River delta (Italy)*. *Journal of Coastal Research*, SI 50: 400 -409.
- Pranzini E. (2008) - *L'intervento di stabilizzazione del litorale de Le Lame*. *Studi costieri* 14: 29-42.
- Psuty N.P. (1992) - *Spatial variation in coastal foredune development*. In: Carter, R.W.G., Curtis, T.G.F. and Sheehy-Skeffington, M.J. (ed.) *Coastal dunes: Geomorphology, Ecology and Management*. Rotterdam: Balkema, 3-13.
- Rooney P. Eds. (2010) *Special Issue: Changing Perspectives in Coastal Dune Management*. Vol.14, n°2.
- Skov-og Naturstyrelsen 2003. Report International Workshop restoration of dune habitats along the Danish west coast. <http://www.skovognatur.dk/Emne/Naturbeskyttelse/Naturpleje/LIFE/Afsluttede/Klithede/Restorationdune.htm>
- Toniolo A.R. (1910) - *Sulle variazioni di spiaggia a foce d'Arno dalla fine del secolo XVIII ai nostri giorni*. Studio storico fisiografico. Pisa: Tip. Municipale, 94 pp
- van Duinen Gert-Jan, Emiel Brouwer, Marijn Nijssen & Hans Esselink (Eds.) (2006) - *Dissemination of ecological knowledge and practical experiences for sound planning and management in raised bogs and sea dunes*. Report of the second workshop 22-26 August 2005. Radboud University Nijmegen, Department of Animal Ecology. (www.barger.science.ru.nl/life/)
- Vega de Seoane C. L., J. B. Gallego Fernández, C. V. Pascual. (2007) - *Manual de restauración de dunas costeras*. Ministerio de Medio Ambiente, 254 pp.
- Zuffi M. (2010) - *Anfibi e rettili*. In Perfetti A. (a cura di) - *La Conservazione degli ecosistemi costieri della Toscana settentrionale*. Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli pp. 246.

Ricevuto il 07/10/2010, accettato il 11/01/2011.

Dal monitoraggio di un intervento pilota al protocollo operativo per la realizzazione della copertura vegetale di dune costiere

Maria Speranza, Lucia Ferroni e Giuseppe Pritoni

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali
Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Viale Fanin, 44 - 40127 Bologna
E-mail: maria.speranza@unibo.it

Riassunto

L'esperienza acquisita nel corso del progetto Beachmed-e INTERREG III C sottoprogetto POSIDUNE (2006/2008), per la realizzazione della copertura vegetale di una duna costruita artificialmente presso il sito pilota di Foce Bevano (Ravenna) ha avuto seguito nell'attività di monitoraggio finanziata nel 2008/2009 dalla Direzione Generale Ambiente e Difesa del Suolo e della Costa della Regione Emilia-Romagna, riguardante lo sviluppo della copertura vegetale e dell'accumulo di sabbia nella zona vegetata del medesimo sito. Il protocollo adottato per realizzare la copertura vegetale utilizza due graminacee presenti in maniera importante nella dune embrionali (*Agropyron junceum* (L.) Beauv.) e nelle dune mobili (*Ammophila littoralis* (Beauv.) Rothm.) naturali. Esso ha consentito di ottenere in tempi relativamente brevi (8-12 mesi dalla piantumazione) una copertura vegetale funzionale ad intercettare e fissare sabbia nell'area vegetata. I risultati del monitoraggio e l'evoluzione del sistema nell'arco di tre anni evidenziano l'importanza di un corretto protocollo d'impianto delle specie per il futuro sviluppo della copertura vegetale, ma mettono altresì in evidenza l'importanza di una corretta progettazione della morfologia e delle geometrie della duna stessa per realizzare sistemi dunosi vegetati in grado di evolvere e persistere nel tempo. Tali valutazioni risultano funzionali anche alla progettazione e gestione di ripascimenti della spiaggia. Questi possono infatti essere vantaggiosamente affiancati da interventi che tendano a trattenere la sabbia là dove essa è stata artificialmente depositata, agendo sia al lato mare che a lato terra, e promuovendo, in questo secondo caso, la costruzione e/o il restauro di sistemi dunosi che possano dinamicamente integrarsi con il sistema spiaggia.

Parole chiave: *Agropyron junceum*, *Ammophila littoralis*, copertura vegetale, dune costiere, monitoraggio, restauro sistemi dunosi, sistema spiaggia-duna.

Abstract

Coastal areas are in critical status in most parts of Europe. One of the main causes for that is an altered balance between sedimentation and erosion processes caused by reduced sediment supply by rivers. Beach nourishment can be a solution, especially when followed by measures that can help hold sand where it was artificially deposited. These can act at sea (offshore breakwaters) and on the land side (construction and/or restoration of dune systems).

Planting can be a useful measure also for restoring the vegetation cover of dune systems which had been modified due to other reasons than marine erosion. This paper reports the results of planting vegetation on a young dune artificially built near the mouth of Bevano river (Ravenna, Italy).

The experimental area is located between the December 2005 river mouth position, and the position of the new mouth, opened artificially in winter 2006 (circa 800 m southwards). Change in Bevano river mouth position, executed due to hydraulic security reasons, was followed by other interventions, such as: 1) shaping of a dune; 2) installation of windbreaker in the dune area; 3) planting of *Ammophila littoralis* (Beauv.) Rothm. and *Agropyron junceum* (L.) Beauv. in the windbreaker area. Monitoring of the development of plant cover (quarterly measurements of diameter, circumference and height of *A. junceum* and *A. littoralis* tufts) as well as of sand accumulation (monthly recording of sand level on 138 fixed poles) was performed from October 2008 to September 2009. In winter 2008/2009, plant cover was evidently reduced due to destructive effects of storms, combined with interruption in vegetative growth. By June 2009, winter losses had been in most cases recovered, whereas in the end of September 2009 the plant cover volume had far exceeded that from the previous year.

In spite of a general increase in plant cover volume, winter 2008/2009 events have significantly changed the spatial structure of plant cover as it existed in autumn 2008. Vegetated areas lower than sea level became heavily damaged because of repeated intrusion of sea water. Similarly, the first three plant rows from the shoreline suffered more damage from winter storms, while increases in volume concerned the three innermost plant rows. At the end of the monitoring period sediment accumulation in the vegetated area showed a positive balance. Sand accumulated mainly due to sea storm events (in winter), and transportation and redistribution by wind of sediment already present in the area (in summer).

The second monitoring period occurred in a time of the year when conditions happen to be more favourable to vegetative growth and there is little disturbance caused by intense meteoric events; interactions between plant cover and sand become more important than during the winter period, resulting in greater sand accumulation where plant cover was more developed. Monitoring results shows that, if the protocol reported in this paper is followed, it is possible to plant vegetation cover that acts as active sediment trap and works as a "dune builder" in a relatively short time (8-12 months after planting). The maintenance of plant cover functions, however, strictly depends on site morphology, elevation above sea level, and width of the beach. Concerning nourishment interventions and planning of artificial dunes, the shape and geomorphology of active, well-structured natural dune systems, present in neighbouring areas, can be used as a reference model.

Keywords: *Agropyron junceum*, *Ammophila littoralis*, coastal dunes, dune-beach system, dune system restoration, nourishment, monitoring, plant cover.

Introduzione

Come risulta dal recente rapporto dell'European Environment Agency (EEA, 2006), che traccia un esauriente quadro della situazione, le aree costiere sono in gran parte dell'Europa in uno stato di forte criticità. Tra i fattori che agiscono negativamente su di esse, l'alterato equilibrio tra sedimentazione-erosione, per il ridotto apporto a mare di sedimenti da parte dei corsi d'acqua regimati, è uno di quelli a maggior impatto. Si stima che a scala europea il deficit di sedimenti sia di 100 milioni di tonnellate/anno (Eurosion - www.eurosion.org). Ad accentuare gli effetti di tale squilibrio, si aggiungono l'innalzamento del livello del mare, legato anche a fenomeni di subsidenza, e la tendenza ad un incremento di intensità negli eventi di mareggiata e inondazione.

Considerata l'importanza socio-economica delle aree costiere, il ripristino di un equilibrio nel bilancio sedimentazione-erosione è problema di grande importanza; un'azione di questo genere richiede sia l'identificazione delle aree dove sono in atto fenomeni di erosione, trasporto, sedimentazione, sia l'identificazione di riserve strategiche di sedimenti, da cui i sedimenti stessi possano essere prelevati senza compromettere altri equilibri. In funzione del raggiungimento di questi equilibri e con una visione più moderna e più ampia del problema, si tende oggi a privilegiare la gestione complessiva dei sedimenti piuttosto che la sola difesa della costa e la gestione della spiaggia. A questo scopo si ricorre a tecniche "soft" di ingegneria costiera, che ben si conciliano con la valorizzazione degli ecosistemi naturali (dune, stagni retrodunali, ecc.), la cui integrità contribuisce a mantenere positivo il bilancio di sedimentazione e quindi anche alla difesa del territorio retrostante (EEA, 2005). Interventi di ripascimento della spiaggia possono pertanto essere vantaggiosamente affiancati da interventi che tendano a

trattenere la sabbia là dove essa è stata artificialmente depositata, agendo sia al lato mare che a lato terra e promuovendo, in questo secondo caso, la costruzione e/o il restauro di sistemi dunosi che possano dinamicamente integrarsi con il sistema spiaggia.

Nel rapporto sullo Stato del Litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007, che contiene indicazioni sugli interventi di ripascimento ai fini della gestione costiera (Preti, 2009), viene sottolineata la necessità di affiancare a tali interventi, laddove possibile, un miglioramento delle condizioni dei sistemi dunosi esistenti o la realizzazione di sistemi dunosi nuovi. Ripascimento e sistema dunoso efficiente dovrebbero infatti agire in sinergia per ristabilire l'equilibrio del bilancio sedimentazione-erosione. Laddove non sussistono le condizioni/necessità per effettuare ripascimenti, ugualmente può essere opportuno intervenire con operazioni di piantumazione se la copertura vegetale dei sistemi dunosi esistenti si presenta più o meno degradata. Ciò allo scopo di iniziare e/o accelerare il recupero della funzionalità del sistema, secondo un approccio che si inserisce nelle linee di azione della *Restoration Ecology* (SER, 2004).

Uno dei primi e più importanti interventi di ripascimento eseguiti in Italia, accompagnato da piantumazione di specie vegetali è stato eseguito negli anni 1994-1999 sulla spiaggia del Cavallino (Venezia) dal Consorzio Venezia Nuova con un finanziamento del Ministero dei Lavori Pubblici e del Magistrato alla Acque di Venezia (Cecconi e Nascimbeni, 1997; Cecconi e Ardone, 1998; Nascimbeni, 1998). Il ripascimento ha riguardato 11 km di spiaggia e più di 2 milioni di m³ di sabbia, di cui circa 150.000 m³ sono stati utilizzati per la ricostruzione di sei cordoni dunosi paralleli alla costa. Per la piantumazione di questi si sono utilizzate circa 800.000 piante di *Ammophila littoralis* prelevate in popolazioni spontanee del litorale veneziano. Un monitoraggio sulla riuscita dell'impianto eseguito nel 2001 (Caniglia e Bonello, 2002; Caniglia, 2006) ha però messo in evidenza che, dopo un buon attecchimento iniziale, *Ammophila littoralis* presentava segni di riduzione nella crescita, probabilmente dovuti allo scarso apporto di sabbia e alla concorrenza di specie nitrofile, quali: *Oenothera biennis* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronquist, *Cenchrus incertus* Curtis, *Ambrosia coronopifolia* Torrey et A. Gray, *Amorpha fruticosa* L., *Bidens tripartita* L.. Le specie qui ricordate, sottraendo spazio ad *Ammophila littoralis*, per eccellenza specie edificatrice e stabilizzatrice dei sistemi dunosi, finiscono per attenuare gli effetti positivi della copertura vegetale sulla cattura e fissazione della sabbia. La presenza di queste specie, probabilmente dovuta a un'eccessiva frequentazione dei luoghi e all'origine del materiale sabbioso utilizzato per il ripascimento, è senza dubbio elemento negativo nell'ambito dell'esperienza citata. Se dunque da un lato l'intervento eseguito presso il litorale del Cavallino rappresenta un buon esempio di integrazione tra pratiche di ripascimento e pratiche di intervento naturalistico, dall'altro ha messo in evidenza alcuni punti deboli della situazione considerata e del protocollo utilizzato.

Il presente contributo riporta i risultati di un'esperienza di realizzazione della copertura vegetale su una giovane duna, costruita artificialmente nei pressi della foce del Torrente Bevano (Ravenna), sito pilota nell'ambito del progetto Beachmed-e INTERREG III C, sottoprogetto POSIDUNE (<http://www.beachmed.eu/Beachmede/SousProjets/POSIDUNE>). Il monitoraggio di dettaglio, eseguito nel corso di un intero anno, sullo sviluppo della copertura vegetale e sull'accumulo di sabbia nella zona vegetata fornisce diversi elementi interessanti per la formalizzazione di un protocollo applicabile ad altri siti nel medesimo contesto bioclimatico, compresi siti di futuri interventi di ripascimento.

Materiali e metodi

L'area di studio

L'area di studio (Fig. 1) è compresa tra la vecchia foce del torrente Bevano alla data del dicembre 2005 e la nuova foce del medesimo corso d'acqua, situata circa 800 m più a Sud, creata artificialmente a seguito dei lavori svolti nel periodo gennaio-aprile 2006 dalla Regione Emilia-Romagna per motivi di sicurezza idraulica. Questo tratto di costa, fino a metà degli anni cinquanta occupato da un cordone dunoso attivo, fu fortemente modificato dalle dinamiche del torrente Bevano che dal 1954 al 2005 circa, spostò progressivamente più a Nord la propria foce, con conseguente erosione della duna situata in questo tratto (Ciavola et al., 2005; Gardelli et al., 2007).

Questo specifico tratto di costa presenta un andamento della linea di riva e un bilancio sedimentario abbastanza soddisfacenti (Preti, 2009). La linea di riva è infatti in avanzamento da Foce Savio, situata circa 4 km più a Sud, fino a Foce Bevano. A partire da 1 km più a Nord di Foce Bevano e fino alla Foce Fiumi Uniti, per un tratto di 8-9 km, la situazione è invece fortemente critica.

Per una trattazione più generale delle problematiche geomorfologiche di questo tratto di costa, nell'ambito delle problematiche delle aree costiere ravennati e dell'intera costa romagnola, esiste un'ampia documentazione bibliografica (Borghi, 1938; Bondesan et al., 1978; Cencini et al., 1979; Cencini, 1980; Simeoni et al., 2006; Armaroli et al., 2007; Preti, 2009; Perini e Calabrese, 2010).

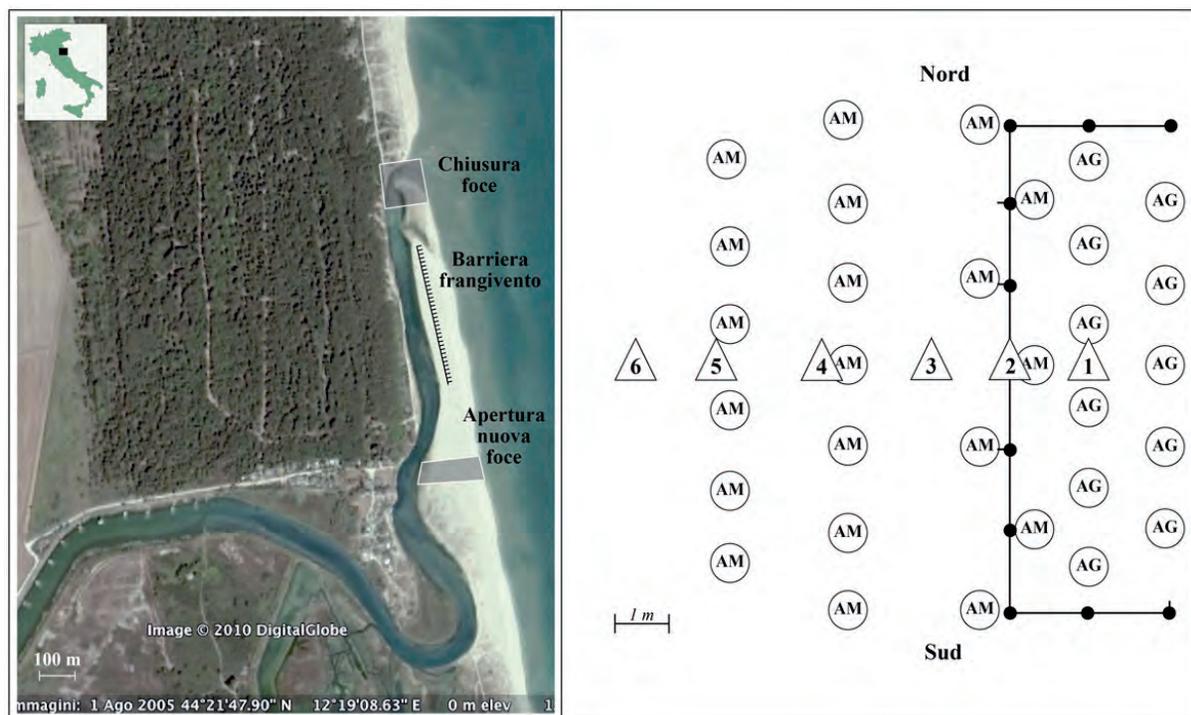


Figura 1 - A sinistra l'area di studio compresa tra la vecchia foce del torrente Bevano e la nuova foce aperta nell'inverno 2006. A destra lo schema di piantumazione di una parcella della barriera frangivento, organizzato su sei file parallele alla linea di costa, con la posizione delle aste fisse per il monitoraggio dell'accumulo di sabbia.

