

RAPPORTI TECNICI

AREA GEOLOGIA, SISMICA E SUOLI

2023



LE DUNE
COSTIERE AL
2019
stato e analisi
evolutive periodo
2004-2019

A cura di:

Luisa Perini (responsabile dell'attività), Lorenzo Calabrese e Jessica Lelli – Area Geologia, Suoli e Sismica – Regione Emilia-Romagna
contributo esterno: contratto CFR (UNIFE) Stefano Fabbri e prof. Paolo Ciavola

Si ringrazia:

Autorità di Distretto del Po che ha acquisito e condiviso i dati Lidar 2019 che hanno permesso l'elaborazione di queste informazioni

In copertina:

foto: Lido di Spina (FE) - Archivio Area Geologia, Suoli e Sismica

Immagine coordinata e grafica:

Simonetta Scappini – Area Geologia, Suoli e Sismica – Regione Emilia-Romagna

Il presente documento è rilasciato secondo i termini della licenza Creative Commons 4.0 Attribution (Attribuzione). I contenuti (salvo marchi, segni distintivi o altro diversamente specificato) possono essere riprodotti, distribuiti, comunicati, esposti, rappresentati e modificati rispettando la seguente condizione:

citazione della fonte ("Regione Emilia-Romagna") e il titolo del documento.

Una sintesi della licenza si trova alla pagina <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.it>

Per eventuali aggregazioni o rielaborazioni dei contenuti finalizzate alla realizzazione di prodotti diversi dall'originale, pur permanendo l'obbligo di citazione della fonte, si declina ogni responsabilità.



Direzione Generale cura del territorio e dell'ambiente
Settore Difesa del Territorio - Area Geologia, Suoli e Sismica
Viale della Fiera 8, 40127 Bologna
telefono: 051 5274798
fax: 051 5274208
e-mail: segrgeol@regione.emilia-romagna.it
PEC: segrgeol@postacert.regione.emilia-romagna.it
Sito web dedicato:

<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/costa>

1. PREMESSA E OBIETTIVI	4
2. PROGETTO DI CARTOGRAFIA DELLE DUNE	5
3. DATI UTILIZZATI: METODOLOGIA OPERATIVA	6
3.1. Dati impiegati nel progetto e assunzioni	6
3.2. Metodologia operativa – declinazione degli obiettivi	7
4. CARTOGRAFIE E ANALISI DEI DATI	10
4.1. Cartografia e classificazione duna 2019	10
4.2. Analisi Duna 2019	15
4.2.1. Superfici	15
4.2.2. Quote	16
4.2.3. Dinamica	19
4.2.4. Antropizzazione	19
4.2.5. Vegetazione	20
4.2.6. Presenza sui voli storici	21
4.3. Analisi dati duna 2004	22
4.3.1. Superfici	22
4.3.2. Quote	23
4.3.3. Antropizzazione	24
4.3.4. Vegetazione	25
4.4. Confronti tra i dataset 2004 - 2019	26
5. I VARCHI	29
6. CONFRONTO CON TRATTI CRITICI E AMPIEZZA SPIAGGIA	30
7. CONCLUSIONI	32
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	34



1. PREMESSA E OBIETTIVI

Il presente rapporto tecnico illustra lo stato delle dune costiere dell'Emilia-Romagna al 2019 e la loro evoluzione nell'intervallo 2004-2019, analizzata attraverso l'elaborazione di cartografie vettoriali.

Il progetto, sviluppato nell'ambito delle attività AGSS sui rischi costieri, ha l'obiettivo generale di produrre le conoscenze necessarie alla corretta gestione delle dune, supportando le azioni di protezione e di ripristino, come suggerito dalle Linee Guida GIZC (DGR 645/2005). Il lavoro è collegato all'obiettivo 14 del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni 2021 - *Garantire e migliorare l'efficacia del sistema spiaggia, compresa la duna, quale elemento di attenuazione del fenomeno di mareggiata*, nonché alle Misure PGRA Misure: ITN008-DI-036 - *Predisporre ed attivare un programma di censimento ed analisi di varchi e punti critici* e ITN008_ITBABD_FR - *Promuovere progetti di conservazione e ripristino delle morfologie costiere*.

Le finalità specifiche del lavoro di seguito illustrato sono state:

- l'aggiornamento della cartografia regionale delle dune costiere all'anno 2019, avvalendosi degli studi più recenti condotti da università e centri di ricerca;
- l'elaborazione di una nuova legenda finalizzata ad una migliore classificazione dei sistemi dunali;
- il censimento delle opere antropiche realizzate al fine di preservare, proteggere e/o sostituire tali ambienti e la valutazione del loro impatto sull'ambiente;
- l'individuazione dei punti di debolezza della duna e degli argini interni costieri, che possono essere visti come un primo sistema di difesa dall'ingresso marina.

Nel corso del lavoro sono emerse nuove esigenze che sono state integrate nel progetto:

- l'importanza di aggiornare le mappe precedenti al 2019 con le stesse modalità messe a punto nella versione più recente, operazione necessaria ad una valutazione quantitativa della dinamica della duna. Come anno di riferimento è stato assunto il 2004;
- la mappatura delle dune artificiali invernali presenti al 2019, elaborando così una prima cartografia di riferimento di questo elemento.

Nei paragrafi successivi sono dettagliate le ragioni, le scelte e le assunzioni che sono state adottate nelle varie casistiche.

2. PROGETTO DI CARTOGRAFIA DELLE DUNE

Il progetto è stato sviluppato grazie al contributo del Consorzio Futuro in Ricerca (CFR) con il coinvolgimento del personale del dipartimento di Fisica e Scienze della terra dell'Università di Ferrara specializzato in studi geomorfologici costieri. L'incarico affidato (CIGZAC2F5B255) comprendeva, oltre alla revisione della cartografia delle dune costiere precedentemente elaborata da AGSS, anche la loro classificazione, l'analisi della dinamica e l'individuazione dei punti critici per l'ingressione marina, cosiddetti varchi.

L'Area Geologia, Suoli e Sismica (AGSS) – RER ha coordinato il progetto, predisposto i dati di base e svolto i sopralluoghi in collaborazione con CFR (UNIFE) per risolvere i dubbi interpretativi e collaudare le mappe. AGSS ha inoltre effettuato le revisioni puntuali sugli elaborati, predisposto le 'cartografie tecniche' (Duna 2019 e Duna 2004) per la pubblicazione sui portali regionali ed effettuato le analisi per il presente rapporto.

CFR ha consegnato tutti gli elaborati previsti dal contratto a settembre 2022. Successivamente, insieme a Unife, si è proceduto a effettuare alcune revisioni e integrazioni non previste dal contratto.

Va sottolineato che nel corso del lavoro è emersa la necessità di elaborare 2 dataset diversi per ciascuno degli anni esaminati (2004 e 2019): il primo strato cartografico è stato realizzato individuando le morfologie costiere sui modelli digitali del terreno, ricavati da rilievo LIDAR, integrati con l'interpretazione delle ortofoto, da utilizzarsi come base per la pubblicazione scientifica. Il secondo, invece, è stato adattato agli scopi tecnici discussi nella presente relazione (vedi paragrafo 3.1) e include alcune porzioni di duna interpretata solo sulla base delle ortofoto a causa dell'assenza del dato Lidar in alcune zone.

La pubblicazione sopracitata è in corso di elaborazione da parte di Unife/Unibo, per condividere con il mondo accademico i nuovi criteri classificatori e le analisi emerse nel progetto e per sviluppare alcuni approfondimenti sulla vulnerabilità delle dune costiere dell'Emilia-Romagna.

3. DATI UTILIZZATI: METODOLOGIA OPERATIVA

Nel seguito si illustrano i dati base utilizzati nell'esecuzione del lavoro e la sintesi delle attività svolte.

3.1. Dati impiegati nel progetto e assunzioni

Per l'elaborazione della cartografia delle dune costiere anni 2019 e 2004 sono stati utilizzati i seguenti dati, disponibili nelle banche dati del Sistema Informativo del Mare e della Costa, condivisi con CFR (Unife) per l'esecuzione delle due cartografie. Alcuni di questi sono stati impiegati specificamente per l'elaborazione dei prodotti previsti, altri sono serviti per effettuare verifiche e ottenere conferme sulle valutazioni effettuate.

- Lo shapefile 'classificazione dune SGSS_2018' – (SR: WGS84 UTM Zone 32N): elaborato dall'Area Geologia, Sismica e Suoli (AGSS) sulla base della sola fotointerpretazione delle foto di google 2018. Lo strato, classificato in base della legenda precedentemente utilizzata dall'AGSS per la cartografia delle morfologie costiere, ha costituito il dato vettoriale di partenza al quale apportare modifiche e integrazioni;
- Lo shapefile 'opere di difesa_2020' (RER) – (SR: WGS84 UTM Zone 32N / TM Emilia-Romagna); elaborato da AGSS, impiegato per l'identificazione/revisione e mappatura delle 'dune artificiali';
- Ortofoto costa, Royal Air Force (RAF) 1943 – (SR: ETRS89 UTM Zone 32N), digitalizzate, orto-rettificate e georeferenziate da AGSS; utilizzate per la verifica della presenza/assenza della duna in epoca storica;
- Ortofoto costa, Regione Emilia-Romagna (RER), 1982 – (SR: Monte Mario / TM Emilia-Romagna), acquisite nel corso di una delle campagne finalizzate allo studio dello stato del litorale, orto-rettificate e georeferenziate da AGSS. Utilizzate per la verifica di presenza/assenza della duna in epoca storica;
- Ortofoto costa, Regione Emilia-Romagna (RER), 2005 – (SR: Monte Mario / TM Emilia-Romagna) acquisite nel corso di una delle campagne finalizzate allo studio dello stato del litorale, ha costituito l'immagine di riferimento per l'elaborazione della cartografia delle 'dune anno 2004';
- Ortofoto costa, Autorità Di Bacino Po (ADBPO), 2019 – SR: WGS84 UTM Zone 32N, utilizzate per l'elaborazione della cartografia delle 'dune anno 2019';
- Modello digitale LIDAR costa, Autorità Di Bacino PO (AdbPO), 2019 – SR: WGS84 UTM Zone 32N, ha costituito il dato altimetrico di dettaglio per l'elaborazione della cartografia delle 'dune anno 2019';
- Modello digitale LIDAR costa, Regione Emilia-Romagna (RER) 2004 – SR: ED50 UTM; è stato utilizzato per l'elaborazione della cartografia delle 'dune anno 2004'
- Modello digitale LIDAR costa, Regione Emilia-Romagna (MATTM) 2008 – (SR: WGS84 UTM Zone 32N, ha supportato l'analisi della presenza/assenza della duna nell'intervallo 2004-2019;
- Modello digitale LIDAR costa, Regione Emilia-Romagna (RER) 2010 – (SR: ED50 UTM) utilizzato per l'analisi della presenza/assenza della duna nell'intervallo 2004-2019;

- Modello digitale LIDAR costa, Ente Nazionale Idrocarburi (ENI) 2012 – (SR: WGS84 UTM Zone 33N) utilizzato per l’analisi della presenza/assenza della duna nell’intervallo 2004-2019.

Nel corso delle elaborazioni sono emersi alcuni limiti dei dataset disponibili, che hanno evidenziato la necessità di effettuare ragionevoli assunzioni per completare la ‘cartografia tecnica’.

Il primo limite riguarda la copertura areale dei dati LIDAR 2004 e 2019 verso l’entroterra: in entrambi i casi il piano di volo è stato progettato per acquisire dati altimetrici in una fascia costiera ampia circa 1 -1.5 km, includendo le opere a mare. Il risultato è stato che l’ampiezza rilevata a terra, a partire dalla linea di riva, risulta essere tra i 250-300 m fino a circa 1500 m. Alcune porzioni interne dei cordoni litorali più antichi sono pertanto escluse dal rilievo.

Per sopperire a tale inconveniente, in queste zone, e solo per la ‘cartografia tecnica’, si è scelto di interpretare la presenza della duna unicamente attraverso la fotointerpretazione. Va sottolineato che tale assunzione ha riguardato solo tratti di ‘duna stabilizzata’ ove i dati LIDAR 2008, 2010 e 2012 hanno spesso consentito di convalidare anche altimetricamente le interpretazioni.

Un ulteriore problema ha riguardato il LIDAR 2004 che, a causa di assenza di copertura GPS, non è stato acquisito a sud di Rimini: anche in quel caso attraverso la fotointerpretazione sono state mappate le uniche due porzioni di duna ancora presenti in quel tratto di costa.

Infine, poiché in occasione del rilievo LIDAR 2004 non sono state acquisite le immagini aeree, si è deciso di utilizzare le ortofoto 2005, scattate 9 mesi dopo il LIDAR.

3.2. Metodologia operativa – declinazione degli obiettivi

Il progetto è stato organizzato in due fasi, una di revisione delle informazioni pregresse e di sperimentazione e la seconda di sviluppo vero e proprio del progetto. Ciascuna fase è a sua volta articolata in diverse attività.

