Studio d'Ingegneria Rivaroli & Partner
Dott. Ing. Matteo Rivaroli - Via N. Sauro nr. 63-65 – 17031 Albenga (SV)
Tel. 0182-542754 Fax. 0182 556704 E-mail : Info@studiorivaroli.it info@pec.studiorivaroli.it
C.F. : RVRMTT73D10A145Y P.I.: 01680780093

COMUNE DI ALASSIO

Provincia di Savona

RELAZIONE TECNICO - ILLUSTRATIVA

PROGETTO DI DIFESA COSTIERA E CONTENIMENTO DELL'EROSIONE MIRATO ALLA RICOSTRUZIONE E ADEGUAMENTO DEI PENNELLI ESISTENTI DANNEGGIATI DAGLI EVENTI METEOMARINI DEL 29-30 OTTOBRE 2018 E CONTESTUALE INTERVENTO DI RIPASCIMENTO STRUTTURALE OPERE DA REALIZZARSI SULLA SPIAGGIA D'ARBORA PRESSO LO STABILIMENTO BALNEARE BABA BEACH IN COMUNE DI ALASSIO

COMMITTENTE:

Soc. "Monti e Mare s.r.l." di Della Valle Andrea con sede in Alassio (SV)

via F.M. Giancardi nr.47 - C.F./P.I.: 01059060093

PROGETTISTA ARCHITETTONICO E DELLE STRUTTURE:

Dott. Ing. Matteo Rivaroli, via N. Sauro nr° 63-65 – 17031 Albenga (SV)
C.F.: RVRMTT73D10A145Y P.I.: 01680780093
Pec : studio@pec.studiorivaroli.it

Albenga, 23.06.2021

Il Tecnico

Dott. Ing. Matteo Rivaroli

Firmato digitalmente da Rivaroli matteo
ND: c=IT, cn=Rivaroli matteo, serialNumber=TINIT-RVRMTT73D10A145Y, givenName=matteo, sn=Rivaroli, dnQualifier=22155391, title=Ingegnere
Versione di Adobe Acrobat: 2021.005.20060

SOMMARIO

1 PREMESSA 4
2 INQUADRAMENTO DEL SITO 5
2.1 IDENTIFICAZIONE DELL’ UNITA’ FISIOGRAFICA 8
2.2 STRUMENTI DI PROGRAMMAZIONE E PIANIFICAZIONE VIGENTI 10
2.3 ANALISI STORICA, RILIEVO DELLO STATO ATTUALE E TENDENZA EVOLUTIVA 20
2.3.1 EVOLUZIONE STORICA 21
2.3.2 INDAGINI GEOGNOSTICHE 25
3 CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA 28
3.1 DATI DI VENTO 31
3.2 DATI DI MOTO ONDOSO 34
3.3 LIVELLO IDROMETRICO 36
3.4 DATI TOPO-BATIMETRICI 37
3.5 ANALISI DELLE CARATTERISTICHE SEDIMENTOLOGICHE 39
4 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI 44
4.1 ALTEZZA D’ONDA SIGNIFICATIVA 45
4.2 INTENSITA’ DEL VENTO 47
4.3 LIVELLO MARINO 49
5 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO 50
5.1 MODELLO SW : BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO. 52
5.2 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE 54
6 TRASPORTO LITORANEO 57
6.1 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO LITDRIFT 57
6.2 RISULTATI DELL’ ELABORAZIONE 59
7 STUDIO DELLE DINAMICHE COSTIERE 63
7.1 SETUP DEL MODELLO HD 64
7.1.1 DOMINIO DI CALCOLO 64
7.1.2 SCELTA DELLE CONDIZIONI D’ONDA RAPPRESENTATIVE. 65
7.2 MODELLO INTEGRATO ONDA-CORRENTE 68
7.2.1 RISULTATI DEL MODELLO D’ONDA 68
7.2.2 RISULTATI DEL MODELLO IDRODINAMICO 73
8 STUDIO DEGLI EVENTI ESTREMI - STATO ATTUALE 77
8.1 SCENARI DI SIMULAZIONE E FORZANTI 77
8.2 RISULTATI DELL’ELABORAZIONE 79
8.2.1 MAREGGIATA DEL 1986 80
8.2.2 MAREGGIATA DEL 1993 83
8.2.3 MAREGGIATA DEL 2018 87
9 OPERE PROGETTUALI 91
9.1 CONFRONTO IPOTESI DI INTERVENTO – MAREGGIATA DEL 2018 91
9.1.1 IPOTESI A 92
9.1.2 IPOTESI B 96
9.1.3 IPOTESI C 99
9.2 STUDIO DEGLI EVENTI ESTREMI 103
9.2.1 MAREGGIATA DEL 1986 103
9.2.2 MAREGGIATA DEL 1993 107
9.3 STUDIO DELLE DINAMICHE COSTIERE - OPERE IN PROGETTO 110
9.3.1 PROPAGAZIONE DELLE ONDE RAPPRESENTATIVE 111
9.3.2 RISULTATI DEL MODULO SW 111
9.3.3 RISULTATI DEL MODULO HD 114
9.3.4 RISULTATI DEL MODULO ST 117

9.3.5 DETERMINAZIONE DELLE ONDE DI PROGETTO 120
9.3.6 PROPAGAZIONE DELLE ONDE DI PROGETTO 123
10 DIMENSIONAMENTO OPERE 125
10.1 VERIFICA DI STABILITÀ DELLA MANTELLATA 126
10.2 RIPASCIMENTO STRUTTURALE 129
10.3 NOTA SUI MATERIALI 132
11 MODALITÀ E TEMPI DI REALIZZAZIONE 132
12 SINTESI DELLO STUDIO E CONCLUSIONI 134
ALLEGATI 137

1 PREMESSA

L'intervento in progetto, di iniziativa privata, nasce dall'esigenza del concessionario di tutelare l'arenile ed i beni immobili su di esso regolarmente costruiti (ed oggi incamerati al Demanio dello Stato), al fine di mantenere uno stabilimento balneare con annesso Bar-Ristorante.
Gli eventi sempre più frequenti ed intensi che si sono susseguiti negli ultimi anni hanno comportato una forte erosione dell’arenile e sempre più spesso danni allo stabilimento balneare in oggetto, nonostante i numerosi interventi di ripascimento stagionale eseguiti.
Al fine di analizzare le dinamiche costiere che si instaurano nell’area in oggetto e quindi determinare la migliore tra le ipotesi di intervento previste sono stati utilizzati differenti codici di calcolo appartenenti alla famiglia MIKE Powered by DHI, in particolare:

- MIKE 21 SW (Spectral Waves), modello d’onda bidimensionale;
- MIKE 21 HD (Hydrodynamics), modulo idrodinamico bidimensionale;
- MIKE 21 ST (Sand Transport), modulo di trasporto di sedimenti non coesivi;
- LitDrift, modulo monodimensionale per la simulazione del trasporto di sedimenti.

Le attività modellistiche hanno permesso di evidenziare i vantaggi e le criticità di differenti soluzioni progettuali proposte, che sono state via via affinate fino a pervenire ad uno schema ottimizzato.
Di qui l’intenzione di eseguire un intervento di ricostruzione e potenziamento dei pennelli esistenti, mediante innalzamento ed allargamento della berma e per il pennello lato levante, modifica del profilo longitudinale al fine di migliorare la protezione fornita all’arenile e alle strutture ivi insistenti ed assicurare una protezione alla fuoriuscita dei sedimenti verso largo; è inoltre prevista la realizzazione di un ripascimento strutturale della cella litoranea che permetta di ricreare la spiaggia emersa fortemente erosa dalle mareggiate dell’ottobre 2018 e nel contempo ricrei una naturale protezione alle strutture balneari.

2 INQUADRAMENTO DEL SITO

L'area di intervento è situata all'interno del Paraggio di Sant'Anna interamente compreso nel Comune di Alassio, che si estende da Capo Santa Croce a Punta Cippo, sviluppandosi per 2,6 km con un orientazione pressoché costante da SSW-NNE; la zona a ponente è caratterizzata dalla presenza del Porto di Alassio e della spiaggia di Sant'Anna, quella centrale da Punta Murena con una costa alta naturale e la parte a levante da una scogliera artificiale costruita a protezione della Ferrovia, a meno della spiaggia d'Arbora oggetto di intervento.

In relazione all'esposizione ventosa, il paraggio è protetto a SW dal Porto di Alassio e capo Santa Croce, a NE da Punta Cippo e ad E dalla presenza dell'Isola Gallinara, generando un moto ondoso proveniente quasi esclusivamente dai settori meridionali (145-200°); in particolare si è rilevato come le onde generate da venti di Libeccio subiscano, nella propagazione verso costa, una forte rotazione.



Figura 2.1: Individuazione del tratto di costa oggetto di intervento

La presenza della foce del fiume Centa a breve distanza, non influenza particolarmente il trasporto di sedimenti, a causa dell'assetto del moto ondoso e del limite fisico dato dalla presenza di Punta Cippo; il flusso sedimentario proveniente dal Paraggio limitrofo di Vadino viene quasi completamente trasportato al largo in corrispondenza di tale promontorio, ad

accezione di parte della frazione grossolana che va ad alimentare la spiaggia sommersa antistante la Spiaggia d’Arbora.

Da un punto di vista morfologico il Paraggio di Sant’Anna è interamente costituito da costa alta, con la presenza di alcune spiagge, non classificabili come costa bassa, ma bensì spiagge a tasca, ovvero depositi di fondo baia in un contesto di costa alta.

Una di queste è la spiaggia d’Arbora, oggetto dell’intervento di difesa costiera in progetto, individuata dalla cella litorale 222, che ha uno sviluppo costiero di circa 168 metri ed una profondità massima di 25 m; essa è posta allo sbocco di un breve corso d’acqua e si appoggia a levante sul promontorio di Punta Cippo mentre a ponente sulla massicciata ferroviaria.

La spiaggia sommersa presenta un profilo convesso delimitato alle estremità da due pennelli di protezione : quello più a Ovest ha una lunghezza pari a circa 25 m mentre quello ad Est si estende per circa 30 m, ma si trova in una condizione di forte degrado.

La morfologia della zona si presenta con un litorale stretto e pianeggiante interrotto dal versante orientale del Monte Bignone, di discreta acclività, attraversato dalla linea ferroviaria Ge-XXmiglia e più a monte dalla via Aurelia.



Figura 2.2 : Individuazione del tratto di costa oggetto di intervento e rappresentazione dei punti di ripresa fotografica



Figura 2.3: Immagine fotografica dell’area oggetto di intervento effettuata dal punto di scatto 1



Figura 2.4 : Immagine fotografica dell’area oggetto di intervento effettuata dal punto di scatto 2

2.1 IDENTIFICAZIONE DELL' UNITA' FISIOGRAFICA

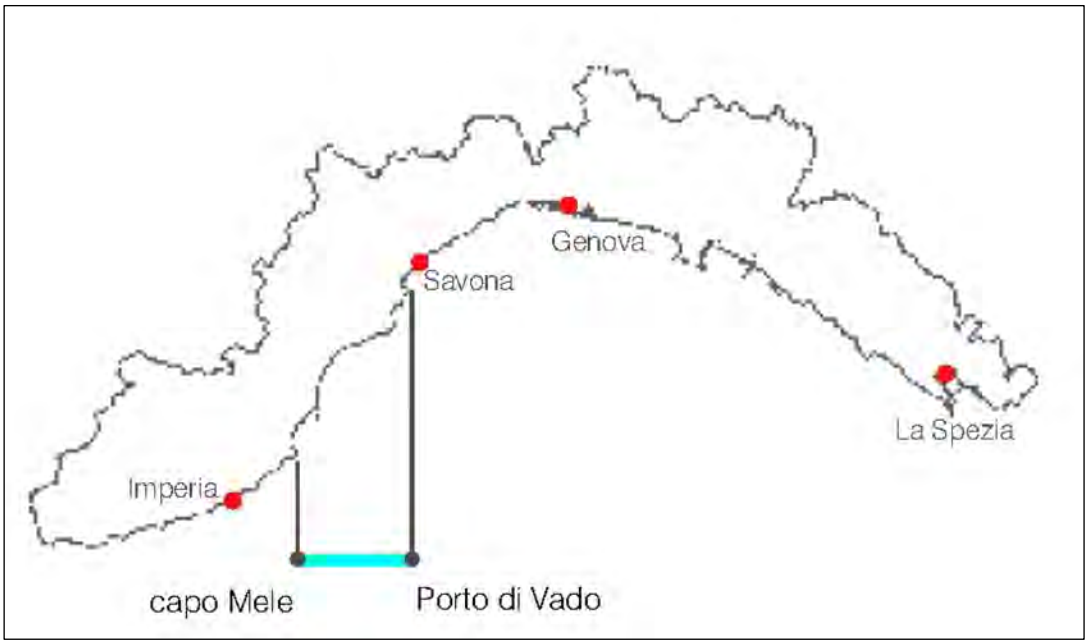


Figura 2.5: Rappresentazione Unità fisiografica definita dallo studio Aquater 1987.

Il promontorio di capo Mele individua l'inizio di una brusca variazione dell'orientazione della costa che assume in generale un andamento SSW-NNE rendendola maggiormente protetta dalle agitazioni ondose principali provenienti da SW. La sua estremità di levante è definita da una struttura portuale, quella di Vado, realizzata all'inizio degli anni 1970. In questo tratto sfocia uno dei più importanti corsi d'acqua della regione, il fiume Centa, in coincidenza del quale si osserva l'attuale tratto di costa deposita più ampio di tutta la regione, anche se ormai fortemente compromesso. Infatti in questo tratto sono presenti delle opere a mare che hanno condizionato l'evoluzione della costa.

Oltre ai porticcioli presenti (Alassio, Loano, Finale Ligure) l'intervento che ha segnato maggiormente il territorio è relativo alla difesa aderente posta a protezione del tracciato ferroviario nel tratto Alberga-Ceriale, struttura che ha causato la completa scomparsa della spiaggia.

Nella cartografia regionale, l'unita fisiografica in cui ricade l'arenile oggetto d'intervento è individuata con il codice UF 10 e presenta all'estremità di ponente il Capo di S. Croce con il porto turistico di Alassio e, a levante il Capo Lena, foce del fiume Centa.

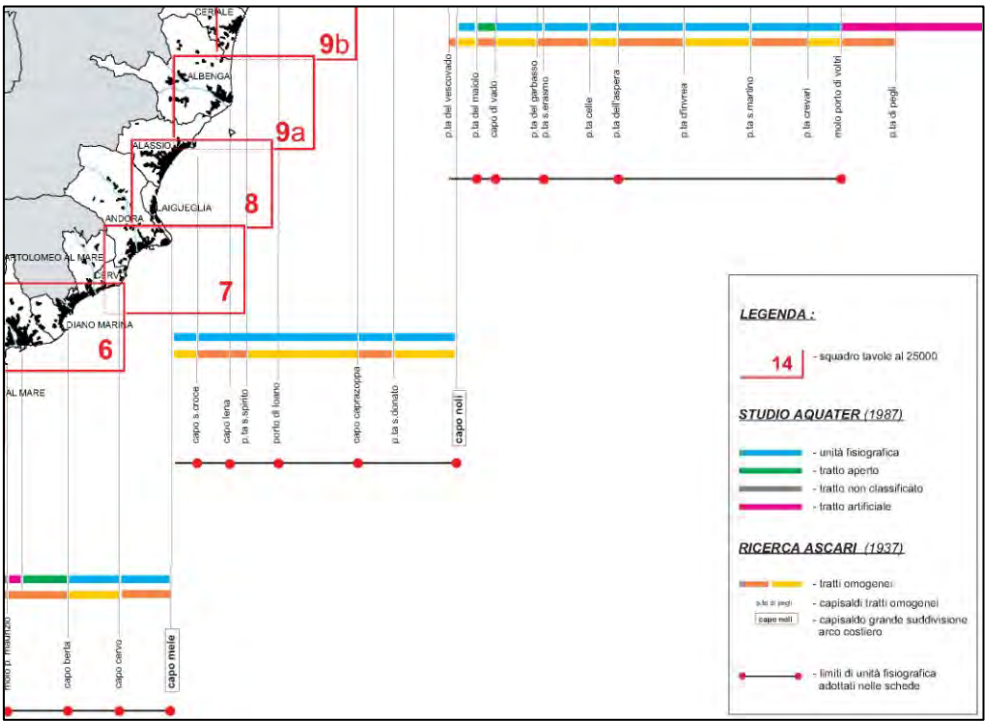


Figura 2.6: Stralcio del quadro d'Unione delle Unità Fisiografiche del ponente ligure (da PTC della Costa, 2000)

L'arenile oggetto d' intervento è localizzato all'incirca al centro dell'unità fisiografica tra Punta Murena e Punta Cippo, ed è racchiuso tra due tratti di costa alta rocciosa.



Figura 2.7: Limiti Unità Fisiografica UF 10 (in colore verde) individuati a Ponente da C. Santa Croce ed il porto di Alassio e a Levante dal Capo Lena coincidente con la Foce del fiume Centa; in colore rosso sono individuati i tratti di costa sabbiosa/ciottolosa, in colore azzurro i limiti del paraggio individuati da punta Cippo a Levante e dal Capo di S. Croce a Ponente, infine, cerchiata in colore giallo l'area oggetto d'intervento

2.2 STRUMENTI DI PROGRAMMAZIONE E PIANIFICAZIONE VIGENTI

L'Intervento in progetto prevendendo la modifica e l'adeguamento di opere di difesa costiera dovrà essere coerente con gli strumenti di programmazione e pianificazione territoriale vigenti ed essere rispettoso delle prescrizioni della normativa tecnica, nazionale e regionale, in materia con particolare riferimento alla D.G.R. 222/2003 così come modificata ed integrata dalla D.G.R. 429/2009 recante :" *Approvazione dei criteri generali per la progettazione e l'esecuzione delle opere di difesa della costa e degli abitati costieri e di ripascimento degli arenili*" e delle "*Istruzioni tecniche per la progettazione e la esecuzione di opere di protezione delle coste*" di cui alla Delibera del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nr° 151/1991.

Per quel che attiene la coerenza dell'intervento in progetto con gli strumenti di programmazione e pianificazione vigenti, si rileva che l'area oggetto di intervento ricade in:

Carta Tecnica Regionale (C.T.R.)

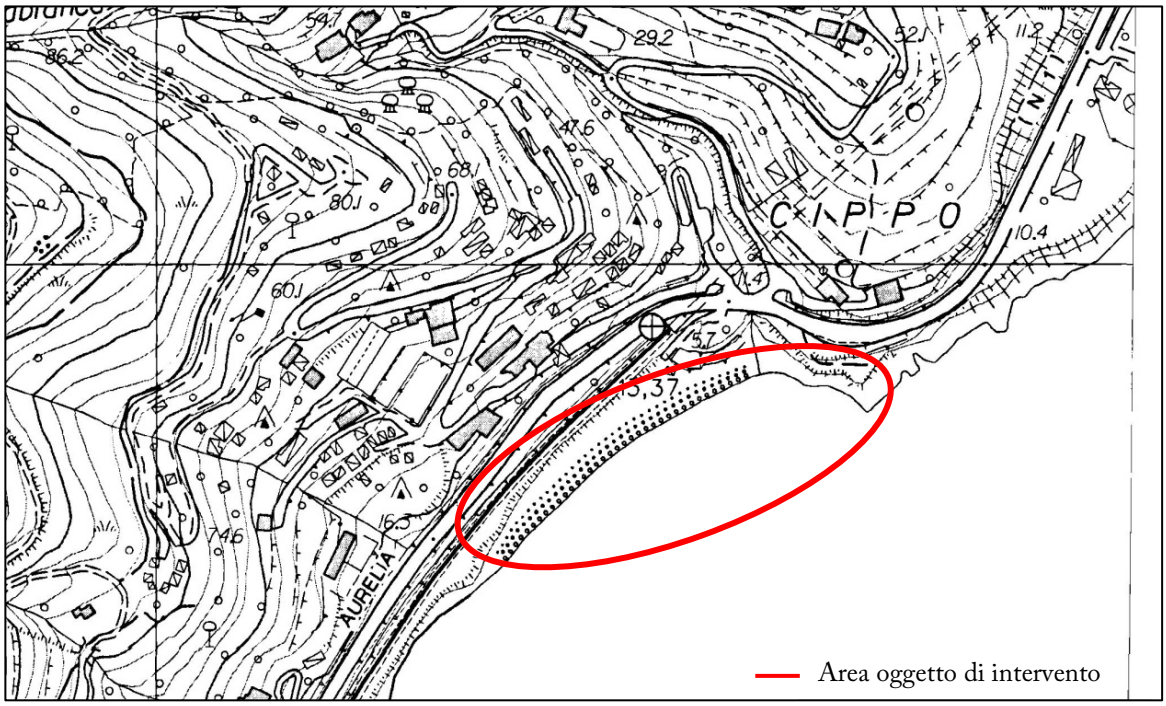


Figura 2.8: Stralcio Carta Tecnica Regionale e localizzazione area oggetto d'intervento; Coordinate: 44° 01' 55"N - 8° 12' 15"E

Piano Urbanistico Comunale (P.U.C.) di Alassio:

In Ambito di conservazione Ac8, zona H6 "Tutela e fruizione della fascia costiera" come si evince dalla cartografia esistente, Art. 16.1 delle Norme di Attuazione del P.U.C. vigente. Nella scheda d'ambito Ac8 si legge:

"[…] L'Ambito Ac8 comprende la zona costiera H6 da villa Brunati fino al confine con Albenga. È prevista la realizzazione di una passeggiata a mare collegata in alcuni punti con la via Aurelia, mediante il recupero dell'ex sede ferroviaria. Sono previste opere a mare per la formazione dell'arenile e per l'attrezzatura dei tratti a scogliera; la formazione di un nuovo sistema balneare con le caratteristiche già illustrate per la zona "H4". Gli interventi di recupero funzionale dell'ex sede ferroviaria sono soggetti a progetto unitario coordinato tra le zone "H6", "H5","H4" […]"

Per quanto sopra si ritiene l'intervento assentibile.

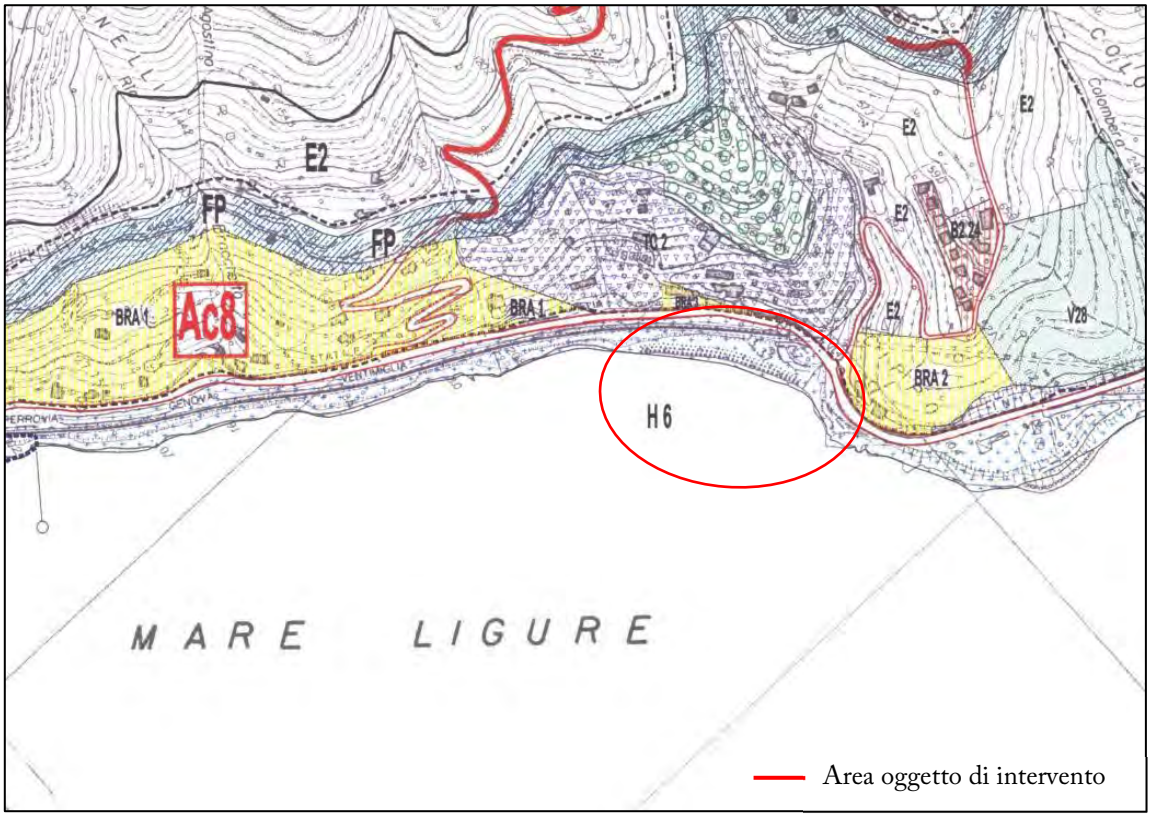


Figura 2.9: Stralcio P.U.C. di Alassio, Zona H6 di tutela ambientale della fascia costiera, Ambito di conservazione Ac8

Piano Territoriale di Coordinamento Paesistico (P.T.C.P.) della Regione Liguria

- *Assetto Geomorfologico*:

  Zona: Consolidamento (CO) - Art. 65

  "Tale regime si applica nelle parti del territorio che presentano condizioni idrogeologiche comportanti rischi di compromissione per l'ambiente e/o pericoli per le attività insediate,

e nelle quali peraltro si riscontrano valori paesaggistici o di fruizione che richiedono particolare attenzione. L'obiettivo è quello di garantire un adeguato controllo delle situazioni di rischio ed il conseguimento di un soddisfacente livello della qualità ambientale […]"

L'intervento di difesa della costa in progetto è coerente con le indicazioni della norma in quanto prevede la bonifica dell'attuale stato di erosione del tratto di costa in oggetto mediante un insieme sistematico di opere che permettano di conseguire la mitigazione del rischio per l'ambiente e per gli insediamenti esistenti riducendo al minimo l'impatto ambientale delle stesse.

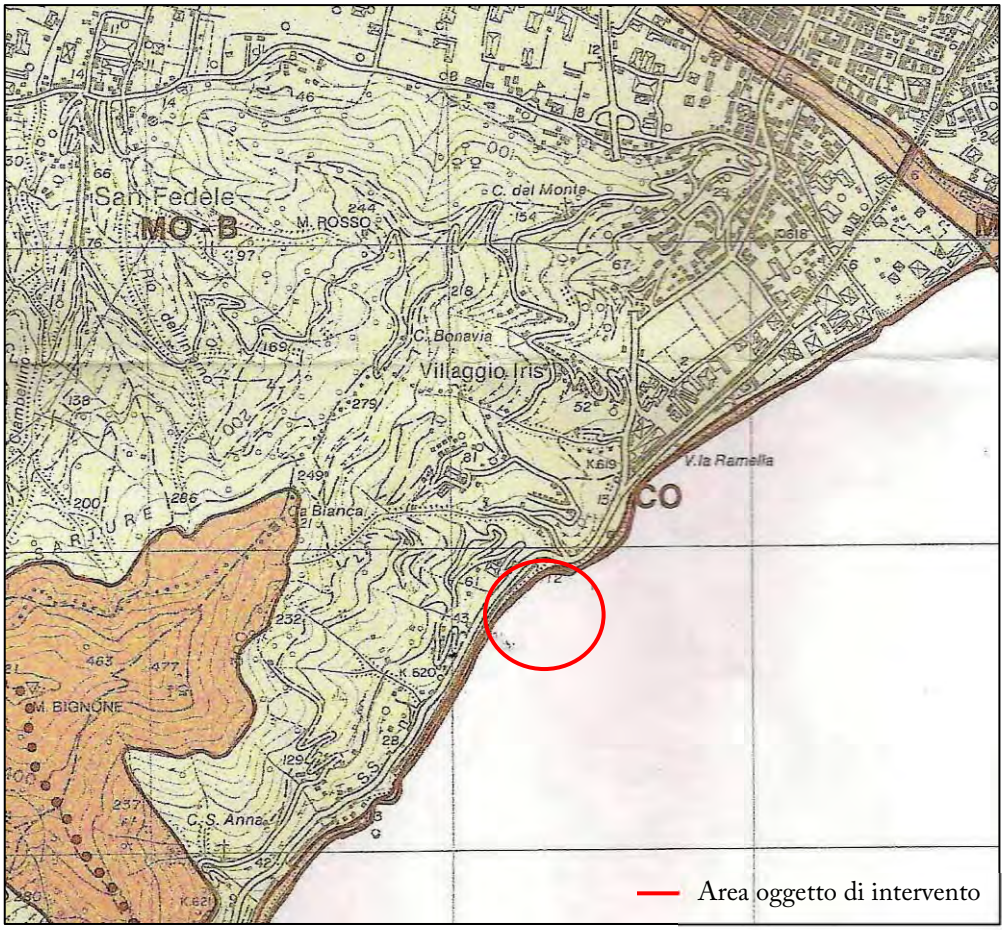


Figura 2.10: Stralcio PTCP Assetto geomorfologico - Zona CO - Art. 65 - Scala 1:25000

- *Assetto insediativo:*

  Zona: Insediamenti Sparsi con Regime di Conservazione (IS-CE) - Art. 48

  "[…] L'obiettivo del regime normativo è quello di conservare sostanzialmente inalterata la situazione attuale per quanto riguarda i rapporti quantitativi e qualitativi tra l'insediamento ed il contesto ambientale. La normativa è altresì volta a rendere possibili,

in quanto compatibili con l'obiettivo enunciato, quegli interventi episodici che siano preordinati al recupero di eventuali singole situazioni di degrado e al soddisfacimento di puntuali carenze di ordine funzionale […] Non è pertanto consentito costruire nuovi edifici, né alterare quelli esistenti se non per adeguarli ai caratteri propri della zona."

L'opera di difesa è sicuramente compatibile con il regime di conservazione non alterando in alcun modo i rapporti quantitativi e qualitativi tra gli insediamenti e l'ambiente circostante.

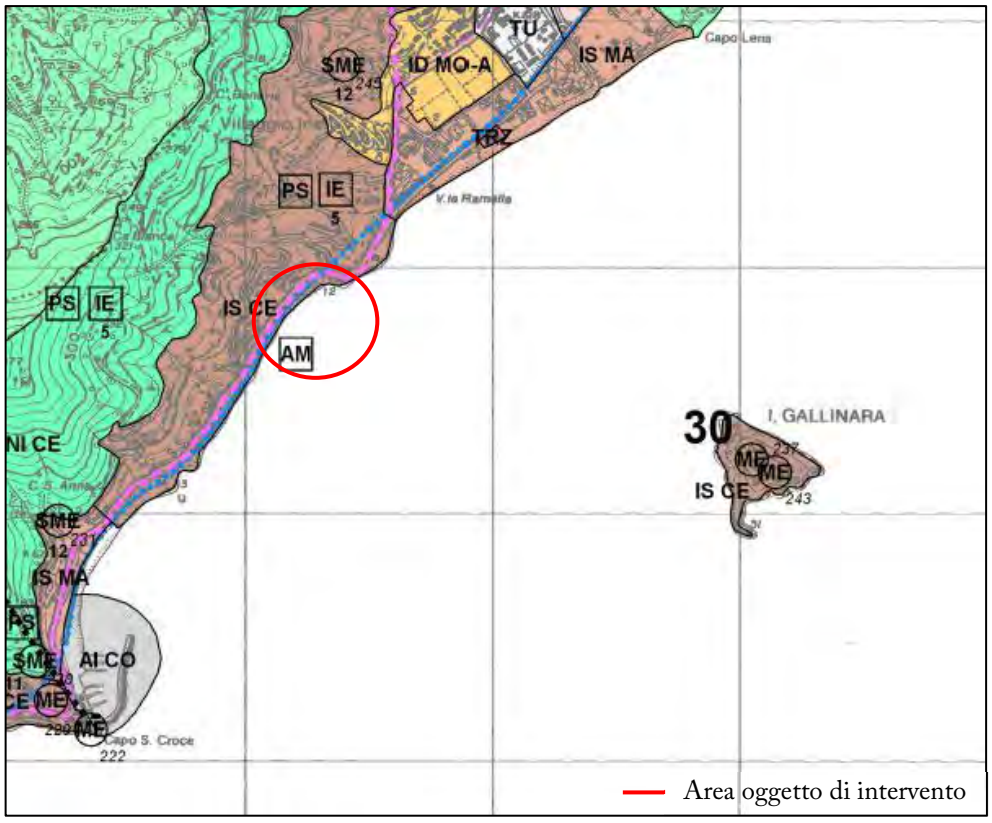


Figura 2.11: Stralcio PTCP Assetto insediativo - Zona IS-CE - Art. 48 - Scala 1:25000

- *Assetto vegetazionale*:

  Zona: Colture Agricole Impianti Sparsi Serre (COL-ISS) - Artt. 58-60

  Il regime normativo disciplina le zone agricole in cui si debba procedere alla costruzione di nuovi edifici, impianti ed infrastrutture.

  "[…] L'obiettivo della disciplina è quello di assicurare che l'evoluzione delle attività agricole verso una maggiore efficienza e competitività trovi riscontro nelle forme del paesaggio agrario senza tuttavia alterarne i caratteri prevalenti. […]"

  L'intervento in progetto non interessando le zone agricole localizzate nelle aree a monte del litorale, risulta assentibile.

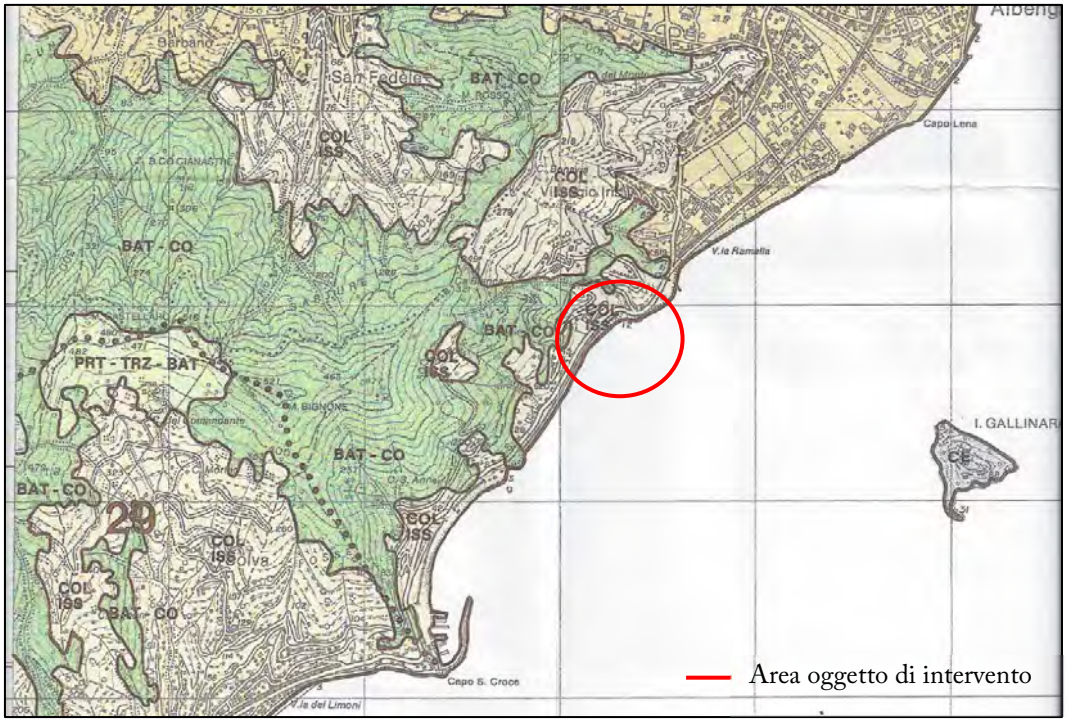


Figura 2.12: Stralcio PTCP Assetto Vegetazionale Zona COL-ISS - Artt. 58-60 - Scala 1:25000

Piano Territoriale di Coordinamento della Costa (P.T.C. della Costa)

Il Piano disciplina, promuove e coordina gli interventi sulla costa secondo i principi dello sviluppo sostenibile, della pianificazione integrata della zona costiera e del controllo della qualità degli interventi, fornendo inoltre indicazioni specifiche relative ai settori di intervento di interesse regionale. L'area di intervento ricade all'interno dell'ambito per la tutela attiva ATA7 che si estende dal porto di Alassio a capo Vadino; le indicazioni specifiche relative alla difesa costiera ed al ripascimento delle spiagge sono riportate nel Fascicolo 2.2.1 "Difesa costiera e ripascimento delle spiagge" corredato di tavole a scala 1:25.000: l'intervento in oggetto è conforme agli indirizzi e criteri previsti dal Piano.