● palo della barriera frangivento;

△ asta fissa per il monitoraggio dell'accumulo di sabbia; AG *Agropyron junceum*; AM *Ammophila littoralis*.

Gli interventi di ripristino della duna a Foce Bevano

Il riposizionamento della foce del Bevano, all'incirca nella medesima posizione occupata agli inizi degli anni '90, è stato accompagnato da una serie di attività per ripristinare la duna erosa. In sintesi si è provveduto:

- a modellare un abbozzo di duna raccordata con il sistema dunoso attivo situato immediatamente a Nord della vecchia foce (inverno 2006);
- a installare a circa 40 metri dalla battigia una barriera frangivento a pettine, con asse maggiore parallelo alla linea di riva, costituita da 69 celle di 6 x 2 m e con elementi trasversali, costituiti da rami di salice/pioppo intrecciati, posizionati fino a circa 80 cm di altezza (aprile 2006; Fig. 1);
- ad avviare la formazione di una copertura vegetale piantumando con *Ammophila littoralis* (Beauv.) Rothm. e con *Agropyron junceum* (L.) Beauv. l'area compresa nella barriera frangivento (fine ottobre 2006 e inizio novembre 2007).

La realizzazione della copertura vegetale

Per ricostruire la copertura vegetale della duna si sono scelte due specie graminacee rizomatose perenni, *Agropyron junceum* e *Ammophila littoralis*, che nei sistemi dunosi naturali caratterizzano, rispettivamente, la duna embrionale e la duna mobile. Sia pure con notevoli differenze, dovute alla diverse dimensioni e struttura di ciascuna, entrambe le specie hanno un ruolo importante come specie edificatrici, contribuendo ad intercettare ed accumulare la sabbia trasportata dal vento.

Il materiale vegetale da utilizzare nella piantumazione è stato raccolto in diversi popolamenti spontanei della costa romagnola, nel periodo immediatamente precedente la ripresa vegetativa primaverile (fine febbraio-inizio marzo 2006 e 2007). In ogni popolamento si sono raccolti da più individui segmenti dei rizomi sotterranei con le rispettive foglie e radici, situati preferenzialmente in corrispondenza della parte periferica e quindi più giovane dei cespi della pianta, dove è più facile siano localizzati nodi con tessuti meristemati pronti ad attivarsi e a produrre nuovi getti. Tale materiale è stato poi propagato presso il centro di Cadriano dell'Azienda Agraria dell'Università di Bologna (AUB) tagliando i segmenti dei rizomi in più parti, ciascuna provvista di una o più gemme che, staccati dalla pianta madre, sono stati interrati in vasi contenenti 2/3 di sabbia e 1/3 di terra di campo. Ugualmente sono stati utilizzati i cespi con foglie, cui originariamente erano collegati i rizomi di cui sopra, che accestiscono facilmente. Il materiale propagato è stato allevato in vivaio fino alla fine di ottobre 2006 e, rispettivamente primi di novembre 2007, quando furono realizzati gli impianti *in situ*. All'epoca dell'impianto, realizzato con una densità di 4 cespi/m², tutto il materiale vegetale era in ottime condizioni vegetative e provvisto di un apparato radicale ben sviluppato. In Figura 1, a destra, è riportato uno schema della distribuzione delle specie piantumate per ogni parcella della barriera frangivento.

Il monitoraggio della copertura vegetale

Nel periodo ottobre 2008-settembre 2009 si è monitorato lo sviluppo della copertura vegetale nell'area piantumata. Tale monitoraggio ha riguardato 23 delle 69 parcelle piantumate, regolarmente distribuite, una ogni tre, su tutta la lunghezza della barriera frangivento. Alle date del 1 ottobre 2008, 9-19 dicembre 2008, 4 febbraio 2009, 17 aprile 2009, 10 giugno 2009, 29 settembre 2009, per ciascuno dei cespi di *A.junceum/A. littoralis* di ogni parcella sono stati misurati l'altezza, il diametro maggiore e minore, il perimetro di base e il perimetro del cespo, stretto in modo da non lasciare spazi vuoti tra gli steli. Le misure eseguite sono state utilizzate per calcolare il volume della copertura vegetale di ogni parcella, disaggregata per file e totale, ad ognuna delle date dei rilievi di campo. Per questo tipo di calcolo, il cespo di ogni pianta è stato assimilato ad un cilindro, avente per base l'ellisse definita dai due diametri massimo e minimo del cespo e per altezza, l'altezza del cespo stesso.

Il monitoraggio dell'accumulo di sabbia nell'area vegetata

Il monitoraggio dell'accumulo di sabbia nell'area vegetata è stato effettuato su una serie di aste di PVC montate su un piede a croce e interrate almeno 40 cm in posizioni fisse, in ciascuna delle 23 parcelle in cui è stato monitorato lo sviluppo della copertura vegetale. La distribuzione delle aste in ogni parcella monitorata segue un allineamento est-ovest come indicato in Figura 1 e comprende anche il paletto centrale dell'asse maggiore della barriera frangivento; la distanza tra le aste varia da 1.5 m (aste 1-2, 2-3, 5-6) a 2 m (aste 3-4, 4-5) per una lunghezza totale di 8.5 m dell'intero transetto. L'accumularsi della sabbia è stato misurato con frequenza mensile, utilizzando un metro rigido con scala millimetrica e leggendo la distanza tra la sommità dell'asta e il livello della sabbia su un insieme di 138 punti fissi. I dati ricavati dalle letture periodiche sulle aste fisse, unitamente alle misure lineari sulle dimensioni dell'area monitorata (402 m di lunghezza x 8.5 m di larghezza), sono stati utilizzati per stimare i volumi di sabbia accumulati nell'area stessa, nel corso del periodo di monitoraggio.

Condizioni meteo-marine durante il periodo di monitoraggio

Per un inquadramento di massima delle condizioni meteo-marine del periodo di monitoraggio, si sono utilizzati i dati della Rete Mareografica Nazionale, stazione di Ravenna e in particolare i valori del livello idrometrico sullo zero mareografico, ritenuto un utile, anche se parziale indicatore delle condizioni meteo marine (Fig. 2)

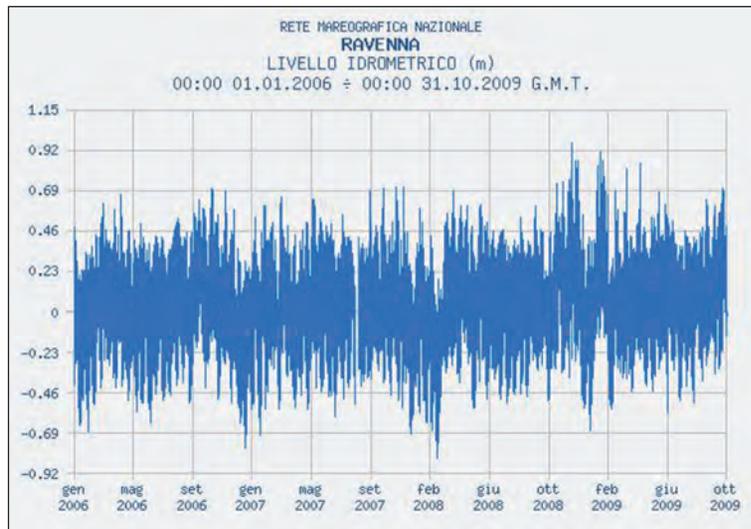


Figura 2 - Rete Mareografica Nazionale, stazione di Ravenna: livello idrometrico sullo zero mareografico per il periodo gennaio 2006-ottobre 2009.

Risultati

Il monitoraggio della copertura vegetale e dell’accumulo di sabbia nell’area vegetata, si riferiscono ad un periodo in cui nei mesi autunnali, invernali e all’inizio primavera i fenomeni meteo marini sono stati particolarmente intensi e frequenti. Da un esame di Figura 2 risulta evidente la particolare situazione dell’autunno inverno 2008/2009, caratterizzata frequentemente da valori del livello idrometrico di quasi 0.2 m superiori ai valori massimi registrati nei 2 anni precedenti.

Evoluzione della copertura vegetale

In Figura 3a sono riportati i valori del volume totale della copertura vegetale nelle 23 parcelle monitorate, alle sei date di monitoraggio. La copertura vegetale ha subito un primo decremento, abbastanza contenuto, evidenziato dal rilievo di dicembre 2008 e un secondo decremento, più importante, nel periodo dicembre 2008 - febbraio 2009. Al 17 aprile 2009 si nota già una tendenza al recupero, che è particolarmente evidente nel periodo primaverile (dato del 10 giugno 2009), e prosegue anche nel periodo estivo (dato del 29 settembre 2009).

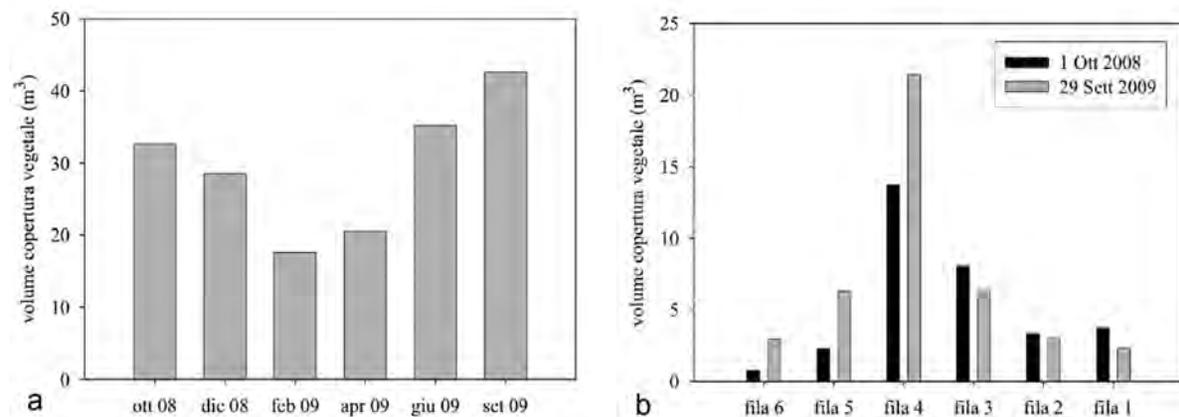


Figura 3 - a) Variazione del volume totale della copertura vegetale nelle 23 parcelle durante il periodo di monitoraggio. b) Volume totale della copertura vegetale nelle 23 parcelle all’inizio del monitoraggio (1 ottobre 2008) e a fine monitoraggio (29 settembre 2009), distinto per file di impianto. L’ordine delle file da 6 a 1 tiene conto della distanza dalla battigia: più vicina alla fila 1 e progressivamente più lontana rispetto alle altre.

Il dato volumetrico totale del 29 settembre 2009 (42.6 m^3) è superiore al dato del 1 ottobre 2008 (32.7 m^3) di 9.9 m^3 ; l'incremento medio per parcella è di $0.43 \text{ m}^3/\text{anno}$.

Gli incrementi rilevati, tuttavia, non sono uniformemente distribuiti su tutta l'area piantumata, né su ciascuna delle file dell'impianto. Riguardo al primo aspetto, nel tratto meridionale e centrale dell'area vegetata (da parcella 9 a parcella 49) la copertura vegetale è in regresso in 6 parcelle su 14 e due di queste risultano completamente prive di copertura vegetale per i danneggiamenti distruttivi delle mareggiate invernali e di inizio primavera. Nel tratto settentrionale (da parcella 52 a parcella 67), invece, la copertura vegetale è in aumento in 5 parcelle su 6. Per quanto riguarda il secondo aspetto (variazioni di copertura sulle file), le file 1, 2 e 3 sono tutte in decremento (-14.8%, -3.8%, -19.9%), mentre sulla fila 4, 5 e 6 si ripartiscono, rispettivamente il 75.4%, il 41% e il 22.3% degli incrementi (Fig. 3b).

Accumulo di sabbia nell'area vegetata

La Figura 4a illustra in sintesi i tratti più salienti della dinamica di accumulo di sabbia nell'area monitorata. In essa vengono indicati i valori di accumulo di sabbia su un profilo est-ovest (dall'asta in posizione 1 all'asta in posizione 6), che rappresenta la media delle letture effettuate sui 6 allineamenti Nord-Sud, paralleli alla linea di riva, definiti dall'insieme delle aste fisse di ogni parcella, che occupano una stessa posizione (posizione da 1 a 6). La Figura 4a considera le quattro diverse situazioni determinate dalla combinazione dei due diversi periodo dell'anno (invernale - estivo) e della parte di area monitorata (parte meridionale, parcelle da 1 a 49 - parte settentrionale, parcelle da 50 a 67).

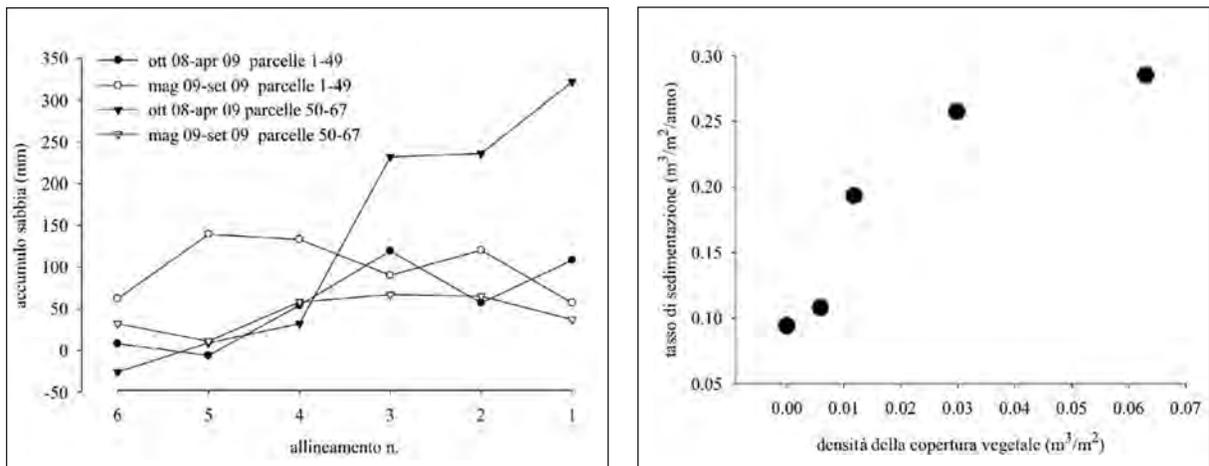


Figura 4 - a) Accumulo di sabbia su un profilo medio est-ovest (da allineamento delle aste 1 ad allineamento delle aste 6) nell'area vegetata, distinto per periodo dell'anno e per posizione lungo la barriera frangivento. b) Relazione tra densità della copertura vegetale e tasso di sedimentazione della sabbia in cinque sezioni dell'area monitorata.

L'apporto totale medio di sabbia sugli allineamenti 1, 2, 3 è circa doppio rispetto a quello sugli allineamenti 4, 5, 6. Nel periodo invernale l'apporto di sabbia riguarda soprattutto gli allineamenti 1, 2, 3, nel periodo estivo soprattutto gli allineamenti 4 e 5. Nella parte meridionale dell'area si registra accumulo di sabbia un po' su tutti gli allineamenti, mentre nella parte settentrionale c'è una differenza molto più marcata tra gli allineamenti 1, 2, 3 e gli allineamenti 4, 5, 6.

