

Studio dei cambiamenti di un sistema dunale mediante integrazione di fotoaeree e immagini MIVIS e Quickbird.

Alessandra Grignetti, Ruggero Casacchia e Rosamaria Salvatori

CNR - IIA Via Salaria, km 29 - 00016 Monterotondo Stazione (Roma). Email: grignetti@iia.cnr.it

Riassunto

Questo studio analizza le variazioni avvenute dalla fine degli anni '50 al 2002 sul sistema dunale di un'area costiera a circa 30 km a sud di Roma, utilizzando fotografie aeree del 1959, 1985 e 1994, dati aerei iperspettrali (MIVIS) del 1995 e immagine del satellite Quickbird del 2002. Dalla fotointerpretazione sono stati ricavati i tematismi relativi ai cordoni dunali, alla vegetazione e alle infrastrutture per le tre epoche. Le immagini digitali sono state trattate con tecniche di filtraggio e di classificazione per estrarre i dati utili per lo studio. I risultati ottenuti evidenziano che l'estensione dei cordoni dunali è progressivamente diminuita (10%-15%) sia nell'area protetta che nelle aree caratterizzate da una fruizione pubblica, a causa dell'aumento di infrastrutture. I dati MIVIS e Quickbird si sono rivelati estremamente utili nel riconoscimento dei diversi tipi vegetazionali e nella realizzazione di carte tematiche da confrontare con i risultati delle analisi dei dati storici.

Abstract

This study refers to the variations occurred in a dune system, located about 30 km south-east of Rome, from late fifties to 2002, making use of aerial photographs acquired in 1959, 1985 and 1994, airborne hyperspectral data (MIVIS) of 1995 and high resolution satellite data of 2002. Using photo-interpretation dune features, vegetation units and infrastructures were mapped and digitised to create a geocoded data set. High-pass filtering and different classification techniques were applied on digital data. Results of this study show that the surface extension of the dune has decreased (10%-15%) in both protected and public areas as a consequence of infrastructures increase. MIVIS and Quickbird data were extremely useful to better define the vegetation units and to provide a detailed mapping of the dune system features to compare with historical data.

Introduzione

Gli ecosistemi costieri costituiscono entità complesse e dinamiche i cui equilibri sono legati sia alla componente marina e terrestre, sia ad aspetti socioeconomici e culturali. Questi ambienti sono quindi estremamente fragili e sensibili; pertanto, se sottoposti ad uno sfruttamento eccessivo, dovuto all'aumento incontrollato degli insediamenti residenziali, o ad un uso massiccio a fini turistici, sono soggetti a gravi alterazioni che determinano erosione costiera, inquinamento delle acque, e danneggiamento delle dune litoranee. In Italia il crescente intervento antropico sulle coste ha condizionato la tendenza evolutiva delle spiagge, rendendo il bilancio sedimentario sempre più in difetto e tale da innescare considerevoli processi erosivi [Fierro, 2004]. Per le coste italiane, caratterizzate per il 61% da arenili, si è osservato che il 27% delle spiagge risulta attualmente in erosione, il 70% può essere considerato in equilibrio (in parte dovuto agli interventi di difesa), mentre solo il 3% mostra quella tendenza verso l'avanzamento che caratterizzava nei secoli scorsi la maggior parte delle spiagge [Caputo et al., 1990 e 1991].

Numerosi studi sugli effetti del disturbo antropico in relazione alla distribuzione spaziale delle comunità vegetazionali psammofile nel litorale laziale [Acosta et al., 2003; Blasi et al., 1999] hanno messo in evidenza che tali

cenosi si comportano da bioindicatori dello stato di conservazione dell'ambiente dunale [Iannantuono et al., 2004]; pertanto, stimando l'estensione superficiale, la struttura e la composizione floristica della vegetazione dunale, è possibile dedurre l'intensità e l'entità del danno presente in una zona e approntare adeguati strumenti di pianificazione territoriale per la corretta gestione di queste aree.

Sebbene la raccolta di dati con metodi tradizionali rimanga una componente fondamentale nello studio di questi ambienti [Baily e Nowell, 1996], dati acquisiti mediante sensori remoti ottici contribuiscono in modo sostanziale agli studi sull'uso e copertura del suolo, sull'idrologia ed ecologia costiera, nonché sulla qualità delle acque e sul trasporto dei sedimenti [Phinn et al., 2000; Ramsey III et al., 2001; Torres-Pulliza et al., 2001]. In particolare, i dati satellitari di nuova generazione, con risoluzioni spaziali sub-metriche [Boccardo, 2000], permettono di monitorare i cambiamenti territoriali, ottenendo prodotti cartografici a scala confrontabile con quella dei prodotti derivati dalle foto aeree acquisite in epoche precedenti [Peccol et al., 2003].

In tale contesto si inserisce questo studio che, avvalendosi di dati storici e recenti provenienti da fonti diverse, ha lo scopo di rilevare e di quantificare, a cadenza temporale, le variazioni occorse in un'area costiera a sud di Roma, sottoposta ad un'intensa pressione antropica. Inoltre questo studio, realizzato nell'ambito di una collaborazione tra il Comune di Roma, Dipartimento X, ed il CNR, Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, ha fornito gli elementi utili per valutare l'efficacia degli interventi adottati dall'Amministrazione Comunale negli ultimi dieci anni.

