

Monitoraggio dell'erosione costiera in Emilia-Romagna. Metodi, strumenti, banche dati e Strategia GIDAC

Coastal erosion monitoring in Emilia-Romagna Region. Methods, tools, databases and GIDAC strategy

FLAVIA SISTILLI¹, LORENZO CALABRESE², NUNZIO DE NIGRIS¹, JESSICA LELLI², ROBERTO MONTANARI², MAURIZIO MORELLI¹, LUISA PERINI²

¹ Arpae Emilia-Romagna

² Regione Emilia-Romagna

E-mail: fsistilli@arpae.it (F. Sistilli), lorenzo.calabrese@regione.emilia-romagna.it (L. Calabrese), ndenigris@arpae.it (N. De Nigris), jessica.elli@regione.emilia-romagna.it (J. Lelli), roberto.montanari@regione.emilia-romagna.it (R. Montanari), mauriziomorelli@arpae.it (M. Morelli), luisa.perini@regione.emilia-romagna.it (L. Perini)

Parole chiave: erosione costiera, monitoraggio, indicatori, banche dati, strategia Gidac

Key words: coastal erosion, monitoring, indicators, database, Gidac strategy

INTRODUZIONE

Il litorale emiliano-romagnolo, come tutte le regioni costiere italiane, è soggetto a una diffusa azione erosiva. I primi fenomeni si registrano già nei primi anni del '900, e le prime opere di cui si ha conoscenza per la difesa dall'erosione costiera del litorale regionale sono state documentate nella cartografia tecnica 'Primo Impianto IGM del 1893', dove è mappato un argine che separa la Sacca di Goro (o dell'Abate) dalle valli in corso di bonifica e da una porzione del bosco della Mesola (Regione Emilia-Romagna, 2022), sulla spiaggia di Viserba, dove furono costruiti 5 pennelli lunghi 30 m e distanziati 150 m nel 1917-1918 (Regione Emilia-Romagna, 1984) e a Porto Garibaldi, dove sono state osservate alcune scogliere in mare dalle ortofoto del 1935 (Regione Emilia-Romagna, 2022). Alla fine degli anni '70 del secolo scorso, a causa dell'inasprimento del fenomeno erosivo che iniziava a compromettere anche lo sviluppo dell'economia turistico-balneare, la Regione Emilia-Romagna, pur essendo la difesa del litorale materia di competenza statale, intervenne con l'approvazione della Legge Regionale Emilia-Romagna 7/1979 "Interventi della Regione Emilia-Romagna per la difesa della costa adriatica ai fini ambientali, turistici e di protezione degli insediamenti civili e produttivi".

La Regione Emilia-Romagna, con la L.R. 7/1979, promuove la realizzazione di un piano progettuale per la difesa della costa adriatica, per identificare i fattori principali incidenti dell'erosione, e la realizzazione di una serie di rilievi (topografici, batimetrici, moto ondoso, ...) per tenere sotto controllo l'evoluzione dei fenomeni dell'erosione e della subsidenza.

Inizia così l'implementazione delle reti di monitoraggio e la sistematizzazione delle conoscenze e dei dati raccolti. Oggi si dispone di un importante sistema di reti di monitoraggio del fenomeno dell'erosione costiera e di una organizzata banca dati, che permette di seguire costantemente l'evoluzione del fenomeno erosivo e pianificarne gli interventi di gestione.

1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il litorale della Regione Emilia-Romagna è costituito da una spiaggia bassa e sabbiosa, che si sviluppa per 110 km da Cattolica (confine sud con la Regione Marche) alla foce del Po di Volano, e dal sistema barriera-laguna della Sacca di Goro, nella zona nord (Arpae, 2020), Figura 1.

Le deboli pendenze ed un'ampia zona di frangimento nella parte sommersa danno luogo a spiagge sabbiose di tipo dissipativo. L'area è una pianura costiera facente parte della piana alluvionale del Po, la cui formazione è da riferirsi al periodo di regressione marina post glaciale (da 6000 anni fa in poi) quando gli apporti fluviali diventano dominanti sulle altre forzanti (Bondesan *et al.*, 1995).

I principali fattori che dominano la morfodinamica costiera attuale sono il bilancio sedimentario negativo a causa del mancato apporto di sedimento da parte dei fiumi, la subsidenza (naturale e antropica), gli impatti degli eventi meteo-marini, il trasporto solido *longshore* diretto prevalentemente da sud verso nord.

L'area marina antistante le coste regionali, così come tutto l'alto Adriatico, è caratterizzata da un clima d'onda di bassa energia; il 60% delle mareggiate ha un'onda significativa (H_s) < 1 m (Regione Emilia-Romagna, 1996 e Ciavola *et al.*, 2007) con direzione prevalente tra i 60°-120° (SE - venti di Scirocco), mentre le più energetiche interessano il quadrante E-NE (venti di Bora) (Regione Emilia-Romagna, 1996).

Un ulteriore fenomeno che caratterizza l'alto Adriatico è lo 'storm-surge' che determina l'innalzamento totale del livello del mare al di sopra delle massime maree sigiziali, la cosiddetta 'acqua alta', che colpisce fortemente Venezia e le coste dell'Emilia-Romagna innescando processi di ingressione marina. L'acqua alta è generata dalla combinazione di fattori astronomici, l'alta marea, e meteorologici. I fenomeni di bassa pressione atmosferica in Adriatico, infatti, determinano una sopraelevazione della superficie del mare



FIGURA 1. Litorale emiliano-romagnolo (Arpae, 2020).

che, se accompagnata da venti di SE, provocano un impilamento delle acque verso nord. Tali eventi sono spesso seguiti da oscillazioni libere della superficie del mare (sesse) che in un bacino semichiuso come quello adriatico possono persistere anche per diversi giorni dopo la cessazione dei fattori perturbativi che le hanno innescate. Mareggiate e fenomeni di acqua alta, soprattutto quando combinati, determinano fenomeni di erosione e ingressione marina lungo le coste regionali a causa dell'assetto morfologico della piana costiera (vaste aree con quote altimetriche prossime e inferiori al livello del mare) e della compromissione delle difese naturali (spiaggia e duna) (Perini *et al.*, 2011).

La costa emiliano-romagnola ha visto infatti, dal dopoguerra in poi, uno sviluppo repentino del settore turistico che ha portato a una progressiva urbanizzazione della costa, dove strutture ricettive di vario tipo nel tempo hanno sostituito i cordoni dunosi. A oggi la maggior parte del territorio presenta pochi ed isolati residui di cordone dunoso, a eccezione della Riserva Naturale della Duna Costiera Ravennate e della Foce del Torrente Bevano, caratteristica per la presenza di un cordone dunoso perlopiù continuo di circa 6 km.

2. L'EROSIONE COSTIERA IN EMILIA-ROMAGNA

Dal punto di vista ambientale, la costa è un ecosistema di transizione dove agiscono i processi di entrambi gli ecosistemi limitrofi, terrestre e marino. Sono numerosi quindi i fattori che ne determinano l'evoluzione, alle diverse scale

spaziali e temporali, che si realizza attraverso un continuo adattamento delle morfologie, un equilibrio di tipo dinamico. Tale dinamicità diventa un fattore di sensibilità del sistema quando gli impatti delle attività antropiche vanno a modificare i flussi naturali come quello del trasporto sedimentario costiero.

In Emilia-Romagna il problema dell'erosione costiera inizia già nella prima metà del '900 quando la riduzione delle portate solide dei fiumi determina da una parte lo smantellamento dei principali apparati deltizi e dall'altra il ripascimento naturale dei tratti di costa interposti testimoniata anche dalla formazione di nuovi cordoni dunosi. Dal dopoguerra in poi una serie di concause determina l'inasprirsi di questa crisi erosiva. I cambiamenti nell'uso del suolo (da seminativi a prati e boschi), la grande attività estrattiva negli alvei, la repentina urbanizzazione dell'arenile e il parallelo smantellamento dei cordoni dunosi (serbatoi di sabbia), assieme alla regimazione fluviale producono un sistema costiero ingessato e degradato non più in grado di recuperare dopo la stagione avversa e caratterizzato da un budget sedimentario negativo (GNRAC, 2006).

A questi fattori soprattutto tra gli anni '60 e '70 del secolo scorso si aggiunge un'importante fase di subsidenza del territorio, indotta dagli emungimenti di fluidi (acqua e idrocarburi) con tassi fino a 110 mm/anno nella zona industriale di Ravenna (Teatini *et al.*, 2005). L'incremento della subsidenza litoranea ha prodotto conseguentemente l'incremento dell'erosione delle spiagge.

Di pari passo con l'erosione è proseguito il ricorso ad opere di difesa che, assieme alle opere portuali, hanno modificato notevolmente la dinamica costiera e il trasporto solido lungo costa. In particolare i primi ricorsi ad opere di tipo rigido della prima metà del XX secolo hanno prodotto un effetto a cascata di erosione delle spiagge sottoflutto che ha portato nel giro di qualche decennio ad avere, al 2018, circa 70 km di costa, sui 110 km da Cattolica a Foce di Volano, difese con opere di tipo rigido (Arpae, 2020).

Oggi, i prelievi di sedimento in alveo sono ridotti e regolamentati, e la subsidenza del litorale, seppur ancora presente con tassi medi di 3 mm/anno (Arpae, 2018), non si manifesta più con gli abbassamenti centimetrici degli anni '70 del secolo scorso, in seguito alla riduzione degli emungimenti idrici e al progressivo esaurimento dei giacimenti di idrocarburi. La riduzione dell'utilizzo di acque di falda è stata possibile grazie alle strategie di intervento strutturale messe in atto dalla Regione per privilegiare l'utilizzo di acque superficiali per i fabbisogni umani, prime fra tutte la realizzazione dell'acquedotto di Romagna, che prende l'acqua dalla diga di Ridracoli (FC) e del Canale Emiliano-Romagnolo (CER), che porta in Romagna l'acqua del Po.

In alto Adriatico non si osserva una chiara tendenza di incremento dell'energia del moto ondoso (Ciavola *et al.*, 2011; Ciavola & Jimenez, 2013; Valentini, 2016), ma un lieve aumento dei fenomeni di "storm surge" (acqua alta), che, come accennato in premessa sono quelli maggiormente impattanti soprattutto in termini di allagamento delle zone costiere (Perini *et al.*, 2011). Questi fenomeni, unita-

mente alla perdita di aree emerse potrebbero subire un'accelerazione in futuro come conseguenze dell'innalzamento del livello del mare indotto dai cambiamenti climatici. Il valore di innalzamento medio, registrato a scala globale attraverso l'osservazione dei dati satellitari, sarebbe stato di circa $3,4 \pm 0,3$ mm/anno negli ultimi 30 anni (1993-2022), anche se il tasso sarebbe raddoppiato nell'ultimo decennio (2013-2022) (WMO, 2022). Il più recente dei rapporti dell'IPCC, sesto rapporto AR6 (Fox-Kemper *et al.*, 2021), evidenzia come questa accelerazione possa subire un drastico incremento nei prossimi decenni, con valori variabili da circa 40 cm a oltre 100 cm al 2100, in funzione dei diversi scenari emissivi di gas serra. Questa tendenza aumenterà inevitabilmente l'instabilità delle aree costiere anche in Emilia-Romagna, peggiorando la stima che è stata fatta nel 2017, applicando i dati di innalzamento del livello del mare riportati nel rapporto IPCC 2014 (AR5) e i tassi di subsidenza misurati nel periodo 2006-2012 (Perini *et al.*, 2017). Nel peggiore degli scenari considerati, che ipotizza un innalzamento del livello del mare di 55 cm al 2100, l'incremento delle aree con quota sotto il livello sarebbe del 25%, ovvero circa 150 km², molti dei quali non direttamente connessi al mare, quindi non dovrebbero risultare sommersi. L'incremento delle aree allagabili per effetto di mareggiate con tempo di ritorno di 100 anni, sarebbe invece di circa 3,5 volte rispetto alle aree mappate ai fini della direttiva alluvioni (Perini *et al.*, 2012). Al 2018, 55 km (47%) di costa sono risultati soggetti a condizioni erosive, rispetto al 2012. Grazie a una serie di interventi di ripascimento, realizzati dalla Regione e dagli Enti locali, solo 21 km (18%) di litorale mostravano segni di erosione. Nel periodo 2012-2018 sono stati portati a ripascimento oltre 3,25 milioni di mc di sabbia di cui 1,48 milioni provenienti da fonti esterne del sistema litoraneo, il restante derivato da prelievi in corrispondenza di aree di accumulo (Arpae, 2020).

3. LE RETI DI MONITORAGGIO DELL'EROSIONE COSTIERA

Le reti di monitoraggio sono gestite e implementate dall'Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna (Arpae) nell'ambito delle attività istituzionali di monitoraggio ambientale su incarico della Regione Emilia-Romagna.

3.1. Rete Geodetica Costiera

L'accuratezza delle misure dei rilievi topo-batimetrici è la variabile che sta alla base dell'affidabilità di tali dati e quindi di tutte le elaborazioni successive: i modelli digitali delle spiagge e i loro confronti nel tempo per la stima delle variazioni volumetriche e degli spessori di sedimento accumulato/eroso e quindi, in ultima analisi, della valutazione dello stato della spiaggia. "Una non corretta misura della quota di spiaggia di pochi centimetri determinerebbe un errore di migliaia di metri cubi di sabbia erosa o depositata" (Arpae, 2020).

Proprio allo scopo di fornire i riferimenti per un corretto e omogeneo inquadramento geodetico dei rilievi, per la

zona costiera, nel 2016-2017 è stata progettata e realizzata la Rete Geodetica Costiera (RGC). Il lavoro è stato svolto nell'ambito di un accordo tra l'attuale Unità Mare Costa di Arpae e il Dipartimento di Ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali - DICAM, dell'Università di Bologna.