Durante il periodo invernale vi è un notevole apporto di sedimento in corrispondenza degli allineamenti longitudinali 1, 2 e 3 e in particolare nella porzione settentrionale dell'area (parcelle 50-67). L'apporto cala decisamente in corrispondenza degli allineamenti 4, 5 e 6, più lontani dalla linea di riva. Nel periodo estivo la situazione muta notevolmente; l'accumulo di sabbia si localizza soprattutto nella porzione meridionale dell'area monitorata (parcelle 1-49) e in corrispondenza degli allineamenti più interni (profilo 4 e 5 soprattutto).

Tabella 1 - Stime dei volumi di sabbia accumulata (m^3) nell'area monitorata.

	Da ottobre 2008 ad aprile 2009	Da maggio 2009 a settembre 2009
Tutta l'area ($3417 m^2$)	287	366
Parcelle da 1 a 49 ($2499 m^2$)	156	308
Parcelle da 50 a 67 ($918 m^2$)	123	44

Tabella 2 - Stime dei tassi di sedimentazione ($m^3/m^2/mese$) nell'area monitorata.

	Da ottobre 2008 ad aprile 2009	Da maggio 2009 a settembre 2009
Tutta l'area ($3417 m^2$)	0.012	0.021
Parcelle da 1 a 49 ($2499 m^2$)	0.009	0.025
Parcelle da 50 a 67 ($918 m^2$)	0.019	0.010

Nell'area monitorata si è dunque verificato accumulo di sabbia con differenti intensità a seconda del periodo dell'anno e della posizione nell'ambito dell'area monitorata. In Tabella 1 e in Tabella 2 sono riportate, rispettivamente, le stime dei volumi di sabbia accumulata e dei corrispondenti tassi di sedimentazione.

Complessivamente, nell'ambito delle tendenze evidenziate, risulterebbe che le dinamiche invernali risentono soprattutto degli apporti di sabbia dovuti alle mareggiate, con maggior apporto di sabbia sugli allineamenti più vicini alla linea di riva, mentre le dinamiche estive risentono soprattutto delle azioni di redistribuzione ad opera del vento e dell'effetto di intercettazione e accumulo ad opera della vegetazione.

Relazioni tra copertura vegetale e accumulo di sabbia

Riguardo all'importanza della copertura vegetale sull'accumulo di sabbia, si propone qui di seguito un'elaborazione di sintesi, relativa all'intero periodo di monitoraggio. In Figura 4b sono riportati i valori di densità della copertura vegetale a fine settembre 2009, in cinque diversi settori longitudinali dell'area monitorata, adiacenti tra loro. Tali settori corrispondono ad altrettante superfici di lunghezza pari alla lunghezza dell'area monitorata (402 m) e di larghezza (variabile tra 1.5 e 2 m) pari al tratto compreso tra due aste fisse contigue, utilizzate per il rilievo del livello della sabbia. Per i medesimi settori sono pure riportati i tassi di sedimentazione della sabbia sull'intero periodo monitorato. La correlazione tra i parametri considerati è significativamente positiva ($R=0.896$, $P=0.039$). Risulterebbe inoltre che per valori di densità della copertura vegetale compresi tra $0.006 m^3/m^2$ e $0.03 m^3/m^2$, il tasso di sedimentazione della sabbia aumenta di 2.5 volte (da $0.107 m^3/m^2/anno$ a $0.257 m^3/m^2/anno$), mentre per valori di densità della copertura vegetale intorno a $0.06 m^3/m^2$, il tasso di sedimentazione della sabbia tenderebbe a stabilizzarsi intorno al valore di $0.3 m^3/m^2/anno$.

Discussione

Nonostante le distruzioni da mareggiate, la copertura vegetale è in crescita di quasi $10 m^3$ sul complesso delle 23 parcelle monitorate.

Nel pieno dell'inverno la copertura vegetale appare in evidente regresso per il combinarsi dell'effetto distruttivo delle mareggiate e del fermo dell'attività vegetativa. I dati di sintesi indicano che il decremento di copertura vegetale è stato particolarmente importante nel periodo che intercorre tra il rilevamento di dicembre (9-19 dicembre 2008) e quello successivo di inizio febbraio (4 febbraio 2009). Il rilevamento di metà aprile 2009 mostra invece segni di accrescimento e di ripresa generalizzati un po' dovunque, nonostante il verificarsi anche in questo periodo di forti mareggiate e conseguente invasione dell'area piantumata da parte delle acque marine. Già nel periodo febbraio 2009-aprile 2009 il volume della copertura vegetale è dunque in crescita rispetto al minimo toccato agli inizi di febbraio. A giugno le perdite invernali sono state recuperate in moltissimi casi e a fine settembre il volume della copertura vegetale supera decisamente quello di un anno prima. La crescita si è verificata

su tutto l'arco del periodo primaverile-estivo, fino alla fine di settembre 2009, ma con particolare intensità nel periodo primaverile. In tale periodo dell'anno si sommano gli effetti positivi dovuti alla ripresa dell'attività vegetativa e all'assenza di mareggiate di forte intensità. Fanno ovviamente eccezione rispetto a questa tendenza quelle parcelle in cui la copertura vegetale piantumata è stata completamente o quasi completamente asportata e distrutta dalle mareggiate invernali. Laddove è invece rimasta la presenza anche frammentaria di piante, alla ripresa della crescita vegetativa si assiste alla produzione di nuovi ricacci verdi. Le piante ricoperte dalla sabbia apportata nel corso delle mareggiate (prima fila di *Agropyron junceum*, soprattutto) sono in grado di riemergere con nuovi culmi e nuove foglie se lo strato di sabbia accumulato su di esse non è troppo profondo. Ugualmente, le temporanee sommersioni da parte dell'acqua marina non pregiudicano la sopravvivenza delle due specie utilizzate. Esse risultano capaci di superare condizioni di disturbo anche forte (parziale insabbiamento, ingresso di acqua marina), purché non vengano sottoposte ad eventi meccanici di tipo distruttivo. La scelta fatta sulle due specie (*Agropyron junceum* e *Ammophila littoralis*) sembra pertanto corretta e l'insediamento di queste nel sito è sostanzialmente stabile e ben consolidato; ciò vale in particolare *A. littoralis*.

Nonostante il bilancio complessivamente positivo, a un anno dall'inizio del monitoraggio, in un numero significativo di parcelle localizzate prevalentemente nella parte centrale dell'impianto, la copertura vegetale è però in regresso. Ugualmente in regresso è la copertura vegetale delle file 1, 2 e 3, mentre gli incrementi si localizzano soprattutto sulla fila 4, seguita dalle file 5 e 6.

Gli eventi invernali hanno dunque modificato abbastanza profondamente la struttura spaziale complessiva della copertura vegetale esistente all'autunno 2008. Sono state particolarmente penalizzate le parcelle localizzate nelle zone a quote più basse rispetto al livello del mare, invase più volte dalle acque marine. Ugualmente, le prime tre file di piante hanno risentito maggiormente dei danni da mareggiate invernali, mentre gli incrementi di volume hanno riguardato le tre file più interne dell'impianto. Rispetto all'assetto dell'autunno 2008, all'autunno 2009 si accentua l'importanza della fila 4, quale principale ostacolo-barriera per il deposito della sabbia trasportata dal vento, oltre che delle file 5 e 6, più o meno paragonabili per l'importanza dei volumi alle file 3 e 2 rispettivamente.

Il periodo di monitoraggio si chiude con un bilancio positivo riguardo all'apporto di sedimenti nell'area vegetata, avvenuto prevalentemente per fenomeni marini nel periodo invernale e per trasporto eolico e redistribuzione di sedimento già presente nell'area, nel periodo estivo. Gli eventi meteo-marini e gli apporti di sabbia da parte del mare hanno dominato lo scenario del periodo ottobre 2008/aprile 2009, mentre la vegetazione ha avuto un ruolo di minor rilievo. Nel corso del secondo semestre di monitoraggio, coincidente con un periodo dell'anno favorevole alla crescita vegetale e di sostanziale tranquillità riguardo agli eventi meteo-marini, le interazioni tra copertura vegetale e sedimento trasportato dal vento sono risultate più importanti, determinando maggiore accumulo di sabbia laddove maggiore è la copertura della vegetazione. A questo riguardo va notato che il regime anemologico del periodo primaverile-estivo 2009, è risultato più dinamico rispetto a quello degli anni precedenti e, contemporaneamente, più efficace ai fini della movimentazione della sabbia. La sabbia movimentata si è poi depositata in maggior misura laddove la copertura vegetale presentava maggiore consistenza.

Riguardo alla quantità di sabbia apportata sull'area monitorata durante le mareggiate invernali, si sono verificate dislocazioni di importanti volumi di sabbia verso il corpo d'acqua retrostante la duna, materializzati in una serie di lobi distribuiti lungo tutto lo sviluppo della duna stessa, dall'estremità Sud (parcella 1) fino alla parcella 50. In questo tratto, segni quali solchi di erosione, piante abbattute e trascinate o sradicate indicano un apporto di sabbia avvenuto per lo più in maniera violenta da parte delle acque marine. Dalla parcella 51 e fino alla parcella 67, invece, i fenomeni di sfondamento e le morfologie che ne derivano non sono più presenti. I sedimenti sabbiosi sono arrivati con abbondanza (incremento del livello della sabbia fino a 40 cm circa) e in modo non distruttivo. E' opportuno notare che esiste una buona corrispondenza tra zone dove si sono verificati fenomeni distruttivi e distribuzione delle aree a quote più basse. In fase di progettazione e di realizzazione di strutture fisiche dunose, su cui inserire una copertura vegetale, sembra dunque di grande importanza un'attenta progettazione geomorfologica. Questa dovrà provvedere all'individuazione e alla realizzazione di quote sufficientemente elevate nel sito, tali da evitare fenomeni di scavalco marino quali quelli verificatisi in alcune parti dell'area Bevano

nell'inverno 2008/09. Nei tempi successivi all'intervento sarà inoltre importante effettuare un monitoraggio delle dinamiche geomorfologiche a grande scala, in modo da poter intervenire, se del caso, in maniera tempestiva, evitando il degrado dell'intero sistema.

Conclusioni

Il monitoraggio congiunto, sviluppo della copertura vegetale - accumulo di sabbia, nell'area di Foce Bevano per il periodo ottobre 2008-settembre 2009 ha consentito di cogliere diversi aspetti interessanti dei fenomeni studiati, utili alla definizione di un protocollo operativo applicabile per la realizzazione/restauro della copertura vegetale di aree dunose costiere.

Le specie utilizzate si sono affermate e accresciute facilmente. *Ammophila littoralis* in particolare ha dimostrato di essere dotata di ottime capacità di colonizzazione dello spazio, di recupero dopo eventi di disturbo, oltre che di una struttura morfologica adatta a intercettare, trattenere e fissare la sabbia nelle diverse stagioni dell'anno. Non risulta dunque problematico realizzare, anche in tempi relativamente brevi (8-12 mesi dalla piantumazione), una copertura vegetale idonea e funzionale per sistemi dunosi costieri. Più problematico sembra essere il mantenimento nel tempo di tale copertura, che necessariamente verrà sottoposta all'azione dei fenomeni fisici che governano il sistema e in particolare all'azione distruttiva delle mareggiate. Il monitoraggio effettuato ha messo in evidenza l'alternarsi nel corso dell'anno di momenti favorevoli (periodo primaverile-estivo) in cui la copertura vegetale è in crescita e i fenomeni meteo-marini distruttivi sono in attenuazione, e di momenti sfavorevoli (tardo autunno-inverno) in cui la copertura vegetale è in contrazione per effetto della stasi vegetativa, combinata con i fenomeni distruttivi meteo marini che sono invece in intensificazione. Se in questo alternarsi ciclico di momenti favorevoli e sfavorevoli, il bilancio complessivo tra incrementi e perdite si manterrà positivo per la copertura vegetale, questa potrà allora esercitare effettivamente la sua funzione edificatrice e conservatrice della duna. Al raggiungimento di questo equilibrio contribuiscono in maniera determinante la morfologia del sito, la distribuzione delle quote rispetto al livello del mare, la profondità della spiaggia antistante. La valutazione di questi aspetti e la loro considerazione, in fase di progettazione di interventi di ricostruzione di sistemi dunosi, sono più difficilmente affrontabili di quelli riguardanti la sola realizzazione della copertura vegetale, ma non possono essere ignorati ai fini di una buona riuscita dell'intervento nel suo complesso. Al riguardo è senza dubbio utile considerare come modelli di riferimento le geometrie e la geomorfologia di sistemi dunosi naturali, attivi e ben strutturati, presenti in aree abbastanza vicine a quella dove verranno effettuati interventi. L'assetto di tali sistemi e i parametri morfologici che li caratterizzano, dovrebbe infatti rappresentare il risultato di un equilibrio dinamico raggiunto tra i diversi fattori fisici in gioco a media scala territoriale.

Protocollo per la realizzazione della copertura vegetale di sistemi dunosi costieri

Qui di seguito si riporta il protocollo per la realizzazione della copertura vegetale di sistemi dunosi costieri, messo a punto attraverso l'esperienza effettuata presso il sito di Foce Bevano. L'impianto di specie in grado di intercettare e trattenere la sabbia è una delle possibili opzioni utilizzabili per la gestione e il restauro di sistemi dunosi costieri (Woodhouse et al., 1977; Coastal Engineering Research Center, 1984; Mauriello, 1989; Mendelssohn et al., 1991; Miller et al., 2001; Gómez-Pina et al., 2002). Si tratta di un tipo di intervento ritenuto di basso costo, potenzialmente auto-sostenibile, che non altera in maniera sostanziale l'aspetto del paesaggio costiero ed è applicabile anche nel caso di ripascimenti (Scottish Natural Heritage, 2009). Per tutti questi motivi si accorda bene con le più recenti tendenze, di tipo "soft", riguardanti la gestione e conservazione delle coste. Rispetto ad altre esperienze analoghe, il protocollo qui presentato è applicabile a tutte quelle situazioni che hanno condizioni bioclimatiche analoghe a quelle della costa romagnola. Con opportune variazioni sui momenti stagionali più appropriati per la raccolta, propagazione, impianto *in situ*, può essere applicato a tutti quegli ambiti territoriali in cui si trovano spontaneamente presenti le specie utilizzate. La sua applicazione consente di ottenere in tempi rapidi una copertura vegetale in grado di intercettare ed accumulare sabbia. Si utilizza infatti materiale vegetale, precedentemente propagato in vivaio, che ha già superato i primi e più delicati momenti dello sviluppo e che comunque non viene sottoposto a stress come nel caso di un trapianto diretto dal sito di raccolta al sito di

piantumazione (Cecconi e Nascimbeni, 1997). Il protocollo è particolarmente dettagliato riguardo alla scelta, raccolta, propagazione, impianto delle specie. Tutti questi aspetti, non trattati con altrettanti approfondimenti nel caso di altre esperienze, sono invece determinanti per assicurare un buon risultato nell'attecchimento e successivo sviluppo negli anni del materiale vegetale. Il protocollo non approfondisce valutazioni di tipo geomorfologico, che pure sono da considerare in fase di progettazione di qualunque intervento di realizzazione/restauro della copertura vegetale di dune costiere. A questo riguardo si sottolinea fortemente l'importanza di tali valutazioni, che dovrebbero essere oggetto di indagini specifiche per ogni sito di intervento.