Area di studio

L'area di studio è costituita da una fascia costiera a sud di Roma che si estende per circa 8 Km dalla Tenuta Presidenziale di Castelporziano fino alla città di Torvaianica (Figura 1) ed è caratterizzata da depositi sabbiosi appartenenti al sistema della duna recente. Tale fascia costiera, proposta come Sito di Importanza Comunitaria (IT6030027), è caratterizzata dalla seriazione psammofila costituita dall'insieme di comunità effimere del primo tratto di spiaggia emersa (1210)¹, comunità a *Elytrigia juncea*² e *Sporobolus virginicus* (2210) e popolamenti ad *Ammophila littoralis* (2120). Questo insieme di cenosi risulta caratterizzato da poche specie fortemente selezionate per le estreme condizioni di vita (vento, salinità del suolo), che svolgono un importante ruolo nella prima azione di colonizzazione della spiaggia e nella formazione e stabilizzazione delle dune embrionali. Sono comunità a bassa copertura (20-30%) che compaiono lungo il litorale in maniera sporadica e spesso in situazioni di mosaico tra di loro [Pignatti et al., 2001].

Tabella 1. Descrizione fisionomica dei tipi vegetazionali analizzati sulle fotografie aeree e sulle immagini.

Tipi vegetazionali	Descrizione fisionomica strutturale
Sabbia	Dune mobili in embrione prive di vegetazione e/o con vegetazione effimera a dominanza di <i>Cakile maritima</i> ssp. <i>maritima</i>
Vegetazione psammofila	Dune mobili con vegetazione erbacea emicriptofitica a copertura bassa (<30%) caratterizzata da <i>Elytrigia juncea</i> e <i>Ammophila littoralis</i>
Macchia bassa	Dune stabili con vegetazione nanofanerofitica e fanerofitica a copertura media (40%-70%) caratterizzata da <i>Cistus</i> sp. pl. e <i>Rosmarinus officinalis</i>
Macchia alta	Dune stabili con vegetazione nanofanerofitica e fanerofitica a copertura elevata (>70%) caratterizzata da <i>Juniperus</i> sp. pl., <i>Pistacia lentiscus</i> e <i>Phyllirea latifolia</i>
Boscaglia igrofila	Retroduna umida con nuclei residuali a <i>Fraxinus angustifolia</i> ssp. <i>oxycarpa</i> con <i>Alnus glutinosa</i> e <i>Ficus carica</i>
Pratelli	Vegetazione erbacea terofitica in mosaico con gariga e macchia

¹ Codice Natura 2000 secondo Interpretation Manual of European Union Habitats, EU15/2, October 1999.

² Per la nomenclatura delle specie si fa riferimento ad Anzalone B. (1994). Prodromo della flora romana (Elenco preliminare delle piante vascolari spontanee del Lazio) Parte 1^a. Ann. Bot. (Roma), LII, Suppl. 11 e Parte 2^a. Ann. Bot. (1996) LIV.

Procedendo verso l'entroterra, la vegetazione dominante è la gariga, costituita da bassi arbusti che raramente raggiungono il metro e caratterizzata dall'elevata copertura di *Cistus creticus ssp. eriocephalus* con *Erica multiflora* e *Rosmarinus officinalis*. A contatto con la gariga risultano presenti significativi aspetti di macchia a ginepri (*Juniperus oxycedrus ssp. macrocarpa* e *J. phoenicea*) accompagnata da *Phyllirea latifolia*, *Pistacia lentiscus*, *Rhamnus alaternus*, *Arbutus unedo* (5210), che determinano il consolidamento e la stabilizzazione del suolo. Tale comunità si va strutturando in altezza raggiungendo anche i 2 o 3 metri (macchia alta) soprattutto nelle zone sottovento.

E' importante inoltre menzionare la presenza, nelle depressioni interdunali in cui affiora la falda acquifera, di popolazioni a carattere residuale in cui il *Fraxinus angustifolia ssp. oxycarpa* è la specie dominante, accompagnato da *Alnus glutinosa* e *Ficus carica* (2190). Localmente si rinvencono anche pratelli terofitici (2240 e 2230), spesso presenti in mosaico con macchia e gariga, a fenologia primaverile con *Tuberaria guttata*, *Aira elegantissima*, *Trifolium cherleri* e *Vulpia myuros* [Pignatti et al., 2001].

Le tipologie brevemente descritte sono state successivamente riunite in tipi vegetazionali così come descritti in tabella 1, successivamente individuati e cartografati sia sulle fotoaeree che sulle immagini telerilevate.

Acquisizione ed elaborazione dati

I dati utilizzati in questo lavoro sono costituiti da foto aeree acquisite con il volo effettuato dallo Stato Maggiore dell'Aeronautica nel 1959 (scala 1:10000), e con i voli effettuati dalla Soc. S.A.R.A. NISTRINI nel 1985 (scala 1:12000) e nel 1994 (scala 1:15000); immagini riprese dal sensore iperspettrale aviotrasportato MIVIS (*Multispectral Infrared Visible Imaging Spectrometer*) il 20 giugno 1995, e dal satellite multispettrale Quickbird il 16 maggio 2002.

L'area di studio (figura 1) è stata suddivisa in tre zone che si distinguono in base al diverso tipo di gestione ed utilizzo del territorio come riportato in tabella 2.