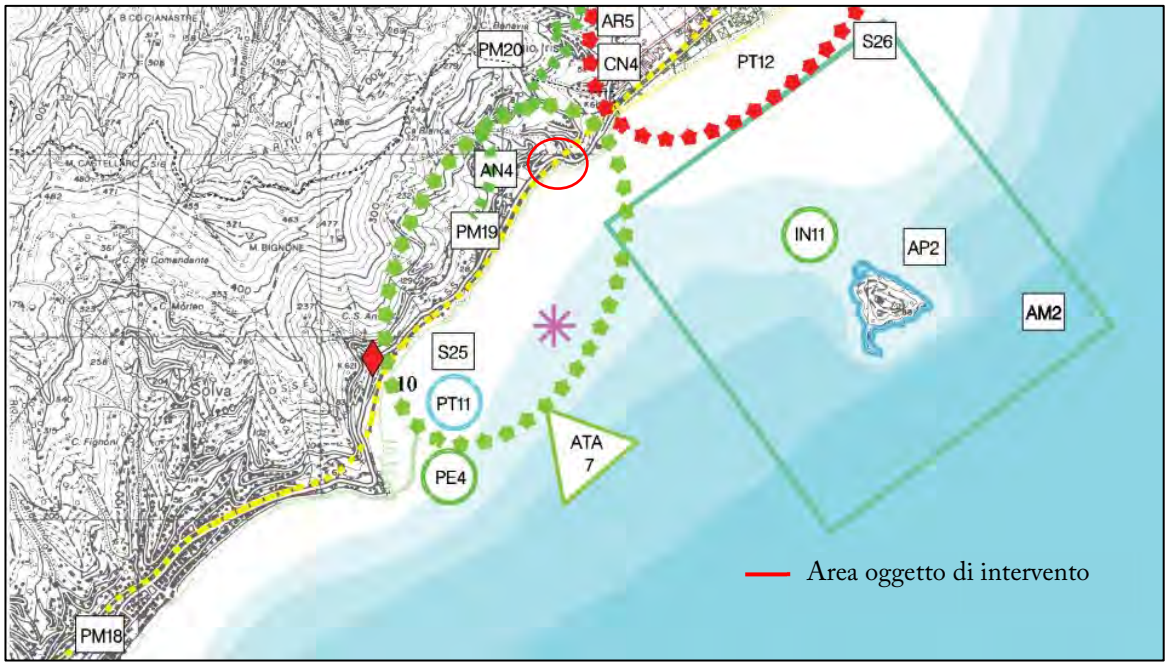


Figura 2.13: Stralcio PTC della Costa - Fascicolo 2.1: Indicazioni generali per la riqualificazione del territorio, la valorizzazione del paesaggio costiero e la tutela dell'ambiente marino



Figura 2.14: Stralcio PTC della Costa- Fascicolo 2.2.1: "Difesa costiera e ripascimento delle spiagge" Tav. 9a da Capo S. Croce a Capo Caprazoppa

<u>Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero (P.T.A.M.C.) della Regione Liguria – Ambito 08</u>

Il Piano persegue l'obiettivo della gestione integrata della fascia costiera attraverso la difesa della costa dall'erosione nonché la conservazione e la valorizzazione degli habitat marino costieri ivi presenti; funge da strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo

mediante il quale vengono fissati gli obiettivi a scala di unità fisiografica e individuati gli strumenti di attuazione e le modalità e priorità d'intervento.

Il Piano presenta differenti elaborati cartografici, tra i quali ricoprono notevole importanza relativamente all'intervento in oggetto il C02 e C07, riportati di seguito:

- *C02 - Habitat Marini*

  La parte di spiaggia sommersa compresa tra i due pennelli esistenti è costituita da fondale sabbioso ma ad Est e ad Ovest, in corrispondenza di questi, vi è la presenza di alghe fotofile.



Figura 2.15: Stralcio PTAMC 08 – C02 Habitat Marini – scala 1:10000

In tabella viene riportata la legenda relativa allo stralcio del PTAMC 08 – C02:

	Classe
	Posidonia su roccia
	Alghe fotofile
	Prato di Cymodocea nodosa
	Sabbia
	Prato di Cymodocea con presenza di Caulerpe

- *C07 – Regimi Normativi*

  L'area oggetto di intervento ricade contemporaneamente nella Fascia Dinamica A e B, e confina ad Est ed Ovest con tratti di costa rocciosa di particolare importanza per la biodiversità da preservare dalle trasformazioni antropiche (habitat "1170 Scogliere" di cui alla Direttiva CE/92/43) indicate come Zone a Trasformazione Vincolata (ZTV); il pennello ad Est ricade inoltre anche nella Fascia Dinamica C.

  Secondo le indicazioni di intervento riportate nella Relazione relativa al Paraggio di Sant'Anna (P.T.A.M.C. -Ambito 08): è consentito un intervento di ripascimento mirato al mantenimento e al modesto potenziamento dell'arenile attuale ed il contestuale adeguamento del pennello esistente in modo che il materiale resti confinato e non vada ad interferire con la zona naturalistica di pregio ZTV.



Figura 2.16: Stralcio PTAMC 08 – C07 Regimi Normativi – scala 1:10000

In tabella viene riportata la legenda relativa allo stralcio del PTAMC 08 – C07:

	Area	*Regime Normativo*
	Fascia Dinamica A (FDA)	PTAMC: Art.8 comma 2
	Fascia Dinamica B (FDB)	PTAMC: Art.8 comma 3

	Fascia Dinamica C (FDC)	PTAMC: Art.8 comma 4
	Zona a Trasformazione Vincolata (Z.T.V.)	PTAMC: Art.14 comma 1
	Fasce Suscettività Costa Alta	PTAMC: Art.10

Siti di Importanza Comunitaria (S.I.C.) Terrestri e Marini:

La perimetrazione dei Siti di Importanza Comunitaria (S.I.C.) è stata realizzata attraverso l'utilizzo integrato di fotografie aeree, carte tematiche preesistenti e bibliografia scientifica; il progetto è stato realizzato dalla Regione Liguria in scala 1:10000.
Nell'area in oggetto non vi è la presenza di Posidonia Oceanica, di elevato valore naturalistico, che è tutelata come Zona Speciale di Conservazione (Z.S.C.) all'interno dei Siti di Importanza Comunitaria (S.I.C.) Terrestri e Marini; alcune formazioni sono presenti nella zona antistante (a 250 m dalla linea di costa) e ad ovest (a circa 50 m dal pennello ovest, in direzione SW).



Figura 2.17: Stralcio S.I.C. Terrestri e Marini – scala 1:10000; in verde le aree Z.S.C. (ex S.I.C)

Facendo riferimento al documento "Misure di conservazione del sito specifiche per i SIC marini liguri", le Schede 2.1 e 2.2 illustrano gli impatti potenziali e le misure di conservazione

relativamente alle attività di Ripascimento delle spiagge e della realizzazione delle opere rigide di difesa della costa; l'area oggetto di intervento non rientra in aree Z.S.C. (ex S.I.C.), ma verranno seguite tali indicazioni per mitigare l'impatto delle opere sugli habitat posti nelle vicinanze del sito.

Atlante Habitat Marini 2020:

L'atlante fornisce una base conoscitiva naturalistica dei fondali marino-costieri, dei loro principali popolamenti, fra i quali le praterie di Posidonia oceanica ed il Coralligeno.

E' obbligatoria la conoscenza della distribuzione degli habitat sensibili nell'intorno del sito di intervento; a tale scopo la Regione Liguria pubblica e aggiorna periodicamente come base cartografica di riferimento l'Atlante degli habitat marino costieri della Liguria in scala 1.10:000.

L'intervento verrà svolto in modo tale da mitigare l'impatto sugli habitat presenti.

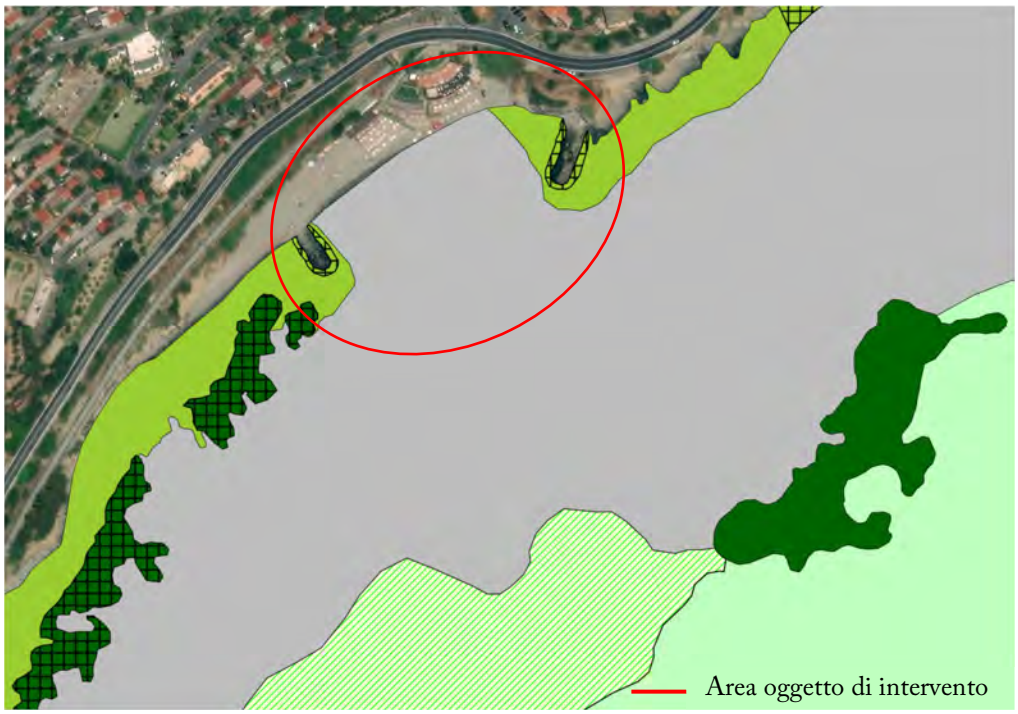


Figura 2.18: Stralcio Atlante Habitat Marini 2020– scala 1:10000

In tabella viene riportata la legenda relativa allo Stralcio Atlante Habitat Marini 2020:

	Habitat
	Posidonia oceanica tra e su roccia
	Prateria di Posidonia oceanica
	Alghe fotofile su substrato prevalentemente artificiale

	Insieme dei popolamenti algali fotofili infralitorali di substrato duro
	Sabbie litorali
	Formazione mista di Cymodocea nodosa e Caulerpa taxifolia
	Prato di Cymodocea nodosa

2.3 ANALISI STORICA, RILIEVO DELLO STATO ATTUALE E TENDENZA EVOLUTIVA

Il tratto di litorale di circa 50 km che va da capo Mele a porto Vado, presenta caratteri geologici e morfologici che lo distinguono nettamente dai tratti precedenti.

Il suo assetto geologico - strutturale e morfologico è condizionato dall'orogenesi alpina ma risente, in parte, anche di quella appenninica. Questa complessità geologica si esplica attraverso la presenza di strutture sia ortogonali che parallele alla costa e quindi i corsi d'acqua ed i rilievi assumono orientazioni differenti. Questo assetto geologico - strutturale determina inoltre un orientamento della costa circa NNE-SSW, che offre, almeno in ampi settori, una relativa protezione alle agitazioni principali di libeccio. La piattaforma continentale è più ampia e la scarpata meno acclive dei tratti precedenti; esse continuano ad essere interessate da importanti depressioni sottomarine, le cui principali sono il canyon di capo Mele e quello di Vado. Anche litologicamente questo settore si differenzia da quelli descritti precedentemente. Infatti mentre il tratto compreso tra capo Mele ed il versante destro del fiume Centa è ancora costituito da litotipi appartenenti al dominio ligure, il tratto successivo è caratterizzato da terreni appartenenti al dominio brianzonese. In particolare i primi sono rappresentati da formazioni a carattere flyshoide quali l'unità di Sanremo - monte Saccarello, che contraddistingue tutto l'imperiese, l'Unità di Moglio - Testico e l'Unità di Borghetto d'Arroscia - Alassio.

Essi sono costituiti da sedimenti tipici delle torbiditi quindi areniti, areniti quarzose, marne, calcilutiti, peliti e argilliti. I secondi invece sono prevalentemente successioni calcaree e calcaree dolomitiche (Unità di Arnasco Castelbianco), quarziti e dolomie (quarziti di Ponte di Nava, dolomie di S. Pietro ai Monti) o ancora litotipi metamorfici (Metaconglomerati, Ignimbriti e ortogneiss). Cioè litotipi presentanti caratteristiche tali da contribuire maggiormente all'alimentazione dei litorali.

I bacini idrografici che insistono su questo tratto costiero drenano una superficie relativamente ampia e pari a circa 700 km^2, di cui 430 km^2 sono riferibili al solo bacino del fiume Centa che sfocia all'estremità meridionale di questo settore. Questo corso d'acqua presenta, almeno nel

suo tratto terminale, caratteristiche tipiche di un sistema fluviale; infatti è un corso d'acqua a carattere perenne che garantisce un apporto relativamente continuo nel tempo di sedimenti; sedimenti che presentano caratteristiche granulometriche differenti da quelli trasportati dagli altri corsi d'acqua regionali. Questi apporti sedimentari sono caratterizzati da una decisa prevalenza di tessiture riferibili alle sabbie che infatti sono prevalenti nei litorali alimentati da questo fiume.

Gli apporti sedimentari dei corsi d'acqua in quest'area risultano piuttosto elevati, specie se confrontati con altri tratti costieri; questo ha permesso nel passato la formazione di ampi tratti di costa deposita. Infine, per quanto riguarda la morfologia costiera, essa risulta condizionata dalla piana di Albenga. Questa ampia piana ha avuto origine dalle alluvioni del fiume Centa, corso d'acqua che costituisce il principale fornitore di sedimenti di tutto il tratto costiero.

Infatti nel passato questo litorale che rappresentava l'unico esempio di spiaggia sabbiosa e continua della Liguria, si estendeva in un'unica soluzione di continuità fino al capo di Caprazoppa. L'alimentazione del litorale, senza tralasciare il contributo fornito comunque dai rii e torrenti locali, era garantita soprattutto dai sedimenti del corso d'acqua che ne condizionavano anche la tessitura. Il restante tratto costiero è anch'esso caratterizzato da ampi tratti di costa deposita limitata dai rilievi rocciosi che costituiscono i promontori.

2.3.1 EVOLUZIONE STORICA

Il periodo precedente alla II° Guerra Mondiale

L'evoluzione del tratto di costa compreso tra Punta Murena e Capo Lena è indissolubilmente collegata al fiume Centa che, con una superficie di 430 km^2 ha alimentato e continua tutt'oggi ad alimentare non solo il litorale fino a capo S. Spirito ma anche oltre.

La vasta pianura alluvionale generata dal corso d'acqua determinò un avanzamento della linea di costa fino a superare l'allineamento tra i due sporgenti naturali, capo Vadino (Punta Cippo) e punta Santo Spirito. La cuspide deltizia (capo Lena) iniziò progressivamente a ruotare, variando conseguentemente l'esposizione del litorale. Il lobo settentrionale assunse uno sviluppo sempre più inclinato al mare di Libeccio, tanto che anche l'agitazione di Scirocco prese senso concordante verso NNE.

In epoca romana il delta presentava già una forma simile all'attuale, anche se la foce era situata circa 1 chilometro a Nord rispetto alla sede attuale, ed il corso d'acqua era superato dalla Via Aurelia su un imponente ponte tuttora esistente, Ponte Lungo.

Questa disposizione determinava una tendenza, ancora maggiore dell'attuale, al trasporto verso NE dei sedimenti alluvionali del fiume Centa, in quanto la sua foce non era protetta dalle agitazioni di Libeccio dall'Isola Gallinara.

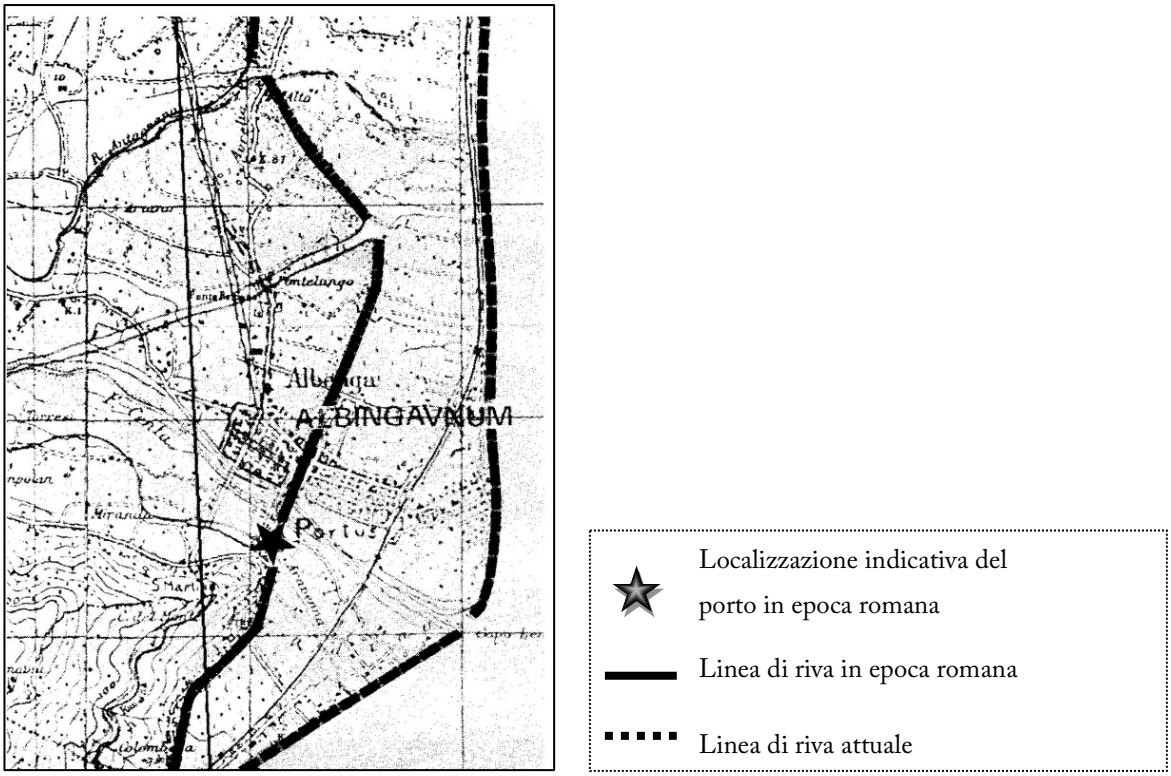


Figura 2.19: Evoluzione della linea di costa alla foce del fiume Centa (da PTC della Costa, 2000)

Quindi, dalla parte opposta, in corrispondenza della foce del torrente Avarenna, il flusso detritico era praticamente assente, poiché la zona era esposta ad agitazioni quasi frontali sia da Libeccio che da Scirocco e parzialmente protetta dall'Isola Gallinara. Infatti, come riferiscono gli storici, era presente un porto, esente da fenomeni d'insabbiamento.

A partire dal Medioevo e fino al XVIII secolo, poiché il fiume non era ancora arginato, si ebbero importanti fenomeni di divagazione dell'alveo. Il corso d'acqua, dopo aver colmato una zona con le sue alluvioni, si volgeva verso un'area posta a più bassa quota variando il suo alveo e spostando la foce anche di qualche chilometro.

Con il primo spostamento verso Sud, le alluvioni si riversarono nello stagno dell'Avarenna che, come accennato in precedenza, aveva avuto in passato funzioni portuali, insabbiando gradualmente tutta la zona. Un successivo tentativo di ricostruzione del porto, nel 1509, non ebbe successo a causa di una nuova divagazione dell'alveo fluviale. Con il successivo spostamento verso Nord, avvenuto il 13 giugno 1651, in conseguenza di una piena eccezionale che distrusse anche una parte delle mura cittadine, il fiume entrò nel rio Antognano creando

un delta di due bracci, di cui il principale aveva sbocco oltre due chilometri a Nord-Est rispetto alla foce attuale. Iniziò così un periodo di instabilità dell'assetto terminale del fiume che si protrasse con successive divagazioni e conseguenti danni per quasi un secolo. L'attuale foce venne privata di gran parte delle alluvioni ed in conseguenza s'innescò un rapido arretramento delle spiagge in questa zona ma anche a meridione. Un documento dell'epoca (1689), presente nell'archivio comunale cittadino, sostiene che "…a Vadino il mare ingoiò molte terre per un tiro di schioppo". Questo nuovo assetto, che nel caso si fosse protratto nel tempo avrebbe condotto ad una situazione simile a quella presente in epoca romana, ebbe termine nei primi anni del XVIII secolo, quando il fiume Centa ritornò nel suo vecchio alveo, cioè in una posizione molto simile a quella attuale. Verso la metà del 1700 a porre rimedio a questo stato di cose fu chiamato Matteo Vinzoni, valente idraulico genovese, che propose una sistemazione che però non fu mai attuata. Continuarono pertanto le divagazioni fluviali con successivi assetti nel 1807, nel 1813 ed in ultimo nel 1825.

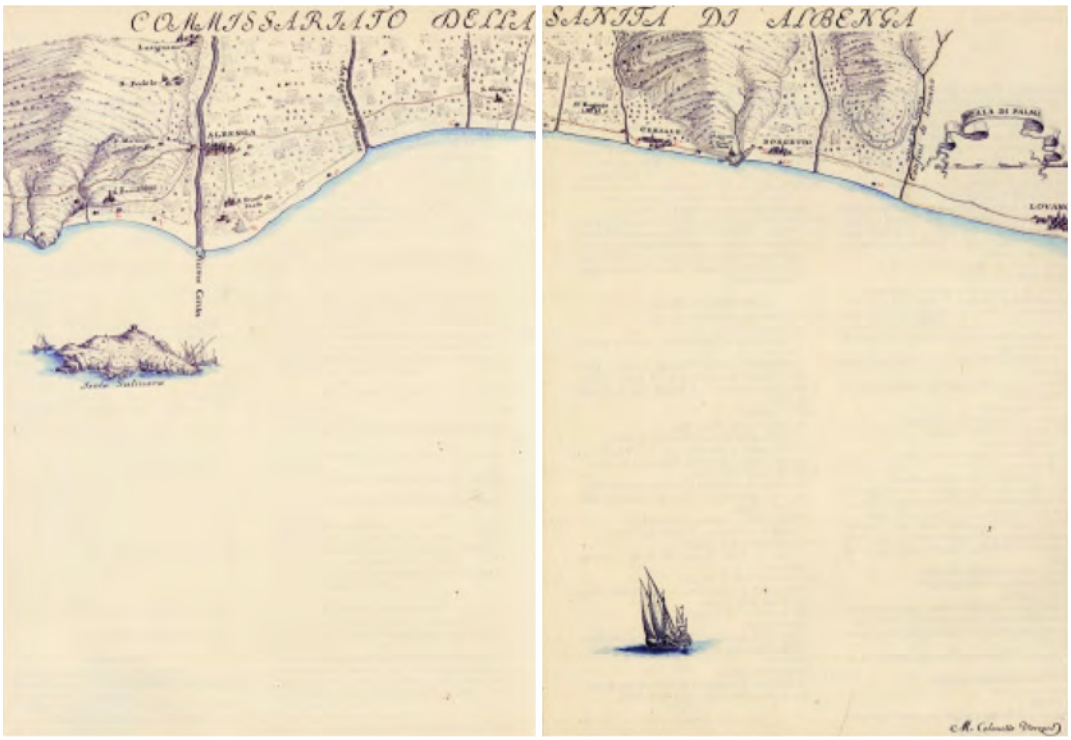


Figura 2.20: Commissariato della Sanità di Albenga 1773 (M. Vinzoni) (da Fierro, Berriolo, Ferrari, “Le spiagge della Liguria Occidentale”, Regione Liguria, 2010)

Naturalmente ad ogni variazione della posizione della foce, o delle foci corrispondeva una nuova posizione di immissione in mare degli apporti solidi, che determinava importanti scompensi nell'assetto costiero. Nel 1751 dal ponte di Branca, in prossimità del centro storico cittadino, al mare vi erano 5.650 palmi (circa. 1400 metri). Tutta la costa era orlata da paludi ed il corso d'acqua stesso, quando il Vinzoni, verso la metà del secolo, tracciò la planimetria,

aveva foce in uno stagno, poco profondo (quattro palmi, cioè circa 1 metro), lungo 950 metri e largo 1500 metri (Figura 2.20). Il secolo successivo è ancora caratterizzato da un costante avanzamento della costa nella zona di delta, nel 1810 il mare era avanzato di circa 1.500 metri rispetto alla planimetria del Vinzoni del secolo precedente.

Questi avanzamenti però non si registravano alla Marina, dove le mareggiate del 1836 demolivano una parte del cosiddetto Palazzo Rosso. Successivamente però, sia a Vadino che alla Marina, si assistette ad una progradazione della spiaggia che proseguì fino al 1880 circa.

I primi segnali dell'inizio del fenomeno erosivo si manifestarono all'inizio del 1900.

Già nel primo decennio, alla Marina, non esisteva più spiaggia e le mareggiate danneggiarono alcune costruzioni civili. Stessa sorte nel frattempo accadeva anche al litorale situato a SW della foce. A Vadino tra il 1906 ed il 1935 si ebbe un ritiro di alcune centinaia di metri.

Il fenomeno si presentò con una progressione impressionante: le mareggiate del 1915, dell'Aprile 1917, del Gennaio 1918, del Dicembre 1924, del Gennaio 1925 ed infine quella del Novembre 1934 asportarono quasi 100.000 m^2 di terreni coltivati.

La causa di questi fenomeni è da ricercarsi ancora una volta nelle indiscriminate estrazioni di inerti dalle spiagge, operate negli anni precedenti per la costruzione della nuova Ferrovia realizzata tra il 1870 ed il 1880.

A questo fattore si devono sommare le conseguenze dei lavori di sistemazione fluviale e le escavazioni in alveo, che provocarono una diminuzione del trasporto detritico del corso d'acqua. Le opere difensive realizzate all'inizio del XX secolo, non poterono produrre altro effetto che impedire, almeno in parte, l'arretramento, ma spostarono il fenomeno erosivo verso i settori sottoflutto.

Il periodo successivo alla II° Guerra Mondiale

Nel dopoguerra l'evoluzione del tratto di litorale tra punta Murena e la foce del Centa fu influenzato dalla discarica di capo Vadino (P.ta Cippo) aperta nel 1954 e chiusa nel 1974.

Il volume di materiale versato non è valutabile, ma non si trattò mai di elevati quantitativi, tuttavia l'apporto artificiale fu decisivo per il mantenimento ed il protendimento delle spiagge di Vadino e di Marina di Levante, che non richiesero ulteriori interventi.

Questa discarica nei venti anni di attività fu alimentata con materiali eterogenei provenienti da scavi edilizi, demolizioni, ed altro che determinarono un peggioramento delle caratteristiche granulometriche dei litorali che divennero decisamente più grossolani.

Sintesi della storia evolutiva

Questo tratto di litorale ha un regime complesso in quanto influenzato dalla presenza dell'isola Gallinara il cui riparo rallenta le alluvioni del Fiume Centa. I materiali del Centa alimentano le spiagge di questo arco certamente fino alla spiaggia di Vadino e forse, ma molto debolmente, poco oltre.

La spiaggia di S. Anna (situata ad Est del Porto di Alassio), prima distesa, abbastanza uniformemente, fino allo sporgente naturale di punta Murena, a seguito della costruzione del porto e soprattutto del suo ampliamento, si è andata sguarnendo di sabbia sul lato nord a favore del lato sud ridossato al porto, a seguito della variazione di esposizione operata dal molo del porto stesso.

La spiaggia oggetto d'intervento risulta praticamente priva di apporti naturali sia da Nord che da Sud e a causa della sua orientazione praticamente perpendicolare alla orientazione assunta dalle onde per i principali settori di traversia stata soggetta in questi ultimi anni ad una marcata erosione, che ha ridotto notevolmente la profondità dell'arenile. Come sempre in questi casi, in cui il litorale è formato da materiale di diversa composizione granulometrica, la migrazione verso il largo delle parti più fini e quindi più pregiate dal punto di vista turistico, ha indotto una pendenza più accentuata della spiaggia, che ormai soprattutto nella parte più a ponente è formata per la quasi totalità da materiale pietroso ghiaioso.

2.3.2 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Il litorale oggetto dell'intervento è costituito da costa deposita ed è orientato all'incirca in direzione SW-NE; la morfologia della zona si presenta con un litorale stretto e pianeggiante nel tratto oggetto di intervento, interrotto bruscamente verso monte dal versante orientale del Monte Bignone, di discreta acclività, che è attraversato dalla linea ferroviaria Genova – Ventimiglia e, ancora più a monte, dalla statale nr. 1 Aurelia. Il settore è inoltre limitato verso Nord – Nordest da un colatoio di ordine inferiore, tombinato verso valle e caratterizzato da una breve lunghezza dell'asta d'impluvio, che si protrae verso Sud–Est, sino ad attraversare l'arenile nella sua parte più orientale.

Dal punto di vista geologico – strutturale, l'areale appartiene all'Unità pre-piemontese di Arnasco – Castelbianco, qui affiorante attraverso il Membro di Leuso della Formazione di Albenga (Boni e Vanossi, 1972). Il substrato roccioso è caratterizzato essenzialmente da peliti/argilliti di colore grigio scuro (marrone chiaro – ocra per alterazione), fogliettate per scistosità ove pervasiva.

Soprastante il substrato roccioso sono impostati i depositi di spiaggia (Olocene) su una linea di fondale a modesta pendenza, con pendenza media di 2,38% tra la linea di riva e l'isobata dei 50 m. Gli apporti naturali, molto limitati, provengono in questo tratto di litorale dal vasto

bacino del Fiume Centa e sono costituiti dai litotipi provenienti dalle unità flischioidi, pre-piemontesi e brianzonesi (calcari marnosi e detritici, marne, arenarie, calcari dolomitici, dolomie, quarziti, brecce poligeniche ecc…). Tutto l'areale è soggetto ad erosione a causa delle forti estrazioni avvenute nel Fiume Centa nel primo dopoguerra e delle opere costruite a difesa del tracciato ferroviario.



Figura 2.21: Stralcio "Carta Geologica dei terreni compresi tra il Brianzonese ligure ed il flysh ad elmintoidi" (da Boni e Vanossi, 1972)

L'assetto stratigrafico indicativo sottostante alla spiaggia attuale è costituito da un deposito sabbioso – ghiaioso con presenza di ciottoli grossolani e con scarsa percentuale variabile di fine (limo – argilla), che transita sino al substrato roccioso presente a breve profondità nel sottosuolo. Alla data del rilievo sulla spiaggia erano presenti alcuni settori caratterizzati dalla presenza di numerosi ciottoli grossolani di dimensioni medie 5-12cm (max. 25cm) con scarsa percentuale sabbiosa, localizzati prevalentemente nella parte più a ponente della spiaggia e riconducibili ad eventi di mareggiata intensi (fig. 2.22) ed

altri prevalenti, con presenza di sabbia medio grossa (fig. 2.23); tali evidenze sono indicative di come il settore di spiaggia in oggetto sia esposto alle mareggiate e a fenomeni di erosione costiera con mobilitazione prevalente di sedimenti.



Figura 2.22: Granulometria grossolana con scarsa percentuale sabbiosa rilevata sulla spiaggia a ponente



Figura 2.23: Granulometria spiaggia sabbiosa rilevata sulla spiaggia tra i pennelli

3 CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA

Tra le prime attività necessarie negli studi di dinamica costiera, vi è la caratterizzazione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al vento e al moto ondoso.

Per quanto riguarda la disponibilità di registrazioni di moto ondoso, la principale fonte di riferimento nel nostro paese è la Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dall’ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). I dati di boa possono essere utilizzati come riferimento anche ad una certa distanza dal sito di interesse, qualora l’esposizione alle mareggiate per i diversi settori direzionali possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondametrica. Frequentemente, tuttavia, per la caratterizzazione meteomarina di un sito non è possibile fare affidamento alle misure. Questo avviene o perché i dati sono troppo frammentati a causa di malfunzionamenti dello strumento o periodi di manutenzione dello stesso, o perché le serie temporali disponibili coprono solo pochi anni (5÷10) oppure ancora perché per il paraggio in esame la boa o l’anemometro non sono disponibili o non sono sufficientemente rappresentativi.

La ricerca dei dati di input e le loro elaborazioni richiedono la maggior precisione, perché le previsioni possono venire completamente falsate da elaborazioni non accurate. Si è fatto quindi ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine basata sulla modellazione numerica, comunemente definito “wind/wave hindcast” che permette di disporre di serie temporali di dati tra l’altro comprensivi di : intensità e direzione del vento, altezza d’onda, periodo e direzione, nel punto desiderato.

Se da un lato la possibilità di disporre di ricostruzioni di condizioni meteomarine pregresse attraverso un approccio modellistico rappresenta oggi un formidabile supporto nell’ingegneria costiera ed offshore, dall’altro va sottolineata l’importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate.

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l’intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell’Università di Trieste. Il database MWM deriva dall’implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell’arte rispettivamente nell’ambito della modellazione atmosferica (WRF- ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI).

In Figura 3.1 e Figura 3.2 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso e un dettaglio della "mesh" di calcolo adottata. La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta i dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite. La risoluzione del database MWM è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta.