1 - La scelta delle specie. Le specie che nei sistemi dunosi naturali determinano con particolare evidenza fissazione e accumulo di sabbia sono *Ammophila littoralis* (Beauv.) Rothm., in primo luogo, per la duna mobile e, secondariamente, *Agropyron junceum* (L.) Beauv per la duna embrionale. *Ammophila littoralis* raggiunge dimensioni davvero significative grazie alla spiccata capacità di produrre nuovi e vigorosi getti vegetativi dall'ampio sistema di rizomi che si sviluppa sotto la sabbia. I cespi sono particolarmente densi e la parte aerea mantiene la capacità di intercettare sabbia per tutto il corso dell'anno, non verificandosi decrementi della massa fogliare legati alla stagionalità. Il sistema di rizomi e radici avventizie sotterranee contribuisce a stabilizzare in profondità il sedimento sabbioso catturato dalla parte subaerea. *A. junceum*, pur essendo una rizomatosa perenne come *A. littoralis*, ha una minore capacità di produzione di nuovi getti; i cespi che esso forma sono molto meno densi, oltre che di minor altezza; la specie è inoltre caratterizzata da un periodo di riposo vegetativo estivo, in cui la massa fogliare e il volume dei cespi si riducono notevolmente, con conseguente netta diminuzione della capacità di intercettare e accumulare sabbia. La maggior velocità di crescita di *Ammophila littoralis*, unita ad altre caratteristiche favorevoli allo sviluppo di una importante massa vegetale, la rendono nettamente preferibile ad *A. junceum* in tutti quei casi in cui si vuole privilegiare un accrescimento il più rapido possibile del sistema dunoso restaurato/ricostruito. E' da tenere però presente che, essendo *A. littoralis* propria di quella parte della duna attiva, situata a maggior distanza dal mare, oltre il limite di risalita dell'onda e solo occasionalmente raggiunta dalle mareggiate di più forte intensità, il suo utilizzo deve essere strettamente subordinato alla presenza di una spiaggia sufficientemente profonda. Nel caso della costa romagnola, e in particolare nel tratto in prossimità della foce del Bevano, le condizioni idonee all'affermarsi di *A. littoralis* si realizzano intorno a 40-45 m dalla linea di riva. Tale indicazione non ha tuttavia valore assoluto e va di volta in volta verificata in funzione delle caratteristiche del moto ondoso e della morfologia della spiaggia del sito dove si effettuerà l'intervento. Se in prossimità di questo esistono sistemi dunosi attivi ben conservati, si può utilizzare la geometria di tali sistemi come utile riferimento operativo.

Nella realizzazione di un intervento di costruzione/restauro della copertura vegetale di sistemi dunosi può essere inizialmente privilegiata la funzione di cattura e trattenimento della sabbia tramite l'impianto di specie come *A. littoralis* e *A. junceum*, provvedendo successivamente, anche dopo qualche anno, all'inserimento di altre specie per incrementare il livello di biodiversità del sistema. Se l'intervento di costruzione/restauro viene effettuato in un sito dove nelle immediate vicinanze sono presenti sistemi dunosi già vegetati, si può pensare che in un arco di tempo di 7-10 anni la biodiversità dell'area di intervento tenderà ad aumentare a seguito dell'arrivo di semi e/o propaguli vegetativi di altre specie psammofile presenti nelle aree vicine. In questo contesto va inoltre prestata particolare attenzione a specie di origine esotica che vengono coltivate a scopo ornamentale nei giardini di abitazioni ubicate in prossimità delle spiagge o negli stabilimenti balneari. Molte di queste sono in grado di insediarsi anche in ecosistemi naturali e di propagarsi con rapidità, sottraendo spazio alle specie autoctone, più efficaci nella funzione di intercettazione della sabbia e di consolidamento della duna. A prevenzione della loro diffusione negli ambienti dunosi, ne andrebbe vietata la coltivazione nelle aree limitrofe.

2 - Provenienza del materiale vegetale utilizzato, tempi e modalità di raccolta - Il materiale da utilizzare per la piantumazione dovrà essere rigorosamente di provenienza locale, da siti dello stesso ambito bioclimatico, dove siano presenti popolamenti spontanei delle specie che si intende utilizzare. Con riferimento alle specie *A. littoralis* e *A. junceum*, che vengono qui proposte come specie chiave per gli interventi di restauro, la raccolta del

materiale riguarderà parti vegetative della pianta, quali segmenti dei rizomi sotterranei con le rispettive foglie e radici. Per non danneggiare la consistenza dei popolamenti naturali in cui vengono effettuate le raccolte, è necessario raccogliere una quantità limitata di materiale e prevedere una fase di propagazione vegetativa in vivaio che consenta di incrementare il materiale vegetale disponibile da utilizzare nell'intervento. La raccolta in natura va effettuata intorno alla fine di febbraio-inizio marzo, poco prima della ripresa dell'attività vegetativa. Si effettueranno prelievi limitati su uno stesso sito, raccogliendo comunque il materiale da più piante madri, ben distanziate tra loro. Si effettueranno inoltre raccolte in più siti. Questo consente di disporre di materiale diversificato dal punto di vista genetico e nello stesso tempo di disporre con buoni quantitativi, senza effetti negativi sulla consistenza delle popolazioni da cui viene effettuato il prelievo.

La raccolta di materiale vegetativo effettuata in natura in febbraio-marzo consente di avere pronte per il mese di ottobre le piante da piantumare e, ad un anno dalla raccolta, di aver già le piante *in situ*, pronte per una prima stagione di crescita. Alla fine della prima stagione vegetativa, dopo 8-9 mesi dalla piantumazione, si può già raggiungere un discreto sviluppo della copertura vegetale, che comincia a determinare accumulo di sabbia. La quantità di materiale vegetale raccolto va commisurata in funzione delle dimensioni dell'area su cui si interverrà e del tipo di intervento (costituzione ex novo di una copertura vegetale, integrazione di una copertura vegetale già esistente). Per *A. junceum* e *A. littoralis* si può comunque far conto di riuscire ad ottenere alla fine della procedura di propagazione e dopo una stagione di crescita, circa 2.5 volte il numero di cespi raccolti.

3 - *Propagazione e coltivazione in vivaio* - *A. junceum* e *A. littoralis*, hanno strategie di crescita e di occupazione dello spazio che si prestano ad essere facilmente sfruttate per ottenere in tempi abbastanza rapidi materiale vegetale attraverso propagazione vegetativa. Entrambe sono specie perenni, caratterizzate da un sistema di rizomi sotterranei, articolati in nodi ed internodi; i rizomi si allungano nella sabbia e dalle gemme portate in corrispondenza dei nuovi nodi formati dai rizomi, si sviluppano nuove foglie e nuove radici. Ne consegue un incremento delle dimensioni della pianta e un progressivo allargamento dello spazio aereo e sotterraneo da essa colonizzato. Per la propagazione vegetativa delle due specie in vivaio, si possono quindi utilizzare segmenti dei rizomi sotterranei su cui siano presenti una o più gemme, che, staccati dalla pianta madre, verranno posti in vasi (si consigliano vasi di 18-20 cm di diametro) contenenti 2/3 di sabbia e 1/3 di terra di campo. Il distacco fisico dalla pianta madre ha un effetto stimolante sull'attivazione delle gemme poste sui segmenti di rizoma; da ciascuna di queste gemme originerà un nuovo cespo con foglie e radici. Ugualmente si possono utilizzare i cespi con foglie, cui originariamente erano collegati i rizomi di cui sopra. Anche nel cespo esistono nuclei di tessuto meristematico che determinano l'accostimento, la formazione di nuovi ricacci con foglie e radici, oltre che nuovi rizomi. I segmenti di rizoma e i cespi producono innanzitutto nuove radici che, a un mese dalle operazioni di propagazione, raggiungono un significativo sviluppo. Successivamente si ha la produzione di nuove foglie e accrescimento anche della parte subaerea.

A. junceum e *A. littoralis* si riproducono anche per seme. I semi vengono prodotti con abbondanza all'inizio dell'estate, all'incirca nella prima metà di luglio, e possono anch'essi essere raccolti da popolamenti spontanei delle due specie seguendo le precauzioni già indicate per la raccolta del materiale vegetativo, in modo da avere materiale diversificato dal punto di vista genetico. Tuttavia la riproduzione da seme richiede circa 12 mesi in più per ottenere piante di dimensioni paragonabili a quelle che si possono ottenere a seguito di propagazione vegetativa. Considerati i tempi più lunghi e quindi anche le maggiori cure necessarie per la più lunga permanenza in vivaio, tale via non risulta particolarmente conveniente.

4 - *Piantumazione: epoca, aspetti logistici, modalità* - Le operazioni di piantumazione vanno eseguite nella seconda metà del mese di ottobre e anche fino ai primi di novembre, quando in natura le temperature sono ancora miti, nettamente al di sopra dello zero, ma non vi sono più momenti di carenza idrica. Collocando le operazioni di piantumazione in questo periodo dell'anno, si dà modo alle piante allevate in vaso e mantenute in vivaio per tutto il periodo estivo, di riattivare in settembre la crescita vegetativa radicale e fogliare finché sono ancora in

condizioni controllate per quanto riguarda l'irrigazione. Ai fini di una buona riuscita dell'impianto è infatti necessario che le piante utilizzate sino tutte in ottime condizioni e non abbiano subito stress idrici e/o nutrizionali. Per quanto riguarda gli aspetti logistici legati alla realizzazione dell'impianto, è quanto mai necessario che l'area dove si interverrà sia raggiungibile con mezzi di trasporto comuni o che l'ultimo tratto prima di arrivare al luogo dell'impianto sia percorribile con un trattore o altro mezzo in grado di avanzare su terreno sabbioso. Il posizionamento delle piante va effettuato scavando nella sabbia buche di 30-40 cm di profondità, all'interno di ciascuna delle quali verrà posizionato il contenuto di un vaso, avendo cura di mantenere il più intatto possibile il pane di terra con le radici e di rincalzare bene la sabbia intorno a queste. Se possibile, si consiglia di effettuare un'irrigazione artificiale subito dopo la messa a dimora.

In funzione del materiale vegetale disponibile e del tipo di intervento, si possono adottare differenti densità di impianto. Nell'esperienza fatta a Foce Bevano, dove si interveniva su una superficie totalmente priva di copertura vegetale, si è utilizzata una densità di circa 4 cespi/m², che ha dato buoni risultati in termini di copertura già ad un anno dall'impianto. Nelle medesime condizioni si sarebbe potuta adottare anche una densità di 5-6 cespi/m². In interventi dove si trattasse di incrementare una copertura vegetale già esistente, si adotteranno, ovviamente, densità inferiori, anche variabili da tratto a tratto dell'intervento, in funzione delle specifiche condizioni. Nell'ipotesi di totale assenza di copertura vegetale e di utilizzo di *A. littoralis* congiuntamente con *A. junceum* in rapporto 2/3-1/3 come consigliato in questo protocollo, valori di densità di 4-5 cespi/m² danno ottima certezza di ottenere una copertura superiore a quella ottenuta nella sperimentazione di Foce Bevano, dove si è lavorato con un rapporto *A. littoralis*-*A. junceum* di 1:1. Considerate le capacità di accrescimento delle specie utilizzate, densità superiori a quelle indicate risulterebbero eccessive. Queste valutazioni derivano anche dal fatto che la procedura adottata nella sperimentazione di Foce Bevano ha assicurato la sopravvivenza di tutte le piante fino alla primavera successiva e perdite del tutto trascurabili alla fine dell'estate del medesimo anno. Del resto, anche in esperienze precedenti, in cui si sono adottate diverse densità di impianto, si è poi giunti a concludere che, relativamente ad *A. littoralis* una densità di 4 cespi/m² sia preferibile rispetto a densità superiori (9 cespi/m²), perché la prima faciliterebbe la colonizzazione spontanea da parte di altre specie psammofile, incrementando la biodiversità del sito (Cecconi e Nascimbeni, 1997; Nascimbeni, 1998).

Riguardo infine alla distribuzione spaziale delle piante che vengono piantumate, nel caso di realizzazione di una copertura vegetale su un sito che ne è totalmente privo, si possono adottare disposizioni regolari per file, parallele alla linea di riva, ma dove i cespi si alternano di posizione tra file adiacenti. Questo è lo schema che è stato adottato a Foce Bevano (Fig. 1), dove la scelta di uno schema di impianto regolare è stata in parte obbligata anche dalla presenza di una barriera frangivento, a moduli 6 m x 2 m preesistente al progetto di piantumazione di specie vegetali. L'effetto che ne è risultato in termini visivi è forse di eccessiva regolarità e artificiosità, particolarmente evidente nei primi anni dall'impianto, ma tendente ad attenuarsi nel corso del tempo per via di differenze nella crescita, o per la perdita di alcuni cespi. In compenso, in fase di messa a dimora delle piante uno schema regolare è più facilmente realizzabile e si presta meno a dar luogo ad errori da parte degli esecutori del lavoro.

Altri casi relativamente recenti di realizzazione di una copertura vegetale su sabbia apportata con ripascimenti (Lido del Cavallino, Venezia (Cecconi e Nascimbeni, 1997; Cecconi e Ardone, 1998)), o su sistemi di dune sabbiose costiere degradate (Scottish Natural Heritage) hanno adottato schemi di impianto ripetitivi e regolari.

5 - Protezione dal calpestio - Per una buona riuscita dell'intervento e per far sì che la copertura vegetale possa crescere e svilupparsi senza subire danneggiamenti da calpestio e da frequentazione antropica impropria, è d'obbligo proteggere l'area piantumata con una recinzione, indirizzando gli accessi alla spiaggia su percorsi stabiliti che interrompano il meno possibile la continuità del sistema dunoso. Si ricorda a questo proposito che una continuità di almeno 300 m di lunghezza del sistema dunoso è uno dei parametri che contribuisce a mantenere ad un livello medio la vulnerabilità rispetto all'erosione dei sistemi costieri (Calabrese et al., 2010). Oltre agli accessi obbligati su corridoi opportunamente distanziati, si può meglio ovviare all'interruzione della continuità della duna con la costruzione di passerelle di legno che fungono da sovrappasso rispetto alla duna stessa.

6 - *Monitoraggio* - Nel progettare un intervento di costruzione/restauro della copertura vegetale di sistemi dunosi, è quanto mai opportuno prevedere anche le risorse finanziarie per il monitoraggio dell'intervento. Questo aspetto è in genere trascurato, anche se di notevole importanza. Saranno oggetto del monitoraggio lo sviluppo della vegetazione, l'evoluzione geomorfologica del sito, gli eventi di mareggiata, il regime dei venti per un periodo di tempo significativo (almeno 3-5 anni). Scopo del monitoraggio è di verificare a posteriori la risposta della copertura vegetale e della sedimentazione di sabbia nella zona vegetata, di correlare tali risposte agli eventi fisici che con esse interagiscono, di intervenire prontamente con azioni di ripristino localizzate, qualora dovessero verificarsi delle parziali distruzioni del sistema, di incrementare le conoscenze sul funzionamento di processi naturali allo scopo di poterli prevedere e meglio dominare. Un investimento in monitoraggio degli interventi effettuati, può significare maggior efficienza e risparmio di costi in analoghi interventi futuri.

7 - *Costi* - A titolo di esempio si riporta qui una sintetica indicazione dei costi sostenuti per la realizzazione della piantumazione effettuata a Foce Bevano nell'ottobre 2006 (Tab. 3). I costi esposti coprono la raccolta del materiale vegetale in natura, la propagazione e coltivazione in vivaio, il trasporto del materiale vegetale sul luogo e l'esecuzione della piantumazione.

Tabella 3 - Costi sostenuti per la realizzazione della piantumazione nell'area monitorata.

Attività	Costo
Raccolta materiale vegetale in natura (6 uscite x 300 euro)	1800 euro
Propagazione e coltivazione in vivaio (irrigazioni, concimazioni, allestimento ombreggiatura) di 1200 cespi di <i>A. littoralis</i> e di 2400 cespi di <i>A. junceum</i>	6000 euro
Trasporto <i>in situ</i> del materiale vegetale e relativa piantumazione (manodopera, irrigazione post-impianto, utilizzo trattore)	3700 euro
Totale	11500 euro
Totale/m ² vegetato	15,3 euro

Ringraziamenti

La realizzazione della copertura vegetale sulla duna di Foce Bevano è stata finanziata dal progetto Beachmed-e INTERREG IIIC - Sottoprogetto Posidune (2006/2008), condotto dal Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica della Regione Emilia-Romagna. L'Azienda Agraria dell'Università di Bologna (AUB) e il Corpo Forestale dello Stato, ufficio Territoriale per la Biodiversità di Punta Marina (RA) hanno contribuito per la coltivazione delle piante in vivaio e per l'esecuzione dell'impianto.

La Regione Emilia-Romagna, Direzione Generale Ambiente e Difesa del Suolo e della Costa ha finanziato il monitoraggio 2008/09 dell'area vegetata, nell'ambito di una convenzione con il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali dell'Università di Bologna.

