

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Corso di Laurea Magistrale in Analisi e Gestione dell'Ambiente

La movimentazione dei sedimenti di spiaggia nell'ambito
della gestione del litorale: il caso di Cesenatico

Tesi di laurea in Gestione Integrata delle Zone Costiere

Relatore

Prof.ssa Claudia Romagnoli

Presentata da

Thomas D'Elia

Correlatore

Dott. Francesco Stecchi

Sessione Unica Anno Accademico 2020/2021

Indice

Introduzione	5
1 Inquadramento territoriale e aspetti generali.....	7
1.1 Le caratteristiche e le criticità della costa in Emilia-Romagna	7
1.2 Il litorale di Cesenatico	11
1.2.1 Interventi di difesa e trend evolutivi del litorale.....	16
1.2.2 Rischio costiero	18
1.3 La gestione del sedimento sui litorali	20
1.3.1 Le “buone pratiche”	20
2 Dati e metodi.....	26
2.1 I dati disponibili.....	26
2.2 Acquisizione dei dati	27
2.3 Elaborazione dei dati	29
3 Risultati	34
3.1 Confronti tra DTM.....	34
3.2 Confronti tra le sezioni	47
4 Discussione.....	55
5 Conclusioni	60
6 Allegati	62
7 Bibliografia	64

Introduzione

La gestione della costa, alla luce anche dei cambiamenti climatici in corso e attesi, costituisce una delle emergenze territoriali più rilevanti, con importanti ricadute ambientali e socioeconomiche. La vulnerabilità del sistema costiero dipende in parte da fattori naturali, come la dinamica meteo-marina, l'innalzamento del livello del mare, l'abbassamento del suolo, la diminuzione del trasporto solido da parte dei corsi fluviali e, in gran parte, anche dall'attività antropica che nell'ultimo secolo ha pesantemente trasformato l'utilizzo di tale territorio e delle sue risorse (Regione Emilia-Romagna, 2021).

Dei circa 100 km di litorale emiliano romagnolo anche la porzione in presa in considerazione in questa tesi, che si estende dal molo sud del Portocanale di Cesenatico e termina in corrispondenza dello stabilimento balneare "Bagno Tahiti", è soggetta a fenomeni di erosione costiera ed ingressione marina. Per contrastare queste criticità negli anni sono stati adottati diversi approcci, inizialmente basati sull'adozione di opere di difesa "rigide" che hanno visto la costruzione principalmente di pennelli trasversali e barriere frangiflutti in calcestruzzo. Queste strutture, in quanto rigide, nonostante in alcuni casi siano state ribassate per migliorare la circolazione dell'acqua in prossimità della costa, hanno indotto effetti irreversibili sul litorale, determinando un "irrigidimento" del sistema ed una compartimentalizzazione delle dinamiche costiere locali, tra cui una forte interferenza con il trasporto del sedimento. Negli anni più recenti si è cercato perciò di impiegare maggiormente interventi di difesa di tipo "morbido" come ripascimenti con sabbie da cava, da depositi litoranei e da depositi sedimentari marini relitti (DSMR), privilegiando quindi l'apporto di materiale venuto a mancare nel sistema costiero.

Dal punto di vista della gestione del litorale, senza contare quelle appena citate, a scala locale (dai gestori degli stabilimenti balneari), oltre al recupero del sedimento tramite pulizia delle spiagge, vengono anche svolte due pratiche tra loro collegate: la realizzazione dell'argine invernale come protezione del retrospiaggia e lo *scraping*, che ha come scopo quello di aumentare la quantità di sabbia disponibile sulla spiaggia emersa tramite un "recupero" dalla spiaggia sommersa ed una redistribuzione su quella emersa. Sarebbe utile diffondere e sistematizzare un insieme di "buone pratiche" basato su queste esperienze, per favorire l'applicazione e la diffusione di nuove modalità gestionali (Regione Emilia-Romagna, 2021).

Lo scopo di questa tesi è stato quello di studiare le variazioni morfologiche della spiaggia a sud di Cesenatico in seguito alla movimentazione del sedimento tramite *scraper* ed altri mezzi meccanici a pala: la disponibilità di una serie di rilievi topo-batimetrici commissionati dalla Cooperativa Stabilimenti Balneari di Cesenatico – che si ringrazia per la fruizione dei dati - ed eseguiti dalla ditta Adriarilievi (RA) nel periodo tra febbraio 2020 e maggio 2021, ha permesso di evidenziare le principali variazioni morfologiche della spiaggia in risposta a processi, di natura antropica (prevalentemente) e naturali. La comprensione della risposta morfologica della spiaggia alle sollecitazioni esterne è di fondamentale importanza nell’ottica di una strategia di difesa e adattamento della costa che preveda modalità di gestione più sostenibili (Regione Emilia-Romagna, 2021).

1 Inquadramento territoriale e aspetti generali

1.1 Le caratteristiche e le criticità della costa in Emilia-Romagna

Il litorale emiliano-romagnolo è un sistema costiero a costa bassa e sabbiosa, profondamente modificato dall'urbanizzazione avvenuta dal dopoguerra ad oggi: la costruzione di hotel, abitazioni e stabilimenti balneari hanno irrigidito la costa e conseguentemente diminuito la resilienza del sistema lasciandola esposta a fenomeni erosivi (Figura 1.1). La maggior parte del litorale è, infatti, interessata dalla carenza di sedimento, principalmente dovuta ad un trasporto solido fluviale ridotto per effetto di regimazione dei corsi d'acqua che in condizioni naturali alimenterebbero la fascia costiera.

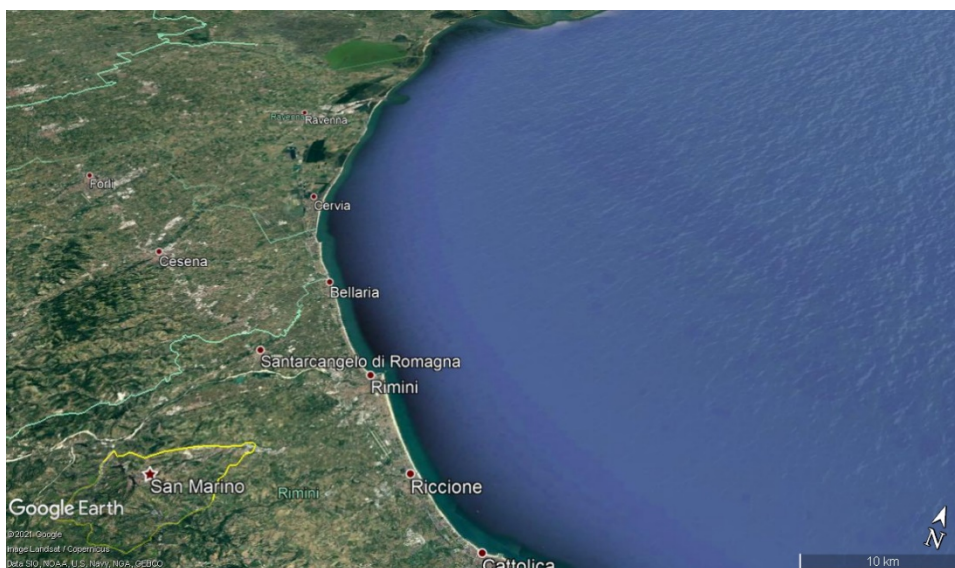


Figura 1.1 Litorale emiliano-romagnolo. Dall'immagine si può notare la presenza di una fascia praticamente continua di territorio densamente urbanizzato. Fonte: Google Earth.

In aggiunta, la costa emiliano-romagnola è stata soggetta a subsidenza a tassi elevati (Arpae, 2002) dovuta ad estrazioni di idrocarburi dal sottosuolo, emungimento delle acque di falda e, in minor parte, a fattori naturali di compattazione del sedimento alluvionale, che hanno provocato un consistente abbassamento delle quote. Nonostante negli ultimi anni i tassi di subsidenza si siano ridotti (Figura 1.2), gli effetti generati sono irreversibili. Sommando a questo la tendenza dell'innalzamento del livello del mare a causa del riscaldamento globale (IPCC, 2019), la costa risulta essere fortemente soggetta all'azione del moto ondoso e all'ingressione marina, e più esposta agli impatti di eventi meteo-marini estremi.

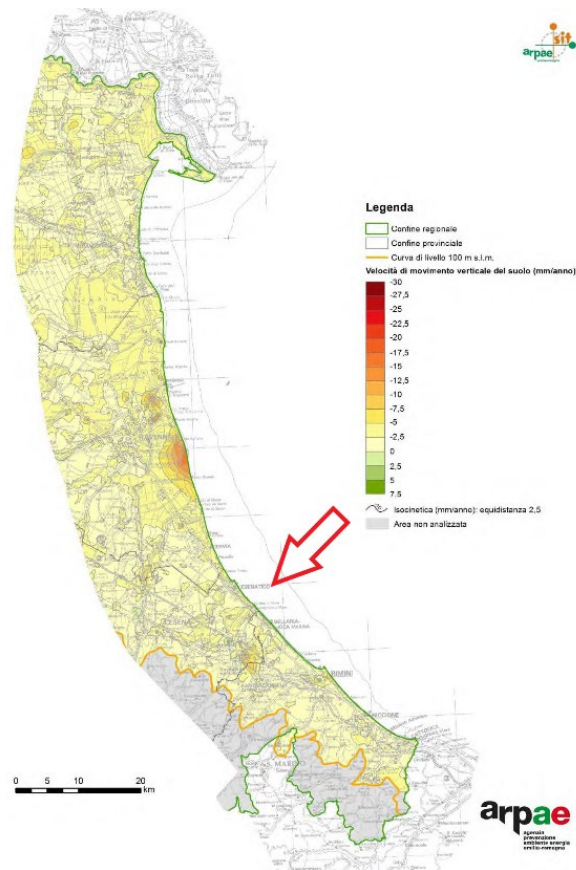


Figura 1.2 Carta della subsidenza relativa al periodo 2011-2016. L'area di Cesenatico (indicata con la freccia) è rappresentata con il colore giallo chiaro corrispondente ad un valore circa di -2.5 mm/anno. Fonte: RILIEVO DELLA SUBSIDENZA NELLA PIANURA EMILIANO-ROMAGNOLA SECONDA FASE, Arpae, 2018.

Ai fini di una maggiore conoscenza del regime di moto ondoso che interessa la costa, Arpae nel 2007 ha installato una boa ondometrica al largo di Cesenatico, a circa 8 km dalla costa, su fondale di 10 m di profondità. La boa Nausicaa (Figura 1.3) permette di determinare diversi parametri, tra cui altezza e direzione dell'onda, periodo medio e di picco e temperatura dell'acqua.



Figura 1.3 Boa Nausicaa.

Fonte: Regione Emilia-Romagna, 2011. Il clima meteo-marino del bacino adriatico nel settore emiliano romagnolo.

I dati rilevati dalla boa nell'intervallo di tempo che va da maggio 2007, periodo di inizio attività, fino al 2018, indicano che la principale direzione del moto ondoso proviene da Est, seguita poi da ESE, ENE e NE (Figura 1.4). Le onde con maggiore altezza significativa (comprese tra 2.5 e 4 m e tra 1.25 e 2.5 m) provengono da direzione ENE e NE, sono quindi generate dai forti venti di Bora che interessano la costa. Le condizioni più frequenti registrate sono state quella di altezza d'onda tra 0.2 e 0.5 metri misurata nel 39% dei casi e di calma (altezza minore di 0.2 m) nel 33% delle rilevazioni; altezza maggiore (da 0.5 a 1.25 m) è stata invece misurata nel 22% dei casi (Arpae, 2020).

Per quanto riguarda gli eventi di mareggiata, sempre nel suddetto periodo, nel litorale emiliano-romagnolo sono stati registrati 132 giorni di mare in burrasca con una maggiore frequenza di accadimento nella stagione autunnale ed in inverno e una frequenza minore in primavera. La durata delle mareggiate è variata dalle 7 alle 96 ore, con una media di circa 20 ore, una provenienza media dal settore di Bora e altezze che sono spaziate dai 1.6 m ai 4.6 m (Arpae, 2016; Arpae, 2020).

Boa ondametria di Cesenatico 2007-2018

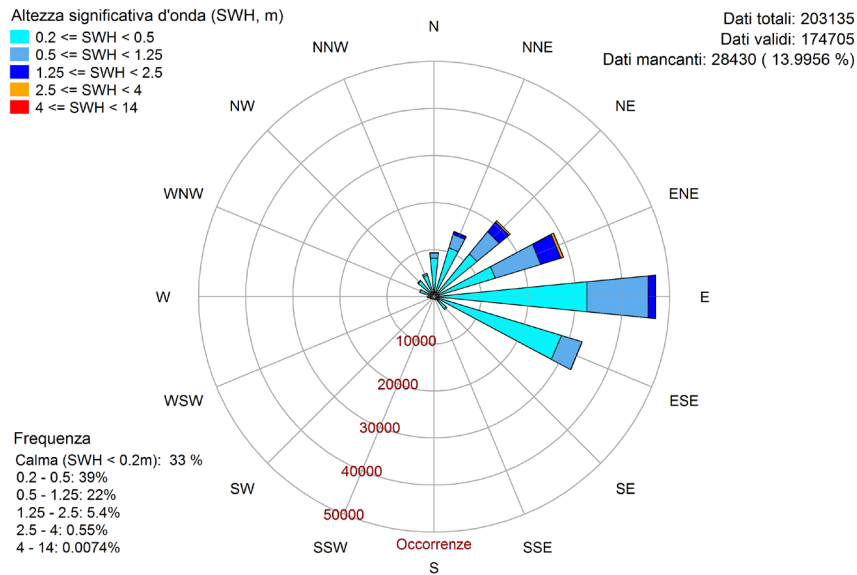


Figura 1.4 Rosa delle onde relativa al periodo 2007 - 2018. I dati sono ottenuti dalla boa Nausicaa e rappresentano la distribuzione della provenienza del moto ondoso. Fonte: <https://webbook.arpae.it/indicatore/Moto-ondoso-00001/>

Informazioni relative alla misura del livello del mare per la costa dell'Emilia-Romagna sono ricavabili dalle stazioni mareografiche di Porto Garibaldi nel comune di Comacchio e da quella di Porto Corsini nel comune di Ravenna, quest'ultima appartiene alla Rete Mareografica Nazionale. Tali stazioni sono state attive su intervalli temporali differenti e si trovano su settori costieri caratterizzati da un diverso tasso di subsidenza, quindi forniscono trend differenti di livello del mare relativo (Meli et al., 2021). È necessario tenere presente, inoltre, che queste stazioni sono localizzate in aree lontane dal tratto di interesse di questa tesi e dalla boa Nausicaa e quindi i dati possono non essere totalmente rappresentativi della condizione locale nell'area di studio.

Queste informazioni sono comunque importanti per la comprensione dei processi evolutivi che interessano la costa e per una oculata gestione del litorale anche in termini di scelta delle politiche da adottare per il contrasto dei fenomeni erosivi (Arpae, 2002; Arpae, 2008; Arpae, 2016; Arpae, 2020).

Volendo riassumere la condizione generale del litorale emiliano-romagnolo al 2018 utilizzando l'indicatore ASPE ("Accumulo, Stabile, equilibrio Precario, Erosione"), che ha come scopo quello di rappresentare lo stato "reale" della criticità della costa in assenza di interventi, si osserva che il 33% del litorale è in accumulo, il 20% stabile, il 21% in equilibrio precario e il

26% in erosione (Figura 1.5) (Arpae, 2020). Considerando gli interventi effettuati dalla Regione e dagli Enti Locali nel periodo 2012-2018, il 36% risulta in accumulo, il 46% stabile e solo il 18% in erosione (indicatore ASE). Questa situazione complessiva è frutto di una buona gestione del litorale e, in particolare, ad una serie di interventi di ripascimento che hanno portato sulle spiagge in erosione oltre 3.25 milioni di mc di sabbia (Arpae, 2020).

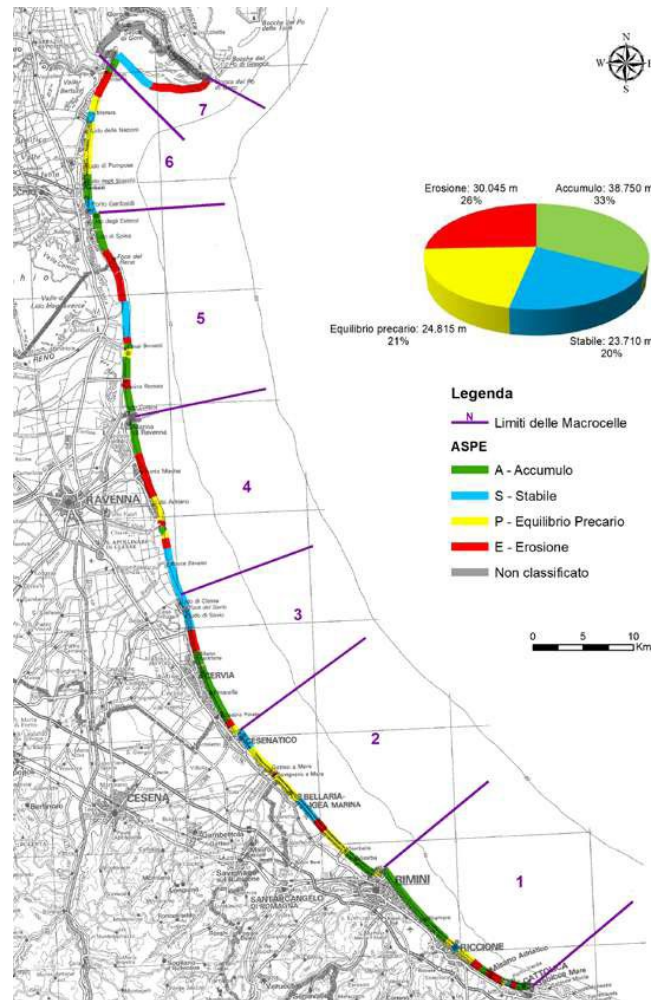


Figura 1.5 Classificazione ASPE: è riportato lo stato reale del litorale all'interno di ogni macrocella delimitata dalle linee viola. Fonte: Stato del Litorale emiliano-romagnolo al 2018, Arpae, 2020.

1.2 Il litorale di Cesenatico

L'area oggetto di studio si trova nella provincia di Forlì-Cesena e più precisamente nel comune di Cesenatico, il quale confina a sud con quello di Gatteo a Mare e a nord con quello di Cervia, in provincia di Ravenna.

Le spiagge interessate si estendono dal molo di Levante di Cesenatico fino al "Bagno Tahiti" che definisce l'inizio della frazione di Valverde, il quale insieme a Villamarina, appartiene allo stesso comune (Figura 1.6). Visto che la gestione è a livello comunale e vista l'assenza di

interruzioni fisiche in queste aree, ai fini dell'inquadratura territoriale e per avere un approccio più completo di seguito saranno prese in considerazione anche le caratteristiche ed i fenomeni che interessano le suddette frazioni.



Figura 1.6 Posizionamento territoriale del tratto oggetto di studio

Secondo la suddivisione della costa in unità fisiografiche eseguita da Arpae, l'area oggetto di studio appartiene alla "Macrocella 2" (Figura 1.5) delimitata a sud dal molo di Rimini e a nord da quello di Cesenatico; entrambi i moli svolgono l'azione di blocco del trasporto solido litoraneo che ha direzione da sud verso nord. Lunga circa 20 km, la Macrocella 2 è caratterizzata dalla presenza di una serie continua di scogliere parallele emerse poste a difesa delle spiagge dai processi erosivi (Arpae, 2016).



Figura 1.7 Vista della serie continua di stabilimenti balneari presenti nel tratto.

Nel tratto in esame la spiaggia ha un'ampiezza tra i 75 ed i 90 m e tende ad allargarsi solo nell'ultimo chilometro a nord, raggiungendo un'ampiezza media di 140 m nel tratto prossimo al molo di Cesenatico (Arpae, 2020; Figura 1.6).

Come per tutto il litorale regionale, le criticità di questo tratto costiero sono principalmente indotte dalla sua scarsa alimentazione. La quantità di sedimento presente nell'area è influenzata dall'apporto che deriva dai tre fiumi che sfociano nel tratto in esame: Marecchia, Uso e Rubicone - da sud verso nord (Figura 1.8) (Arpae, 2020). Questi corsi d'acqua, come molti altri presenti in Regione, hanno subito le conseguenze delle azioni antropiche come la costruzione di opere di regimazione che trattengono materiale portato in carico durante gli eventi di piena, ed escavazioni degli alvei fluviali nel passato. Ciò ha portato ad una condizione di carenza di trasporto solido fluviale, che si va poi a ripercuotere sulla spiaggia in termini di bilancio sedimentario negativo.