FASE 1: REVISIONI E SPERIMENTAZIONI

Revisione della bibliografia scientifica sulle dune costiere, con particolare riferimento a quelle dell’Emilia-Romagna, alla loro evoluzione geomorfologica, alla vegetazione presente e alle attività di monitoraggio fin qui svolte (topografico o tramite tecnologie remote sensing);

Sperimentazione della cartografia nelle due aree test, una nel ravennate, in località Lido di Classe, e l’altra nel ferrarese, a Lido di Volano. In queste zone, piuttosto diverse per dinamica evolutiva e per stato delle morfologie, è stato possibile testare quasi tutte le problematiche di seguito individuate nel lavoro a scala regionale. È stata inoltre definita la procedura da seguire per arricchire la classificazione regionale delle opere di difesa costiera con quelle di protezione delle morfologie e con la mappatura dei varchi;

Definizione finale della classificazione da adottare per le dune e della legenda, realizzata migliorando la classificazione utilizzata da AGSS nel 2018 con tutti i nuovi criteri evinti dagli studi e quelli emersi dalla sperimentazione nelle due aree test. La nuova classificazione ha coniugato i più innovativi criteri di analisi geomorfologica e di classificazione della vegetazione presente sulle dune sabbiose costiere, con riferimento alle fonti bibliografiche più recenti e alle nuove proposte elaborate dall’Università di Ferrara (Tabella 1). Una descrizione dettagliata degli elementi mappati e classificati è riportata nel paragrafo 4.1.

In fase di test si è compresa l’importanza di elaborare un’analisi sulla dina-

Tabella 1
*Attributi individuati
per gli elementi
Duna 2004 e 2019.*

campi	attributi
TIPO DUNA	Duna attiva
	Duna semi-stabilizzata
	Duna stabilizzata
	Duna residuale
	Duna artificiale
QUOTA	>2m
	<2 m
VEGETAZIONE	Pioniera rada-assente
	Erbosa annuale
	Erbosa perenne
	Arborea-arbustiva
	Arborea
	Mista
ESSENZE	Cakiletum
	Ammophyllum-Agropiretum
	Tortoletum-Scabiosetum
	Juniperus/Pinus
	Pynus Pinaster
	Varie
DINAMICA (solo anno 2019)	Arretramento
	Avanzamento
	Stabilità
	Indeterminata
ANTROPIZZAZIONE	Alta
	Media
	Bassa
PROVINCIA	Ferrara
	Ravenna
	Forlì-Cesena
	Rimini
COMUNE	Comacchio
	Ravenna
	Cervia
	Cesenatico
	Rimini
	Riccione
SUPERFICIE	

mica evolutiva delle dune anche quantitativa, basata sul confronto con una cartografia antecedente realizzata con gli stessi criteri di quella al 2019. Nonostante non fosse previsto dal contratto con CFR, è stato concordato di elaborare anche la cartografia per l'anno 2004, utilizzando come dataset di riferimento il primo volo Lidar acquisito da RER-AGSS nel settembre 2004.

FASE 2: PRODUZIONE DELLE CARTOGRAFIE ALLA SCALA REGIONALE, COME PREVISTO DAL CONTRATTO CON CFR, E DI ALTRI PRODOTTI CARTOGRAFICI CHE HANNO PERMESSO DI RAGGIUNGERE ULTERIORI RISULTATI NON PREVISTI IN FASE DI PROGETTAZIONE DEL LAVORO.

Cartografia delle 'Dune 2019', a scala regionale, con relativa classificazione. Comprende la costa emiliano-romagnola dalla foce del Po di Volano a Cattolica, per una lunghezza di circa 110 km;

Revisione del catalogo 'opere di difesa 2020', precedentemente elaborato da AGSS, con aggiunta di nuove classi, finalizzate a censire le opere antropiche interferenti con le dune naturali; le dune artificiali e i punti di debolezza. I poligoni aggiuntivi riguardano i seguenti elementi:

- Varchi (nelle dune e negli argini interni): si tratta di accessi alla spiaggia dalle zone retrostanti. Sono generalmente in sabbia e rappresentano punti di debolezza del sistema di difesa dalle ingressioni marine;
- Passerelle: in legno, costruite sui campi di dune in diverse località, per permettere che i fruitori della spiaggia di attraversare le morfologie senza danneggiarle ed innescare fenomeni erosivi;
- Staccionate: sono interventi di ripristino naturale delle dune chiamati ganivelle, ovvero delle doppie staccionate in legno appositamente ubicate al piede della duna (zona foce torrente Bevano) con lo scopo di abbattere la velocità del vento e favorire la deposizione e l'intrappolamento della sabbia;
- Impatto ambientale: è stata fatta una valutazione qualitativa dell'impatto ecologico/ambientale delle opere antropiche, tenendo conto sia della modificazione che esse impongono alla naturale morfologia del sistema spiaggia/duna, sia dell'impatto sul paesaggio sulla naturalità. Per esempio, gli elementi di protezione naturalistica quali passerelle e ganivelles sono stati considerati tutti ad impatto ambientale basso.

Mappatura dei tratti con 'dune invernali 2019'. Come anticipato questo è uno dei prodotti che si è deciso di aggiungere in fase esecutiva, al fine di effettuare un'analisi, mai realizzata in Regione, relativa all'estensione e alla tipologia costruttiva di questo elemento antropico. Con un file lineare sono stati tracciati i tratti dove la foto e il dato lidar evidenziavano la presenza dell'elemento. Inoltre, dal dato LIDAR sono state ricavate alcune sezioni trasversali al fine di esaminare le diverse forme.

Sopralluoghi: al termine della prima stesura dell'elaborato 2019 sono stati eseguiti una serie di sopralluoghi in zone dove erano stati riscontrati dubbi interpretativi. A novembre 2021 sono state rilevate le dune di Lido Adriano zona sud e nord, quelle di Porto Corsini. A giugno 2022: Lido degli Scacchi, in corrispondenza dell'Holiday Village Florenz, Lido delle Nazioni, zona nord, Lido di Volano, zona sud. È inoltre stato valutato lo stato delle opere di difesa del tratto compreso fra Bagno Isa e Spiaggia Romea;

Elaborazioni GIS a scala regionale per la produzione della **cartografia delle 'Dune 2004'**;

Revisione dei dati e **produzione delle 'cartografie-tecniche'** per la pubblicazione sui portali regionali;

Analisi dati ed elaborazione del rapporto tecnico.

4. CARTOGRAFIE E ANALISI DEI DATI

Si riportano di seguito i dettagli circa le modalità di mappatura e classificazione delle dune costiere e le considerazioni effettuate dall'analisi dei dati ricavati.

4.1. Cartografia e classificazione duna 2019

Come anticipato nel paragrafo precedente, la classificazione degli ambienti dunali (sintetizzata in Tabella 1 – “TIPO_DUNA”) è iniziata con l'osservazione delle caratteristiche strettamente morfologiche dei cordoni, identificando, secondo i criteri stabiliti e basati sulle più recenti ricerche geomorfologiche in tale campo (Fabbri et al., 2017), le diverse aree morfologico-dinamiche in cui è suddivisibile una duna costiera naturale (Figura 1).

- Duna attiva, che morfologicamente corrisponde all'avanduna (foredune), ovvero la parte di duna compresa tra la linea di piede e la linea che delimita la scarpata retrodunale;
- Duna semi-stabilizzata, che coincide con la depressione retrodunale (detta anche “duna vegetata” o “duna grigia”) e solitamente caratterizzata da una vegetazione più uniforme ed una dinamica più consolidata;
- Duna stabilizzata, zona delle cosiddette paleo-dune o dune secondarie, formatesi molto tempo prima di quelle attuali ed ormai largamente consolidate.

Figura 1
Dettaglio rappresentazione cartografica delle classi di dunari.

Le elaborazioni e gli elementi morfologici necessari a distinguere le zone morfologiche sono stati identificati e mappati seguendo le metodologie più recenti tratte dalla letteratura scientifica (Mitasova et al., 2005; Lents et al., 2011; Fabbri et al., 2017), che si basano sull'analisi dettagliata delle pendenze, elaborate a partire dal



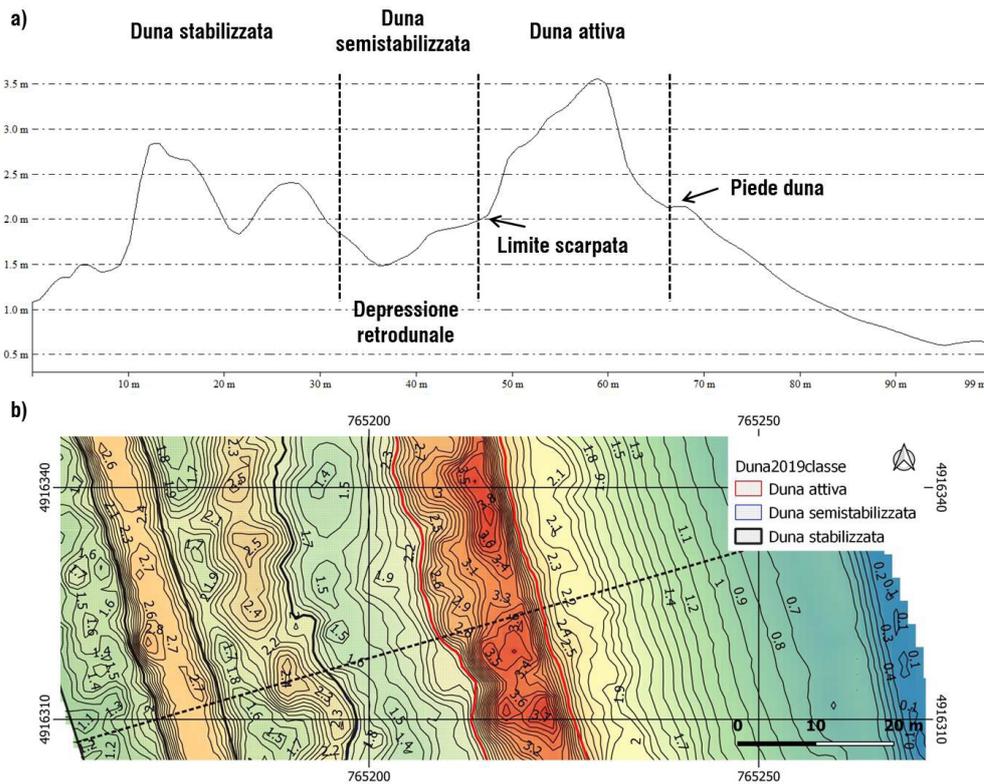


Figura 2
 Classificazione della duna in base alle caratteristiche geomorfologiche.

DTM LIDAR 2019. Sono distinti:

- linea di piede della duna, che marca il confine tra duna e spiaggia e coincide con un evidente e repentino cambio di pendenza (da circa 40 - 20% della duna, a circa 15 - 0% della spiaggia in una distanza di circa 1 metro);
- le due linee morfologiche che delimitano la scarpata retrodunale, ovvero: il limite tra duna attiva e quella semi-stabilizzata, caratterizzato da un cambio di pendenza evidente, da circa il 25–15% allo 0-15% in una distanza di circa 1-2 m. Il passaggio alla retrostante duna stabilizzata è, invece, meno marcato, da 0 - 5 a 5 - 10% nello spazio di 2-3 metri.

La cartografia delle dune è stata infine integrata con la mappatura di altri due elementi morfologici:

- duna residuale: porzioni di duna stabilizzata (fondamentalmente vegetata con pineta), in cui la morfologia dunale è completamente persa, principalmente a causa dello spianamento effettuato dall'uomo con mezzi meccanici per creare delle aree destinate alla fruizione turistica, come ad esempio giardini (Figura 3).
- duna artificiale: porzioni di duna ricostituite artificialmente (spesso tramite sacchi di sabbia e terreno di riporto) che comunque nel tempo sono diventate parte integrante del paesaggio litoraneo e che sono state, almeno parzialmente, ri-colonizzate da vegetazione (Figura 4).

Per l'individuazione di tali elementi morfologici, si è proceduto anche con il confronto con il catalogo opere di difesa RER 2020. A questo proposito va precisato che nella classe 'duna artificiale, non sono state mappate le opere, erette soprattutto nel ferrarese, e già classificate come "argine interno" nel catalogo delle opere 2019 e 2020. Va sottolineato che esse sono generalmente inserite in un contesto di dune stabilizzate, come a

Figura 3
 esempio di duna
 residuale presente a
 Lido degli Estensi.



Figura 4
 esempio di duna
 artificiale presente a
 Lido Adriano (in fig.
 A ortofoto e in fig.
 B in rilievo DTM_LI-
 DAR)⁽¹⁾.