Il progetto della rete ha previsto la presenza di un vertice mediamente ogni 4 km e a tale scopo si è proceduto all'individuazione di vertici già esistenti appartenenti ad altre reti di livellazione, in primis Arpa 2005 (Rete Regionale di Controllo della Subsidenza) e altre reti (IGM95, GPS-7, altri enti locali), e solo in ultima istanza si è proceduto alla materializzazione di vertici ex-novo.

Le coordinate planimetriche e la quota ellissoidica sono state individuate mediante 5 campagne di rilievo GNSS (rilievo in modalità statica e NRTK) nel sistema di riferimento nazionale ETRS89-ETRF2000 (2008.0) (Decreto Ministeriale 10/11/2011).

La quota ortometrica (m sul livello del mare) è stata determinata partendo dalla quota della rete Arpa 2005 (ottenuta con misure di livellazione geometrica di alta precisione), e aggiornata al maggio 2011 tramite i modelli di subsidenza disponibili ottenuti con misure interferometriche satellitari.

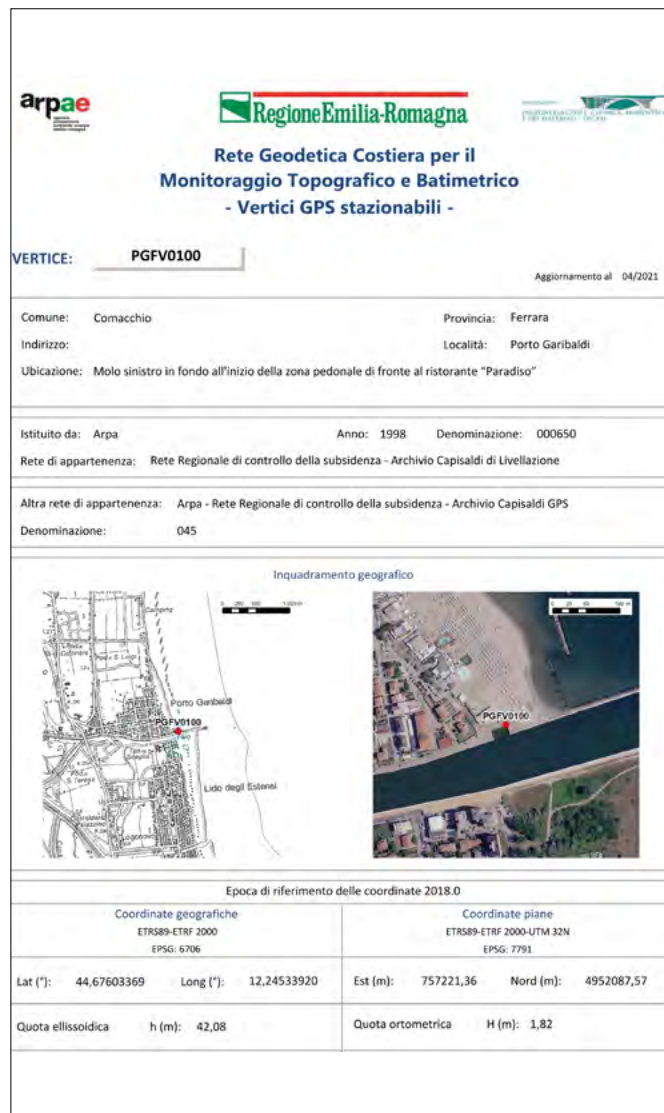
La RGC al suo impianto era costituita da 40 vertici (2018), in seguito alla necessità di raffittire alcune zone dove i vertici erano particolarmente distanti e alla richiesta degli operatori di disporre più vertici per agevolare le operazioni di inquadramento geodetico, la rete è stata implementata portando a 51 i vertici disponibili nel 2021 (Figura 2a). L'implementazione è stata l'occasione anche per l'aggiornamento delle monografie, in particolare si è deciso di riportare le coordinate a un'unica epoca (2018.0) prossima ai rilievi GNSS di impianto. Le quote ortometriche, riferite a maggio 2011, sono state aggiornate all'epoca 2018.0 utilizzando la velocità di subsidenza del modello Arpae 2011-2016 (Arpae, 2018), resosi nel frattempo disponibile.

Le monografie dei vertici della RGC (Figura 2b) sono consultabili e scaricabili dal [Portale Cartografico di Arpae](#).

Attualmente è in corso, dopo l'ultima realizzata nel 2005, una nuova campagna di livellazione geometrica di alta precisione che fornirà la quota ortometrica aggiornata al 2023 di ogni vertice, da Gabicce al faro di Goro (Comacchio). La rete verrà collegata sia ai capisaldi IGM che al caposaldo di riferimento del mareografo di Porto Garibaldi (Comacchio). Questo porterà a un secondo aggiornamento delle monografie, dove sarà disponibile sia la quota geoidica riferita al livello medio mare misurato dal mareografo di Genova 1942 (riferimento Nazionale), sia la quota rispetto al livello medio mare misurato dalla stazione mareografica integrata con GNSS permanente di Porto Garibaldi (riferimento Locale).

3.2. Rete di monitoraggio topo-batimetrico e linea di riva

Il monitoraggio dell'evoluzione morfologica della spiaggia è fondamentale per la conoscenza del fenomeno erosivo. Attraverso il confronto tra i profili rilevati nella



a) Rete Geodetica Costiera della Regione Emilia-Romagna. b) Esempio di monografia di vertice della RGC. (Arpae, 2020).

stessa posizione nel tempo (Figura 3a) e relativi modelli tridimensionali ottenuti dall’interpolazione spaziale dei dati puntuali (Figura 3b) è possibile evidenziare le modifiche morfologiche, quantificare gli spessori e i volumi di sabbia erosi/accumulati (Figura 3c) e valutare quindi i tassi di erosione costiera.

La rete regionale topo-batimetrica fu istituita nel 1984 da Idroser, costituita da 150 sezioni perpendicolari alla costa, a partire dalla zona più alta della spiaggia fino oltre la profondità chiusura.

Nelle successive campagne (1993, 2000, 2006, 2012, 2018) la rete è stata progressivamente integrata e migliorata. Nell’ultima campagna topo-batimetrica (6^a campagna topo-batimetrica del 2018) sono stati rilevati oltre 1000 km di sezioni, suddivise in:

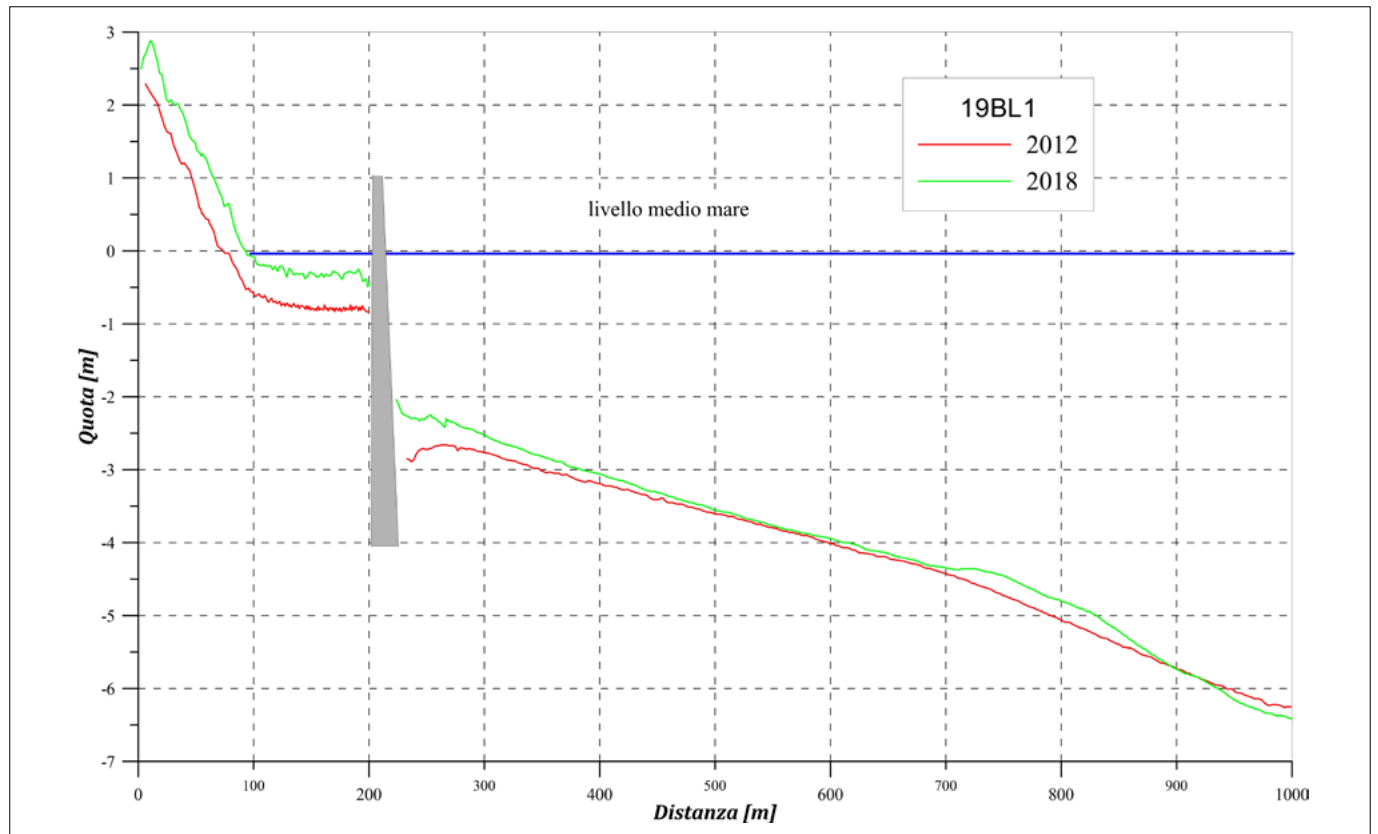
- 251 sezioni principali perpendicolari a costa, dal piede dunale o dalla base della prima struttura fino in mare oltre la profondità di chiusura, a seconda dei casi variabile tra i -6 e i -10 m s.l.m.;
- 163 sezioni secondarie perpendicolari alla costa, che si spingono in mare fino alla batimetrica dei 4-5 m, per una migliore identificazione e rappresentazione della barre sommerse, laddove presenti;

- una serie di sezioni longitudinali individuate nelle zone di maggior interesse della spiaggia con diverse configurazioni a seconda del tratto: spiaggia alta, linea di riva (quota 0 m s.l.m.), intermedio scogliera, interno scogliera, esterno scogliera, esterno pennelli, scogliera radente lato mare, barre.

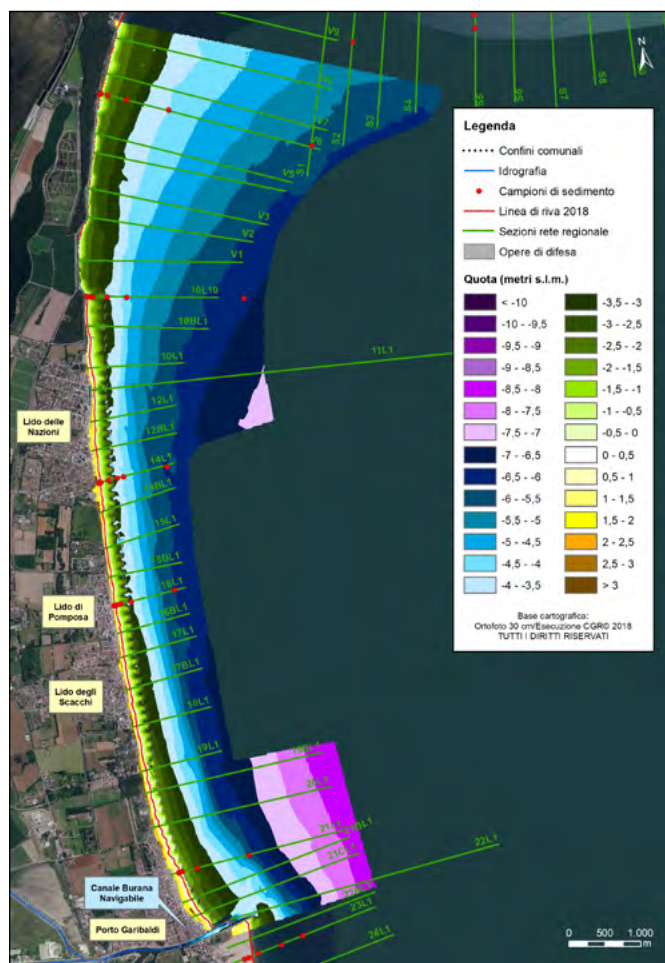
La Regione Emilia-Romagna ha già finanziato la 7^a campagna topo-batimetrica regionale, che verrà realizzata dalla Direzione Tecnica di Arpae nel 2024.

È importante puntualizzare che lo schema di rilievo utilizzato nelle campagne topo-batimetriche regionali (dettaglio per la zona Porto Garibaldi – Volano in Figura 3b) viene utilizzato come base di partenza per tutti i Piani di monitoraggio effettuati da Arpae con sezioni di raffittimento specifiche in base al caso di studio.