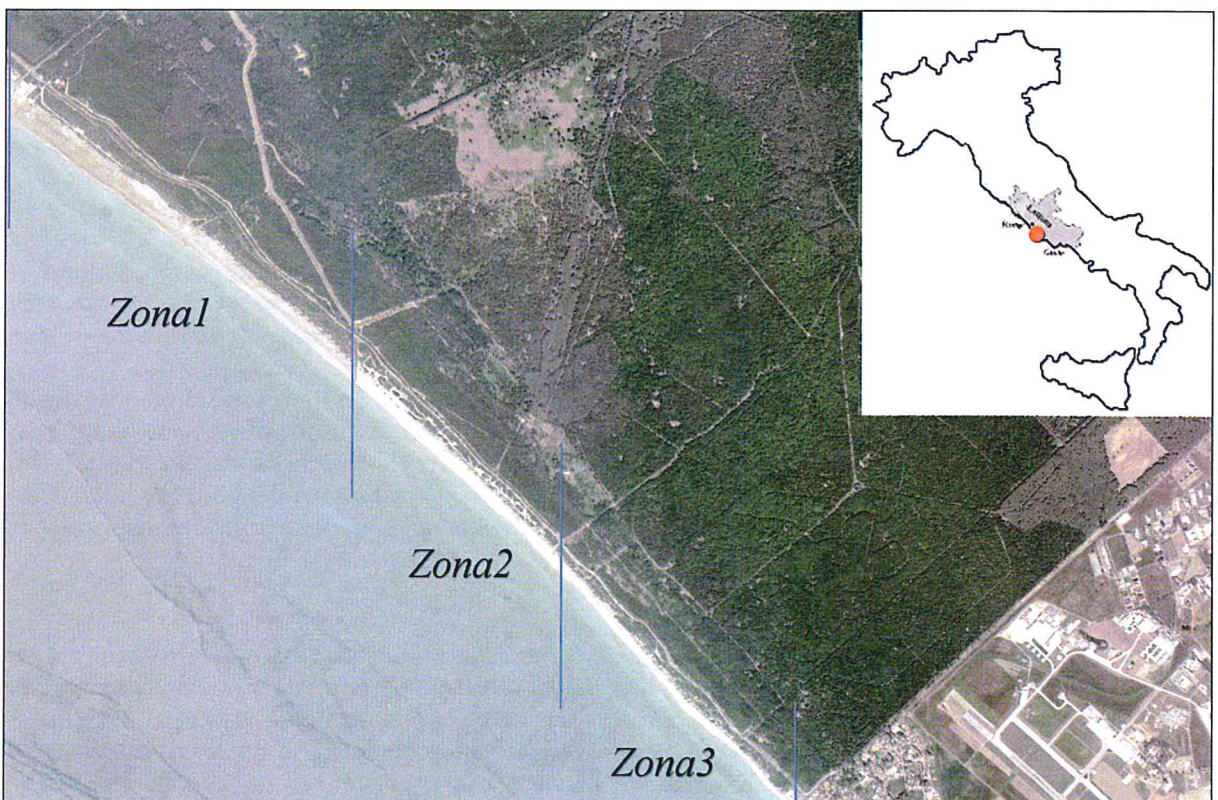


Figura 1 - Area di studio compresa tra la Tenuta di Castelporziano (a nord) e la città di Torvaianica (a sud).

Tabella 2. Suddivisione dell'area di studio e caratteristiche delle zone individuate.

	Descrizione delle tre zone
Zona 1	Area protetta della Tenuta Presidenziale di Castelporziano con limitato accesso alla spiaggia (superficie 95 ha)
Zona 2	Area pubblica comunale definita come "Cancelli", caratterizzata da numerosi punti di fruizione con ampi parcheggi nell'area retrodunale (superficie 38 ha)
Zona 3	Area pubblica comunale corrispondente all'area di Capocotta, priva di parcheggi nell'area retrodunale, con limitati punti di fruizione e con camminamenti per l'accesso al mare istituiti negli anni '90 (superficie 40 ha)

Fotografie aeree e dati cartografici

Dall'analisi stereoscopica delle foto aeree sono state estratte le informazioni relative all'estensione dei cordoni dunali, alla distribuzione della vegetazione litoranea e allo sviluppo delle infrastrutture (strutture per la balneazione, strade, parcheggi) presenti lungo la fascia costiera. I tematismi così selezionati sono stati quindi georiferiti rispetto alla Carta Tecnica Regionale a scala 1:10000, al fine di derivare carte tematiche multitemporali dell'estensione dei cordoni dunali, e della presenza di infrastrutture e dei tipi vegetazionali descritti in tabella 1. La fotointerpretazione non ha permesso il riconoscimento e la mappatura dei pratelli, per la limitata estensione di tale comunità, non rilevabile pertanto alla scala delle foto aeree.

Immagini MIVIS

Le immagini del sensore iperspettrale MIVIS sono state acquisite a 1000 metri di quota, con una risoluzione spaziale di circa 2m/pixel [Marino, 2001]. La copertura complessiva dell'area di studio ha richiesto due passaggi MIVIS. L'elaborazione di queste immagini è stata finalizzata al riconoscimento dei cordoni dunali e alla classificazione delle formazioni vegetazionali. L'individuazione dei cordoni dunali è stata effettuata a seguito dell'elaborazione della banda 28 (1.5-1.55 mm) mediante l'applicazione di filtri a convoluzione passa-alto [Chavez e Bauer, 1982]. La classificazione è stata invece eseguita sulle prime 20 bande spettrali (0.43-0.83 mm), selezionate tra le 102 disponibili, mediante l'applicazione degli algoritmi di Massima Verosimiglianza (ML) e *Spectral Angle Mapper* (SAM). Prima di essere classificate, le immagini MIVIS sono state trasformate in riflettanza, mediante la tecnica dell'*empirical line* [Moran et al., 2001]. La metodologia utilizzata per il trattamento delle immagini è ampiamente descritta in Casacchia et al., 2002.

L'accuratezza della classificazione è stata stimata mediante test statistici e controlli in campo. I rilievi di campo, effettuati nella primavera del 2003, hanno permesso di individuare 15 aree relative alle tipologie vegetazionali: di queste circa i 2/3 sono stati utilizzati per selezionare le aree test per la classificazione, e le restanti per verificare l'accuratezza delle classificazioni.