Bibliografia

- Armaroli C, Ciavola P., Perini L., Luciani L. (2007) - *Morfologia delle spiagge ravennati e vulnerabilità per fenomeni di inondazione*. In: Ferrucci E.M. (ed.), Ambiente e Territorio, n.127, pp. 363-389, Maggioli Editore.
- Bondesan M., Calderoni G., Dal Cin R. (1978) - *Il litorale delle province di Ferrara e Ravenna (Alto Adriatico). Evoluzione morfologica e distribuzione dei sedimenti*. Bollettino della Società Geologica Italiana, 97: 247-287.
- Borghi G. (1938) - *Le spiagge romagnole da Cervia a Punta Gabicce*. In: Vicentini M. (ed.), Le spiagge Padane, C.N.R., Roma. pp. 73.
- Calabrese L., Lorito S., Perini L. (2010) - *Vulnerabilità all'erosione della costa ferrarese*. In: Perini L. e Calabrese L. (eds.) - Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli. Pendragon, Bologna, pp. 211-223.

- Caniglia G. (2006) - *Stato attuale dei litorali del Veneto*. Informatore Botanico Italiano, Atti del Convegno Conservazione e recupero degli habitat costieri, Ancona, 19-20 maggio 2005.
- Caniglia G., Bonello L. (2002) - *Potere aggregante di *Ammophila littoralis* nella ricomposizione dei litorali veneziani*. Atti del 97° Congresso della Società Botanica Italiana, Lecce, pag.86.
- Cecconi G., Ardone V. (1998) - *La progettazione dei litorali con ripascimento delle spiagge: l'esperienza dei litorali di Cavallino e Pellestrina*. Atti del 10° Seminario IAED - La progettazione ambientale nei sistemi costieri, 12: 11-31.
- Cecconi G., Nascimbeni P. (1997) - *Ricostruzione e naturalizzazione delle dune artificiali sul litorale di Cavallino*. Quaderni Trimestrali Consorzio Venezia Nuova, 2: 45-61.
- Cencini C., 1980 - *L'evoluzione delle dune del litorale romagnolo nell'ultimo secolo*. Rassegna Economica, Camera di Commercio, Forlì: 6-7.
- Cencini A., Cucoli L., Fabbri P., Montanari F., Semboloni F., Torresani S., Varani L. (1979) - *Le spiagge di Romagna: uno spazio da proteggere*. Bologna, Programma Finalizzato Conservazione del Suolo - Sottoprogetto Dinamica dei Litorali, CNR.
- Ciavola P., Billi P., Armaroli C., Preciso E., Salemi E., Balouin Y. (2005) - *Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo*. Geologia Tecnica ed Ambientale, 1/2005: 41-57.
- Coastal Engineering Research Center (CERC) (1984) - *Shore protection manual*. Ft. Belvoir, VA: US Army Corps of Engineers.
- European Environment Agency (2005) - *The European environment. State and outlook 2005*. Copenhagen.
- European Environment Agency (2006) - *The changing faces of Europe's coastal areas*. Copenhagen.
- Gardelli M., Caleffi S., Ciavola P. (2007) - *Evoluzione morfodinamica della foce del torrente Bevano*. Studi Costieri, 13: 55-76.
- Gómez-Pina G., Muñoz-Pérez J.J., Ramírez J.L., Ley C. (2002) - *Sand dune management problems and techniques, Spain*. Journal of Coastal Research, SI36:325-332.
- Mauriello M.N. (1989) - *Dune maintenance and enhancement: a New Jersey example*. In: Magoon O.T., Converse H., Miner D., Tobin L.T., Clark D. (eds.), Coastal zone. New York, American Society of Civil Engineers, pp. 1023-37.
- Mendelssohn I.A., Hester M.W., Monteferrante F.J., Talbot F. (1991) - *Experimental dune building and vegetative stabilization in a sand-deficient barrier island setting on the Louisiana coast, USA*. Journal of Coastal Research, 7:137-149.
- Miller D.L., Thetford M., Yager L. (2001) - *Evaluation of sand fence and vegetation for dune building following overwash by Hurricane Opal on Santa Rosa Island, Florida*. Journal of Coastal Research, 17: 936-948.
- Nascimbeni P., 1998 - *Ricostruzione e naturalizzazione delle dune artificiali sul litorale di Cavallino*. Atti del 10° Seminario IAED - La progettazione ambientale nei sistemi costieri, 12: 32-41.
- Nordstrom K.F., Hartman J.M., Freestone A.L., Wong M., Jackson N.L. (2007) - *Changes in topography and vegetation near gaps in a protective foredune*. Ocean & Coastal Management, 50: 945-959.
- Perini L., Calabrese L. (eds.), (2010) - *Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli. Pendragon, Bologna.
- Preti M. (ed.) (2009) - *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione*. I Quaderni di Arpa - Arpa Emilia-Romagna, Bologna, 271 pp.
- Scottish Natural Heritage (2009) - *A guide to managing coastal erosion in beach/dune systems*. <http://www.snh.org.uk/publications/on-line/heritagemanagement/erosion/>
- SER (Society for Ecological Restoration), 2004 - *The SER Primer on Ecological Restoration, Version 2*. Society for Ecological Restoration - Science and Policy Working Group. <http://www.ser.org/reading-resources.asp>
- Simeoni U., Valpreda E., Schiavi C., Corbau C. (2006) - *Le dune costiere dell'Emilia-Romagna*. Studi Costieri, 11: 121-132.
- Woodhouse Jr. W.W., Seneca E.D., Broome S.W. (1977) - *Effect of species on dune grass growth*. International Journal of Biometeorology, 21:256-266.

Ricevuto il 01/04/2010, accettato il 21/1/2011.

Gli ambienti dunali della costa di Sterpaia Comune di Piombino (LI): interventi di riqualificazione degli habitat, controllo delle specie esotiche e razionalizzazione del carico turistico

Enrico Bartoletti¹, Alessandro Bini¹, Leonardo Lombardi², Michele Giunti²,
Maurizio Bacci³ e Stefano Corsi³

¹Unità di Servizio "Pianificazione, Difesa del Suolo e delle Coste" Provincia di Livorno

²NEMO Nature and Environment Management Operators S.r.l. - Firenze

³IRIS S.a.s. - Firenze

Riassunto

Nell'ambito degli interventi di difesa costiera e riqualificazione degli ambienti dunali della Provincia di Livorno, il settore occidentale del Golfo di Follonica (circa 10 km), nell'area interna all'Area Naturale Protetta (ANPIL) Sterpaia (Comune di Piombino), è stato interessato dal progetto esecutivo di ripristino morfologico ed ecologico del sistema dunale e retrodunale.

Gli obiettivi del progetto sono il ripristino morfologico e vegetazionale del sistema dunale e retrodunale di Sterpaia, un territorio caratterizzato dalla contemporanea presenza di elementi di elevato interesse naturalistico e paesaggistico e con forti criticità legate al carico turistico estivo e ai processi di erosione costiera. Dopo l'analisi degli aspetti geomorfologici, naturalistici, degli usi antropici e della pianificazione territoriale sono stati quindi progettati interventi di ripristino degli ecosistemi dunali mediante tecniche di ingegneria naturalistica, attraverso l'eliminazione di formazioni vegetali esotiche invasive e la razionalizzazione del carico turistico. Sono infine state proposte buone pratiche e norme in grado di sviluppare una attività turistica maggiormente sostenibile. Il progetto ha voluto valorizzare la fase di partecipazione e ascolto delle Comunità locali, dei gestori degli stabilimenti e delle associazioni al fine di realizzare una progettazione condivisa degli interventi.

Parole chiave: ecosistemi dunali e retrodunali, ripristino morfologico e vegetazionale, pressione turistica, erosione costiera, ingegneria naturalistica, eradicazione specie aliene, sentieristica sostenibile.

Abstract

The morphological and ecological restoration of coastal dune and back dune systems has been proposed for the west coast of Follonica Gulf (approximately 10 km long), inside "Sterpaia" Natural Protected Area (ANPIL) (municipality of Piombino), as part of a larger project on coastal defense interventions and restoration of dune ecosystems in the Province of Livorno.

The project aimed at restoring vegetation cover and dune morphology within Sterpaia dune and back dune systems. This area is characterised by elements of high natural and landscape value, subject to critical issues due to erosion and pressure from tourists in summer. Geomorphological, naturalistic, human use and land planning aspects were first analysed; different actions were then executed, such as: restoration of dune ecosystems by natural engineering solutions, eradication of invading exotic plant species, rationalisation of tourist pressure (creation of a proper pathway

system). Good practices and rules have also been suggested for the development of sustainable tourism activities. The project emphasized the participation of local communities, bathing establishment managers and interested associations in the process of planning coastal interventions.

Keywords: coastal dune and back dune ecosystem, morphological and vegetation restoration, tourist pressure, coastal erosion, bioengineering, eradication of alien species, suitable pathway system.

Introduzione

Nell'ambito degli interventi di difesa costiera e riqualificazione degli ambienti dunali della Provincia di Livorno, il settore occidentale del Golfo di Follonica (Fig. 1) è stato interessato dal presente progetto esecutivo di ripristino morfologico del sistema dunale e retrodunale del Golfo di Follonica nel tratto compreso tra Torre del Sale e Carbonifera. Si tratta dell'intervento n° 14 dell'Elenco interventi prioritari di recupero e riequilibrio del

litorale approvato con Del.C.R. 47/2003 così come modificato con nota prot. n° 124/133569/054.002 (atti Provincia prot. n° 53630 del 15/11/2005) a firma congiunta del Settore Tutela del Territorio della Regione Toscana e l'Ufficio Regionale per la Tutela del Territorio e così come modificato dal Tavolo Tecnico del Protocollo d'intesa tra Provincia di Livorno, Comune di Piombino e Circondario della Val di Cornia nella seduta del 12/10/2007.

Gli obiettivi del progetto sono il ripristino morfologico ed ecologico del sistema dunale e retrodunale di Sterpaia. La conservazione del sistema dunale è infatti un punto fondamentale della gestione integrata della costa, perché costituisce di fatto la naturale riserva di sabbia per la spiaggia, svolge un'importante azione di difesa dall'ingresso delle inondazioni marine e dai venti salmastri ed ospita importanti habitat e specie di flora e fauna di elevato interesse conservazionistico.



Figura 1 - Localizzazione dell'area di intervento nel contesto regionale e provinciale: porzione del Golfo di Follonica compreso tra le località di Torre del Sale e Carbonifera (Comune di Piombino).

Il progetto si è sviluppato secondo le seguenti fasi:

- inquadramento geomorfologico e analisi delle dinamiche in atto nella linea di costa;
- analisi delle valenze naturalistiche e dello stato di conservazione degli ambienti dunali e retrodunali;
- analisi degli strumenti di pianificazione vigenti nell'area e del locale carico turistico e antropico;
- progettazione esecutiva di interventi di ingegneria naturalistica per la riqualificazione degli ambienti dunali;
- progettazione esecutiva della rete di sentieristica, accessibilità e pannellistica;
- progettazione esecutiva degli interventi di eliminazione e controllo delle specie esotiche di flora e di impianto di nuove cenosi vegetali autoctone;
- redazione di buone pratiche per la gestione sostenibile delle attività balneari condivise con locali stakeholder.

In considerazione delle problematiche di conservazione degli ambienti dunali e retrodunali di Sterpaia è risultato indispensabile associare alla realizzazione degli interventi di riqualificazione anche buone pratiche e norme

comportamentali indirizzate ai gestori degli stabilimenti balneari, ai fruitori dell'area ed agli Enti competenti alle operazioni di pulizia della spiaggia. Si tratta di due azioni complementari ed in grado di migliorare l'efficacia complessiva delle azioni di riqualificazione e difesa del sistema costiero di Sterpaia, la cui importanza è dimostrata anche dall'inserimento nell'ambito di un'area protetta a gestione della Parchi Val di Cornia Spa (ANPIL Sterpaia).

Le principali criticità ambientali degli ecosistemi dunali di Sterpaia

Per il loro carattere relittuale e per la loro non eccessiva ampiezza gli habitat dunali di Sterpaia (Fig. 2) sono attualmente fortemente condizionati dalla presenza di un elevato carico turistico estivo. Tale pressione si traduce soprattutto in fenomeni di intenso calpestio e alterazione degli habitat dunali, ma soprattutto di sentieramento diffuso (Figg. 3 e 4).



Figura 2 - Tratto centrale dell'area di intervento: sistema dunale di elevato valore naturalistico con dune fisse e mobili ad *Ammophila arenaria*: a) foto aerea; b) sul campo.



Figura 3 - Erosione sistema dunale con diffuso scalzamento al piede, crollo del fronte dunale e messa a nudo degli apparati radicali (Loc. Carlappiano).



Figura 4 - Le interruzioni nel sistema dunale, legate al sentieramento, rappresentano punti critici: erosione eolica e ingresso mareggiate (Loc. Torre del Sale).

Dalle aree di parcheggio retrodunali i fruitori raggiungono la spiaggia direttamente attraverso gli accessi agli stabilimenti balneari o si distribuiscono lungo le spiagge utilizzando alcuni sentieri interni alle pinete dunali, paralleli alla linea di costa. Vengono quindi attraversati gli habitat dunali utilizzando i numerosi sentieramenti presenti. Tra la centrale di Torre del Sale e la loc. Carbonifera il presente progetto ha censito circa 300 sentieramenti di accesso alla spiaggia.

Il sentieramento diffuso non solo è in grado di alterare direttamente preziosi habitat dunali, ed in particolare le formazioni ad *Ammophila arenaria* ed *Agropyron junceum*, ma attraverso la realizzazione di aperture nel fronte dunale per l'accesso alla spiaggia (*blowout*) è in grado di innescare negativi processi di erosione eolica o delle mareggiate.

In questo contesto di precario equilibrio ecologico si inseriscono, durante la stagione primaverile-estiva, periodiche attività di pulizia della spiaggia finalizzate ad una più agevole fruizione turistica. Tali attività, ed in particolare l'asportazione del materiale organico spiaggiato (cumuli di posidonia, materiale legnoso, ecc.) costituiscono degli ulteriori elementi di criticità degli ecosistemi costieri, ed in particolare per i peculiari habitat di battigia e di anteduna caratterizzati da specie animali e vegetali strettamente legate al materiale organico spiaggiato.

Come in altre aree costiere mediterranee le dune di Sterpaia ospitano numerosi cenosi esotiche (Fig.5), prevalentemente a dominanza i *Carpobrotus* sp.pl. (ma anche *Agave* sp.pl., *Opuntia* sp.pl., *Pittosporum tobira*, *Yucca gloriosa*, ecc.), che hanno avuto come centri di diffusione gli stabilimenti balneari, le aree verdi attrezzate e l'area di Riva verde interessata in passato da una estesa lottizzazione abusiva.



Figura 5 - Diffusione di cenosi esotiche a *Carpobrotus* sp.pl. sul fronte dunale in erosione in loc. Carbonifera.

Inquadramento naturalistico dell'area costiera di Sterpaia

L'area costiera di Sterpaia, pur in una condizione di forte criticità ambientale, ospita ecosistemi dunali e retrodunali di elevato interesse naturalistico: al sistema dunale costiero fanno seguito importanti aree umide retrodunali (salicornieti, giuncheti, prati salsi, ecc.) boschi mesoigrofilici centenari e vaste aree incolte o saltuariamente coltivate. Le relitte aree umide interne o retrostanti l'ANPIL di Sterpaia costituiscono, assieme alla confinante Riserva Naturale Padule Orti Bottagone, un sistema di aree palustri salmastre di grande interesse vegetazionale, ma soprattutto faunistico.

Gli ambienti dunali di Sterpaia presentano ancora, pur in una situazione di forte riduzione quantitativa e qualitativa, relittuali habitat dunali e tipici popolamenti floristici psammofitici.

I fenomeni di erosione costiera, soprattutto nella porzione più occidentale, il carico turistico estivo e le opere antropiche costiere hanno ridotto questi ambienti ad una facies alterata. Frequenti sono i fenomeni di erosione a carico della duna fissa, mentre la duna mobile in molte aree non esiste quasi più.

La individuazione delle formazioni di psammofite e la loro descrizione è di estrema importanza anche in considerazione della loro estrema fragilità nei confronti del condizionamento antropico. I sistemi dunali costituiscono infatti uno degli ecosistemi oggi più vulnerabili sia in Italia che a livello comunitario, ospitando numerosi habitat di interesse regionale (di cui alla LR Toscana 56/2000 e succ. modif.) e comunitario (di cui alla Direttiva 92/43/CEE e succ. modif.). Tali ecosistemi rappresentano un importante target di conservazione nell'ambito del piano d'azione per la tutela della biodiversità della Regione Toscana in corso di realizzazione.