Lido di Volano o a Lido Nazioni. Un'ulteriore revisione del dato potrebbe suggerire di includere anch'esse tra le "dune artificiali", molto simili visto per tipologia costruttiva, ma allo stato attuale si è ritenuto opportuno tenerle separate.

Per quanto riguarda la classificazione dei campi Vegetazione ed Essenze, il lavoro si è basato fondamentalmente sulla fotointerpretazione, che ha permesso di individuare le associazioni vegetali tipiche del Nord Adriatico.

I poligoni classificati in base all'analisi geomorfologica, sono stati suddivisi per distinguere le diverse tipologie di vegetazione, identificate in base alla tessitura

⁽¹⁾ Attualmente la duna è difficilmente classificabile come artificiale: la ricostruzione è avvenuta per confronto con le ortofoto precedenti, dalle quali emerge che la realizzazione dev'essere stata successiva agli anni '80, e intrapresa al fine di proteggere l'abitato dai fenomeni di ingressione marina. La duna è infatti ubicata in una porzione di costa dove fino al decennio precedente era presente la duna stabilizzata, analoga a quella che attualmente troviamo nella porzione retrostante, e che nei primi anni '80 era poi quasi totalmente scomparsa per l'aggravarsi del fenomeno di erosione dei litorali. L'accrescimento è testimoniato dalle ortofoto a partire dagli anni '90, e nei primi anni del 2000 sono presenti porzioni completamente formate.

dei pixel e previa verifica di congruità con la zona morfologica di appartenenza (Figura 5). Le classi di riferimento sono 6, così articolate:

- Pioniera, rada, assente: che sono caratterizzate da una tessitura poco uniforme con netta prevalenza di pixel bianchi o molto chiari, interrotti da piccole zone più scure, tipiche degli ambienti dunosi dove l'elemento predominante è la sabbia. Sono le zone con duna embrionale o duna attiva (avanduna);
- Erbosa annuale: con tessitura sempre poco uniforme composta soprattutto da pixel verde o marrone, dove ancora si riescono nettamente a vedere zone molto più chiare;
- Erbosa perenne: data invece da una tessitura molto più uniforme, formata da pixel di colore sostanzialmente verde scuro;
- Arborea-arbustiva, dove la tessitura è frastagliata, per l'alternanza di zone a pixel verdi, grigi o marrone, che indicano una vegetazione tipica delle zone di retroduna;
- Arborea: zone di tessitura simile alla precedente, ma con un colore molto più uniforme, verde brillante. Tale tipologia di vegetazione, salvo rare eccezioni, si ritrova sempre in ambienti di paleoduna consolidata, spesso in zone ad antropizzazione bassa e corrisponde fondamentalmente a zone di pineta;

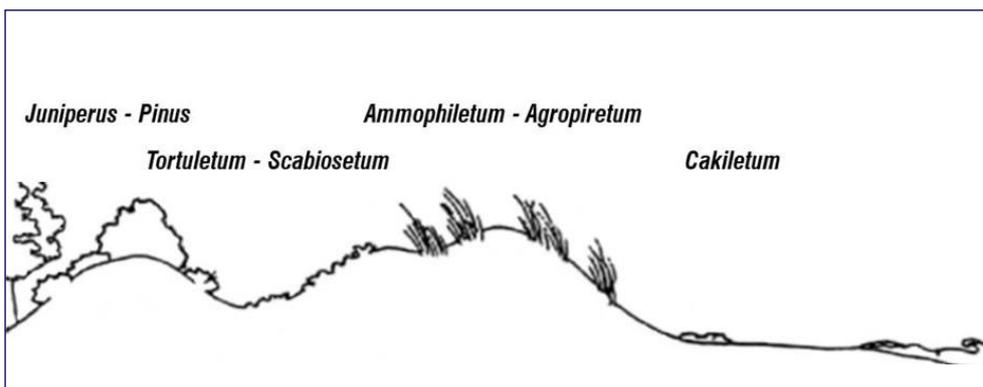


Figura 5
schema di riferimento per la vegetazione su dune sabbiose costiere in nord Adriatico (Merloni et al., 2007).

- Mista: zone con vegetazione atipica, evidentemente alterata dalle attività antropiche.

A ciascuna classe di vegetazione sono state associate le relative essenze caratteristiche, basandosi sulla zonazione tipica della vegetazione dunosa del nord Adriatico, indicata in recenti pubblicazioni scientifiche (Merloni et al., 2007 e 2015; Sburlino et al., 2013; Valentini et al., 2015). Le essenze associate alle diverse classi sono state:

- Pioniera rada – Assente: principalmente generi da *Cakiletum*;
- Erbosa Annuale, principalmente generi da *Ammophyllum/Agropyretum*;
- Erbosa Perenne, principalmente generi da *Tortuletum/Scabiosetum*;
- Arborea – Arbustiva, principalmente generi *Juniperus e Pynus*;
- Arborea, principalmente *Pynus Pinaster* (Pineta);
- Mista, senza una caratterizzazione precisa.

Il campo **Quota** classifica le aree con elevazione maggiore o minore di 2 metri,

riferita al livello del mare. L'analisi è stata condotta rielaborando i poligoni TIPO DUNA, precedentemente classificati, in base alla morfologia della duna, utilizzando le isoipse derivate dal DTM-LIDAR 2019, sulle quali si è operata una suddivisione in base appunto all'elevazione.

Il campo **DINAMICA** contiene l'analisi della evoluzione rispetto alla rilevazione effettuata nel 2018. Si segnala che, alla data in cui è stata effettuata questa classificazione, non era ancora stato deciso di elaborare la cartografia della duna al 2004, per questo il confronto qui esaminato è riferito allo strato 2018.

A ciascuno dei poligoni si è attribuita una delle seguenti classi: Stabilità, Avanzamento, Arretramento, Indeterminata. È importante specificare che, essendo cambiati in maniera sostanziale i criteri di riferimento per la classificazione morfologica rispetto al lavoro del 2018, non sempre è stato possibile fare un confronto diretto fra i corrispettivi poligoni, specialmente per quelli relativi alla categoria duna semi-stabilizzata. Per questo si è deciso di introdurre la categoria "Indeterminata". L'analisi si è concentrata soprattutto sulle zone riguardanti il fronte dunale, cercando principalmente di evidenziare quelle aree in cui la duna, assente nel 2018, è poi comparsa, o viceversa. In questo caso, i risultati preliminari hanno rilevato una netta dominanza di situazioni caratterizzate da una dinamica di stabilità (circa 8.9 km²), risultato piuttosto in linea con i dati precedenti e con la prevalente estensione della duna stabilizzata, con vegetazione arborea.

Il campo **ANTROPIZZAZIONE** evidenzia il livello di antropizzazione (alta, media o bassa) dei diversi elementi morfologici che caratterizzano la duna (Figura 6). Ciò fornisce una valutazione sullo stato di salute della duna: infatti, i tratti caratterizzati da antropizzazione alta sono quelli dove le morfologie sono fortemente modificate/rimaneggiate (es: paleodune in ambiente urbano, spianate e avanduna completamente assente); le zone ad antropizzazione media, invece, sono spesso contraddistinte da un livello ancora alto di urbanizzazione, ma con elementi morfologici dunosi ancora piuttosto integri. Infine, gli ambienti ad antropizzazione bassa, corrispondono alle zone più prettamente naturali, o con costruzioni rade, dove gli elementi dunosi possono liberamente svilupparsi in maniera consona.

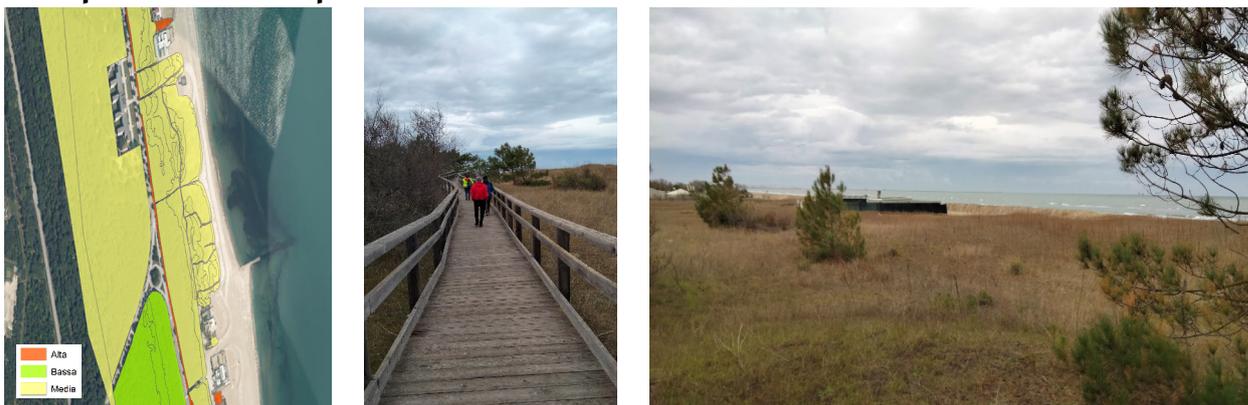
I campi **VOLO 1943** e **VOLO 1982** riportano la presenza /assenza delle dune 2019 anche in quegli anni. Questa informazione può essere utile a stabilire, seppur in modo grossolano l'età delle dune più recenti.

Figura 6
Esempi classificazione "antropizzazione" delle dune costiere in Regione.

Esempio Bassa antropizzazione – Zona Vene di Bellocchio (RA)



Esempio Media antropizzazione – Dune tra Marina di ravenna e Punta Marina



Esempio Alta antropizzazione – Lido degli Scacchi (fronte Holiday Village Florenz)



4.2. Analisi Duna 2019

Le informazioni di seguito illustrate si riferiscono al dataset *'elaborato tecnico' Duna_2019*, ovvero lo strato cartografico nel quale, oltre alle geometrie ricavate da rilievo Lidar, sono state mappate alcune porzioni di duna stabilizzata, individuate attraverso la sola fotointerpretazione a causa della mancanza del dato LIDAR.

4.2.1. Superfici

La superficie totale delle dune presenti lungo la fascia costiera tra Volano e Cattolica al 2019 è di 988,4 ettari (9,8 km²), articolate nelle diverse tipologie come riportato nel dettaglio di Figura 7.

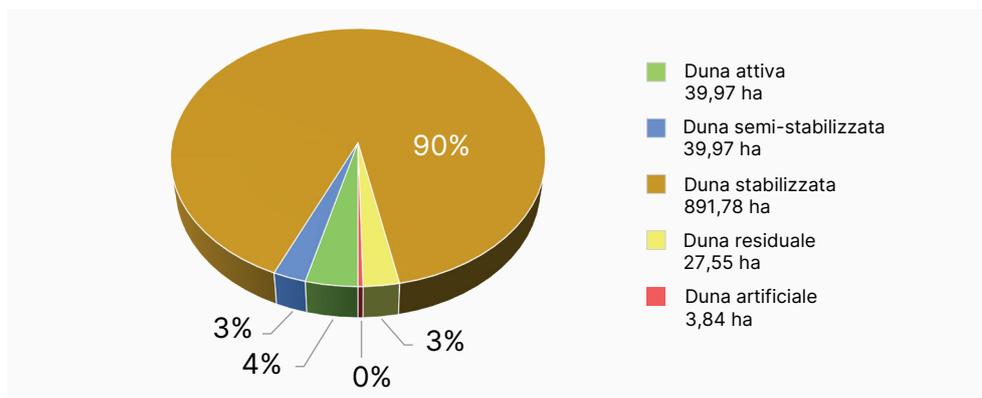


Figura 7
Dettaglio superfici dunali individuate per l'anno 2019 e classificazione tipologica.

Il 90% di esse è rappresentato dalla duna stabilizzata, che include ampie porzioni di cordoni litorali del XX e XIX secolo e porzioni più limitate di cordoni più antichi, presenti sia nel ferrarese che nel ravennate. A Lido delle Nazioni, per esempio, i cordoni dunali sono datati al XVII-XVIII secolo, mentre nell'area delle Vene di Bellocchio - Foce Reno le dune coincidono con sistemi del XVIII-XIX secolo.

La distribuzione delle dune in relazione ai limiti provinciali (Tabella 2) vede una netta prevalenza nella provincia di Ravenna, dove sono censite il 74,9% di queste morfologie, segue Ferrara con il 23,9% circa. Poco più dell'1% è presente nelle altre due province. Se rapportiamo la superficie occupata dai sistemi dunali alla lunghezza di costa provinciale analizzata, è possibile osservare come questo valore nel ravennate risulti circa 1,5 volte maggiore a quello misurato nel ferrarese.

Tabella 2
Dettaglio superfici dunali individuate per le province costiere all'anno 2019.