La matrice degli errori [Congalton, 1991] ha fornito un'accuratezza totale del 97% utilizzando l'algoritmo ML e del 87%, con l'algoritmo SAM. Nella classificazione ML gli errori di classificazione sono molto bassi e sono dovuti ad una errata attribuzione di pixel di bosco alla macchia alta; nella classificazione SAM, invece, gli errori di classificazione sono più consistenti e riguardano l'attribuzione dei pixel alle due tipologie di macchia mediterranea. Pertanto, ai fini dell'analisi multitemporale sono stati utilizzati i risultati delle classificazioni ML.

Immagine Quickbird

I dati relativi al 2002 sono stati estratti da un'immagine Quickbird che acquisisce quattro bande spettrali (0.450-0.520 μm , 0.520-0.600 μm , 0.630-0.690 μm , 0.760-0.900 μm) con risoluzione spaziale di circa 2.8 μm . Le procedure di elaborazione adottate sono state simili a quelle utilizzate per le immagini MIVIS per mantenere una omogeneità di analisi e hanno avuto come scopo quello di migliorare il contrasto spaziale tra le strutture del sistema dunale e di riconoscere i principali tipi di vegetazione presenti sul litorale.

Tabella 3. Estensione areale (percentuale) dei cordoni dunali e delle infrastrutture (la descrizione delle zone è riportata in tabella 2).

Anno	1959			1985			1994			1995			2002		
Zona	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Cordoni dunali (%)	38	23	34	23	17	14	27	11	19	24	12	20	30	11	24
Infrastrutture (%)	0.2	3	0	5.6	12	7	7	12	5	6	12	5	3.1	16.8	1

Il miglioramento del contrasto spaziale tra le strutture del sistema dunale è stato ottenuto applicando filtri a convoluzione alla banda 4. L'immagine filtrata è stata ricombinata con i dati originali per ottenere un'immagine con la migliore definizione possibile dei cordoni dunali. Sull'immagine risultante sono stati quindi digitalizzati i limiti dei cordoni ed estratte le informazioni riguardanti la struttura delle dune.

Anche l'immagine Quickbird è stata classificata utilizzando le procedure ML e SAM per il riconoscimento dei tipi vegetazionali riportati in tabella 2. Anche in questo caso la scelta delle aree test e la verifica della bontà delle classificazioni si è basata sui rilievi di campo precedentemente citati. In base ai coefficienti di accuratezza, la classificazione SAM (accuratezza 97%) ha fornito risultati più affidabili rispetto al metodo ML (accuratezza 88%), sia dal punto di vista statistico sia per il riconoscimento dei singoli tipi vegetazionali. In questo caso, nell'analisi multitemporale, sono stati utilizzati i tematismi derivati dalla classificazione SAM.

Risultati e discussione

I risultati ottenuti in questo lavoro interessano la distribuzione di cordoni dunali/infrastrutture (figura 2, tabella 3) e dei tipi vegetazionali (figura 3 e tabella 4). I valori riportati nelle tabelle sono calcolati come percentuali normalizzate rispetto all'estensione delle singole zone. Nelle figure sono riportati i risultati ottenuti per ciascuno dei periodi considerati, con l'esclusione dei dati relativi al 1995 (derivati dall'elaborazione dell'immagine MIVIS) perché, rispetto al 1994, le variazioni areali dei tematismi considerati non sono apprezzabili alla scala di rappresentazione adottata. I dati del 1995 sono stati comunque riportati nelle tabelle 2 e 3 e discussi.

Analisi multitemporale di cordoni dunali ed infrastrutture

Dalla analisi dei dati in tabella 3, è possibile individuare una correlazione tra aumento di infrastrutture e diminuzione della percentuale areale dei cordoni, in tutte le zone analizzate. Questo dato emerge soprattutto dall'analisi dei dati compresi nel periodo 1959-1985 ed interessa maggiormente la zona 1 (Tenuta di Castelporziano) e la zona 3 (Capocotta). Nei dieci anni successivi (1985-1995) si assiste ad una stabilizzazione della presenza di infrastrutture a cui corrisponde una relativa stabilizzazione dell'estensione dei cordoni dunali, tranne nella zona 1 dove l'aumento di infrastrutture è associato ad un aumento dei cordoni.

Va però tenuto in considerazione che tale zona è ad accesso limitato e la maggior presenza di strade, utilizzate prevalentemente per fini di sorveglianza, induce l'aumento percentuale delle infrastrutture, ma non determina alcun danno alla duna. Nella zona 2 invece, pur essendo costante la presenza di infrastrutture, l'estensione dunale è diminuita sensibilmente: ciò è facilmente spiegabile considerando che in questa zona è più intensa la fruizione pubblica.

Nel periodo 1995-2002, nelle zone 1 e 3 si assiste ad un aumento percentuale dei cordoni dunali con relativa diminuzione della presenza di infrastrutture. Infatti nel 1995, nella zona della Tenuta sono state costruite dune artificiali allo scopo di riqualificare il sistema più prossimo alla linea di riva [Bianco et al., 2001], mentre nella zona di Capocotta (zona 3) la pubblica Amministrazione, nei primi anni '90, ha realizzato interventi di protezione per impedire il camminamento sulle dune.

In figura 2 sono riportati i cordoni dunali, numerati a partire dalla I duna mobile, la più vicina alla linea di costa, e le infrastrutture comprendenti le strade e le strutture per la balneazione. La rappresentazione grafica di queste strutture conferma quanto osservato in base ai dati percentuali.