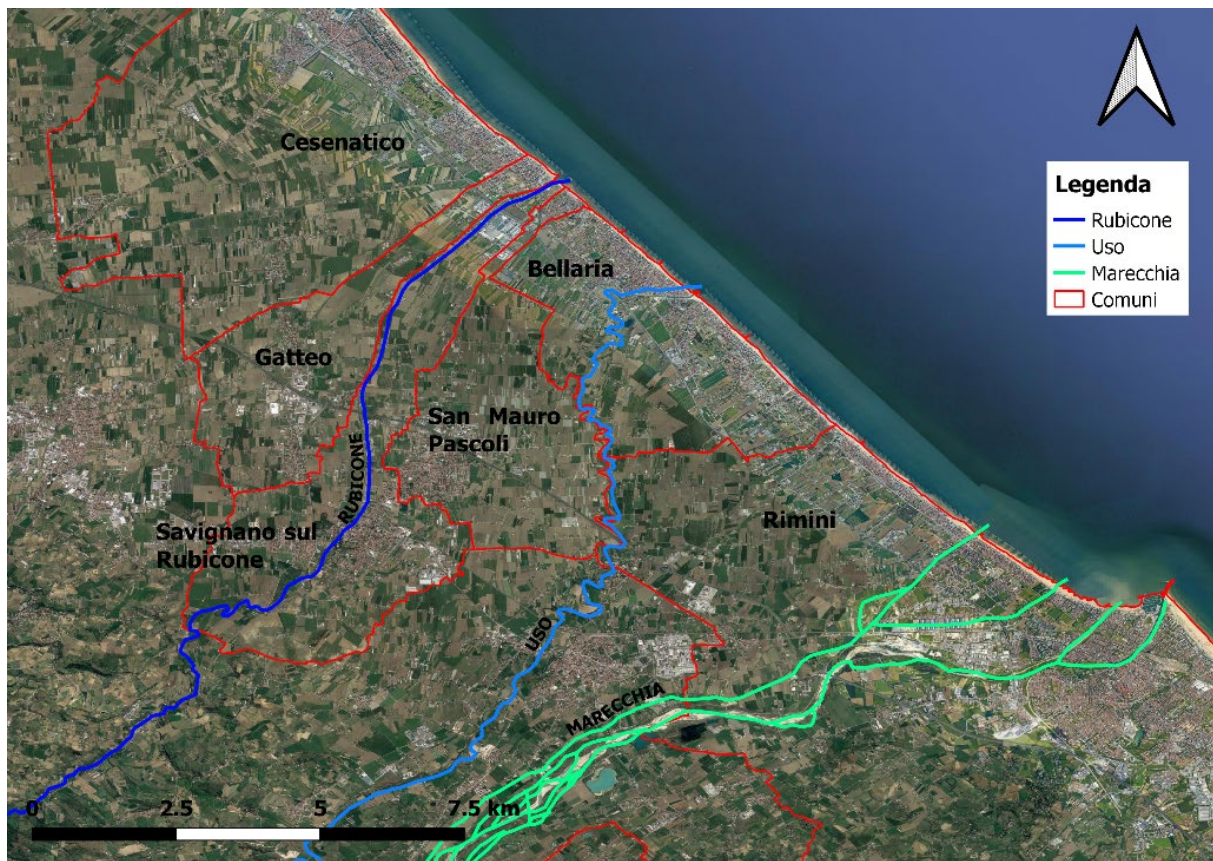


Figura 1.8 Vista dei principali fiumi che sfociano nella Macrocella 2.

Il tipo di sedimento presente sulle spiagge dell'area di studio, individuato dalla caratterizzazione a livello regionale su alcuni transetti di campionamento selezionati, mostra la prevalenza di sedimento sabbioso (Arpae, 2020). In particolare, seguendo la scala granulometrica di Udden (1914) e Wentworth (1922) per la classificazione del sedimento, si trovano principalmente sabbie fini (0.25 – 0.125 mm) nella fascia che va dalla spiaggia emersa fino alla profondità di 1 m; in quella successiva (che arriva a -3 m) sempre sabbie fini ma aumenta la percentuale di sabbie molto fini (0.125 – 0.063 mm) e in minima parte anche quella del silt (<0.063 mm). Infine, per la fascia che va dai -3 ai -7 m la granulometria media prevalente è quella delle sabbie molto fini seguita dal silt (Arpae, 2020). In linea di massima vi è, quindi, una tendenza alla diminuzione della granulometria verso mare, come è facile attendersi; tuttavia, si osserva anche una variabilità locale nella distribuzione granulometrica del sedimento, spesso dovuta alla presenza di opere sul fondale.

Rispetto alla campagna sedimentologica precedente che risale al 2012, ad esempio, nel campionamento del 2018 si è riscontrato un passaggio da silt a sabbia molto fine sul fondale di -4 m nell'area sud del molo di Cesenatico, dove è associato ad un leggero accumulo e un

passaggio inverso – da sabbia molto fine a silt – nei fondali di -3 m presenti nel lato terra rispetto le barriere frangiflutti (Figura 1.9).

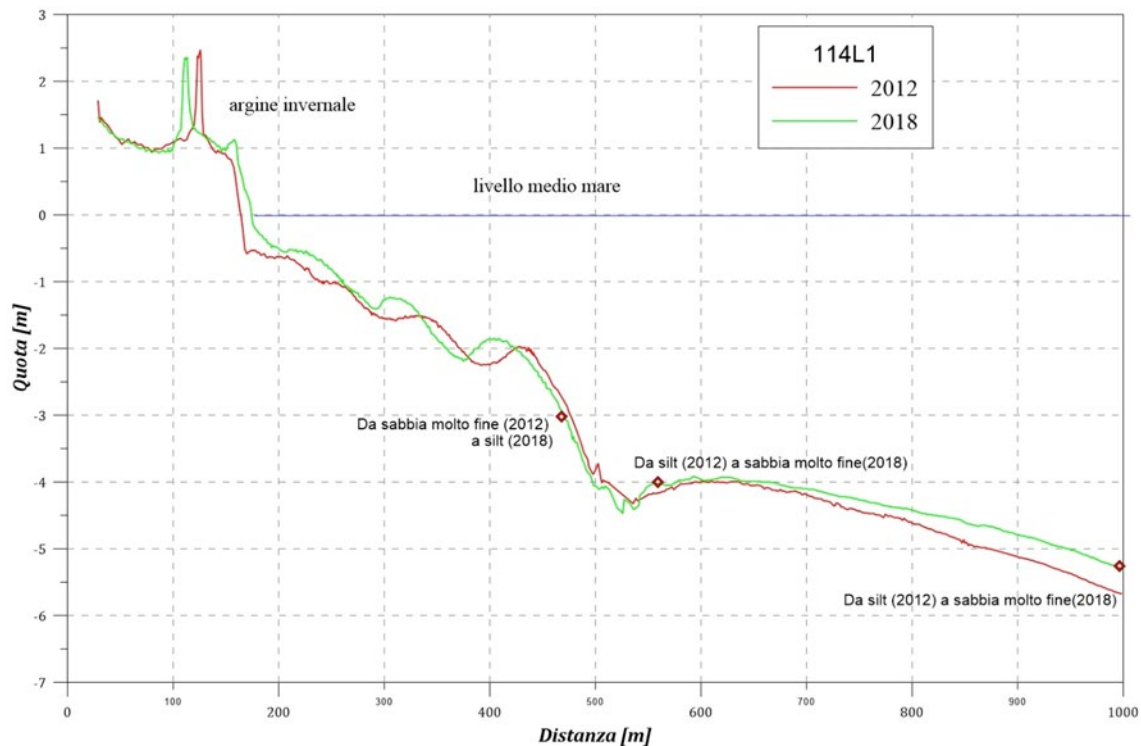


Figura 1.9 Confronto tra profilo topo-batimetrico nel 2012 e nel 2018 in un transetto di campionamento a sud del molo di Cesenatico, con indicazione della granulometria dei relativi campioni (da Arpae, 2020).

Per quanto riguarda la subsidenza, questo è un aspetto particolarmente critico a Cesenatico, dove è stato registrato un tasso massimo di 40-50 mm/anno relativo al periodo 1950-2005, con un abbassamento totale di 116 cm (Arpae, 2008). Il risultato è stato una diffusione e una accentuazione dei processi erosivi, che si sono tradotti in un aumento della vulnerabilità della costa con particolare riguardo alle numerose strutture costruite nell'arco degli anni in prossimità della spiaggia – vedi hotel, abitazioni, stabilimenti balneari – oltre che in modifiche sostanziali della linea di riva e dell'intero profilo di equilibrio della spiaggia sommersa ed emersa (Arpae, 2002; Arpae, 2008).

Dai dati ottenuti con le rilevazioni geodetiche più recenti risalenti al periodo 2011 – 2016, si osserva una riduzione del tasso di subsidenza che nel tratto in esame risulta ora essere di 3 mm/anno (Figura 1.2) (Regione Emilia-Romagna e Arpae, 2018). Nonostante il miglioramento del fenomeno, tuttavia, rimangono in maniera irreversibile gli abbassamenti di suolo che si sono verificati negli anni precedenti e così anche gli effetti legati ad essi.

1.2.1 Interventi di difesa e trend evolutivi del litorale

Come precedentemente affermato riguardo alla macrocella, il litorale in esame è interessato per tutta la sua estensione dalla presenza di opere longitudinali distaccate (Figura 1.6). Queste hanno generato un approfondimento del fondale sul lato mare fino a oltre -4 m, mentre un accumulo di sedimento fine si è verificato sul lato interno, cioè quello verso costa. In questo modo si è formato un gradino morfologico che rappresenta una interruzione del normale profilo di equilibrio della spiaggia e dei relativi processi di trasferimento del sedimento tra la spiaggia emersa e quella sommersa al di là delle barriere.

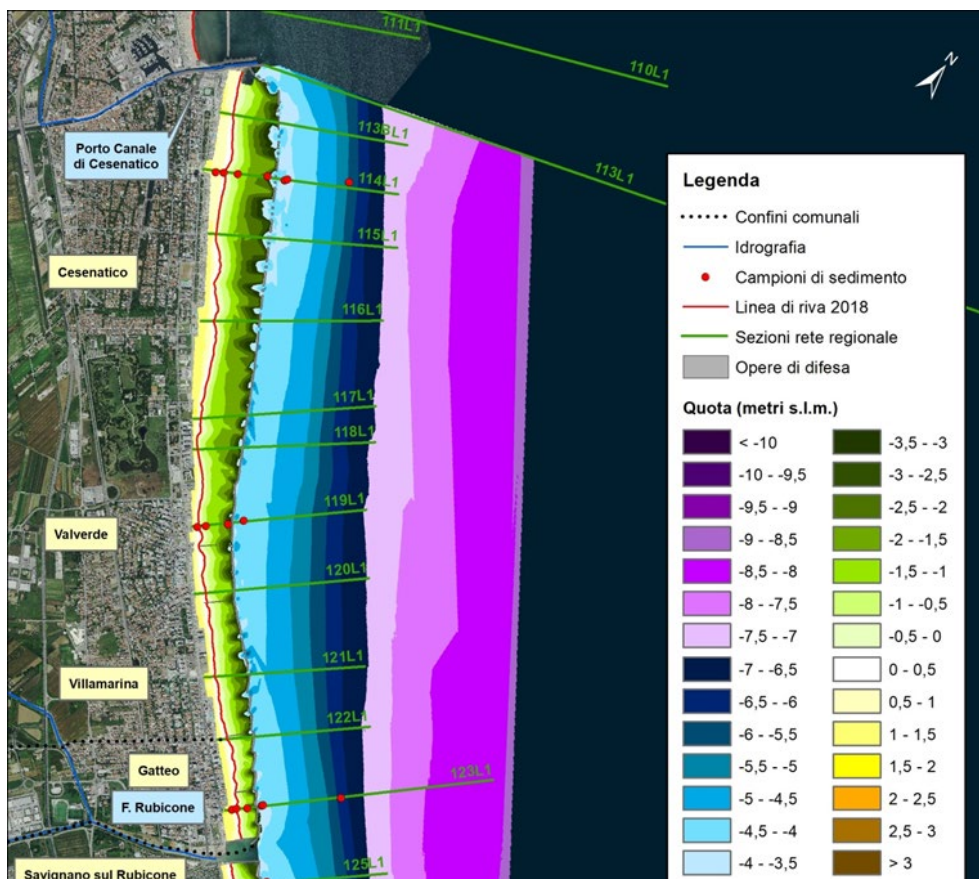


Figura 1.10 Dall'immagine si possono osservare la presenza dei tomboli fino al Portocanale di Cesenatico. Fonte: Arpa, 2020, modificata.

Altra modifica del litorale che si è verificata conseguentemente alla presenza di queste strutture è la tombolizzazione della spiaggia che, oltre a creare una linea di riva con un andamento diverso da quello che si avrebbe in condizioni naturali – intese come situazione in assenza di barriere -, comporta una accentuazione dell'erosione e della vulnerabilità della spiaggia (Figura 1.10) (Arpa, 2016).

Sono poi stati effettuati diversi interventi di ripascimento nei tratti immediatamente adiacenti all'area di studio: nel periodo 2006 – 2012 sono stati apportati quasi 11000 m³ di sabbia a Villamarina e quasi 75000 m³ a Valverde, dove una parte del volume è stato ricavato da sabbie accumulate in prossimità delle barriere frangiflutti riportate sulla spiaggia emersa con *scraper* (vedi paragrafo 1.3.1). Al contrario, nella spiaggia adiacente il Portocanale di Cesenatico ne sono stati prelevati circa 26000 m³ tramite paleggiamenti, con cui si sono rifornite altre spiagge (Tabella 1.1) (Arpae, 2016; Arpae, 2020).

Nel periodo che va dal 2012 al 2018 si conferma l'utilizzo del ripascimento come approccio di contrasto all'erosione e per aumentare l'apporto di sedimento nelle spiagge: il volume depositato nel tratto in esame risulta essere stato pari a circa 31000 m³, dei quali quasi 4000 m³ provengono anche in questo caso dalla zona di accumulo di Cesenatico (Tabella 1.1). Sulla provenienza del volume restante non si hanno a disposizione informazioni dettagliate, ma in generale i ripascimenti eseguiti nella macrocella di appartenenza nel suddetto periodo hanno incluso apporti esterni provenienti da giacimenti sottomarini, in minima parte da cave a terra e scavi edili e apporti interni provenienti da una zona di accumulo sommersa che si trova sul lato mare della scogliera a Cesenatico Ponente – prossima alla foce del Portocanale – oltre che da quella a Levante citata in precedenza (Arpae, 2020).

Area	2006 - 2012			2012 - 2018		
	Vrip	Vpre	Vimm	Vrip	Vpre	Vimm
Villamarina	10830	0	10830	11711	0	11711
Valverde	74265	0	74265	19180	0	19180
Cesenatico	0	26660	-26660	0	3860	-3860
Totale	85095	26660	58435	30891	3860	27031

Tabella 1.1. Volumi di sabbia movimentati nel tratto oggetto di studio e all'intorno. Vrip = ripascimento, Vpre = prelievo, Vimm = Vrip – Vpre (volume netto immesso). Fonti dati: Arpae, 2016; Arpae, 2020.

I principali cambiamenti avvenuti nel litorale di interesse sono anche, in parte, la conseguenza degli interventi di difesa eseguiti sul paraggio. A Valverde di Cesenatico (Figura 1.6), ad esempio, tra il 2004 ed il 2010 sono stati eseguiti interventi di modifica dell'assetto di alcune barriere parallele emerse, sono stati rimossi dieci pennelli trasversali, costruiti tre nuovi ed eseguito un ripascimento (Arpae, 2008; Arpae, 2016). Dal monitoraggio eseguito da Arpae nel

periodo che va dal 2006 al 2012 si è potuto osservare un riallineamento della linea di riva nel suddetto tratto (Arpae, 2016).

La spiaggia adiacente il molo di Levante di Cesenatico invece, registra generalmente una variazione volumetrica negativa, dovuta ai prelievi di sabbia qui prelevata per compensare tratti in erosione nelle vicinanze tramite paleggiamenti: nonostante questo però, il paraggio è considerato stabile in quanto la rimozione di sedimento non genera variazioni significative.

Ad oggi – stando ai dati a disposizione risalenti all’ultima campagna di monitoraggio 2012 – 2018 - le spiagge appartenenti al tratto in esame sono classificate secondo l’indicatore ASPE come “Stabile” (quella di Cesenatico) e come in “Equilibrio Precario” (quelle di Valverde e Villamarina), questo perché la quantità di sabbia apportata attraverso ripascimenti e paleggiamenti ha permesso il mantenimento del bilancio sedimentario e della linea di riva. Al 2018 la spiaggia si estende in media tra i 75 m e i 90 m a Villamarina e Valverde e 140 m per quella di Cesenatico (Arpae, 2020).

1.2.2 Rischio costiero

Il rischio costiero che grava sull’area di studio è dovuto principalmente ad erosione costiera e fenomeni di ingressione marina. A contrasto del primo sono state realizzate, come detto in precedenza, opere di difesa rigide e interventi di ripascimento. Per ridurre il fenomeno di ingressione marina, che in passato ha colpito il litorale di Cesenatico fino al centro storico, nel 2005 è stato terminato un progetto che ha visto la realizzazione di uno sbarramento mobile, le cosiddette “porte vinciane” (Figura 1.11) il cui compito dovrebbe essere quello di impedire la risalita dell’acqua di mare verso terra durante fenomeni di acqua alta superiori ai 90 cm (Arpae, 2008).



*Figura 1.11 Fotografia dello sbarramento mobile del Portocanale di Cesenatico.
Fonte: Arpae, 2008.*

A distanza dal portocanale, per contrastare tale problema è stata poi creata una separazione tra la spiaggia e la città di Cesenatico, costruendo un rilevato di terra lungo 1.4 km, nel primo tratto a Sud del portocanale, al retro degli stabilimenti balneari. La struttura è alta 1 metro e larga 20 metri ed è stata dotata di fioriere, alberi e giochi per renderla visivamente migliore dal punto di vista paesaggistico (Figura 1.12) (Arpae, 2008).



Figura 1.12 Fotografia del rilevato creato a Cesenatico per proteggere l'abitato dall'ingressione marina. Alle spalle del punto di vista si trovano gli stabilimenti balneari.

Come si può osservare dalla carta delle criticità costiere in Figura 1.13, le spiagge appartenenti all'area di studio risultano essere soggette a rischio di inondazioni per eventi con tempi di ritorno di 10 anni (P3) e 100 anni (P2), in quanto aventi una quota massima di spiaggia emersa minore rispettivamente di 1.49 m e 1.81 m (Regione Emilia-Romagna, 2016).

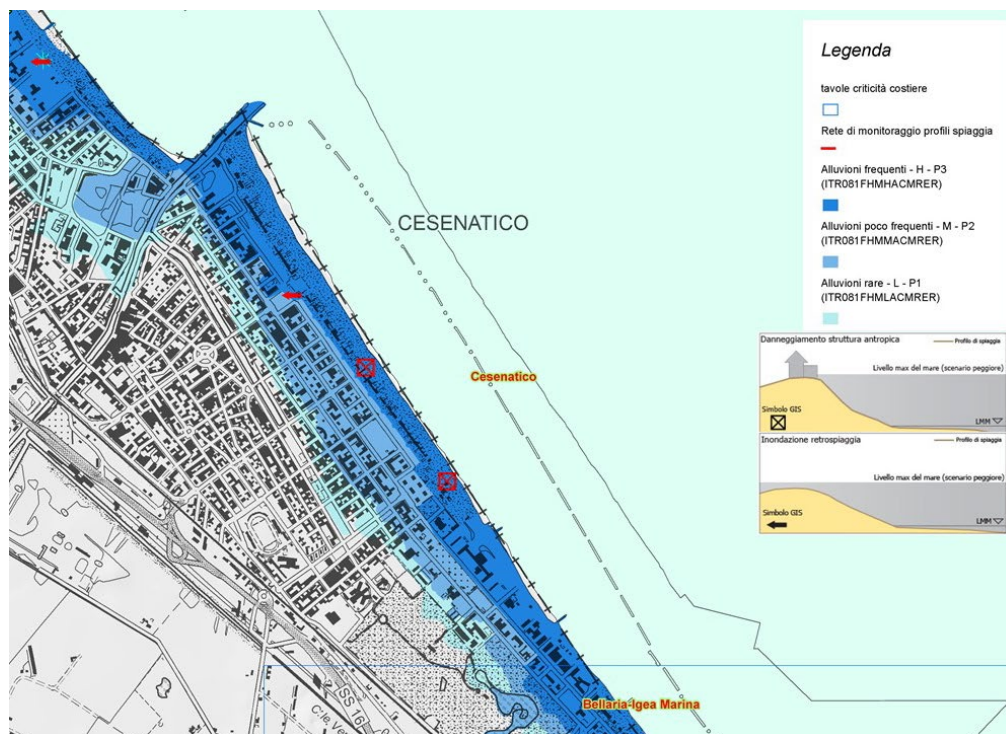


Figura 1.13 Carta della vulnerabilità ad allagamento per eventi con diversi tempi di ritorno.
Fonte: https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/costa/in_risk

Il problema dell'area urbana di Cesenatico però non deriva solo da mare, l'allagamento può avvenire anche da terra: in concomitanza di forti piogge e mareggiate importanti, con la chiusura delle porte vinciane per evitare l'ingressione dell'acqua marina, le acque meteoriche della città e del territorio retrostante non sarebbero più in grado di fluire verso mare attraverso il portocanale come normalmente dovrebbe avvenire. Per risolvere questo problema è stato creato un impianto idrovoro che ne permette lo scarico a lato delle porte vinciane – anche se solo per basse quantità -, e sono state create casse di espansione a monte del centro abitato (Arpae, 2008).

1.3 La gestione del sedimento sui litorali

1.3.1 Le "buone pratiche"

Al fine di contrastare l'erosione costiera, nell'ambito delle attività del Tavolo Nazionale sull'erosione costiera (TNEC, di cui fanno parte il Ministero dell'Ambiente, della Tutela del

Territorio e del Mare, ISPRA e le Regioni interessate, tra cui anche l'Emilia-Romagna) sono state realizzate linee guida che contengono, oltre alla raccomandazione di suddividere la costa in unità gestionali per ottenere migliori risultati ed evitare una gestione frammentata, anche indicazioni sulle “buone pratiche” da seguire nella gestione del litorale per quanto riguarda, nello specifico, la gestione della “risorsa sedimento” (Figura 1.14). A tale riguardo, oltre a gestire i possibili apporti di sedimento esterni al sistema litoraneo, viene dato un peso importante alla gestione di quelli interni, pratica definita “cruciale” per la manutenzione della costa (MATTM-Regioni, 2018).



Figura 1.14 Esempio di approccio di gestione integrata per contrastare l'erosione costiera (MATTM-Regioni, 2018).

Questi accumuli sono spesso ubicati al ridosso di opere aggettanti come moli o opere di difesa parallele o trasversali. Il loro riutilizzo è destinato ad un significativo incremento (TNEC, 2018) e vengono suggerite varie modalità di recupero del sedimento. In presenza di accumuli litoranei – sia sommersi che emersi - le linee guida prevedono che dove possibile, i sedimenti siano movimentati con sistemi di back-pass se depositati nella spiaggia sopraflutto o di by-pass se sulla spiaggia sottoflutto (MATTM-Regioni, 2018).