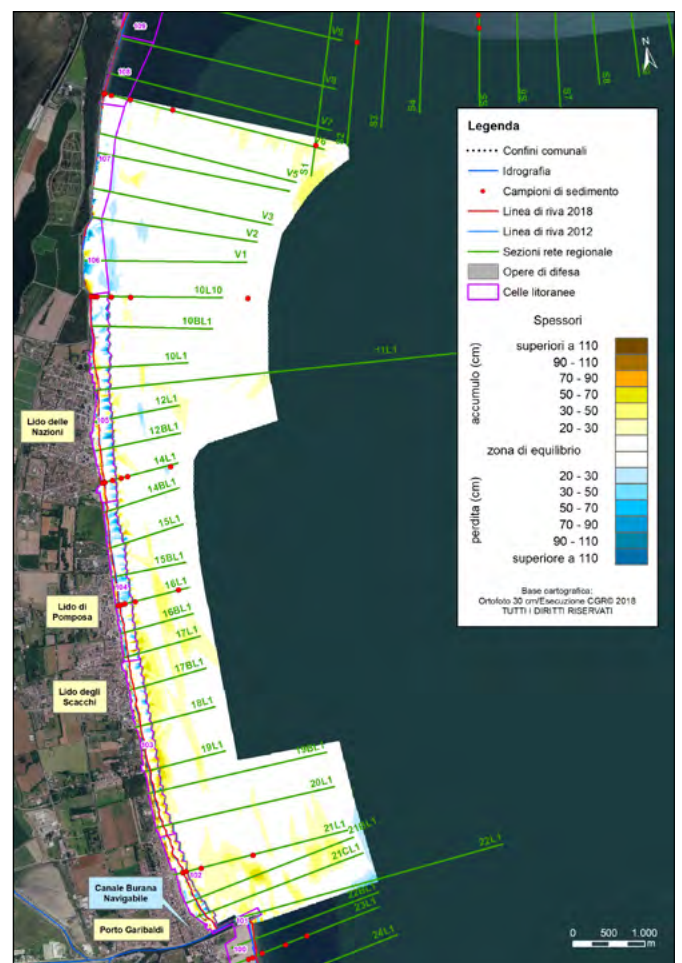
Per quanto riguarda la metodologia risulta di fondamentale importanza l’inquadramento geodetico che viene effettuato a partire sempre dalla stessa infrastruttura: la Rete geodetica costiera (RGC). Grazie alla coerenza dei riferimenti plano-altimetrici viene garantita la confrontabilità dei rilievi all’interno di un range di errore centimetrico.



a)



b)



c)

FIGURA 3. a) Confronto tra i profili 2012 e 2018 relativi alla Sezione 19BL1 Lido degli Scacchi (C103). b) Porto Garibaldi – Volano: carta topo-batimetrica e punti di campionamento dei sedimenti (2018). c) Porto Garibaldi – Volano: carta degli accumuli e delle perdite di sedimento 2012-2018 e punti di campionamento 2012 (Arpa, 2020).

Il rilievo topografico viene effettuato con ricevitori satellitari GNSS, in modalità RTK con stazione di riferimento (master) e stazione ricevente (rover) per la ricezione della correzione differenziale (trasmissione GSM o radio). Le sezioni vengono battute mediamente con un punto ogni 2-4 m e a ogni cambio di pendenza significativo.

Il rilievo batimetrico viene realizzato tramite ecoscandaglio multibeam (MBES) installato su idonea imbarcazione equipaggiata con tutta la strumentazione necessaria per la correzione del dato acquisito.

Nelle sole zone a basso fondale viene utilizzato un sistema singlebeam (SBES) che può essere installato su imbarcazioni con ridotto pescaggio. Entrambi i sistemi devono necessariamente essere calibrati giornalmente tramite procedura di Bar-check e in continuo con sonda di misura della velocità del suono in acqua.

Le tre tipologie di rilievo (asta GNSS, SBES e MBES) devono avere delle zone di sovrapposizione ad ulteriore conferma dell'affidabilità del dato.

3.2.2. Linea di riva

La linea di riva è "l'elemento più immediato per una prima valutazione dello stato e dell'evoluzione di una spiaggia bassa e sabbiosa" (Arpae, 2016) tuttavia le analisi dello stato dei litorali basate esclusivamente su questo parametro comportano una serie di problematiche, legate sia alla metodologia che alla sua significatività.

In passato il rilievo della linea di riva veniva effettuato principalmente mediante fotointerpretazione delle ortofoto georeferenziate attraverso l'individuazione di indicatori indiretti come il limite bagnato/asciutto, un elemento quindi molto variabile a seconda della risoluzione delle ortofoto e del momento di ripresa delle stesse. Nell'ambito della 4^a campagna di monitoraggio del 2006 la linea di riva è stata ottenuta sia da fotointerpretazione che tramite rilievo GNSS, metodologia quest'ultima attraverso la quale è possibile individuare e tracciare lo zero ortometrico (0 m s.l.m.) e che è stata adottata ufficialmente anche nelle successive campagne (2012 e 2018).

Inoltre, a causa degli interventi antropici di gestione e manutenzione del litorale sempre più diffusi e consistenti questo parametro, da solo, non è più sufficiente per l'analisi dell'evoluzione della spiaggia (Arpa, 2008). Per tale ragione nelle ultime tre campagne di monitoraggio le valutazioni sullo stato delle spiagge e loro evoluzione sono state effettuate sulla base di due indicatori, ASE e ASPE (descritti nel dettaglio successivamente), che pur tenendo in considerazione le variazioni della linea di riva considerano come parametro maggiormente significativo le variazioni di volume.

3.3 Rete di monitoraggio sedimentologico

Nel monitoraggio dell'erosione costiera, il dato sedimentologico è indicativo dell'ambiente deposizionale, quindi delle condizioni idrodinamiche che si determinano localmente e dell'energia in gioco. La distribuzione granulometrica dipende dalla natura del sedimento (caratteristiche petrografiche dei bacini di provenienza), dalla distanza

dalle zone di alimentazione (foci fluviali), dalla morfologia dei fondali, dall'azione del moto ondoso e dalle correnti lungo costa, nonché dagli interventi antropici, quali costruzione di opere e ripascimenti artificiali.

Sono tre le campagne sedimentologiche regionali condotte in concomitanza con i rilievi della rete di monitoraggio topo-batimetrico e quindi nell'ambito dei rilievi delle reti di monitoraggio costiero gestite da Arpae:

- la prima, condotta nel 1993 da Idroser (poi confluita in Arpae), nell'ambito del Piano Costa 1996 (156 campioni) (Regione Emilia-Romagna, 1996).
- la seconda, nel giugno-luglio 2012, ad integrazione della quinta campagna topo-batimetrica della costa regionale. Il monitoraggio è consistito nel prelievo di 300 campioni di sedimento, di cui 130 raccolti alle stesse coordinate del 1993 e 170 su nuovi punti di campionamento (principalmente individuati su spiaggia emersa o su sezioni della rete topo-batimetrica su litorali con tendenza erosiva non ancora indagati) (Arpae, 2016).
- la terza, nell'agosto-ottobre del 2018, nell'ambito della seconda campagna di monitoraggio del "Progettone 3" (Messa in sicurezza di tratti critici del litorale regionale mediante ripascimento con sabbie sottomarine). Sono stati raccolti 370 campioni, di cui 300 prelevati sulle stesse coordinate della campagna del 2012 e i restanti 70 necessari per le indagini localizzate sulle spiagge oggetto di ripascimento (Arpae, 2020).

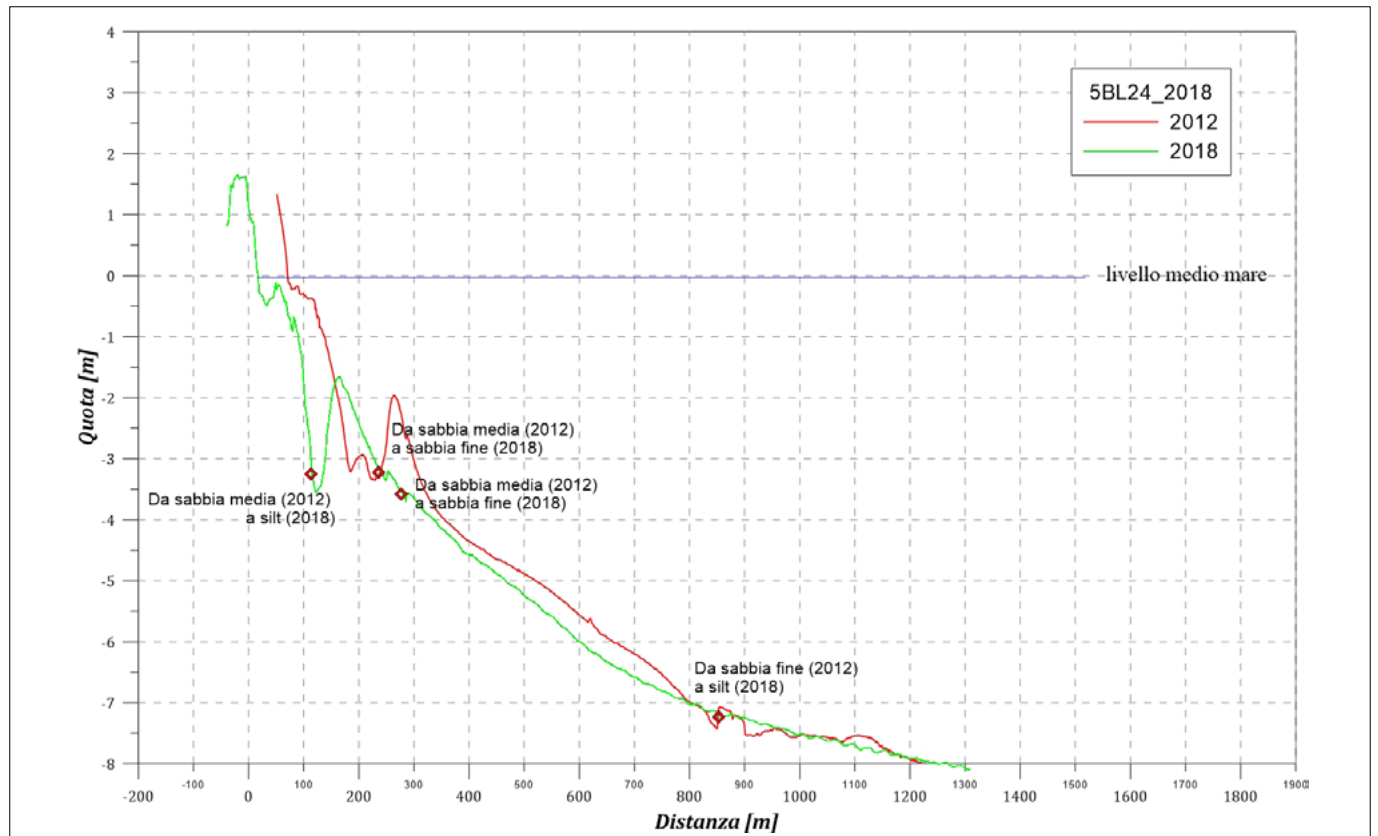
A queste tre si aggiunge, quale riferimento di base, la campagna regionale condotta dall'Università di Ferrara tra il 1971 e il 1972 (330 campioni da Volano a Cattolica) (Bondesan *et al.*, 1978; Dal Cin *et al.*, 1979).

Nel 2024 sarà effettuata la 4^a campagna sedimentologica regionale che consisterà di 474 campionamenti, dei quali 306 prelevati sugli stessi punti delle precedenti campagne e 168 di nuovo disegno. La maggior parte di questi nuovi punti sono stati inseriti poiché necessari nell'ambito del monitoraggio triennale che riguarderà le spiagge oggetto di ripascimento nel 2022 "Progettone 4" mentre 36 punti sono stati individuati in corrispondenza delle principali foci fluviali (Conca, Marecchia, Uso, Rubicone, Savio, Bevano, Fiumi Uniti, Lamone, Reno, Po di Goro) per un maggior approfondimento.

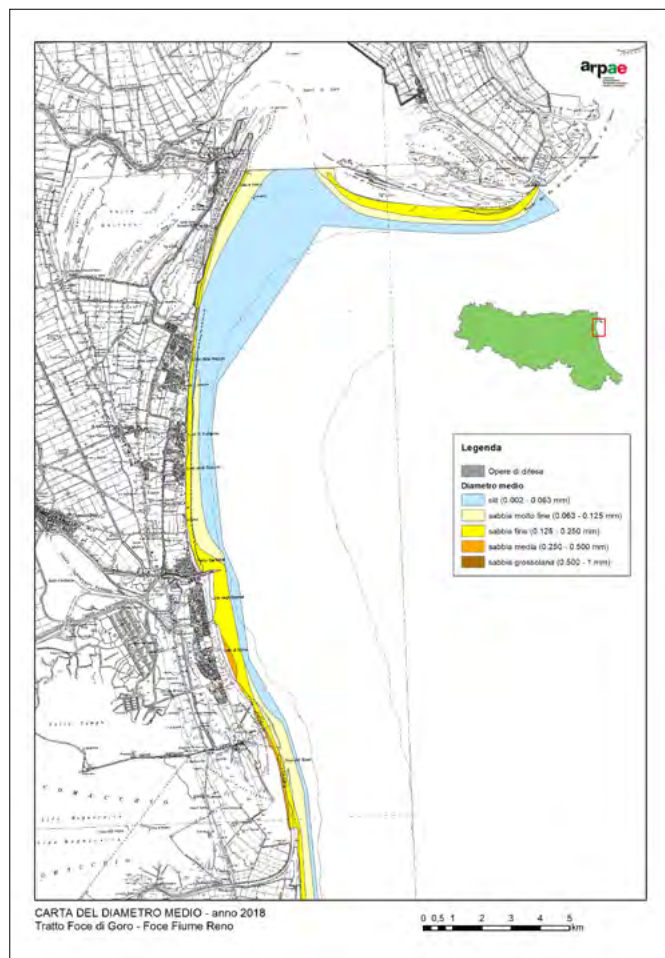
Anche in questo caso, è importante puntualizzare che il disegno di campionamento utilizzato nelle campagne sedimentologiche regionali viene utilizzato come base di partenza per tutti i Piani di monitoraggio effettuati da Arpae con integrazioni specifiche di punti di campionamento in base al caso di studio.

Per quanto riguarda le metodologie e la strumentazione si procede alla raccolta tramite sessola o benna Van Veen su spiaggia emersa e sommersa rispettivamente, registrando la posizione di campionamento reale tramite asta GNSS o SBES.