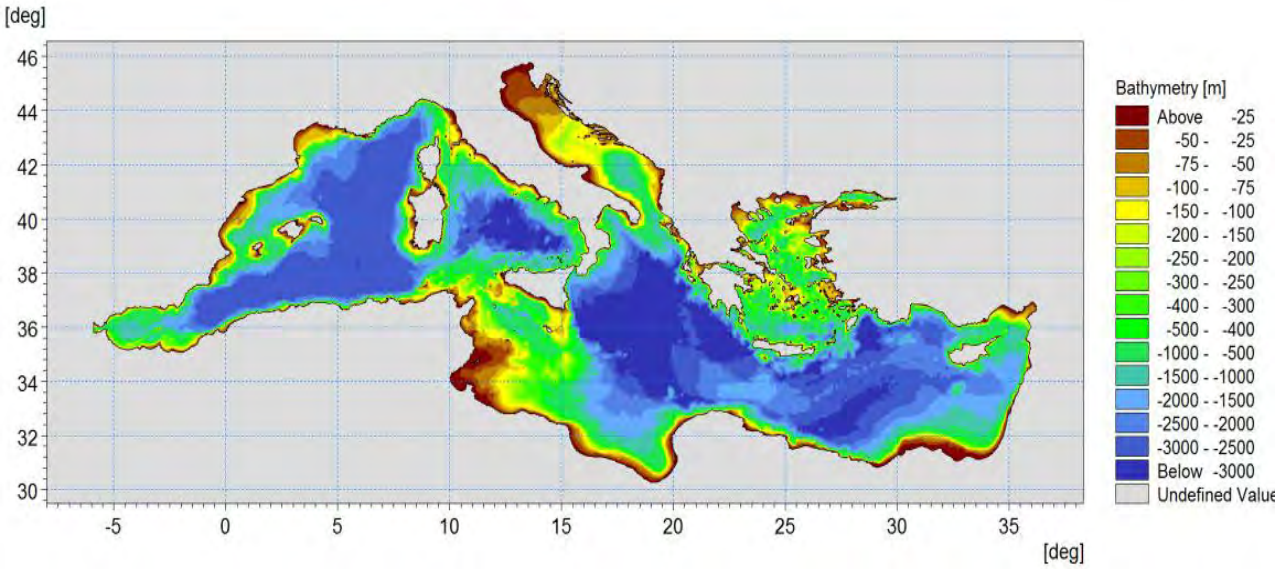


Figura 3.1: batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso del database MWM

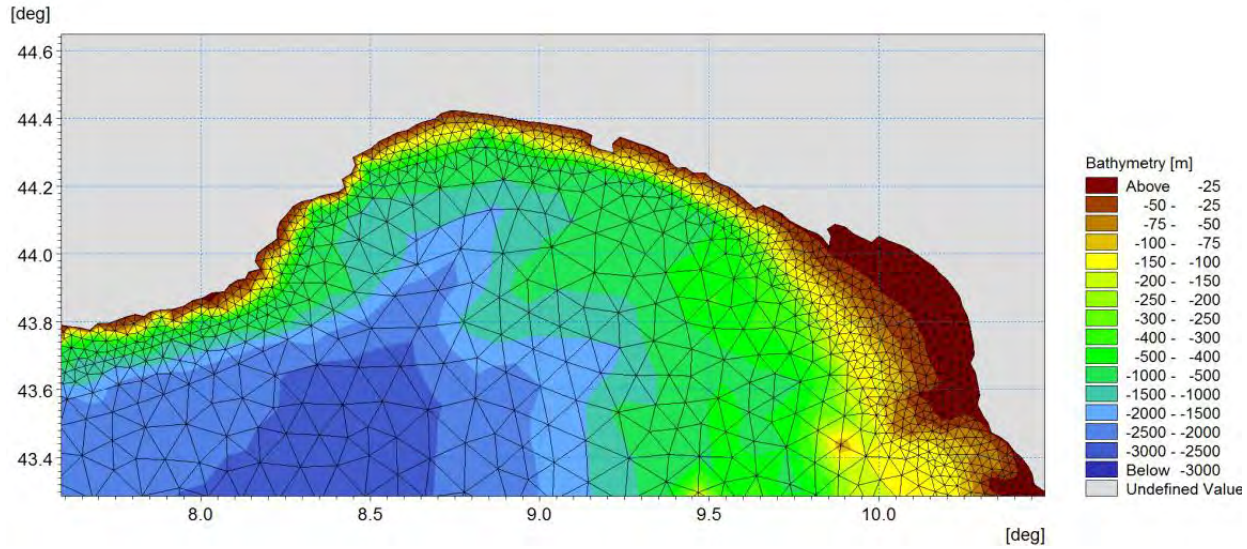


Figura 3.2: dettaglio sul Mar Ligure della batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso del database MWM

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito oggetto di studio si è fatto riferimento al sopra citato database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), compiutamente descritto in Allegato A al presente documento.

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarino al largo del paraggio di Sant'Anna, è stata effettuata tenendo in considerazione diversi aspetti:

- il punto di estrazione deve essere ben rappresentativo dell'esposizione del sito a vento e onda;
- in virtù della risoluzione del database MWM (circa 3 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta trascurabile l'interazione dell'onda con il fondale, che verrà pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito;
- la localizzazione del punto non dovrà essere troppo lontana dalla costa, in modo che il modello di propagazione largo-costa non presenti un dominio troppo ampio, con tempi di calcolo eccessivamente onerosi.

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato individuato un punto circa 3 km al largo del sito in esame, ad una profondità di circa 75 m.

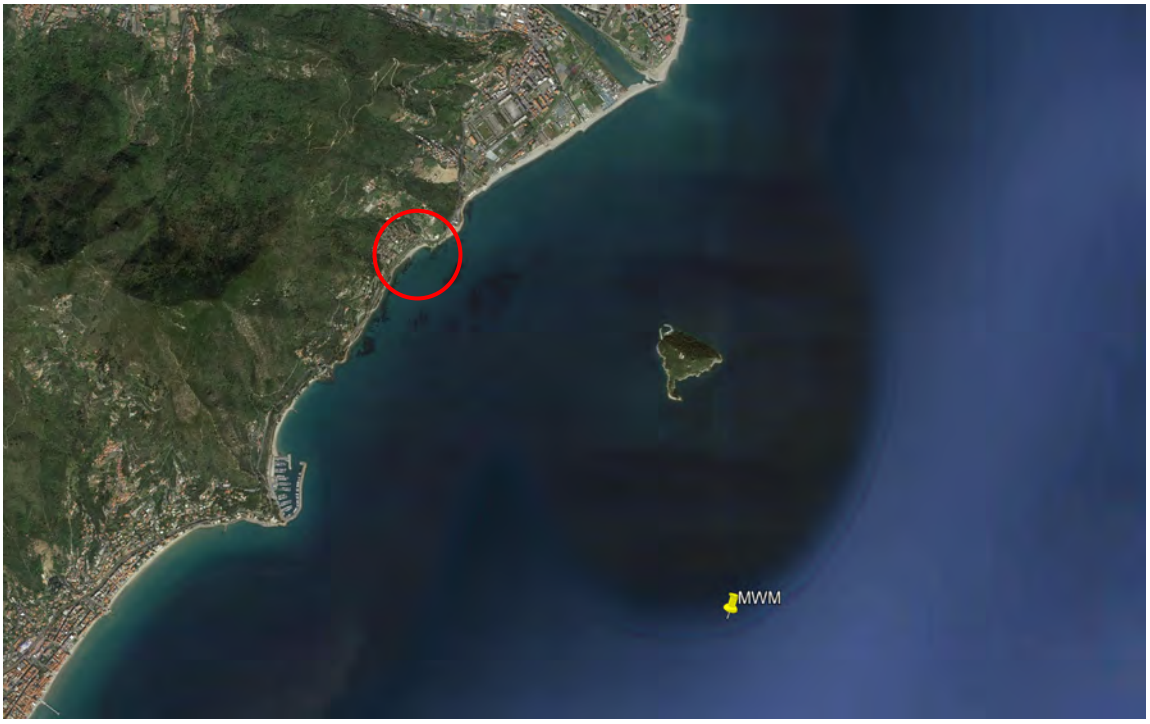


Figura 3.3: Ubicazione grafica del punto di estrazione dal dataset di MWM (Lon 8.23°E e Lat 44.01°N)

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]
MWM	8.230	44.010

In corrispondenza di tale punto è stata estrapolata l'intera serie di dati disponibili, ovvero 42 anni (1/01/1979-31/12/2020) in modo da avere una migliore comprensione delle dinamiche costiere a disporre di una valida base statistica nel sito oggetto di intervento; i parametri estratti

sono relativi a: Altezza d'onda Significativa (Hs), Periodo di Picco (Tp), Periodo Medio (Tm), Direzione media dell'onda (MWD), velocità del vento (WS), Direzione del vento (WD), Periodo zero crossing (Tz), direzione di picco dell'onda (PWD), deviazione standard direzionale (DSD).

3.1 DATI DI VENTO

Nel seguito si riportano in forma grafica i dati di velocità del vento per l'intera serie nel punto MWM (fig. 3.4), una tabella riassuntiva del numero di osservazioni per classi di velocità e direzione del vento (fig. 3.5) e dalla rappresentazione in forma di rosa del vento (fig. 3.6). Dall'analisi dei dati di velocità del vento, si evince che nel periodo di 42 anni considerato si raggiungono valori massimi di circa 24 m/s ; dall'analisi dei dati in forma di rosa e tabellare, è possibile determinare che i settori caratterizzati da una maggiore frequenza e intensità ($v \geq 20\ ^{m}/_{s}$) sono quelli associati al IV° e III° quadrante con qualche escursione nel I° nello specifico per direzione comprese tra 320°-10° associati al settore N-NW e 220°-250° associati al settore SW.

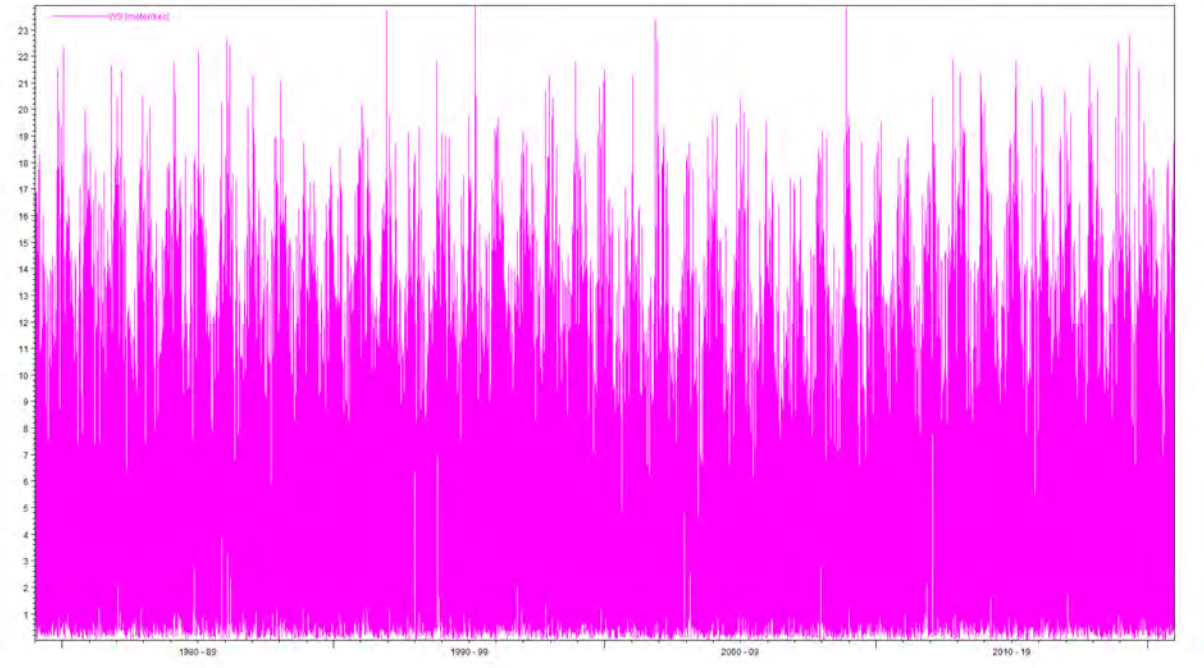


Figura 3.4: Ricostruzione storica di velocità del vento (Ws in m/s) nel punto MWM Lon 8.23°E e Lat 44.01°N

WD \ WS	[0 -2.5]	[2.5-5]	[5-7.5]	[7.5-10]	[10-12.5]	[12.5-15]	[15-17.5]	[17.5-20]	[20-22.5]	[22.5-25]	Tot	Accum
[0-10]	3510	6864	6890	4993	2140	826	272	46	6		25547	25547
[10-20]	3713	7055	5517	2194	525	183	74	8			19269	44816
[20-30]	3741	7171	4329	974	119	19					16353	61169
[30-40]	3730	6858	3418	423	30	2					14461	75630
[40-50]	3820	6338	2462	183	13	1					12817	88447
[50-60]	3591	5497	1868	107	15	1					11079	99526
[60-70]	3509	4458	1356	57	9	3	1				9393	108919
[70-80]	3308	3359	901	37	8		1				7614	116533
[80-90]	3041	2545	594	27	7	1					6215	122748
[90-100]	2770	1883	300	30	9	2					4994	127742
[100-110]	2558	1389	143	24	11	2	1				4128	131870
[110-120]	2523	995	79	19	12	4	2				3634	135504
[120-130]	2333	716	57	21	7	4					3138	138642
[130-140]	2407	630	49	15	11	1	1				3114	141756
[140-150]	2406	666	41	19	13	6	2				3153	144909
[150-160]	2430	747	51	20	6	1	1	1			3257	148166
[160-170]	2631	1218	66	37	21	6					3979	152145
[170-180]	2839	1968	138	55	38	18	9				5065	157210
[180-190]	2879	3375	401	110	56	30	9				6860	164070
[190-200]	2751	5029	1640	262	58	46	22				9808	173878
[200-210]	2604	6015	3648	1115	215	50	17				13664	187542
[210-220]	2330	5446	4723	2414	760	152	25				15850	203392
[220-230]	2099	3978	3228	2060	1070	494	108	6			13043	216435
[230-240]	1827	2574	1461	851	579	295	40	7			7634	224069
[240-250]	1689	1656	735	344	150	56	5	2			4637	228706
[250-260]	1613	1209	377	112	24	1					3336	232042
[260-270]	1612	894	189	31	3						2729	234771
[270-280]	1476	759	103	9	2						2349	237120
[280-290]	1515	733	86	11							2345	239465
[290-300]	1560	806	113	10	1	1					2491	241956
[300-310]	1880	998	183	28	3						3092	245048
[310-320]	2020	1394	415	113	31	6	1				3980	249028
[320-330]	2374	2405	1054	474	272	130	57	20	4	1	6791	255819
[330-340]	2712	3865	3576	2813	1949	1158	556	195	44	4	16872	272691
[340-350]	3058	5518	7450	10947	11800	7758	3525	971	167	7	51201	323892
[350-360]	3232	6253	8656	10766	8924	4469	1670	301	21		44292	368184
Tot	94091	113264	66297	41705	28891	15726	6399	1557	242	12	368184	
Accum	94091	207355	273652	315357	344248	359974	366373	367930	368172	368184		

Figura 3.5: Numero di dati per classi di intensità del vento (Ws in m/s) e direzione media di provenienza (Wd in gradi) nel punto MWM Lon 8.23°E e Lat 44.01°N

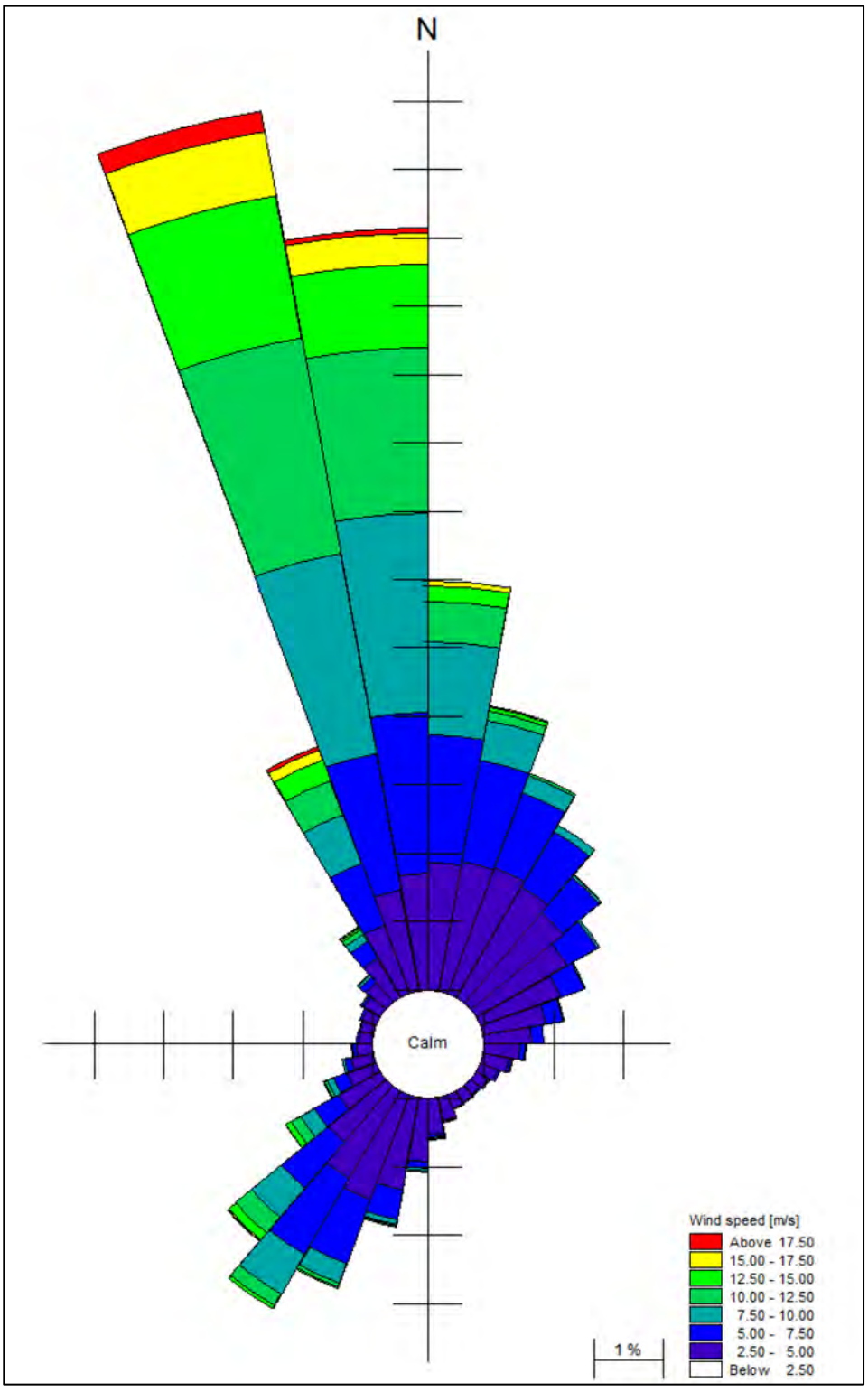


Figura 3.6 Rosa del vento per il punto MWM Lon 8.23°E e Lat 44.01°N; la calma, qui associata ad intensità inferiori a 2,5 m/s, si verifica per il 25,56% del tempo (3 mesi/anno)

3.2 DATI DI MOTO ONDOSO

Dalla serie storica dei dati d’onda estratti dal database MWM emerge che nel periodo di 42 anni considerato, si raggiungono valori massimi di altezza d’onda significativa Hs al largo pari a circa 5.7 metri, raggiunti con la mareggiata del dicembre 2017 (fig. 3.7). Mediante la rappresentazione a rosa del clima ondoso e la tabella delle frequenze (Figg. 3.8 – 3.9), si evince che le onde più alte e frequenti provengono dal III° settore Ostro -Libeccio (Sud-Sud Ovest), in particolar modo dalle direzioni comprese tra 180°N e 210°N; Complessivamente le onde provenienti da questi settori interessano circa il 38% degli eventi, corrispondenti a circa 4,5 mesi/anno.

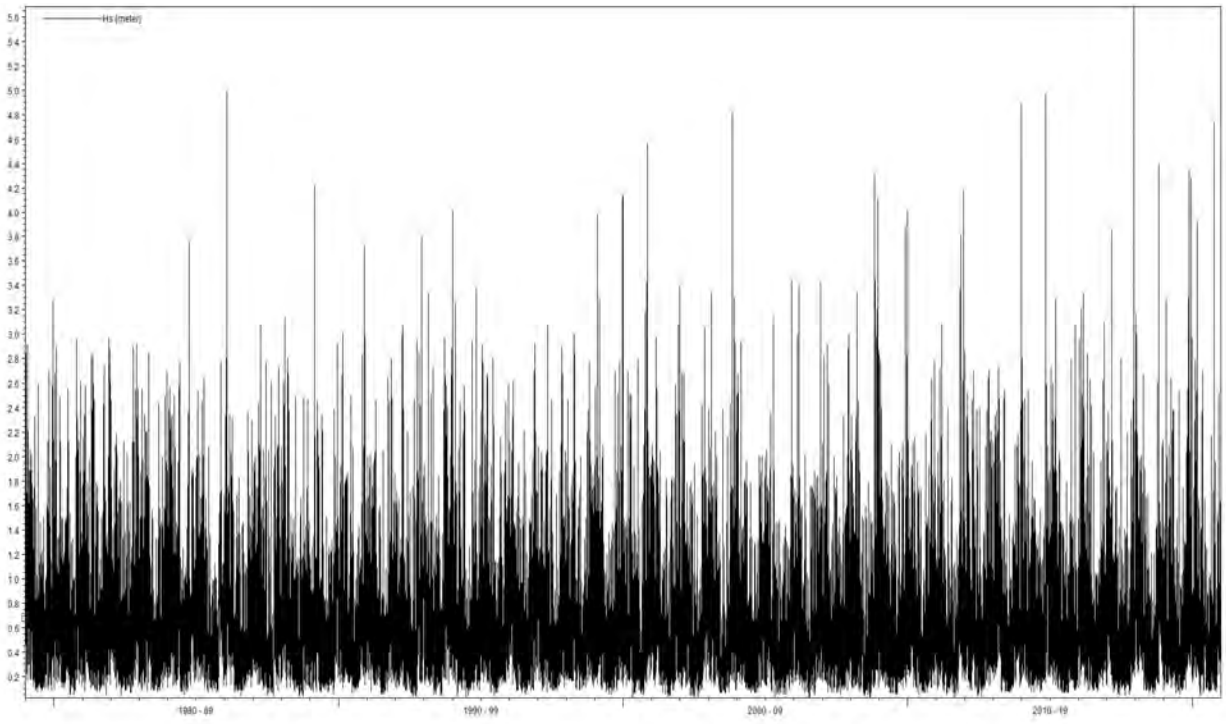


Figura 3.7: Andamento delle altezze d’onda (Hs in metri) nel punto MWM Lon 8.23°E e Lat 44.01°N

Hs / MWD	[0-0.25]	[0.25-0.5]	[0.5-0.75]	[0.75-1]	[1-1.25]	[1.25-1.5]	[1.5-1.75]	[1.75-2]	[2-2.25]	[2.25-2.5]	[2.5-2.75]	[2.75-3]	[3-3.25]	[3.25-3.5]	[3.5-3.75]	[3.75-4]	Tot	Accum
[0-10]	74	279	206	45	14	4											622	622
[10-20]	470	1131	743	294	140	14											2792	3414
[20-30]	1580	4416	4295	1748	590	147	20	7									12803	16217
[30-40]	3129	7051	6460	3692	1432	414	83	8	2								22271	38488
[40-50]	5079	6954	5753	3258	1785	752	216	29	3								23829	62317
[50-60]	6988	4991	3273	2056	1030	482	230	42	3	1							19096	81413
[60-70]	6583	3268	2064	1256	562	292	164	59	20	8	2						14278	95691
[70-80]	5276	2492	1284	873	373	184	74	40	7	4	3						10610	106301
[80-90]	5017	2020	992	563	340	149	49	20	12	13	1	1					9177	115478
[90-100]	5483	1850	891	499	277	127	60	27	19	7	6	3	1				9250	124728
[100-110]	7625	2371	1131	553	307	129	49	23	16	12	7	1	1				12225	136953
[110-120]	11285	2969	1426	716	430	197	103	36	16	16	10	5	1		1	1	17212	154165
[120-130]	11605	3188	1315	579	439	267	189	61	44	25	17	12	9	1	3	5	17759	171924
[130-140]	9253	2454	989	583	332	245	150	63	40	31	27	18	6	1	4	12	14208	186132
[140-150]	7747	2148	915	503	291	203	104	44	35	32	27	27	8		2	2	12088	198220
[150-160]	7789	2404	1040	482	267	147	73	26	9	7	14	3	2		1	6	12270	210490
[160-170]	8868	3058	1225	648	378	200	91	62	30	22	10	8	4	2	5	1	14612	225102
[170-180]	12333	4692	2037	1128	584	322	215	140	75	43	18	11	16	1	14	22	21651	246753
[180-190]	16754	6532	3540	2086	1232	859	549	299	199	126	83	57	38	4	19	36	32413	279166
[190-200]	21372	9322	6816	4771	2774	1760	1024	541	298	235	96	51	19		15	8	49102	328268
[200-210]	12591	6685	5930	4419	2842	1882	1154	739	332	202	103	22	8	1	4	2	36916	365184
[210-220]	576	544	282	104	14	1	1										1522	366706
[220-230]	13	69	83	41	9												215	366921
[230-240]	10	35	52	18	5												120	367041
[240-250]	11	26	26	13	3	1											80	367121
[250-260]	3	20	20	17	3												63	367184
[260-270]	4	18	28	9	2												61	367245
[270-280]	9	19	20	12	2		1										63	367308
[280-290]	2	15	20	6	1												44	367352
[290-300]	9	13	21	4	2												49	367401
[300-310]	2	19	30	11													62	367463
[310-320]	9	12	31	8	2												62	367525
[320-330]	7	22	31	12	5		1										78	367603
[330-340]	18	38	37	15	4	2											114	367717
[340-350]	16	58	58	36	8	2											178	367895
[350-360]	39	108	94	36	11	1											289	368184
Tot	167629	81291	53158	31094	16490	8783	4600	2266	1160	784	424	219	113	10	68	95	368184	
Accum	167629	248920	302078	333172	349662	358445	363045	365311	366471	367255	367679	367898	368011	368021	368089	368184		

Figura 3.8 Numero di dati per classi di altezza d'onda significativa (Hs in metri) in funzione della direzione media di provenienza (MWD in gradi) per il punto MWM Lon 8.23°E e Lat 44.01°N

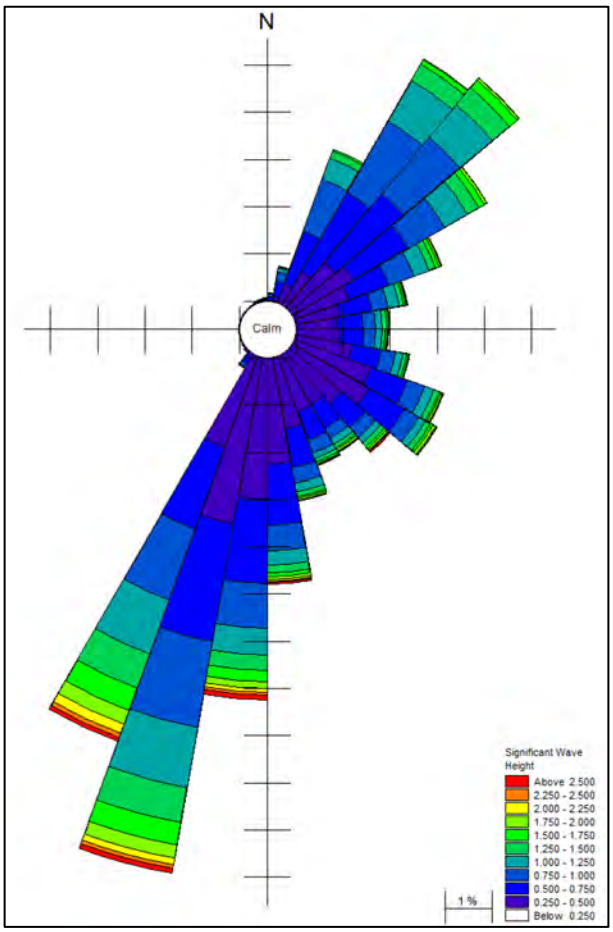
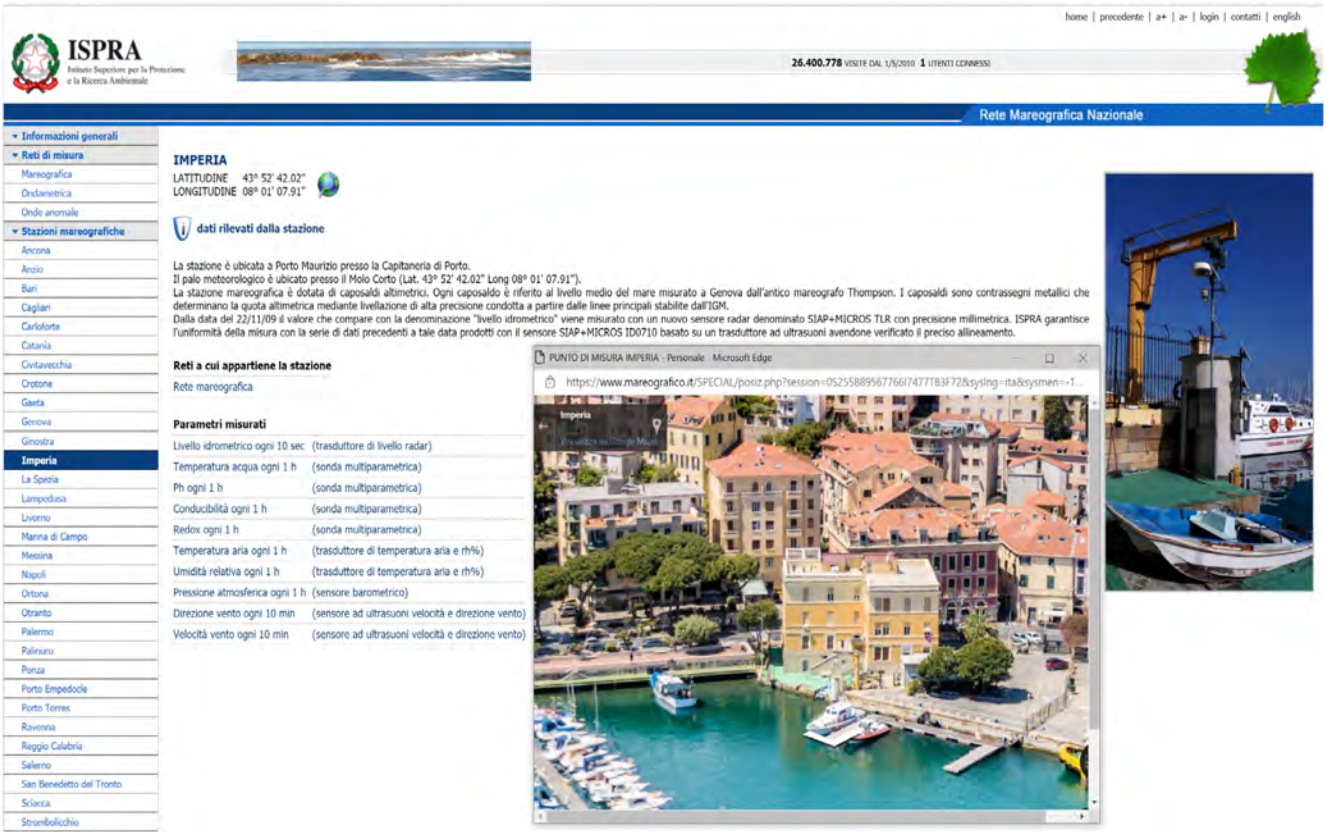


Figura 3.9: Rosa del moto ondoso per il punto MWM Lon 8.23°E e Lat 44.01°N; la calma, qui associata ad altezze inferiori a 0.25m, si verifica per circa il 16% del tempo (2 mesi/anno)

3.3 LIVELLO IDROMETRICO

Per la definizione dei livelli marini da considerare nella progettazione dell’opera si è fatto riferimento alla serie osservata dalla Stazione Mareografica più vicina al sito di intervento, ovvero quella di Imperia, che presenta una serie di dati relativa al periodo 1/10/2010 - 31/12/2020.

La stazione è ubicata a Porto Maurizio presso la Capitaneria di Porto, in corrispondenza del Molo Corto (Lon 8.018864°E - Lat 43.878339 ° N); il valore di livello idrometrico viene misurato con un nuovo sensore radar denominato SIAP+MICROS TLR con precisione millimetrica.



I dati rilevati dalla stazione vengono registrati con intervallo temporale di 10 minuti; dalla loro analisi, comparata con eventi meteomarini intensi, si è potuto definire un valore di progetto dell’innalzamento del livello del mare dovuto ad eventi di tempesta “Storm surge” valutato mediamente in 0,3 m con picchi in condizioni eccezionali di circa 0,6m.

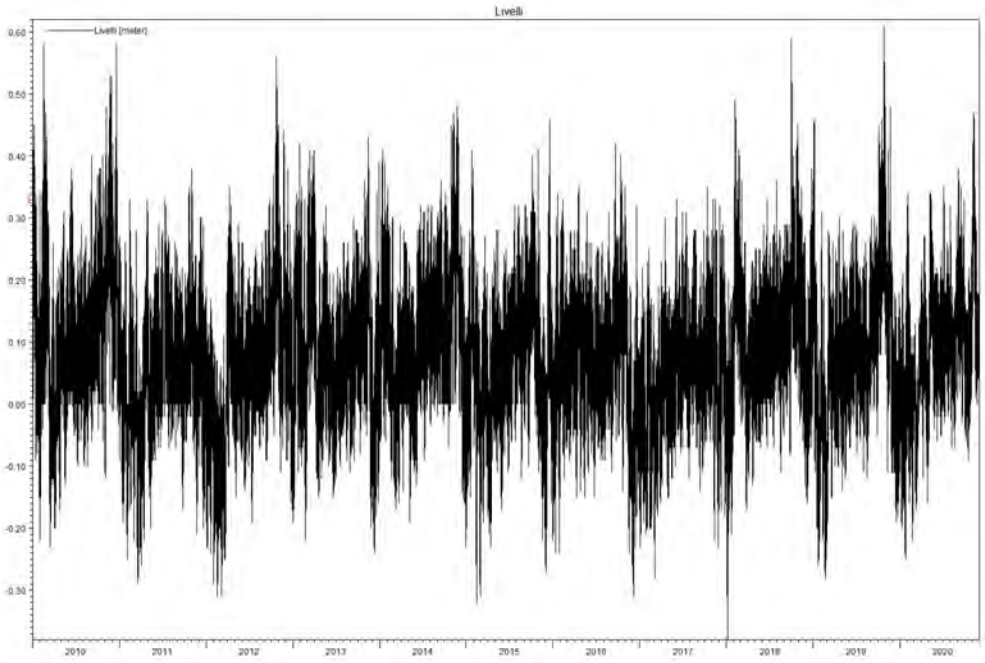


Figura 3.10: registrazioni relative al livello idrometrico dalla stazione mareografica di Imperia (dal 1/01/2010 al 31/12/2020)

3.4 DATI TOPO-BATIMETRICI

Per la caratterizzazione batimetrica del fondale antistante l'area di intervento si è assunta a riferimento la batimetria riportata nel Piano Tutela Ambiente Marino Costiero 08 (P.T.A.M.C. 08) scaricabile dal Portale della Regione Liguria (open-data) eseguito con tecnologia multibeam nel 2012 e contenente la linea di riva aggiornata (2012) e le isobatimetriche di dettaglio che vanno da una profondità di -3m a -30m (-49 nei pressi dell'Isola Gallinara) limitato all'area di interesse compresa tra Capo Santa Croce a Capo Lena.

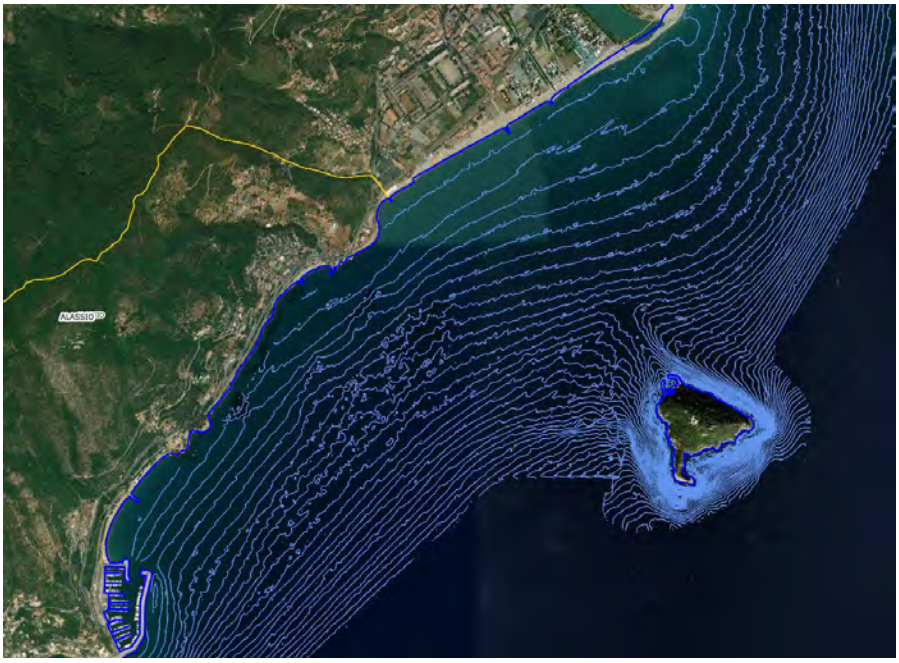


Figura 3.11 : Stralcio del PTAMC relativo all'Ambito 08, tratto da (https://geoportal.regione.liguria.it)

Tale base di dati è stata integrata nella parte più a largo dell'isola Gallinara e a sud del Porto di Alassio con i dati rilevati dalle Carte Nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di Jeppesen , mentre per la porzione antistante la zona oggetto di intervento e la spiaggia emersa, il database Regionale è stato integrato con un rilievo di dettaglio eseguito tramite sistema satellitare (Reference + Rover) marca Topcon,per il rilievo delle stazioni topografiche utili al rilievo batimetrico di precisione (modalità pseudo-statica + verifica in modalità RTK in correzione differenziale locale) seguendo le seguenti fasi:

- stazionamento della Reference su caposaldo IGM95;
- rilievo di latitudine e longitudine (sistema ETRF2000) e della quota ellissoidica (sistema ETRF2000-GRS80) delle stazioni topografiche tramite Rover;
- restituzione planimetrica delle stazioni tramite conversione da coordinate geografiche a piane nel sistema nazionale Gauss-Boaga e UTM-ETRF2000);
- restituzione altimetrica delle stazioni tramite conversione da quote ellissoidiche a geoidiche s.l.m.