Nell'ambito dell'area di studio i migliori esempi di formazioni vegetali dunali si localizzano lungo la costa tra Carlappiano (ad ovest) e Mortelliccio (ad est), con particolare riferimento al tratto centrale ove è presente un tipico ambiente dunale con specie annuali di anteduna, ammoreti e agropireti, formazioni di duna fissa e ginepreti a *Juniperus macrocarpa*. In questa zona la duna mostra quindi una serie completa costituita da:

- arenile;
- eventuale sistemazione di protezione;
- ante duna (*Cakile maritima*, *Euphorbia peplis*, *Xanthium italicum*, *Sporobolus pungens*, *Agropyron junceum*);
- formazioni erbacee psammofile di duna mobile (*Ammophila arenaria*, *Eryngium maritimum*, *Anthemis maritima*, *Medicago marina*, *Helichrysum stoechas*, *Lagurus ovatus*);
- formazioni erbacee psammofile di retroduna (*Crucianella maritima*, *Pancretium maritimum*, *Centaurea sphaerocephala*, *Matthiola sinuata*);
- junceto retrodunale (*Juncus acutus*);
- formazioni a ginepro coccolone (*Juniperus oxycedrus* ssp. *macrocarpa* con *Rhamnus alaternus*, *Pistacia lentiscus*);
- duna fissa con pinete e sottobosco di macchia mediterranea (pineta su macchia con *Pistacia lentiscus*, *Myrtus communis*, *Cistus salvifolius*, *Cistus monspeliensis*, *Phillyrea angustifolia*);
- formazioni arboree mesoigrofile retrodunali;
- paludi salmastre retrodunali.

Numerosi risultano gli habitat di interesse regionale e comunitario, di cui alla LR Toscana 56/2000 e succ. modif., quali:

- 1210 *Vegetazione effimera nitro-alofila delle linee di deposito marino*;
- 2110 *Dune mobili embrionali mediterranee con vegetazione psammofila*;
- 2120 *Dune mobili del cordone litorale con presenza di Ammophila arenaria*;
- 2210 *Dune stabilizzate mediterranee del Crucianellion maritimae*;
- 2240 *Dune con vegetazione annua dei Thero-Brachypodietalia*;
- 2250 * *Dune costiere con vegetazione a ginepri*;
- 2260 *Dune con vegetazione delle Cisto-Lavanduletalia*;
- 2270* *Dune con vegetazione alto arborea a dominanza di Pinus pinea e/o P. pinaster*.

Nell'ambito della stesso tratto sono inoltre presenti dune con densa copertura di *Juniperus oxycedrus* ssp. *macrocarpa* frammisto a specie tipiche di macchia.

Un ulteriore tratto situato ad ovest di Luna beach ospita dune mobili con interessanti presenze floristiche quali *Echinophora spinosa* ed *Eryngium maritimum*, specie non comuni nell'area di Sterpaia.

I sistemi dunali più alterati presentano in generale il seguente profilo:

- arenile;
- intervento di protezione (metodo Ingannamorte, barriera di scope, ecc.);

- fronte della duna fissa (massimo 2 m) con *Carpobrotus acinaciformis* o *Tamarix* sp.pl.;
- relitte cenosi psammofile dense sulla sommità della duna fissa con graminacee cespitose;
- pinete degradate;
- formazioni arboree mesoigrofile retrodunali;
- paludi salmastre.

Nei tratti di duna fortemente degradati le specie psammofile non sono più disposte nella tipica zonizzazione a fasce parallele alla costa secondo gradienti ecologici (vegetazione azonale) ma costituiscono invece un relitto mosaico ambientale frammisto a specie di minore importanza ecologica e spesso antropofile. Nei tratti più degradati la flora psammofila è sostituita o affiancata da specie quali *Carpobrotus acinaciformis* (particolarmente abbondante fino a totalmente dominante in loc. Carbonifera), *Pittosporum tobira*, *Tamarix* sp.pl., ecc.

Ove la duna è fortemente degradata anche le formazioni vegetali retrostanti sono spesso in stato di deperimento, con una forte degradazione dei gineprei costieri, dei giuncheti retrodunali ed in alcuni casi anche delle pinete dunali (quest'ultime fortemente danneggiate dalle mareggiate di fine novembre primi dicembre 2008 e 2009). La fauna degli ambienti dunali, pur non essendo molto ricca e diversificata, riveste un ruolo conservazionistico molto importante, derivante dallo stato di minaccia in cui si trovano molte specie tipiche. Tra questi si ricorda il mollusco gasteropode terrestre *Xerosecta contermina*. La sua presenza non è ancora stata accertata nella zona de La Sterpaia ma è molto probabile, dal momento che è conosciuto per il vicino litorale di Follonica e di Cecina. Si tratta di una specie psammofila, vivente esclusivamente tra le erbe e gli arbusti delle dune ben consolidate e dato che è estremamente sensibile alle modificazioni dell'habitat indotte dall'uomo, *X. contermina* risulta un buon indicatore di qualità dell'ambiente di duna.

Poche sono le specie di Vertebrati che frequentano regolarmente l'ambiente dunale. Tra i rettili si ricordano la comune Lucertola campestre (*Podarcis sicula*) mentre tra gli uccelli il Corriere piccolo (*Caradrius dubius*) e il più raro Fratino (*Caradrius alexandrinus*). Durante la migrazione è probabile la presenza della Pivieressa (*Pluvialis squatarola*) ed il Corriere grosso (*Caradrius hiaticula*), due altre specie di caradriformi che prediligono i litorali sabbiosi. Gli unici due mammiferi che si possono rintracciare nella duna sono il topo selvatico (*Apodemus sylvaticus*) e il Coniglio selvatico (*Oryctolagus cuniculus*), due specie di scarso interesse faunistico.

Nella vegetazione boscata o di macchia della sommità dunale la fauna si presenta assai più ricca e diversificata. Tra le molte specie di Invertebrati è possibile la presenza di due interessanti insetti, il lepidottero ropalocero *Ceonomypha albana* e il coleottero geotrupide *Ceratophyus rossii*. La prima è endemica della Toscana, dove è limitata all'Elba, al Giglio a Giannutri e a poche stazioni dell'area costiera livornese e grossetana (Terzani, 1995). *C. rossii* è un coleottero endemico del litorale toscano, ed è molto raro, dal momento che è limitato all'area di San Rossore, ai dintorni di Follonica e all'Oasi WWF di Burano (Nistri et al., 1991). Nel comprensorio de La Sterpaia non mancano ambienti di macchia e bosco rado, adatti alla sua sopravvivenza.

Passando ai Vertebrati, tra i rettili si segnalano la rara testuggine terrestre (*Testudo hermanni*) e la presenza possibile del Tarantolino (*Phyllodactylus europeus*) e del Cervone (*Elaphe quatuorlineata*), conosciuti per il vicino promontorio di Piombino (Vanni, 1981; Corti et al., 1991). Tra gli uccelli, nelle zone a macchia troviamo alcuni passeriformi come l'Occhiocotto (*Sylvia melanocephala*), la Sterpazzolina (*S. cantillans*) e l'Usignolo (*Luscinia megarhynchos*) e la meno frequente Magnanina (*S. undata*), quest'ultima considerata mediamente vulnerabile come nidificante in Toscana (Sposimo e Tellini, 1995). Dove la macchia diventa meno fitta e dominano le formazioni a *Pinus* sp. e a leccio, si rinvencono altre specie di uccelli tra le quali le più frequenti sono il Picchio rosso maggiore (*Picoides major*), il Colombaccio (*Columba palumbus*), la Tortora (*Streptopelia turtur*), la Tortora dal collare orientale (*Streptopelia decaocto*), il Fiorrancino (*Regulus ignicapillus*), il Lù piccolo (*Phylloscopus collybita*), il Pigliamosche (*Muscicapa striata*), il Rampichino (*Certhia brachydactyla*), la Ghiandaia (*Garrulus glandarius*), il Fringuello (*Fringilla coelebs*), il Verdone (*Carduelis chloris*), il Cardellino (*C. carduelis*) e il Verzellino (*Serinus serinus*). Il Riccio (*Erinaceus europeus*), lo Scoiattolo (*Sciurus vulgaris*), il Topo selvatico (*Apodemus sylvaticus*), l'Istrice (*Hystrix cristata*) e la Volpe (*Vulpes vulpes*) sono i mammiferi più frequenti in questa unità ambientale.

Nelle aree umide retrodunali, dove si trovano estesi canneti e salicornieti, sono presenti anche specie ittiche anche dulcacquicole come il Cavedano (*Leuciscus cephalus*) e la Scardola (*Scardinius erythrophthalmus*), altre eurialine quali i muggini, i cefali (*Mugil* sp., *Chelon* sp. e *Liza* sp.) e la Spigola (*Dicentrarchus labrax*). Comuni sono l'Anguilla (*Anguilla anguilla*) e la Gambusia (*Gambusia holbrooki*). Gli anfibi includono, tra gli altri, il Tritone crestato (*Triturus carnifex*), il Tritone punteggiato (*T. vulgaris*), il Rospo smeraldino (*Bufo viridis*) e la Raganella (*Hyla variegata*). I rettili sono presenti con la comune Biscia dal collare (*Natrix natrix*) e la Testuggine d'acqua (*Emys orbicularis*). Gli uccelli acquatici, attratti dalla presenza dell'importante Oasi WWF del padule dell'Orti-Bottagone, frequentano soprattutto in inverno e durante le migrazioni anche le zone umide de La Sterpaia. Tra questi si ricordano la Garzetta (*Egretta garzetta*), l'Airone bianco maggiore (*E. alba*), la Sgarza ciuffetto (*Ardeola ralloides*), il Falco di palude (*Circus aeruginosus*), il Cavaliere d'Italia (*Himantopus himantopus*), il Cannareccione (*Acrocephalus arundinaceus*), la Cannaiola (*A. scirpaceus*), il Forapaglie castagnolo (*A. melanopogon*) e il Pendolino (*Remiz pendulinus*). I salicornieti sono colonizzati dalla Cutrettola (*Motacilla flava*), e dalla Sterpazzola di Sardegna (*Sylvia conspicillata*).

Il processo partecipativo nella fase di progettazione

Il processo di partecipazione si è sviluppato fin dalle prime fasi di redazione del progetto preliminare coinvolgendo sia soggetti pubblici che privati: Provincia di Livorno, Comune di Piombino, Parchi Val di Cornia (società che gestisce l'ANPIL Sterpaia), ASIU Azienda Servizi Igienici Urbani di Piombino, Consorzio Balneare Costa Est, concessionari degli stabilimenti balneari e servizi di Sterpaia, Associazioni ambientaliste e culturali locali e cittadini (Fig. 6).

Durante le fasi di progettazione preliminare, definitiva ed esecutiva, sono stati organizzati momenti seminari, riunioni di approfondimento e sopralluoghi in campo, quest'ultimi finalizzati ad una migliore comprensione delle problematiche e per una efficace illustrazione delle soluzioni individuate.

Propedeuticamente alla realizzazione del progetto preliminare i concessionari degli stabilimenti sono stati coinvolti, a cura della Parchi Val di Cornia SpA, in un corso specifico finalizzato alla conoscenza delle valenze naturalistiche ed ambientali dell'area di Sterpaia, dei vincoli e normative vigenti e delle modalità di gestione sostenibile degli stabilimenti balneari.

I diversi livelli progettuali, successivamente alla loro approvazione, sono quindi stati collocati sul sito internet della Provincia di Livorno, in una pagina appositamente dedicata.



Figura 6 - Momenti della fase di partecipazione alle scelte progettuali: sopralluogo in campo con operatori balneari e incaricati delle pulizie della spiaggia (sx), discussione sulle proposte progettuali (dx).

La progettazione degli interventi di riqualificazione degli ambienti dunali

La riqualificazione degli ambienti dunali è stata perseguita mediante la progettazione di interventi di ingegneria naturalistica, di razionalizzazione della fruizione turistica (mediante chiusura sentieramenti, realizzazione sentieristica e accessibilità sostenibile e pannellistica), di eliminazione e controllo delle specie esotiche di flora, di taglio di specie arboree pericolanti e di piantumazione di specie psammofile autoctone.

La finalità degli interventi è quella di arrestare le dinamiche in atto nell'ecosistema dunale di Sterpaia che, se incontrollate, potrebbero comportare danni difficilmente recuperabili fino al depauperamento irreversibile dell'ecosistema. Al tempo stesso vengono accelerati alcuni processi spontanei di recupero della morfologia e vegetazione dunale, recuperando un equilibrio naturale più stabile. L'intervento ha valorizzato l'utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica, una disciplina tecnica che studia le modalità di utilizzo, come materiali di costruzione, di piante vive, di parti di piante o di intere biocenosi vegetali, impiegate insieme a materiali naturali, quali pietrame, terra, legname, bio-tessuti, ecc., in modo tale da svolgere contemporaneamente funzioni idrogeologiche, naturalistiche e paesaggistiche.

Queste tecniche permettono di raggiungere efficacemente, e con minimo impatto ambientale, l'obiettivo primario di ricostituire le condizioni ambientali favorevoli ad una successiva evoluzione naturale del sistema, accelerandone i tempi e riducendo sensibilmente gli effetti derivanti dalle pressioni antropiche.



Collocazione residui vegetali sciolti

In alcuni tratti della costa di Sterpaia, in corrispondenza di brevi interruzioni del sistema dunale legate al sentieramento, in aree di anteduna caratterizzate da processi di deposizione di sabbia e in aree degradate in prossimità degli stabilimenti balneari, è stata progettata la collocazione di materiale legnoso derivante dalle operazioni di pulizia della spiaggia o dal taglio dei pini in ambito dunale e retrodunale (per uno sviluppo complessivo di circa 250 m). Tale attività è già in corso di realizzazione, su brevi tratti di duna, ad opera dei gestori degli stabilimenti balneari e di ASIU, quale risultato del corso di formazione e degli incontri della partecipazione. Tale intervento (Fig. 7) dovrà diventare un elemento di gestione continua del sistema spiaggia-duna.

Figura 7 - Esempio di intervento di collocazione di residui vegetali sciolti sul fronte dunale (Marina di Bibbona).

Cataste di tronchi fissati con corda

L'intervento è previsto lungo i tratti di costa dove non si presentino particolari necessità di protezione dall'erosione marina in modo da favorire il ripascimento spontaneo del litorale (circa 2000 m complessivi). Si tratta di una catasta di legna di larghezza compresa tra 1.5 m e 3 m e altezza circa 1 m, formata da tronchi e rami ricavati dal taglio di pini e altre specie arboree e arbustive alloctone. La catasta sarà fissata mediante corda del diametro non inferiore a 2 cm di diametro, passata intorno a pali dell'altezza di 2-2.5 m.

La catasta sarà posizionata, dove possibile, in modo da lasciare una fascia di 2-3 m tra di essa e il piede della duna, da destinare al naturale sviluppo della vegetazione e della duna.

Viminate e palizzate

Il progetto prevede la realizzazione di *sand fencing* alla base della duna con viminata di erica disposta su una fila parallela alla linea di costa, a distanza variabile dal piede della scarpata (Fig. 8). L'opera è prevista, per uno sviluppo complessivo di circa 900 m) nei punti in cui non è presente una spiccata erosione marina e risulta necessario prevedere una protezione dell'anteduna e/o del piede della duna. L'intervento risulta efficace dove si debba attuare la riduzione dell'erosione eolica (piccole incisione o zone soggette a erosione frontale dal vento) e un controllo degli accessi. La realizzazione di palizzate è finalizzata a fornire una protezione al piede della duna, rallentando il flusso dell'onda e riducendone l'erosione, nonché favorendo l'accumulo di alghe e sabbia permettendo di conseguenza la formazione o l'accrescimento spontaneo del cordone antedunale.