Provincia	Sup.sistemi dunari (ha) anno 2019	Sup. sistemi dunari (%) anno 2019	Lunghezza costa analizzata (km)
Ferrara	236,50	23,93	23,5
Ravenna	728,51	74,92	47,4
Forlì-Cesena	4,34	0,78	9,3
Rimini	2,08	0,38	34,7

Confrontando invece le lunghezze dei tratti di litorale dove sono presenti dune costiere rispetto all'estensione totale della linea di costa provinciale (Tabella 3), Ravenna domina ancora con il 68,4%, Ferrara segue con uno scarto inferiore rispetto alla precedente valutazione (60% circa), poi Forlì-Cesena (25%) e Rimini con il 2,6%.

Nelle 3 province settentrionali prevale la duna stabilizzata, mentre in quella di Rimini è prevalente la tipologia "residuale" (44%), che corrisponde però a soli 1,6 ettari di superficie.

Tabella 3
Dettaglio superfici delle diverse tipologie dunali individuate per le province costiere all'anno 2019.

Tipologia duna 2019	Ferrara		Ravenna		Forlì-Cesena		Rimini	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Duna attiva	11,06	4,68	27,84	3,76	0,08	1,02	0,99	26,78
Duna semi-stabilizzata	10,62	4,49	14,11	1,91	0,03	0,35	0,48	12,96
Duna stabilizzata	204,23	86,35	682,72	92,20	4,23	55,08	0,60	16,16
Duna residuale	10,59	4,48	11,97	1,62	3,35	43,55	1,64	44,10
Duna artificiale	-	-	3,84	0,52	-	-	-	-

4.2.2. Quote

Uno dei parametri più rilevanti per la gestione dei rischi da inondazione marina è la quota delle dune, che può essere indicativa anche del volume della riserva di sedimento. Le analisi di seguito commentate sono state elaborate estraendo, per ciascun poligono, i valori altimetrici minimo, medio e massimo dal DTM Lidar 2019. Circa l'82% delle dune censite, pari ad una superficie di 814 ettari, ha una quota <2 m, quindi facilmente sormontabile in caso di mareggiata. In particolare, la tipologia "duna stabilizzata" rappresenta il 96% di quelle con quota inferiore ai 2 metri, ovvero al 76% della superficie totale delle dune costiere.



Il rimanente 18% delle dune ha un'elevazione superiore a 2 metri.

Il sistema dunale con quote superiori ai 3 metri maggiormente esteso si sviluppa tra le località di Marina di Ravenna e Punta Marina (Figura 9) ed è stato oggetto di un intervento di protezione concluso nel 2016 (realizzato da Eni S.p.A., su progetto del SGSS-RER, nell'ambito dell'accordo istituzionale tra RER-Comune e provincia di Ravenna e Eni S.p.A., denominato Angela-Angelina). Tale sistema si sviluppa per circa 3.5 ettari e mostra un'ampiezza di circa 150-160 metri (in direzione terra-mare), valori che denotano un apparato in ottimo stato di conservazione. Le quote massime sono superiori a 7 metri. L'intervento è stato oggetto di monitoraggio altimetrico e sedimentologico nel periodo 2014-2018, eseguito dall'Università di Ferrara per conto di Eni S.p.A., e ha evidenziato l'incipiente accrescimento del fronte dunale e di stabilizzazione della morfologia grazie alla crescita della vegetazione piantumata.

Figura 8
Classificazione quota dune maggiore/minore di 2 m all'anno 2019.

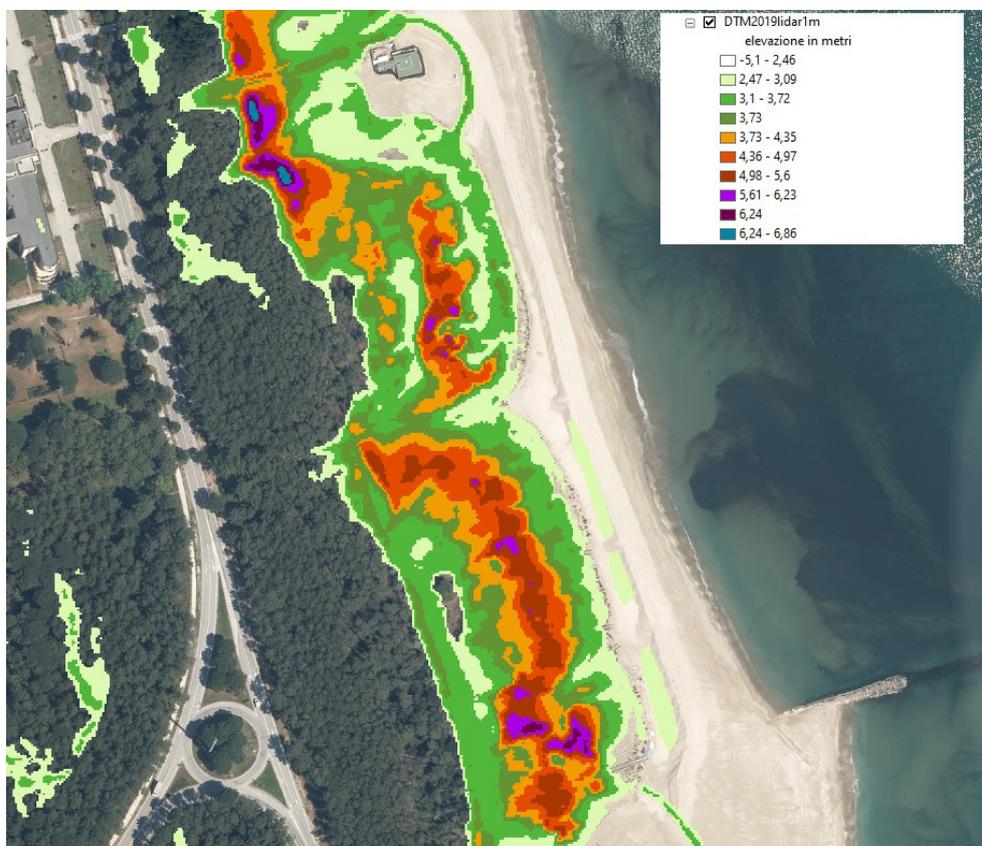


Figura 9
Particolare intervento realizzato da Eni S.p.A. a Marina di Ravenna.

Nel ferrarese sono presenti alcune porzioni di duna con quote massime di oltre 8 - 9 metri, rilevate in corrispondenza dei campeggi “Florenz” e “Ancora” in prossimità di Lido degli Scacchi.

Tra le dune con quota > 2 metri domina la tipologia “stabilizzata”, che rappresenta il 13% della superficie totale delle dune, seguita dalla duna attiva che, per la porzione con elevazione > 2 metri, costituisce il 4%.

La Figura 10 illustra in dettaglio la superficie in ettari delle diverse tipologie di duna per classe altimetrica, considerando le quote inferiori e superiori ai 2 metri. Quasi il 73% delle dune attive con quota > 2m è nella provincia di Ravenna, poco meno del 25% in quella di Ferrara, intorno all’1% a Rimini e a Forlì-Cesena.

Figura 10
Analisi quote dune
2019.

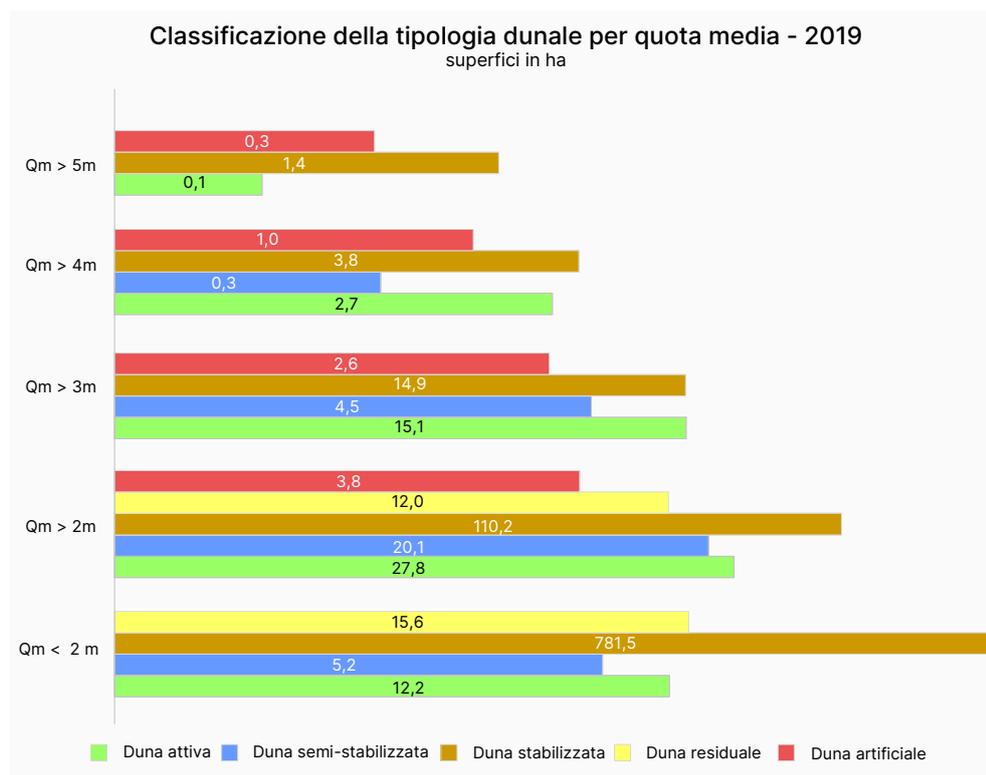
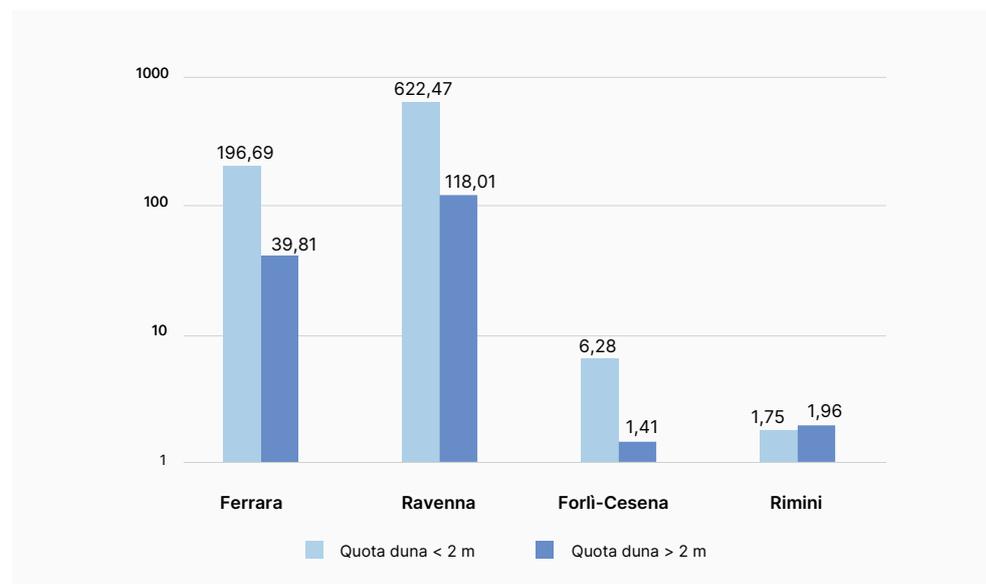


Figura 11
Analisi quote dune
2019 a livello provinciale.
(Superfici in ha)



4.2.3. Dinamica

Per quanto riguarda la dinamica delle dune 2019 rispetto all'anno precedente (2018) si osserva che oltre il 90% (897,72 ettari) è stabile, circa il 9% in crescita mentre lo 0,71% (circa 7 ettari) è in arretramento. Questi dati, tuttavia, come è stato specificato nella parte metodologica, devono essere valutati attentamente perché il metodo di mappatura e classificazione è in parte cambiato tra i 2 dataset.

Per ovviare a questo inconveniente, le elaborazioni quantitative di riferimento riguardano solo il fronte dunale, focalizzando l'attenzione quindi unicamente sulla duna attiva e individuano le aree che, tra il 2018 e 2019, sono state caratterizzate da avanzamento o arretramento. I risultati di quest'analisi hanno evidenziato una dominanza delle aree stabili (40,8%) e in avanzamento (34,1%) su quelli in arretramento (14,3%) (Figura 12).