Per gli accumuli di sedimento che si formano nella zona d'ombra delle barriere frangiflutti si può invece utilizzare la movimentazione attraverso mezzi meccanici chiamati *scraper* (Figura 1.15) – nati per l'utilizzo agricolo ma adattati a quello marino – che vengono trainati da trattori o ruspe verso la spiaggia emersa.



Figura 1.15 Scraper trainato da un trattore in fase di deposito della sabbia precedentemente prelevata.
Fonte: <https://www.ecodemolizionisrl.com/pulizia-spiagge-e-ripascimenti>

Questo mezzo è sostanzialmente un rimorchio dotato di ruote, in grado di prelevare il materiale tramite una superficie tagliente la cui altezza è regolabile per poter determinare la profondità alla quale agire. La sabbia prelevata viene contenuta nello *scraper* stesso, e quando riempito viene espulsa sulla spiaggia. È una pratica relativamente poco costosa che viene eseguita periodicamente prima dell'avvio della stagione balneare per aumentare la superficie di spiaggia emersa (MATTM-Regioni, 2018).

Recenti indicazioni sulla gestione della “risorsa sabbia” (Regione Emilia-Romagna, 2021) evidenziano poi l'importanza di altre operazioni per limitare le perdite di sedimento interno al sistema litoraneo.

Ad esempio, la pulizia della spiaggia dovrebbe essere svolta eseguendo la vagliatura in sito (Figura 1.16) durante il periodo invernale e lo stoccaggio del materiale asportato, sottoponendo poi anch'esso a vagliatura prima dell'utilizzo per seguente ripascimento o realizzazione dell'argine invernale. Si eviterebbe in questo modo una perdita potenziale di sabbia stimata essere pari al 25-30% dei volumi riportati a ripascimento annualmente (Farina, 2014). Tronchi spiaggiati e altro materiale di origine biologica dovrebbe essere mantenuto in situ come trappola di sedimento preso in carico dal vento.



Figura 1.16 Vagliatore all'opera su una spiaggia. Questo strumento è in grado di separare la frazione da smaltire dalla sabbia idonea al riutilizzo. Fonte: <https://www.ecodemolizionisrl.com/pulizia-spiagge-e-ripascimenti>

Sullo stesso concetto si basano le barriere frangivento che dovrebbero essere create per limitare la perdita di sabbia: sono solitamente costituite da reti biodegradabili e pali in legno, e sono orientate a seconda della direzione dei venti, possono essere anche posizionate sugli argini invernali (Figura 1.17).

La realizzazione di questi ultimi dovrebbe avvenire utilizzando sabbie provenienti da dragaggi oppure da operazioni di vagliatura; la tendenza, invece, è spesso quella di movimentare sabbia dalla battigia verso il retrospiaggia, ma in questo modo non si incrementa il budget del sedimento disponibile e si aumenta la pendenza del *foreshore* e l'esposizione all'erosione, perché le onde tenderanno a frangersi più vicino alle strutture presenti.



Figura 1.17 Esempio di argine invernale a protezione degli stabilimenti balneari. Fonte: Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione. Arpa, 2008.

Ponendo l'attenzione sul litorale oggetto di studio, tra le pratiche sopracitate, oltre i ripascimenti, quella maggiormente messa in atto è sicuramente la costruzione dell'argine invernale che viene realizzato periodicamente al termine della stagione balneare lungo tutto il tratto di spiaggia. Nell'arco temporale durante il quale sono stati eseguiti i rilievi utilizzati in questa tesi, in prossimità di febbraio/marzo sono stati eseguiti livellamenti della spiaggia tramite l'uso dello *scraper* al fine di aumentare la quantità di sedimento disponibile sulla spiaggia emersa, poi ad aprile/maggio l'argine è stato steso in vista della balneazione.

Dal punto di vista della pulizia della spiaggia, è previsto durante la stagione autunnale ed invernale il mantenimento in sito dei tronchi spiaggiati e la gestione delle biomasse in generale, in modo che fungano da trappola per i sedimenti e da contrasto all'azione del mare e del vento. Oltre a ciò, indipendentemente dalla stagione, sono seguite le direttive previste per la gestione dei rifiuti urbani ed assimilati, che prevedono la raccolta dei cumuli di rifiuti disposti dai gestori delle spiagge in prossimità della battigia, per poi essere vagliati in modo da recuperare la sabbia idonea e smaltire il materiale di scarto (ATERSIR, 2019). In estate, a causa della ridotta disponibilità di spazio nelle spiagge in esame, il materiale viene stoccato in depositi che spesso si trovano lontano dalla costa complicandone però l'utilizzo ed aumentando i costi di gestione rispetto alle zone limitrofe (Regione Emilia-Romagna, 2021).

Per quanto riguarda invece le buone pratiche non messe in atto, si denota il mancato refluento sistematico del sedimento che si deposita periodicamente nel Portocanale di

Cesenatico, pratica che andrebbe a ridurre la difficoltà di reperimento del materiale per la manutenzione ordinaria delle spiagge, che spesso vede ancora l'utilizzo di sabbie da cava (Regione Emilia-Romagna, 2021).

2 Dati e metodi

2.1 I dati disponibili

L'acquisizione dei dati è stata effettuata dall'azienda Adriarilievi del Dott. Francesco Stecchi (RA) ed ha interessato un ampio intervallo di tempo che si estende da febbraio 2020 fino a maggio 2021 (Tabella 2.1). Durante questo periodo sono cambiati gli strumenti utilizzati, inizialmente un GNSS sulla spiaggia emersa e nel primo metro di quella sommersa, successivamente anche un ecoscandaglio single-beam, questo perché l'area di studio si è progressivamente estesa ed ha richiesto l'indagine di fondali fino alle barriere frangiflutti e oltre, non direttamente raggiungibili con la medesima strumentazione utilizzata per la spiaggia emersa (Figura 2.1). Nell'ambito dello svolgimento di questa tesi, ho partecipato personalmente al rilievo di maggio 2021.

Periodo	Strumentazione	Sezione	Tratto	Condizione spiaggia
feb-20	GNSS	fino a -1 m	Piazza A. Costa - Bagno Britannia	Profilo invernale
apr-20	GNSS	fino a -1 m	Piazza A. Costa - Bagno Genova	Profilo "post-scaper"
mag-20	GNSS	fino a -1 m	Piazza A. Costa - Bagno Genova	Profilo pre-estivo
set-20	GNSS	fino a -1 m	Molo di Levante - Bagno Genova	Profilo di fine estate
nov-20	GNSS + SBES	fino a barriere frangiflutti	Molo di Levante - Bagno Tahiti	Profilo invernale
feb-21	GNSS + SBES	fino a -1 m	Molo di Levante - Bagno Tahiti	Profilo invernale
mar-21	GNSS	fino a -1.5 m	Molo di Levante - Bagno Tahiti	Profilo "post-scaper"
mag-21	GNSS + SBES	oltre barriere frangiflutti	Molo di Levante - Bagno Tahiti	Profilo pre-estivo

Tabella 2.1 Periodi di acquisizione dei dati, tipo di strumentazione utilizzata (SBES = Single-Beam Echo Sounder), estensione della sezione, del tratto e relativo "profilo di spiaggia".

I periodi di esecuzione dei rilievi sono stati stabiliti in modo tale da poter rappresentare le diverse condizioni di spiaggia che si susseguono ciclicamente nel corso dell'anno e che spesso

coincidono con variazioni morfologiche, naturali e antropiche. Quindi sono stati distinti diversi “profili di spiaggia”, riportati in Tabella 2.1 insieme alle informazioni relative ai singoli rilievi.



Figura 2.1 Esempio di un tratto di rilievo con le due differenti strumentazioni: in giallo i dati ottenuti con GPS nella spiaggia emersa e nella prima parte sommersa, in azzurro i dati ottenuti con ecoscandaglio single-beam nelle aree a profondità maggiore.

2.2 Acquisizione dei dati

Premettendo che l’acquisizione dei dati è avvenuta sempre in condizioni di mare calmo, vento debole ed in assenza di precipitazioni, per una parte di rilievi topo-batimetrici è stata utilizzata una piccola imbarcazione (Figura 2.2) sulla quale è stata installata la strumentazione necessaria: un ecoscandaglio single-beam a singola frequenza (210 kHz) “Hydrobox” prodotto da SyQwest Inc. con un fascio acustico di 8° di apertura ed un ricevitore GNSS a doppia frequenza “Trimble R8” impostato in modalità NRTK. La risoluzione nominale di tali strumenti è rispettivamente di 1 cm in una colonna d’acqua minore di 100 m per il primo e di circa 1.5 cm per il secondo.



Figura 2.2 Imbarcazione utilizzata per i rilievi batimetrici.



Figura 2.3 Postazione PC a bordo dell'imbarcazione

L'antenna del GNSS è stata installata all'estremità superiore di un supporto posto a sbalzo dell'imbarcazione, mentre a quella inferiore il trasduttore dell'ecoscandaglio. Inoltre, a bordo è stato posizionato un *laptop* (Figura 2.3) al quale sono stati collegati i due strumenti sopracitati tramite uno *switch*. In questo modo, grazie all'ausilio del software NavPro prodotto dalla società *Communication Technologies*, è stato possibile accoppiare le rispettive stringhe di dati ottenute. Lo stesso applicativo ha anche permesso, impostando come base il livello

relativo ai transetti di progetto, di stabilire la rotta di navigazione e contemporaneamente, sfruttando anche l'interfaccia visiva del software dell'ecoscandaglio, di verificare in tempo reale la misura del battente d'acqua in modo tale da rendersi conto di possibili errori di misurazione ed eventualmente ripetere la misura.

Il metodo appena descritto si è potuto utilizzare per la porzione di transetto che si estende, partendo dall'estremità lato mare, fino ad una profondità di circa 60 cm e non oltre a causa del pescaggio dell'imbarcazione. La restante porzione di fondale, così come la spiaggia emersa, è stata rilevata tramite un ricevitore GPS "Topcon" a doppia frequenza con sistema integrato GPS+Glonass e modulo RTK/GGD utilizzato in modalità NRTK, con una risoluzione di 2/3 cm in orizzontale e 3/4 cm in verticale. Lo strumento è complessivamente costituito da un'asta sulla quale è avvitata l'antenna e da un controller ancorato a sbalzo ad altezza regolabile e i due comunicano tramite *Bluetooth*. Il controller è dotato di una carta SIM che ne permette il collegamento con le stazioni permanenti "TopNET live" (ex "NETGEO") presenti sul territorio, usufruendo così del servizio di correzione differenziale. Inoltre, tramite una scheda SD, è stato possibile caricare al suo interno un file contenente i transetti di progetto e i dati acquisiti nelle giornate precedenti tramite ecoscandaglio, quindi, grazie al software "MERCURIO" di cui è dotato si è potuto osservare le porzioni di transetto da riprendere a mare e seguire la traccia per terminare l'acquisizione dei dati sulla spiaggia emersa. In questo caso, la frequenza di acquisizione è stata puramente manuale e pari a circa un punto ogni 10 metri, mentre per quelle ottenute con ecoscandaglio single-beam si parla di 10 punti ogni secondo in modalità automatica.

2.3 Elaborazione dei dati

Sui dati così acquisiti, la fase di elaborazione ha visto prima di tutto la loro organizzazione in un dataset in cui sono stati riportati: l'orario di acquisizione, coordinata Est, coordinata Nord, quota ellissoidica, qualità del segnale GNSS e valore del battente d'acqua, cioè la distanza tra il trasduttore ed il fondale (Figura 2.4).

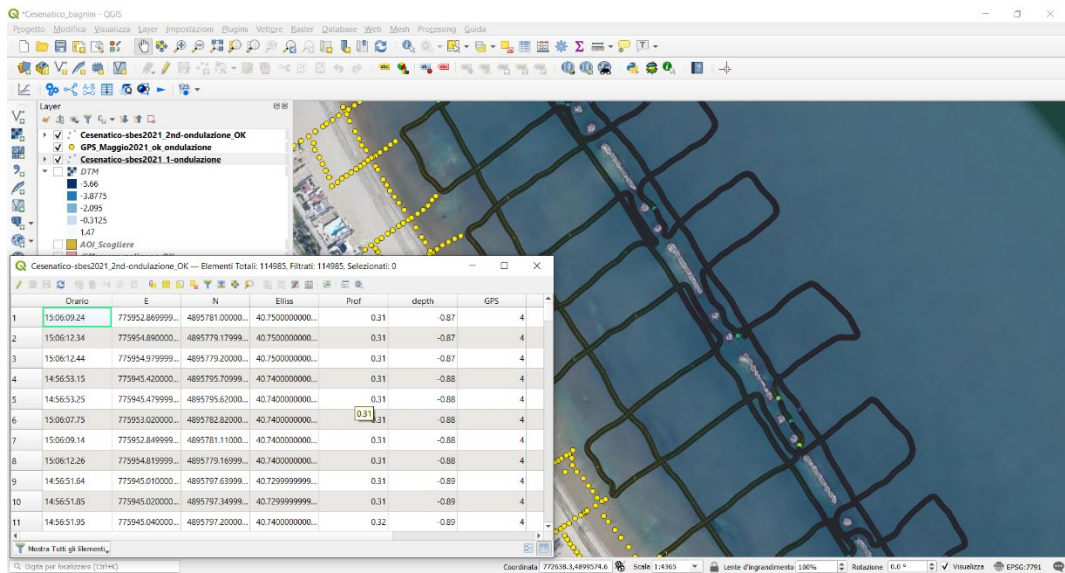


Figura 2.4 Immagine dei dati riportati in ambiente QGIS nella quale si può osservare la "tabella attributi" utilizzata per la loro gestione.

Il file è stato poi importato nel software QGIS per eliminare i “falsi eco” batimetrici, cioè quei dati che hanno registrato un valore di battente d’acqua pari a 0 ed è stata poi calcolata la profondità “reale” del fondale sottraendo alla quota ellissoidica misurata dall’antenna posta all’estremità superiore dell’asta, l’ondulazione del geode, la misura del battente d’acqua e la lunghezza dell’asta stessa (Figura 2.5), riuscendo così ad ottenere una misura equivalente a quella che si avrebbe utilizzando un’asta lunga fino al fondale dotata di un’antenna.

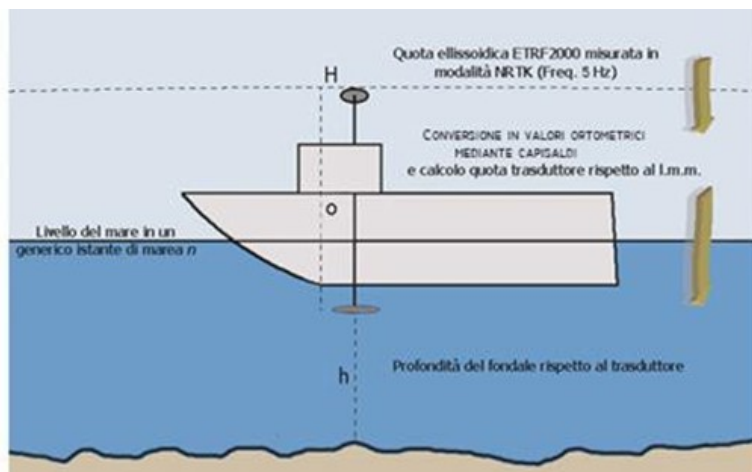


Figura 2.5 Schema di correzione del dato di profondità.

Per quanto riguarda l’ondulazione del geode (che viene sottratta per riportare le misure alla quota ortometrica, cioè al livello medio del mare) sono stati utilizzati valori ottenuti sottraendo quello relativo alla quota ortometrica a quello della quota ellissoidica, entrambi riportati nelle monografie dei capisaldi denominati “RICE0600” e “RICE0700” (vedi Allegato 1

e Allegato 2) prodotti da Arpae e Regione Emilia-Romagna. Quindi, sono stati creati dei “conci topografici”, aree all’interno delle quali corrispondono i valori trovati, ognuno di questi è stato poi associato a tutte le misure ricadenti nelle rispettive aree (Figura 2.6).



Figura 2.6 Conci topografici realizzati con QGIS, ad ogni area è associato un valore di ondulazione.

È stato possibile agire in questo modo in quanto le misure altimetriche e planimetriche ottenute sono state riferite al Datum nazionale ETRS89-ETRF2000(2008.0) e proiettate nel reticolo UTM32 come nelle monografie e come specificato sul sito della Regione Emilia-Romagna.

Una volta trovato il dato di profondità “effettiva”, per ogni periodo di campionamento, è stato possibile realizzare i rispettivi DTM (*Digital Terrain Model*) tramite l’interpolazione dei singoli punti: il software utilizzato in questo caso è stato “Global Mapper” e ha permesso di ottenere una rappresentazione dell’andamento della batimetria e della topografia della spiaggia generale (Figura 2.7).

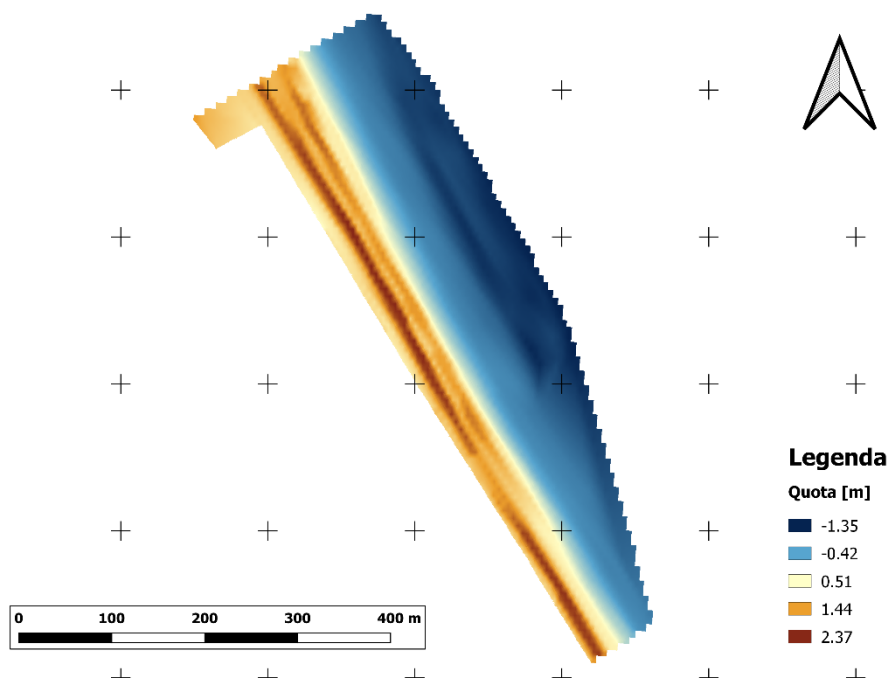


Figura 2.7 DTM realizzato con il software Global Mapper ed importato su QGIS.

È bene specificare che dall'interpolazione, inizialmente, si ottiene una maglia irregolare di triangoli, che è stata poi esportata in formato griglia con una risoluzione di 1 m x 1 m in modo che la rappresentazione fosse qualitativamente migliore. Se per i punti che si trovano lungo i transetti la risoluzione è sicuramente adeguata, in quanto – in particolare per i dati di ecoscandaglio - si ha anche più di un punto al metro, i transetti distano tra loro centinaia di metri e questo richiederebbe la formazione di celle dello stesso ordine di grandezza, che però avrebbe potuto fare perdere informazioni importanti come, ad esempio, la presenza di barre di ampiezza inferiore a quella della maglia. E' stata quindi valutata come adeguata la risoluzione di 1 m x 1 m, in quanto la morfologia del fondale nell'area è estremamente omogenea. Un'alternativa sarebbe stata quella di creare delle interpolazioni di dimensioni minori, corrispondenti ad una sorta di offset del transetto: si sarebbe ottenuto però, un risultato frammentato che non avrebbe fornito una rappresentazione generale continua e intuitiva dell'area. L'informazione del dato originale è comunque mantenuta, in quanto le celle da 1 m di lato hanno in ogni caso il valore medio che avrebbe la cella di dimensioni maggiori, e che viene integrata dai profili di spiaggia creati lungo le sezioni sulle quali risultano i punti di campionamento. Sulla base dei DTM è stato possibile, tramite funzioni specifiche del software, ricavare profili di spiaggia, ottenere informazioni relative alle curve di livello e quindi anche sulla linea di riva e realizzare confronti tra la morfologia della spiaggia in periodi diversi al fine di determinare una condizione di accumulo o perdita in termini di volume di sabbia.

Nel capitolo successivo saranno illustrati gli elaborati ottenuti e discussi i confronti realizzati tra i risultati dei rilievi nei vari periodi temporali.

3 Risultati

3.1 Confronti tra DTM

In questo capitolo vengono confrontati tra loro i risultati dei vari rilievi topografici e batimetrici seguiti in successione da febbraio 2020 a maggio 2021. Dall'estensione delle aree dei singoli rilievi eseguiti e del relativo DTM, dipende l'estensione delle aree sulle quali si sono ottenuti i DTM delle differenze di quota/profondità; questi coincideranno con l'area minore tra le due messe a confronto. Per rendere più chiara la comprensione degli elaborati che di seguito verranno presentati, in Figura 3.1 sono riportate le aree indagate nei rispettivi rilievi.