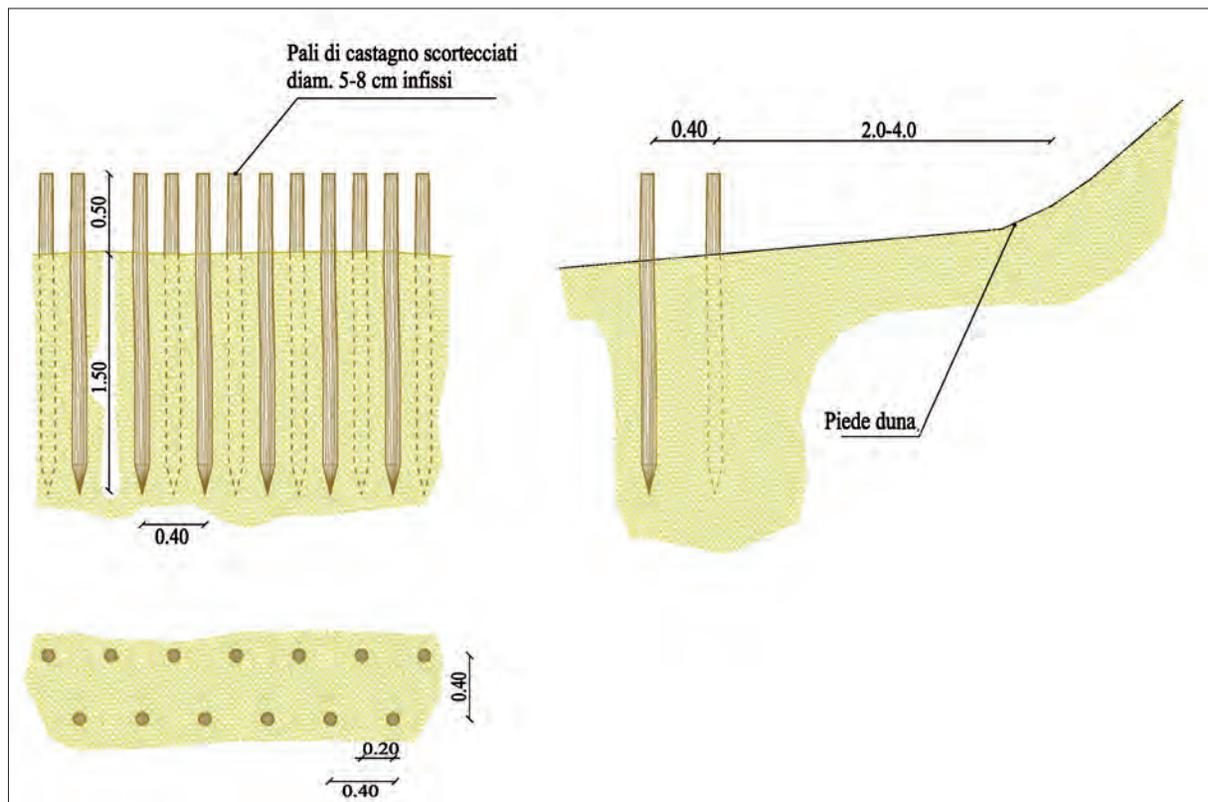


Figura 8 - Schema grafico di viminata prevista al piede dunale in aree con modesta erosione.

Biogabbione/fascinata

In zone che necessitano di protezione al piede della duna, ma ove non è presente spazio sufficiente per la realizzazione di altri interventi, è prevista la realizzazione del biogabbione (sviluppo complessivo di circa 550 m). I biogabbioni saranno realizzati in analogia ai gabbioni tradizionali, ma con materiali naturali. Si tratta di gabbioni a sezione quadrata con biorete esterna (agave o cocco) ad alta grammatura e biofiltro interno (cocco) di lato 0.8 - 1 m riempito con fascine di ramaglie legate e cippato misto a sabbia.

I gabbioni saranno ricoperti con sabbia proveniente dallo scavo, facilitandone l'infiltrazione e l'intasamento del corpo tramite contestuale colamento di acqua marina. I biogabbioni presentano un'elevata flessibilità ed adattabilità a variazioni morfologiche e inoltre non risultano visibili, se non a seguito di scalzamento per eventi di carattere eccezionale.

In zone soggette a erosione della duna con ristretto spazio al piede, a causa della presenza di arenile in concessio-

ne o altri vincoli, si prevede l'utilizzo di una fascinata (sviluppo complessivo circa 150 m) formata da un cilindro di fascine di ramaglia e cippato misto a sabbia contenuto da un telo di biofeltro di cocco (interno) e da una biorete in fibra di agave o cocco (esterno).

Cordone antedunale

Nelle zone soggette ad erosione da parte delle mareggiate il progetto prevede la collocazione di un "cordone antedunale" costruito mediante lo scavo di una trincea di profondità 1 m e larghezza in sommità di 3-3.5 m circa (Fig. 9). L'intervento avrà lo scopo di assorbire l'effetto delle onde e ridurre la probabilità che esse raggiungano la duna. Sul fondo della trincea sarà posta una biorete in fibra di cocco o di agave (per trattenere il materiale di riempimento) con sopra un biofeltro in fibra di cocco (finalizzato al contenimento della sabbia), di lunghezze tali da permettere la chiusura sopra il cordone. Il cordone verrà riempito con fascine di ramaglie di pino e tamerici e cippato di risulta misto a sabbia fino a raggiungere 1 m di altezza al di sopra del piano campagna. Nello strato superficiale sarà riportata la sabbia accantonata dello strato superficiale. Il cordone così realizzato sarà fissato ad un palo di castagno scortecciato di 10-12 cm di lunghezza compresa tra 1.5 e 2 m infisso per 1.5 m mediante due corde tessute alla biorete e al biofeltro e legate a cappio.

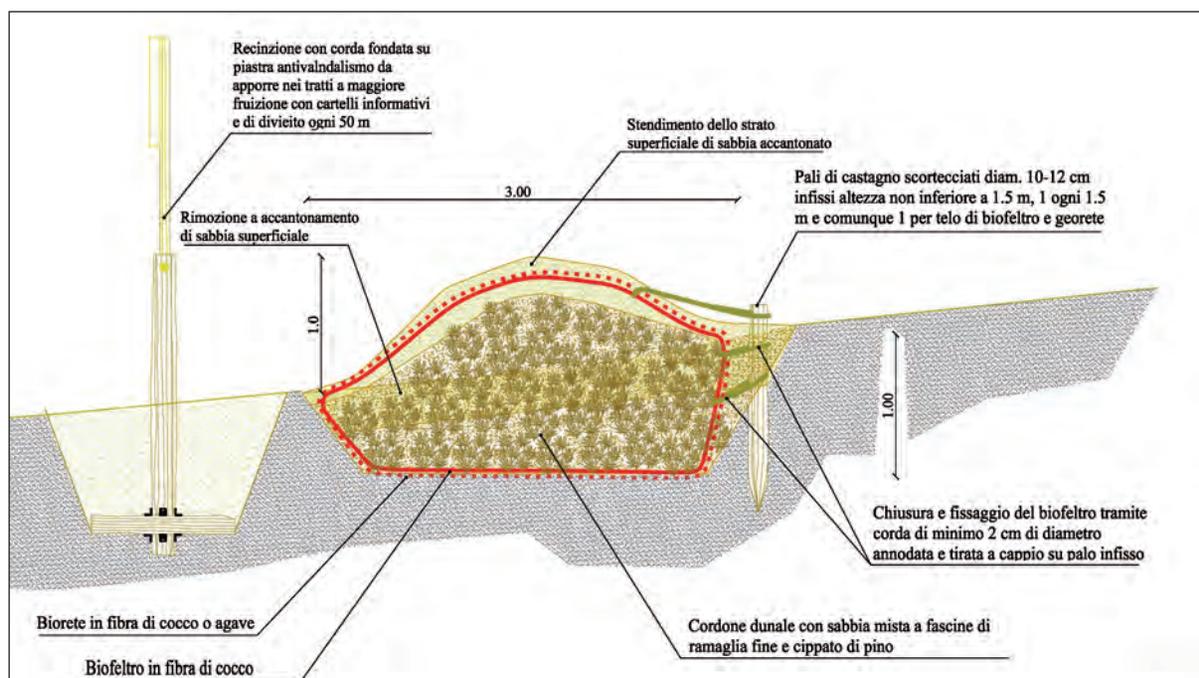


Figura 9 - Schema grafico di cordone antedunale con collocazione recinzione con corda sul lato mare.

L'intervento offrirà una buona protezione dall'azione marina, anche in presenza di mareggiate di una certa intensità. Questa soluzione è stata prevista anche in zone soggette ad elevata azione da parte delle mareggiate (per complessivi 1200 m), dove forti eventi potrebbero portare a danneggiamenti di un certo rilievo. In questi punti è ipotizzabile che comunque l'utilità dell'intervento sia limitato alla protezione da un numero ridotto di eventi, dopo ciascuno dei quali verificare l'effettiva tenuta del sistema attuando ripristini ove necessario.

Asportazione gabbionata esistente su duna

Circa 50 m di ambiente dunale in loc. Mortelliccio è attualmente occupato da una protezione in gabbioni con ciottoli di circa 10 cm di diametro. Tale elemento, oltre a rappresentare un manufatto artificiale incongruo e visivamente impattante, inibisce lo sviluppo della vegetazione e l'accrescimento dunale e rappresenta una difesa

rigida non adeguata alle problematiche erosive locali. Il progetto ha quindi previsto l'eliminazione del manufatto mediante lo scavo e lo sbancamento del cordone con escavatore dotato di benna.

Creazione/ripristino frangivento su sommità dunale

In presenza di pinete basse e di aree attrezzate turisticamente, su circa 250 m di sviluppo lineare, il progetto ha previsto la realizzazione di una barriera frangivento a fascinata di altezza fuori terra variabile tra 0.5 e 1.8 m. Ogni fascinata sarà realizzata con montanti di legno durevole (diametro di 10 cm), distanziati tra loro di 2 metri, e con 3 file di pali di castagno (diametro di 8 cm) ciascuno di lunghezza di 4 metri posizionati a coppia con viti autofilettanti in file orizzontali a creare un'armatura adatta a racchiudere fasci intrecciati di erica del diametro di 25-50 mm e lunghezze a correre non inferiori a 1.5 m, tenuti assieme con filo di ferro zincato e legate all'armatura.

Recupero sabbia deposta per ripristino duna

Nell'area di intervento sono presenti alcune zone retrodunali, di estensione ridotta, ove sono presenti accumuli di sabbia derivanti dall'azione delle forti mareggiate. I quantitativi non sono sufficienti a realizzare un adeguato ripascimento del corpo dunale, ma localmente tale sabbia (circa 600 m³) sarà utilizzata per la chiusura degli accessi ai sentieri e la formazione di piccoli rilevati. Le lavorazioni saranno eseguite con miniescavatori cingolati o gommati di peso operativo massimo non superiore a 2500 kg e di lunghezza al suolo non superiore a 1.5 m.

Impianto specie erbacee psammofile

L'intervento prevede la realizzazione di celle di impianto all'interno di schermi di 2x2 m di protezione (dal vento e dal calpestio), per una superficie complessiva di 640 m². Il progetto ha previsto l'impianto di specie di flora psammofila in vaso 10x10x15 cm, propagate da materiale di provenienza certificata (ecotipi locali). In particolare verranno utilizzate le seguenti specie: *Ammophila arenaria*, *Agropyrum junceum*, *Sporobolus pungens*, *Calystegia soldanella*, *Pancratium maritimum*, *Echinophora spinosa*, *Eryngium maritimum*.

L'impianto avverrà nell'ambito di barriere frangivento costituite da schermi quadrati montati a scacchiera, di 2 m di lato. La struttura portante sarà realizzata con pali di castagno (h= 100 cm, d = 10 cm), interrati per circa 50 cm, posti ai vertici del quadrato e a distanza di un metro l'uno dall'altro. Gli schermi saranno costituiti da stuoia in canne, tessuta in modo da risultare semipermeabile al vento, favorendo la deposizione del sedimento, interrata per circa 20 cm e fissata ai pali in legno mediante due verghe, ancorate con tirafondi, e legata con corde in canapa.

Impianto specie erbacee/arbustive psammofile

L'intervento verrà realizzato negli ambiti di duna fissa e retrodunali degradati e frammentati, in corrispondenza delle superfici dove è maggiore il diradamento della vegetazione e su substrati in parte pedogenizzati; in aree interessate da interventi di ampliamento e riqualificazione degli habitat; in aree di duna fissa interessate da taglio ed asportazioni di pini; in aree interessate dall'asportazione delle cenosi esotiche.

L'intervento prevede la realizzazione di celle di impianto quadrangolari identiche a quelle descritte per l'intervento precedente. Gli impianti prevedono l'uso di specie arbustive autoctone quali *Juniperus oxycedrus* subsp. *macrocarpa*, *Pistacia lentiscus* e *Cistus salvifolius*. Le piantine dovranno essere, a seconda della specie, di uno o due anni, allevate in contenitore (vaso o fitocelle; altezza 15 cm circa) con dichiarazione di origine del seme o materiale da propagazione.

Taglio di piante di pino e impianto specie psammofile e/o retrodunali

Intervento di taglio degli esemplari di pino e impianto di specie vegetali autoctone o di pini mediterranei, previsto su ambiti di sommità dunale e di retroduna caratterizzati dalla presenza di nuclei di pineta con piante di pino (*Pinus halepensis*, *Pinus pinea*, *P. pinaster*) di varia dimensione adagiate al suolo, stroncate, secche,

aduggiate o fortemente deperienti, spesso a costituire elementi di rischio per i fruitori dell'area. In alcuni casi trattasi anche di esemplari isolati, comunque sempre in pessime condizioni vegetative o del tutto secche.

Eliminazione/controllo di specie aliene di flora

L'intervento prevede la eliminazione diretta, mediante eradicazione, di 4.000 m² di cenosi esotiche a *Carpobrotus acinaciformis* su dune. L'eradicazione della specie invasiva è da eseguirsi direttamente a mano o con attrezzi manuali idonei, nei settori puntiformi, con trattamento chimico nelle aree più estese (ogni sito ha un'ampiezza che va da pochi m² a qualche centinaia di m²). Il progetto prevede l'eliminazione di ulteriori circa 4 ettari di cenosi a *Carpobrotus acinaciformis* nel sottobosco della pineta situata nella porzione centrale di Sterpaia e di circa 2.100 m² di cenosi esotiche miste con *Agave americana*, *Opuntia* sp.pl., *Pittosporum tobira*, *Yucca gloriosa*, ecc.

Chiusura accessi alla battigia

I sentieri di accesso rappresentano una via privilegiata dell'erosione eolica e di conseguenza è necessario attuare un controllo degli ingressi all'arenile, strutturandone un numero ridotto, rispetto a quelli presenti, ove operare opportune misure di protezione dall'azione del vento, prevedendo la chiusura degli altri.

Il processo di razionalizzazione del carico turistico ha portato a progettare la chiusura di 131 sentieri o sentieramenti esistenti per uno sviluppo complessivo di 4.600 m.

La chiusura delle aperture sul fronte dunale sarà attuata mediante la posa in opera di 3-4 viminate sovrapposte e collocate in senso parallelo alla linea di costa e distanziate tra loro in misura crescente con l'aumentare della distanza dal mare. Ogni viminata è composta da verghe di erica del diametro di 40-50 mm, lunghezze a correre non inferiori a 1.5 m, intrecciate su picchetti di sostegno, per un'altezza di 30-40 cm fuori terra e fissate con filo di ferro non zincato. In aggiunta o parziale alternativa al suddetto modello realizzativo saranno utilizzati anche tronchi e materiale vegetale legnoso di varia pezzatura, purché opportunamente sagomato a misura, recuperato direttamente in loco.

Mantenimento e riqualificazione accessi alla battigia

Il progetto ha individuato un numero di 55 accessi da mantenere ed attrezzare, distribuiti in tutta l'area di intervento. Questi saranno dotati di camminamento attrezzato costituito da una pedana/passarella in legno appoggiata al suolo (largh. media utile 1,20 m) di lunghezza in media di circa 25 metri (per una lunghezza complessiva di circa 1.400 m) disposta secondo l'andamento morfologico del tracciato esistente (Fig. 10), che in prossimità dell'imbocco all'arenile si adatta al profilo naturale della duna anche mediante l'eventuale realizzazione di scalini.

Tale camminamento è costituito da listoni piallati e smussati in legno di larice o pino nordico pretrattati in autoclave (tavole spessore 4.5 cm; larghezza 14.5 cm; lunghezza in opera 125 cm e lunghezza di produzione 500 cm.) fissate trasversalmente con viti autofilettanti sopra listoni di pari misura posti in opera interrati di taglio. I bordi della pedana sono rifiniti con mezzi pali di stesso legname, diametro 10 cm posti longitudinalmente e fissati con viti autofilettanti sopra il piano di calpestio. All'inizio di ogni accesso/sentiero attrezzato verrà collocato un piccolo pannello informativo in legno (20x40 cm), con il numero di riferimento del sentiero e la sua localizzazione nell'ambito della Costa di Sterpaia rispetto ai parcheggi e agli altri accessi attrezzati.