Tabella 4. Estensione percentuale della vegetazione in ciascun periodo (la descrizione delle zone è riportata in tabella 2).

Anno	1959			1985			1994			1995			2002			
	Zona	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sabbia		15	24	20	26	44	37	21	49	40	30	49	47	35	46	37
Veg. psammofila		19	11	15	20	7	5	24	10	11	24	17	14	20	17	18
Macchia bassa		44	48	46	29	45	41	45	39	45	26	33	38	37	33	37
Macchia alta		22	17	9	10	3	12	10	0	1	18	1	0	8	2	2
Boscaglia igrofila				11			5			3			1	0.1	0.5	5

Nel 1985 e nel 1994 è evidente una progressiva diminuzione delle serie dei cordoni con un costante assottigliamento delle dune e la scomparsa dei cordoni più prossimi al mare. In questo periodo si osserva una netta differenza dovuta alle modalità di gestione tra la spiaggia di Castelporziano (zona 1) e le altre due zone. Laddove sono ubicate strutture per la balneazione, si nota il dissolversi della continuità tra le dune mobili, che rimangono elementi isolati e non collegati tra loro. Nelle zone 2 e 3, infatti, i cordoni dunali risultano esigui ed estremamente frastagliati.

Nel 2002 il depauperamento del sistema dunale interessa prevalentemente l'area dei "cancelli" (zona 2), mentre a Capocotta si osserva una fase di recupero del sistema dunale, testimoniato dalla presenza di nuove dune, in una fase iniziale di sviluppo.

Analisi multitemporale delle formazioni vegetazionali

Nella tabella 4 sono riportate le percentuali di estensione dei diversi tipi vegetazionali descritti in tabella 1, con l'esclusione dei pratelli, individuati solo sull'immagine Quickbird.

Dall'analisi dei dati si osserva che la percentuale di superficie di sabbia priva di vegetazione aumenta nel tempo in tutte le zone. Tale aumento è più evidente negli anni 1959-1985 rispetto ai decenni successivi. Per quanto riguarda la vegetazione psammofila, in zona 1 nel periodo compreso tra il 1959 e il 1985, mantiene costante la sua estensione percentuale mentre diminuisce drasticamente nelle zone 2 e 3. Tra il 1985 e il 1995 in zona 2 e 3 si nota al contrario un limitato aumento di tale tipologia osservabile anche negli anni successivi, fino ad arrivare nel 2002 a valori simili a quelli ottenuti nel 1959.

La superficie coperta da macchia bassa diminuisce dal 1959 al 1985, prevalentemente in zona 1 che passa dal 44% al 29 % del totale. Analizzando i dati relativi al periodo 1985 e 1994 riguardanti sempre la zona 1, si può osservare un forte aumento della macchia bassa, al contrario di quanto avviene nelle zone 2 e 3 dove la percentuale di superficie di tale formazione diminuisce negli anni fino al 2002.

Passando alla macchia alta, si nota che tale tipologia diminuisce consistentemente in tutte le zone. Tra gli eventi di natura antropica che possono aver determinato la diminuzione di superficie a macchia alta si deve menzionare un incendio avvenuto nel 1985 in zona 1, che comportò la distruzione di circa 12 ha di macchia alta. Tale evento distruttivo è oltretutto connesso all'aumento della macchia bassa rilevato sempre in zona 1 nel 1994. È noto infatti che le garighe a *Cistus* sp.pl. (incluse nella tipologia macchia bassa come descritto in tabella 1) si sviluppano rapidamente a seguito di un incendio, in quanto aumenta in maniera significativa la germinabilità dei semi a causa del forte riscaldamento [Troumbis e Trabaud, 1986; Pignatti et al., 2001].

La boscaglia igrofila ha un'estensione molto limitata ed è stata riscontrata solo in zona 3 (figura 2). Tale consorzio, dal 1959 al 1995, ha subito un forte decremento dovuto probabilmente ad una minore disponibilità di risorse idriche a seguito dell'intensa urbanizzazione nelle aree circostanti la Tenuta [Busuoli et al., 2001].

Dall'analisi dei valori percentuali e dalla figura 2 in cui si possono osservare le variazioni areali dei tipi vegetazionali considerati, emerge che le maggiori variazioni sono avvenute nell'arco di tempo tra il 1959 e 1995 quando era più intensa la fruizione pubblica della spiaggia e non erano stati presi in considerazione interventi di tutela dell'ambiente costiero.