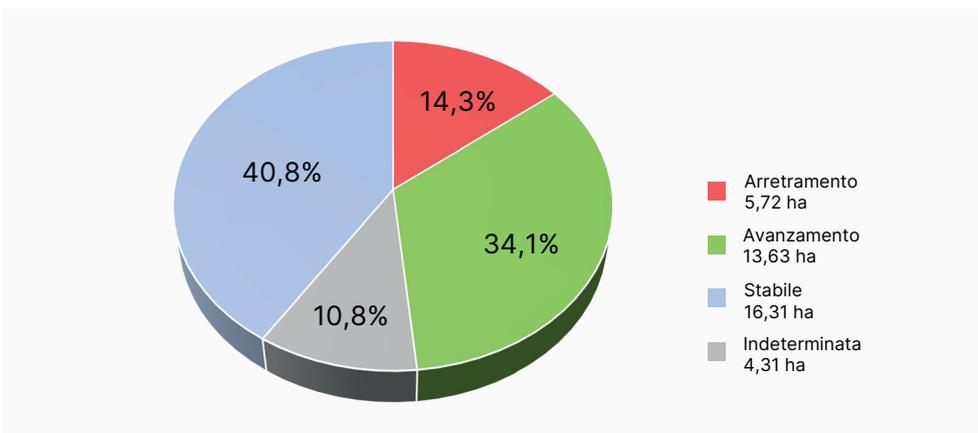


Figura 12
Analisi della dinamica della duna attiva (porzione frontale della duna) all'anno 2019.

4.2.4. Antropizzazione

Un ulteriore dato interessante, anche se valutato solo in modo qualitativo, attraverso fotointerpretazione, è quello che riguarda il livello di antropizzazione degli apparati dunali.

Il 60% delle superfici dunali ha un basso grado di antropizzazione (Figura 13), ciò significa che sono scarsamente presenti manufatti e infrastrutture e le morfologie naturali possono quindi modificarsi senza vincoli. L'8,7%, è invece caratterizzato da un livello di antropizzazione elevata (dune fortemente modificate e rimaneggiate). La classe media, che rappresenta ambienti con livello di urbanizzazione elevato ma con elementi morfologici dunosi piuttosto integri, corrisponde al 31,1%.

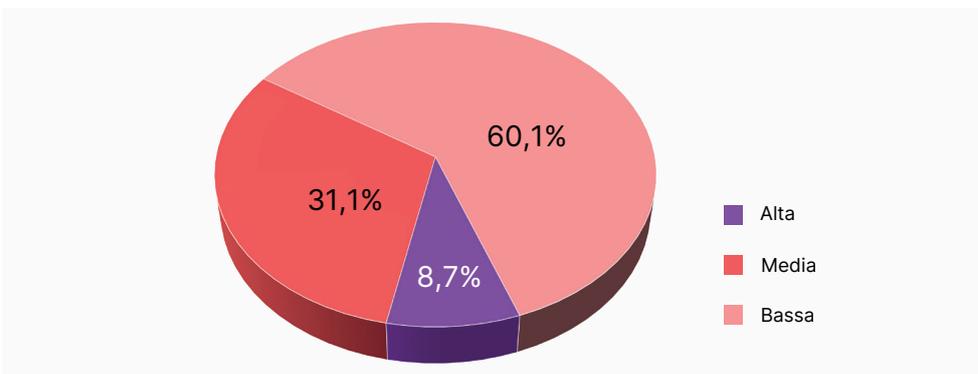
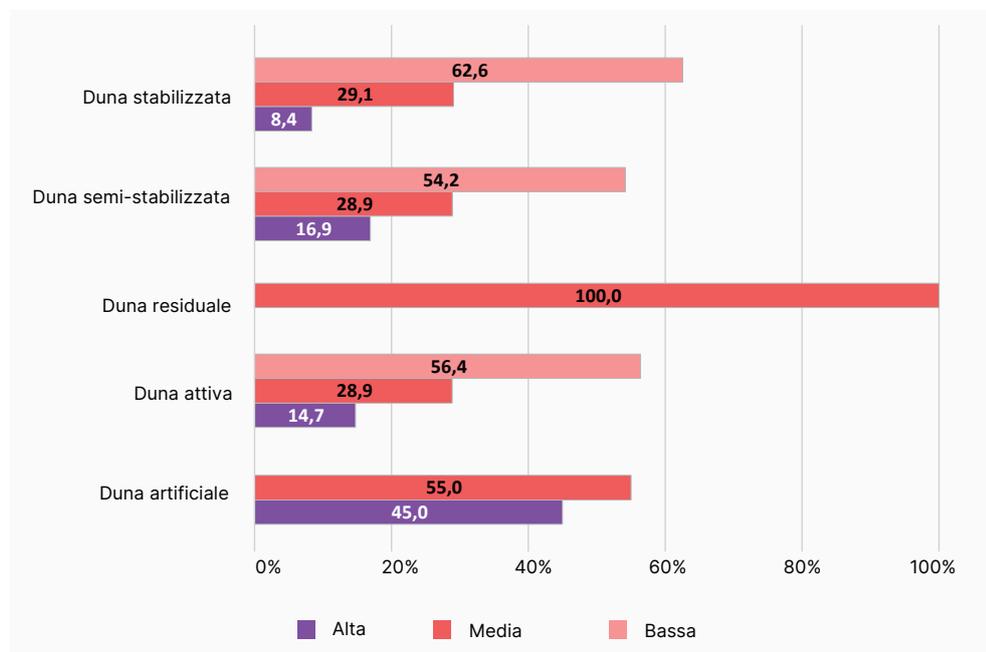


Figura 13
Grado di antropizzazione della duna all'anno 2019.

Come si evince dal grafico in Figura 14, oltre alla duna artificiale, fortemente antropizzata per il 45%, anche la duna semi-stabilizzata con il 16,9% e la duna attiva con il 14,7% risultano essere ad alto livello di antropizzazione.

Sono infatti le infrastrutture turistiche, come i parcheggi o gli stabilimenti balneari, a compromettere la salute di questi sistemi dunali.

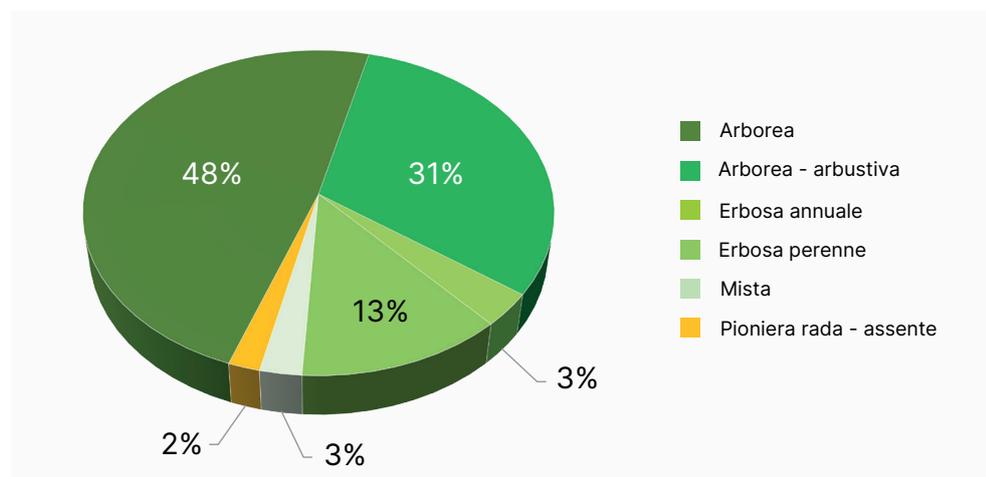
Figura 14
 Dettaglio del livello di antropizzazione delle diverse tipologie di duna.
 (Superfici in ha)



4.2.5. Vegetazione

Per quanto riguarda la vegetazione domina quella arborea e l'arborea/arbustiva, che rispettivamente interessano il 48,3% e il 31,1% della superficie totale delle dune (Figura 15).

Figura 15
 Analisi della distribuzione delle diverse specie vegetazionali nei sistemi dunali all'anno 2019.



La vegetazione arborea è particolarmente estesa sulla duna stabilizzata, dove rappresenta il 53,5% della copertura vegetale (Figura 16). Sulla duna semi-stabilizzata prevale la vegetazione erbosa perenne, con il 49,3%, mentre sulla duna attiva la pioniera-rada-assente (43%) seguita dall'erboso annuale (39,5%).

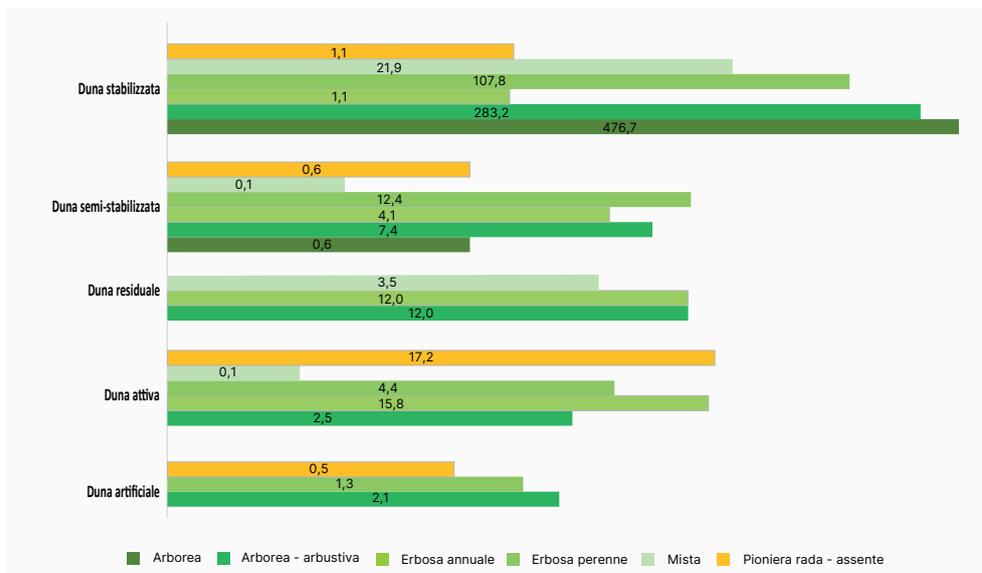


Figura 16
 Dettaglio della distribuzione vegetazionale per le diverse tipologie di duna all'anno 2019. (Superfici in ha)

4.2.6. Presenza sui voli storici

È stata effettuata un'analisi relativa alla presenza/assenza della duna attuale (elaborato cartografico Dune_2019) sulle immagini fotografiche dei voli RAF1943 e COSTA-RER 1982. Non è stato invece possibile valutare le porzioni di duna scomparse perché non sono disponibili dati altimetrici per quelle annualità, indispensabili per poter classificare le dune 1943 e 1982 seguendo la metodologia qui utilizzata.

La duna 2019 è risultata in gran parte presente anche sui voli storici: infatti, solo l'11% di questa, paria a 110 ettari, non era già presente al 1943 (Tabella 4), percentuale che si riduce al 5,5% (54,9 ettari) rispetto all'anno 1982 (Tabella 5).

Presenza anno 1943			
Tipologia duna	Indeterminabile (ha)	Non presente (ha)	Presente (ha)
Duna artificiale		2,4	1,5
Duna attiva	2,1	24,2	13,7
Duna residuale		3,5	24,0
Duna semi-stabilizzata	0,9	17,6	6,8
Duna stabilizzata	26,8	62,9	802,1
Totale complessivo	29,7	110,6	848,1

Tabella 4
 Dune cartografate nello strato Dune_2019 già presenti all'anno 1943.

Presenza anno 1982			
Tipologia duna	Indeterminabile (ha)	Non presente (ha)	Presente (ha)
Duna artificiale		1,7	2,1
Duna attiva	0,1	14,3	25,5
Duna residuale			27,5
Duna semi-stabilizzata		9,1	16,2
Duna stabilizzata		29,7	862,1
Totale complessivo	0,1	54,9	933,4

Tabella 5
 Dune cartografate nello strato Dune_2019 già presenti all'anno 1982.

4.3. Analisi dati duna 2004

Le informazioni di seguito illustrate si riferiscono al dataset ‘elaborato tecnico’ Duna_2004, nel quale, come precedentemente descritto al paragrafo 3.1, sono state incluse alcune porzioni di duna stabilizzata mappate solo attraverso la fotointerpretazione a causa dell’assenza del dato LIDAR.

4.3.1. Superfici

La superficie totale delle dune costiere al 2004 (Figura 17) è di 998,58 ettari (9,9 km²).

La distribuzione provinciale delle dune (Tabella 6) vede una netta prevalenza nella provincia di Ravenna, dove sono censite il 74,5% delle dune, segue Ferrara con il 24,4% circa. Poco più del 1% è presente nelle altre due province. Anche in questo caso le dune del ravennate sono più estese se rapportate alla lunghezza della costa, circa 1,6 volte rispetto alla stessa valutazione fatta sul territorio ferrarese.