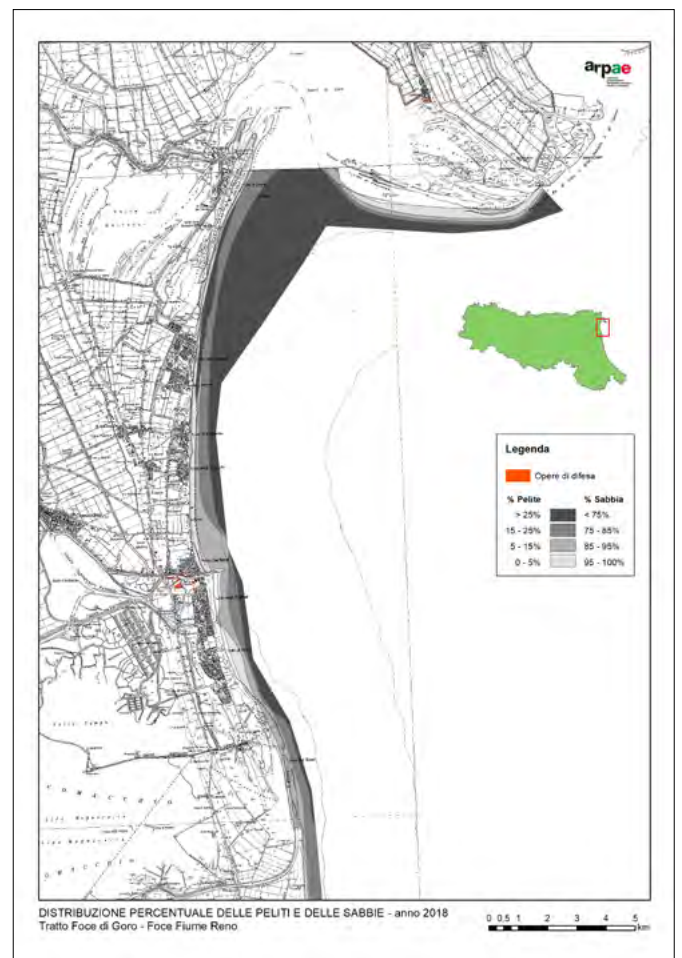
I campioni vengono affidati a laboratori specializzati, come il Laboratorio Multisito Arpae, per le analisi granulometriche, i cui risultati sono poi analizzati per il calcolo dei principali parametri sedimentologici (tessitura, distri-



a)



b)



c)

FIGURA 4. a) Confronto del Diametro medio tra il 2012 e il 2018, in relazione alle modifiche morfologiche. b) Carta del diametro medio anno 2018. Tratto Foce di Goro - Foce Fiume Reno. c) Distribuzione percentuale delle peliti e delle sabbie anno 2018. Tratto Foce Goro - Foce Fiume Reno (Arpae, 2020).

buzione granulometrica, diametro medio, coefficiente di cernita, frazione pelitica), relativi confronti temporali (Figura 4a) e restituzione cartografica (Figura 4b-c).

3.4 Rete di monitoraggio della subsidenza costiera

Il fenomeno dell'abbassamento del suolo, o subsidenza, si manifesta in termini significativi, nella parte nord della fascia costiera regionale, a partire dagli anni '30 - '40 del secolo scorso. Negli anni '50 la subsidenza investe anche il territorio della provincia di Ravenna. Negli anni '60 si verifica un ulteriore spostamento verso sud del fenomeno fino ad interessare tutta l'area costiera riminese.

Lo studio del fenomeno evidenzia come l'abbassamento del suolo non si limita alle sole terre emerse, ma interessa anche la spiaggia sommersa.

L'entità degli abbassamenti risulta in quel caso di difficile definizione in quanto fino al 1980, la subsidenza del territorio costiero era stata misurata con livellazioni eseguite da diversi Enti, con metodologie e caposaldi di riferimento diversi tra loro come l'IGM e il Catasto.

Al fine di verificare gli sviluppi della subsidenza, nel 1983 venne istituita, per conto della Regione Emilia-Romagna, una rete di caposaldi che garantiva una copertura uniforme del territorio costiero e ne fu eseguita la prima misura nel 1984. La rete si sviluppava da Cattolica (RN) a Gorino (FE) e il caposaldo di riferimento era posto a Pennabilli, nell'Appennino Riminese.

Nel 1987 si svolse la 2^a campagna di livellazione, sullo stesso percorso della precedente e al termine dei calcoli di compensazione si determinarono, nell'area costiera, valori di subsidenza decisamente elevati, compresi tra i 20 e i 50 mm/y.

Nel 1993 è stata istituita e misurata una nuova rete di misura della subsidenza lungo la costa regionale. La rete aveva una lunghezza complessiva di circa 450 km e contava oltre 560 capisaldi distribuiti su 16 poligoni. Anche in questo caso il riferimento è stato il caposaldo di Pennabilli. La disponibilità di 3 campagne di livellazione (1984, 1987 e 1993) ha consentito di meglio definire il trend evolutivo della subsidenza lungo la fascia costiera.

L'intensificarsi del fenomeno della subsidenza per cause antropiche, come riportato nel precedente paragrafo, ha indotto nel 1997-1998 la regione Emilia-Romagna a dotarsi di una rete regionale di monitoraggio della subsidenza, progettata da Arpa in collaborazione con il Dicam (Dipartimento di ingegneria civile, ambientale e dei materiali) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna.

La rete regionale di controllo della subsidenza era costituita inizialmente da oltre 2300 capisaldi di livellazione geometrica di alta precisione e da circa 60 punti GPS periodicamente rilevati.

Successivamente, nella campagna dal 2005-2007, l'analisi della subsidenza tramite livellazione è stata integrata dall'analisi interferometrica di dati radar satellitari con tecnica PSInSARTM.

Un'ulteriore evoluzione della rete si è avuta con il "Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola" 2011-2012, per i quali si è fatto ricorso alla sola analisi interferometrica (tecnica SqueeSARTM) supportata per la

calibrazione da 17 stazioni GNSS permanenti, con l'abbandono della livellazione.

Nel 2016 si è proceduto ad aggiornare le conoscenze geometriche sul fenomeno della subsidenza nel periodo 2011-2016, migliorando la tecnica interferometrica adottata in precedenza.

Il passaggio dalla livellazione di precisione alle tecniche interferometriche da dati satellitari ha permesso di acquisire un'informazione molto più diffusa e capillare sull'intero territorio regionale (circa 2 milioni di punti), ottenendo così un grigliato (100 m x 100 m) delle velocità di movimento verticale sull'intero territorio di pianura della regione e la relativa Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo di riferimento. Le Carte sono rappresentate tramite isocinetiche con passo di 2,5 mm/anno in linea con la precisione della metodologia di ± 2 mm/anno (Figura 5).

L'ultima analisi effettuata per il periodo 2011-2016 ha evidenziato che gran parte del territorio (79%) non presenta variazioni di tendenza, mentre il 18% della superficie evidenzia una riduzione della subsidenza. Nello specifico sulla zona costiera sono stati rilevati tassi di subsidenza in linea con i tassi naturali (2-3 mm/anno), tranne che per la zona di Lido di Dante (17 mm/anno) e Lido Adriano (11 mm/anno), dove si riscontrano tassi maggiori (Arpae, 2018).

Sono in corso analisi interferometriche satellitari per la valutazione del tasso di subsidenza del periodo 2016-2021.

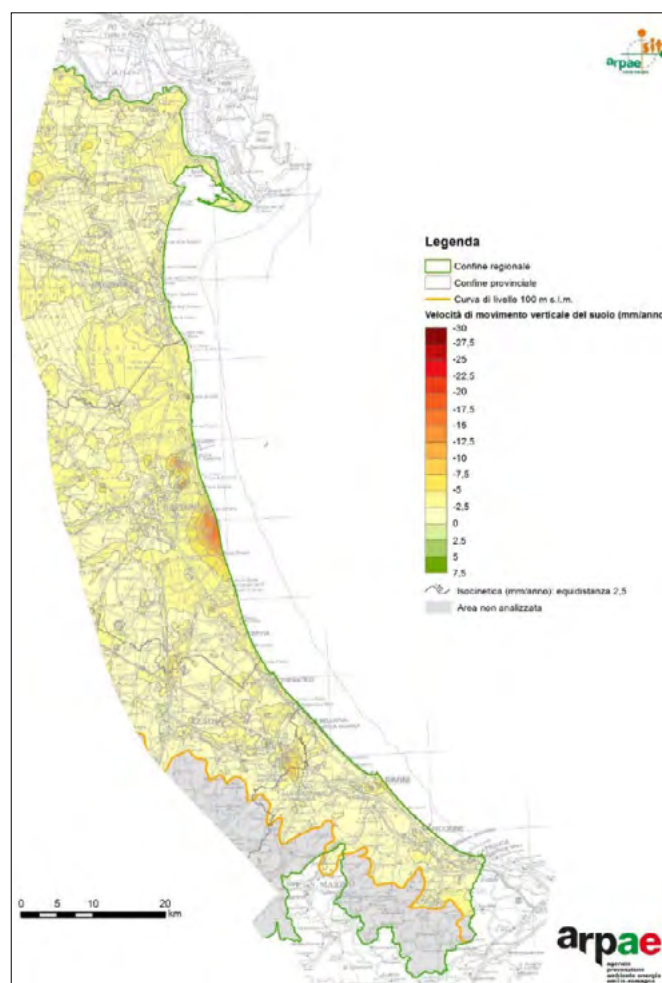


FIGURA 5. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Litorale. (Arpae, 2018).

3.5 Rete di monitoraggio dello stato del mare

3.5.1. Moto ondoso

Lo studio della dinamica marina è finalizzato a fornire elementi per stimare quali effetti il moto ondoso e le correnti, ad esso associate, abbiano sui fondali in termini di possibili movimentazione dei sedimenti e quali interazioni si possono avere con le strutture artificiali presenti e con nuovi assetti morfologici delle spiagge determinati da interventi di ripascimento.

Per individuare la dinamica litoranea e le modificazioni della morfologia della spiaggia emersa e sommersa, occorre partire da dati ondametrici rappresentativi delle condizioni meteo-marine del tratto di mare antistante i litorali in studio, per arrivare alla definizione delle condizioni del moto ondoso incidente, relative sia al regime medio annuo sia agli eventi estremi che possono interessare la costa.

La disponibilità di dati ondametrici in corrispondenza delle coste della Regione Emilia-Romagna è risultata, in passato, piuttosto varia, sia come tipologia delle stazioni di misura, sia come estensione temporale delle serie storiche.

L'occasione di installare una boa ondametrica davanti al litorale regionale è stata colta grazie al progetto europeo Beachmed-e (2006), che ha messo a disposizione una parte dei finanziamenti necessari all'operazione. Una significativa quota di finanziamento fu fornita autonomamente da Arpa (ora Arpae), partner del progetto europeo. L'installazione della boa, denominata Nausicaa, è avvenuta il 23 maggio 2007, in corrispondenza di un fondale di circa 10 m (Figura 6).

Grazie alla gestione operata da Arpae, la boa Nausicaa ha continuato a funzionare, pur con le inevitabili interruzioni causate da malfunzionamenti e dalla attività di manutenzione, fino all'estate del 2021 durante la quale le interruzioni sono aumentate, fino al mese di settembre dello stesso anno, quando la boa ha interrotto definitivamente la trasmissione dei dati.

Arpae ha così avviato le procedure per sostituire la boa Nausicaa con una nuova, usufruendo delle risorse finanziarie messe a disposizione dal progetto europeo strategico AdriaClim del Programma di cooperazione transfrontaliera Italia-Croazia.

La nuova boa ondametrica di Arpae Emilia-Romagna, denominata Nausicaa2, è stata installata al largo di Cesenatico il 13 ottobre 2022, nei pressi dell'area in cui operava la precedente boa ondametrica e i primi dati sono stati archiviati a partire dal successivo mese di dicembre.

La boa Nausicaa2 è il modello DWR-4 ACM della ditta olandese Datawell, ha un diametro di 0,7 m ed è equipaggiata con doppia alimentazione (batterie e pannelli solari), doppio sistema di trasmissione dati (radio e GPRS) e antenna per la misura della temperatura dell'aria a 2 metri.

Come la precedente boa ondametrica Nausicaa, la nuova strumentazione misura in tempo reale le caratteristiche del moto ondoso (altezza, periodo, direzione), della corrente superficiale, della temperatura dell'acqua e dell'aria. I dati, acquisiti ogni 30 minuti, sono trasmessi al sistema ricevente a terra situato presso la Struttura oceanografica Daphne di Arpae, a Cesenatico; da qui vengono inviati e archiviati nel Database della Struttura IdroMeteoClima e scaricabili tramite il [servizio web Dexter](#) di Arpae-SIMC.

La serie storica di dati ondametrici, disponibile a partire dall'installazione della prima boa Nausicaa nel 2007 e considerando la pausa tecnica necessaria per varare la seconda boa Nausicaa2, presenta una notevole copertura, attestandosi su oltre l'85% dei dati teoricamente rilevabili.

3.5.2. Marea

Gli innalzamenti del livello marino di una certa consistenza, in concomitanza con eventi di mareggiata, possono determinare l'intensificazione degli effetti erosivi sulla spiaggia da parte delle onde incidenti oltre, ovviamente, alla possibilità di determinare l'allagamento di aree di retro spiaggia.

Lungo il litorale regionale sono presenti tre stazioni mareografiche caratterizzate da periodi significativi di funzionamento, ovvero la stazione mareografica di Porto Corsini (RA), appartenente alla Rete Mareografica Nazionale, il mareografo del porto di Rimini, installato dalla Società Hera e la stazione mareografica integrata di Porto Garibaldi (FE), gestita da Arpae.

Per l'analisi degli effetti dell'innalzamento del livello del mare durante le mareggiate davanti al litorale regionale, si fa riferimento ai dati forniti dal mareografo di Porto Garibaldi.