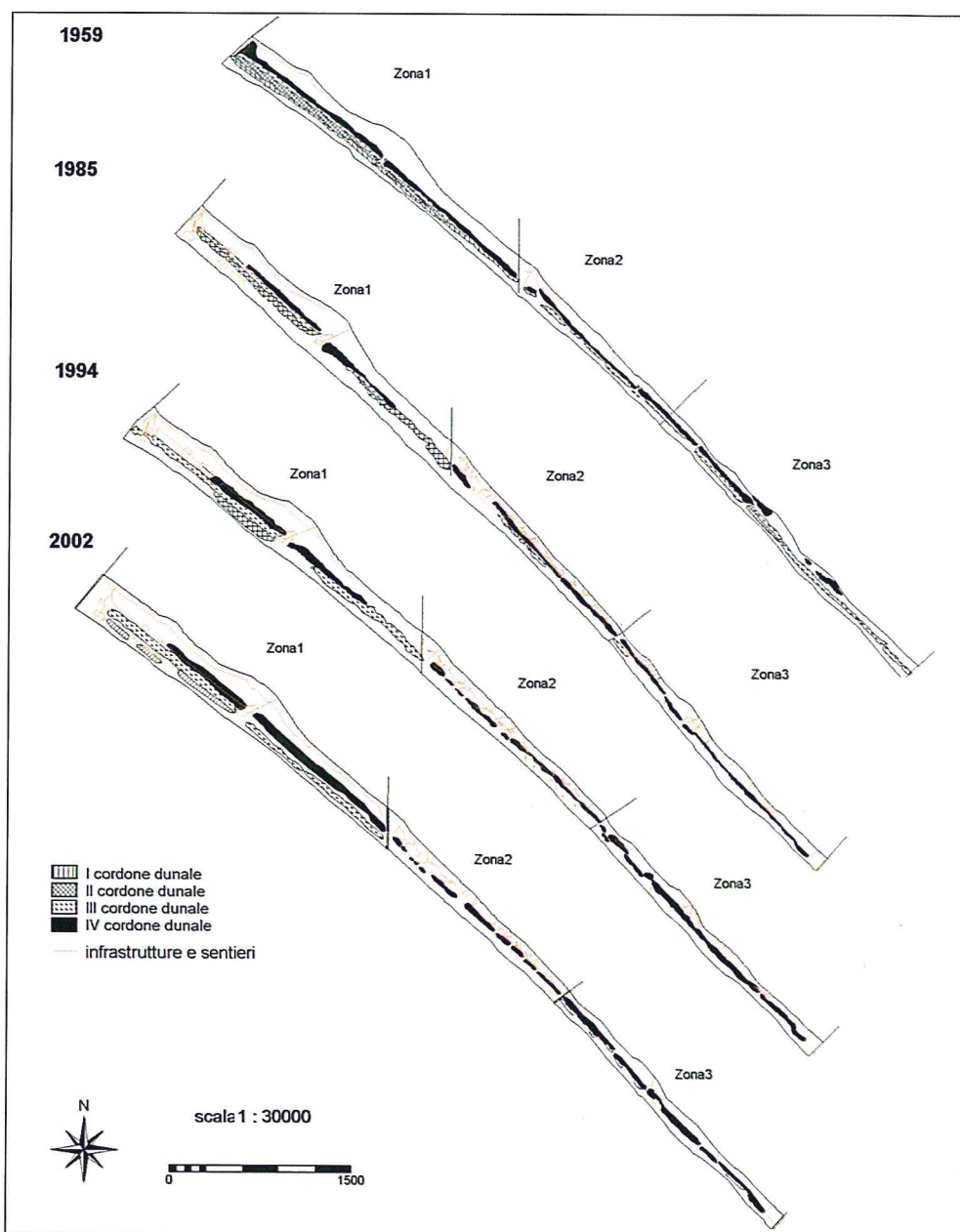


Figura 2 - Evoluzione dei cordoni dunali derivata da fotointerpretazione e dall'elaborazione dell'immagine Quickbird.

A partire dagli anni '90 con una maggiore sensibilizzazione riguardo alle problematiche connesse alla conservazione degli habitat naturali, sono state prese misure di protezione della duna che hanno favorito il mantenimento o il recupero da parte della prima fascia di vegetazione, ossia quella che determina il consolidamento della duna.

I tipi vegetazionali che hanno subito le maggiori variazioni, nell'arco di tempo compreso tra il 1959 e il 2002, sono la macchia bassa e la macchia alta, con un decremento avvenuto in tutte e tre le zone, particolarmente critico per la macchia alta, che risulta quasi scomparsa nelle zone 2 e 3.

L'integrità di tali consorzi è molto importante in quanto, svolgendo un'azione di protezione dai venti marini, determinano la sopravvivenza delle comunità boschive retrodunali [Acosta et al., 2000], le quali, se distrutte, hanno tempi di recupero molto più lunghi delle antistanti formazioni arbustive a più alta resilienza.

Conclusioni

L'indagine multitemporale condotta ha permesso di valutare le variazioni temporali dell'area costiera intercorse dal 1959 al 2002, utilizzando dati di natura profondamente diversa.

Lo studio si è focalizzato sul riconoscimento e sull'analisi della distribuzione dei cordoni dunali e delle comunità vegetazionali che si sviluppano sulle dune, e sulla presenza di infrastrutture legate alla fruizione della spiaggia. Le comunità vegetazionali degli ambienti costieri mediterranei, in assenza di disturbo, si sviluppano secondo una zonazione spaziale strettamente legata a fattori geomorfologici, edifici e microclimatici [Acosta et al., 2000] e ciò crea popolamenti molto diversi anche a distanze limitate. In situazioni di erosione delle coste si osserva un arretramento delle associazioni della serie psammofila verso terra con una elevata compenetrazione tra le specie appartenenti ai diversi sintaxa [Lucchese e Pignatti, 1990]. A ciò si aggiunge che il disturbo antropico rende frammentari gli ambienti originari, determinando un forte impatto sulla distribuzione della vegetazione.