Ottenendo un grado di precisione statica in post-elaborazione del rilievo pari a

$$H\colon \pm 3\ mm + 0.5\ ppm$$
$$V\colon \pm 5\ mm + 0.5\ ppm$$

Il rilievo batimetrico invece, è stato eseguito tramite un sistema costituito da differenti apparati e software interfacciati ed installati su imbarcazione Merry Fisher 595 secondo la seguente configurazione e metodologia:

- Software per la gestione della navigazione e tracciamento della rotta, interfacciamento dei vari apparati ed acquisizione dei dati multibeam;
- Sistema di posizionamento GPS in modalità RTK OTF;
- Sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati;
- Ecoscandaglio multibeam;
- Piattaforma di navigazione inerziale per la compensazione di onda e di moto.

Post-produzione mediante elaborazione dei dati acquisiti, produzione dtm e di planimetria quotata a curve di livello ed in formato dwg/dxf e xyz.

Tutto quanto sopra ha costituito la base dati necessaria a coprire l'intero dominio di calcolo per la modellazione realizzata con il software Mike 21 di DHI (figura 3.12).

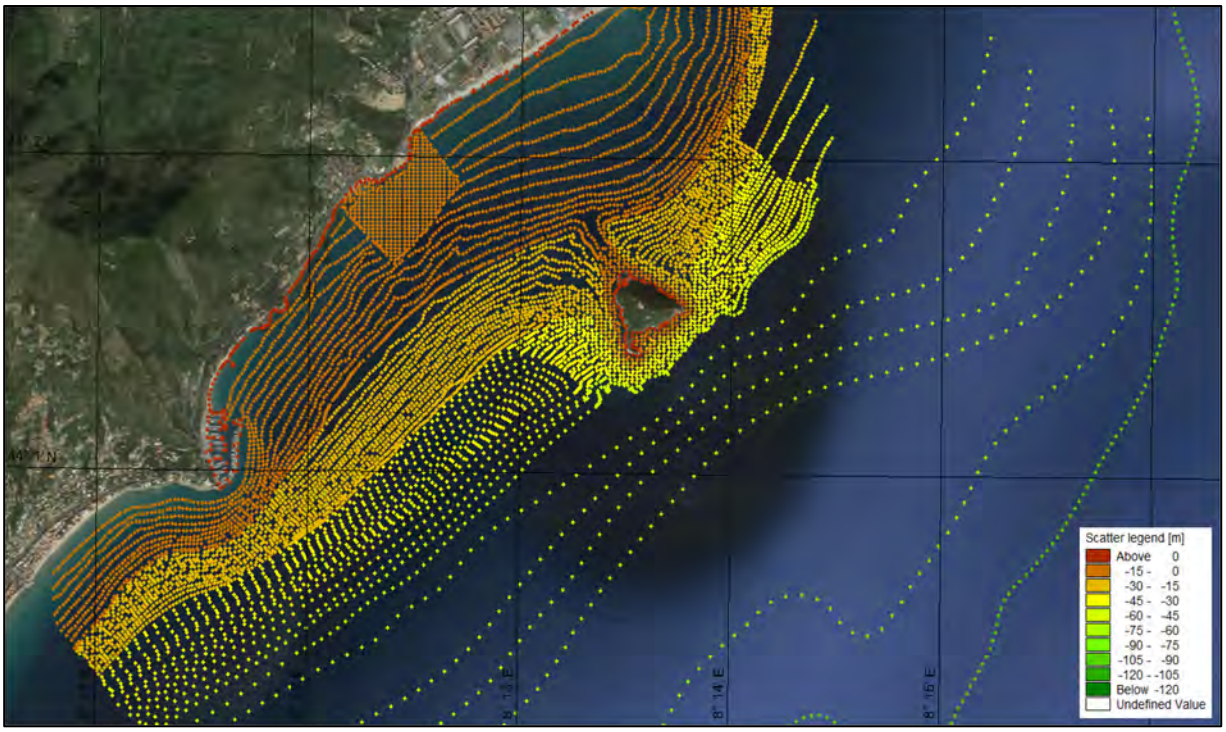


Figura 3.12: Quote batimetriche inserite nel programma Mike 21 per la costruzione del dominio di calcolo

3.5 ANALISI DELLE CARATTERISTICHE SEDIMENTOLOGICHE

L'assetto stratigrafico indicativo sottostante la spiaggia attuale, è costituito da un deposito sabbioso-ghiaioso con presenza di ciottoli grossolani e con scarsa percentuale variabile di fine (limo-argilla), che transita sino al substrato roccioso presente a breve profondità nel sottosuolo. Alla data del rilievo (Gennaio 2021), sull'arenile erano presenti alcuni settori caratterizzati dalla presenza di numerosi ciottoli grossolani di dimensione media 5-12 cm (max. 25 cm) con scarsa o assente percentuale sabbiosa, localizzati prevalentemente nella parte più a ponente della spiaggia e riconducibili ad eventi di mareggiata intensi ed altri, prevalenti, con presenza di sabbia medio grossa. Al fine di definire l'assetto stratigrafico e tessiturale sopra esposto, sono stati eseguiti alcuni campioni con prelievo di sedimento, nr. 2 prelievi di campioni di terreno dalla spiaggia emersa (C1 e C3) e nr. 1 dalla spiaggia sommersa, (C2) a breve distanza dalla linea di battigia, ritenuti sufficienti a caratterizzare granulometricamente e tessituralmente il paraggio.



Figura 3.13: posizione di prelievo dei campioni e loro identificazione.

Per la campionatura e le analisi granulometriche si è scelto di escludere il prelievo dai settori all'estremità di ponente caratterizzata dalla presenza di molti ciottoli e prossima alla massicciata ferroviaria. Tale scelta è giustificata dal fatto che i depositi di sedimenti qui presenti sono il risultato di forti eventi di mareggiata che ne hanno asportato la porzione fine oltreché dalla volontà della committenza di realizzare il ripascimento con materiale più fine compatibile con quello presente sul resto della spiaggia. Per i campioni prelevati sono state effettuate le analisi di laboratorio e rese disponibili le curve granulometriche che hanno fornito i valori di D_{50}, D_{16} e D_{84} di seguito riportati:

Prelievo	Profondità [m]	D_{50} [mm]	D_{16} [mm]	D_{84} [mm]
C1	0	1.1	0.74	1.54
C2	-2	1.09	0.74	1.63
C3	0	1.23	0.8	1.59

Questi risultano piuttosto omogenei, di conseguenza si è assunto di caratterizzare il fondale dell'intero dominio di studio adottando come costanti le proprietà dei sedimenti.

Tenendo conto dell'estensione del dominio di calcolo, che si estende molto più al largo rispetto alle profondità a cui si è effettuato il prelievo, e che come rilevato anche in altri studi condotti in aree prossime al sito di intervento, il sedimento risulta sicuramente caratterizzato da

granulometrie inferiori, si è assunto un valore del D_{50} caratterizzante l'intero dominio di calcolo, leggermente inferiore ai valori medi dei prelievi:

- Grain diameter (d50): 0,8 mm
- Grading coefficient: $\sqrt{\frac{d84}{d16}} = 1{,}48$

Nelle tabelle seguenti sono riportate le analisi sedimentologiche e le relative curve granulometriche per i differenti campioni.

ANALISI GRANULOMETRICA – Campione C1

Profondità :	**0**
Data prelievo :	**28/01/2021**

Peso campione asciutto:	**1 000 grammi**

SETACCI		TRATTENUTO					PASSANTE
Classificazione	apertura (mm)	**Peso (grammi)**	%	cumul. %		%	%
	60.000	0.0	0.0	0.0			100.0
Ghiaia Grossa	20.000	0.0	0.0	0.0			100.0
Ghiaia Media	6.000	0.0	0.0	0.0			100.0
Ghiaia Fine	2.000	0.0	0.0	0.0	**GHIAIA :**	**0.0**	100.0
Sabbia Grossa	0.600	970.0	97.0	97.0			3.0
Sabbia media	0.200	0.0	0.0	97.0			3.0
Sabbia Fine	0.060	15.0	1.5	98.5	**SABBIA :**	**98.5**	1.5
Limo grosso	0.020	1.0	0.1	98.6			1.4
Limo medio	0.006	0.0	0.0	98.6			1.4
Limo fine	0.002	2.0	0.2	98.8			1.2
Argille		12.0	1.2	100.0	**FRAZ. FINE :**	**1.4**	0.0
	TOTALI :	1 000	100.0				

Figura 3.14: Analisi granulometrica relativa al campione C1

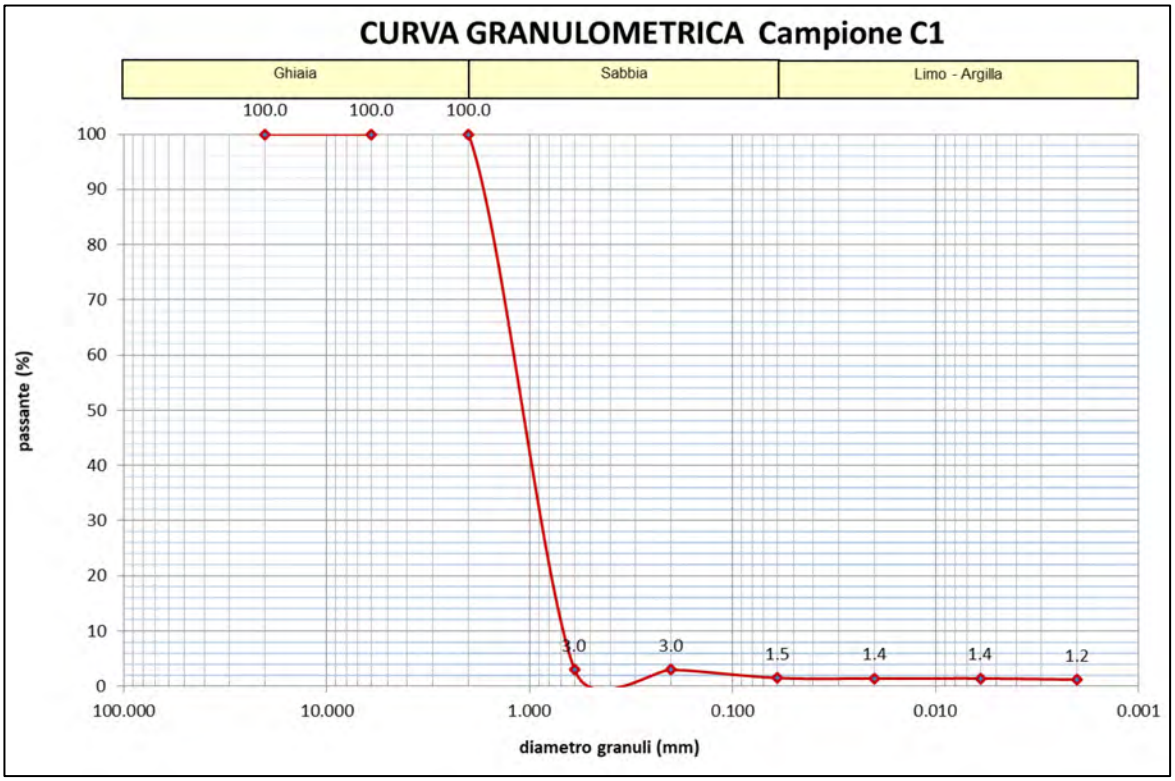


Figura 3.15: Curva granulometrica relativa al campione C1

ANALISI GRANULOMETRICA – Campione C2

Profondità :	**-2**
Data prelievo :	**28/01/2021**

Peso campione asciutto:	**1 000**	**grammi**

SETACCI		TRATTENUTO					PASSANTE
Classificazione	apertura (mm)	**Peso (grammi)**	%	cumul. %		%	%
	60.000	0.0	0.0	0.0			100.0
Ghiaia Grossa	20.000	0.0	0.0	0.0			100.0
Ghiaia Media	6.000	0.0	0.0	0.0			100.0
Ghiaia Fine	2.000	0.0	0.0	0.0	**GHIAIA :**	**0.0**	100.0
Sabbia Grossa	0.600	934.0	93.4	93.4			6.6
Sabbia media	0.200	0.0	0.0	93.4			6.6
Sabbia Fine	0.060	61.0	6.1	99.5	**SABBIA :**	**99.5**	0.5
Limo grosso	0.020	0.0	0.0	99.5			0.5
Limo medio	0.006	0.0	0.0	99.5			0.5
Limo fine	0.002	2.0	0.2	99.7			0.3
Argille		3.0	0.3	100.0	**FRAZ. FINE :**	**0.5**	0.0
TOTALI :		1000	100.0				

Figura 3.16: Analisi granulometrica relativa al campione C2

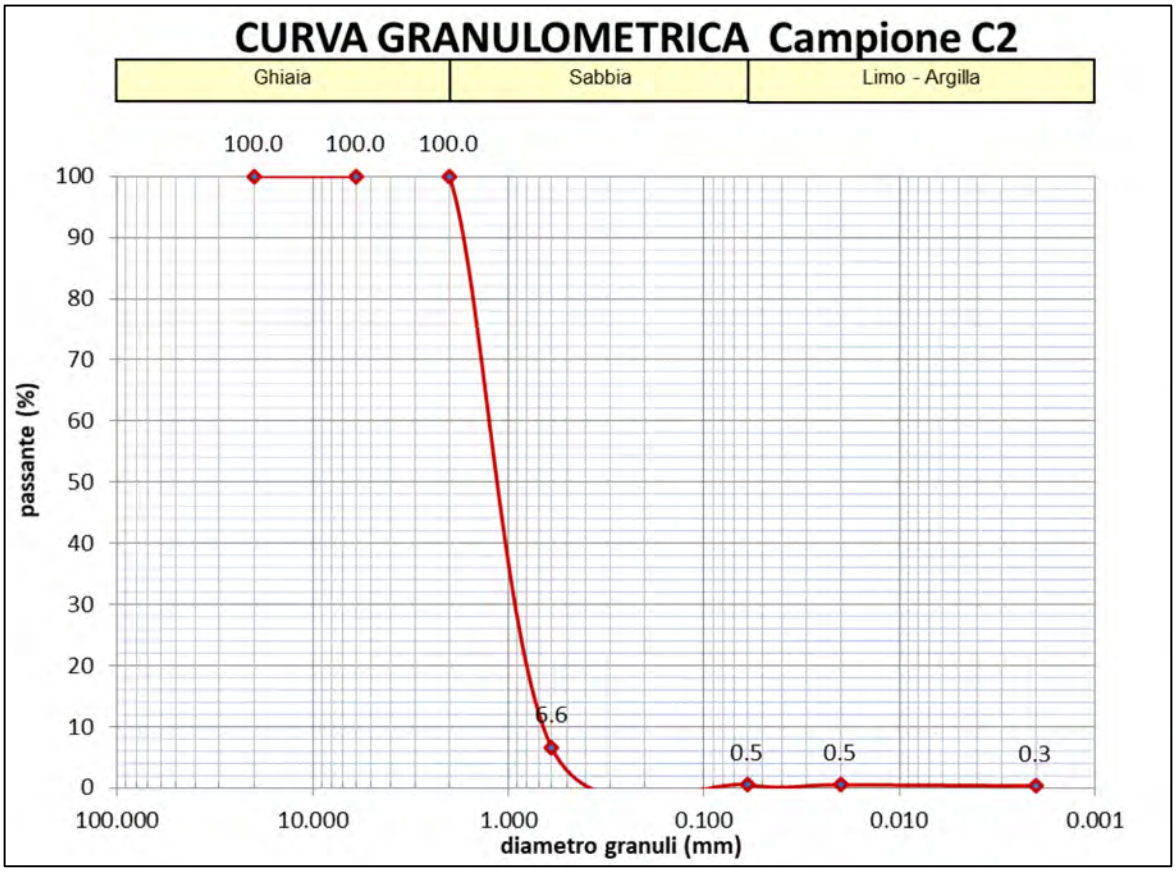


Figura 3.17: Curva granulometrica relativa la campione C2

ANALISI GRANULOMETRICA – Campione C3

Profondità :	**0**
Data prelievo :	**28/01/2021**

Peso campione asciutto:	**1 000**	**grammi**

SETACCI		TRATTENUTO					PASSANTE
Classificazione	apertura (mm)	**Peso (grammi)**	%	cumul. %		%	%
	60.000	0.0	0.0	0.0			100.0
Ghiaia Grossa	20.000	0.0	0.0	0.0			100.0
Ghiaia Media	6.000	0.0	0.0	0.0			100.0
Ghiaia Fine	2.000	0.0	0.0	0.0	**GHIAIA :**	**0.0**	100.0
Sabbia Grossa	0.600	968.0	96.8	96.8			3.2
Sabbia media	0.200	0.0	0.0	96.8			3.2
Sabbia Fine	0.060	26.0	2.6	99.4	**SABBIA :**	**99.4**	0.6
Limo grosso	0.020	0.0	0.0	99.4			0.6
Limo medio	0.006	0.0	0.0	99.4			0.6
Limo fine	0.002	1.0	0.1	99.5			0.5
Argille		5.0	0.5	100.0	**FRAZ. FINE :**	**0.6**	0.0
	TOTALI :	1000	100.0				

Figura 3.18: Analisi granulometrica relativa al campione C3

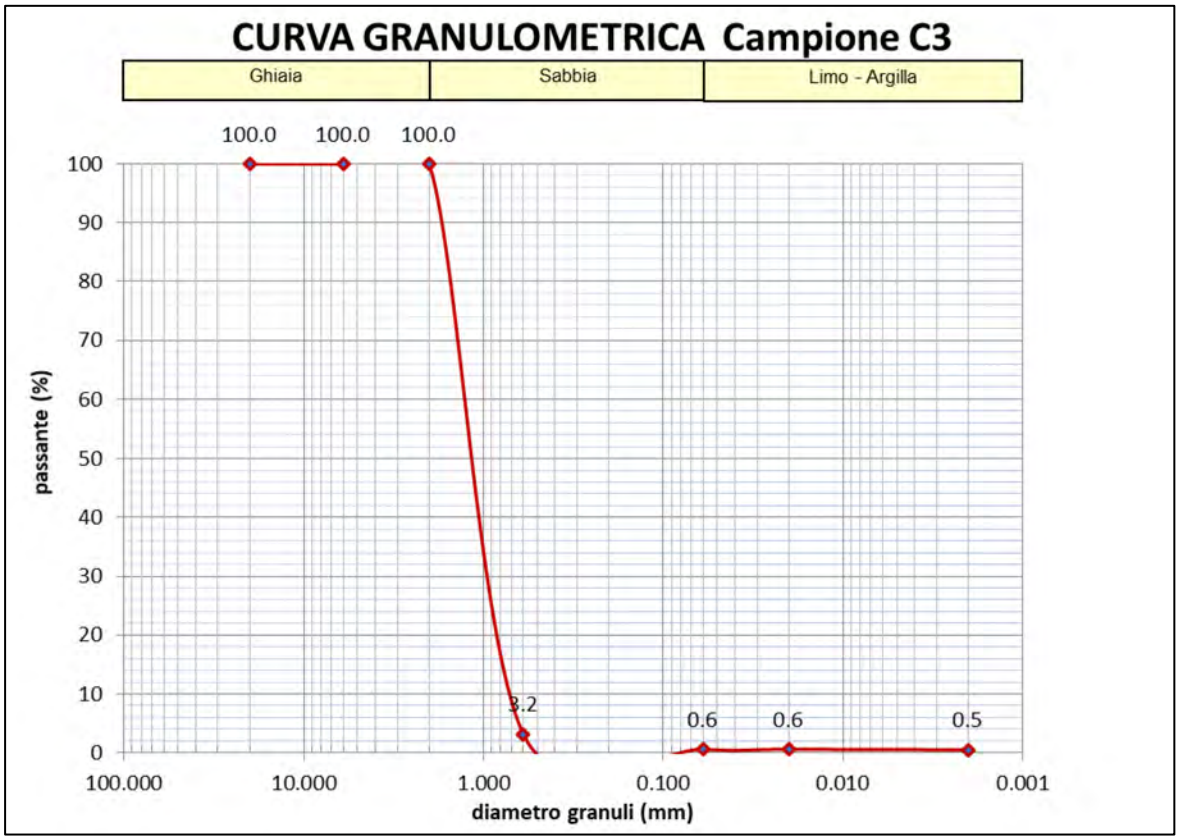


Figura 3.19: Curva granulometrica relativa al campione C3

4 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI

Sulla base delle serie di dati disponibili al largo del tratto di costa oggetto di intervento, si è proceduto con un'analisi statistica finalizzata alla definizione degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno. L'analisi statistica è stata svolta sia per la serie di altezza d'onda significativa, che per i dati di vento e di livello idrometrico.

I valori estremi associati a tempi di ritorno elevati sono in genere stimati applicando una distribuzione di probabilità alla serie di dati. In letteratura sono disponibili molte distribuzioni di probabilità, tecniche di selezione dei dati e di fitting e i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata.

Nel presente studio si è proceduto facendo riferimento ad una serie di diversi approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

4.1 ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA

Per la definizione statistica della variabile "altezza d'onda significativa" è stata adottata la seguente procedura:

- a partire dalla serie di dati orari estratti in corrispondenza del punto MWM al largo (§3) sono stati selezionati gli eventi "statisticamente indipendenti", ovvero quelli per cui siano verificate le seguenti due condizioni :
  - l'intervallo di tempo che separa due eventi sia pari ad almeno 24 ore, in modo da considerare una sola onda significativa per evento;
  - l'onda tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (tipicamente pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti).
- fit della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, sia omnidirezionale / annuale, sia direzionale / stagionale. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. Sono stati utilizzati i seguenti approcci di analisi:
  - fit dei dati con la distribuzione dei massimi annuali di Gumbel;
  - fit dei dati con la distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold"). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri;
- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di bootstrap.

Nel caso in esame per modellare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla base dati di riferimento ed alla finalità dell'analisi è stata assunta a riferimento la distribuzione statistica di Weibull a due parametri associata al metodo di stima della massima verosimiglianza, che meglio rappresenta l'andamento del campione.
A partire dall'intera serie temporale dei 42 anni si è proceduto ad estrarre 84 eventi statisticamente indipendenti di tipo omnidirezionale e riferiti al punto MWM caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa; numero sufficientemente rappresentativo della serie di dati a disposizione.
I risultati dell'analisi probabilistica di tipo omnidirezionale sono riportati in figura 4.3 e riassunti in tabella 4.1 in cui si riportano le altezze d'onda significative per assegnato periodo di ritorno. Si è poi condotta un'Analisi direzionale su un punto più prossimo alla costa i cui risultati sono riportati al capitolo §9.3.5.1.

Al fine di validare la scelta del metodo di analisi adottato, i valori risultanti dall'analisi statistica degli estremi sono stati confrontati con quelli pubblicati da Regione Liguria nel "Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero" ambito costiero 08, paraggio di Sant'Anna da Capo Santa Croce a Punta Cippo (figura 4.1); nel quale si evidenziano "altezze d'onda significative" al largo per il caposaldo Beachmed B93 pari a 3,1m e 6m rispettivamente per un tempo di ritorno di 1 anno e 50 anni (figura 4.2).

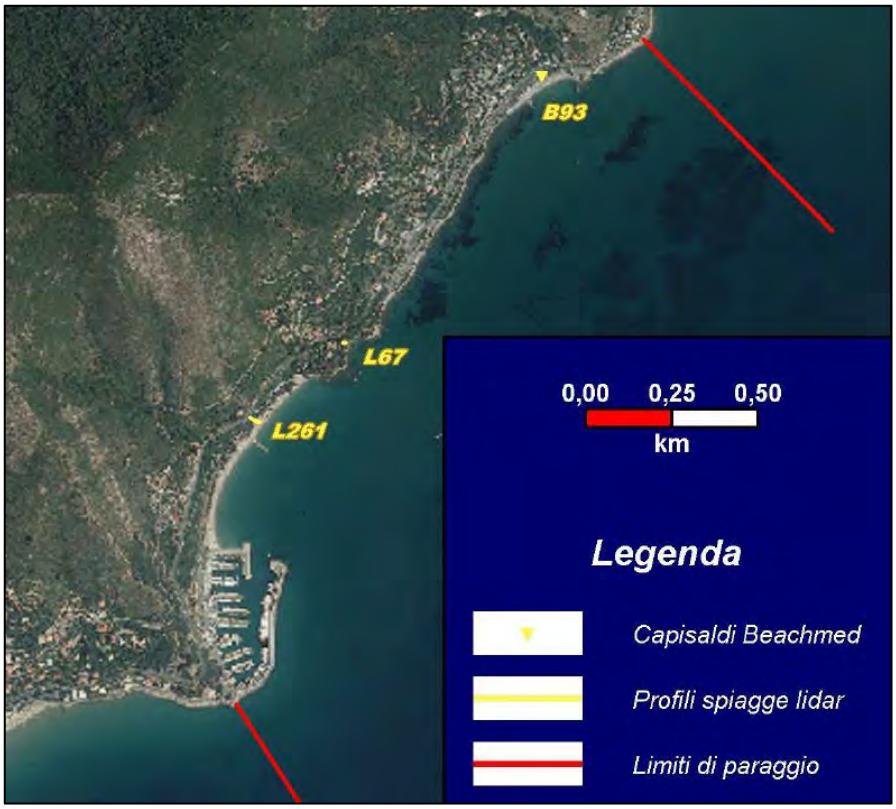


Figura 4.1: Limiti del paraggio Sant'Anna e indicazione delle sezioni di calcolo dei profili trasversali di spiaggia (da PTAMC - Ambito 08 - Relazione Paraggio Sant'Anna)

PROPAGAZIONE MOTO ONDOSO								
ESPOSIZIONE DEL PARAGGIO								
Settore di provenienza del moto ondoso	45°N - 195°N							
ANALISI METEOMARINA SOTTOCOSTA								
Modello utilizzato	Mike 21							
Ambito di applicazione	batimetrica -30 m — linea di costa							
Tempo di ritorno	1 e 50 anni							
RISULTATI								
Nome sezione	T = 1 anno				T = 50 anno			
	H_{largo} [m]	H_{frang} [m]	Decr [%]	$Direzione_{largo}$ [°N]	H_{largo} [m]	H_{frang} [m]	Decr [%]	$Direzione_{largo}$ [°N]
L261	3.1	1.8	42	180	6.0	4.6	23	150
L67	3.1	2.1	32	180	6.0	4.5	25	150
B93	3.1	2.3	26	180	6.0	4.8	20	150

Figura 4.2: Risultati dell'analisi della dinamica del moto ondoso riportati nel PTAMC - Ambito 08 - Relazione Paraggio Sant'Anna

Le stime sono simili, di poco inferiori, a quelle ottenute con l'analisi statistica della serie estratta dal database MWM, che è quindi, a vantaggio di sicurezza, stata presa a riferimento per le successive verifiche contenute nel presente studio.

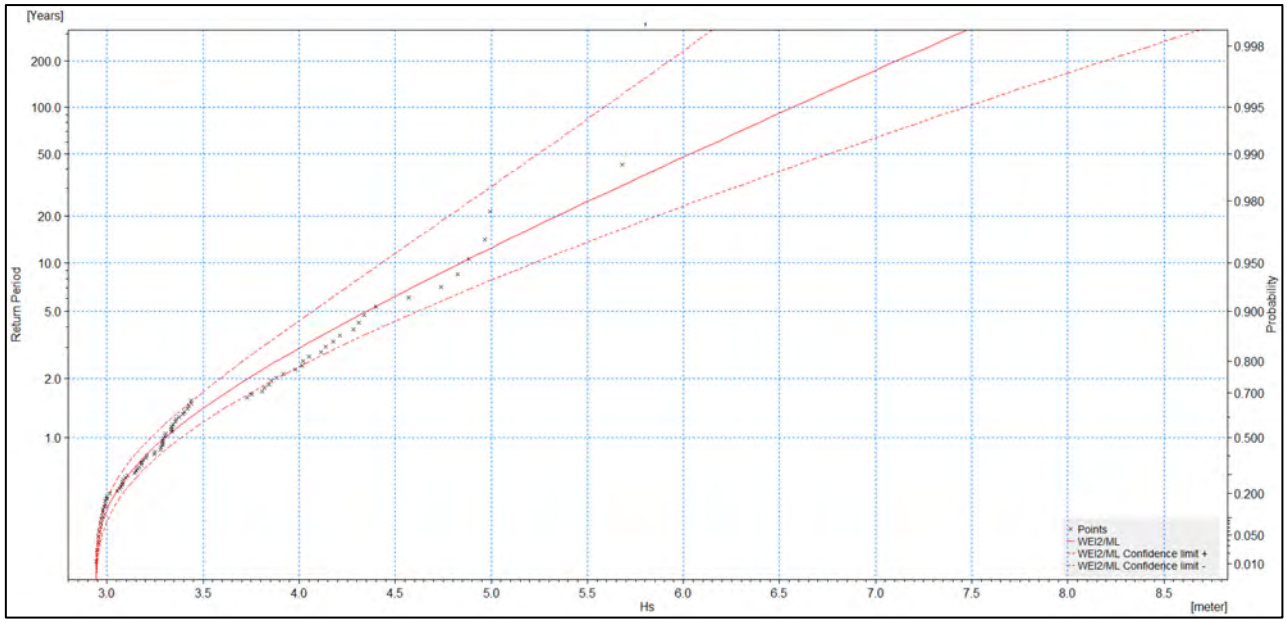


Figura 4.3: Distribuzione statistica di Weibull per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative

I valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs (analisi omnidirezionale) sono riportati nella tabella seguente:

Tempo di ritorno $[anni]$	Hs omnidirezionale $[m]$
1	3.31
10	4.83
50	6.00
100	6.52
200	7.06

4.2 INTENSITA' DEL VENTO

L'analisi dei venti estremi è stata effettuata a supporto delle successive simulazioni del moto ondoso dal largo verso costa, pertanto le elaborazioni fanno esplicitamente riferimento al settore direzionale compreso tra i 30°N e 220°N (primo, secondo e terzo quadrante) effettivamente in grado di contribuire ad un ulteriore innalzamento dell'onda nella sua propagazione verso costa. I venti estremi risultanti dall'analisi sono stati successivamente

utilizzati quale ulteriore forzante locale nel modello di propagazione delle onde dal largo verso costa (capitolo 5).

Anche per i valori di intensità del vento l'analisi statistica si basa sull'intera serie temporale dei dati estratti nel punto al largo (database MWM).

I risultati di tale analisi comprendono 84 eventi statisticamente indipendenti, estratti dall'intera serie temporale (42 anni), caratterizzati dai valori più elevati di intensità del vento.

La distribuzione statistica che si è scelto di utilizzare per analizzare il comportamento del fenomeno è quella di Weibull associata al metodo di stima dei L-Momenti, poiché meglio rappresentativa dell'andamento del campione.

I risultanti dall'analisi statistica per la velocità del vento sono riportati sotto sia in forma grafica che tabellare per determinati tempi di ritorno (figura 4.4 e tabella 4.2)

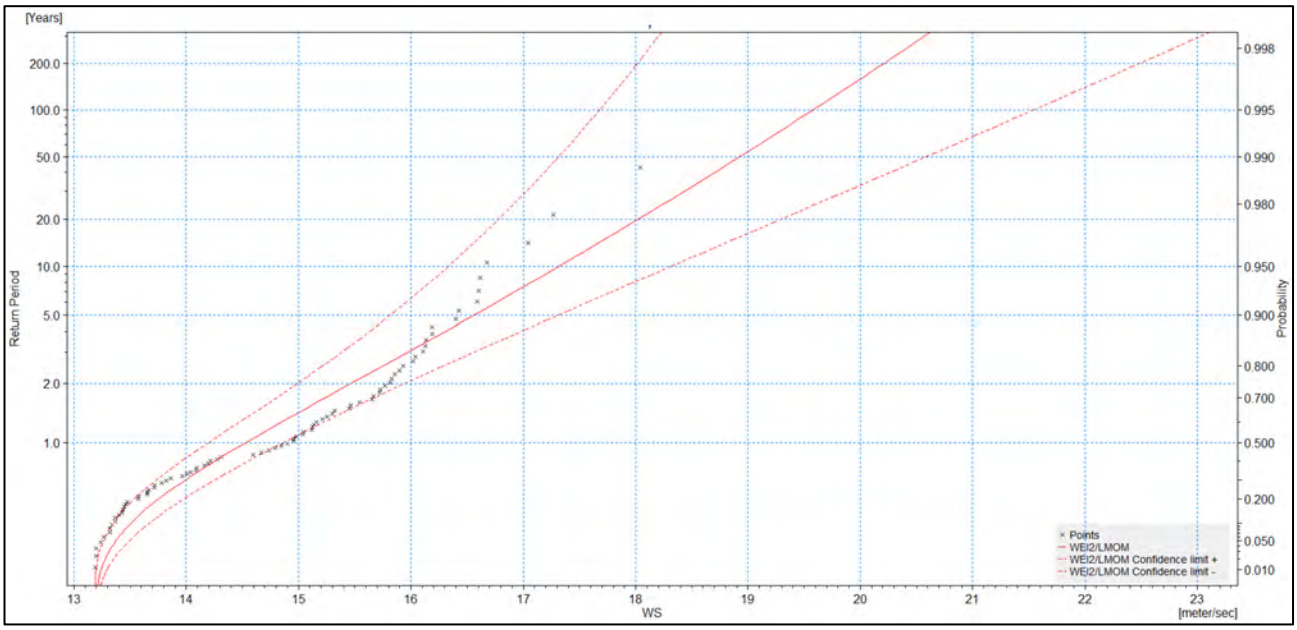


Figura 4.4: Distribuzione statistica di Weibull per il campione di dati relativi alla velocità del vento (WS)

Tempo di ritorno T_R $[anni]$	WS (settore 30-220°N) $[^m/_s]$
1	14.53
10	17.32
50	18.95
100	19.61
200	20.25

4.3 LIVELLO MARINO

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Imperia (§3.3) che, essendo posto all'interno del bacino portuale, è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- contributo del vento (effetto "wind setup", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

Considerata la sua posizione, in ambito portuale protetto, il mareografo di Imperia, non è in grado di misurare l'effetto dell'onda, cosiddetto "wave setup" ovvero il contributo all'innalzamento locale della superficie marina in condizioni di costa aperta e bassi fondali, laddove si verifica il frangimento. Tale contributo è tenuto in considerazione nel modello di risalita dell'onda (§ 8.1)

L'analisi statistica per la definizione dei valori estremi per assegnato tempo di ritorno è stata effettuata sulla base dei dati appena descritti, assumendo i 110 valori più elevati registrati nel periodo corrente dal 1/10/2010 al 31/12/2020. In figura 4.5 e tabella 4.3 sono riassunti sotto forma grafica e tabellare i risultati

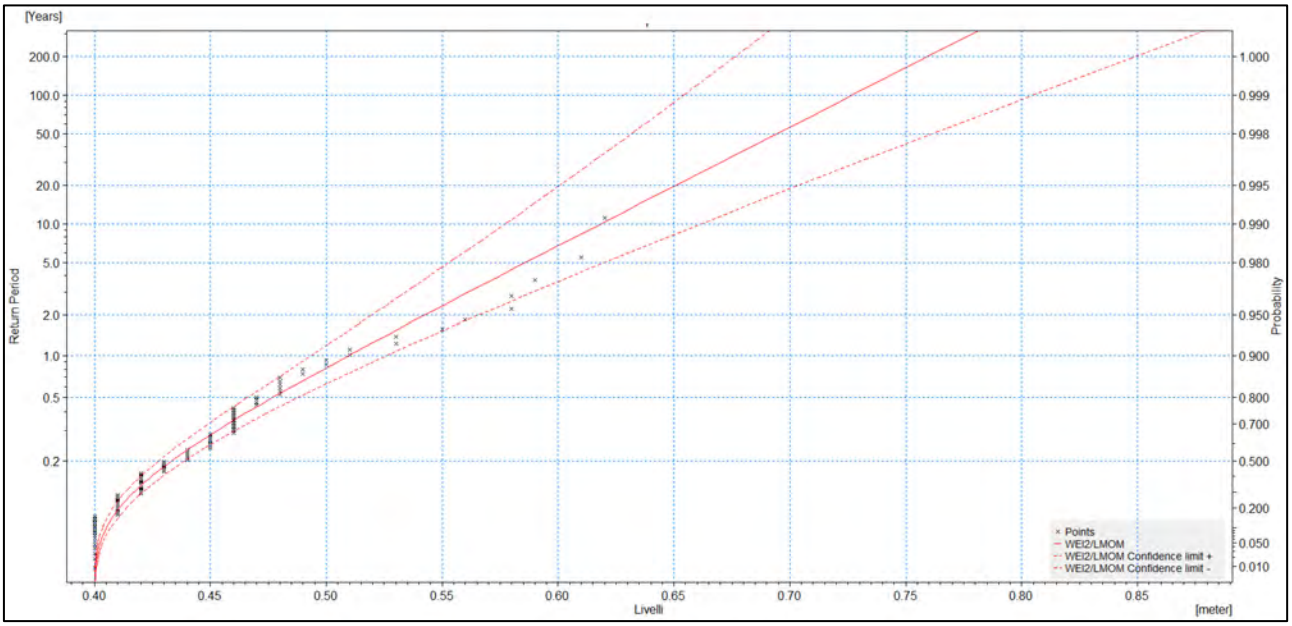


Figura 4.5: Distribuzione statistica di Weibull per il campione di dati relativi al livello marino

La distribuzione statistica che si è scelto di utilizzare per analizzare il comportamento del fenomeno è quella di Weibull associata al metodo di stima dei L-Momenti, poiché meglio rappresentava l'andamento del campione.