Figura 17
Dettaglio superfici dunali individuate per l’anno 2004 e classificazione tipologica

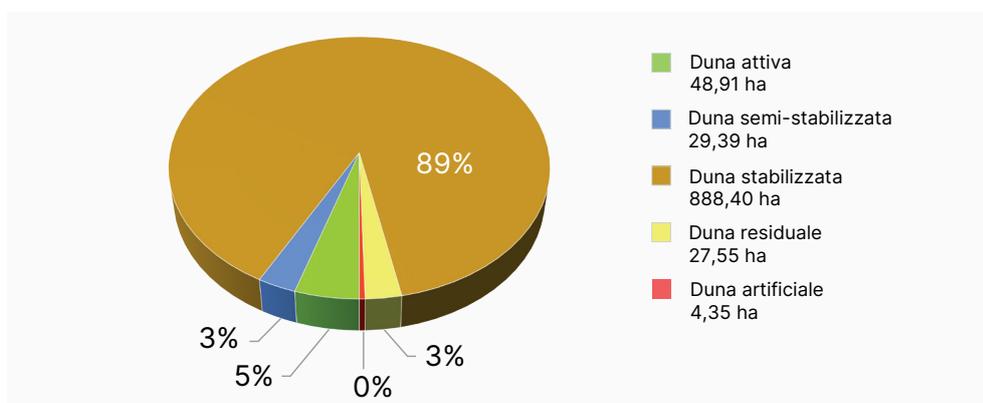


Tabella 6
Dettaglio superfici dunali individuate per le province costiere all’anno 2004.

Provincia	Superfici sistemi dunari (ha) anno 2004	Superfici sistemi dunari (%) anno 2004	Lunghezza costa analizzata
Ferrara	243,3	24,4	23,5
Ravenna	744,0	74,5	47,4
Forlì-Cesena	7,8	0,8	9,3
Rimini	3,4	0,3	34,7

In tutte e 4 le province costiere prevale nettamente la duna stabilizzata (Tabella 7), sempre considerando che a Rimini e Forlì-Cesena la duna totale è estremamente ridotta, con superfici di pochi ettari.

Tabella 7
Dettaglio superfici delle diverse tipologie dunali individuate per le province costiere all’anno 2004.

Tipologia duna 2004	Ferrara		Ravenna		Forlì-Cesena		Rimini	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Duna attiva	13,65	5,6	35,09	4,72	0,17	2,16	-	-
Duna semi-stabilizzata	9,97	4,1	19,40	2,61	0,01	0,19	-	-
Duna stabilizzata	209,11	85,9	673,23	90,48	4,29	54,87	1,76	51,83
Duna residuale	10,59	4,4	11,97	1,61	3,35	42,78	1,64	48,17
Duna artificiale	-	-	4,35	0,58	-	-	-	-

4.3.2. Quote

La quota duna deriva dal dato LIDAR 2004, che, seppur con minore risoluzione rispetto al 2019, è un dato di alta precisione già testato in precedenti analisi morfologiche (Ciavola et al., 2006).

Come nel caso delle dune 2019, anche nel 2004 prevale nettamente la duna con quota < 2 metri, dove rappresenta l'82% del totale ed è pari a 823 ettari circa (Figura 18).

Figura 18
Classificazione quota dune maggiore/minore di 2 m all'anno 2004.



I sistemi dunali a quota media inferiore i 2 m sono in larga parte costituiti dalla tipologia “stabilizzata” con circa 770 ha, pari al 94%. Anche tra quelle a quota maggiore di 2 m prevalgono le porzioni stabilizzate di duna (140 ha, 63%), seguite dai settori di duna attiva con il 23%. Dettagliando le quote per le varie tipologie di duna è stato ricavato il grafico di Figura 19.

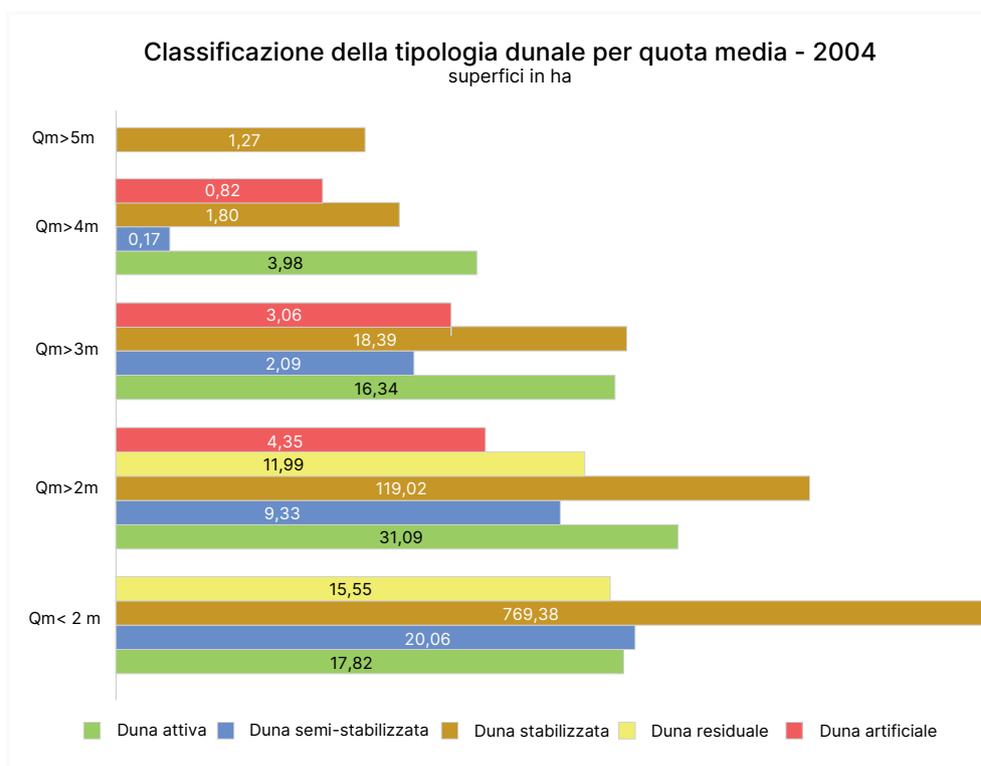


Figura 19
Analisi quote dune 2004.

La duna costiera al 2004 presenta quote massime superiori ai 7 - 8 metri, registrate nelle stesse porzioni di duna del ferrarese precedentemente citati al paragrafo 4.2.2 (Campeggi "Florenz" e "Ancora" a Lido degli Scacchi) e nel Ravennate (es. Lido Adriano).

Circa il 69 % delle dune con quota > 2m è nella provincia di Ravenna, il 29% in quella di Ferrara, il rimanente 2 % è distribuito in egual misura tra Forlì-Cesena e Rimini (Figura 20).

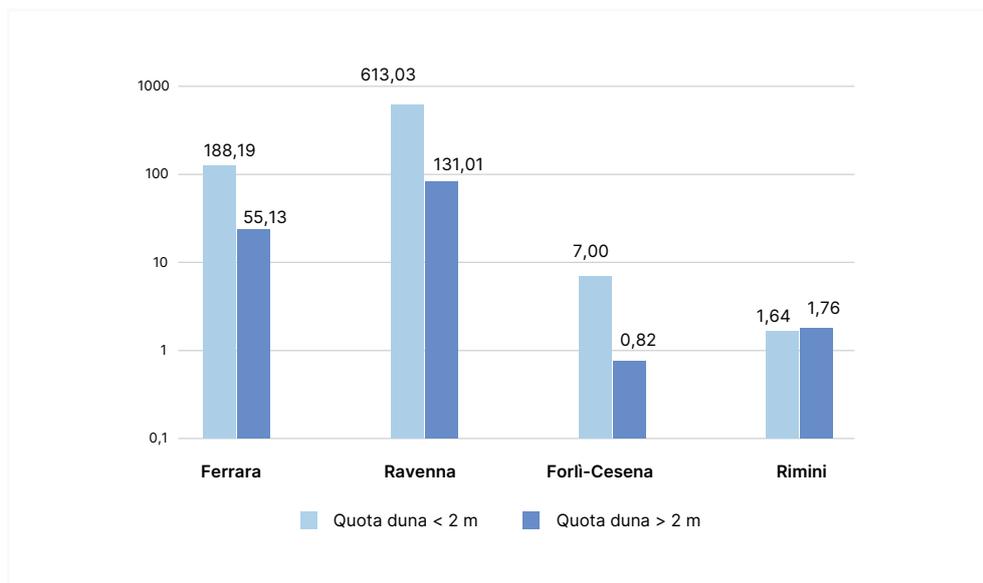


Figura 20
Analisi quote dune 2004 a livello provinciale. (Superfici in ha)

4.3.3. Antropizzazione

Il livello di antropizzazione delle dune per l'anno 2004 è descritto nel grafico di Figura 21, che mostra una prevalenza di bassa antropizzazione (57,7%).

Oltre alla duna artificiale, che presenta sempre un elevato grado di antropizzazione, l'altra tipologia che risulta fortemente antropizzata è la duna attiva, con un 19,7% di grado elevato e il 28,7% di grado medio (Figura 22).

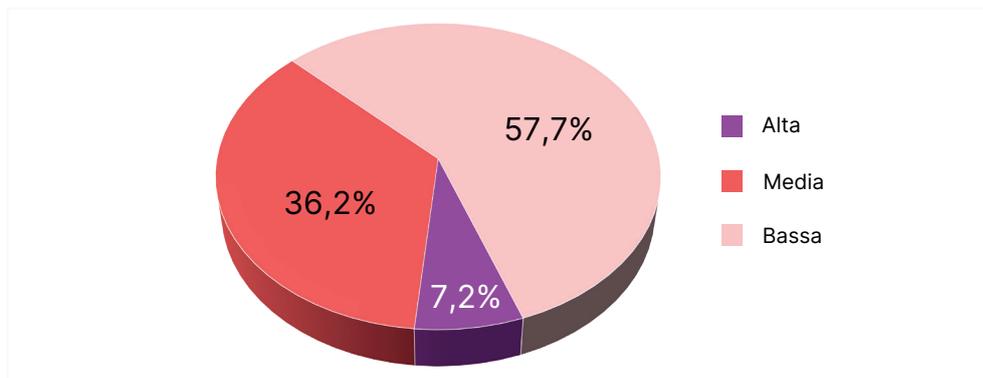


Figura 21
Grado di antropizzazione della duna all'anno 2004

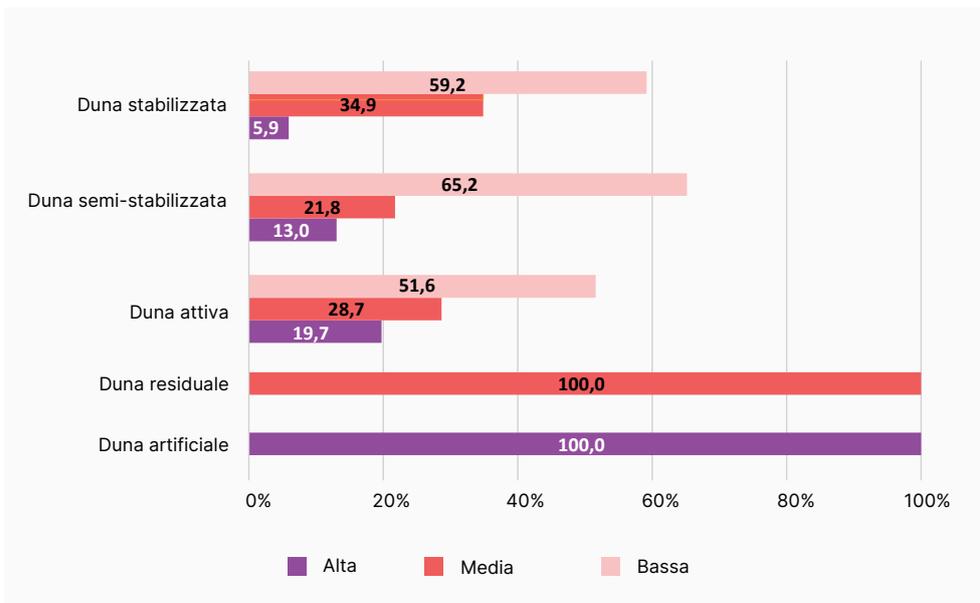


Figura 22
 Dettaglio del livello di antropizzazione delle diverse tipologie di duna. (Superfici in ha)

4.3.4. Vegetazione

Per quanto riguarda la vegetazione domina quella arborea e l'arborea/arbustiva, che rispettivamente interessano il 61,5% e il 21,1% della superficie totale delle dune (Figura 23).