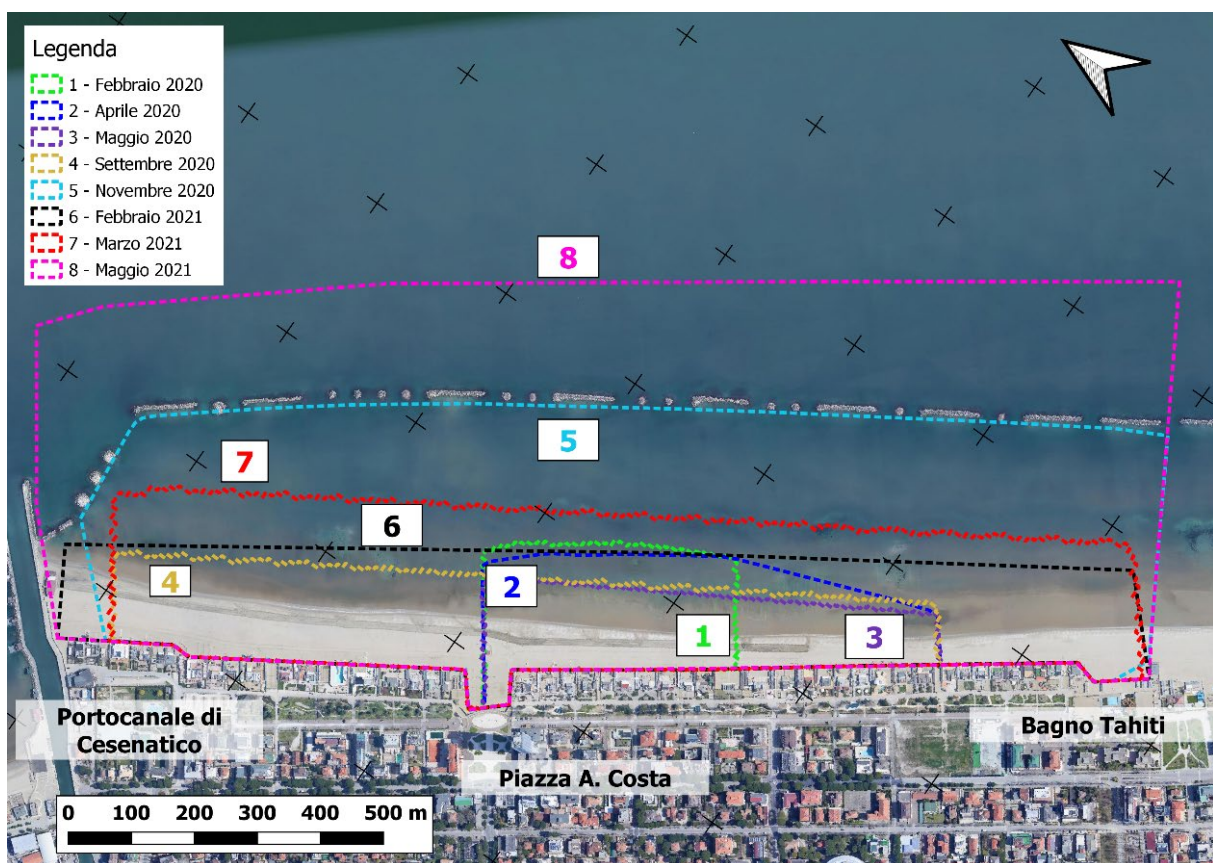
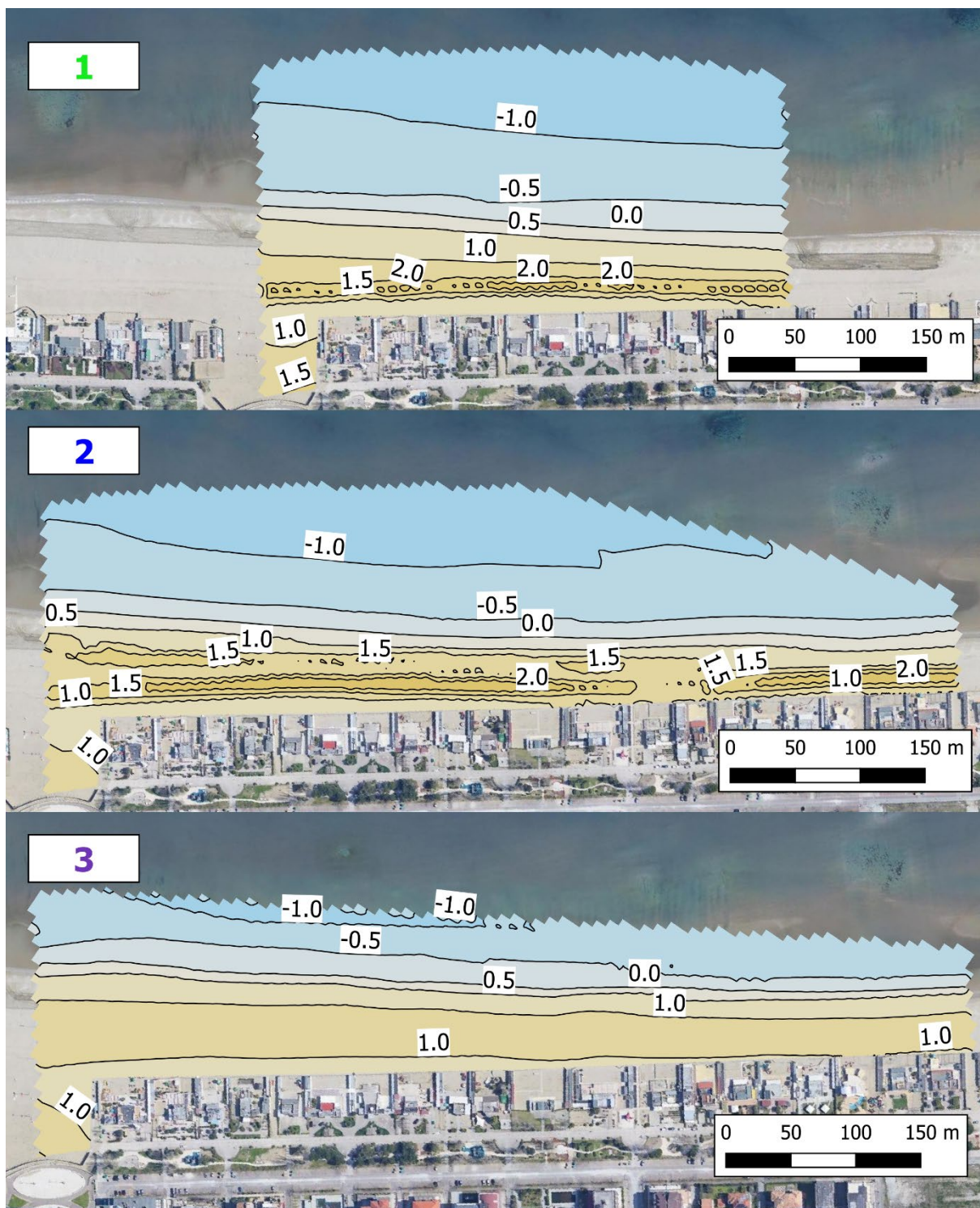


Figura 3.1 Estensione areale dei settori interessati dai rilievi.

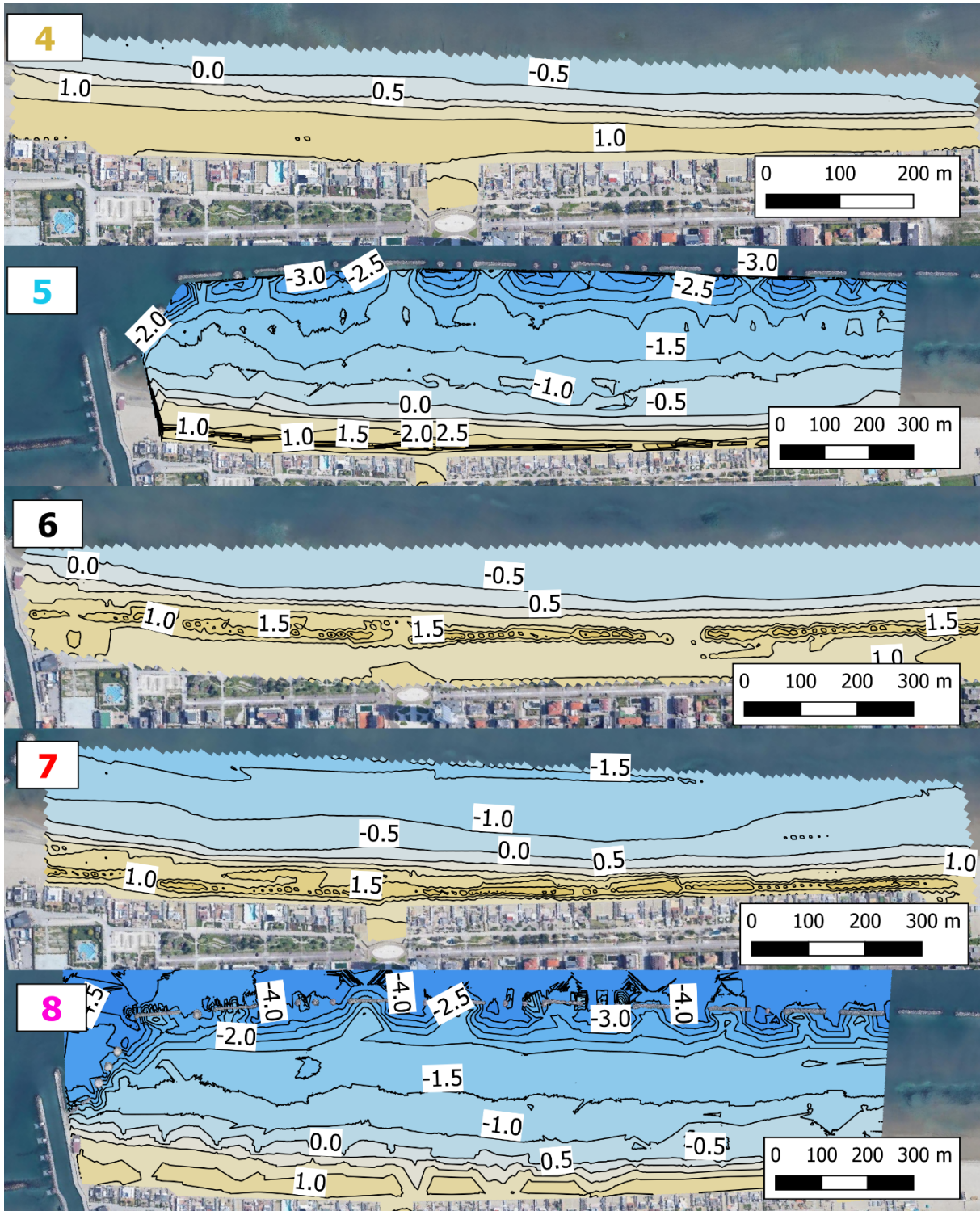
In Figura 3.2 sono riportate le mappe di batimetria per ogni rilievo eseguito, in ordine cronologico. In generale, la morfologia della spiaggia appare piuttosto regolare, con tendenza all'approfondimento via via che ci si allontana dalla linea di riva verso mare; irregolarità ed approfondimenti localizzati del fondale (fino a -3 m) appaiono in concomitanza dei varchi tra le barriere frangiflutti (rilievi 5 e 8).



Legenda

Quota/Batimetria [m]	-4.0 - -3.5	-2.0 - -1.5	0.0 - 0.5	2.0 - 2.5	4.0 - 4.5
<= -4.5	-3.5 - -3.0	-1.5 - -1.0	0.5 - 1.0	2.5 - 3.0	> 4.5
-4.5 - -4.0	-3.0 - -2.5	-1.0 - -0.5	1.0 - 1.5	3.0 - 3.5	
	-2.5 - -2.0	-0.5 - 0.0	1.5 - 2.0	3.5 - 4.0	

Figura 3.2 Mappe delle batimetrie (isobate in metri) relative ai vari rilievi (la numerazione dei rilievi fa riferimento alla Figura 3.1).



Legenda

Quota/Batimetria [m]	-4.0 - -3.5	-2.0 - -1.5	0.0 - 0.5	2.0 - 2.5	4.0 - 4.5
<= -4.5	-3.5 - -3.0	-1.5 - -1.0	0.5 - 1.0	2.5 - 3.0	> 4.5
-4.5 - -4.0	-3.0 - -2.5	-1.0 - -0.5	1.0 - 1.5	3.0 - 3.5	
	-2.5 - -2.0	-0.5 - 0.0	1.5 - 2.0	3.5 - 4.0	

Figura 3.2 (continua).

Iniziando il confronto tra i vari DTM in ordine cronologico, in Figura 3.3 è riportato il DTM ottenuto dalla differenza tra il rilievo di febbraio 2020 e quello di aprile 2020: le dimensioni della mappa coincidono con l'estensione del primo dei due rilievi citati, in quanto più ridotto. Nella figura sono riportate le aree di accumulo e perdita di quota (per rimozione di sedimento) con colore diverso a seconda della loro entità, rispettivamente nei toni del giallo/arancione e dell'azzurro. Ciò che si osserva in Figura 3.3 è la prevalenza di aumento di quota sulla spiaggia emersa (da 10 a 50 cm rispetto al rilievo precedente), a formare due accumuli paralleli. Questo assetto è in relazione alla movimentazione della sabbia effettuata dagli *scraper* nel mese di aprile (condizione "post-scraper" in Tabella 2.1), quando parte della sabbia è stata portata dalla spiaggia sommersa a quella emersa.

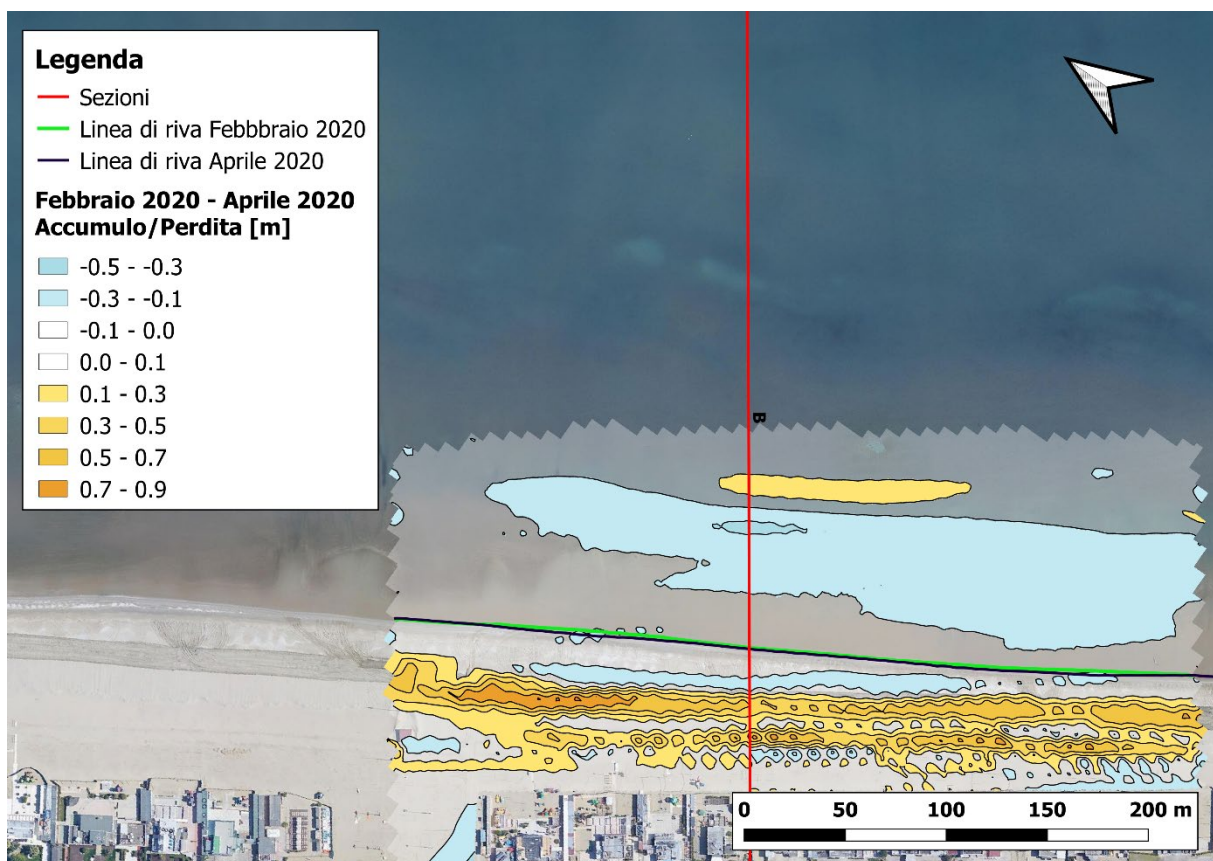


Figura 3.3 Differenza di quota/profondità tra il DTM di febbraio 2020 e quello di aprile 2020. La linea rossa rappresenta la traccia della sezione "B" (vedi paragrafo 3.2)

Un'altra possibile conseguenza di tale intervento si registra, infatti, nella spiaggia sommersa come una larga zona di perdita di quota: l'abbassamento del fondale in linea di massima va da 10 a 30 cm, e rappresenta verosimilmente l'area di rimozione del sedimento.

Sono inoltre presenti ampie aree – rappresentate con un retino semi-trasparente nei toni neutri - nelle quali la variazione di quota/profondità è compresa entro ± 0.1 metri. In queste

aree le variazioni non sono considerate come significative dato che ricadono nel *range* di errore associato alle misure topo-batimetriche (vedi capitolo 2.3) e quindi tali aree si considerano come relativamente stabili. Anche la linea di riva non appare interessata da modifiche rilevanti.

Il secondo confronto è quello tra il rilievo di aprile e maggio 2020: l'estensione dell'area sulla quale è possibile un paragone è maggiore rispetto alla precedente (Figura 3.1).

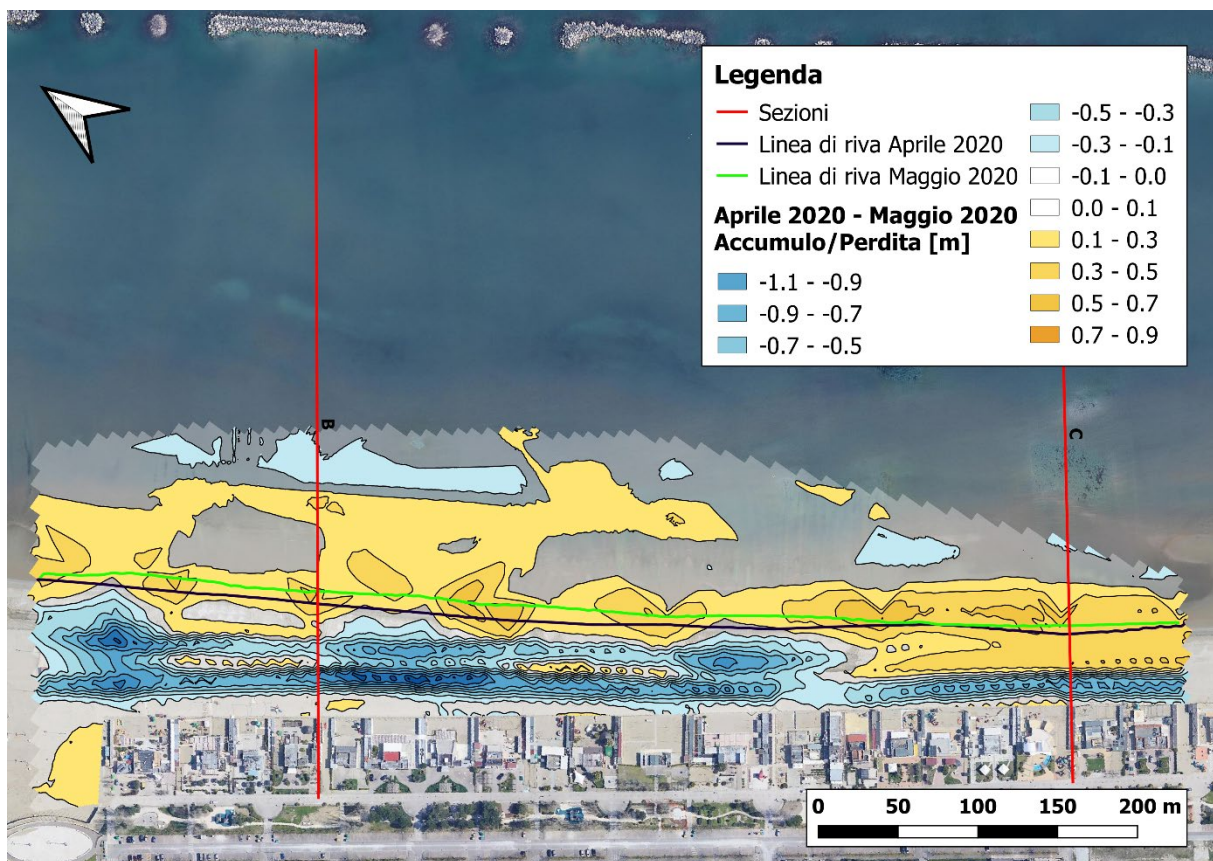


Figura 3.4 Differenza di quota/profondità tra il DTM di aprile e maggio 2020. Le linee rosse rappresentano le tracce delle sezioni "B" e "C" (vedi paragrafo 3.2).

Dalla Figura 3.4 si nota come su gran parte della spiaggia emersa è avvenuta una perdita in quota fino ad 1 metro; essa rappresenta l'abbassamento dovuto alla stesura dell'argine invernale precedentemente presente. Al contrario, sulla battigia e nella prima spiaggia sommersa si notano aree di accumulo (spessori dell'ordine dei 50 cm, fino a raggiungere i 70 cm in alcuni punti): questi aumenti di quota localizzati potrebbero essere in relazione allo spostamento del sedimento effettuato nella realizzazione "artificiale" dell'assetto di spiaggia estivo, quando la tendenza dei gestori degli stabilimenti è quella di spingere sedimento sulla battigia per aumentarne la quota e quindi anche l'area di spiaggia emersa sfruttabile (si noti

l'avanzamento della linea di riva a maggio 2020). In questo modo, inoltre, parte del sedimento torna a distribuirsi nella spiaggia sommersa sotto l'azione del moto ondoso. Risultano presenti anche zone dove la variazione di quota è considerevole come non significativa soprattutto nella spiaggia sommersa.

Il confronto seguente che è stato possibile realizzare è quello tra il rilievo di maggio 2020 e quello di settembre 2020: anche in questo caso l'estensione del confronto coincide con quella dell'area del primo dei due in quanto minore rispetto al secondo.