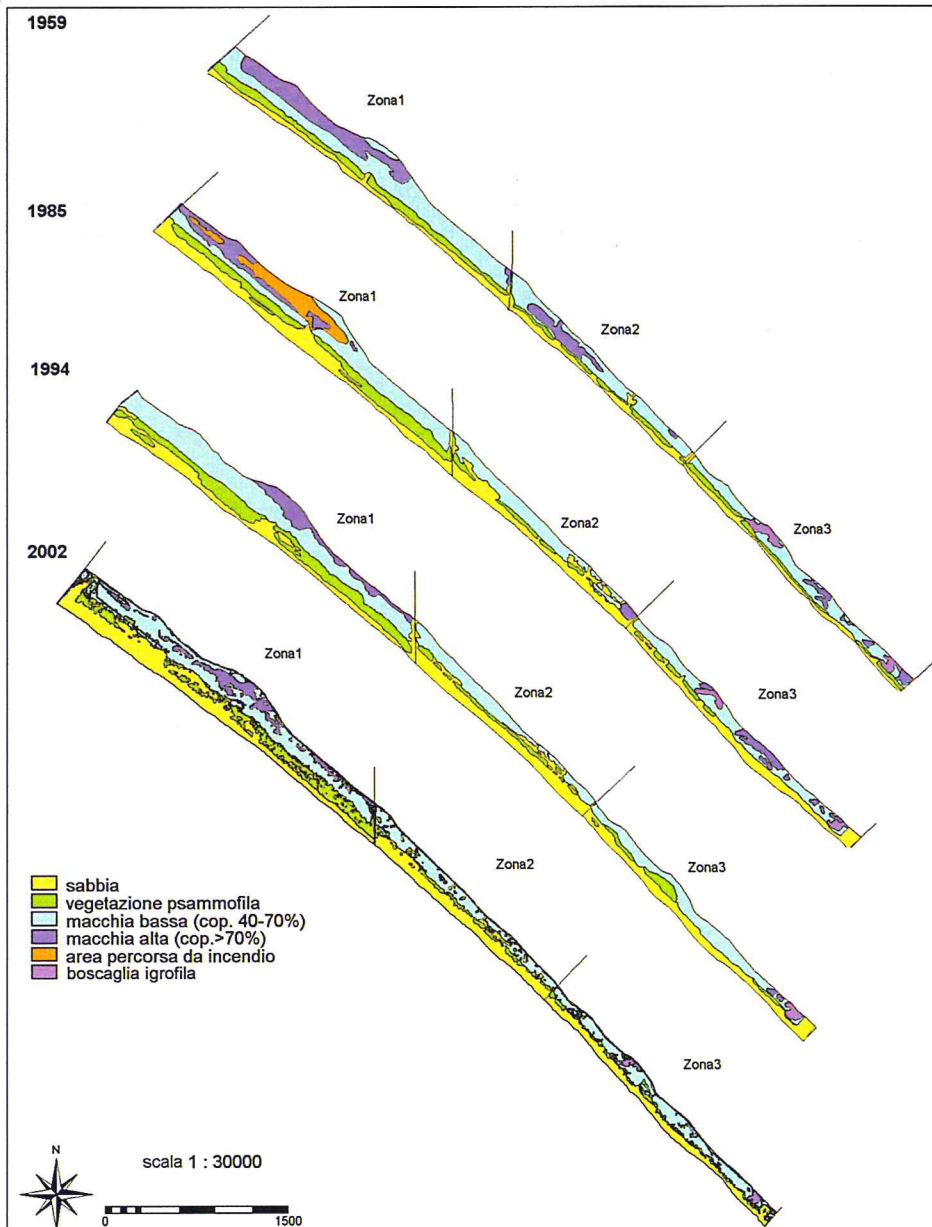


Figura 3 - Evoluzione della vegetazione dunale derivata da fotointerpretazione e dall'elaborazione dell'immagine Quickbird.

Dall'analisi dei risultati tra il 1959 ed il 1985 è emerso che l'aumento nel tempo delle strutture balneari ha determinato un deterioramento della serie di dune con un costante assottigliamento dei cordoni dunali e progressiva scomparsa di quelli prossimi alla riva. Gli anni compresi tra il 1959 ed il 1985 sono stati anche quelli in cui le variazioni della fascia di vegetazione delle prime dune mobili sono state più consistenti. Le zone pubbliche (zona 2 e 3) sono quelle che hanno subito maggiori variazioni rispetto all'area protetta di Castelporziano (zona1), in quanto sono sottoposte annualmente a lavori di manutenzione della spiaggia, prima della stagione estiva. A partire dagli anni '90 si assiste ad un recupero da parte della vegetazione psammofila dovuto ad interventi di tutela dei cordoni dunali, le percentuali di superficie relative alle formazioni di macchia bassa e, soprattutto di macchia alta, hanno subito un forte decremento fino alla totale scomparsa della macchia alta in zona 2.

L'uso integrato di immagini satellitari di nuova generazione e di fotoaeree storiche, si è inoltre rivelato uno strumento particolarmente utile per il monitoraggio del sistema dunale. I risultati ottenuti dall'elaborazione delle immagini del 1995 e 2002 mostrano che le strutture dunali sono ampiamente confrontabili con quelle che derivano dalla fotointerpretazione degli anni precedenti; le estensioni percentuali dei consorzi vegetazionali dal 1995 al 2002 confermano l'evoluzione evidenziata dall'analisi multitemporale.

Tuttavia le leggere variazioni riscontrate nella zona 1 per la macchia bassa e la macchia alta tra il 1994 ed il 1995, possono essere ricondotte ad una differente tecnica di campionamento delle diverse formazioni e al grado di accuratezza delle immagini classificate, che pur essendo elevato (circa 97%) ha messo in evidenza una erronea attribuzione di pixel tra i consorzi di macchia bassa ed alta.

La possibilità di ricostruire le tendenze evolutive del sistema dunale permette di valutare la vulnerabilità ed il rischio di degrado del litorale e può fornire utili informazioni nel definire interventi futuri di protezione e di tutela dell'ecosistema dunale.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato realizzato nell'ambito della Convenzione tra il Comune di Roma Dipartimento X ed il Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, maggio 2003.