Realizzazione staccionate

L'intervento ha la finalità di delimitare aree dunali di interesse conservazionistico impedendo l'accesso dei turisti e fenomeni di calpestio. Consente inoltre di indirizzare i fruitori dell'area verso gli ingressi attrezzati. Il progetto prevede la realizzazione di circa 400 m di staccionate in paleria di legno trattata; di altezza utile fuori terra 1,05-1,10 m. La staccionata sarà costituita da montanti di diametro 12 cm posti ad interasse di 1,60 m (max. 1,70 m), traverse di diametro 8 cm posizionate a croce tra un montante e l'altro, e corrimano di diametro 10 cm



Figura 10 - Modello di passerelle in legno, con o senza staccionate, previsto per l'area di Sterpaia (tipologie utilizzata nell'ambito del Parco Regionale di Migliarino, San Rossore e Massaciuccoli).

posto alla sommità dei montanti; il tutto in paleria di legno di castagno o larice o pino nordico, scortecciato, rifilato e trattato con impregnante protettivo da esterno, tossico, di colore neutro, possibilmente del tipo all'acqua.

Realizzazione e collocazione pannelli informativi e di divieto

Di frequente i danni antropici agli ambienti dunali sono riconducibili a una cattiva fruizione causata da una scarsa conoscenza del valore e della vulnerabilità degli ecosistemi dunali. L'informazione ai fruitori risulta quindi un intervento di utilità pari agli interventi attivi di difesa. A questo scopo, il progetto prevede, quindi, di realizzare e installare pannelli didattici per uso esterno in legno trattato (100x120 cm), in particolare di 2 tipi:

- uno descrittivo degli ambienti di duna e retroduna, degli habitat e delle specie di flora e di fauna, delle emergenze e degli elementi di criticità;
- l'altro contestualizzato a specifici interventi di riqualificazione realizzati nell'area.

Entrambi conterranno una parte relativa alla illustrazione delle cause di minaccia degli ambienti dunali e delle norme comportamentali da osservare.

In totale sono previsti 60 pannelli, 30 per entrambe le due tipologie tematiche. Sono inoltre previsti 13 pannelli di divieto di accesso (30x30 cm) da localizzare in punti strategici per una efficace riduzione del sentieramento su duna.

Proposta di regolamentazione delle attività di uso della fascia costiera

In considerazione delle problematiche di conservazione degli ambienti dunali e retrodunali di Sterpaia è risultato indispensabile associare alla realizzazione degli interventi di riqualificazione anche buone pratiche e norme comportamentali indirizzate ai gestori degli stabilimenti balneari, ai fruitori dell'area ed agli Enti competenti alle operazioni di pulizia della spiaggia.

Si tratta di una attività in grado di migliorare l'efficacia complessiva delle azioni di riqualificazione e difesa del sistema costiero di Sterpaia.

Il processo di redazione della progettazione degli interventi in oggetto, soprattutto relativamente alla buone pratiche, ha valorizzato la fase di partecipazione al fine di produrre contenuti condivisi degli Enti, Associazioni e portatori di interessi locali.

In particolare sono state sviluppate buone pratiche, norme e linee guida in grado di condizionare le attività antropiche nelle diverse zone della costa di Sterpaia (Spiagge ed habitat dunali di valore naturalistico; Zone con strutture temporanee o stabili per la balneazione), o per i diversi tratti trasversali al sistema costiero (zona affitoica tra la battigia ed il piede della duna; zona dunale; zona retrodunale).

La proposta di buone pratiche e norme comportamentali ha cercato di valorizzare i contenuti, già cogenti, dei diversi strumenti pianificatori vigenti nell'area, ed in particolare il Regolamento di gestione dell'Area Protet-

Danneggiamento flora e fauna

Nell'ambito del territorio costiero di Sterpaia sono presenti formazioni vegetali e specie di flora e fauna di interesse conservazionistico (specie di interesse regionale di cui alla LR 56/2000 e/o comunitario di cui alle Direttive 92/43/CEE e 79/409/CEE) o comunque funzionali alla protezione del sistema dunale. Sono quindi vietate attività che comportano il danneggiamento diretto di habitat o specie ad eccezione degli interventi di riqualificazione ambientale e di controllo delle specie esotiche, autorizzati dall'Ente gestore dell'ANPIL.

Accesso mezzi meccanici

Ad eccezione dei mezzi di soccorso e dei mezzi utili alle attività di pulizia delle spiagge, per quest'ultime nelle modalità prima definite, è vietato l'accesso e la circolazione di mezzi meccanici sulla battigia, nella spiaggia e sul sistema dunale. Le vie di accesso dei mezzi meccanici sono precisamente individuate nelle cartografie di progetto. Lo spostamento lungo la costa dovrà avvenire lungo la battigia evitando le aree adiacenti al piede dunale.

Illuminazione delle strutture balneari e servizi

In ambito di ecosistemi costieri l'illuminazione notturna può costituire un forte elemento di criticità per rare specie di invertebrati della zona di battigia-spiaggia (tra cui rari coleotteri endemici) e, soprattutto se indirizzata verso il mare, per importanti specie di uccelli marini.

Nell'ambito degli stabilimenti balneari e delle strutture di servizio, l'illuminazione dovrà caratterizzarsi ad adeguate scelte tecniche finalizzate a raggiungere maggiori livelli di sostenibilità, sia in termini di inquinamento luminoso, di consumi energetici che di disturbo alla fauna locale. Gli impianti di illuminazione dovranno risultare coerenti con la normativa regionale di settore e le relative linee guida regionali. Tra le principali indicazioni:

- illuminazione solo verso il basso e schermatura verso il mare,
- scelta adeguata dei punti luce e limitazione dell'intensità luminosa,
- utilizzazione di lampade ai vapori di sodio a bassa pressione.

L'illuminazione è consentita solo in adiacenza delle strutture fisse mentre non è consentita l'illuminazione notturna delle spiagge.

Verde di arredo delle strutture balneari e servizi

La presenza di specie esotiche di flora costituisce una delle principali minacce alla biodiversità negli ambienti costieri mediterranei. Alcune specie in particolare, quali il genere *Carpobrotus*, costituiscono formazioni dense in grado di sostituirsi agli habitat e alle specie tipiche delle dune. Negli arredi verdi degli stabilimenti balneari è molto diffuso l'utilizzo di specie aliene, una pratica che comporta poi la diffusione spontanea di tali specie sulle formazioni dunali. Alle azioni di eliminazione di tali formazioni a *Carpobrotus* si deve quindi unire il divieto di utilizzo di specie aliene negli arredi degli stabilimenti.

Localizzazione strutture balneari, servizi, ecc.

La localizzazione delle spiagge attrezzate, delle postazioni per la sicurezza e la sorveglianza, chioschi per ristoro, rimessaggi dei servizi, ecc. non deve avvenire a discapito di habitat dunali e di anteduna. Gli interventi di riattivazione di tali attività non deve compromettere quindi ulteriori porzioni di ambienti dunali o di margini di essi, sia direttamente sia attraverso le operazioni di pulizia della spiaggia.

In considerazione della qualità e vulnerabilità degli habitat dunali si ritiene non realizzabile una eventuale previsione di ulteriore sviluppo di nuove strutture/concessioni per l'utilizzo delle spiagge di Sterpaia.

Conclusioni

Attraverso un processo di partecipazione l'Ufficio Pianificazione, Difesa del Suolo e delle Coste della Provincia di Livorno ed i progettisti incaricati, in accordo con gli Enti locali, in particolare Parchi Val di Cornia Spa e

Comune di Piombino, hanno realizzato, negli anni 2009 e 2010, la progettazione preliminare, definitiva ed esecutiva degli interventi di riqualificazione e ripristino del sistema dunale e retrodunale di Sterpaia. Tale progettazione è stata approvata dalla Provincia di Livorno nel corso del 2010 e nell'ambito del 2011 è prevista la realizzazione degli interventi.

L'esperienza di progettazione realizzata ha evidenziato l'importanza della fase di partecipazione dei soggetti pubblici e privati locali, elemento fondamentale per una condivisione degli obiettivi e per la massima efficacia degli interventi. I sistemi dunali rappresentano infatti non solo ambienti di elevato valore conservazionistico ma anche una preziosa fonte di "servizi ecosistemici", creando paesaggi di elevato valore turistico ed economico, tutelando le falde dulcacuicole costiere ed impedendo l'ingressione del cuneo salino, tutelando le aree agricole e le infrastrutture costiere ed ostacolando l'erosione costiera.

L'analisi di altre esperienze italiane di riqualificazione dei sistemi dunali ha inoltre evidenziato come molto spesso tali interventi vengano attuati senza un'adeguata analisi preliminare e multidisciplinare delle aree di intervento e di frequente utilizzando tecniche standardizzate e talora inefficaci, se non addirittura controproducenti. Infatti con l'obiettivo di contenere le azioni meteomarine, sono state realizzate opere strutturali, anche in calcestruzzo o massi, che provocano esse stesse effetti erosivi, a causa della risposta "rigida" alle azioni stesse, non tenendo conto del substrato e degli elementi naturali con cui interagiscono.

Per questo motivo è necessario concepire gli interventi in modo che siano compatibili con l'ambiente naturale e le sue dinamiche e "dedicati" al sito, nonché sperimentare e mettere a punto soluzioni alternative a quelle dell'ingegneria convenzionale. Principio fondamentale del progetto è stato quindi quello di "restituire spazio al sistema dunale", affinché esso possa espletare le proprie dinamiche evolutive, sia attraverso interventi di riqualificazione delle dune sia attraverso una razionalizzazione ed una maggiore sostenibilità delle importanti attività turistiche presenti a Sterpaia.

Bibliografia

- Arrigoni P.V. (1993) - *Tipologia vegetazionale e dinamismo delle pinete litoranee toscane*. Pretirage del "Convegno sulla salvaguardia delle pinete litoranee". Grosseto, PP. 21-30.
- Arrigoni P.V. (1998) - *La vegetazione forestale. Boschi e macchie di Toscana*. Regione Toscana, Giunta Regionale. Dipartimento dello Sviluppo Economico.
- Arrigoni P.V., Menicagli E. (1999) - *Carta della vegetazione forestale (scala 1:250.000)*. Boschi e macchie di Toscana. Regione Toscana, Giunta Regionale.
- Comune di Piombino (1986) - *Piano particolareggiato di esecuzione*. Comuni di Campiglia M., Piombino, San Vincenzo, Suvereto, Sassetta "Piani Regolatori Generali Coordinati", Tav. n. 1.
- Comune di Piombino (1990) - *Indagini sulle lottizzazioni abusive*. Ed. Bandecchi & Vivaldi.
- Corti C., Nistri A., Poggesi M. e Vanni S. (1991) - *Biogeographical analysis of the Tuscan herpetofauna (Central Italy)*. Revista Española de Herpetologia, 5: 51-75.
- Mondino G.P. (1997) - *Carta della vegetazione forestale potenziale (scala 1:250.000)*. Boschi e macchie di Toscana. Regione Toscana, Giunta Regionale.
- Mondino G.P., Bernetti G. (1998) - *I Tipi forestali*. Serie Boschi e macchie di Toscana. Regione Toscana, Giunta Regionale. Dipartimento dello Sviluppo Economico.
- Nistri A., Corti C., Poggesi M. e Vanni S. (1991) - *Biogeographical analysis of the Tuscan herpetofauna (Central Italy)*. Revista Española de Herpetologia, 5: 51-75.
- Provincia di Livorno (1997) - *Il sistema dunale della Provincia di Livorno. Analisi dello stato di fatto*.
- Rombai L. (1977) - *Fascia costiera da Torre del Sale a Prato Ranieri*. In "Aree verdi e tutela del paesaggio" a cura di Canigiani F., Guaraldi Editore.
- Sposimo P., Tellini G.F. (1995) - *L'avifauna in Toscana: lista rossa degli uccelli nidificanti*. Regione Toscana Giunta Regionale.
- Terzani F. (1995) - *Lepidoptera Satyridae. Coenonympha elbana Staudinger, 1910*. In: Reperti. Bollettino

ta di Interesse Locale “Sterpaia”, il Piano particolareggiato della Costa orientale, il Regolamento del Demanio marittimo e le Linee guida per la gestione integrata della Posidonia della Provincia di Livorno.

Attraversamento degli ambienti dunali

Con la realizzazione del progetto, l'attraversamento degli ambienti dunali potrà avvenire solo attraverso i camminamenti attrezzati con passerelle in legno, con divieto di attraversamento degli ambienti dunali aperti. Alcune aree dunali classificate come “habitat dunali di valore naturalistico” saranno delimitate da staccionate al fine di una loro integrale tutela.

Pulizia della spiaggia e raccolta dei rifiuti

Zone con strutture fisse o temporanee per la balneazione

La pulizia ordinaria dell'area connessa alle attività, anche quotidiana durante la stagione balneare, dovrà essere manuale, con la raccolta di rifiuti e altro materiale spiaggiato al suolo, o meccanica mediante piccoli mezzi vagliatori, gommati o cingolati, in grado di non asportare la sabbia dalla spiaggia. Solo per manutenzione straordinaria, a fine inverno, potranno essere effettuate operazioni di pulizia con mezzi meccanici di limitato ingombro (interasse massimo 2 metri, senza escavatori, né mezzi cingolati) ed a carico sia dei rifiuti (plastica, vetro, ecc.) che del materiale spiaggiato naturale (materiale organico, legno, ecc.). Quest'ultima pulizia potrà avvenire dandone comunicazione alla Parchi Val di Cornia e dovrà essere realizzata solo nella zona afitoica e senza interessare direttamente il piede delle dune.

Il materiale organico derivante dalla pulizie delle aree in concessione dovrà essere collocato al piede delle dune, nelle zone di interruzione del sistema dunale o in aree indicate nelle cartografie di progetto. Il materiale organico raccolto nelle operazioni di pulizia straordinaria (legname, posidonia, ecc.) dovrà essere collocato nelle aree di stoccaggio appositamente individuate dal progetto di riqualificazione (aree di anteduna, zone di interruzione del sistema dunale, fascia antistante la fascinate frangivento in corrispondenza degli stabilimenti). Altre aree potranno essere individuate dalla Parchi Val di Cornia, anche su indicazione dei gestori degli stabilimenti, per affrontare eventuali nuovi problemi di erosione o di alterazione del sistema dunale. Non è comunque consentito lo scarico del materiale organico direttamente sugli habitat dunali e retrodunali.

Spiagge ed habitat dunali di valore naturalistico

La pulizia dovrà avvenire esclusivamente con mezzi manuali ed a carico dei soli rifiuti non organici (plastica, vetro, ecc.). Essa non comprende quindi il materiale spiaggiato organico e dovrà realizzarsi solo nella zona afitoica dandone comunicazione alla Parchi Val di Cornia.

Solo per manutenzione straordinaria, alla fine dell'inverno, ed a carico del materiale spiaggiato di maggiori dimensioni (grandi tronchi spiaggiati) potranno essere effettuate operazioni di pulizia meccanica. Il materiale organico derivante dalla manutenzione straordinaria dovrà essere accumulato alla base dell'ante duna o in aree caratterizzate dalla presenza di aperture nel sistema dunale, costituendo materiale utile a funzioni di *sand fencing*.

Le eventuali operazioni di pulizia straordinaria non dovranno comunque avvenire a carico degli eventuali accumuli di posidonia.

Altri tratti di costa

Valgono le indicazioni di cui alla categoria precedente con la possibilità aggiuntiva di realizzare pulizie straordinarie meccaniche, alla fine dell'inverno, ed a carico del materiale spiaggiato e non solo su quello di maggiori dimensioni (grandi tronchi spiaggiati). Il materiale organico derivante dalla manutenzione straordinaria dovrà comunque essere accumulato alla base dell'ante duna o in aree caratterizzate dalla presenza di aperture nel sistema dunale, costituendo materiale utile a funzioni di *sand fencing*.

Le eventuali operazioni di pulizia straordinaria non dovrà avvenire a carico degli eventuali accumuli di posidonia.

dell'Associazione Romana di Entomologia, 49: 215-217.

Vanni S. (1981) - *Gli Anfibi e i rettili italiani del Museo provinciale di Storia naturale di Livorno*. Quaderni del Museo di Storia Naturale di Livorno, 1: 55-59.

Università di Firenze, Museo di Storia Naturale (2003) - *Progetto di approfondimento e di riorganizzazione delle conoscenze sulle emergenze faunistiche, floristiche e vegetazionali della Toscana*. Banca dati del Repertorio Naturalistico Toscano. ARSIA, Dipartimento delle Politiche Territoriali e Ambientali della Regione Toscana.

Ricevuto il 01/04/2010, accettato il 20/05/2010.