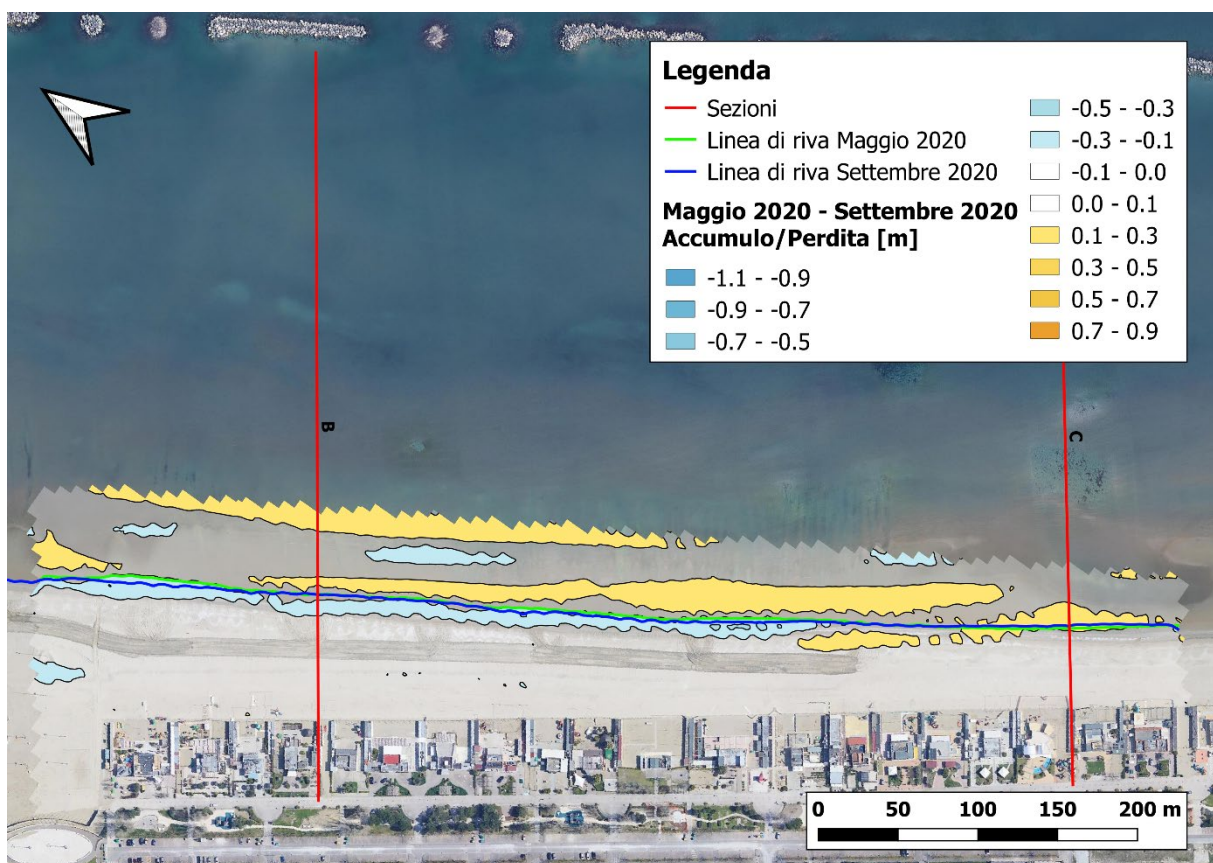


Figura 3.5 Differenza di quota/profondità tra il DTM di maggio e settembre 2020. Le linee rosse rappresentano le tracce delle sezioni "B" e "C" (vedi paragrafo 3.2).

Dal DTM delle differenze riportato in Figura 3.5 si nota la prevalenza di aree in cui la variazione di quota/profondità può essere considerata come non significativa, in quanto rientra nell'intervallo ± 10 cm. Una leggera perdita di quota (entro i -0.3 m) si osserva in buona parte dell'area rilevata in corrispondenza della battigia, a cui corrisponde un leggerissimo arretramento localizzato della linea di riva. Nella spiaggia sommersa, sia in prossimità della battigia che più verso mare, sono presenti due accumuli paralleli (barre) di altezza dai 10 ai 30 cm, separati da un trugolo discontinuo: queste morfologie derivano probabilmente

dall'azione del moto ondoso durante i mesi estivi, vista l'assenza di movimentazione meccanica di sedimento nel periodo in esame. La linea di riva non appare interessata da modifiche rilevanti.

Nel confronto tra il rilievo di settembre 2020 e novembre 2020 l'area "limitante" per estensione è la prima in quanto per settembre non si hanno a disposizione i dati di ecoscandaglio ma solo quelli acquisiti con GNSS nella spiaggia sommersa fino a circa 0.5 m. Tuttavia, complessivamente l'area di confronto viene ampliata rispetto al confronto precedente.

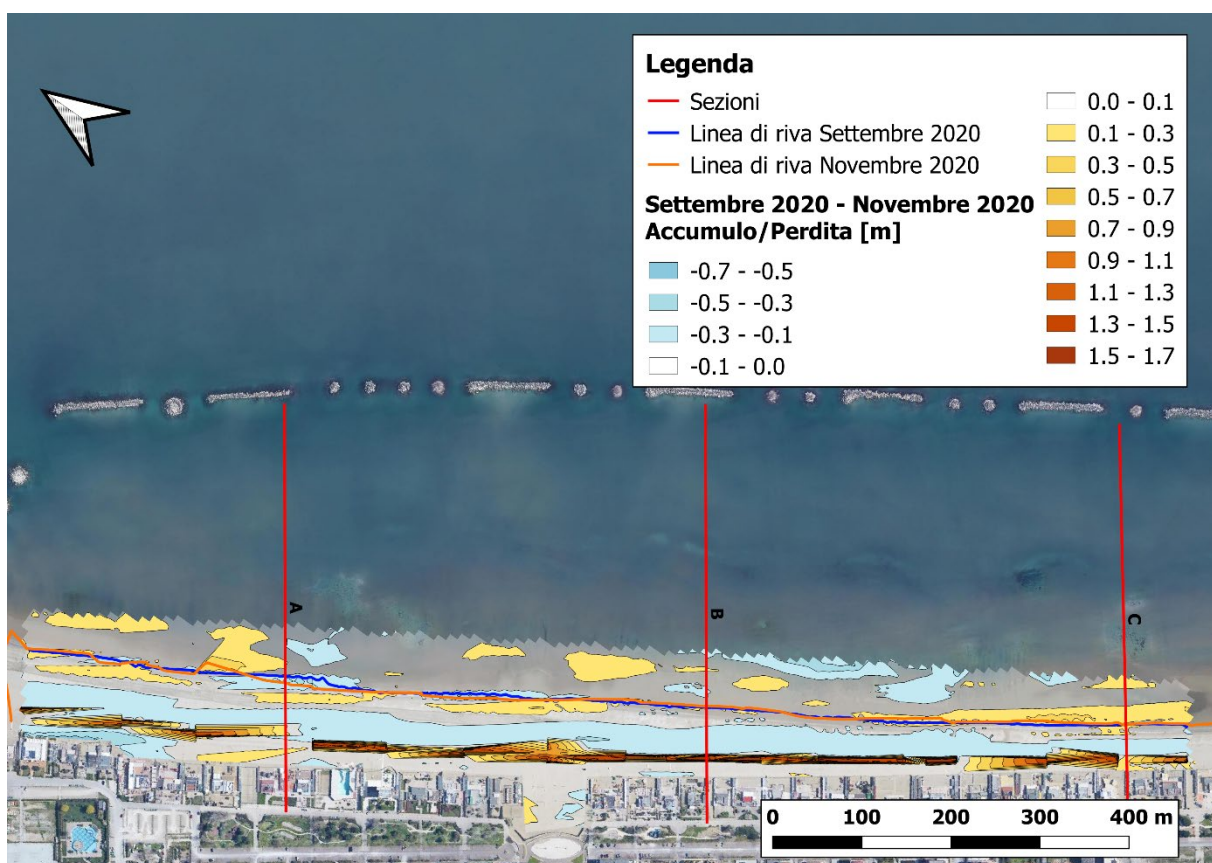


Figura 3.6 Differenza di quota/profondità tra il DTM di settembre 2020 e quello di novembre 2020.

Dalla Figura 3.6 è possibile osservare come le principali variazioni riscontrate tra i due rilievi interessino principalmente la spiaggia emersa, mentre in quella sommersa rilevata, ad eccezione di singole aree di dimensioni modeste in cui si ha alternativamente accumulo e perdita di quota (dove queste aree interessano la battigia si osservano modeste variazioni localizzate della linea di riva), la condizione generale è quella di variazioni di quota non significative. Spostandosi dalla battigia verso terra, si incontra un'area lunga e continua che si

estende parallelamente alla linea di riva, nella quale si è avuta una perdita di quota di circa 30 cm e successivamente, verso l'interno della spiaggia, uno stretto e ripido accumulo (fino a +1.7 m rispetto al rilievo precedente). Tali variazioni morfologiche sono verosimilmente la conseguenza della movimentazione artificiale di sabbia che è stata accumulata da mare verso terra a formare una duna di protezione "invernale" di altezza variabile.

Il confronto successivo riguarda i rilievi di novembre 2020 e febbraio 2021: il DTM risultante dalla loro differenza ha un'estensione maggiore rispetto ai precedenti, soprattutto nella direzione parallela alla spiaggia (Figura 3.1).

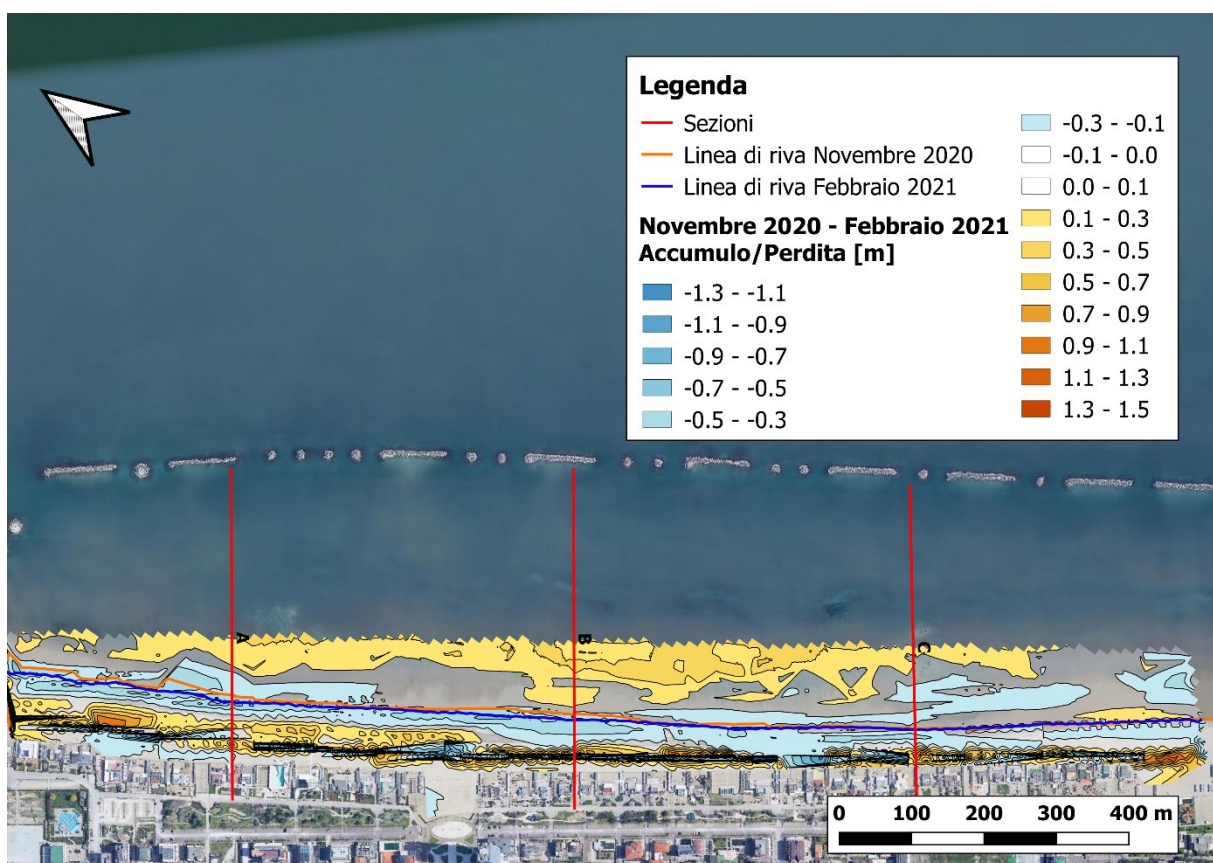


Figura 3.7 Differenza di quota/profondità tra il DTM di novembre 2020 e quello di febbraio 2021. Le linee rosse rappresentano le tracce delle sezioni "A", "B", e "C" (vedi paragrafo 3.2)

Dalla Figura 3.7 si osserva la presenza, nella spiaggia sommersa, di aree di accumulo per buona parte dell'area più a mare, con aumenti di quota che vanno dai 10 ai 50 cm rispetto alla condizione precedente, mentre a cavallo della battigia e sulla spiaggia emersa si notano aree di perdita di quota dello stesso ordine di grandezza (associate a locale arretramento della linea di riva). Questo assetto potrebbe essere spiegato dall'azione delle mareggiate avvenute durante l'inverno che hanno colpito l'area in questione provocando lo spostamento del

sedimento dalla battigia e dalla spiaggia emersa verso mare, a formare l'area di accumulo e di perdita di quota sopracitate.

Dall'immagine si notano, tuttavia, sulla spiaggia emersa aree di aumento di quota rispetto alla condizione rilevata nel mese di novembre: esse potrebbero rappresentare delle berme invernali o, più probabilmente, essere la conseguenza del rimaneggiamento della duna invernale tramite mezzi meccanici, spesso richiesto dai gestori degli stabilimenti balneari in risposta all'effetto delle mareggiate.

Il confronto successivo, tra febbraio 2021 e marzo 2021, ha un'estensione pari al precedente, in quanto nel primo dei due mesi il rilievo è stato meno esteso ed è quindi limitante sulla mappa delle differenze. Il risultato che si ottiene dalla differenza tra i due DTM è riportato in Figura 3.8 e mostra gli effetti della movimentazione meccanica del sedimento avvenuta a marzo 2021 (Tabella 2.1).

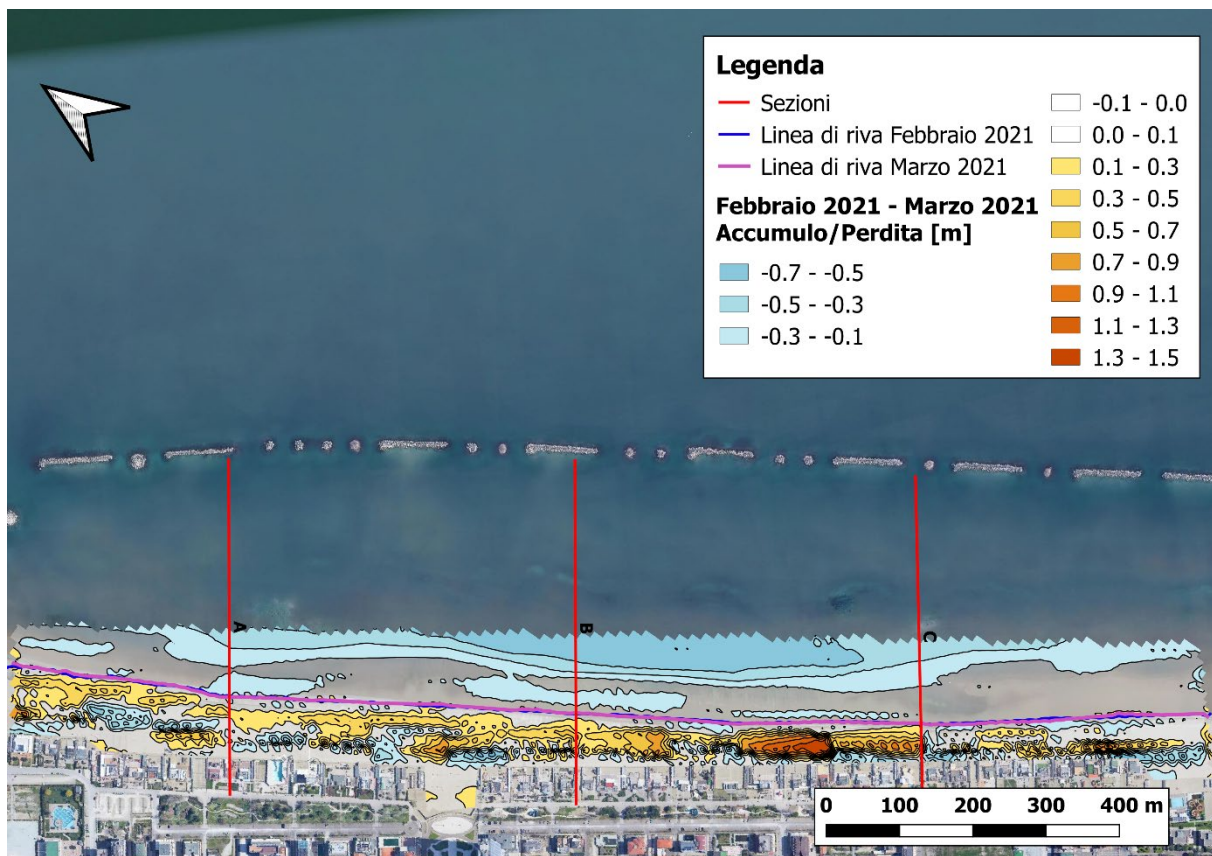


Figura 3.8 Differenza di quota/profondità tra il DTM di febbraio 2021 e quello di marzo 2021. Le linee rosse rappresentano le tracce delle sezioni "A", "B" e "C" (vedi paragrafo 3.2).

Nella spiaggia sommersa, oltre ad aree in cui non c'è stata variazione significativa di quota, le aree di abbassamento del fondale (da -0.1 m a -0.7 m) sono più diffuse e regolari; esse

potrebbero rappresentare le zone di rimozione del sedimento con *scaper* benché non completamente coperte da questa mappa delle differenze. La spiaggia emersa è principalmente sede di accumulo (fino a +1.5 m), ma sono comunque presenti minori aree di perdita di quota (al massimo di -0.5 m). La linea di riva non appare interessata da modifiche rilevanti.

A terminare la serie di confronti cronologici è il DTM ottenuto dalla differenza tra il rilievo di marzo e maggio 2021.

In Figura 3.9 si osserva la prevalenza di invariabilità del fondale in gran parte della spiaggia sommersa, con alcune ampie aree di accumulo che hanno generato aumenti di quota tra i 10 ed i 30 cm, e solo alcune aree minori di perdita di quota localizzate verso mare, all'estremo dell'area rilevata. Un aumento di quota quasi continuo, generato da accumuli di forma irregolare e con valori intorno ai 70 cm, si osserva in corrispondenza della battigia e del primo metro di spiaggia sommersa. Esso si riflette anche nell'avanzamento della linea di riva di maggio rispetto a marzo, attribuibile con elevata probabilità alla movimentazione di sabbia dalla spiaggia emersa. Su quest'ultima, infatti, prevale una situazione di abbassamento di quota, che supera anche 1 m nelle aree prossime agli stabilimenti balneari: la causa di questa variazione è da imputare alla stesura dell'argine invernale avvenuta a maggio 2021 (Tabella 2.1), analogamente a quanto osservato nel maggio 2020.

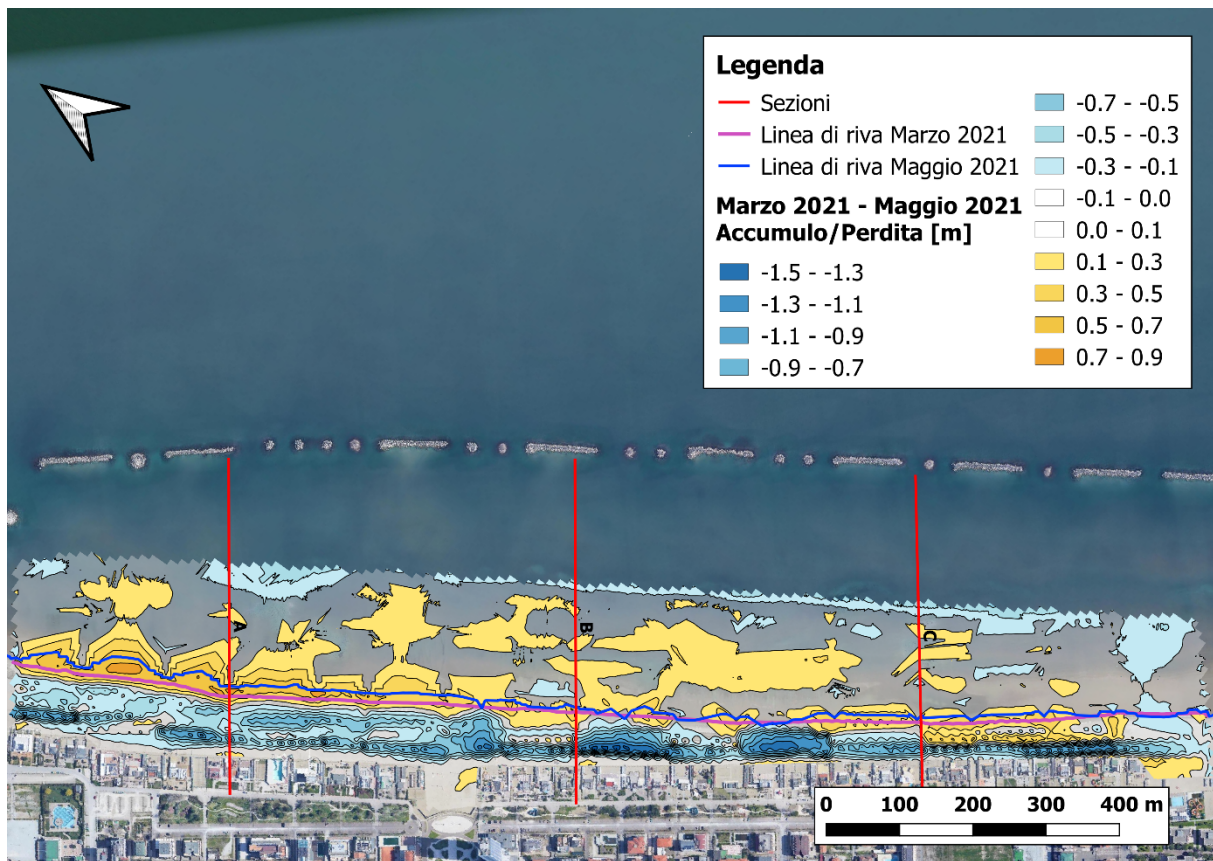


Figura 3.9 Confronto tra DTM del rilievo di marzo e maggio 2021. Le linee rosse rappresentano le tracce delle sezioni "A", "B" e "C" (vedi paragrafo 3.2).