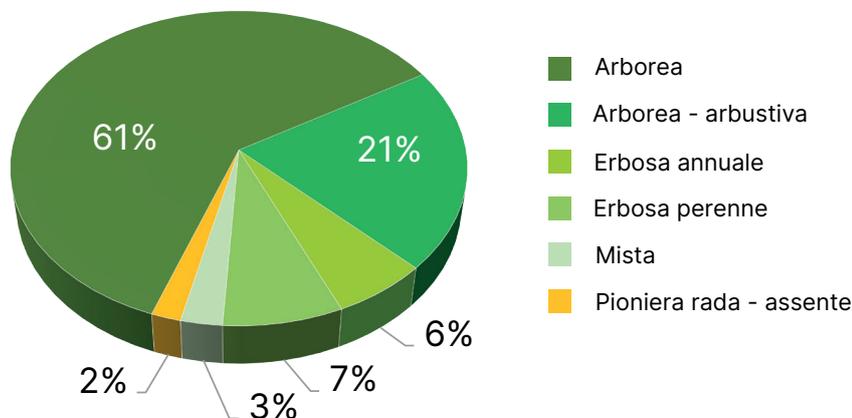
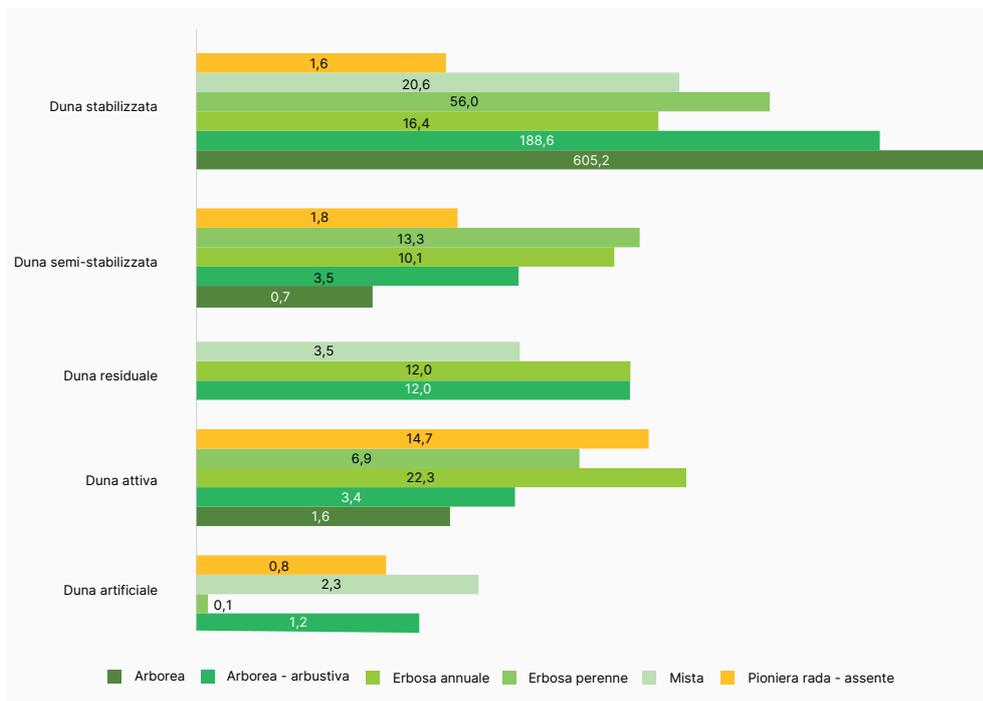


Figura 23
 Analisi della distribuzione delle diverse specie vegetazionali nei sistemi dunali all'anno 2004.

La vegetazione arborea è particolarmente diffusa sulla duna stabilizzata, con il 68,1% della copertura vegetale totale. Sulla duna semi-stabilizzata domina invece la vegetazione perenne, con il 45,4%, mentre sulla duna attiva prevale la erbosa annuale (45,6%) come da grafico in Figura 24.

Figura 24
 Dettaglio della distribuzione vegetazionale per le diverse tipologie di duna all'anno 2004.
 (Superfici in ha)



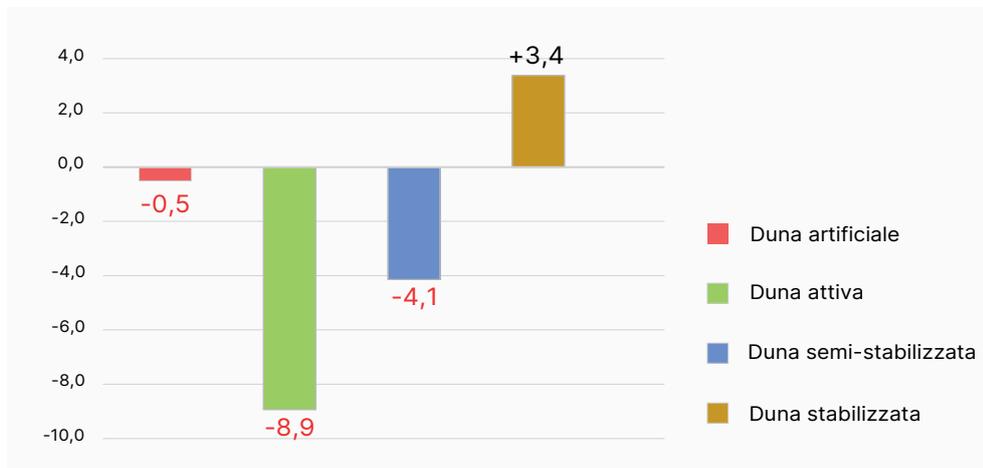
4.4. Confronti tra i dataset 2004 - 2019

I dataset 'dune 2019' e 'dune 2004' sono stati confrontati per valutare la dinamica evolutiva delle morfologie nell'arco dei 15 anni.

È stata calcolata una perdita complessiva della superficie dunale di circa 10 ettari, ovvero circa l'1%. Nonostante il bilancio non appaia particolarmente critico, ciò che si evince dal grafico in Figura 25 è la scomparsa di quasi 9 ettari di duna attiva, ovvero di quella porzione di morfologia che maggiormente contribuisce al bilancio sedimentario della spiaggia.

Un analogo bilancio negativo riguarda la duna semi-stabilizzata che è diminuita di circa 4 ettari, forse in parte trasformati in duna stabilizzata, quest'ultima accresciuta del 3,4%.

Figura 25
 Differenze areali tra duna 2004 e duna 2019 con dettaglio delle tipologie.
 (Superfici in ha)



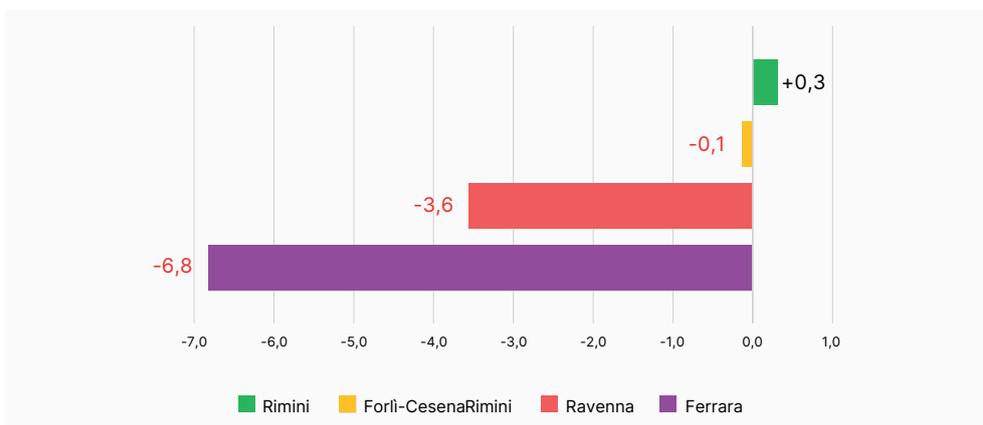


Figura 26
Analisi della dinamica dei corpi dunali per le 4 province costiere regionali nel periodo 2004-2019. (Superfici in ha)

Il territorio in cui è avvenuta la perdita complessiva maggiore è quello della provincia di Ferrara (Figura 26), dove è scomparsa una superficie di dune pari a 6,8 ettari, pari alla dimensione di circa 10 campi da calcio. Il fenomeno riguarda in particolare il settore di costa compreso tra Lido delle Nazioni e Volano, che manifesta da anni gravi fenomeni di erosione costiera.

Approfondendo l'analisi la situazione appare più articolata: infatti, l'area che ha subito la trasformazione più consistente è quella di Ravenna (Figura 27) dove, parte delle dune classificate attive e semi-stabilizzate, si sono verosimilmente trasformate in duna stabilizzata (+9,5 ettari). La perdita complessiva di dune risulta essere quindi pari a soli 3,6 ettari.

Il settore maggiormente colpito è quello a criticità storica delle Vene del Bellocchio, a nord di foce Reno, dove, in prossimità della Foce del canale Gobino, si osserva una regressione del sistema verso terra di circa 100-150 m con perdita della duna (Figura 28).

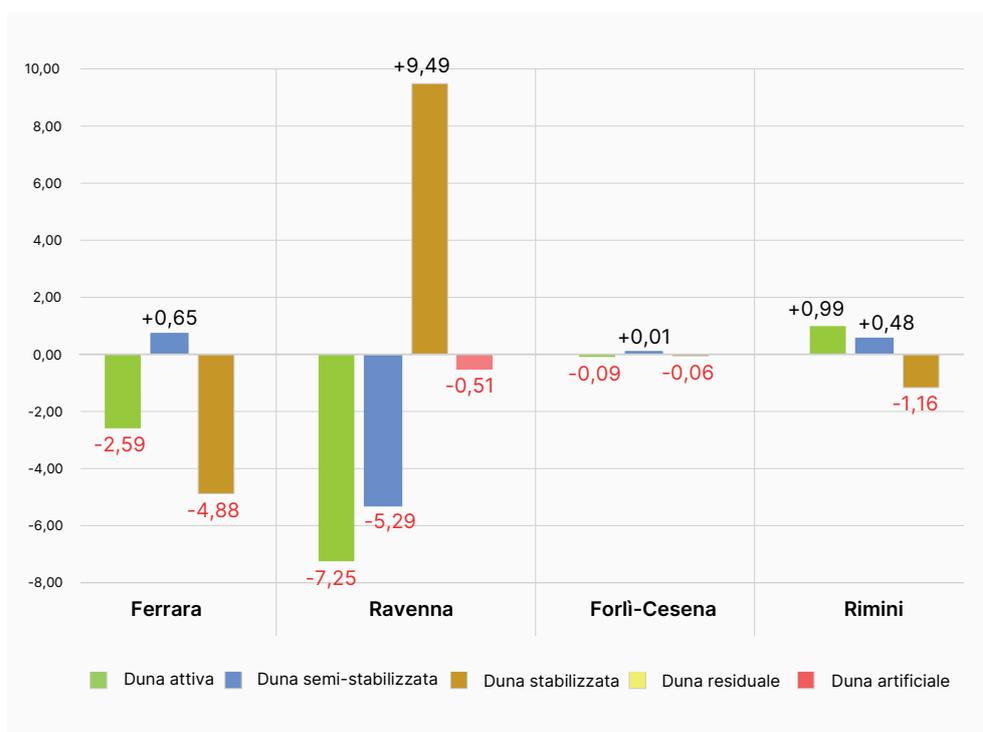


Figura 27
Analisi della variazione del tipo di duna per le 4 province costiere regionali nel periodo 2004-2019. (Superfici in ha)

Figura 28
Dettaglio dell'arretramento della linea di costa e conseguente scomparsa di corpi dunali nell'area delle Vene di Bellocchio (RA).



Per quanto riguarda l'elevazione, la percentuale di dune con quota inferiore o superiore ai 2 metri rimane praticamente identica tra il 2004 e il 2019. In entrambi i casi poco più dell'82% ha quote inferiori ai 2 metri. Dei quasi 10 ettari persi, circa 8,4 sono rappresentati da questa tipologia.

Il dato positivo riguarda il lieve aumento dei tratti con quota superiore ai 5 metri, che corrisponde a una percentuale pari all'1,3% della duna stabilizzata e dell'1% di quella attiva. L'area tra Marina di Ravenna e Punta Marina, oggetto dell'intervento di protezione che si è concluso nel 2016, è quella che mostra i dati più confortanti, con un avanzamento del fronte dunale fino a 15 metri e un aumento della quota che in alcuni punti raggiunge i 2-3 metri. La dinamica di questa porzione di duna è però complessa e consiglierebbe uno studio di dettaglio, completando il lavoro di monitoraggio che è stato attuato per circa 2 anni a seguito dell'intervento.

5. I VARCHI

Al fine di valutare i punti potenzialmente critici per i fenomeni di ingressione marina, sono stati cartografati i varchi presenti nel sistema delle dune costiere. Si tratta di 98 varchi, tutti rappresentati da stradine di accesso alla spiaggia, generalmente caratterizzati da un'ampiezza di pochi metri (da 2 a 6 m). Circa i 2/3 di essi hanno una quota media inferiore ai 2 metri, mentre i restanti presentano valori medi di elevazione compresi tra i 2 e i 2,6 m.

È stato realizzato un confronto tra le quote medie dei varchi e i livelli del mare critici stabiliti nel Piano di Gestione per il Rischio Alluvioni (PGRA), elaborato ai sensi della Direttiva Alluvioni (recepita dal D.lgs. n. 49/2010). Nel PGRA, infatti, sono stati calcolati i livelli di innalzamento della superficie del mare che si possono verificare in occasione di eventi di mareggiata rara (P1), poco frequente (P2) e frequente (P3) e che possono causare fenomeni di ingressione marina. Tali valori sono rispettivamente 2,5 m per le mareggiate rare (P1), che equivale a un tempo di ritorno \gg 100 anni, 1,8 m per lo scenario P2 ($T_r=100$ anni) e 1,5 m per il P3 ($T_r=10$ anni).