Tempo di ritorno **B** $[anni]$	WL $[m]$
1	0.51
10	0.62
50	0.70
100	0.73
200	0.76

5 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO

Al fine di propagare l'intera serie quarantennale di moto ondoso dal punto di estrazione MWM a largo sino al litorale è stato utilizzato il modulo SW (Spectral Waves) di MIKE 21, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.

Tale modello, a maglia triangolare "flessibile", permette di utilizzare una risoluzione spaziale variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, shoaling, attrito con il fondo ed eventualmente frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- generazione dell'onda ad opera del vento;
- interazione non lineare onda-onda;
- dissipazione dovuta al cosiddetto "white capping"
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- dissipazione dovuta al frangimento;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni del fondale;
- interazione onde-correnti;
- diffrazione;

- riflessione.

Un'accurata descrizione del modulo MIKE 21 SW è riportata nell'Allegato B al presente elaborato. I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione;
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, *white-capping*, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun istante temporale di calcolo (time step), sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media, *radiation stress*.

5.1 MODELLO SW : BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO.

Partendo dai dati topo-batimetrici a disposizione (§3.4), è stato possibile caratterizzare l'area oggetto di studio predisponendo una batimetria di calcolo a maglia triangolare tale da coprire una porzione di mare antistante l'area di intervento avente sviluppo costiero di circa 6 km e un'estensione verso il largo di oltre 3 km. La risoluzione e la dimensione e del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo le

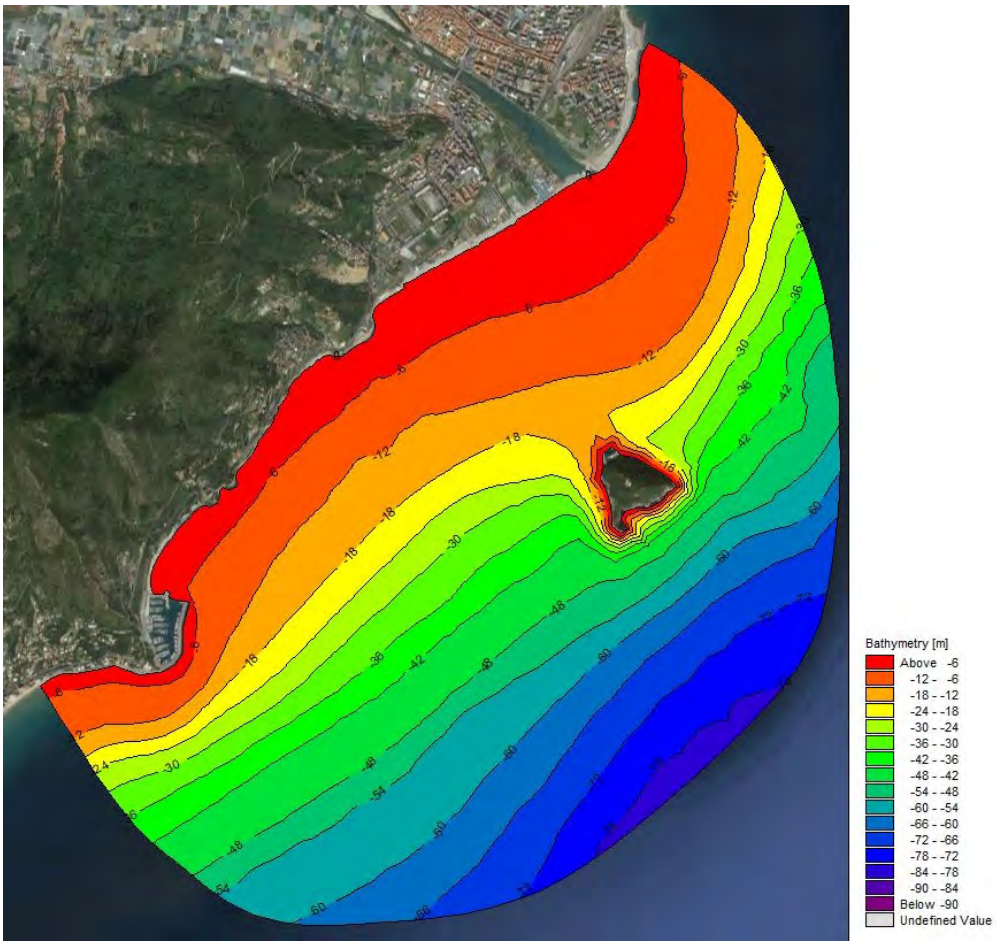


Figura 5.1: Batimetria ottenuta dall'elaborazione dei dati a disposizione

tempistiche di elaborazione.

La batimetria del modello (Figura 5.1) è stata costruita partendo, come detto, dai dati di rilievo integrati con quelli forniti dal database regionale e dal database delle carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP, utilizzando un approccio a maglia flessibile con risoluzione spaziale (lunghezza media dei lati dei triangoli) al largo di circa 150m che diminuisce

gradatamente fino ad arrivare a 10 m in prossimità dell'area oggetto di intervento così da aumentare la risoluzione nelle aree più prossime alla costa.

Nel complesso la mesh di calcolo è costituita da circa 9500 elementi (Figura 5.2).

Il confine della mesh (boundary) è stato suddiviso in 4 "segmenti" (Figura 5.3) in modo da impostare le corrette condizioni al contorno: alla boundary offshore, di colore verde, sono stati quindi associati i principali parametri d'onda estratti dal database MWM (§ 3.1) assumendoli come uniformi lungo il contorno aperto; in rosso e blu sono rappresentate le boundary lateral, mentre in giallo la land boundary.

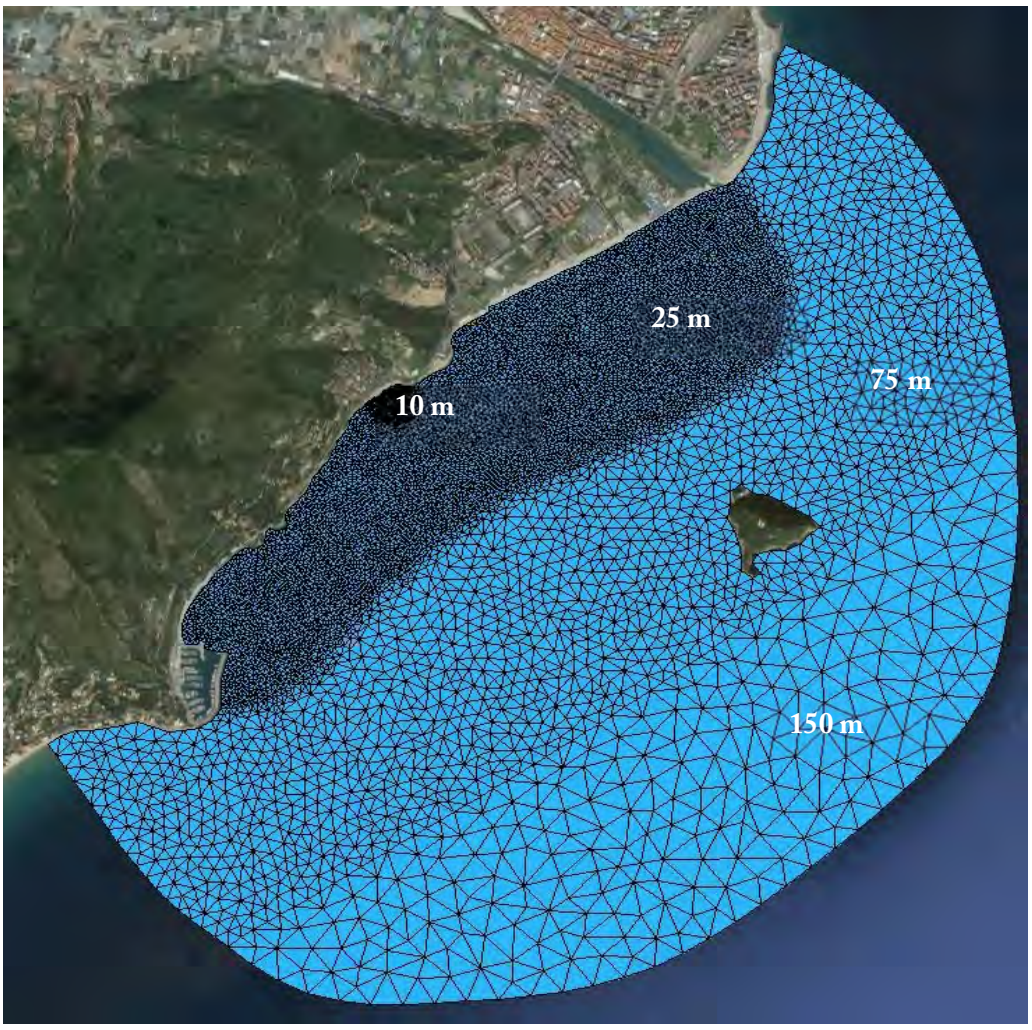


Figura 5.2: Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello SW



Figura 5.3: Rappresentazione della suddivisione delle boundary per l'applicazione di differenti condizioni al contorno

5.2 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

La simulazione ha permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa - periodo medio e di picco - direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo, rendendo pertanto possibile estrarre la serie di moto ondoso in qualsiasi punto sotto costa. Nelle figure a seguire (Fig. 5.4-5.5) sono riportati i campi d'onda relativi a due stati di mare rappresentativi, in particolare di un'onda proveniente da Scirocco ed una da Libeccio; la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che subisce l'onda durante la sua propagazione verso costa. In particolare la scala cromatica mette bene in evidenza l'effetto schermante che l'Isola Gallinara offre, in particolar modo per le onde provenienti da Scirocco.

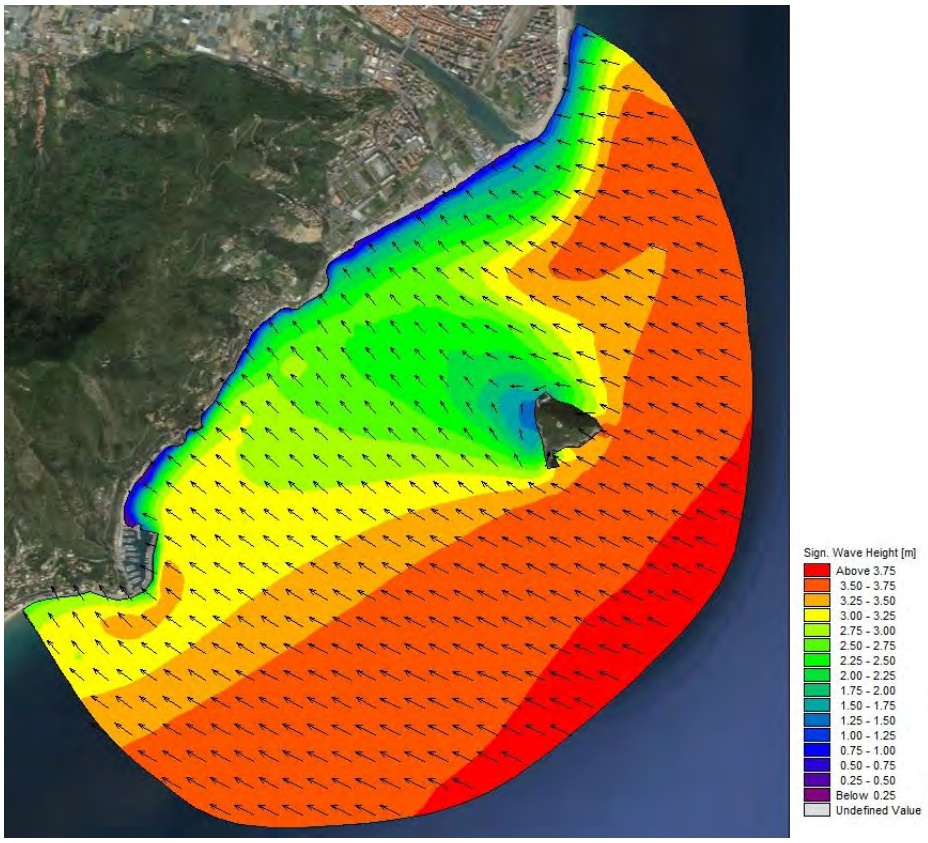


Figura 5.4: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per un'onda da Scirocco (dati del 31.01.1986 ore 00.00)

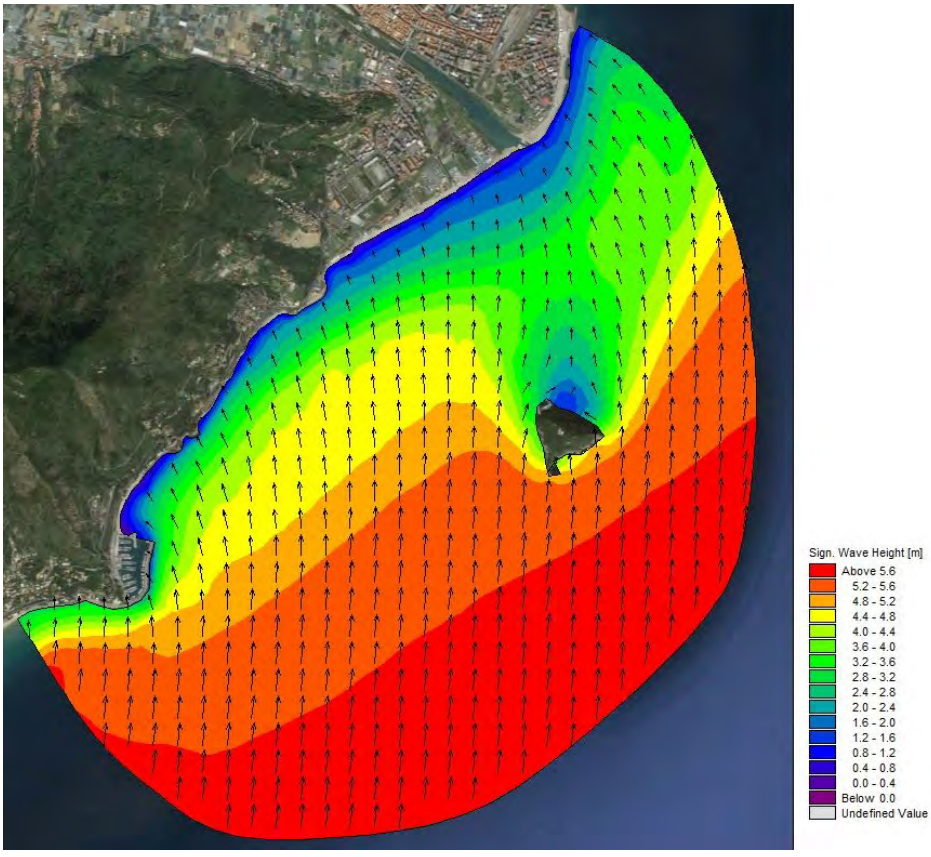


Figura 5.5: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per un'onda da Libeccio (dati del 11.12.2017 ore 13.00)

I risultati del modello mostrano una distribuzione delle altezze d’onda piuttosto regolare con l’andamento dei fondali: le pendenze poco elevate determinano infatti una dissipazione progressiva dell’energia ondosa con l’avvicinarsi alla costa.
La trasposizione dell’intera serie di dati orari estratti dal dataset MWM ha fornito indicazioni generali sulle modalità di propagazione del clima ondoso verso litorale oggetto di studio e ha permesso di ottenere le principali grandezze di moto ondoso in tutti i punti del dominio di calcolo, fornendo anche le condizioni al contorno per i modelli di dettaglio descritti nei capitoli seguenti.

Come accennato, il litorale oggetto di studio risulta particolarmente influenzato in termini di energia del moto ondoso incidente dalla presenza dell’Isola Gallinara, soprattutto in riferimento alle onde provenienti dal settore di Scirocco. A seguire si riporta la rosa del clima estratta in 3 differenti punti del dominio di calcolo, indicativamente intorno alla batimetrica -5 m, che sintetizzano le variazioni che il moto ondoso subisce nella propagazione da largo verso riva
Nei 3 punti di estrazione posti in corrispondenza della batimetrica -5m, è possibile notare l’incidenza dell’effetto schermante dovuto alla presenza dell’Isola Gallinara sul settore di Scirocco mentre si evidenzia che le altezze d’onda più frequenti e significative si manifestino per i settori di Libeccio e Mezzogiorno.

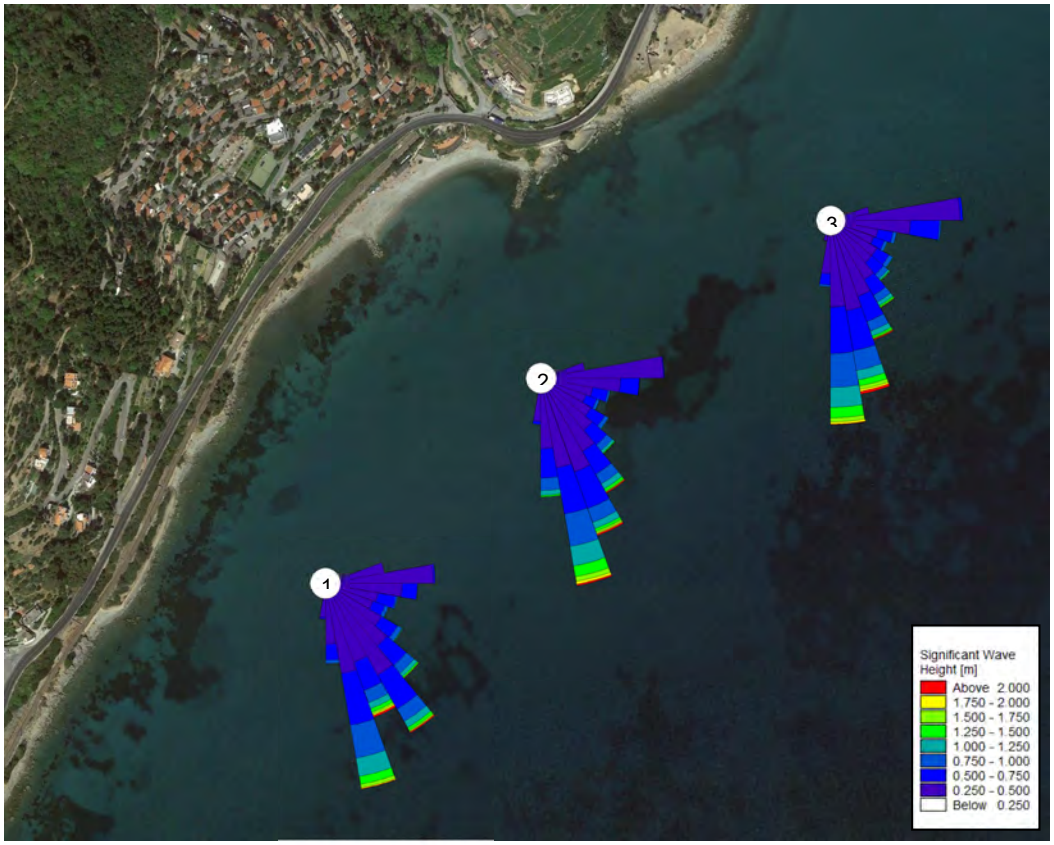


Figura 5.6: Rose del moto ondoso relative ai punti di estrazione 1(Long 44.0281° - Lat 8.2031°), 2 (Long 44.0300° - Lat 8.2057°) e 3(Long 44.0315° - Lat 8.2087°).

6 TRASPORTO LITORANEO

Per l'analisi preliminare del trasporto di sedimenti che avviene in corrispondenza dell'area di interesse, è stato utilizzato il modello numerico monodimensionale Litdrift, facente parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI descritto dettagliatamente nell' Allegato C. Il modulo Litdrift permette di simulare la distribuzione delle altezze d'onda, del set-up e del set-down, delle correnti longshore e del trasporto di sedimenti non coesivi lungo uno o più profili trasversali alla costa; esso utilizza il metodo "STP" di DHI per calcolare la distribuzione trasversale del trasporto longitudinale di sedimenti (dato dalla somma del trasporto di sedimenti al fondo ed in sospensione) per un determinato profilo batimetrico, per onde regolari e irregolari. Il trasporto al fondo viene calcolato facendo riferimento allo shear stress istantaneo che si verifica durante il ciclo d'onda, mentre il trasporto dei sedimenti sospesi è dato dall'integrazione della velocità istantanea con le concentrazioni lungo i profili verticali.
STP descrive inoltre nel dettaglio le condizioni idrodinamiche, inclusi i processi di propagazione, *shoaling* e frangimento delle onde, il calcolo delle forzanti derivanti dai gradienti di *radiation stress*, il bilancio dei momenti per le direzioni trasversali e longitudinali che forniscono il set-up dell'onda e le velocità di corrente longitudinali.
Pertanto, l'applicazione del modulo Litdrift permette di definire il budget sedimentario nei profili trasversali di interesse, sulla base del clima meteomarino (onda, vento, marea e storm surge), delle quote del profilo e della granulometria lungo lo stesso, che può essere considerata variabile.
Nell'ambito del presente studio, tale modulo è stato applicato al fine di:

- quantificare i volumi di sedimenti movimentati nel corso dei 42 anni disponibili;
- stimare la direzione del trasporto litoraneo netto;
- individuare, se esistente, un trend evolutivo nei 42 anni di dati a disposizione;
- individuare la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti si può considerare trascurabile.

6.1 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO LITDRIFT

Per lo studio del trasporto litoraneo è stato applicato il modello monodimensionale LITDRIFT che ha richiesto l'identificazione di tre profili di spiaggia ritenuti rappresentativi del tratto costiero in oggetto (Fig. 6.1), con un'estensione tale da coprire l'intera zona dei frangenti (surf-zone) ossia la fascia costiera dove hanno luogo i processi morfodinamici e la

movimentazione di sedimenti, indicativamente fino alla quota di profondità 7m. Ad ogni transetto sono state associate come forzanti le condizioni d'onda estratte dal modello di propagazione del moto ondoso (§5) in corrispondenza del punto più a largo di ciascuno di essi; il fondale invece, è stato descritto dal punto di vista granulometrico impostando un diametro medio (D_{50}) costante pari a 0,8 ed un "Grading coefficient" pari a 1,48; quest'ultimo è un parametro indicativo della variabilità del fuso che corrispondente a: $\sqrt{D_{84}/D_{16}}$

Tali valori sono stati assunti sulla base dalle analisi granulometriche a disposizione (§3.5); nell'impostazione del modello è stato utilizzata una mesh di calcolo di minori dimensioni ma di maggior dettaglio, ovvero con una lunghezza media dei lati dei triangoli pari a 2 m.

In corrispondenza dei punti offshore dei transetti sono state considerate come forzanti le condizioni d'onda locali estratte dal modello SW per l'intero intervallo temporale a disposizione (42 anni) (§5.1); in tabella sono riportate le coordinate di tali punti e la quota batimetrica alla quale sono stati estratti:

Transetto	Batimetrica	Latitudine	Longitudine
1 - 2	-7	44.0286°	8.2059°
3	-7	44.0297°	8.2076°



Figura 6.1: Rappresentazione dei profili utilizzati per il calcolo del trasporto di sedimenti e dei relativi punti di estrazione.

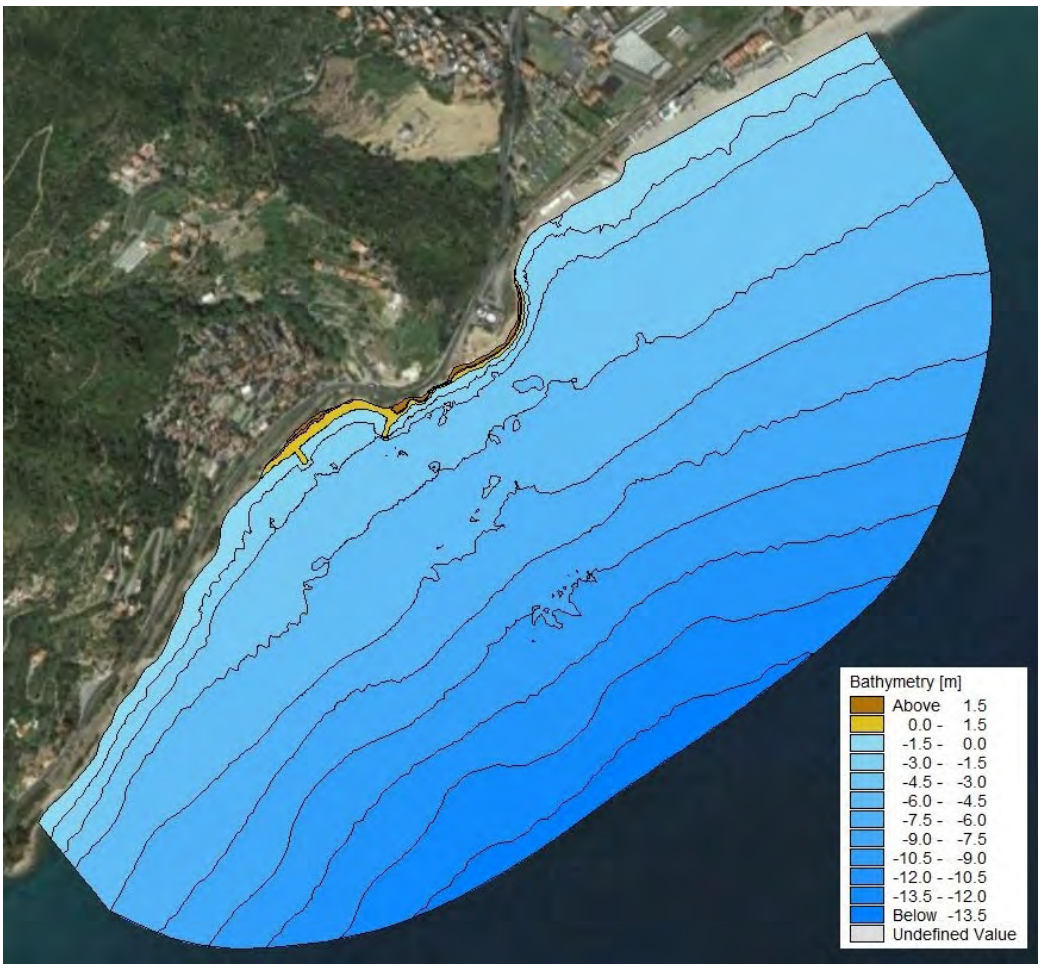


Figura 6.2: Rappresentazione del dominio di calcolo utilizzato nel modulo Litdrift

6.2 RISULTATI DELL' ELABORAZIONE

Il modello Litdrift permette di estrapolare molteplici informazioni sul trasporto dei sedimenti in corrispondenza dei profili considerati; in particolar modo, mostra i volumi di sedimento netti e lordi che vengono movimentati annualmente e la loro direzione.

I transetti si estendono da riva sino ad almeno la profondità di chiusura (qui considerata come la profondità entro la quale si esaurisce il 98% del trasporto solido long-shore) senza prolungarsi troppo al largo, poiché l'utilizzo di dati di clima ondoso estratti sotto costa permettono di ottenere dei risultati più accurati; tuttavia la presenza dei pennelli e del promontorio di punta Cippo ad est del sito, di cui il Litdrift non tiene conto essendo monodimensionale, compromette la veridicità dei dati quantitativi del trasporto, ne consegue che al fine del presente studio i risultati saranno considerati solo dal punto di vista qualitativo, al fine di definire il senso del trasporto e l'orientazione ottimale del profilo di spiaggia.

I risultati ottenuti dalla simulazione del periodo di 42 anni sono rappresentati in termini di andamento del trasporto **longshore medio annuo** (lordo, netto) lungo i profili analizzati (T1-T3) ed illustrati sia in forma grafica (Figura 6.3 ÷ 6.5) che in forma tabellare (Tabella 6.1).

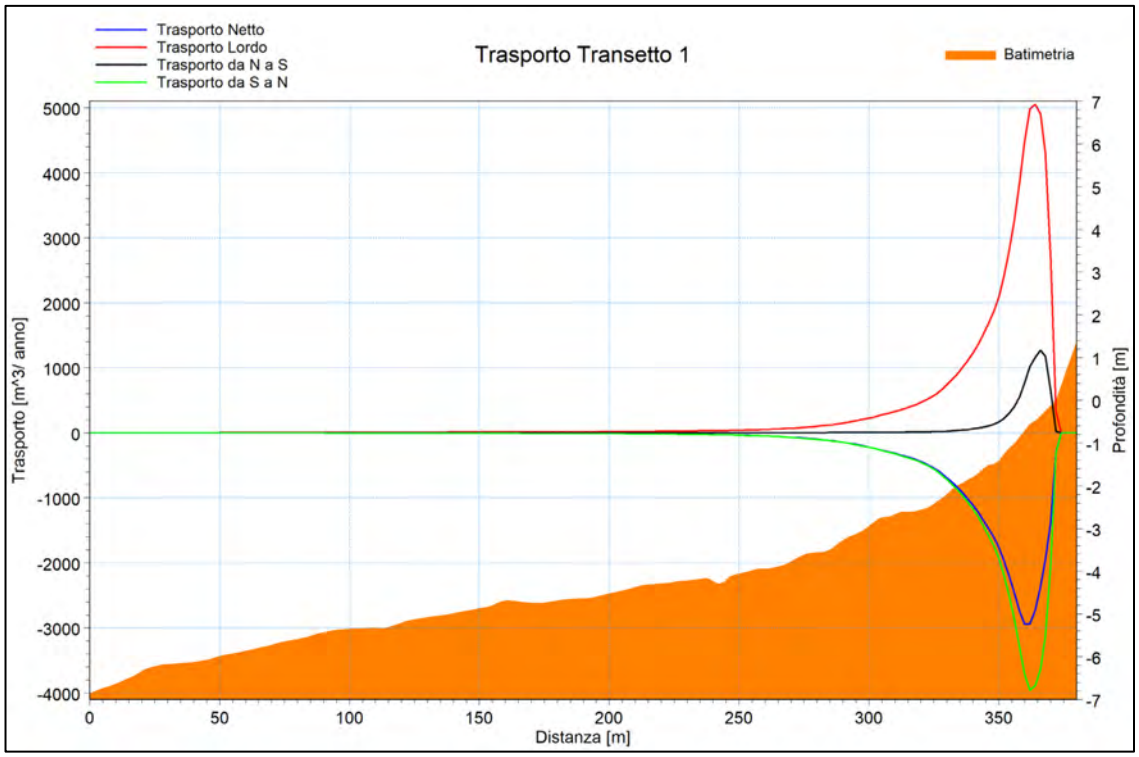


Figura 6.3: Rappresentazione grafica del trasporto potenziale medio annuale lungo il Transetto 1

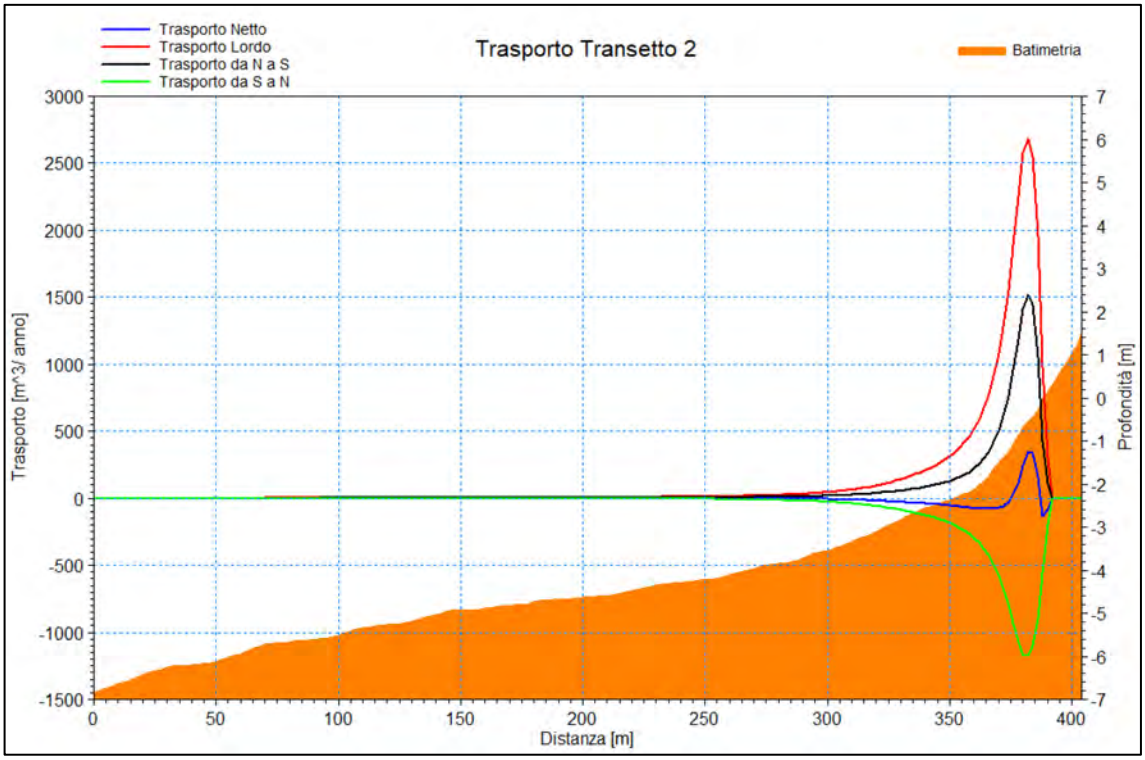


Figura 6.4: Rappresentazione grafica del trasporto potenziale medio annuale lungo il Transetto 2

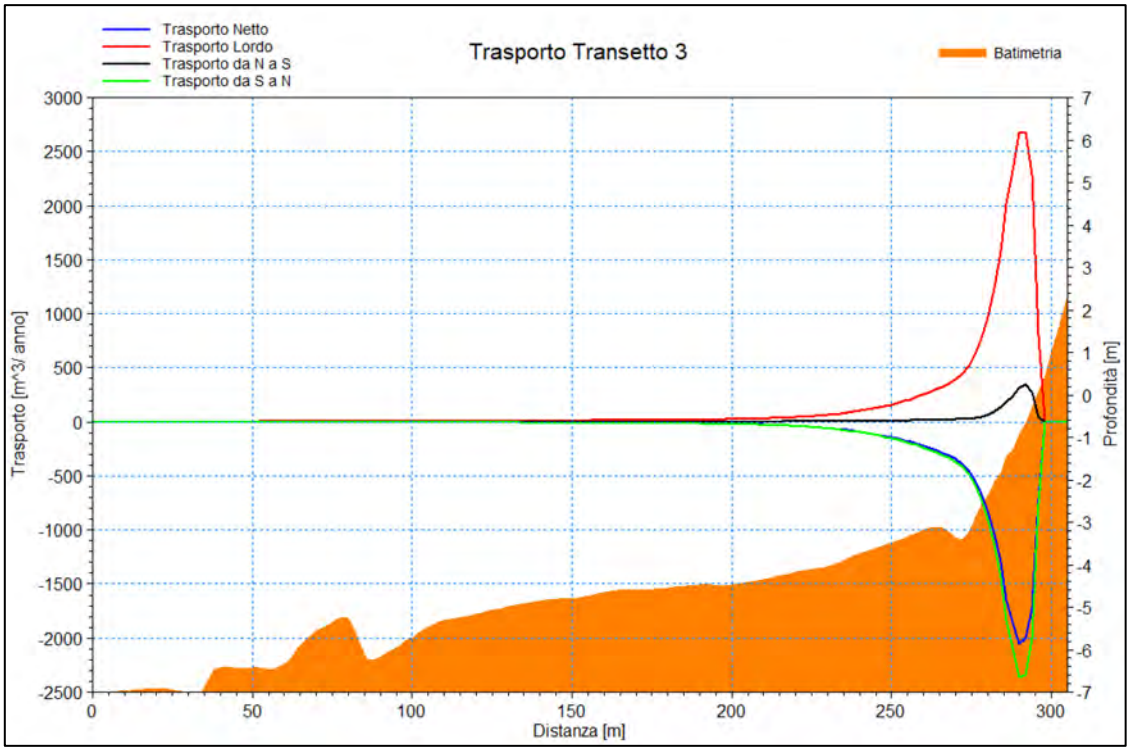


Figura 6.5: Rappresentazione grafica del trasporto potenziale medio annuale lungo il Transetto 3

Nella tabella seguente sono riportati la profondità di chiusura ed il trasporto potenziale medio annuale relativi ad ogni transetto; le quantità, riportate unicamente a scopo rappresentativo, evidenziano un trasporto diretto da Sud a Nord sui Transetti 1 e 3, mentre sul transetto 2 il senso si inverte ed il trasporto può considerarsi praticamente nullo.