Con i dati a disposizione è inoltre possibile eseguire tre confronti annuali, il primo dei quali riguarda il rilievo di febbraio 2020 e quello di febbraio 2021: anche in questo caso essendo i punti di campionamento relativi ad un'area minore nel 2020 rispetto all'anno successivo, tale sarà l'estensione del confronto in esame.

Dalla Figura 3.10 si osserva sulla spiaggia emersa più interna la presenza di un'area quasi continua di accumulo di sabbia (fino ad un massimo di quasi 1 m) in corrispondenza della duna invernale: ciò indica come nel febbraio 2021 la quota di questo elemento fosse maggiore rispetto all'anno precedente. Questo è probabilmente dovuto al fatto che nel rilievo più recente l'eventuale intervento con mezzi meccanici per rimodellare la duna invernale è stato di entità maggiore.

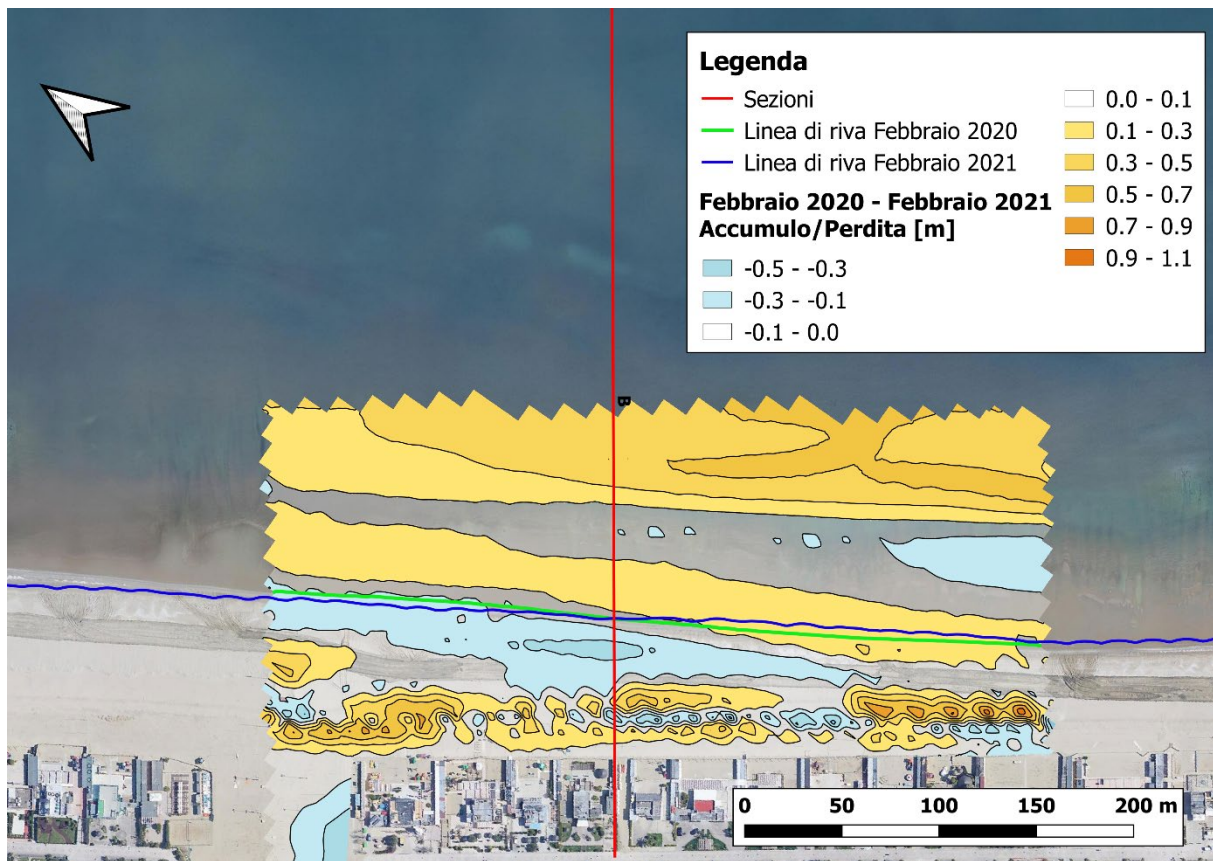


Figura 3.10 Confronto tra il DTM ottenuto dal rilievo di febbraio 2020 e quello del 2021. La linea rossa rappresenta la traccia della sezione "B" (vedi paragrafo 3.2)

Tra il piede di questi accumuli e la linea di riva, risulta presente un'area più ribassata dell'ordine dei -10/30 cm, mentre nella spiaggia sommersa sono presenti due aree di accumulo che si estendono da un'estremità all'altra del confronto dalle quali si registra un aumento di quota compreso tra i 10 ed i 50 cm.

Il secondo confronto annuale è quello tra il rilievo di aprile 2020 e marzo 2021, che corrispondono a condizioni di spiaggia analoghe, cioè di profilo di fine inverno con effetto "post scraper". Anche in questo caso l'estensione dei due rilievi è differente ma, nell'area comune ad entrambi, permette comunque di notare alcune differenze (Figura 3.11). Nella spiaggia emersa si osservano numerose aree alternate a cui sono associate variazioni di quota diverse, sia positive che negative, ma tendenzialmente parallele alla spiaggia; queste possono riflettere la diversa posizione di berme ed accumuli vari di sedimento che vengono formati tra un anno e l'altro. Nel settore più meridionale, un accumulo di circa 1 m in positivo rappresenta verosimilmente la differenza tra la posizione dell'argine invernale di marzo 2021 e quello di aprile 2020.

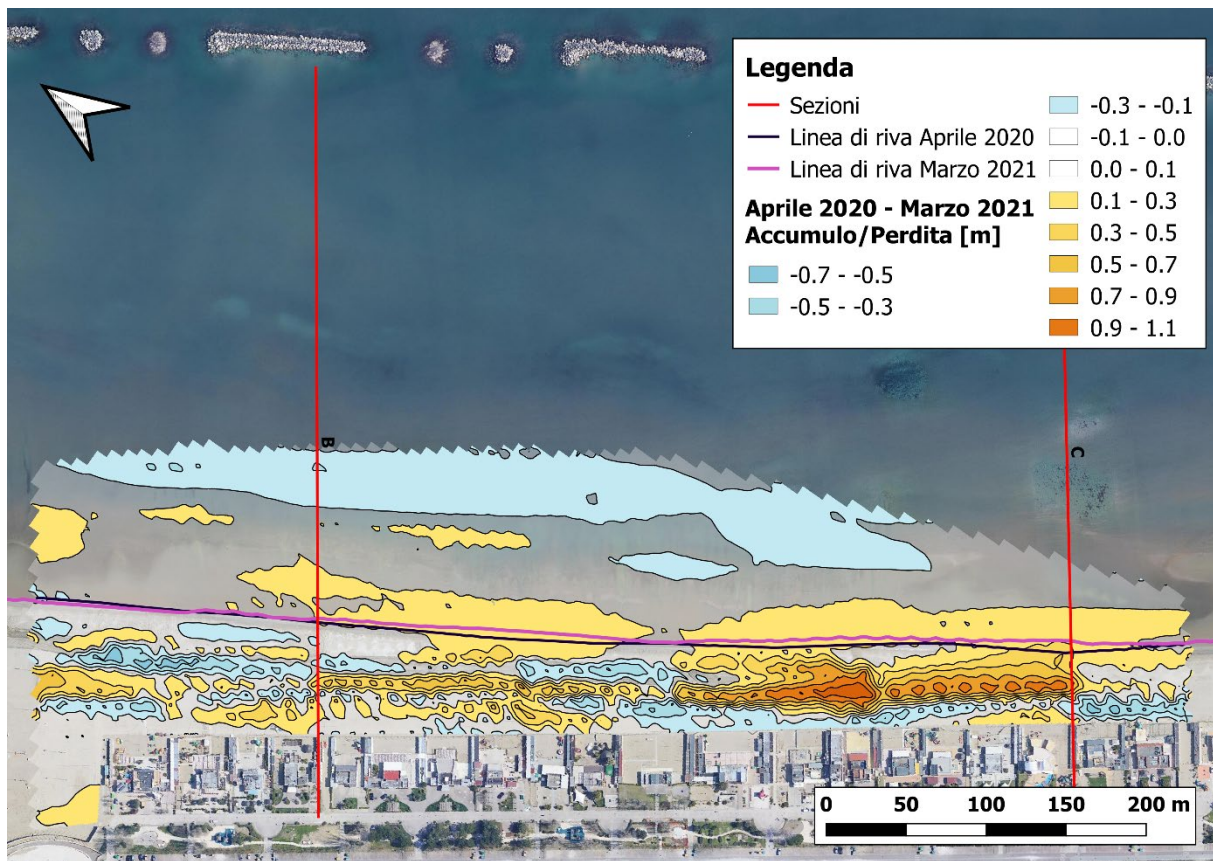


Figura 3.11 Confronto annuale tra DTM di aprile 2020 e marzo 2021. Le linee rosse rappresentano le tracce delle sezioni "B" e "C" (vedi paragrafo 3.2)

Nella spiaggia sommersa sono presenti ampie aree in cui la variazione di profondità non è considerabile come significativa, un ampio settore con perdita di quota verso mare corrispondente all'area di rimozione del sedimento con *scraper* nel 2021 e uno in prevalente accumulo nella battigia ed in prossimità della linea di riva. In corrispondenza di questo, si osserva un leggero avanzamento della linea di riva.

L'ultimo confronto annuale è quello tra i rilievi di maggio 2020 e 2021, le cui estensioni nuovamente non coincidono. Nelle aree comuni ai due rilievi (Figura 3.12) prevalgono aree con differenze di quota non significative. Tuttavia, si osserva sulla spiaggia emersa e sulla battigia la presenza di alcune aree di perdita di quota localizzate, con quote inferiori fino a -30 cm rispetto a maggio 2020, mentre nella spiaggia sommersa sono presenti aree di prevalente accumulo, di forma allungata, con aumenti di quota di circa 30-50 cm rispetto alla condizione precedente. Queste variazioni si riflettono localmente nell'andamento più articolato della linea di riva di maggio 2021 rispetto a quella di maggio 2020 (Figura 3.12).

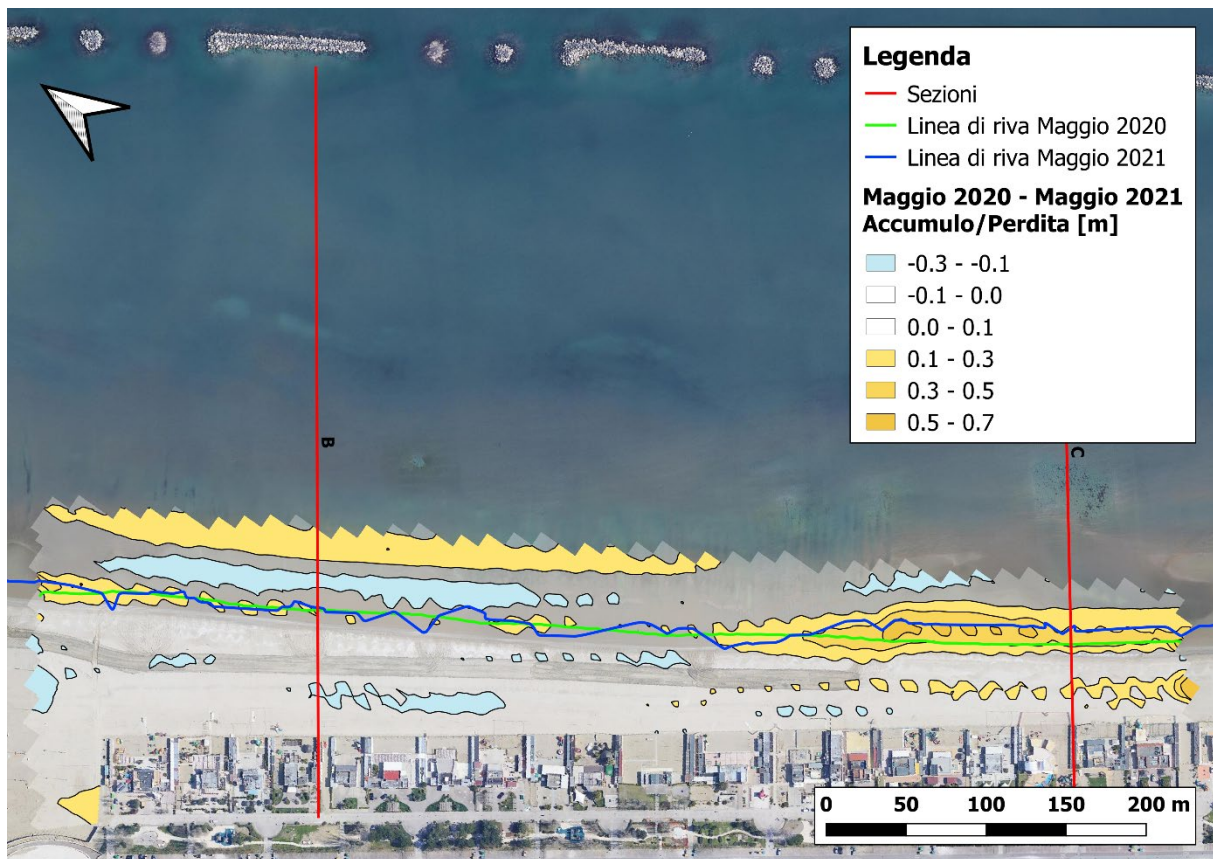


Figura 3.12 Confronto annuale tra i DTM di maggio 2020 e 2021. Le linee rosse rappresentano le tracce delle sezioni "B" e "C" (vedi paragrafo 3.2).

3.2 Confronti tra le sezioni

Per valutare le variazioni osservate tra i diversi rilievi dal punto di vista del profilo di spiaggia, nell'intera area di studio sono state selezionate 3 sezioni, considerate rappresentative del settore all'interno del quale ricadono (Figura 3.13): su di esse sono stati ricostruiti i profili morfologici nei diversi periodi rilevati.

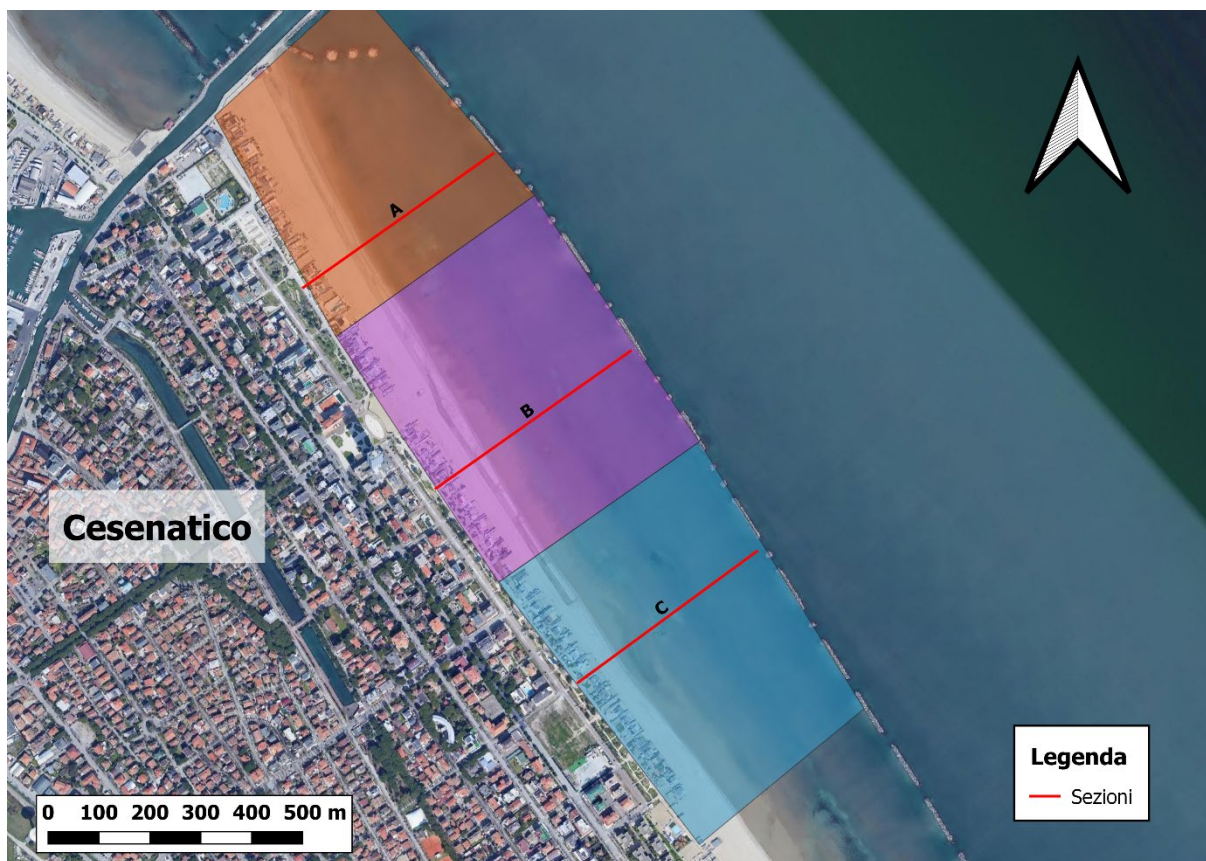
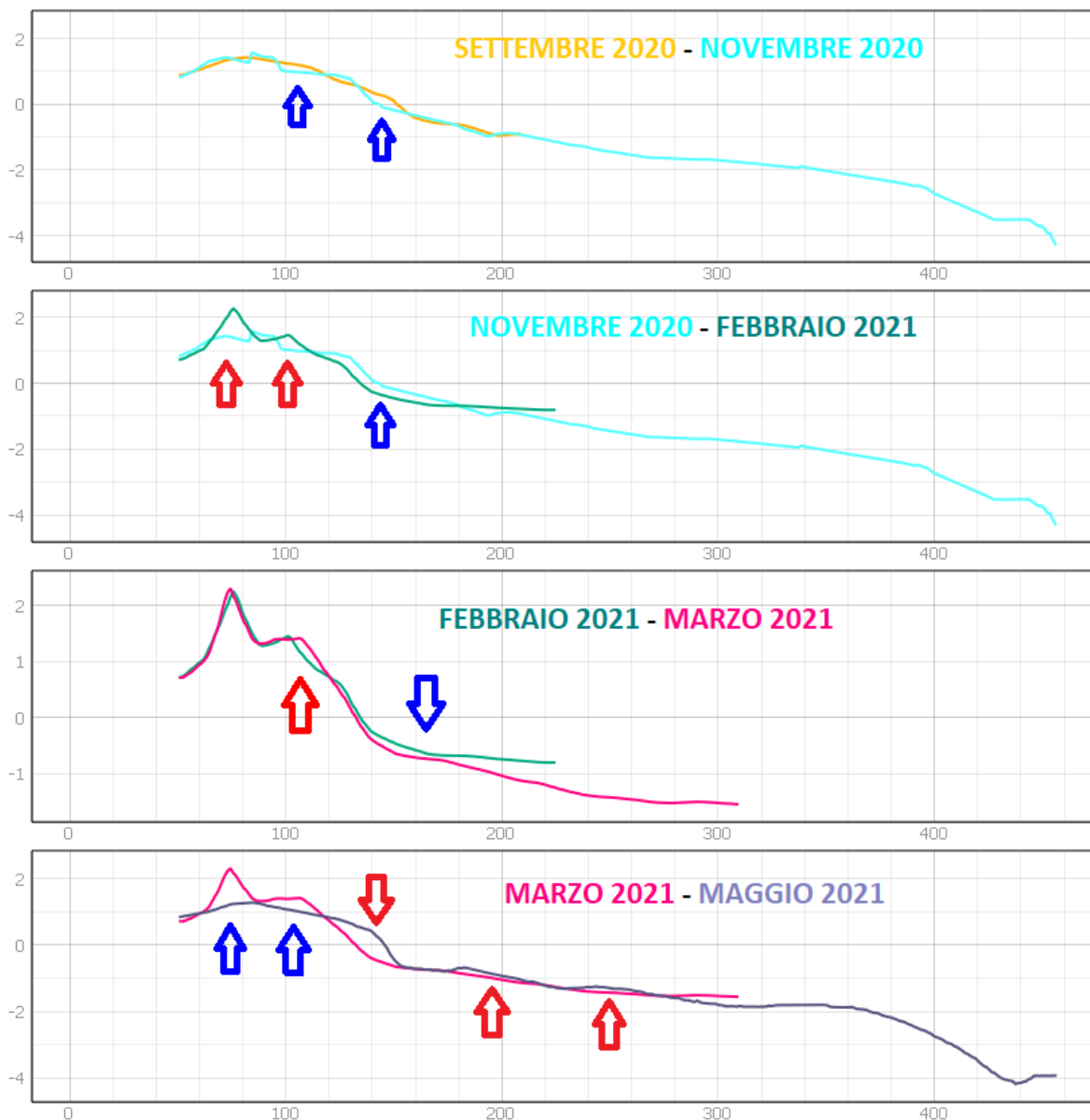


Figura 3.13 Ubicazione delle sezioni sulle quali sono stati ricostruiti i profili di spiaggia, indicative dei settori aventi analogo comportamento.