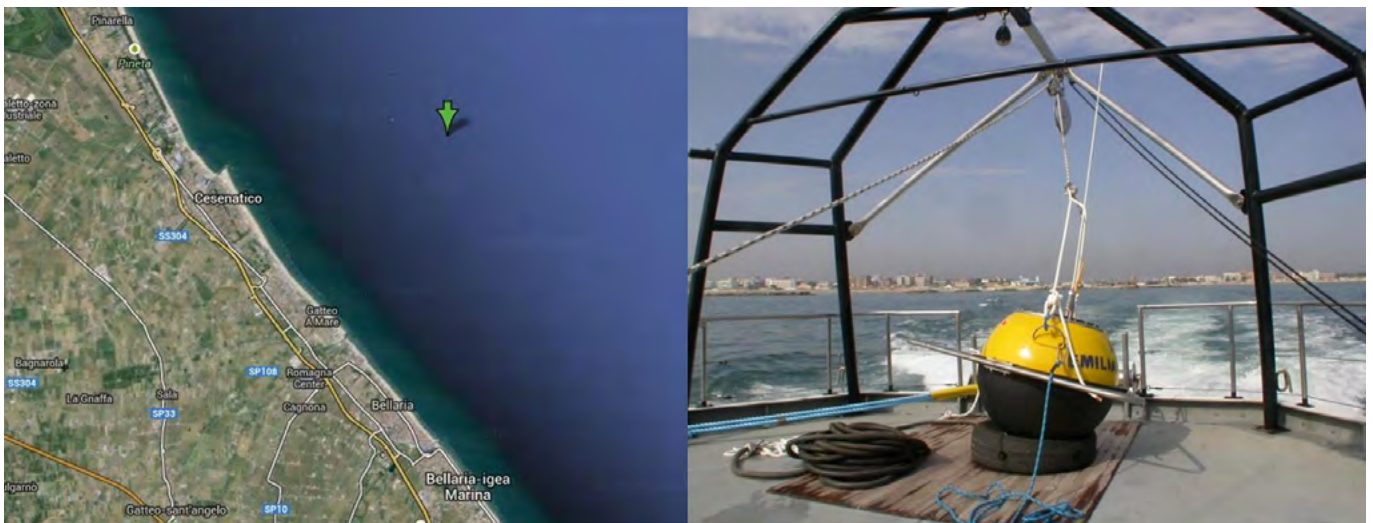


FIGURA 6. Localizzazione e trasporto della boa della prima boa Nausicaa al largo di Cesenatico nel 2007.

La stazione, installata nel mese di giugno del 2009 dall'Università di Ferrara per conto della Provincia di Ferrara, è passata in gestione ad Arpa a seguito del trasferimento di parte delle funzioni della Provincia. Il mareografo è collocato in prossimità della testa del molo nord del porto, all'interno di un'apposita cabina, poggiata su una piattaforma sostenuta da pali. Questa disposizione garantisce una profondità dell'acqua sottostante di almeno 3,5 m (Figura 7).



FIGURA 7. La stazione mareografica di Porto Garibaldi collocata in prossimità della testa del molo Nord del porto canale.

La stazione è dotata di due mareografi distinti per avere una misura precisa del livello del mare e di una stazione GNSS permanente, che misura costantemente la quota della piattaforma, per poter discriminare il fenomeno della subsidenza. La dotazione strumentale della stazione è composta da: mareografo radar, mareografo a galleggiante, stazione permanente GNSS, stazione metereologica (anemometro, pluviometro, termometro, barometro), sonda multiparametrica per il monitoraggio dell'acqua. I dati sono registrati ogni 10 minuti e sono disponibili alla consultazione tramite il servizio web Dexter di Arpa-SIMC.

Nell'arco di circa 14 anni di funzionamento, il rendimento raggiunto dalla stazione mareografica è risultato molto alto: i dati di livello del mare disponibili risultano oltre il 95% di quelli teoricamente ottenibili con una cadenza di 10 minuti.

4. INDICATORI DI STATO DELL'EROSIONE ASE E ASPE

La complessità di fattori che agiscono sull'evoluzione della costa emiliano-romagnola ha determinato nel tempo la necessità di definire degli indicatori attraverso i quali ottenere una informazione sintetica per descrivere lo stato di fatto di un tratto costiero e la sua evoluzione nel tempo. Le variazioni della linea di riva, le variazioni di volume della spiaggia emersa e sommersa, la subsidenza, i ripascimenti, i prelievi e le opere rigide vanno a determinare un quadro in cui l'analisi integrata diventa indispensabile per il corretto studio di un tratto costiero, dove una perdita di volume o un avanzamento della linea di costa possono essere causati sia da processi naturali che da interventi antropici.

A tale scopo, potendo disporre di una quantità significativa di dati derivanti dalle campagne topo-batimetriche regionali (dal 2000 rilevate ogni 6 anni) sono stati messi a

punto e introdotti nel monitoraggio della costa emiliano-romagnola due indicatori, ASE e ASPE (Aguzzi *et al.*, 2012).

Entrambi gli indicatori fanno riferimento ad unità territoriali dette "macrocelle", segmenti di costa di lunghezza variabile tra i 15 e i 30 km, caratterizzati da bilancio sedimentario indipendente. Le macrocelle sono formate da una serie di unità elementari di gestione dette "celle", tratti costieri di lunghezza variabile da poche decine di metri ad alcuni chilometri caratterizzate da evoluzione della spiaggia emersa e sommersa uniforme e strettamente dipendente dagli interventi di difesa effettuati nel tempo. Le celle e le macrocelle sono state introdotte come unità di riferimento, alle diverse scale, dallo studio Arpa, 2008 e in seguito rielaborate nell'ambito del progetto europeo Coastance ed utilizzate nel 'SICELL - Il sistema gestionale delle celle litoranee' (Regione Emilia-Romagna, 2011). Attualmente il litorale regionale è suddiviso in 7 macrocelle e 118 celle unitarie.

Sempre a partire dagli studi effettuati in Arpa, 2008 sono state definite delle soglie di variazione significativa, sui 6 anni intercorsi tra i due rilievi della rete, comuni ai due indicatori:

- 30 m³/m di variazione di volume di sedimento eroso e/o depositato
- 10 m di avanzamento/arretramento della linea di riva, su un tratto di 100 metri.

In sintesi, tramite gli indicatori ASE e ASPE, calcolati per ognuna delle celle litoranee del sistema SICELL, è possibile valutare lo stato del litorale dell'Emilia-Romagna, e di individuare i tratti in stato critico per i quali prevedere ulteriori interventi di gestione e difesa.

Inoltre, ASE e ASPE sono entrati a fare parte dell'insieme degli indicatori, sviluppati secondo il modello DPSIR, del tema ambientale **Rischi costieri** del report "Dati ambientali dell'Emilia-Romagna".

4.1. ASE (Accumulo, Stabile, Erosione)

Il primo indicatore, ASE, "fornisce indicazioni sullo stato del litorale così come si presenta dopo essere stato oggetto di interventi di protezione" (Aguzzi *et al.*, 2012). Non tiene quindi in considerazione le cause delle variazioni registrate anche se, essendo basato su variazioni di volume oltre che sulla variazione della linea di riva, risulta più consistente come indicatore rispetto ad esempio alla sola linea di riva, dove questa perde di rappresentatività soprattutto nei litorali soggetto a continui interventi antropici.

L'ASE descrive la costa in base a tre classi: accumulo, stabile o erosione (Figura 8).

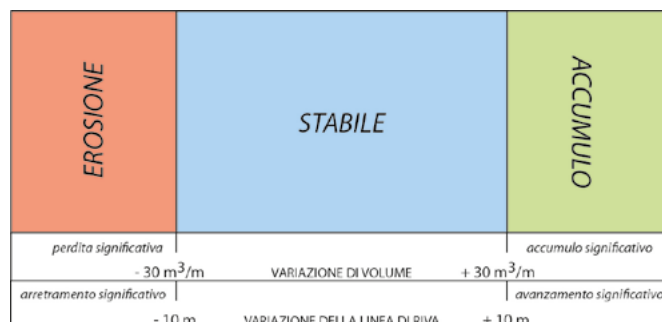


FIGURA 8. Schema dell'indicatore ASE (Aguzzi *et al.*, 2012).

L'analisi è effettuata al lordo dei volumi di ripascimento apportati sul singolo tratto e non considera la presenza di opere di difesa, in tal modo l'indicatore evidenzia gli effetti prodotti dagli interventi effettuati e quindi è possibile valutarne l'efficacia.

4.2. ASPE (Accumulo, Stabile, equilibrio Precario, Erosione)

L'ASPE, "ha lo scopo di fornire il quadro del reale stato di criticità della costa e descrive il litorale così come si presenterebbe se non venissero effettuati gli interventi di difesa" (Aguzzi *et al.*, 2012) e per tanto descrive lo stato reale di criticità del tratto in questione. L'analisi viene effettuata prendendo in considerazione lo stato delle opere di difesa presenti ed escludendo eventuali apporti/prelievi di sedimento.

L'ASPE descrive la costa in base a quattro classi: accumulo, stabilità, equilibrio precario o erosione (Figura 9).

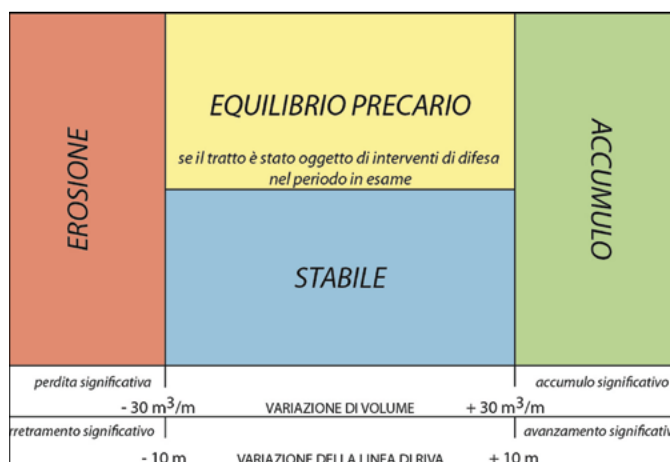


FIGURA 9. Schema dell'indicatore ASPE (Aguzzi *et al.*, 2012).

Erosione ed accumulo sono individuati, come nell'ASE, in base al superamento delle soglie individuate. Per i tratti che non mostrano erosione o accumulo significativi, l'indicatore distingue tra spiagge realmente stabili (non sono stati effettuati interventi di difesa nel periodo di tempo considerato) e tratti in equilibrio precario (sono stati effettuati interventi nel periodo di riferimento in assenza dei quali il tratto sarebbe in erosione).

5. SICELL - IL SISTEMA GESTIONALE DELLE CELLE LITORANEE

Il Sistema gestionale delle celle litoranee (SICELL), Figura 10, è stato sviluppato nel 2010 nell'ambito del progetto europeo COASTANCE (Programma Interreg-MED) come strumento informativo di supporto alla gestione e difesa della costa, grazie alla riorganizzazione di banche dati e informazioni in massima parte già esistenti e costantemente aggiornati nel sistema informativo regionale.

Nel quadro delle numerose criticità che insistono sulle coste basse e sabbiose, per gestire i tratti costieri più esposti e in generale per il mantenimento in equilibrio del sistema costiero regionale, è necessaria una gestione ottimale dei sedimenti litoranei, una diversificazione delle fonti (scavi edili, dragaggi portuali e fluviali, accumuli litoranei, tutto quanto possa concorrere a gestire i tratti in erosione) e un efficientamento delle pratiche di dragaggio e ripascimento in funzione delle distanze fra le zone di prelievo e quelle di destinazione. Il SICELL e la suddivisione del territorio in celle litoranee sono funzionali a queste necessità di ottimizzazione.

Il SICELL è funzionale anche ad un approccio complessivo ed integrato messo a punto dalla Regione che considera i sedimenti come risorsa strategica e che si basa su due pilastri: 1) l'alimentazione del sistema costiero, 2) la riduzione delle perdite dal sistema. Al primo fanno capo le politiche per favorire il ripristino del trasporto solido fluviale, l'utilizzo delle fonti esterne di sedimenti (depositi sottomarini, materiali provenienti da scavi edili, da ampliamento di bacini portuali), e delle fonti interne (accumuli presso moli e bocche portuali, foci e barre di foce fluviali, opere di difesa rigide, ecc.) ai fini della manutenzione dei tratti litoranei più critici. Al secondo pilastro fanno capo sia la corretta gestione dei sedimenti di spiaggia (corretta esecuzione degli argini invernali di protezione, utilizzo di trappole eoliche, corretta pulizia delle spiagge con vagliatura in sito), sia le politiche per la riduzione della subsidenza (riduzione dei prelievi di acque sotterranee e di idrocarburi, misure di mitigazione come la re-immissione di fluidi nel sottosuolo o altre misure compensative).

Nel tempo si sono aggiunte le informazioni sulla sedimentologia, l'individuazione dei "tratti litoranei significativi".

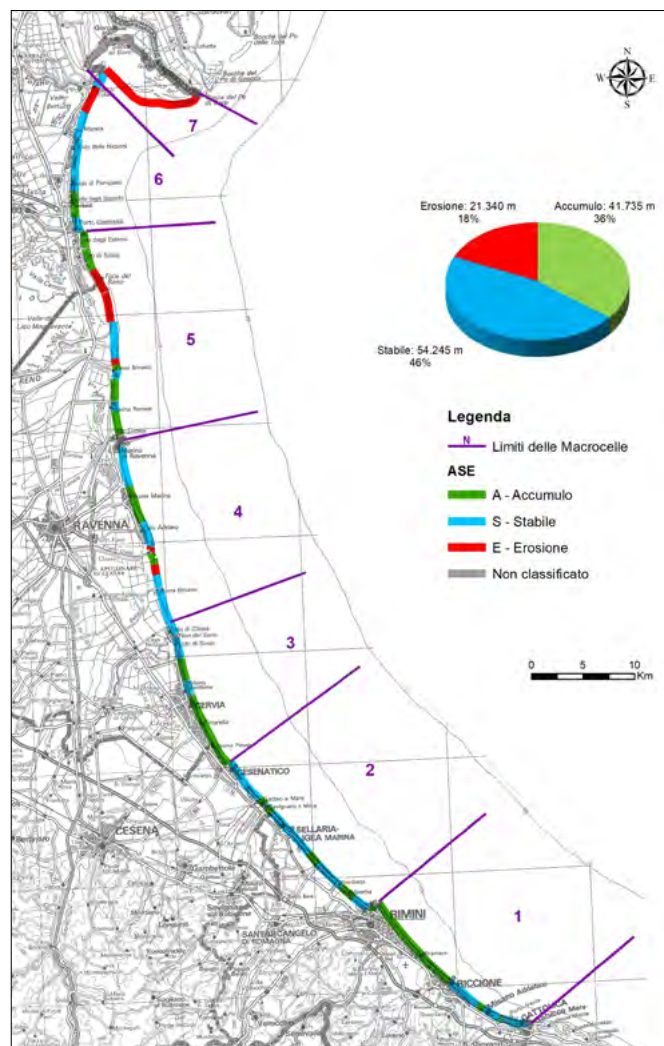


FIGURA 10. Limiti delle sette macrocelle del sistema SICELL (Arpa, 2020).

tivi ai fini gestionali” e la suddivisione delle celle corrispondenti a imboccature portuali e foci dei corsi d’acqua in due sotto unità, una di pertinenza marina una di pertinenza interna. Tali nuovi elementi sono stati introdotti ai fini di un’ipotesi di specifica regolamentazione delle autorizzazioni alla movimentazione dei sedimenti.