Transetto	Profondità di Chiusura $[m]$	Trasporto Netto $[m^3/anno]$	Trasporto Lordo $[m^3/anno]$	Trasporto Da Nord a Sud $[m^3/anno]$	Trasporto Da Sud a Nord $[m^3/anno]$
T1	-4.00	-4'583 (da Sud a Nord)	6'293	855	-5'438
T2	-4,05	34 (da Nord a Sud)	2'884	1459	-1'425
T3	-4.53	-1'979 (da Sud a Nord)	2'399	210	-2'189

Ne consegue che la conformazione attuale della baia, grazie alla presenza dei due pennelli agli estremi, impedisce il transito dei sedimenti in direzione S-N ed il profilo di spiaggia compreso tra i due pennelli può considerarsi in sostanziale equilibrio "longshore". Si può inoltre affermare che il sedimento potenzialmente mosso non viene accumulato a lato dei pennelli ma viene

trasportato al largo da correnti offshore(avvalorate dallo studio idrodinamico di cui al § 7 e seguenti). Tale risultato è suffragato dal confronto dei risultati ottenuti con la situazione reale e le rappresentazioni storiche della linea di riva in cui si evidenzia che il trasporto di sedimenti per l’area in oggetto avviene sostanzialmente in senso offshore e quindi verso largo (Figura 6.6)



Figura 6.6 : Evoluzione della linea di riva per il sito in oggetto

7 STUDIO DELLE DINAMICHE COSTIERE

Al fine di identificare le principali dinamiche locali che si instaurano in corrispondenza dell'area oggetto di studio, ad integrazione del modello d'onda prodotto con il modulo Spectral Waves (MIKE 21 SW), è stato utilizzato il modulo idrodinamico MIKE 21 HD, (Hydrodynamics), cuore del codice bidimensionale MIKE 21, in grado di simulare le variazioni di livello e di corrente che si verificano in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica. La versione Flexible Mesh utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale, al pari del modello d'onda, è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il modulo necessita di una serie di dati di input, che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (es. oscillazioni di marea, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, *radiation stress*, apporti puntuali di portata).

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno, ma anche la direzione e il verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascun elemento di calcolo, è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- velocità di corrente e direzione;
- densità, temperatura e salinità (se rilevanti).

Una descrizione di dettaglio del modulo idrodinamico HD del codice di calcolo MIKE 21 è disponibile in Allegato D.

7.1 SETUP DEL MODELLO HD

7.1.1 DOMINIO DI CALCOLO

Il Dominio utilizzato per il modello idrodinamico è stato realizzato a partire dai dati batimetrici a disposizione (§3.2) come avvenuto per il calcolo dei domini dei moduli precedenti, ma differisce da questi per estensione e dettaglio; l'area si estende all'incirca per 2 km lungo costa e 1 km verso il largo ed è stata suddivisa in sottodomini con differenti risoluzioni: si passa da una dimensione media dei lati dei triangoli che compongono la mesh di 18 m nella zona più al largo, ad una di 3 metri per la zona caratterizzata da profondità inferiori a 5 m (Figure 7.1 e 7.2). La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente studio.

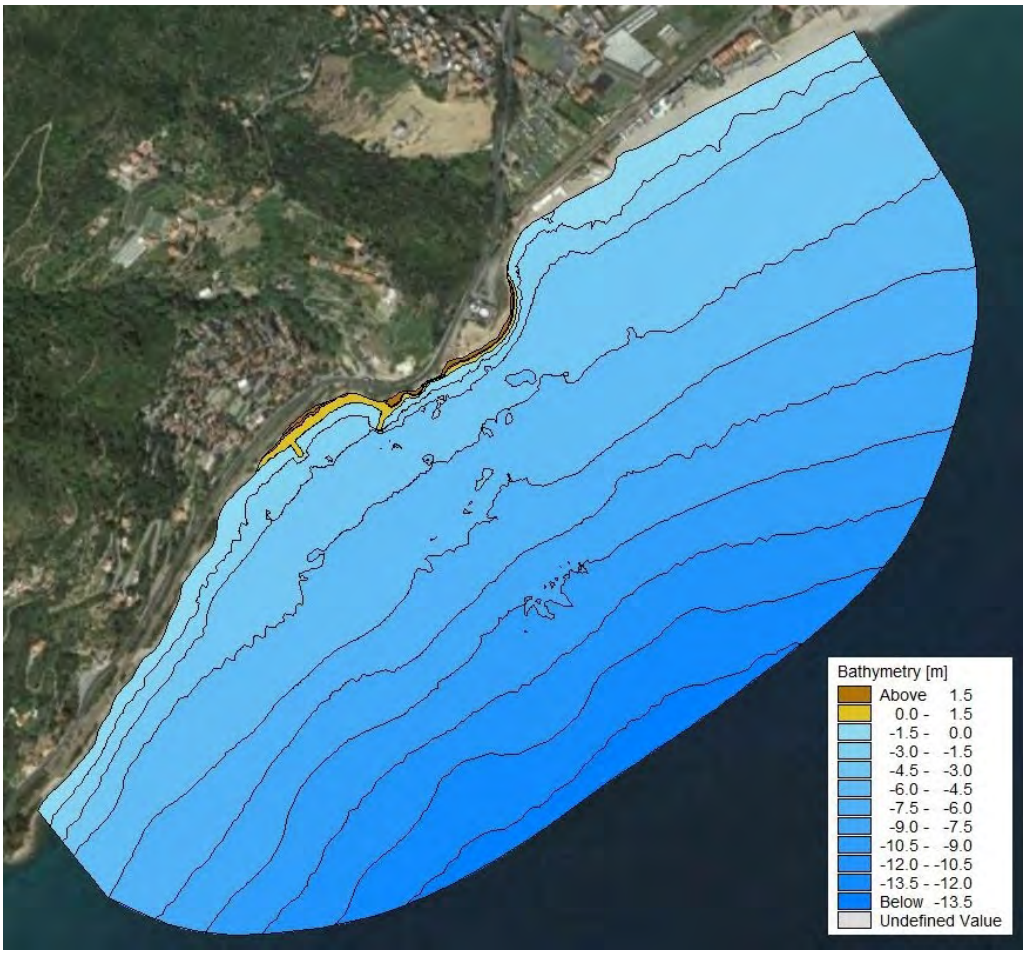


Figura 7.1: Rappresentazione della batimetria utilizzata per l'impostazione modello HD

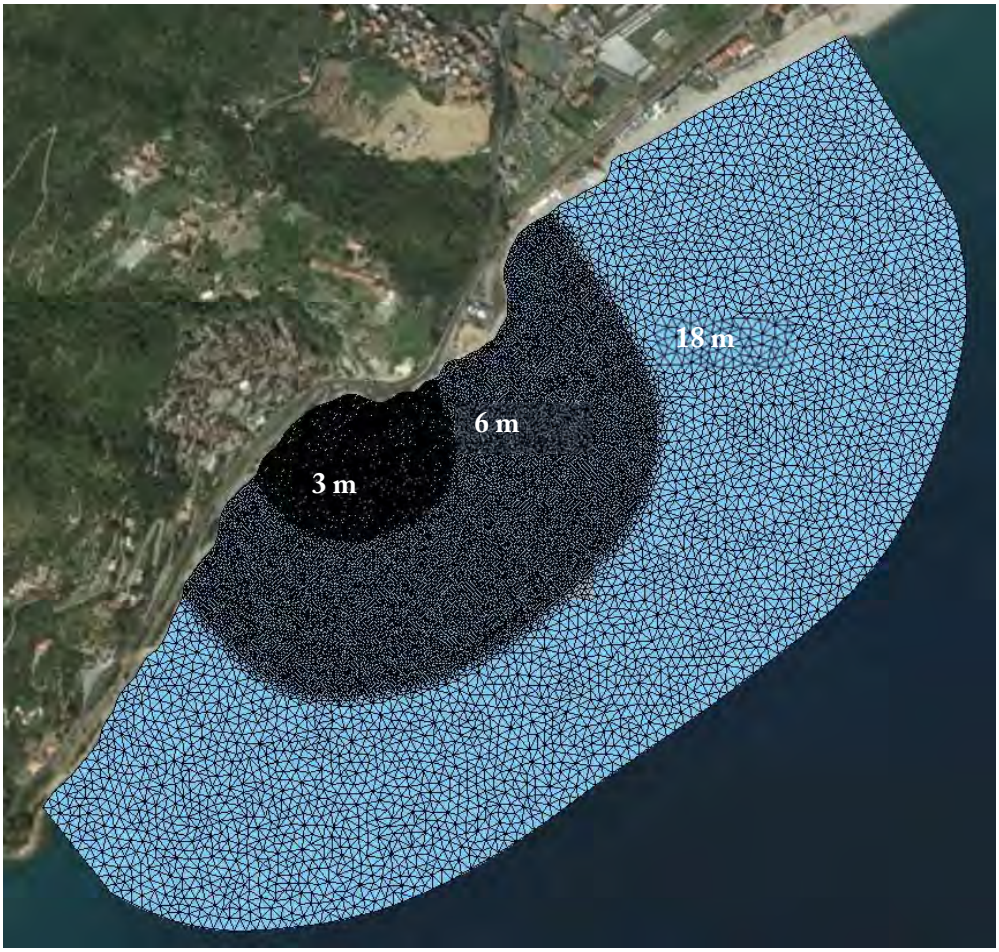


Figura 7.2: Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modulo HD

7.1.2 SCELTA DELLE CONDIZIONI D’ONDA RAPPRESENTATIVE.

Il modello di dettaglio integrato onda-corrente, è stato utilizzato per l’identificazione e l’analisi delle principali dinamiche sottocosta, sia per la configurazione di stato attuale, sia per le alternative progettuali di volta in volta prese in considerazione.

A tal fine partendo dalla rosa del moto ondoso relativa al Punto 0 di coordinate Lon 8.2091° E, Lat 44.0261° N (Fig. 7.3) posto in corrispondenza della boundary offshore del dominio considerato, in prossimità della batimetrica -14 m già definito dalla propagazione largo › costa del dato MWM sono state selezionate una serie di condizioni d’onda rappresentative dell’intera serie di dati estratti, sia come frequenza che intensità.

Il grafico a rosa è stato suddiviso in settori da 30° in modo da individuare chiaramente quale direzione di provenienza hanno le onde con maggiore altezza e frequenza (Figura 7.4).

Si sono quindi individuati quattro settori prevalenti :

- Settore 1 MWD 85°N comprensivo di tutte le onde tra 70°N e 100°N;
- Settore 2 MWD 115°N comprensivo di tutte le onde tra 100°N e 130°N;

- Settore 3 MWD 145°N comprensivo di tutte le onde tra 130°N e 160°N;
- Settore 4 MWD 175°N comprensivo di tutte le onde tra 160°N e 190°N.



Figura 7.3: Posizione del punto di estrazione dei dati P0 (LON 8.2091°E LAT 44.0261°N)

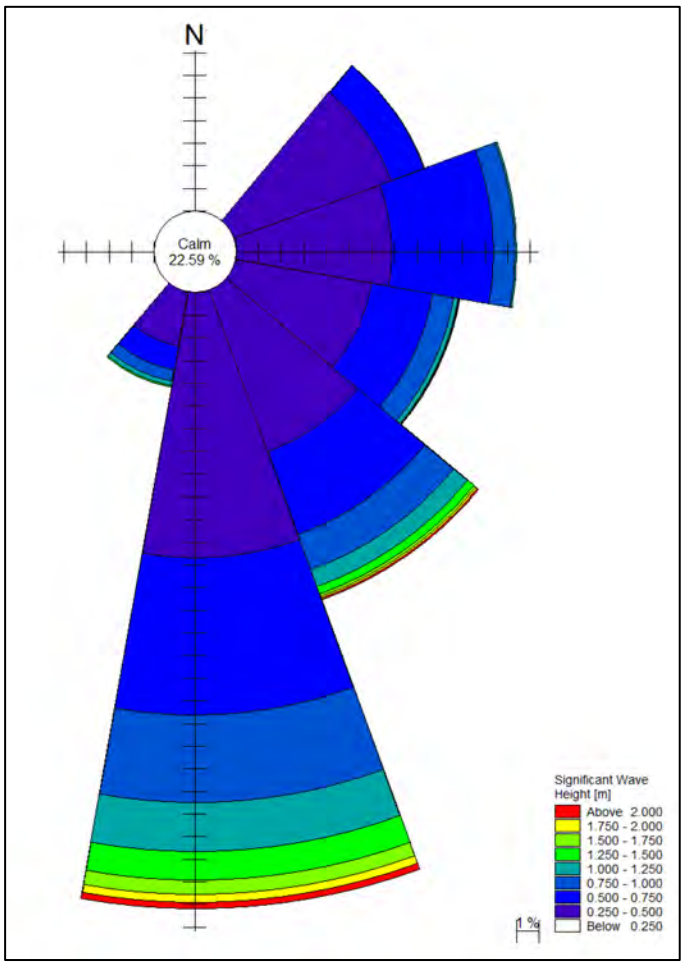


Figura 7.4: Rosa del moto ondoso in corrispondenza del punto P0 (LON 8.2091°E LAT 44.0261°N) La calma qui associata ad altezze inferiori a 0.25m, si verifica per circa il 22,6% del tempo.

Per il primo ed il secondo settore direzionale da cui, per la schermatura offerta dall'Isola Gallinara, non si evidenziano onde di altezza importante, si sono assunti valori d'onda di frequenza compresi tra 3,5 - 4,2 giorni/anno rappresentativi di eventi di medio-bassa frequenza ed altezze d'onda media.

Per il terzo settore direzionale si sono assunti valori d'onda di frequenza compresa tra 1,3 – 1,5 giorni/anno rappresentativi di eventi con bassa frequenza ed altezze d'onda medio-alta e valori d'onda con frequenza compresa tra 0,3 – 1,0 giorni/anno rappresentativi di eventi con poco frequenti ed altezze d'onda alta.

Nel quarto settore maggiormente significativo si sono assunti valori d'onda con frequenza compresi tra 12,5 – 15 giorni/anno rappresentativi di eventi con alta frequenza ed altezze d'onda media, valori d'onda con frequenza compresa tra 3,0 – 3,5 giorni/anno rappresentativi di eventi con bassa frequenza ed altezze d'onda elevata e, in fine, valori d'onda con frequenza compresi tra 0,1 – 0,2 giorni/anno rappresentativi di eventi molto poco frequenti ed altezze d'onda molto elevata

Nella tabella seguente sono elencate le caratteristiche relative a n°7 condizioni di onda che sono state simulate:

Onda	MWD[°N]	Hs [m]	Tp [s]	n [-]
1	85	0,8	5,33	7
2	115	1,1	5,88	7
3	145	1,25	6,11	7
4	145	2,25	7,33	8
5	175	1,1	5,88	7
6	175	1,75	6,78	8
7	175	3	8,01	9

I valori di Periodo di picco [Tp] e quindi del Directional spreading index [n] per le condizioni d'onda simulate sono stati calcolati mediante l'equazione della linea di tendenza (least-square fit) che rappresenta la meglio la base dati reale mediante le relazioni riportate nelle figure seguenti (Fig. 7.5):

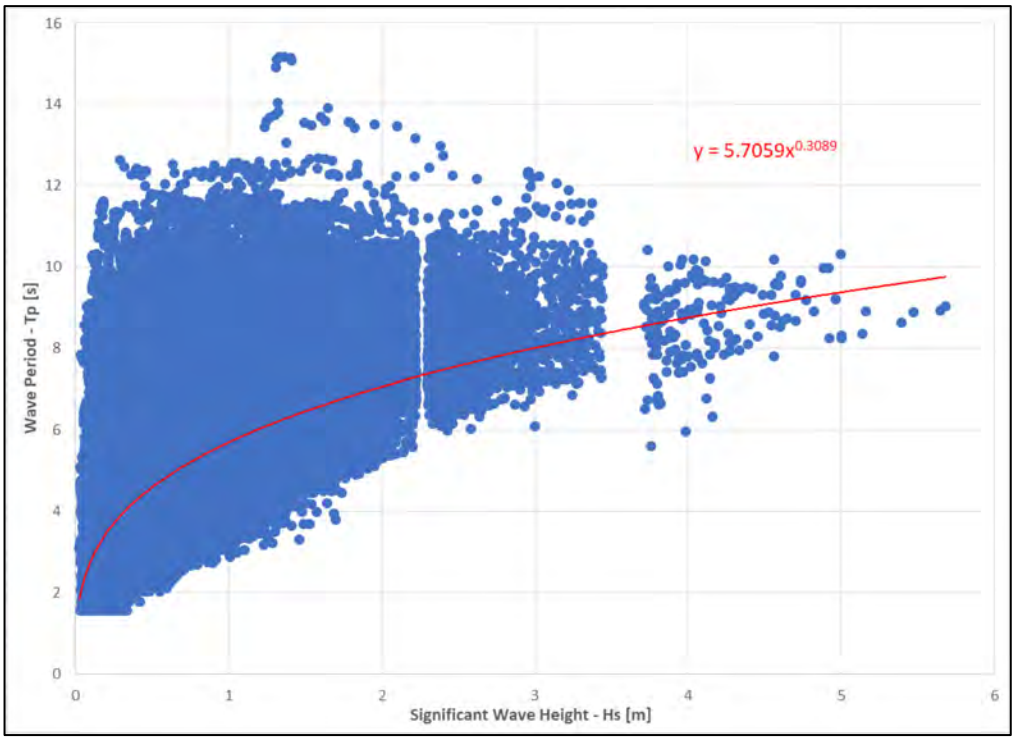


Figura 7.5: Scatter plot Hs-Tp relativo al punto P0; in rosso è riportata la linea di tendenza e la relativa equazione.

Tp $[s]$	**n** $[-]$
Tp < 5	6
5 < Tp < 6.5	7
6.5 < Tp < 8	8
8 < Tp < 9.5	9
Tp > 9.5	10

7.2 MODELLO INTEGRATO ONDA-CORRENTE

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo. I risultati del modello, riportati nei paragrafi a seguire, fanno principalmente riferimento a:

- mappe di altezza d'onda e direzione di provenienza;
- mappe di velocità e direzione di corrente.

7.2.1 RISULTATI DEL MODELLO D'ONDA

Le simulazione delle onde scelte come rappresentative (§7.1.2) ha permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso per l'intero dominio di studio. Come

già illustrato per il modello d'onda a larga scala (propagazione delle onde da largo verso riva §5), la simulazione ha permesso di ottenere mappe in cui la scala cromatica, l'orientazione e la la lunghezza dei vettori mostrano in maniera efficace le trasformazioni che subisce l'onda in direzione e altezze nella sua propagazione dal largo verso costa. In particolare, è possibile notare l'effetto schermante che la presenza di ostacoli naturali come ad esempio l'Isola Gallinara, e le opere di difesa artificiali, offrono al litorale oggetto di studio. In generale si evidenzia come la regolarità del fondale non determini particolari aree di concentrazione di energia del moto ondoso.

Come mostrato nelle figure seguenti, la conformazione attuale della spiaggia, dei pennelli e la pendenza del fondale non permette una protezione efficace dell'arenile oggetto di intervento, in particolar modo per quanto riguarda le onde con direzione media di propagazione da 145°N e 175°N, rappresentative dei settori 3 (130°N-160°N) e 4 (160°N-190°N) in cui le onde raggiungono il litorale senza riduzioni significative di energia sino al frangimento (Figure 7.8 ÷ 7.12) come dimostra la parziale distruzione del pennello lato levante durante i recenti eventi calamitosi del 28-30 ottobre 2018.

Le condizioni d'onda con direzione media di propagazione da 85°N e 115°N (Figura 7.6 e Figura 7.7), data la forte obliquità rispetto alla normale alla costa e la protezione fornita dall'isola Gallinara, sono caratterizzati da significative rotazioni del fronte d'onda nella propagazione verso costa e conseguenti maggiori dissipazioni di energia rispetto al caso precedente.

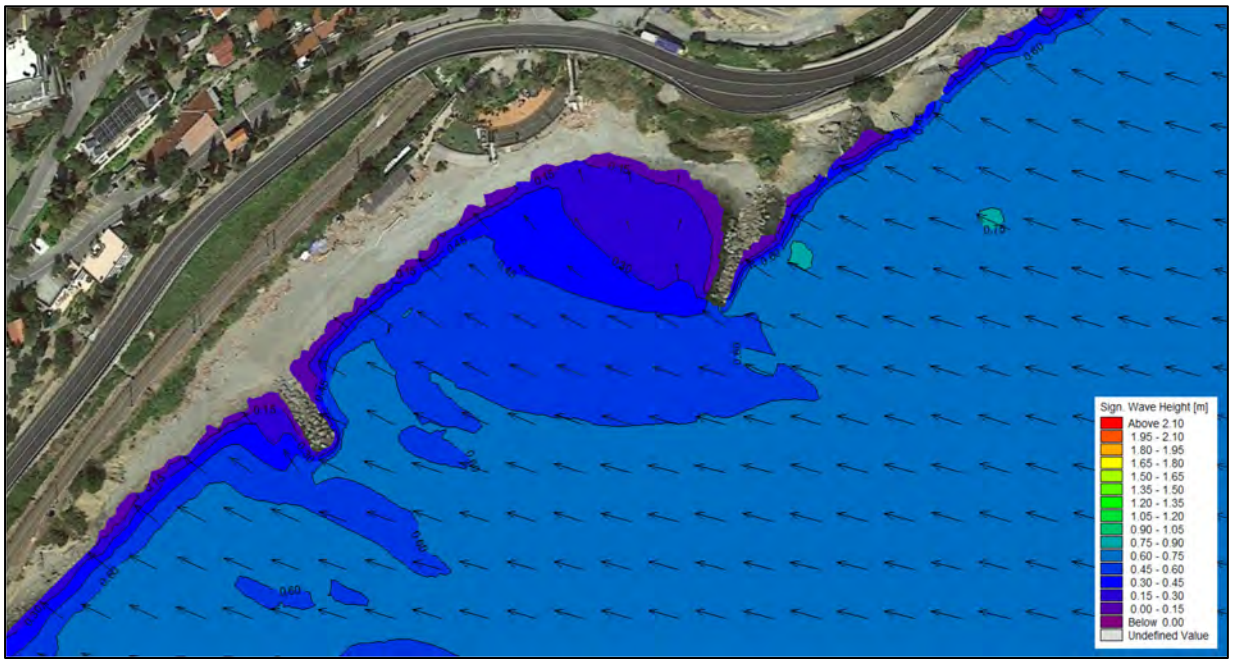


Figura 7.6: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 1 (Hs=0.8 m, MWD=85°N)

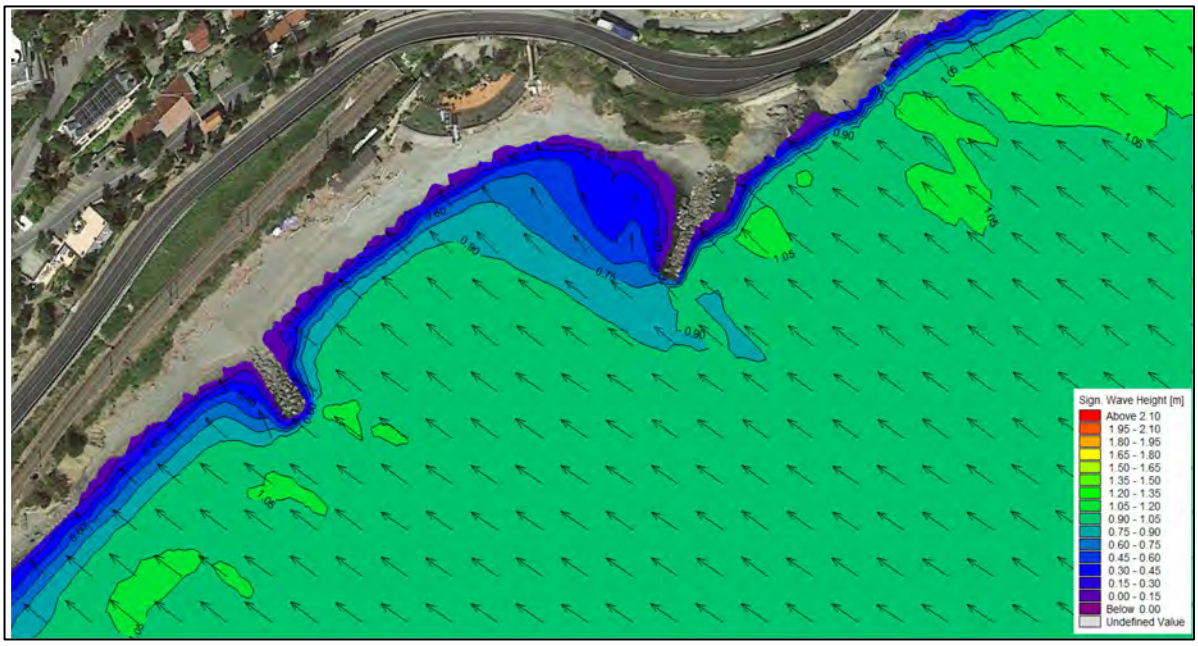


Figura 7.7: Distribuzione dell’altezza d’onda per la condizione 2 (Hs=1.1 m, MWD=115°N)

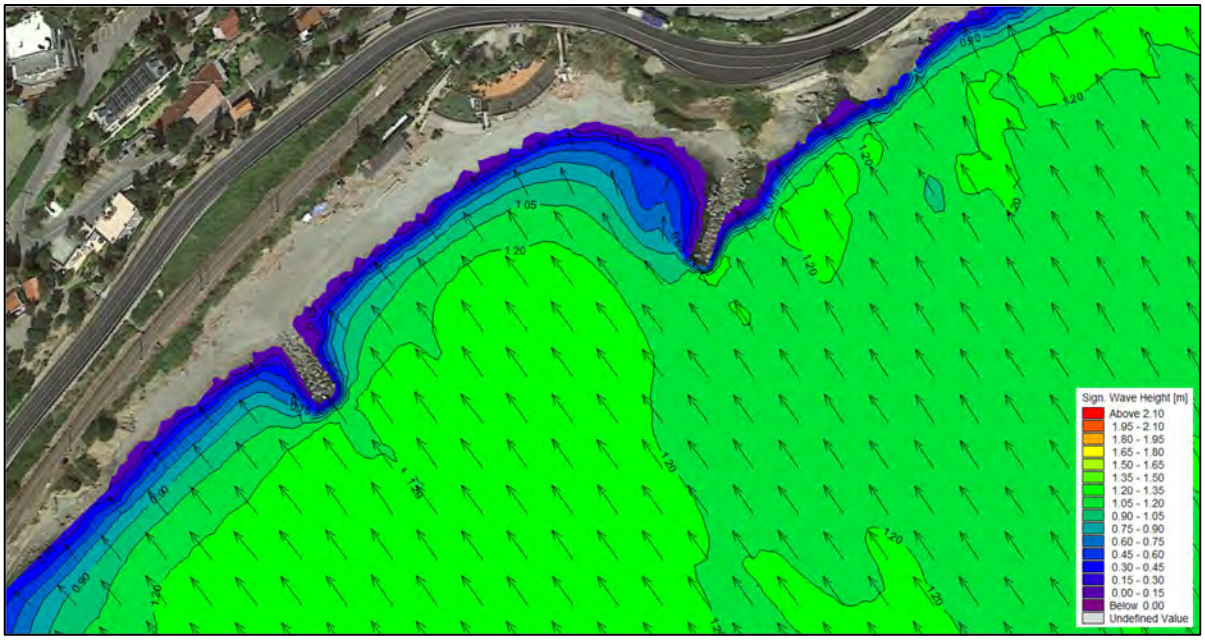


Figura 7.8: Distribuzione dell’altezza d’onda per la condizione 3 (Hs=1.25 m, MWD=145°N)

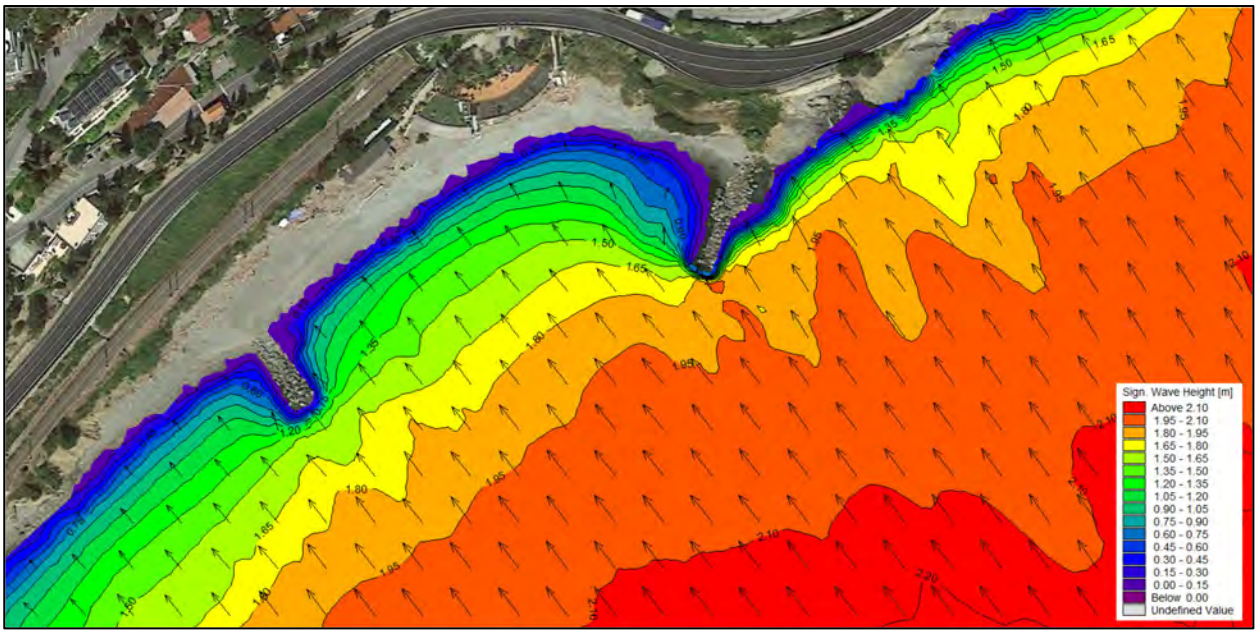


Figura 7.9: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 4 (Hs=2.25 m, MWD=145°N)

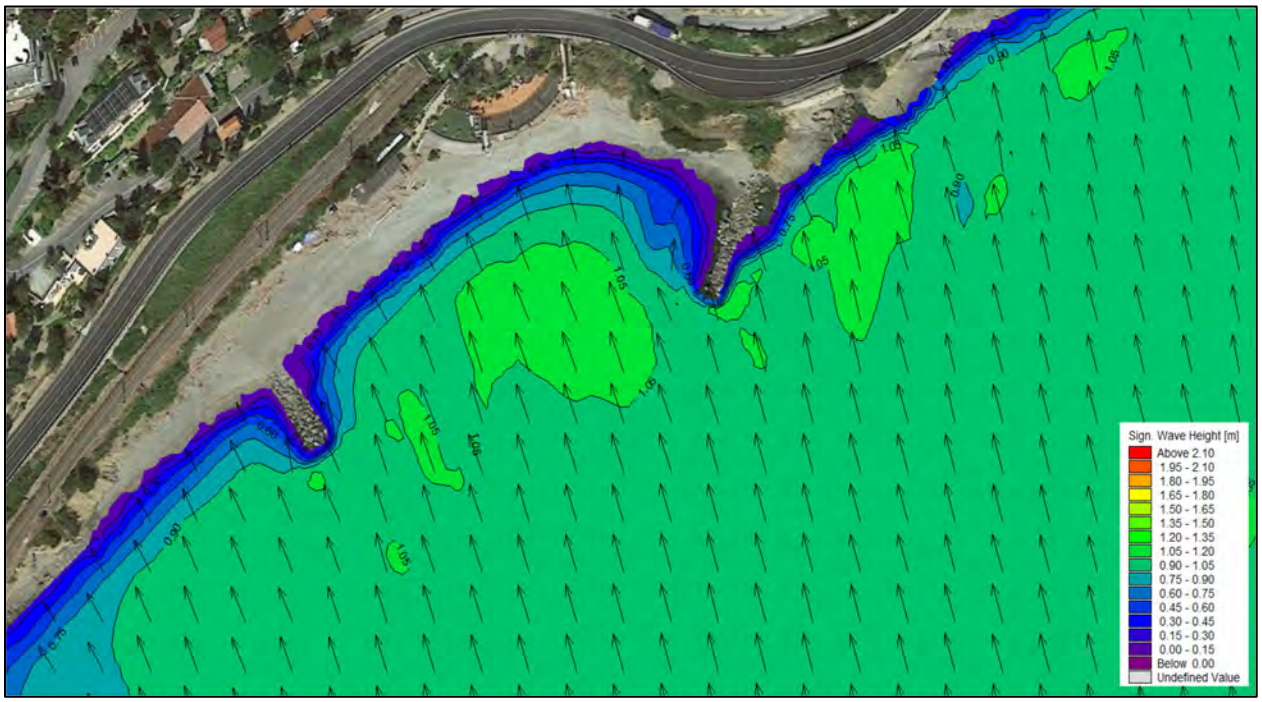


Figura 7.10: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 5 (Hs=1.1 m, MWD=175°N)