Partendo dall'estremità prossima al portocanale di Cesenatico, per la sezione A il confronto possibile tra i diversi profili di spiaggia riguarda il periodo che va da settembre 2020 a maggio 2021, da quando, cioè, i rilievi si sono estesi fino a comprendere questa area (4, 5, 6, 7 e 8 in Figura 3.1). Dalla Figura 3.14 si può osservare che i cambiamenti principali nel profilo riguardano la presenza dell'argine invernale realizzato a novembre 2020 e poi rimodellato a febbraio 2021 con la sola movimentazione del sedimento presente nei pressi della duna, e a marzo con sabbia ottenuta dall'azione degli *scraper*: infatti, nel primo caso si nota l'arretramento della linea di riva ed un leggero abbassamento di quota in prossimità della battigia (freccia blu nel grafico novembre 2020 – febbraio 2021), mentre nel secondo caso la perdita di quota nella spiaggia sommersa è più marcata soprattutto all'estremità dei due rilievi (freccia blu nel grafico febbraio 2021 – marzo 2021). In entrambi i casi, si ha la formazione di un accumulo di sabbia ai piedi dell'argine stesso ed un rimodellamento della spiaggia emersa (vedi anche Figura 3.7 e Figura 3.8). Quest'ultimo effetto (ad opera dei gestori della spiaggia) si osserva anche nel confronto tra marzo 2021 e maggio 2021, questa volta in relazione alla stesura dell'argine invernale e all'assetto di spiaggia "estivo", più regolare ed esteso, con la

linea di riva avanzata verso mare e la berma pronunciata (vedi Figura 3.9). Nella spiaggia sommersa dello stesso confronto si possono notare l'elevata pendenza della battigia e la formazione di due piccoli accumuli alle batimetriche di -1/-1.5 m.

Variazioni di profondità si riscontrano anche più al largo ma sono osservabili solo nei rilievi per i quali vi è disponibilità di dati batimetrici acquisiti con ecoscandaglio: il confronto più esteso possibile, relativo alla spiaggia sommersa, è quello tra il rilievo di novembre 2020 e maggio 2021, dal quale si nota la formazione di truogoli (indicati dalla frecce blu) ed accumuli a varie profondità.



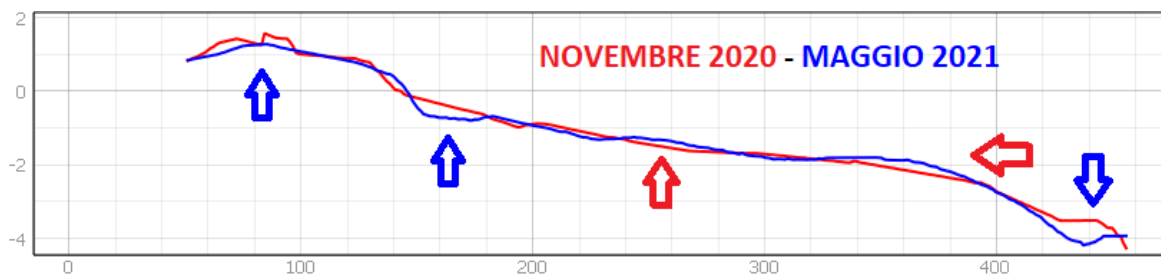
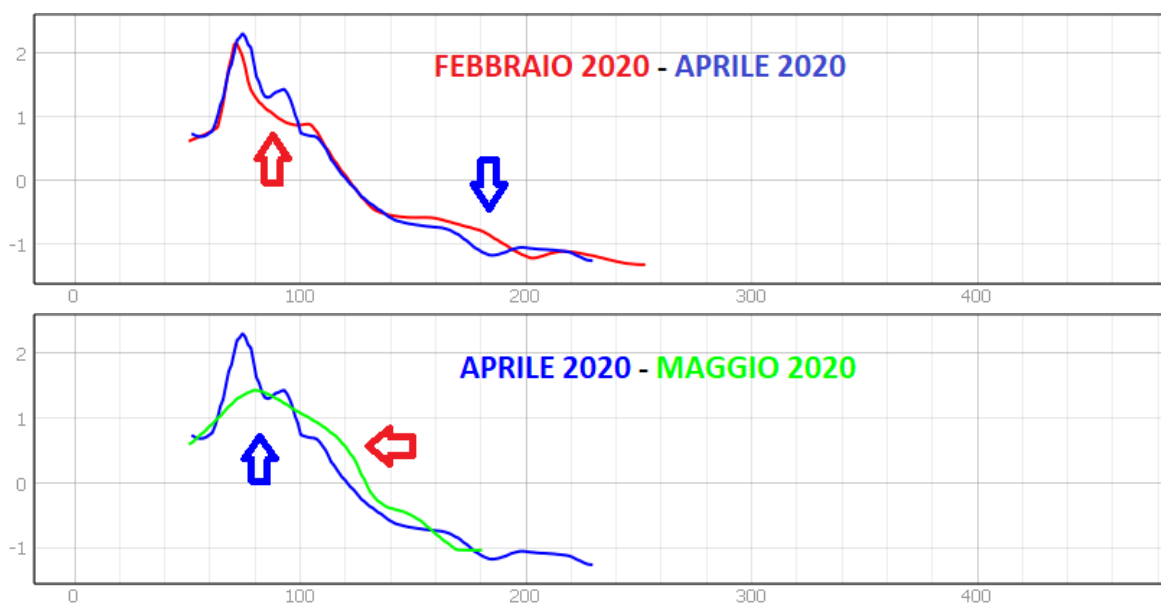


Figura 3.14 Sequenza di profili di spiaggia relativi alla sezione A nei diversi periodi.

In Figura 3.15 è riportata la sequenza temporale relativa alla Sezione B, per la quale sono disponibili più rilievi, alcuni dei quali tuttavia estesi solo fino a circa -1 m (Tabella 2.1 e Figura 3.1): si nota anche in questo caso la presenza dell'argine invernale già a febbraio 2020 e la formazione di un secondo accumulo di dimensioni minori ai suoi piedi, in seguito all'azione degli *scaper* nel profilo di aprile 2020 (freccia rossa nel confronto febbraio 2020 – aprile 2020). Tale intervento si ripercuote anche nella spiaggia sommersa, dove si registra la formazione di un ampio avvallamento, profondo circa 30 cm (freccia blu nel confronto febbraio 2020 – aprile 2020 e vedi anche Figura 3.3) in corrispondenza dell'area di rimozione del sedimento. Tra aprile e maggio 2020 si assiste ad un certo rimodellamento morfologico (sempre artificiale) della spiaggia emersa e del primo metro di quella sommersa, con parziale stesura della duna e graduale spostamento del sedimento verso mare con conseguente avanzamento della linea di riva (vedi anche Figura 3.4).

Non risulta, invece, cambiata la topografia della spiaggia in seguito alla stagione estiva: i punti rilevati a maggio 2020 coincidono all'incirca con quelli di settembre dello stesso anno.



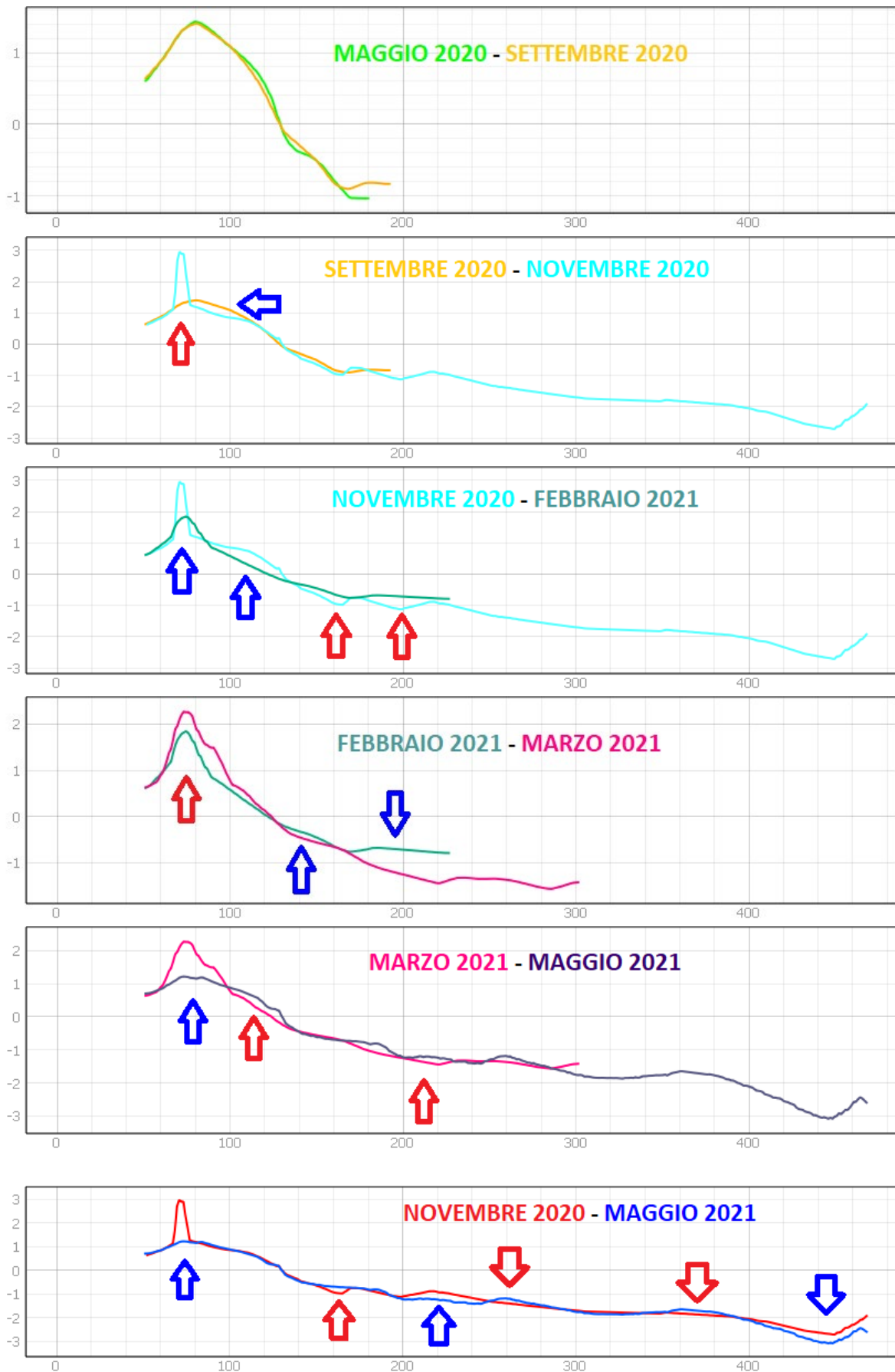


Figura 3.15 Sequenza di profili di spiaggia relativi alla sezione B nei diversi periodi.

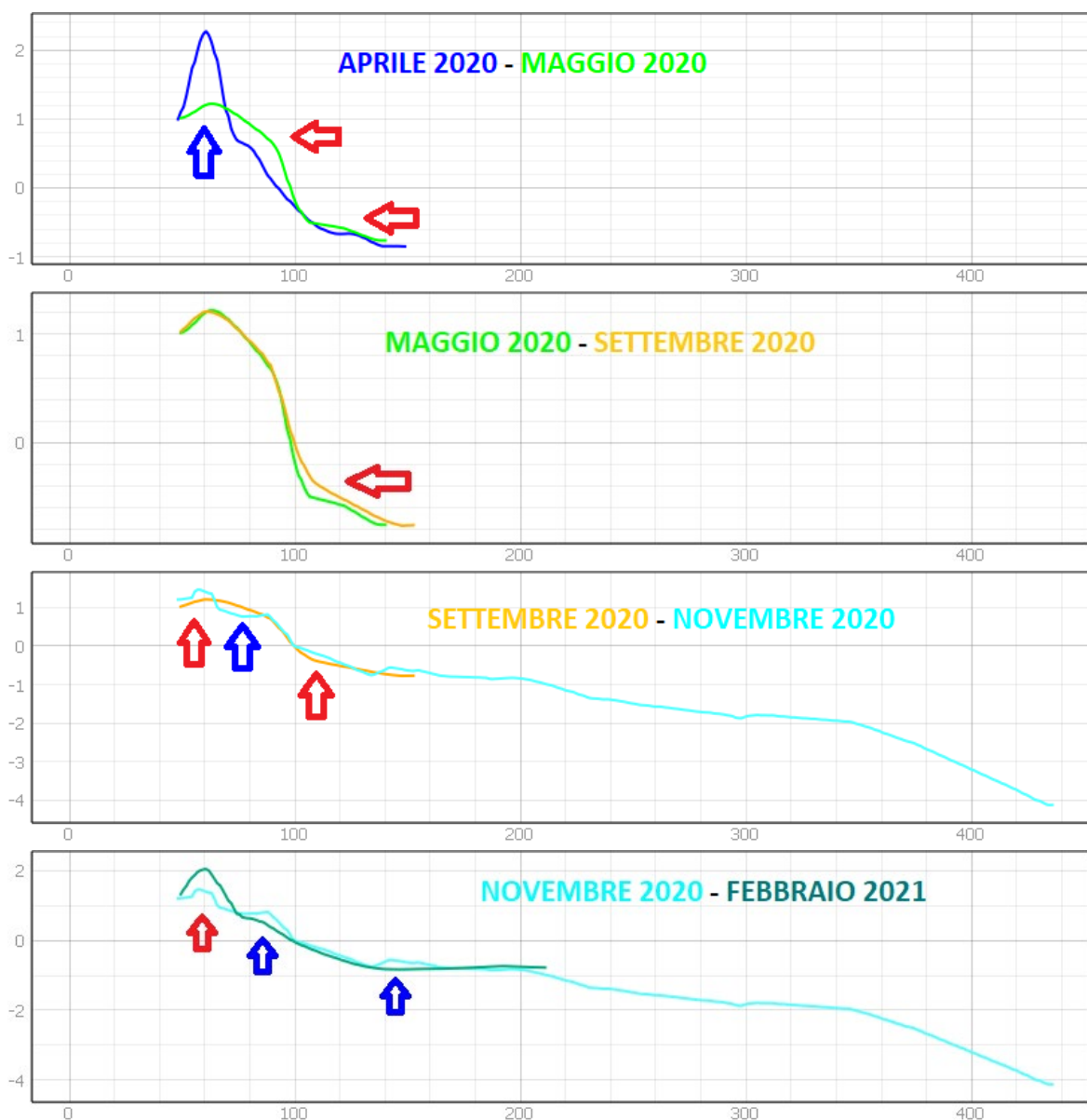
I cambiamenti avvenuti nei mesi successivi risultano analoghi a quelli già descritti per la sezione A: quindi ricostruzione della duna a novembre 2020, un “rinforzo” dell’argine in seguito ad attività degli *scraper* a marzo 2021 con rimodellamento della spiaggia emersa e, successivamente, a maggio 2021, la stesura dell’argine invernale e la redistribuzione del sedimento sulla spiaggia emersa, con un leggero avanzamento della linea di riva (vedi anche Figura 3.6, Figura 3.8 e Figura 3.9). Si notano invece alcune differenze rispetto alla sezione precedente nel passaggio tra novembre 2020 e febbraio 2021: per la sezione B, infatti, il profilo mostra un abbassamento di quota dell’argine da 3 a 2 m circa (freccia blu nella rispettiva immagine) e in buona parte della spiaggia emersa e battigia, mentre nella spiaggia sommersa si registra un accumulo già nel primo metro di profondità rispetto a novembre 2020 (freccie rosse nella rispettiva immagine, e vedi Figura 3.7).

Variazioni nella spiaggia sommersa nel primo metro di profondità sono evidenti anche nel profilo di marzo 2021 che, confrontato con quello del mese precedente, mostra l’azione degli *scraper*, con un dislivello che raggiunge anche -0.7 m (freccie blu), mentre si registra un leggero accumulo nel mese di maggio 2021 dopo la stesura dell’argine invernale ed il consueto rimodellamento artificiale della spiaggia emersa (vedi Figura 3.9). Nel confronto tra i due rilievi più estesi, quello di novembre 2020 e maggio 2021, si osserva anche in questo caso una certa variabilità anche nella spiaggia sommersa, con piccoli accumuli che si alternano ad approfondimenti del fondale fino ad oltre i 3 metri di profondità.

Per la sezione C, che rappresenta l’estremità sud dell’area di studio, i dati a disposizione riguardano una finestra temporale ampia, l’unico rilievo per il quale non è possibile il confronto è quello di febbraio 2020. Dalla sequenza di profili di spiaggia riportata in Figura 3.16 si può osservare anche in questo caso il rimodellamento della spiaggia e l’avanzamento della linea di riva avvenuti in seguito alla stesura della duna invernale a maggio 2020 (vedi anche Figura 3.4). A settembre 2020 si registra la formazione di un leggero accumulo di sabbia, pari a circa 20 cm, nella spiaggia sommersa alla profondità di -0.40 m (vedi anche Figura 3.5) mentre su quella emersa non risultano variazioni significative. Da novembre 2020, ma soprattutto nel rilievo di febbraio 2021 si determina l’aumento di quota della duna invernale ed un locale abbassamento di quota sia nella restante spiaggia emersa che nella prima parte di quella sommersa (vedi anche Figura 3.6 e Figura 3.7), dovuti al rimodellamento dei mezzi meccanici già citato. Nel confronto tra febbraio 2021 e marzo 2021 si osserva, anche su questa

sezione come nel caso di A e B, l'attività eseguita dagli *scraper*: si nota infatti un netto aumento della quota dell'argine invernale e una perdita di quota significativa nella spiaggia sommersa (vedi anche Figura 3.8). Infine, con l'ultimo rilievo di maggio 2021 si osserva nuovamente il passaggio ad un profilo estivo, in questo caso caratterizzato dalla presenza di piccoli accumuli a cavallo della linea di riva e nel primo metro di profondità.

Il confronto tra i rilievi più estesi di novembre 2020 e maggio 2021, utili in particolare ad analizzare la spiaggia sommersa, mostra anche in questo caso variazioni di quota intorno al metro di profondità, più o meno significative, sia nella spiaggia emersa che in quella sommersa fino a oltre -4 m.



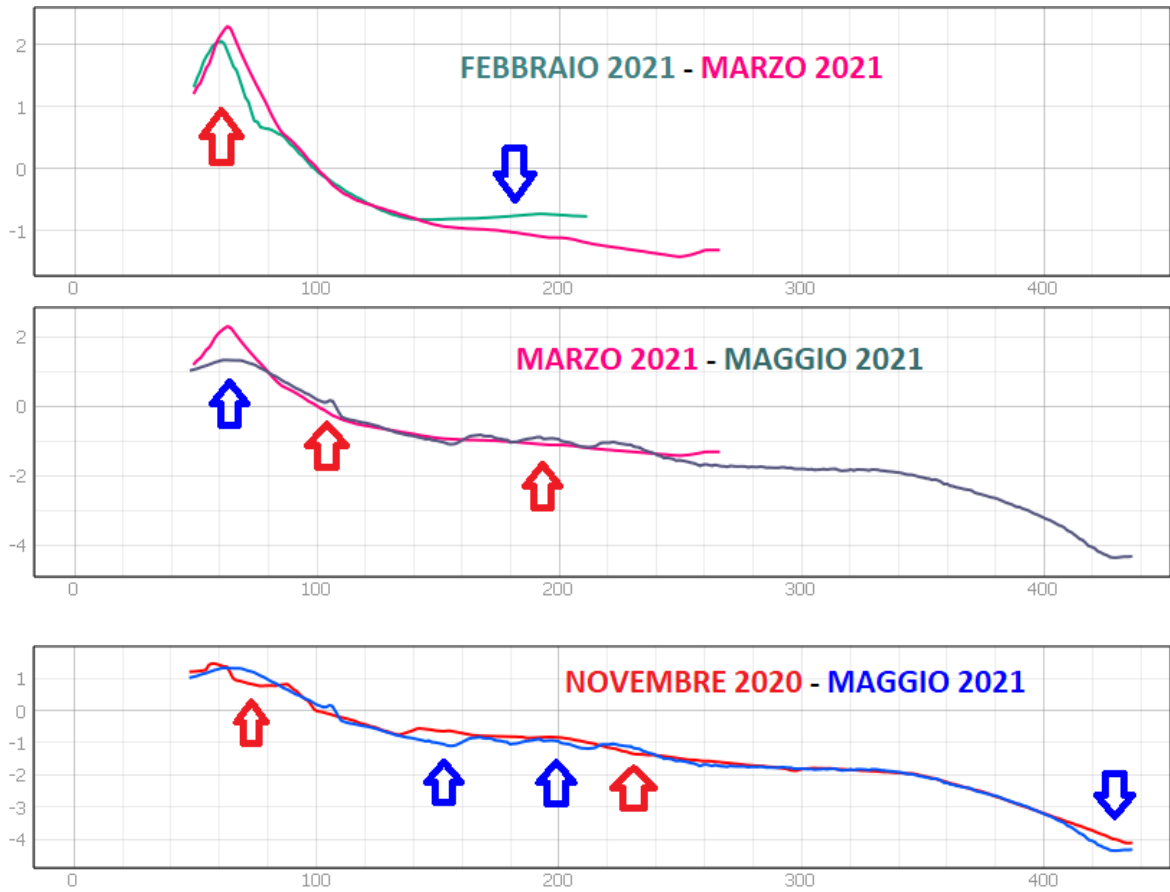


Figura 3.16 Sequenza di profili di spiaggia relativi alla sezione C nei diversi periodi.

4 Discussione

Lo studio eseguito in questa tesi, che ha preso in esame una serie di rilievi successivi della spiaggia di Cesenatico su un periodo totale di circa un anno e tre mesi, ha permesso di sviluppare un'idea generale dei cambiamenti morfologici a cui la spiaggia è sottoposta ciclicamente. Dai risultati riportati nel capitolo precedente ciò che si evince è la forte influenza delle azioni antropiche che, spostando e ridistribuendo il sedimento tra i vari settori della spiaggia, si sovrappongono ai processi naturali nel determinare variazioni morfologiche: questo avviene in particolare nel periodo che va da novembre a maggio, durante il quale si hanno i maggiori cambiamenti sia sulla spiaggia emersa (per la costruzione dell'argine invernale e successiva stesura prima dell'estate) che nel primo metro di quella sommersa (per lo spostamento del sedimento effettuato con *scraper*). Anche tra maggio e settembre la spiaggia, pur risultando prevalentemente soggetta agli effetti del moto ondoso e delle correnti associate, è in realtà caratterizzata anche dalle pressioni antropiche del turismo balneare e della pulizia meccanica.