Bibliografia

- Acosta A., Blasi C., Esposito S., Stanisci A., (2000) - *Analisi della vegetazione delle dune costiere del Lazio centro-meridionale*. *Informatore Botanico Italiano*, 32, Suppl. 1: 5-10.
- Acosta A., Stanisci A., Ercole S., Blasi C. (2003) - *Sandy coastal landscape of the Lazio region (Central Italy)*. *Phytocoenologia*, 33 (4) : 715-726.
- Baily B., Nowell D. (1996) - *Techniques for monitoring coastal change : a review and case study*. *Ocean & Coastal Management*, 32 (7) : 85-95.
- Blasi C., Anzellotti I., Acosta A., Stanisci A., Di Marzio P., 1999 - *Vegetazione e disturbo antropico nella duna costiera del Parco Nazionale del Circeo*. *Suppl. Boll. Museo Civ. Sc. Nat. Venezia*, 49 (1998) : 173-178.
- Bianco P.M., Costanzo L., De Lillis M., Tinelli A. (2001) - *Evoluzione floristica e vegetazionale nella riqualificazione delle dune costiere*. In: *Il Sistema Ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano*, Vol.II, Acc. Naz. delle Scienze detta dei Quaranta. pp. 826-834.
- Boccardo P. (2000) - *I sensori del 2000: nuove frontiere della Geomatica*. Atti della IV Conferenza ASITA "Informazione Geografica: innovazione e formazione", Genova. pp. XLVII-LXVI.
- Busuoli G., Bucci M., Grillino M. (2001) - *Studi geologici, geomorfologici ed idrogeologici sulla Tenuta Presidenziale di Castelporziano*. In: *Il Sistema Ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano*, Vol.II, Acc. Naz. delle Scienze detta dei Quaranta. pp. 123-155.
- Caputo C., Chiocci F., Ferrante A., La Monica G.B., Landini B., Pugliese F. (1990) - *La ricostruzione dei litorali in erosione mediante ripascimento artificiale e il problema del reperimento degli inerti*. *La Difesa dei Litorali in Italia*. pp. 121-151.
- Caputo C., D'Alessandro L., La Monica G.B., Landini B., Lupia Palmieri E. (1991). *Present erosion and dynamics of Italian beaches*. *Zeitschrift Geomorphology*, Suppl. 81: 31-39.
- Casacchia R., Grignetti A., Salvatori R. (2002) - *Analisi multitemporale di un sistema dunale con foto aeree e dati MIVIS*. Atti VI Conferenza ASITA, "Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale", Perugia. pp. 685-690.

- Chavez P.S., Bauer B. (1982) - *An automatic optimum kernel-size selection technique for edge enhancement*. Remote Sensing of Environment, 12 : 23-38.
- Congalton R. G. (1991) - *A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data*. Remote Sensing of Environment, 37: 35-46.
- Fierro G. (2004) - *Il degrado dei litorali*. Atti Convegni Lincei , XXI Giornata dell’Ambiente, Aree Costiere , Roma, vol. 205 : 37-50.
- Iannantuono E., Roskopf C.M., Stanisci A., Acosta A., Augelli P.P.C. (2004) - *Effetti della dinamica costiera sull’evoluzione dei sistemi dunali presenti lungo la costa molisana*. Atti Convegni Lincei , XXI Giornata dell’Ambiente, Aree Costiere , Roma, vol. 205 : 321-331.
- Lucchese F., Pignatti S. (1990) - *Sguardo sulla vegetazione del Lazio marittimo. II Ricerche ecologiche floristiche e faunistiche sulla fascia costiera mediotirrenica italiana*. Quad. Acc. Naz. Lincei, 264. pp. 5-48.
- Marino C.M. (2001) - *L’evoluzione, obiettivi e i ruoli del laboratorio del LARA del CNR nell’ambito del telerilevamento iperspettrale*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 30/31, settembre 2000 - gennaio 2001: 7-10.
- Moran M.S., Bryant R., Thome K., Ni W., Nouvellon Y., Gonzalez-Dugo M.P., Qi J., Clarke T.R. (2001) - *A refined empirical line approach for reflectance factor retrieval from Landsat5 TM and Landsat7 ETM*. Remote Sensing of Environment, 78 : 71-82.
- Peccol E., De Luca A., Sigura M., Bonfanti P. (2003) - *Caratterizzazione del paesaggio rurale con immagini satellitari ad altissima risoluzione*. Atti VII Conferenza ASITA. Verona. pp. 575-1580.
- Pignatti S., Bianco P.M., Tescarollo P., Scarascia Mugnozza G.T. (2001) - *La vegetazione della Tenuta Presidenziale di Castelporziano*. In : Il Sistema Ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano, Vol.II, Acc. Naz. Delle Scienze detta dei Quaranta. pp. 468-692.
- Phinn S.R., Menges C., Hill G.J.E., Standford M. (2000) - *Optimizing remotely sensed solutions for monitoring, modeling, and managing coastal environments*. Remote Sensing of Environment, 73 : 117-132.
- Ramsey III E.W., Nelson G.A., Sapkota S.K. (2001) - *Coastal change analysis program implemented in Louisiana*. Journal of Coastal Research, 17: 53-71.
- Torres-Pulliza D., Brock J., Lea C., Duffy M. (2001) - *Classification of barrier island land-cover using aerial photography and lidar airborne remote sensing*. Fifth International Airborne Remote Sensing Conference. California. San Francisco. CD.
- Troumbis A., Trabaud L. (1986) - *Comparison of reproductive biological attributes of two Cistus species*. Oecol. Plant., 7:235-250.

Manoscritto ricevuto il 22/02/2005, accettato il 10/04/2005.