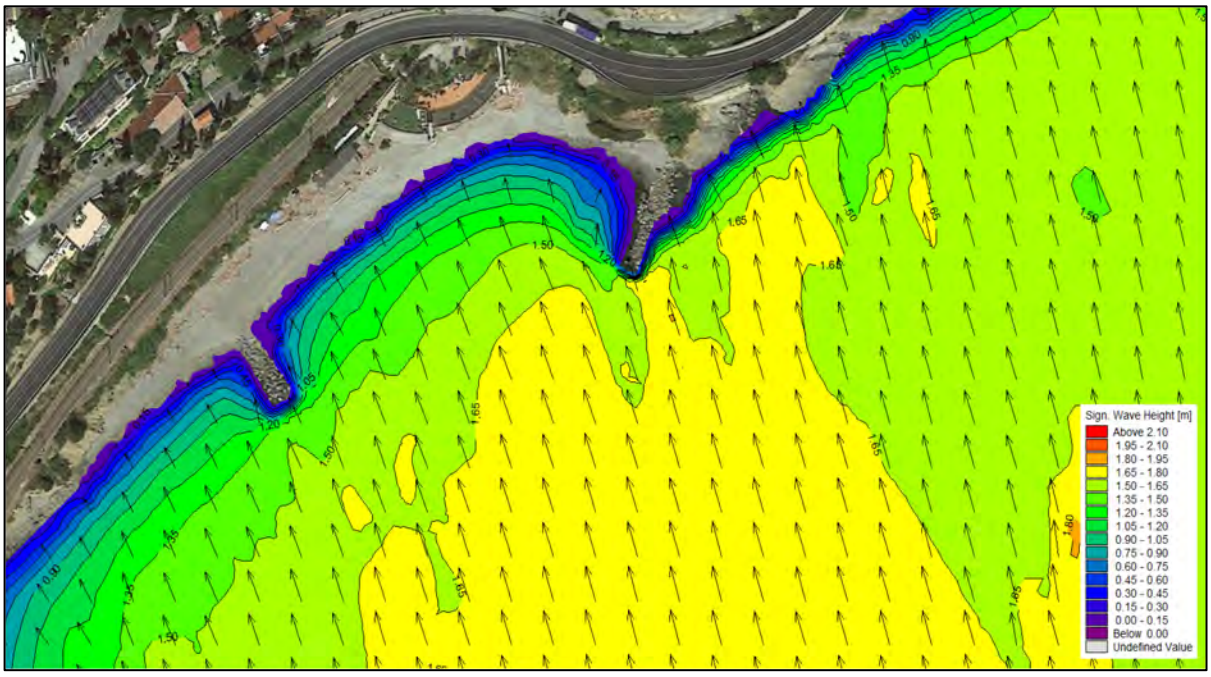


Figura 7.11: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 6 (Hs=1.75 m, MWD=175°N)

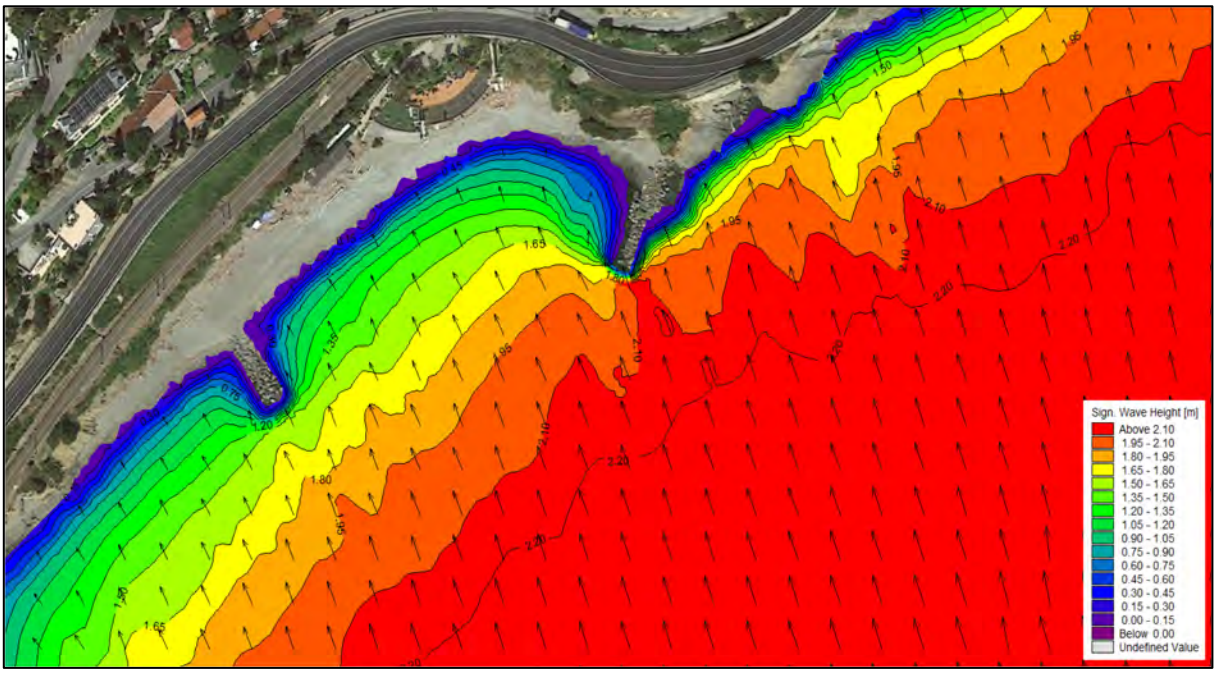


Figura 7.12: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 7 (Hs=3 m, MWD=175°N)

7.2.2 RISULTATI DEL MODELLO IDRODINAMICO

Nel seguito si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le condizioni d'onda selezionate, che forniscono una esaustiva rappresentazione dell'attuale circolazione locale.

Le correnti litoranee sono generate per effetto dei gradienti dei radiation stress, massimi in corrispondenza del frangimento. Le condizioni di moto ondoso, a seconda della loro intensità e direzione (e quindi della localizzazione della fascia di frangenti, più o meno spostata verso largo), sono in grado di generare correnti in una fascia più o meno prossima alla costa. La direzione prevalente della corrente risulta invece influenzata dall'angolo formato tra il fronte d'onda e le isobate.

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente per ogni condizione di onda impostata; come mostrato nelle figure seguenti, le onde provenienti da 85°N e 115°N (condizioni 1 e 2) caratterizzate da una spiccata inclinazione rispetto alla linea di costa generano velocità di corrente molto basse e con direzione da levante verso ponente (Figure 7.13 e 7.14).

Viceversa le onde provenienti da 145°N e 175°N (condizioni da 3 a 7) più perpendicolari alla costa generano sistemi di correnti più complessi dovuti anche alla presenza di strutture artificiali e del promontorio di punta Cippo che percorrono la costa in direzione SW-NE. Per condizioni di altezza d'onda media (Figure 7.15-7.16) le correnti seguono la conformazione della costa verso riva generando per direzioni d'onda più prossime ai 175° correnti di ritorno *"Rip current"* più intense in corrispondenza del pennello di ponente. Al crescere dell'intensità del moto ondoso e dell'altezza d'onda, le correnti tendono a bypassare la baia oggetto d' intervento arrivando a discrete velocità (Figure 7.17 – 7.18 – 7.19).

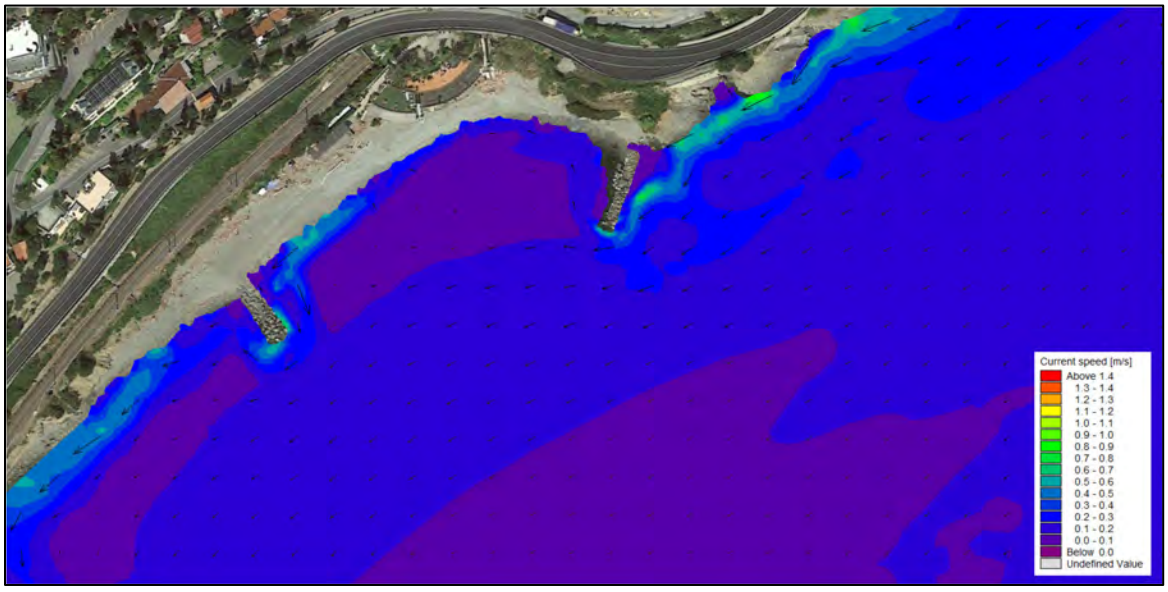


Figura 7.13: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 1(Hs=0.8 m, MWD=85°N)

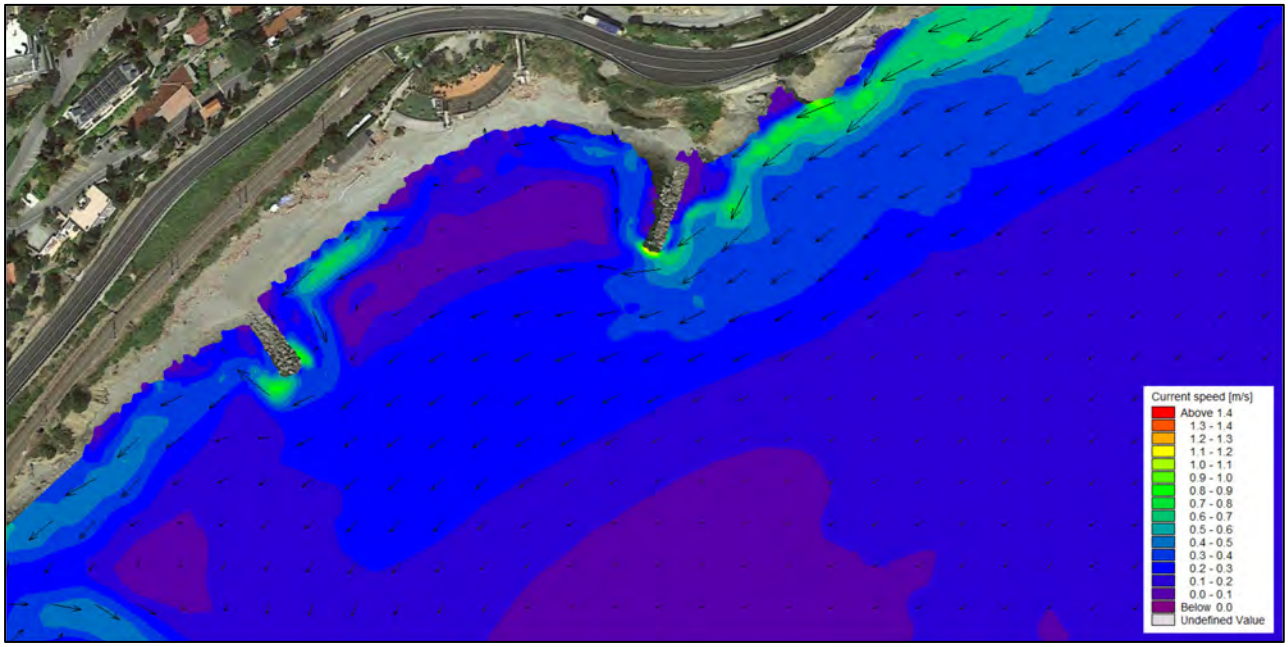


Figura 7.14: Distribuzione dell’intensità di corrente per la condizione 2(Hs=1.1 m, MWD=115°N)

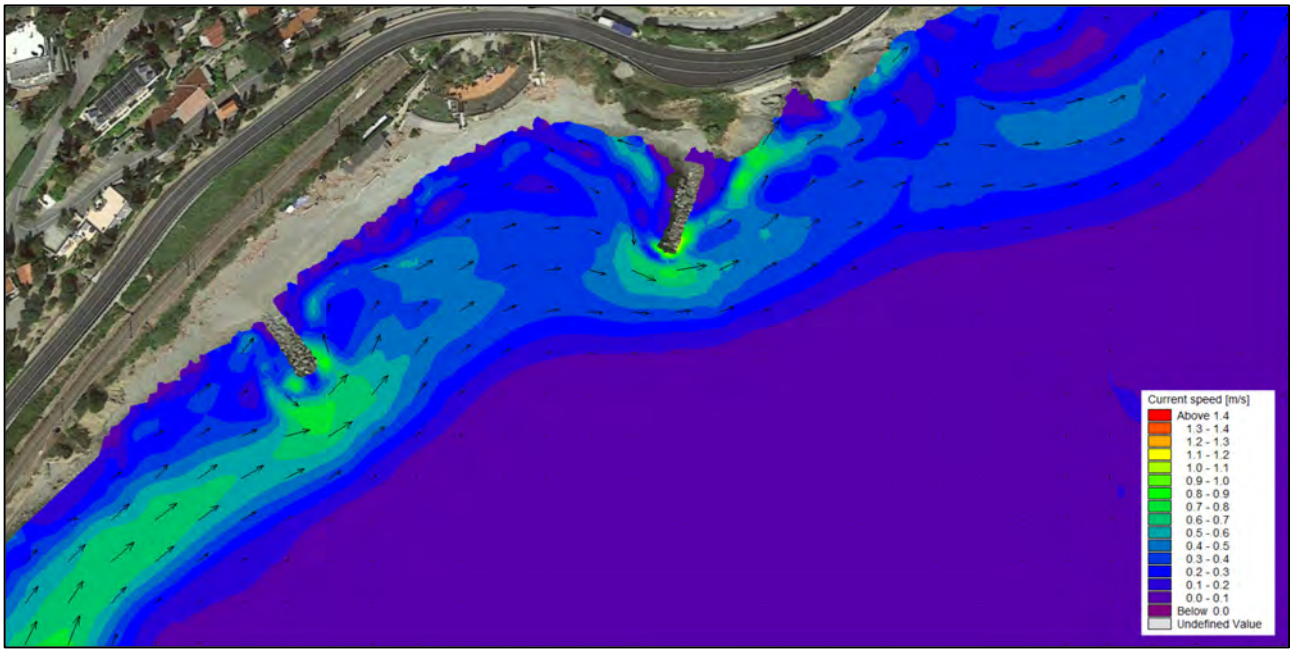


Figura 7.15: Distribuzione dell’intensità di corrente per la condizione 3 (Hs=1.25 m, MWD=145°N)

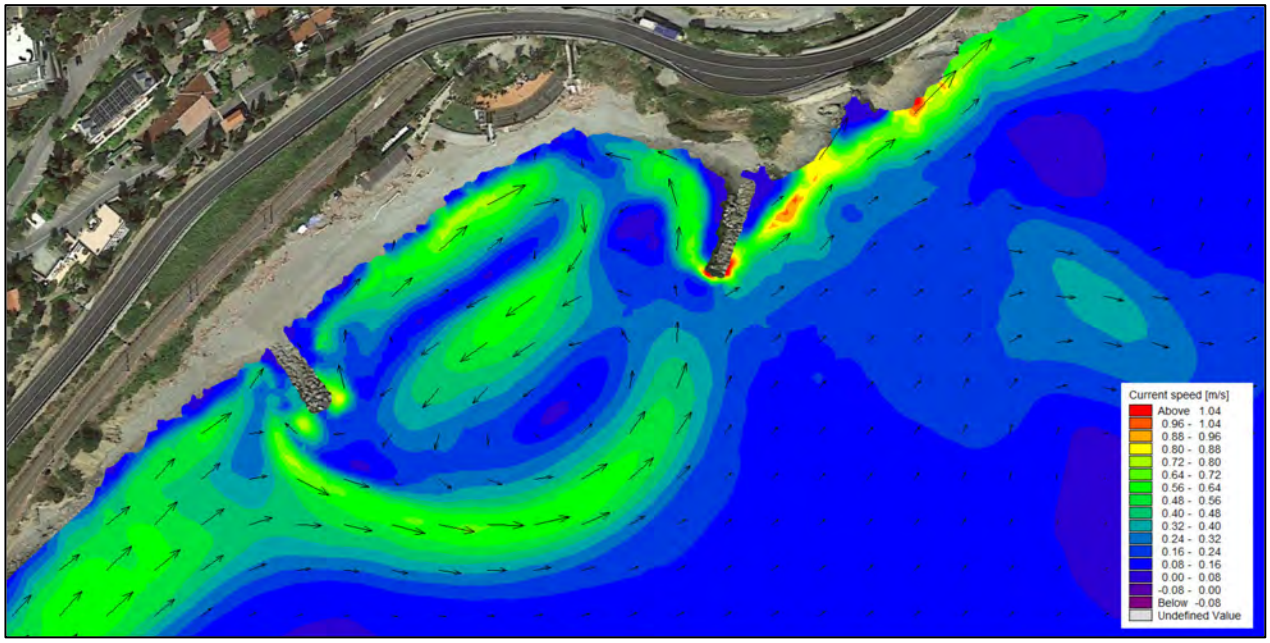


Figura 7.16: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 5 (Hs=1.1 m, MWD=175°N)

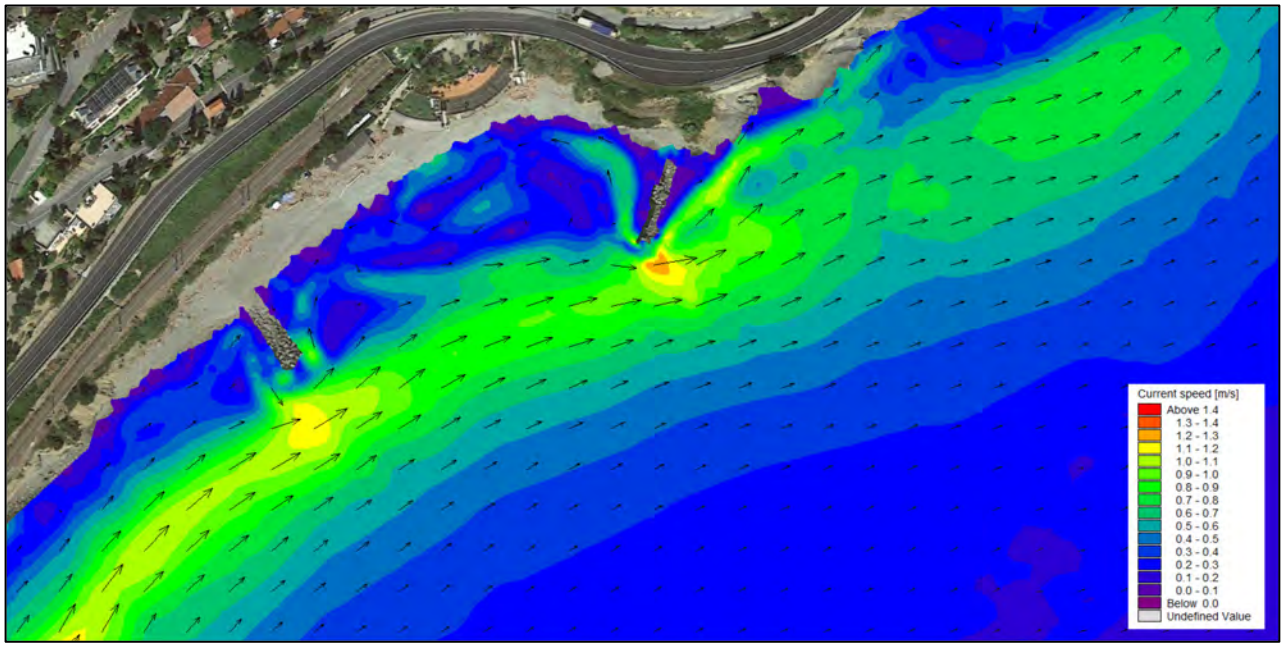


Figura 7.17: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 4 (Hs=2.25 m, MWD=145°N)

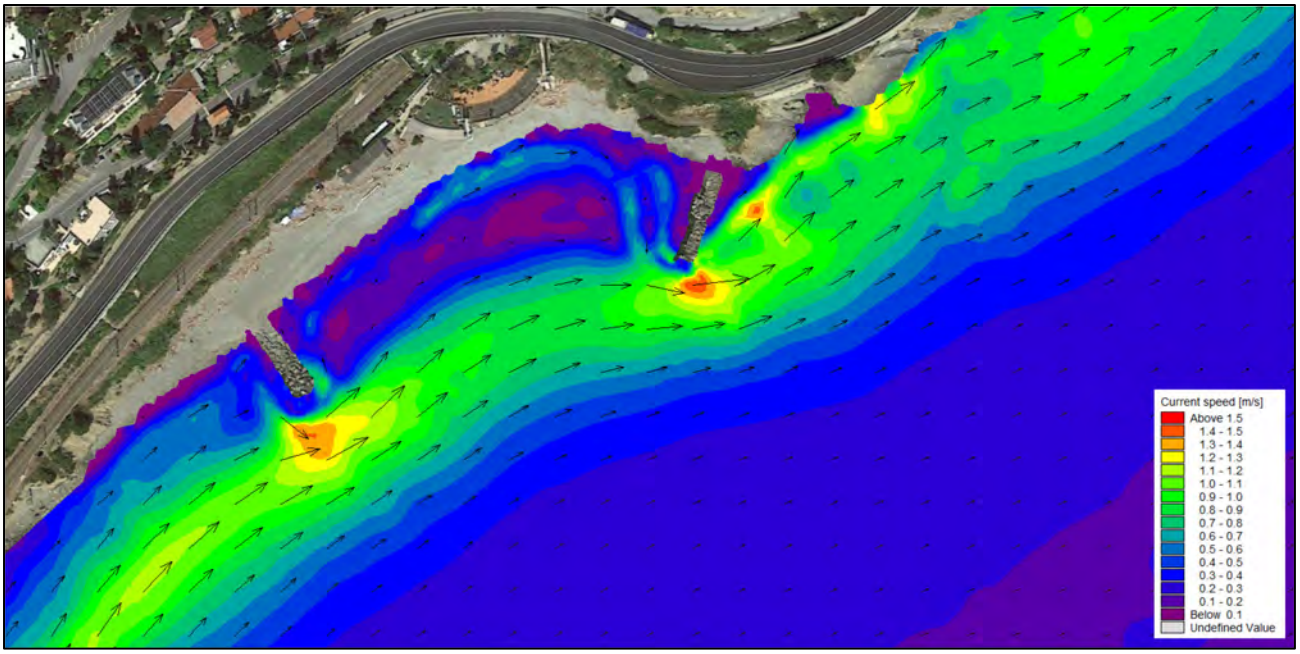


Figura 7.18: Distribuzione dell’intensità di corrente per la condizione 6 (Hs=1.75 m, MWD=175°N)

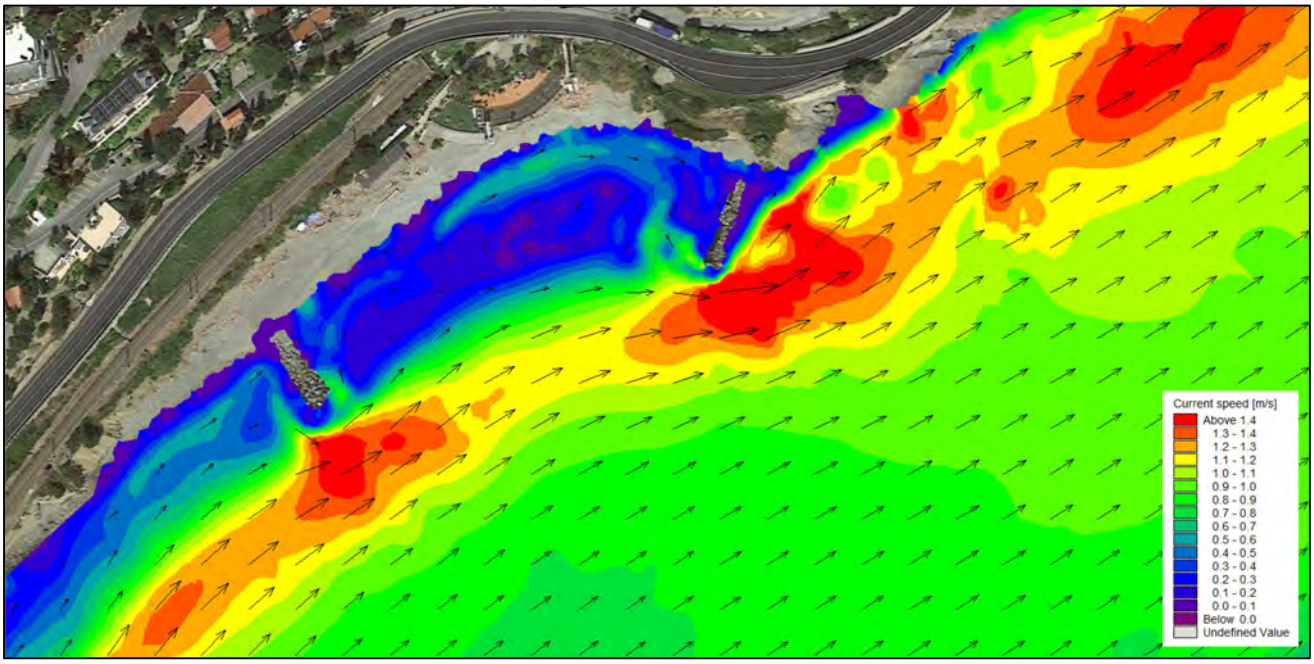


Figura 7.19: Distribuzione dell’intensità di corrente per la condizione 7 (Hs=3 m, MWD=175°N)

8 STUDIO DEGLI EVENTI ESTREMI - STATO ATTUALE

Ai fini progettuali si rende necessario conoscere quali sono le condizioni d'onda in prossimità delle opere di progetto, in modo da comprendere il comportamento e/o le carenze delle opere di difesa e dell'arenile esistenti. A tal fine partendo dall'intera serie temporale di dati MWM (42 anni) estratta nel punto P0 di coordinate *LON 8.2091°E LAT 44.0261°N* (Fig. 7.3) posto in prossimità della batimetrica -14 m (§7.1.2), sono stati selezionati gli eventi di mareggiata maggiormente significativi per il sito in oggetto, caratterizzati da elevate altezze d'onda e dalla durata di almeno 24 ore, riportati di seguito:

Evento	Durata		Direzione
	Inizio	Fine	
Mareggiata 1986	29/01/1986 ore 17:00	2/02/1986 ore 00:00	130°-165°
Mareggiata 1993	01/03/1993 ore 07:00	2/03/1993 ore 07:00	160°-175°
Mareggiata 2018	27/10/2018 ore 6:00	30/10/2018 ore 23:00	160°-180°

Per la modellazione e l'analisi dei dati si è utilizzato MIKE 21/3 Coupled Model FM capace di analizzare le dinamiche costiere che hanno luogo durante gli eventi di mareggiata intensi.
Il software consente il processamento dei dati per la simulazione contemporanea del modulo Idrodinamico (HD), Spectral Waves (SW) e Sand Transport (ST), in modo tale da simulare l'interazione reciproca tra onde, correnti e trasporto tenendo conto di elementi che variano durante l'elaborazione, come ad esempio la conformazione del fondale.

8.1 SCENARI DI SIMULAZIONE E FORZANTI

Il dominio di calcolo è invariato rispetto a quello utilizzato nel modulo HD (§7.1.1), sia per dimensioni che per grado di dettaglio.
All'interno della sezione relativa al modulo Idrodinamico, è stato impostato un numero di Manning costante nel tempo ma variabile nel dominio, in modo da caratterizzare al meglio la scabrezza del fondale.
Come mostrato di seguito(figura 8.1), il dominio è stato suddiviso in diverse aree in base alla tipologia del letto: in giallo il fondale sabbioso al quale è stato attribuito un numero di Manning pari a 40, in blu i pennelli dal valore pari a 10 e in azzurro la parte caratterizzata dalla presenza di grandi massi; infine, in corrispondenza della boundary offshore, è stato utilizzato un valore

pari a 10, in modo da creare meno problematiche al modello: mediante opportuni test, è stato verificato che l’impostazione di tale valore non compromette i risultati dell’elaborazione.



Figura 8.1: caratterizzazione del Numero di Manning variabile nel dominio e costante nel tempo.

Nel modulo Spectral Waves (SW) oltre alle diverse condizioni d’onda si è associato un livello del mare dovuto a storme-sourge pari a 0,5m corrispondente ad un tempo di ritorno di 1 anno.

Relativamente al modulo Sand Transport (ST), è stato impostato uno spessore del fondale erodibile (Bed Thickness) variabile nel dominio, in modo da rendere maggiormente veritiere le quantità di sedimento erose o accumulate; inizialmente è stato assegnato un valore massimo per tutto il dominio, a meno dei pennelli e delle zone caratterizzate dalla presenza di scogli, che risultano pressocché inerodibili; in seguito è stato associato un valore nullo (inerodibile) anche alla zona al largo situata oltre la profondità di chiusura , ovvero oltre la batimetrica di -6m, poiché il modello generava dei disturbi in tale area. Mediante opportuni test, è stato verificato che l’impostazione di tale valore non compromette i risultati dell’elaborazione, poiché non va ad influenzare le dinamiche che avvengono sottocosta.
Nella tabella seguente si riportano i valori attribuiti alle differenti aree:

Area	Bed Thickness
Fondale sabbioso	10
Fondale sabbioso oltre la batimetica -6m	0
Scogliera	0.03
Pennelli	0

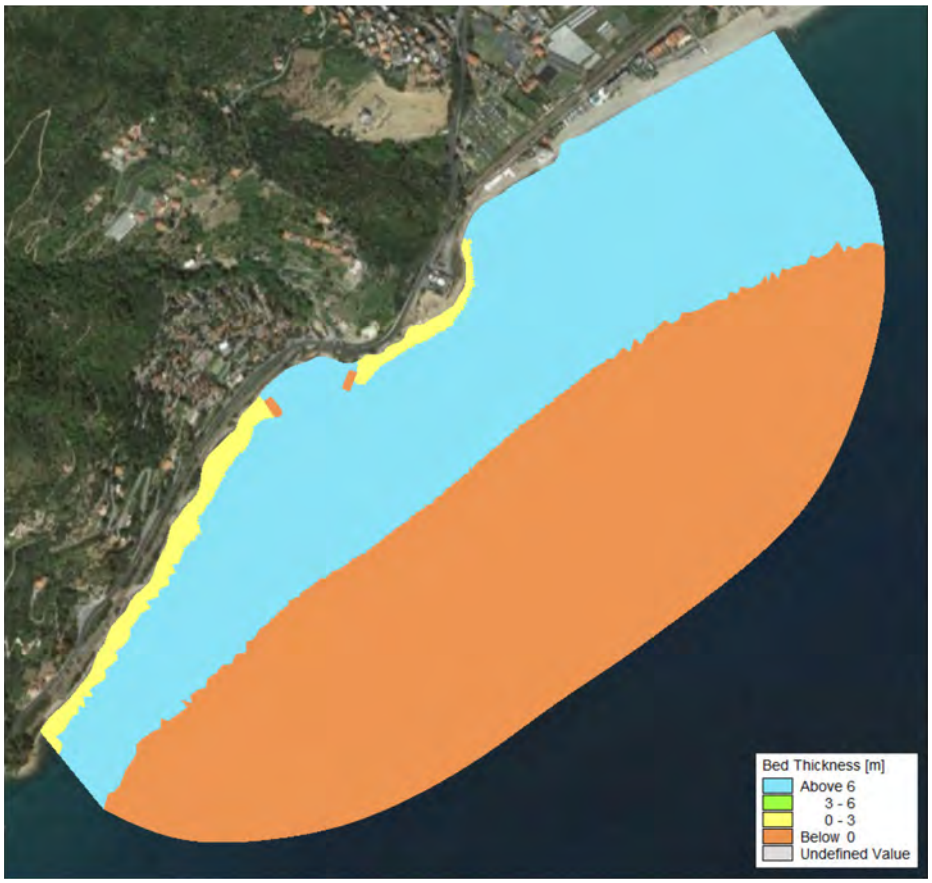


Figura 8.2: rappresentazione delle zone caratterizzate da differenti valori di "Bed Thickness"

8.2 RISULTATI DELL'ELABORAZIONE

Il Modello Morfologico permette di valutare le dinamiche costiere che si instaurano durante le mareggiate considerate come maggiormente significative; i moduli HD, SW ed ST lavorano in modo combinato, ma a fine elaborazione si ottengono tre differenti risultati analizzabili separatamente.

8.2.1 MAREGGIATA DEL 1986

L'evento considerato interessa l'arco temporale compreso tra le ore 17.00 del 29/01/1986 e le ore 00.00 del 02/02/1986, caratterizzato da onde provenienti dal settore direzionale 130°- 165° ed altezze d'onda che raggiungono i 3,8 m in corrispondenza del Punto 0 di estrazione dei dati.

RISULTATI DEL MODULO HD

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente, che mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, hanno mostrano in maniera efficace le correnti che si instaurano in prossimità dell'area oggetto di intervento.
Come mostrato nelle figure seguenti, durante l'evento possono distinguersi tre fasi, differenti per durata, intensità e direzione delle correnti; la prima (figura 8.3) è caratterizzata da un flusso che penetra all'interno della baia oggetto di intervento per poi dirigersi verso il largo, con velocità che si mantengono sull'ordine di circa 0,7 m/s, dopodiché il flusso acquisisce una maggiore intensità e, pur mantenendo una direzione prevalente verso il largo, bypassa la baia (figura 8.4); inoltre, in corrispondenza del pennello di levante, si creano delle correnti che si insinuano nella baia e la percorrono in direzione NE-SW.
La terza fase (figura 8.5) è quella prevalente sia per velocità che per durata: questa è caratterizzata da una corrente che costeggia il litorale in direzione SW-NE con picchi di velocità di circa 2m/s in corrispondenza della testa del pennello di levante; tale flusso non va ad insinuarsi nella baia, a meno della zona ad est.