Questo rende difficoltoso riconoscere gli effetti di processi naturali come, ad esempio, mareggiate che possono avere interessato il tratto costiero in esame.

Premettendo che per "eventi di mareggiata" per il litorale emiliano-romagnolo si intendono "eventi di altezza significativa superiore a 1.5 m che abbiano durata almeno di 6 ore" (Arpae, 2016), in Tabella 4.1 sono riportati quelli intercorsi nel periodo 2020 – 2021, ricavati dai dati della boa *Nausicaa* (<https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/mare/dati-e-indicatori/dati-boa-ondametrica/dati-boa-ondametrica-di-cesenatico-fc>;

<http://www.smr.arpa.emr.it/dext3r>). È bene precisare che in alcuni casi, quando ci si è trovati in mancanza di dati completi per un evento (come nel caso del 6 e del 23 marzo 2021) o in presenza di un superamento della soglia di sole 5.5 ore invece che le 6 previste dal criterio sopracitato (come nel caso del 13 aprile 2021) si è deciso di seguire un approccio più flessibile ed includere l'evento comunque. Ad eccezione dell'evento di mareggiata registrato in data 7 giugno 2020, dalla tabella si osserva la quasi totale assenza di eventi durante il periodo estivo, a giustificazione quindi delle contenute variazioni di quota/profondità osservate nel periodo maggio - settembre 2020 (Figura 3.5). Nei periodi invernali si sono invece verificate le principali mareggiate, come il 25 marzo 2020 e il 21 novembre 2020 (le più lunghe ed energetiche, vedi Tabella 4.1) e il 14 febbraio 2021, seguite da altre mareggiate di minore

durata o minore H_s , vedi Tabella 4.1. Questo va a conferma del contributo delle mareggiate ipotizzato per i periodi invernali nel capitolo 3.1, che si sommano alle azioni antropiche (Figura 3.7 e Figura 3.8).

Anno	Data	H_s (m)	MWD (°N)	Durata (h)
2020	06-feb-20	2.54	44	18.5
	25-mar-20	4.05	58	76.5
	31-mar-20	2.24	48	17
	01-apr-20	1.88	61	10.5
	14-apr-20	2.58	59	16
	07-giu-20	3.06	59	9
	28-set-20	1.72	21	11
	21-nov-20	2.93	58	41
	05-dic-20	1.91	84	27
	26-dic-20	2.60	55	28
2021	11-feb-21	1.80	63	8.0
	14-feb-21	2.57	32	41.5
	27-feb-21	2.22	68	14.5
	06-mar-21	1.91	63	7.5
	20/21-mar-21	1.82	62	16
	23-mar-21	1.19	74	7.5
	03/04-apr-21	1.53	67	13
13-apr-21	1.36	69	6	

Tabella 4.1 Eventi di mareggiate nel periodo 2020-2021 dai dati della boa Nausicaa. H_s : altezza significativa dell'onda; MWD: direzione media dell'onda. Fonte: modificato da Romagnoli et al., 2021.

Dalle attività di monitoraggio eseguite nei periodi febbraio – maggio 2020 e novembre 2020 – maggio 2021 sono stati riscontrati, infatti, i cambiamenti più evidenti nella morfologia della spiaggia emersa e sommersa (vedi Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.6, Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9).

Dai confronti annuali effettuati nel corso del monitoraggio in condizioni analoghe (profilo “invernale”, profilo “post-scaper” e profilo “pre-estivo”, Tabella 2.1) risulta evidente, inoltre, come le condizioni di spiaggia presenti alla data del rilievo siano variabili e diverse tra loro,

come ci si attenderebbe vista l'elevata variabilità dei parametri in gioco, sia per effetti naturali che antropici. Questo appare significativo, ad esempio, nel caso dei confronti febbraio 2020 – febbraio 2021 e aprile 2020 – marzo 2021 (Figura 3.10 e Figura 3.11), quando la movimentazione meccanica del sedimento, sia ad opera degli *scraper* che da mezzi a pala per il rimaneggiamento dell'argine, influisce molto sulle quote di spiaggia, trattandosi di un'attività che viene svolta non con particolare precisione e che può variare di anno in anno. In un litorale fortemente antropizzato come quello cesenate, risulta quindi complicato distinguere gli effetti dei processi naturali che agiscono sulle morfologie della spiaggia; sono invece più evidenti le conseguenze degli interventi di natura antropica, che vengono effettuati con cadenza regolare e difficilmente possono essere fraintesi per naturali.

Certamente, per confronti più completi ed attendibili sul comportamento della spiaggia a medio termine e sull'efficacia delle azioni intraprese, occorrerebbe avere esteso l'area del monitoraggio fino a maggiore profondità, o almeno fino alle barriere frangiflutti, attività non pianificata nei primi rilievi, che non hanno previsto l'utilizzo di ecoscandaglio ma solo di GNSS. In questo senso, i confronti svolti in questo studio sono stati limitati dalle variazioni nel tempo dell'estensione dei rilievi, che non sempre hanno permesso di avere una copertura completa dell'area. In particolare, risulta poco studiata la spiaggia sommersa che va dalla batimetria di -1.5 fino a profondità maggiori, per la quale sono disponibili solo i rilievi di novembre 2020 e maggio 2021 (vedi Figura 3.1).

Dal punto di vista dello svolgimento delle attività sperimentali, comunque, le metodologie e la strumentazione utilizzata sono da considerarsi come idonee se rapportate al tipo di analisi da svolgere: dato che l'intenzione era quella di avere un'idea generale delle conseguenze derivanti dalla movimentazione meccanica del sedimento, viste anche le profondità interessate, la combinazione di tecnologia GNSS ed ecoscandaglio single-beam hanno permesso di avere una buona copertura dell'area con dati di elevata precisione. Per avere risultati con maggiore dettaglio, in futuro sarebbe possibile eseguire i rilievi su un numero di transetti più elevato e quindi più ravvicinati tra loro: così facendo si otterrebbe un'interpolazione migliore, a fronte però di un significativo aumento dei tempi di lavoro che, in particolare per i rilievi con GNSS consisterebbero in varie ore di rilievo aggiuntive (a meno di adottare nella spiaggia emersa tecnologie come *Terrestrial Laser Scanner* o aerofotogrammetria da drone). Per quanto riguarda la spiaggia sommersa, l'utilizzo di

ecoscandaglio multi-beam da drone consente ormai di acquisire dati ad altissima precisione anche in acqua bassa in tempi relativamente brevi (Romagnoli et al., 2021).

I dati relativi alle linee di riva presenti nei DTM delle differenze riportati nelle figure del capitolo 3.1, sono da considerarsi poco significativi: oltre ad essere un parametro che, per essere utilizzato nell'interpretazione della tendenza di una spiaggia in chiave evolutiva necessita dell'integrazione di ulteriori informazioni (per esempio le condizioni di marea) e serie di dati più lunghe, il fatto che la linea di riva sia fortemente influenzata dalle azioni antropiche di spostamento del sedimento ne riduce la rappresentatività. Il continuo rimaneggiamento della sabbia, infatti, sia in occasione del cambiamento stagionale di assetto di spiaggia che per l'azione giornaliera dei mezzi di pulizia delle spiagge in estate, modificano l'andamento della linea di riva.

A conferma di quanto trattato nel sotto capitolo 1.3.1 riguardo alle “buone pratiche” per la gestione del litorale, è stato possibile osservare nelle variazioni morfologiche della spiaggia gli effetti scaturiti dalla loro applicazione, in particolare quelli legati alla realizzazione e stesura dell'argine invernale e all'azione degli *scrapper*, mentre quelli derivanti dalla pulizia delle spiagge risultano meno evidenti. Per quanto riguarda l'argine invernale, in Figura 3.4, Figura 3.6 e Figura 3.7 è possibile notare la rispettiva stesura, l'innalzamento e l'ulteriore stesura: il fatto che nelle mappe di differenza di quota ci sia un'alternanza di accumulo e perdita nella spiaggia sommersa (ad esempio si veda il confronto tra profilo post-*scrapper* ed invernale in Figura 3.15 per i mesi febbraio 2020 – aprile 2020 e febbraio 2021 – marzo 2021), indica come sia avvenuta una movimentazione del sedimento dalla spiaggia sommersa a quella emersa, cioè che il sedimento utilizzato per la sua realizzazione proviene dall'interno dell'area di studio, diversamente da quanto auspicato nelle linee guida (MATTM-Regioni, 2018; Regione Emilia-Romagna, 2021).

Per quanto riguarda gli *scrapper*, si tratta di un tipo di intervento con carattere ancora relativamente sperimentale. La scarsità di ricerca su questa pratica ha portato a pareri divergenti sull'impatto che può avere sulla spiaggia: in presenza di innalzamento del livello del mare e di incremento di eventi di mareggiata, che tendono a ridurre l'ampiezza del litorale, l'azione di *scraping* contribuirebbe ad aumentare l'inclinazione della spiaggia sommersa e di conseguenza l'erosione (Psuty, 1988). I risultati che si possono ottenere sono però anche un ampliamento (temporaneo) della spiaggia e quindi la possibilità di utilizzo ai fini turistici e,

insieme alla costruzione dell'argine invernale, la protezione (temporanea) delle infrastrutture presenti nel retrospiaggia dalle mareggiate, anche utilizzando sedimento proveniente dalla stessa area di prelievo invece che dall'esterno (Dare, 2003). È quindi possibile definire la pratica come “un modo di organizzare il materiale di spiaggia disponibile in maniera più ragionevole, nel breve termine” ma è da considerare “solo come una misura temporanea” e non come un'alternativa ai ripascimenti artificiali (Bruun, 1983). Questi ultimi sono comunque necessari a mantenere l'equilibrio nel medio termine in tratti costieri nei quali la riduzione del naturale input sedimentario è un fattore predominante, come nel litorale emiliano-romagnolo.

5 Conclusioni

Il litorale preso in considerazione in questo studio, così come in generale quello emiliano romagnolo, risulta soggetto da decenni a carenza di sedimento, subsidenza e urbanizzazione. Questi fattori, che sottopongono le coste ad erosione e fenomeni di ingressione marina, verranno esacerbati dai tassi d'innalzamento del livello del mare di circa 3-4 mm/anno misurati attualmente e da quelli previsti in futuro (nella peggiore delle ipotesi di 10-20 mm/anno; IPCC, 2019). Queste criticità sviluppatasi nel corso degli anni hanno fatto sì che si instaurasse la necessità di una corretta gestione del sedimento e del litorale nel suo complesso che, irrigidito da strutture di difesa, non è più in grado di reagire in modo dinamico.

Le attività di rilievo eseguite ed i dati analizzati in questa tesi hanno permesso di documentare i cambiamenti avvenuti sul litorale a seguito della combinazione di processi di natura antropica e non, sia in termini qualitativi che quantitativi: le informazioni raccolte sono state utili a ricostruire il comportamento morfologico della spiaggia – nel breve termine e in aree campione, gettando le basi per un eventuale monitoraggio periodico. Dato che lo studio eseguito in questa tesi è durato all'incirca un anno e tre mesi, infatti, per poter avere un quadro meglio documentato ed informazioni più affidabili, risulterebbe necessario un piano di monitoraggio duraturo nel tempo che permetta di ottenere delle tendenze medie. Allo stato attuale, la condizione delle spiagge di Cesenatico, come tutto il litorale regionale, è monitorato periodicamente (Arpae, 2002 e 2009; Arpae, 2016 e 2020).

Monitoraggi più specifici vengono svolti solo nelle spiagge oggetto di interventi di ripascimento (denominati come "Progettoni", vedi Arpae 2008, 2016, 2020), permettendo un'analisi più dettagliata dello stato del litorale a seguito di tali interventi.

Visto che una delle pratiche che si intende utilizzare per contrastare le criticità a cui è soggetto il litorale è quella dello *scraping*: per far sì che tale attività sia efficace e non dannosa è bene che il sedimento venga rimosso da zone di "surplus" con un intervallo di spessore che indicativamente va da 0.2 m a 0.5 m (Bruun, 1983), ma che deve essere stabilito caso per caso. Un'eventuale attività di monitoraggio strutturata fornirebbe, quindi, elementi importanti per valutare quando e dove recuperare il materiale, quale spessore rimuovere e dove depositarlo.

6 Allegati

Allegato 1



Rete Geodetica Costiera per il Monitoraggio Topografico e Batimetrico - Vertici GPS stazionabili -

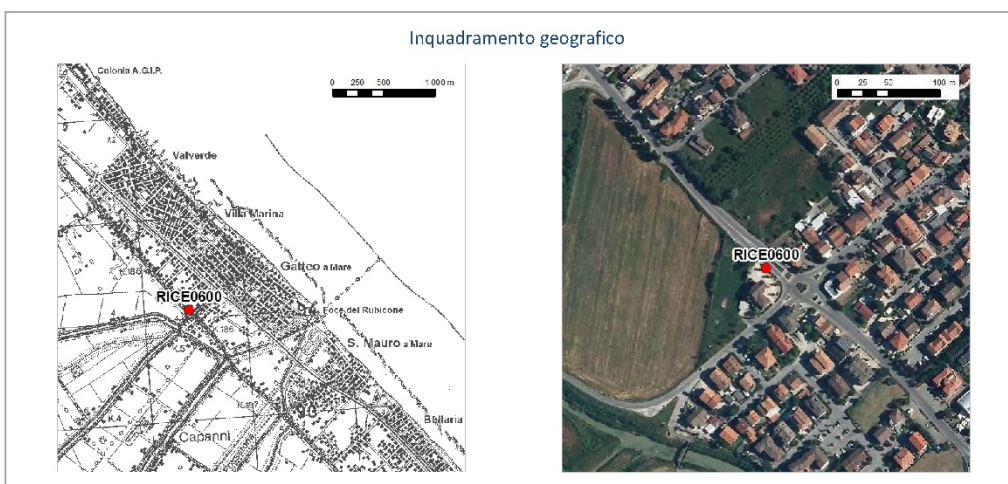
VERTICE:

Aggiornamento al 02/2018

Comune: <input type="text" value="Cesenatico"/>	Provincia: <input type="text" value="Forlì - Cesena"/>
Indirizzo: <input type="text"/>	Località: <input type="text" value="Villa Marina"/>
Ubicazione: Chiesa di S. Maria Assunta	

Istituito da: <input type="text" value="Ente Pubblico"/>	Anno: <input type="text" value="2001"/>	Denominazione: <input type="text"/>
Rete di appartenenza: <input type="text"/>		

Altra rete di appartenenza: <input type="text" value="Rete Geodetica di Raffittimento - RER GPS7"/>
Denominazione: <input type="text" value="VTP01"/>



Coordinate geografiche ETRS89-ETRF 2000 (2008.0) EPSG: 6706	Coordinate piane ETRS89-ETRF 2000-UTM 32N (2008.0) EPSG: 7791
Lat (°): <input type="text" value="44,16908649"/> Long (°): <input type="text" value="12,42780344"/>	Est (m): <input type="text" value="774044,36"/> Nord (m): <input type="text" value="4896368,54"/>

Quota ellissoidica h (m): <input type="text" value="41,85"/>	Data di acquisizione: <input type="text" value="26/04/2017"/>
Quota ortometrica H (m): <input type="text" value="2,34"/>	Data di riferimento: <input type="text" value="05/2011"/>

Figura 6.1 Monografia caposaldo RICE0600. Fonte: Regione Emilia-Romagna

Allegato 2



Rete Geodetica Costiera per il Monitoraggio Topografico e Batimetrico - Vertici GPS stazionabili -

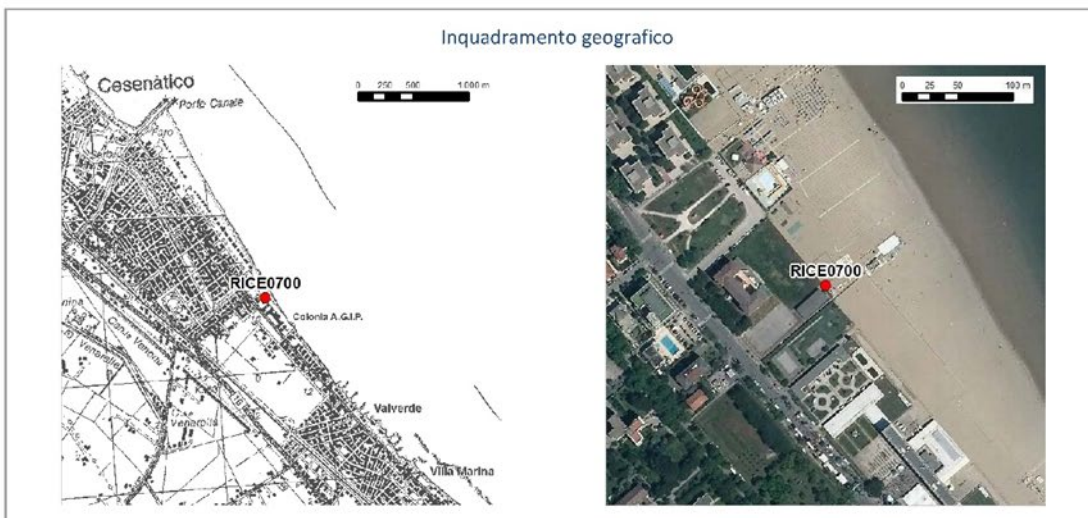
VERTICE:

Aggiornamento al 02/2018

Comune:	<input type="text" value="Cesenatico"/>	Provincia:	<input type="text" value="Forlì - Cesena"/>
Indirizzo:	<input type="text" value="Viale Giosuè Carducci"/>	Località:	<input type="text"/>
Ubicazione:	<input type="text" value="Presso Istituto Agnelli"/>		

Istituito da:	<input type="text" value="Arpae"/>	Anno:	<input type="text" value="2017"/>	Denominazione:	<input type="text" value="RICE0700"/>
Rete di appartenenza:	<input type="text" value="Rete Geodetica Costiera"/>				

Altra rete di appartenenza:	<input type="text"/>
Denominazione:	<input type="text"/>



Coordinate geografiche		Coordinate piane	
ETRS89-ETRF 2000 (2008.0)		ETRS89-ETRF 2000-UTM 32N (2008.0)	
EPSG: 6706		EPSG: 7791	
Lat (°):	<input type="text" value="44,19220344"/>	Long (°):	<input type="text" value="12,41481162"/>
Est (m):	<input type="text" value="772898,87"/>	Nord (m):	<input type="text" value="4898893,04"/>

Quota ellissoidica	h (m): <input type="text" value="42,03"/>	Data di acquisizione:	<input type="text" value="27/04/2017"/>
Quota ortometrica	H (m): <input type="text" value="2,56"/>	Data di riferimento:	<input type="text" value="05/2011"/>

Figura 6.2 Monografia caposaldo RICE0700. Fonte: Regione Emilia-Romagna

7 Bibliografia

- **Aguzzi, M., De Nigris, N., Preti, M., Mallegni, R., 2012.** Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola. Studi Costieri 20, 95–109.
- **Arpae, 2002.** Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2000. Bologna: I quaderni di Arpa. A cura di Mentino Preti, ARPA Emilia-Romagna.
- **Arpae, 2008.** Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione. Bologna: I quaderni di Arpa. Pagine 272. ISBN-88-8754-21-1.
- **Arpae, 2016.** Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012. Erosione e interventi di difesa. Bologna: I quaderni di Arpae. Pagine 227. ISBN978-88-87854-41-1.
- **Arpae, 2020.** Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2018. Erosione e interventi di difesa. Bologna: I quaderni di Arpae. Pagine 224. ISBN 978-88-87854-48-0.
- **ATERSIR, 2019.** Gestione dei rifiuti urbani ed assimilati nel bacino territoriale di Ravenna e Cesena. Allegato A.11 al Disciplinare Tecnico Caratteristiche del servizio di Pulizia Spiagge attivo al momento di avvio del Contratto. ATERSIR - Agenzia Territoriale dell'Emilia-Romagna per i Servizi Idrici e Rifiuti. Via Cairoli, n. 8/F –40121 Bologna.
- **Bruun, P., 1983.** Beach scraping—is it damaging to beach stability? Coastal Engineering 7, 167–173.
- **Dare, J.L., 2003.** Alternative shore protection strategies: Innovative options and management issues.
- **Farina M., 2014.** Le azioni della Regione Emilia-Romagna a difesa del territorio costiero (seconda parte); SAIE Built Academy A5 – Bologna, 24 ottobre 2014
- **IPCC, 2019.** IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- **MATTM-Regioni, 2018.** Linee Guida per la Difesa della Costa dai fenomeni di Erosione e dagli effetti dei Cambiamenti climatici. Versione 2018 - Documento elaborato dal Tavolo Nazionale sull'Erosione Costiera MATTM-Regioni con il coordinamento tecnico di ISPRA, 305 pp

- **Meli, M., Olivieri, M., Romagnoli, C., 2021.** Sea-Level Change along the Emilia-Romagna Coast from Tide Gauge and Satellite Altimetry. *Remote Sensing* 13, 97. <https://doi.org/10.3390/rs13010097>
- **Psuty, N.P., 1988.** Sediment budget and dune/beach interaction. *Journal of Coastal Research* 1–4.
- **Regione Emilia-Romagna, 2016.** Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni della Regione Emilia-Romagna.
- **Regione Emilia-Romagna, 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>
- **Regione Emilia-Romagna, 2021.** AdriaClim WP5 – Adaptation Plans, Activity 5.5 – Emilia-Romagna Coast Adaptation Plan. Linee d’indirizzo Strategia di Gestione Integrata per la Difesa e l’Adattamento della Costa ai cambiamenti climatici (GIDAC) - Documento Preliminare – Linee d’indirizzo. Gennaio 2021.
- **Romagnoli, C., Sistilli, F., Cantelli, L., Aguzzi, M., De Nigris, N., Morelli, M., Gaeta, M.G., Archetti, R., 2021.** Beach Monitoring and Morphological Response in the Presence of Coastal Defense Strategies at Riccione (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering* 9, 851. <https://doi.org/10.3390/jmse9080851>