La corretta gestione degli accumuli litoranei, così come dei depositi off-shore o di altre fonti esterne al sistema litoraneo, è diventata negli anni un fattore determinante per ottimizzare le risorse e per difendere la costa dal fenomeno erosivo e dal rischio di ingressione marina in maniera sostenibile e integrata, tanto che è entrata a far parte, insieme ad altri fattori, come sistema di azioni e indirizzi operativi nella nuova Strategia regionale di Gestione Integrata per la Difesa e l’Adattamento della Costa ai cambiamenti climatici (GIDAC).

6. IL SISTEMA INFORMATIVO DEL MARE E DELLA COSTA (SIC)

Oltre ai monitoraggi sistematici dei fenomeni e delle dinamiche costiere a scala regionale precedentemente descritti, la gestione della costa si basa su un sistema complesso di conoscenze che includono attività quali:

- esecuzione di rilievi laserscanner e di altri monitoraggi sperimentali per gli approfondimenti sulle dinamiche costiere;
- indagini geognostiche e studi sulla geologia dell’interfaccia terra mare;
- elaborazione di cartografie tematiche e dei rischi;
- sviluppo e la gestione delle banche dati.

Gli strumenti fondamentali per la gestione dei dati, lo sviluppo dei quadri conoscitivi e l’analisi degli scenari di rischio e di adattamento, sono infatti le banche dati. Per

questo motivo a partire dal 2002 è stato implementato il Sistema Informativo del Mare e della Costa (SIC), diventato strumento istituzionale con le Linee Guida GIZC (D.G.R. 20 gennaio 2005, n.645) (Perini *et al.*, 2007).

Il riferimento iniziale è costituito dalle raccomandazioni ICZM 2002/413/CE e dal programma EUROSION. In seguito, lo strumento è stato aggiornato per rispondere alle nuove sfide, alle nuove strategie e direttive Europee, Nazionali e Regionali quali:

- Direttiva alluvioni (DIR EU 2007/60 - recepita nell’ordinamento nazionale con d.lgs. 49/2010) - e il relativo Piano di Gestione del rischio alluvioni che, tra le sue misure, ha previsto l’elaborazione della strategia GIDAC Regionale;
- Strategia per la mitigazione e l’adattamento della Regione Emilia-Romagna (SRCC);
- Direttiva europea per la Pianificazione dello Spazio Marittimo (DIR EU 49/2014- recepita a livello nazionale con d.lgs. 201/2016), nonché per supportare il Sistema Regionale di Allertamento rispetto ai fenomeni da mareggiata (DGR 1761/2020).

Attualmente il Sistema Informativo del mare e della costa si articola in sette banche-dati tematiche di seguito elencate in Figura 11, che riguardano lo stato fisico del litorale, i rischi costieri e le risorse della fascia marino-costiera. Altre banche dati sono in fase embrionale.

Oltre ai servizi webgis disponibili per alcune delle banche dati sopra elencate, raggiungibili dalla pagina [Cartografia interattiva e banche dati](#) dell’Area geologia, suoli e sismica, che permettono la consultazione dei dati cartografici online, molte informazioni sono scaricabili tramite servizi WMS e WFS, accessibili attraverso la piattaforma [MinERva](#), portale di condivisione delle banche dati e delle



FIGURA 11. Articolazione delle sette banche dati tematiche del SIC.

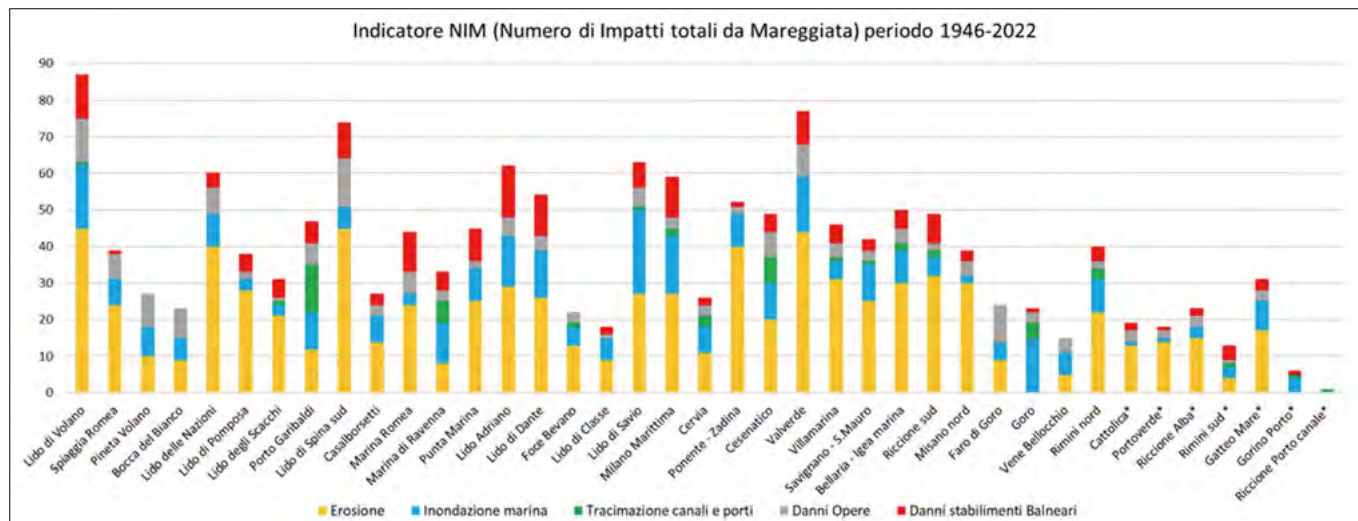


FIGURA 12. Distribuzione dell'indicatore NIM e tipologia di impatto per località - periodo 1946-2022.

informazioni detenute dalla Direzione Generale Cura del Territorio ed Ambiente della Regione Emilia-Romagna.

Al fine di supportare il processo di 'pianificazione dello spazio marittimo', in corso ai sensi della direttiva EU 89/2014, la Regione insieme agli altri partner del progetto EU Portodimare, ha inoltre sviluppato il **Geoportale Adriatico-Ionio (GAIR)**.

Un dettaglio sulle banche dati ed i relativi contenuti è consultabile nel Quadro conoscitivo della Strategia GIDAC.

Tra le banche dati sopra citate, *in_Storm* svolge un ruolo fondamentale nel monitoraggio delle dinamiche costiere e dei processi associati agli eventi meteo marini avversi. In essa sono archiviati ed elaborati tutti i dati relativi agli eventi che producono danni lungo le coste regionali.

Gli impatti vengono geolocalizzati e classificati sulla base delle 5 tipologie prevalenti: l'erosione dei litorali, che rappresenta il 53% degli impatti registrati dal 1946 al 2022, l'inondazione marina (il 20%), i danni agli stabilimenti balneari (12%), i danni alle opere di difesa costiera (11%) e la tracimazione di porti e canali (il 4%), Figura 12.

6.1 Rilievi morfologici tramite laser-scanner

L'avvento delle tecnologie di rilievo altimetrico *laser-scan*, disponibili dai primi anni 2000, ha consentito un notevole miglioramento della conoscenza e del monitoraggio delle morfologie costiere, grazie all'acquisizione in tempi molto rapidi di nuvole di dati piano altimetrici (ENH) molto densi, dai quali, in post-processing, si ottengono il Modello Digitale di Superficie (*DSM-Digital Surface Model*) e il Modello Digitale del Terreno (*DTM-Digital Elevation Model*). Per questi motivi, nell'ambito delle attività conoscitive regionali afferenti al "Sistema Informativo della Costa" si è deciso di investire fin dal 2004 nell'esecuzione di un rilievo altimetrico della fascia costiera con tecnologia laser-scanning (LiDAR) da piattaforma aerea (Ciavola *et al.*, 2006) (Figura 13). Successivamente, anche grazie al grande impulso e sviluppo di tale tecnologia e alla riduzione dei costi, nuovi rilievi sono stati condotti anche da parte altri enti (Eni nel 2006, Ministero dell'ambiente nel 2008, RER-Agenzia di protezione Civile nel 2010, Eni nel 2012 e Autorità di Distretto del Po nel 2019) che hanno

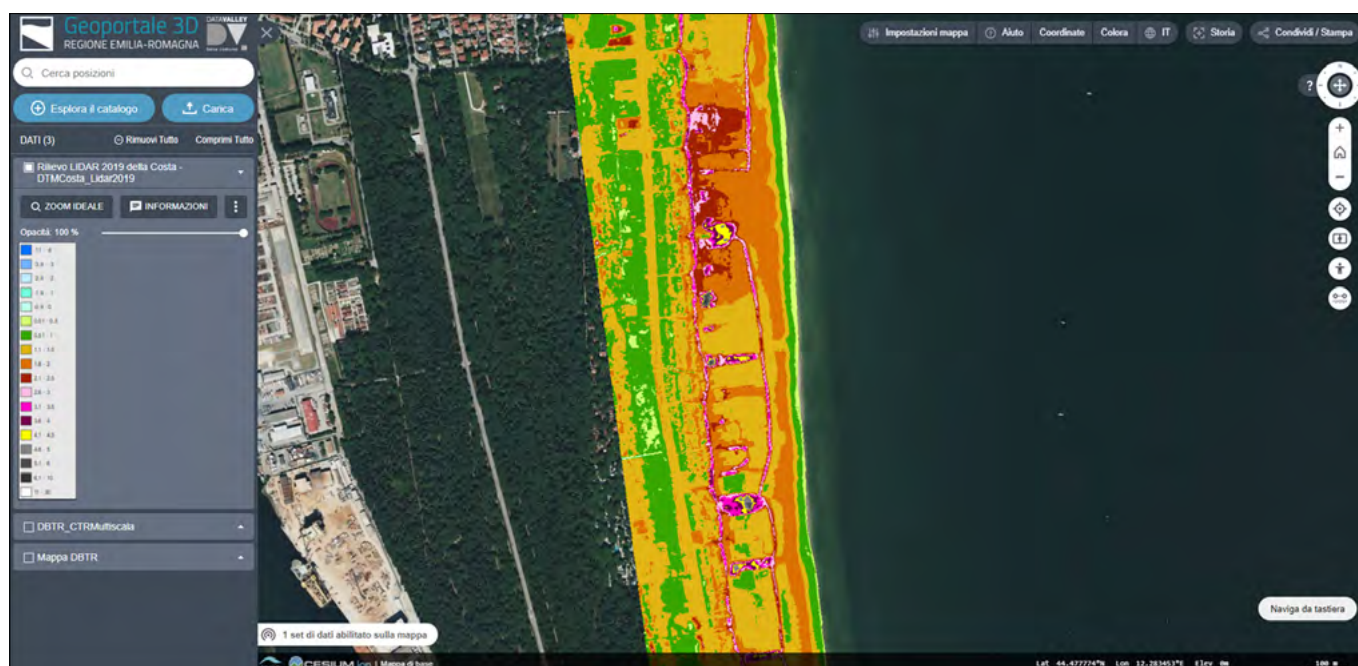


FIGURA 13. Dettaglio del risultato ottenuto dal rilievo Lidar 2019 - DTM e pubblicato nel portale regionale **Geoportale 3D**.

contribuito ad arricchire il dataset regionale consentendo lo sviluppo delle cartografie di pericolosità all'inondazione marina ai sensi del D.lgs. 49/2010 (Perini *et al.*, 2012) e di numerosi altri studi sulle morfologie costiere, come la nuova cartografia delle dune che sarà a breve pubblicata.

6.2 Studi sulla dinamica di lungo periodo e sulla geologia dell'interfaccia terra-mare

Per comprendere appieno i fenomeni di erosione costiera che interessano i litorali regionali e governare le scelte pianificatorie e di intervento è necessario approfondire gli studi dell'evoluzione millenaria della piana costiera, al fine di mettere in evidenza la natura profonda e l'origine dei fenomeni, la durata e la persistenza di situazioni critiche.

Per questo, nell'ambito del Sistema Informativo del Mare e della Costa, sono state sviluppate due attività principali: la dinamica della linea di costa e dei fondali nel medio/lungo periodo e lo studio della geologia dell'interfaccia terra-mare.

La dinamica della linea di riva a scala regionale e alla scala temporale delle centinaia di anni è dominata da un processo di rettificazione, che si manifesta attraverso l'erosione delle cuspidi deltizie e la crescita dei settori interposti. La causa che sta alla base di questo fenomeno è da ricercare nella modificazione del regime dei fiumi e dalla quantità e natura dei materiali da essi trasportati, avvenuta a seguito del cambiamento climatico col passaggio dalla Piccola Età Glaciale (PEG, circa dalla seconda metà del XIV alla metà del XIX secolo) al riscaldamento globale attuale: si è passati

da un surplus sedimentario e dalla crescita delle foci a un deficit di apporto e ad una sofferenza delle foci stesse. Spesso la tendenza alla rettificazione viene "mascherata" dalle dinamiche complesse della linea di riva a scala locale e a scale temporali minori (anni, decine di anni), fondamentalmente governate dagli interventi antropici sulla costa. Tra essi, a titolo di esempio, si ricordano la momentanea stabilizzazione della linea di riva grazie a opere di difese rigide o morbide e la formazione di hotspot erosionali ai margini dei sistemi di scogliere e migranti contestualmente all'ampliamento delle difese stesse.