Considerando che il 73,4% delle dune costiere ricade in area allagabili per scenario alluvionale P1, il 13% in area interessate dallo scenario alluvionale P2, e solo un 4% in aree P3, emerge che la maggior parte dei varchi insiste arealmente nelle aree caratterizzate da pericolosità P1. In 20 casi essi, tuttavia, presentano quote inferiori al valore di riferimento di 1,5 m, caratteristico delle mareggiate frequenti. Altri 34 varchi hanno quota media inferiore a 1,8 m, quota di riferimento per le mareggiate poco frequenti.

I varchi che potrebbero favorire l'ingressione del mare in centri abitati riguardano le località Lido di Spina, Casal Borsetti, Marina di Ravenna (zona lungomare), Lido Adriano, Lido di Classe e Pinarella di Cervia.

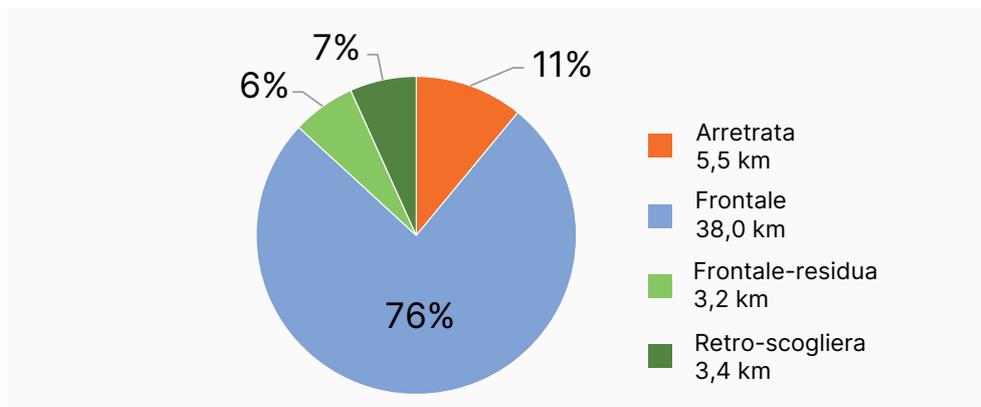
6. CONFRONTO CON TRATTI CRITICI E AMPIEZZA SPIAGGIA

Un ulteriore fattore di criticità per la conservazione delle dune è rappresentato dalla loro posizione rispetto alla linea di riva e dalle caratteristiche della spiaggia antistante. Per esaminare questo aspetto è stato elaborato uno strato lineare, a partire dal livello cartografico “linea di costa 2019”, al quale sono stati aggiunti un campo relativo alla presenza (1) o assenza (0) della duna e uno in cui è riportata la posizione della duna rispetto alla spiaggia. Per quest’ultimo campo sono state definite le seguenti classi:

- frontale, se la duna è in diretto contatto con la spiaggia, anche in presenza di infrastrutture turistiche;
- frontale-residua: quando la spiaggia è bordata da una porzione di duna residua;
- arretrata: se la duna è separata dalla spiaggia da una strada, da un nucleo abitato o da aree naturali prive di duna;
- retro-scogliera: quando la duna è riparata verso mare da una difesa radente in massi.

L’analisi ha evidenziato che le dune sono presenti complessivamente in circa 50 km dei 114 km di linea di costa da Cattolica a Volano (Figura 29), così distribuite: il 76% della costa con dune, ovvero circa 38 km, presenta tali morfologie in posizione frontale, a diretto contatto con la spiaggia, alle quali si aggiunge un 6% costituito da dune residuali. Le dune in posizione arretrata rappresentano l’11% della costa con dune, a cui si aggiunge un 7% che è ubicato a tergo di opere di difesa.

Figura 29
Lunghezza litorale regionale con presenza di sistemi dunari (km) e loro posizione rispetto alla linea di costa



Analizzando i dati di ampiezza delle spiagge in corrispondenza della duna che si trova in posizione frontale o di quella frontale-residuale (Figura 30), si osserva che circa il 33% di esse insiste su tratti molto critici, dove la spiaggia ha una larghezza inferiore ai 30 metri.

Un ulteriore 23% è situato in aree in cui la spiaggia presenta ampiezza compresa tra 30 e 50 m.

Questo dato non è particolarmente confortante poiché una parte rilevante del sistema dunale è molto esposto agli effetti delle mareggiate anche non particolarmente energetiche. In spiagge così strette e generalmente poco pendenti, il mare si propaga facilmente fino a raggiungere il piede della duna provocando erosioni e perdita di volume.

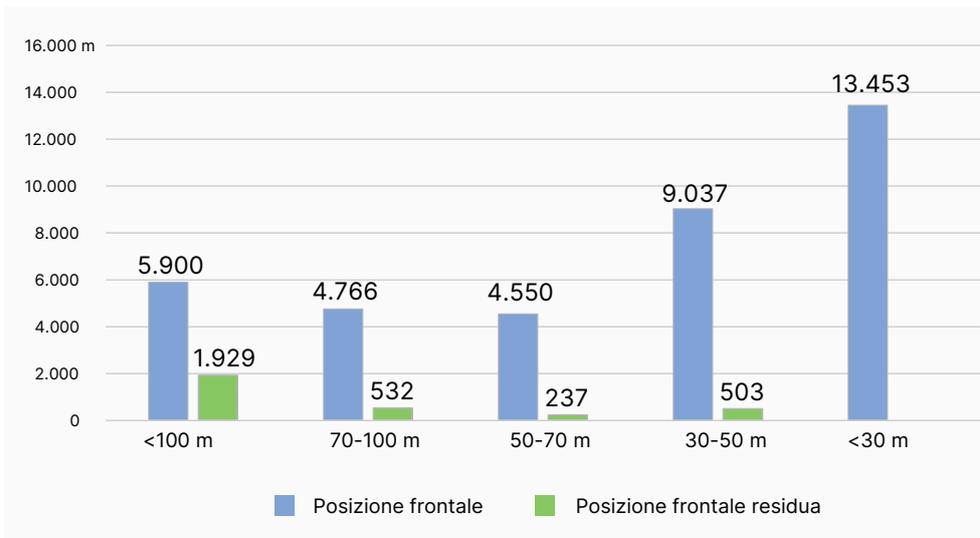


Figura 30
Dettaglio della valutazione sull'ampiezza della spiaggia assistente sistemi di dune posti in posizione frontale e frontale-residua

7. CONCLUSIONI

Le dune costiere, oltre a costituire un importante ecosistema da preservare, svolgono un ruolo imprescindibile nella difesa dell'entroterra dall'ingressione marina.

Esse rappresentano l'ostacolo fisico all'avanzamento del mare e un serbatoio di sabbia insostituibile per il naturale ripascimento della spiaggia. Per questo motivo, nell'ambito della definizione delle misure del PGRA – ambito costa, si è ribadita l'importanza della loro conservazione e del ripristino, riproponendo quanto già sottolineato nelle Linee Guida GIZC (DGR 645/2005). Il primo passo per promuovere e potenziare i progetti di salvaguardia delle dune è la conoscenza approfondita di tali elementi, a partire dalla loro cartografia e dalla classificazione di dettaglio, oggetto del presente lavoro.

Le dune costiere in Emilia-Romagna sono state gravemente spianate e danneggiate nel dopoguerra, in concomitanza con l'intensa urbanizzazione, che è stata pari al 400% circa, se si considera la fascia costiera ampia 1,5 km dalla linea di riva (Lorito et al., 2010). Ad oggi il fronte dunale è affetto da fenomeni erosivi in occasione degli eventi meteo-marini, soprattutto nelle zone in cui la spiaggia antistante è stretta e non consente l'attenuazione delle onde (Figura 31).

I dati elaborati nel presente rapporto evidenziano che circa il 43% della costa regionale tra le località di Cattolica a sud e Volano a nord presenta un sistema di dune costiere, attuali e/o storiche, solo in parte prospicienti alla spiaggia (circa il 35% della costa). Questi valori includono tutte le tipologie di duna, anche quelle artificiali e residue.

Le dune cartografate sulla base dei dati acquisiti nel 2019 coprono una superficie di circa 988 ettari, il 90% dei quali è costituito dalle 'dune stabilizzate' che includono, ampie porzioni di cordoni litorali del XX e XIX secolo o più antichi (fino al XVII secolo).

Figura 31
Tratto litorale regionale dove la duna costiera è stata erosa a seguito di evento di mareggiata.





Le dune prevalgono nella provincia di Ravenna, dove è presente il 74,9% della superficie delle morfologie censite, mentre il 23,9% è ubicato nel Ferrarese.

Considerando invece la lunghezza di costa con duna, rapportato all'estensione provinciale, osserviamo che Ravenna detiene il primato con un 68,4% di litorale in cui sono presenti queste morfologie; ad essa segue Ferrara con il 60% circa, Forlì-Cesena con il 25%, e Rimini con il solo per il 2,6%.

Purtroppo, circa l'82% delle dune censite al 2019, ovvero 814 ettari, ha una quota <2 m, quindi facilmente sormontabile in caso di mareggiata. Il 79% di esse, è rappresentato da dune stabilizzate. Solo il rimanente 18% ha un'elevazione superiore ai 2 metri, il 3,7% delle quali presenta un'elevazione superiore ai 3 metri.

Dal confronto con il dato 'dune 2004' emerge che nell'arco dei 15 anni è andata persa una superficie dunale di circa 10 ettari, corrispondente all'1%. Allarmante è il fatto che questo calo riguardi quasi esclusivamente la duna attiva (circa 9 ettari), ovvero quella porzione che maggiormente contribuisce al bilancio sedimentario della spiaggia.

L'analisi ha evidenziato anche situazioni incoraggianti per quanto riguarda la tematica della protezione costiera: il caso più rappresentativo è quello del settore prossimale Marina di Ravenna in cui è stato realizzato un intervento di protezione con passerelle e fascinate (Figura 32), precedentemente descritto al paragrafo 4.2.2.

Il presente lavoro, grazie alle informazioni elaborate e alle cartografie prodotte, costituisce un punto di partenza per avviare nuovi progetti di protezione delle dune costiere, contribuendo così a mitigare il rischio di inondazione marina e aumentando la salvaguardia di questi importanti ecosistemi faunistici e vegetazionali.

Figura 32
Dettaglio intervento "Marina di Ravenna – Ex colonie" realizzato nell'ambito del Protocollo di intesa tra la Regione Emilia-Romagna, il Comune e la Provincia di Ravenna ed Eni S.p.A. ed approvato con Delibera del comune di Ravenna del 3/9/2014.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Ciavola, P., Perini, L., Luciani, P. and 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*, vol. 9 Febbraio 2006, pp. 18-2.
- Fabbri, S., Giambastiani, B.M., Sistilli, F., Scarelli, F. and Gabbianelli, G. (2017). Geomorphological analysis and classification of foredune ridges based on Terrestrial Laser Scanning (TLS) technology. *Geomorphology*, 295, 436–451.
- Lentz, E.E. and Hapke, C.J. (2011). Geologic framework influences on the geomorphology of an anthropogenically modified barrier island: Assessment of dune/beach changes at Fire Island, New York. *Geomorphology*, 126 (1–2), 82–96.
0.1016/j.geomorph.2011.09.006
- Lorito, S., Calabrese, L., Perini, L., and Cibin U. (2010). *Usa del Suolo della Costa – in: Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna*; Bologna: Pendragon. Monografie ISBN 978-888342847
- Merloni, N. and Piccoli, F. (2007). Comunità vegetali rare e minacciate delle stazioni ravennati del Parco del Delta del Po (Regione Emilia-Romagna). *Fitosociologia*, 44, 67–76.
- Merloni, N., Rigoni, P. and Zanni, F. (2015). La vegetazione delle dune litoranee nella Riserva Naturale di Foce Bevano. In *Spiagge e dune dell'Alto Adriatico*; Corpo Forestale dello Stato: La Greca Arti Grafiche, Forlì, Italy.
- Mitasova, H., Overton, M. and Harmon, R.S. (2005). Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina. *Geomorphology* 72, 204–221.
- Sburlino, G., Bua, G., Filesì, L., Gamper, U. and Ghirelli, L. (2013). Phytocoenotic diversity of the N-Adriatic coastal sand dunes—The herbaceous communities of the fixed dunes and the vegetation of the interdunal wetlands. *Plant Sociol.*, 50, 57–77.
- Valentini, E., Taramelli, A., Filipponi, F. and Giulio, S. (2015). An effective procedure for EUNIS and Natura 2000 habitat type mapping in estuarine ecosystems integrating ecological knowledge and remote sensing analysis. *Ocean and Coast. Manag.*, 108, 52–64.