La Figura 14 riporta il primo impianto della carta topografica IGM del 1860 e carta nautica IIM 1901 a cui sono state sovrapposte le linee di riva antecedenti (1570 e 1682) e successive (2019). La collocazione delle linee di riva di fine del '500 (linea verde, tratta da carta storica del Pasi del 1570) e la successiva di fine '600 (linea rossa, tratta da carta storica 'Romagna-Flaminia' del 1682) testimonia un apparato deltizio in avanzamento e aggettante rispetto alla costa (linea di riva a circa 8 e 6 km verso mare rispetto all'attuale).

L'immagine mostra inoltre una nuova forma della foce, indicazione di progressivo declino dell'attività fluviale, esacerbato ulteriormente nei tempi recenti, e un forte controllo da parte della corrente lungo costa.

Insieme al processo di rettificazione della linea di riva, sul lungo periodo, agisce anche un generalizzato approfondimento dei fondali evidenziato dal confronto tra i rilievi batimetrici di inizio XX secolo e quelli effettuati successivamente. Si ipotizza che alla base di questo fenomeno ci sia ancora una volta la crisi del trasporto solido susseguente alla PEG. La riduzione degli apporti ha modificato gli equilibri morfo-sedimentari del fondale marino, ancora soggetto ad un abbassamento dovuto alla subsidenza naturale (alla quale nel tempo si è sommata localmente quella antropica); con questa nuova configurazione delle forzanti e i nuovi profili di equilibrio il fenomeno più rilevante è l'aumento della pendenza del fondale vicino a riva e la conseguente riduzione dell'ampiezza della spiaggia sommersa che svolge una funzione di dissipazione per il moto ondoso. Anche in questo caso al fenomeno si sovrappongono dinamiche più recenti e locali come gli accumuli di sedimenti e il sollevamento del fondale in prossimità delle opere di difesa (ad esempio nel lato sopraflusso dei moli o a tergo delle scogliere).

Le dinamiche sopra brevemente introdotte si inquadrano nella storia geologica della fascia costiera regionale. L'evoluzione recente è caratterizzata dall'attività delle foci fluviali padane e appenniniche, dalla loro crescita, dall'abbandono, dalla ripresa, dalla modificazione del regime e dalle regimazioni antropiche.

Nella costa ferrarese si osservano tre edifici deltizi distinti, rappresentati dai lobi romani a sud (Po di Spina), quelli medievali e rinascimentali nel settore centrale (Po di Volano) e quelli del delta moderno a nord (Figura 15). La costa ravennate è caratterizzata dai lobi dei fiumi appenninici, meno sviluppati rispetto agli apparati della piana costiera ferrarese e che conobbero una relativa crescita durante la PEG. Il litorale più a sud è costituito da una sottile piana costiera dove non si osservano apparati del-

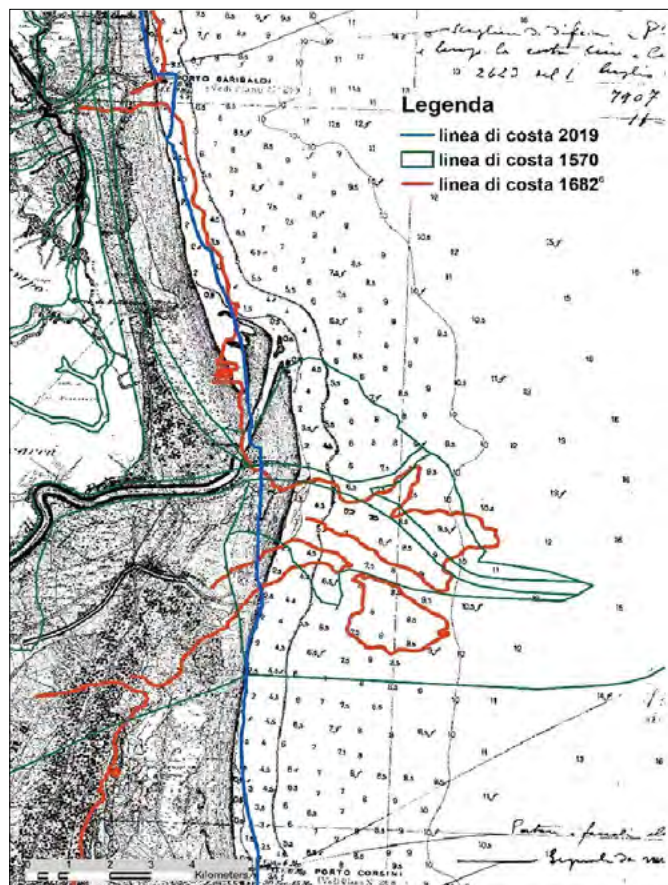


FIGURA 14. Primo impianto della carta topografica IGM del 1860 e carta nautica IIM 1901 con sovrapposte linee di riva antecedenti (1570 e 1682) e successive (2019).

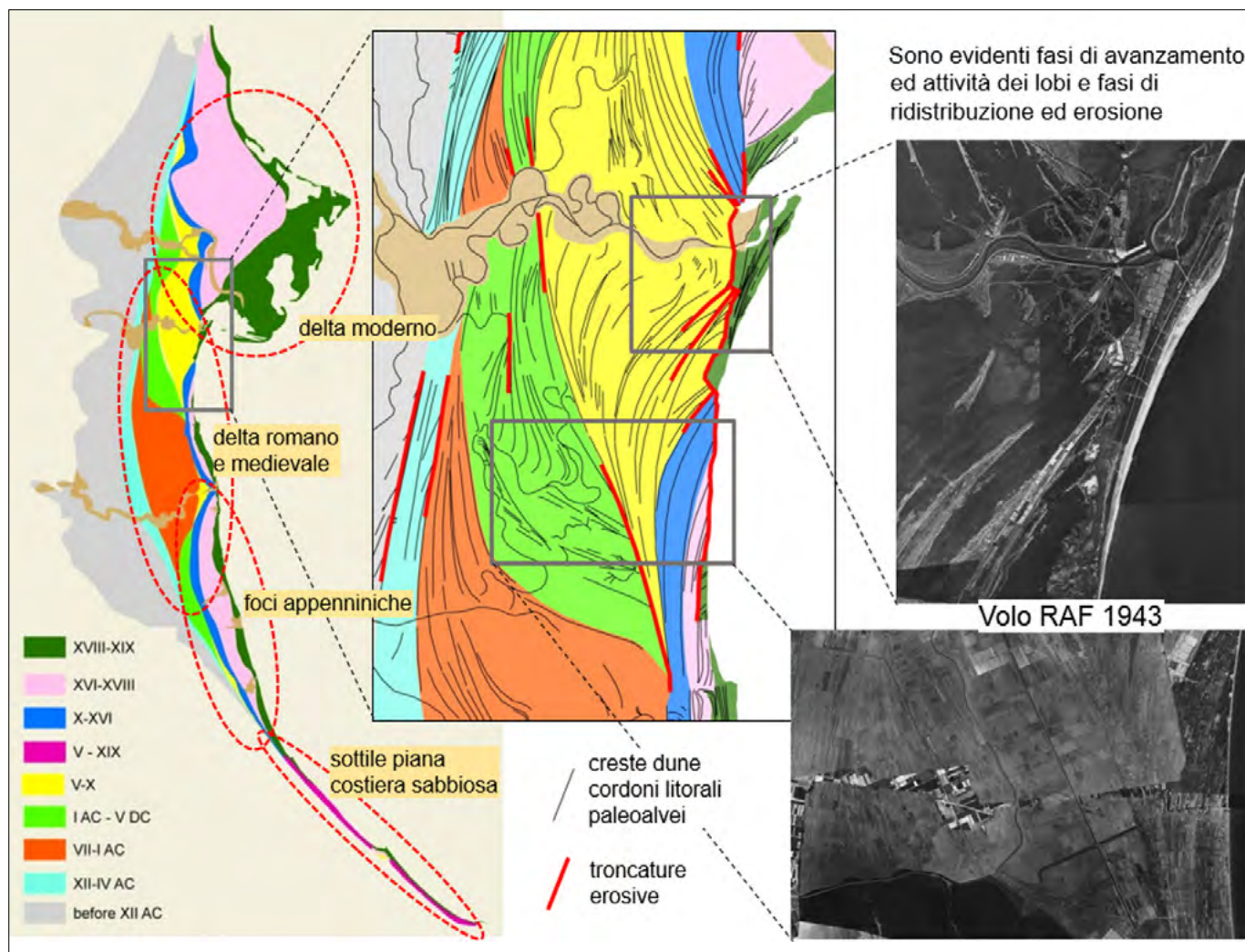


FIGURA 15. Evidenze geomorfologiche dei diversi lobi deltizi nella piana costiera ferrarese, con focus sul delta del Po di Volano. In giallo e in blu i lobi medievali e rinascimentali; in arancione e verde si osserva più a sud il delta sviluppatosi durante l'epoca romana.

tizi ben formati. I depositi deltizi e litorali affioranti sulla terraferma continuano anche nella porzione sommersa, al di sotto del fondale marino, testimoniando le complesse fasi sedimentarie e soprattutto caratterizzando in modo diverso i tratti costieri regionali. Ad esempio, la spiaggia attiva nel tratto costiero presso Lido delle Nazioni poggia sui depositi antecedenti al XVI secolo e presenti in prossimità della linea di costa a causa della profonda erosione e troncatura del delta del Po di Volano. È questo il motivo per cui in questo tratto costiero sulla spiaggia affiorano sovente depositi argilloso-limosi di retro-cordone.

7. LA STRATEGIA GIDAC

7.1 Riferimenti programmatici e normativi

Per far fronte agli impatti del cambiamento climatico e ridurre la vulnerabilità ed esposizione a rischio del territorio costiero ai fenomeni meteomarinari, la Regione ha previsto un aggiornamento generale della sua strategia di gestione della costa che, a partire dalle Linee guida GIZC del 2005, tenesse conto delle nuove condizioni e degli scenari climatici attesi nei prossimi decenni.

Nel quadro programmatico regionale, la Strategia di Gestione Integrata per la Difesa e l'Adattamento della Costa ai cambiamenti climatici (GIDAC), già individuata dalla

“Strategia unitaria di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici della Regione Emilia-Romagna” (D.A.L. 187/2018), è fra gli obiettivi introdotti dal DEFR 2020 - Documento di programmazione economica e finanziaria regionale come riferimento programmatico, del mandato dell'attuale giunta regionale e del DSR 2021-2027 (Documento Strategico Regionale per la programmazione unitaria delle politiche europee di sviluppo 21-27) che indica per l'Asse della Costa la necessità di uno strumento di programmazione unitario in grado di aggiornare il Piano costa e la difesa del litorale con l'obiettivo di integrare la manutenzione ordinaria e gli interventi strutturali complessi e di area vasta, e contribuisce inoltre a 4 dei 17 obiettivi dell'Agenda 2030 della Regione Emilia-Romagna.

I riferimenti normativi e gli strumenti vigenti riguardano, oltre a quanto già citato per il SIC (Cfr. 6), la L.R. 7/1979 per la difesa della costa regionale, l'art. 29 della L.R. 17/2004 che introduce la gestione integrata della zona costiera e la successiva D.C.R. 645/2005 che approva le Linee Guida GIZC regionali, la D.A.L. 187/2018 e la D.G.R. 1588/2019, recepimento delle “Linee Guida nazionali per la difesa delle coste dai fenomeni di erosione e dagli effetti dei cambiamenti climatici” predisposte dal Tavolo Nazionale sull'Erosione Costiera (TNEC), e inoltre la L.R. 15/2018 sulla Partecipazione all'elaborazione delle politiche pubbliche.

7.2. Sviluppo e obiettivi della Strategia

La Strategia GIDAC è stata sviluppata attraverso un articolato processo partecipativo nel periodo 2021-2022 (*CheCostaSarà?*), grazie al progetto europeo *AdriaClim* (Programma Interreg Italia-Croazia Strategico 2020-2023) con il coinvolgimento di vari soggetti portatori d'interesse, pubblici e privati, del territorio costiero e non solo. Inoltre, nella logica di operare non soltanto "per" ma soprattutto "con" le nuove generazioni, si è realizzato un percorso dedicato "Innovation Camp – Patto intergenerazionale per la difesa e l'adattamento della costa ai cambiamenti climatici" (marzo-aprile 2023) finanziato dal programma Science Meets Regions del Centro Comune di Ricerca (JRC) della Commissione Europea.

Gli obiettivi della GIDAC emersi e messi a punto nell'ambito di tale percorso fanno riferimento alle necessità di riduzione della vulnerabilità del territorio costiero, di gestione sostenibile delle risorse naturali, di rigenerazione del sistema fisico e delle aree urbane in chiave adattiva e di aumento della resilienza della fascia costiera.

In particolare, sono stati individuati sei obiettivi generali.

1. Ridurre la vulnerabilità del territorio costiero garantendo un adeguato assetto di sicurezza del sistema spiaggia in relazione alla sua funzione di prima "struttura di difesa" per la protezione dell'entroterra.
2. Garantire la conservazione e l'integrità degli ecosistemi costieri, dei paesaggi e della geomorfologia per le generazioni presenti e future.
3. Promuovere lo sviluppo sostenibile della zona costiera, con riguardo ad una pianificazione razionale delle attività umane in relazione agli scenari attesi dei cambiamenti climatici.
4. Prevenire/mitigare gli effetti del cambiamento climatico sul territorio costiero relativi all'innalzamento del livello del mare, all'erosione, alle mareggiate e ai fenomeni di ingressione marina
5. Garantire l'uso e la gestione sostenibile e coordinata delle diverse risorse di sedimenti utili per il ripascimento e il mantenimento delle spiagge.
6. Garantire la coerenza tra le iniziative pubbliche e private che riguardano gli interventi di trasformazione, la protezione e l'adattamento della zona costiera, la gestione dei litorali, l'uso sostenibile e la conservazione delle risorse di sedimenti e del territorio costiero.

Tali obiettivi generali fanno riferimento ai quattro pilastri della Strategia come di seguito indicati.

- Liberare spazi lungo la costa e mantenere le spiagge libere da strutture e infrastrutture creando fasce di rispetto per l'esplicitarsi delle dinamiche marine, favorendo la riorganizzazione dei tratti costieri critici e, ove necessario, l'arretramento o il riallineamento degli elementi antropici.
- Garantire un adeguato apporto di sedimenti al sistema costiero, provenienti da diverse fonti interne ed esterne, al fine di ripristinare e mantenere l'equilibrio sedimentario per le condizioni climatiche attuali e attese.
- Promuovere l'integrazione dei costi dei rischi costieri nei processi decisionali in materia di pianificazione e investimenti sulla costa, attraverso un approccio integrato di valutazione costi/benefici.

- Mantenere un sistema delle conoscenze sempre aggiornato sulle dinamiche costiere e fluviali, sulla gestione delle fonti di sedimenti, sull'erosione e sui fenomeni e rischi costieri in relazione agli scenari climatici presenti e attesi, sulla pianificazione urbanistica e territoriale, sugli interventi e trasformazioni del territorio in fascia costiera.

La Strategia individua quindi una serie di azioni per la sua attuazione, raggruppate in quattro aree tematiche:

- **Azioni di Sistema** (gestione delle fonti di sedimento, riduzione della subsidenza antropica e ripristino del trasporto solido fluviale)
- **Azioni di Adattamento** (trasformazioni del tessuto urbanizzato, riduzione della vulnerabilità, adattamento del sistema spiaggia e potenziamento del sistema di allertamento costiero);
- **Azioni di Manutenzione** (su spiagge, opere di difesa e opere portuali);
- **Azioni Trasversali** (collaborazione tra soggetti competenti e portatori d'interesse, aggiornamento delle conoscenze, valutazione dei costi connessi ai rischi e agli impatti nelle decisioni sugli interventi costieri).

7.3. Quadro conoscitivo e individuazione dei tratti critici

Uno dei principali obiettivi del quadro conoscitivo della GIDAC è l'individuazione dei tratti critici del litorale per i quali prevedere interventi di difesa più efficaci, volti



FIGURA 16. Tratti critici della costa regionale (Regione Emilia-Romagna, 2022).

a ridurre la vulnerabilità rispetto ad erosione e ingressione marina. L'individuazione dei tratti critici (Fig.16) è stata effettuata sulla base di due indicatori costieri, SI_TOT (Perini *et al.*, 2019) e ASPE (Arpa, 2020) che sintetizzano le informazioni dei parametri fisici monitorati e delle osservazioni dirette in relazione agli scenari di pericolosità attuale e futura (mappe della pericolosità di inondazione marina al 2019 e al 2100 (Perini *et al.*, 2017)).

L'insieme formato dalle reti di monitoraggio sistematico (Cfr. 3) con le altre acquisizioni e approfondimenti tematici e gli indicatori che ne derivano (Cfr. 4), inquadrato nel sistema gestionale delle celle litoranee SICELL (Cfr. 5) e gestito con il sistema di raccolta dei dati del SIC (Cfr. 6) e dei diversi geoportali per la condivisione delle informazioni, rappresenta il necessario sistema della conoscenza della costa per la comprensione dei fenomeni e per la gestione dei litorali e dei rischi costieri.

7.4. ATTUAZIONE E MONITORAGGIO DELLA STRATEGIA

L'attuazione della Strategia GIDAC è prevista attraverso la programmazione regionale, con finanziamenti per azioni e interventi da fondi regionali e nazionali, e con il recepimento negli strumenti di pianificazione locale e di area vasta degli indirizzi per la riduzione della vulnerabilità ed esposizione a rischio.

Un sistema di monitoraggio, in fase ora di impostazione secondo le indicazioni del documento di Strategia, con un set di indicatori di cui una parte dialoganti con quelli proposti dal Piano Nazionale per l'Adattamento ai Cambiamenti Climatici recentemente pubblicato (PNACC, Dicembre 2022), permetterà da un lato di seguire lo stato di avanzamento dell'attuazione della GIDAC e dall'altro di valutare l'efficacia delle azioni e degli interventi proposti ed eventualmente riformulare in chiave migliorativa.

CONCLUSIONI

La valutazione quantitativa delle componenti di un ambiente così dinamico come quello costiero in un'ottica il più possibile integrata è un obiettivo di non facile raggiungimento, a causa sia della intrinseca complessità del sistema dove ogni componente è governata da meccanismi diversi e ognuna di queste interagisce con le altre, alle diverse scale spaziali e temporali, e sia dell'intermittenza con la quale molto spesso gli studi vengono realizzati.

La Regione Emilia-Romagna, fin dal 1981 con il primo "Piano progettuale per la difesa della costa adriatica Emilia-Romagnola", ha dato il via alla sistematizzazione degli studi connessi al problema dell'erosione costiera tramite il monitoraggio delle componenti fisiche. Oggi, a distanza di diversi decenni, sono disponibili le reti di monitoraggio sistematico (Cfr. 3), inquadrato nel sistema gestionale delle celle litoranee SICELL (Cfr. 5) insieme a tutti gli altri approfondimenti tematici e agli indicatori che ne derivano (Cfr. 4), raccolti attraverso il sistema del SIC (Cfr. 6) e dei diversi geoportali, tra cui quello di Arpa.

Questo articolato insieme di informazioni e strumenti, che nella strategia GIDAC (Cfr. 7) prende il nome di "siste-

ma delle conoscenze della costa", diventa oggi più che mai essenziale per la comprensione dei fenomeni, la valutazione dei rischi e quindi la gestione dei litorali.

Una gestione che, grazie a questo supporto, possa essere auspicabilmente sempre più pianificata sul medio-lungo periodo e sempre meno emergenziale, in un'ottica di prevenzione dei danni, e che sia quanto più possibile diversificata in relazione alle specificità dei paraggi costieri e alle diverse esigenze di messa in sicurezza delle strutture e infrastrutture e conservazione degli elementi naturali ancora presenti.

Inoltre, il repentino sviluppo tecnologico dei sistemi di rilevamento pone senza dubbio la necessità di un continuo aggiornamento e implementazione delle reti e di formazione costante del personale tecnico e, parallelamente, di miglioramento dei sistemi di diffusione e condivisione dell'informazione tra i portatori d'interesse pubblici e privati.

BIBLIOGRAFIA

- AGUZZI, M., DE NIGRIS N., PRETI M., MALLEGGI R. (2012). *Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola*. Studi Costieri N. 20, pp. 95-109. <http://www.gnrac.it/rivista/Numero20/Articolo8.pdf>
- ARPA (2008). *Stato del litorale emiliano romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione*. I Quaderni di Arpa.
- ARPAE (2016). *Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012. Erosione e interventi di difesa*. I quaderni di Arpa. Pagine 227. ISBN978-88-87854-41-1. https://www.arpae.it/it/eventi/2016/2016_stato_litorale_volume.pdf
- ARPAE (2018). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Seconda fase. Relazione finale*. <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/rapporti/rapporti-subsidenza/rilievo-della-subsidenza-nella-pianura-er-seconda-fase-1.pdf>
- ARPAE (2020). *Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2018 erosione e interventi di difesa*. <https://www.arpae.it/it/documenti/pubblicazioni/slem-arpae-2020-web-leggera.pdf>
- BONDESAN M., CALDERONI G., DAL CIN R. (1978). *Il litorale delle province di Ferrara e di Ravenna (Alto Adriatico): evoluzione morfologica e distribuzione dei sedimenti*. Boll. Soc. Geol. It., 97, pp. 247-287.
- BONDESAN M., FAVERO V., VIÑALS M. J., (1995). *New evidence on the evolution of the Po delta coastal plain during the Holocene*. Quaternary International Vol. 29/30, 105-110.
- CIAVOLA, P., PERINI, L., LUCIANI, P., ARMAROLI, C. (2006). *Application of terrestrial LIDAR surveys for the evaluation of dune erosion generated by storm events*. Atti di: 5th European congress on regional geoscientific cartography and information systems, Barcellona: Institut Cartogràfic de Catalunya, Spagna, vol. 1, pp. 540-542.
- CIAVOLA P., ARMAROLI C., CHIGGIATO J., VALENTINI A., DESERTI M. PERINI L., LUCIANI P. (2007). *Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna:*

- the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy)*. (1.83 MB) Journal of Coastal Research, SI 50, pp. 540-544.
- CIAVOLA P AND J. A. JIMENEZ (2013). *The record of marine storminess along European coastlines*. Natural Hazards Earth System Sciences, 13, 1999–2002, 2013. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/1999/2013/ doi:10.5194/nhess-13-1999-2013
- CIAVOLA, P., FERREIRA, O., HAERENS, P., VAN KONINGSVELD, M., ARMAROLI, C., LEQUEUX, Q. (2011). *Storm impacts along European coastlines. Part 1: The joint effort of the MICORE and ConHaz Projects*, Environmental Science Policy, 14, 912–923, 2011.
- DAL CIN R., CALDERONI G., SIMEONI U. (1979). *Caratteri sedimentologici del litorale romagnolo - Le spiagge di Romagna: uno spazio da proteggere*. C.N.R. Quaderno n° 2, Bologna, 31-36.
- FOX-KEMPER B., H.T. HEWITT, C. XIAO, G. AÐALGEIRSDÓTTIR, S.S. DRIJFHOUT, T.L. EDWARDS, N.R. GOLLEDGE, M. HEMER, R.E. KOPP, G. KRINNER, A. MIX, D. NOTZ, S. NOWICKI, I.S. NURHATI, L. RUIZ, J.-B. SALLÉE, A.B.A. SLANGEN, AND Y. YU, (2021). *Ocean, Cryosphere and Sea Level Change*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362, doi: 10.1017/9781009157896.011. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-9/>
- GNRAC (2006). *Le spiagge dell'Emilia-Romagna. Studi costieri - 2006 - 10: Lo stato dei litorali italiani*.
- PERINI L., CALABRESE L., DESERTI M., VALENTINI A., CIAVOLA P., ARMAROLI C. (2011). *Le mareggiate e gli impatti sulla costa in ER 1946/2010*. I quaderni di Arpa. Arpa Emilia-Romagna. ISBN 88-87854-27-5
- PERINI L., CALABRESE L., DESERTI M., VALENTINI A., CIAVOLA P., ARMAROLI C. (a cura di) (2011). *Le Mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna, 1946-2010*. I quaderni di Arpa, pp. 141. Arpa Emilia Romagna, Bologna, ISBN 88-87854-27-5.
- PERINI L., CALABRESE L., LUCIANI P., OLIVIERI M., GALASSI G., SPADA G. (2017). *Sea-level rise along the Emilia-Romagna coast (Northern Italy) in 2100: scenarios and impacts*, Natural Hazards Earth System Sciences, 17, 2271-2287, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2271-2017>
- PERINI L., CALABRESE L., SALERNO G., LUCIANI P. (2012). *Sea flood hazard mapping in Emilia-Romagna*, In: 7th EureGeo Conference - European Congress on Regional GEOscientific Cartography and Information Systems. vol. 1, p. 334-335, Regione Emilia-Romagna, Bologna, 12-15 giugno 2012 – Abstract.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA (1984). *Piano progettuale per la difesa della costa adriatica Emiliano-Romagnola – volume VI. Le opere a mare: caratteristiche ed effetti sul litorale*.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA (1996). *Progetto di piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna. Relazione Generale*.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2011). *Nuovi strumenti di gestione dei litorali in Emilia-Romagna*. SICELL. Il sistema gestionale delle celle litoranee. MONTANARI R. E MARASMI C. (a cura di).
- Regione Emilia-Romagna (2014). *SICELL. Il sistema gestionale delle celle litoranee. Aggiornamento 2006-2012*. MONTANARI R. E MARASMI C. (a cura di). <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/suolo-bacino/argomenti/progetti-interventi/difesa-della-costa/sicell>
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2022). *Strategia di gestione integrata per la difesa e l'adattamento della costa ai cambiamenti climatici (GIDAC)*. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/suolo-bacino/argomenti/difesa-della-costa/gidac/gidac-dicembre-2022>
- TEATINI P., FERRONATO M., GAMBOLATI G., BERTONI W., GONELLA M. (2005). *A century of land subsidence in Ravenna, Italy*. Environ. Geol, 47, 831>846.
- VALENTINI A. (2016). *Review of Climate change impacts on sea storm occurrence*. Report progetto Life Primes. Azione A1.
- WMO (2022). *Provisional State of the Global Climate 2022*. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

SITOGRAFIA

- Dext3r: <https://simc.arpae.it/dext3r/>
- Portale Cartografico di Arpa: <https://www.arpae.it/it/dati-e-report/dati-ambientali/il-portale-cartografico-di-arpae>
- Dati Ambientali Emilia-Romagna - Rischi costieri 2019: <https://webbook.arpae.it/erosione-costiera/>
- Portale minERva, Direzione Generale Cura del Territorio ed Ambiente della Regione Emilia-Romagna: <https://datacatalog.regione.emilia-romagna.it/catalogC-TA/>
- Accesso webgis Area Geologia, Suoli e Sismica del Settore Difesa del Territorio: <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati>
- Gidac AA.VV., 2022 - Quadro conoscitivo della Strategia: <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/costa/il-quadro-conoscitivo-della-strategia-gidac>
- Geoportale 3D: <https://mappe.regione.emilia-romagna.it/>
- Geoportale Adriatico-Ionio (GAIR): [https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/practices/geo-data-portal-adriatic-ionian-region-gair](https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/practices/geo-data-portal-adriatic-ionic-ionian-region-gair)