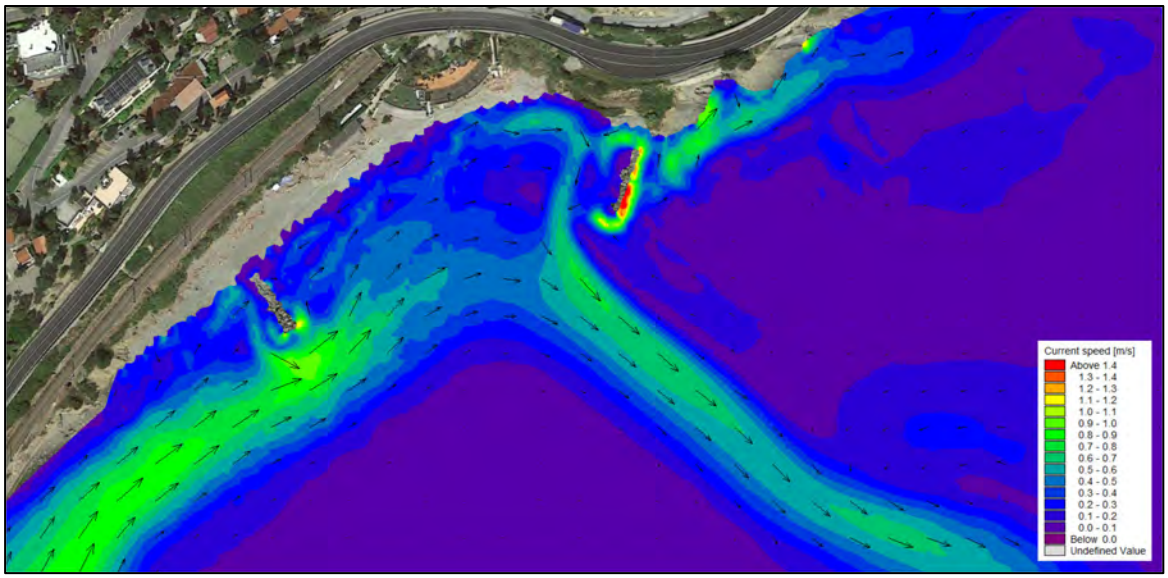


Figura 8.3: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 17.00 del 30/01/86

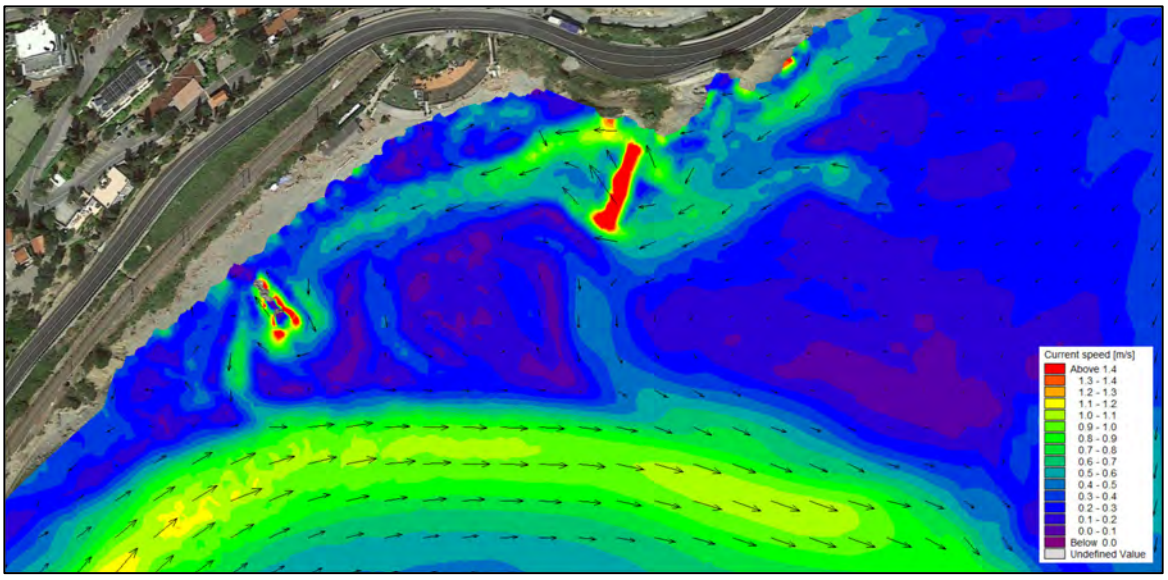


Figura 8.4: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 03.00 del 31/01/86

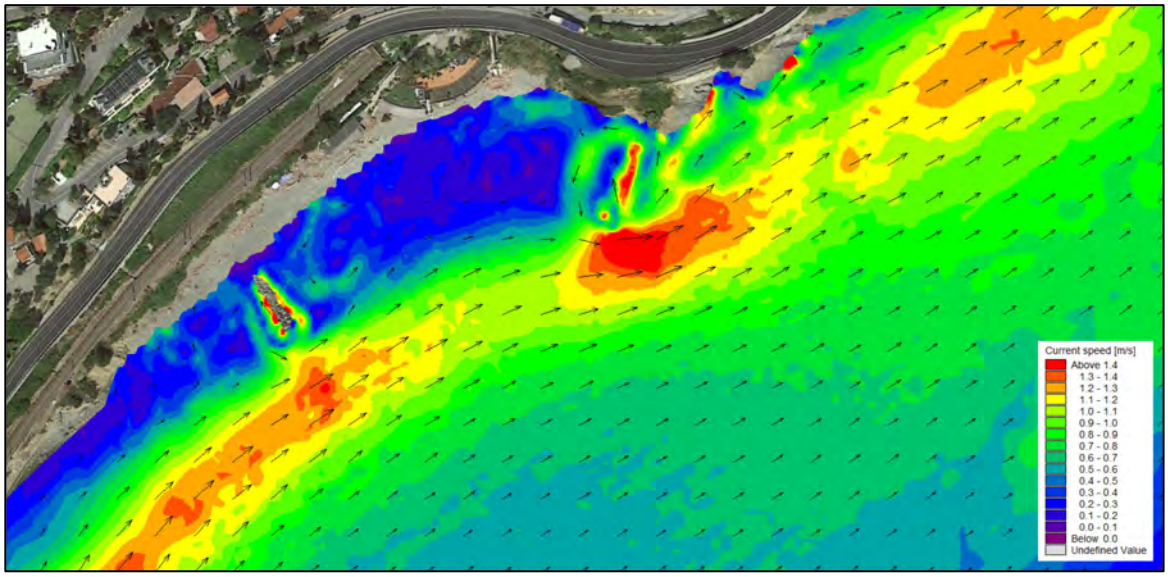


Figura 8.5: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 12.00 del 31/01/86

RISULTATI DEL MODULO ST

L'elaborazione del modello ST svolto in contemporanea con gli altri moduli, ha permesso di tenere conto delle variazioni del fondale e di conseguenza di ottenere risultati più veritieri relativamente alle dimensioni del trasporto di sedimenti.

Mediante l'uso di un'opportuna scala cromatica, i risultati permettono di comprendere in maniera efficace le dinamiche di erosione/apporto che avvengono durante la mareggiata.

Analizzando la variazione del fondale a fine mareggiata (figure 8.6 e 8.7), è possibile notare che l'evento ha provocato un'erosione della spiaggia per una fascia dalla larghezza di circa 10 m che va dalla quota +0.8 a -0.2 che, nella zona a ponente del pennello Est, si estende sino a

raggiungerne la testa; a partire dalla quota di –0,2 m si riscontra una zona di accumulo di sedimento che si estende per circa 20m verso il largo e che, nell’area a ponente, raggiunge la testa del pennello Ovest.

Superata la profondità chiusura, si riscontrano punti di accumulo e punti di erosione, senza la netta prevalenza di uno sull’altro; questo è dovuto al fenomeno della rifrazione dell’onda cioè all’interazione tra onda e fondale, che genera movimento delle particelle senza l’effettivo trasporto longitudinale di sedimento.

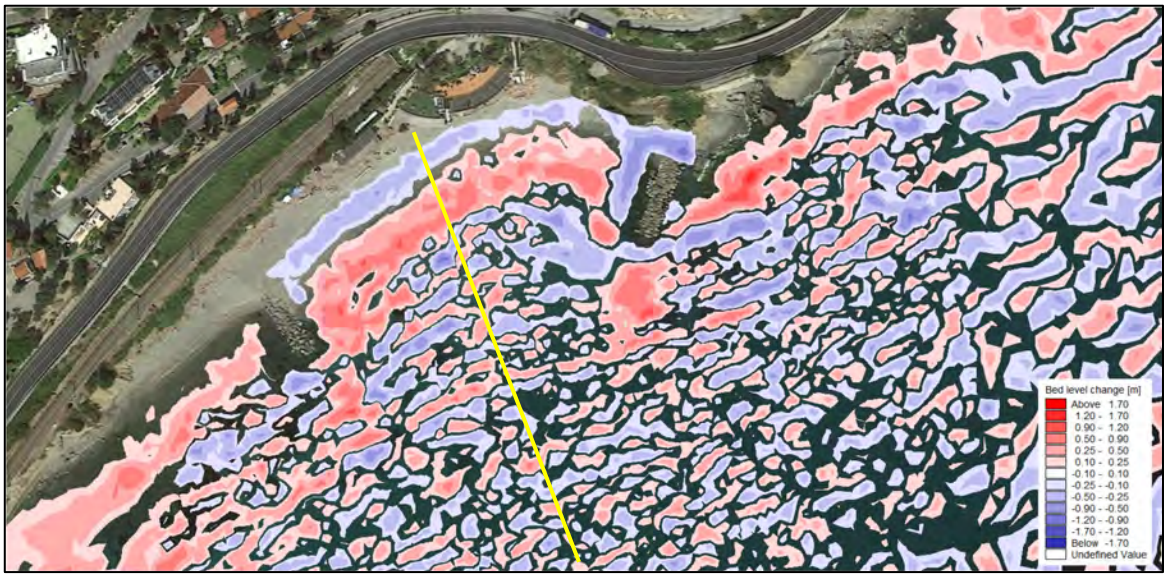


Figura 8.6: Rappresentazione dello stato di erosione/apporto di sedimenti a fine mareggiata; in giallo il profilo utilizzato per determinare la variazione del fondale nella figura seguente.

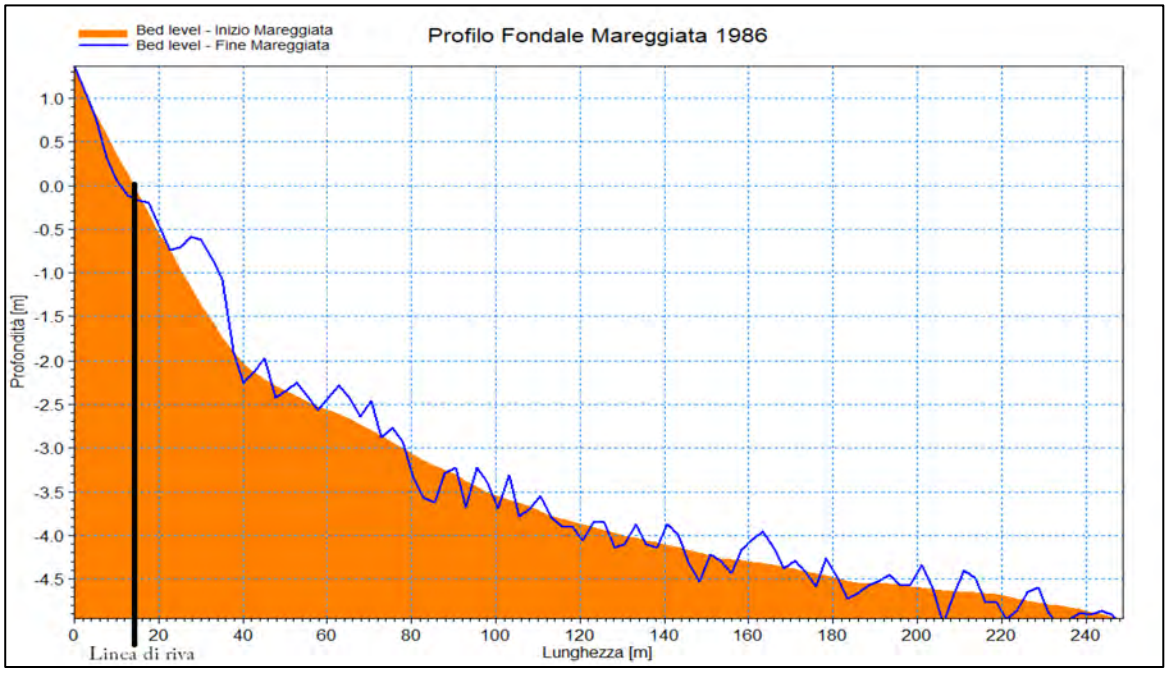


Figura 8.7: Grafico di confronto tra la morfologia del fondale prima e dopo la mareggiata

RISULTATI DEL MODULO SW

La figura seguente è rappresentativa del campo d'onda relativo allo stato di mare più significativo della mareggiata e, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, mostra in modo evidente come l'attuale conformazione dell'arenile non consenta una efficace riduzione dell'energia delle onde provenienti dalla direzione di 150°; queste raggiungono un'altezza di 2,20m in corrispondenza della testa del pennello di levante e si insinuano in maniera pressocché perpendicolare tra i pennelli.

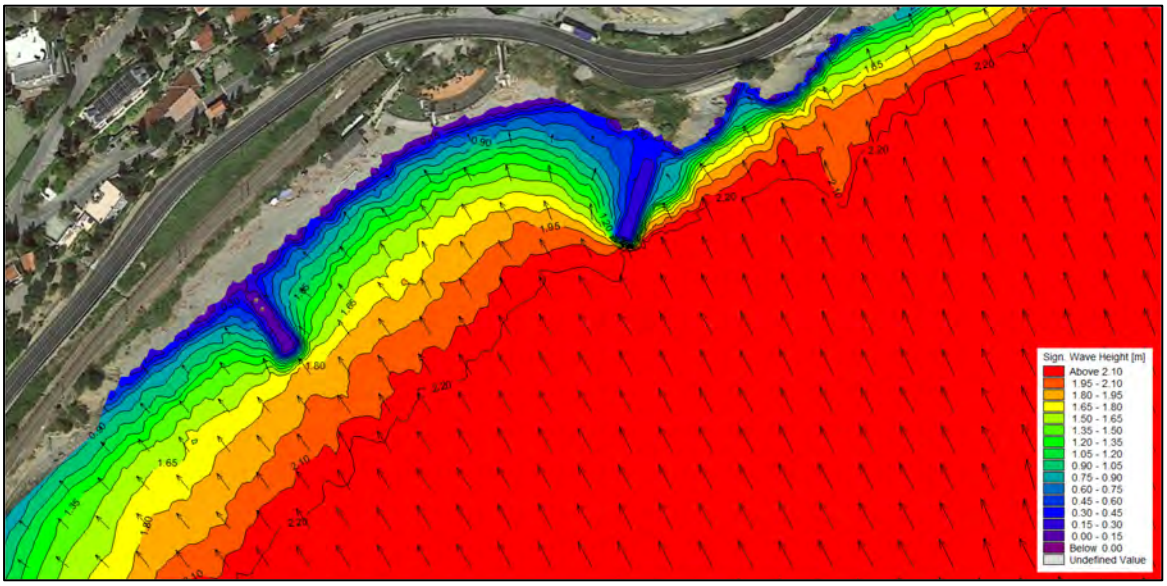


Figura 8.8: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa alle ore 12.00 del 31/01/86

8.2.2 MAREGGIATA DEL 1993

L'evento considerato interessa l'arco temporale compreso tra le ore 19.00 del 28/02/1993 e le ore 23.00 del 02/03/1993, caratterizzato da onde provenienti dal settore direzionale 110°- 160° ed altezze d'onda che raggiungono i 2,4 m in corrispondenza del Punto 0 di estrazione dei dati.

RISULTATI RELATIVI AL MODULO HD

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente, che mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, hanno mostrano in maniera efficace le correnti che si instaurano in prossimità dell'area oggetto di intervento.

Come mostrato nelle figure seguenti, durante l'evento possono distinguersi due fasi, differenti per durata, intensità e direzione delle correnti; la prima (figura 8.9), di minor durata, è caratterizzata da un flusso con direzione NE-SW che raggiunge una maggior intensità in

corrispondenza della testa del pennello di levante (1,5 m/s); la corrente riesce a penetrare in parte nella baia poiché riesce a raggirare il pennello di levante.
La seconda fase (figura 8.10), più consistente sia per intensità che per durata, presenta correnti di direzione opposta alle precedenti (SW-NE) che rimangono esterne alla baia, a meno dell’area attorno al pennello Est; i picchi di velocità sono di circa 1,5 m/s.

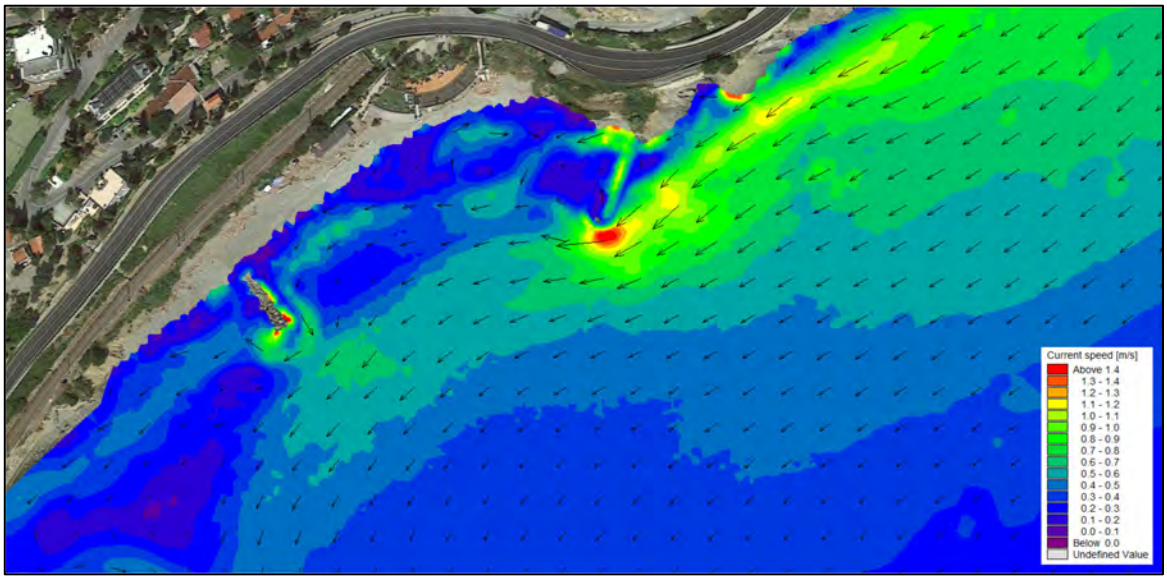


Figura 8.9: Distribuzione dell’intensità di corrente alle ore 19.00 del 01/03/1993

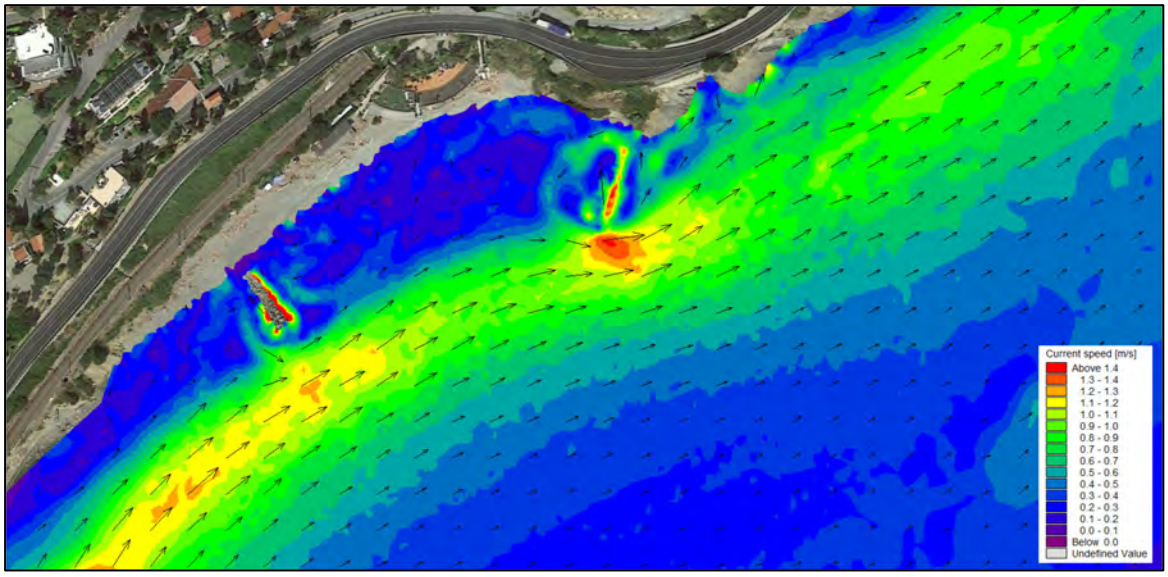


Figura 8.10: Distribuzione dell’intensità di corrente alle ore 11.00 del 02/03/1993

8.2.2.1 RISULTATI DEL MODULO ST

L'elaborazione del modello ST svolta in contemporanea con gli altri moduli, ha permesso di tenere conto delle variazioni del fondale e di conseguenza di ottenere risultati più veritieri relativamente alle dimensioni del trasporto di sedimenti.

Mediante l'uso di un'opportuna scala cromatica, i risultati permettono di comprendere in maniera efficace le dinamiche di erosione/apporto che avvengono durante la mareggiata.

Analizzando la variazione del fondale a fine mareggiata (figure 8.11-8.12), è possibile notare che l'evento ha provocato un'erosione della spiaggia per una fascia dalla larghezza di circa 8 m che va dalla quota +0.7 a -0.1m; a partire dalla quota di –0,1m si riscontra una zona di accumulo di sedimento che si estende per circa 20m verso il largo e che, nell'area a ponente, raggiunge la testa del pennello Ovest.

Superata la profondità chiusura, si riscontrano punti di accumulo e punti di erosione, senza la netta prevalenza di uno sull'altro; questo è dovuto al fenomeno della rifrazione dell'onda cioè all'interazione tra onda e fondale, che genera movimento delle particelle senza l'effettivo trasporto longitudinale di sedimento.

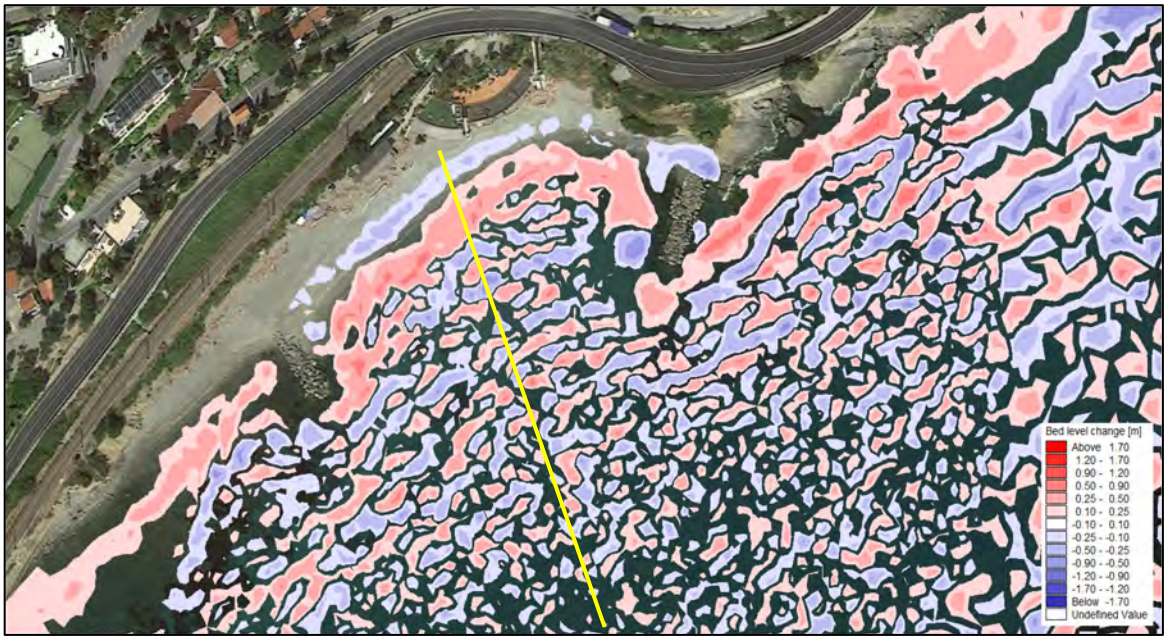


Figura 8.11: Rappresentazione dello stato di erosione/apporto di sedimenti a fine mareggiata; in giallo il profilo utilizzato per determinare la variazione del fondale nella figura seguente.

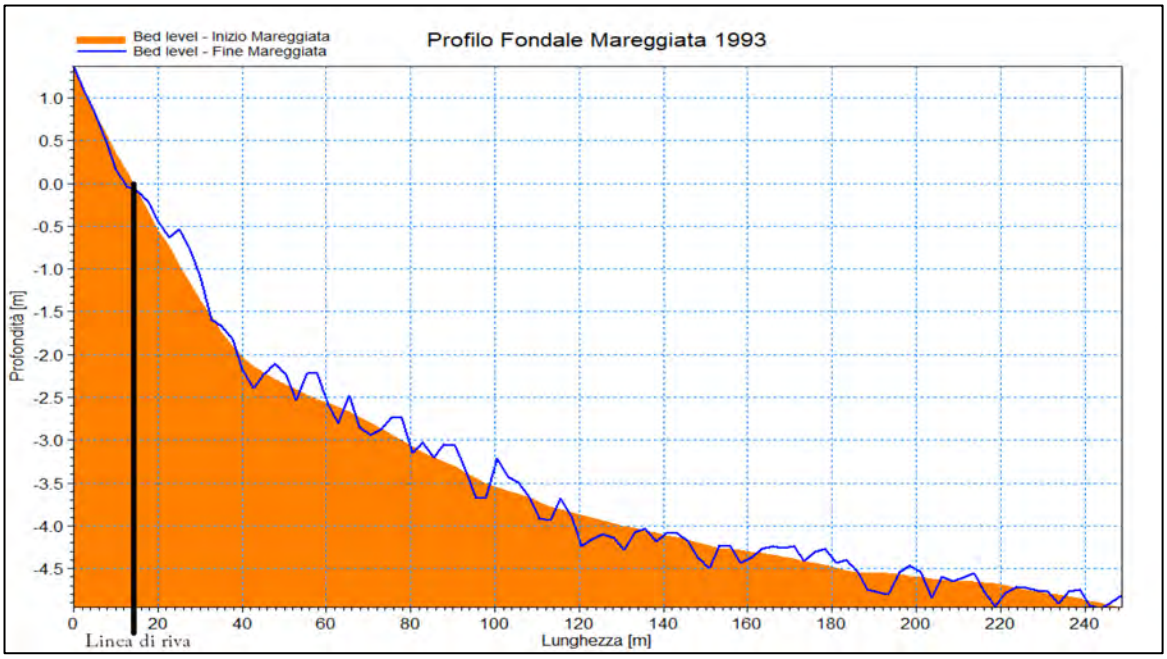


Figura 8.12: Grafico di confronto tra la morfologia del fondale prima e dopo la mareggiata

RISULTATI MODULO SW

La figura seguente (figura 8.13) è rappresentativa del campo d'onda relativo allo stato di mare più significativo della mareggiata e, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, mostra in modo evidente come l'attuale conformazione dell'arenile non consenta una efficace riduzione dell'energia delle onde provenienti dalla direzione di circa 145°; queste raggiungono un'altezza di 1,8m in corrispondenza della testa del pennello di levante.

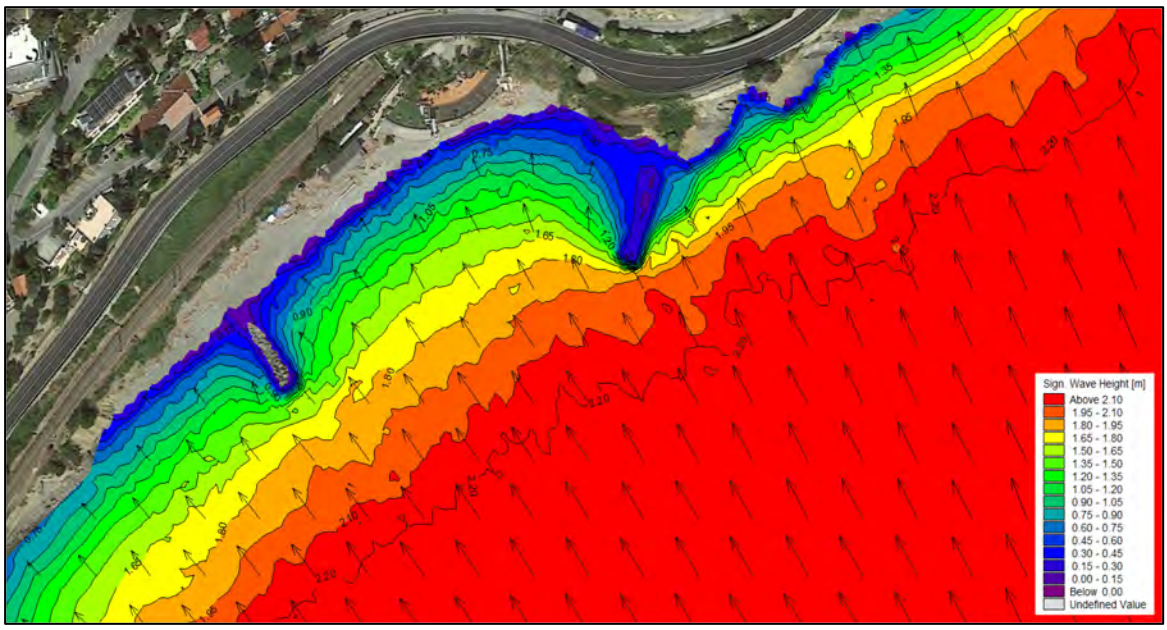


Figura 8.13: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 11.00 del 02/03/93

8.2.3 MAREGGIATA DEL 2018

L'evento considerato interessa l'arco temporale compreso tra le ore 6.00 del 27/10/2018 e le ore 23.00 del 30/10/2018, caratterizzato da onde provenienti dal settore direzionale 140°- 180° ed altezze d'onda che raggiungono i 3,35 m in corrispondenza del Punto 0 di estrazione dei dati.

RISULTATI RELATIVI AL MODULO HD

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente, che mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, hanno mostrano in maniera efficace le correnti che si instaurano in prossimità dell'area oggetto di intervento.

Come mostrato nelle figure seguenti, durante l'evento possono distinguersi due fasi, differenti per durata, intensità e direzione delle correnti; la prima (figura 8.14) è caratterizzata da un flusso con velocità relativamente basse (circa 0,7 m/s) ma che penetra all'interno della baia oggetto di intervento per poi dirigersi verso il largo.

La seconda fase della mareggiata (figura 8.15), presenta correnti con intensità maggiore (picchi di velocità di 1,6 m/s) ma che si mantengono esterni alla baia, a meno dell'intorno del pennello di levante.

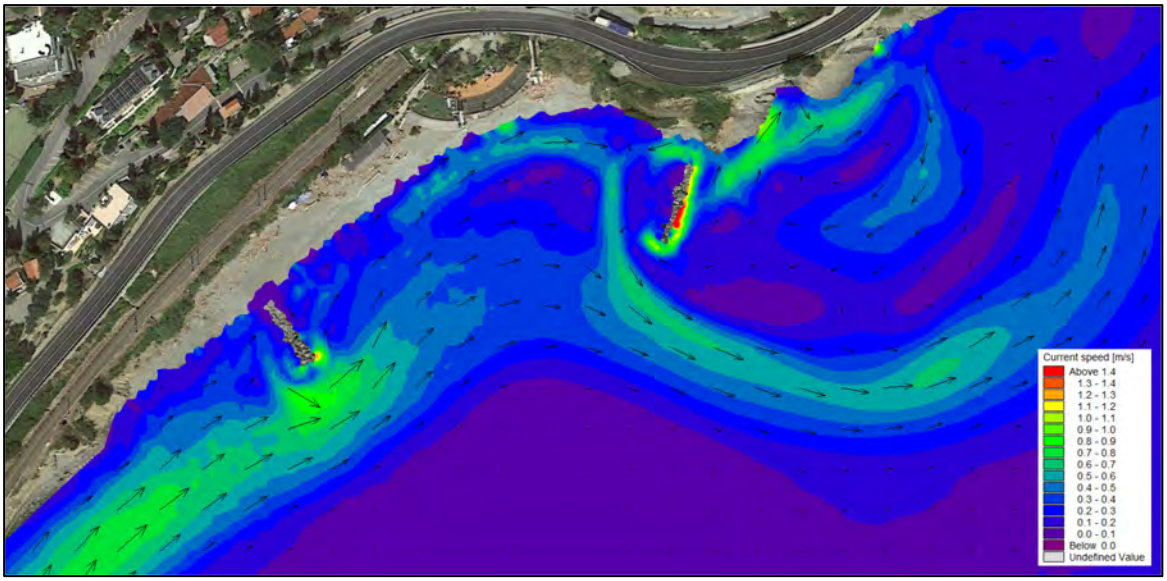


Figura 8.14: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 02.00 del 28/10/2018

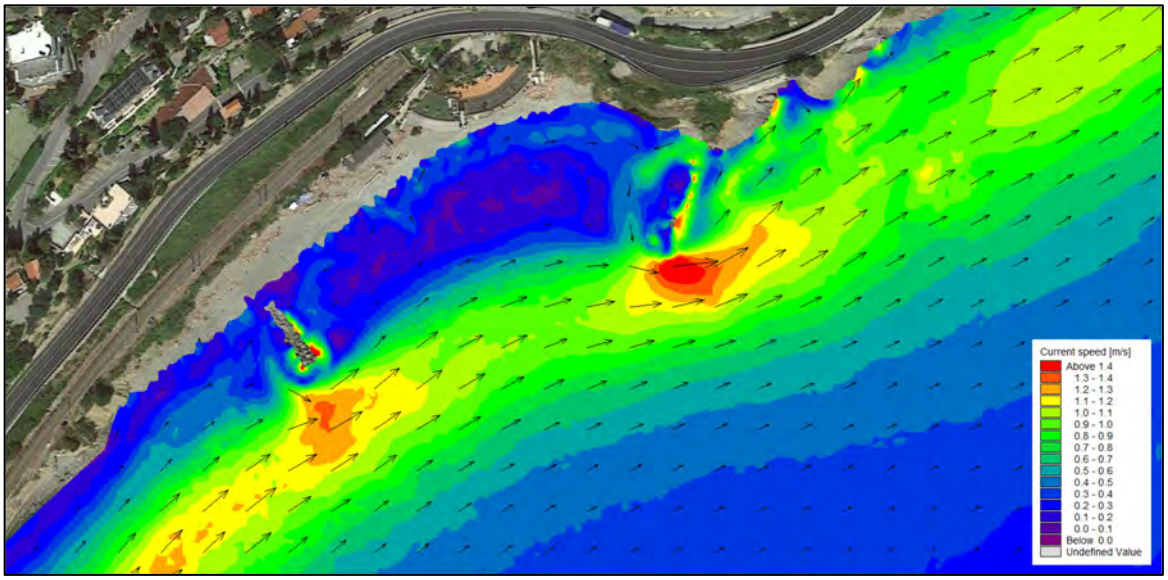


Figura 8.15: Distribuzione dell’intensità di corrente alle ore 06.00 del 28/10/2018

RISULTATI DEL MODULO ST

L’elaborazione del modello ST svolta in contemporanea con gli altri moduli, ha permesso di tenere conto delle variazioni del fondale e di conseguenza di ottenere risultati più veritieri relativamente alle dimensioni del trasporto di sedimenti.

Mediante l’uso di un’opportuna scala cromatica, i risultati permettono di comprendere in maniera efficace le dinamiche di erosione/apporto che avvengono durante la mareggiata.

Analizzando la variazione del fondale a fine mareggiata (figure 8.16-8.17), è possibile notare che l’evento ha provocato un’erosione della spiaggia per una fascia dalla larghezza di circa 10 m che va dalla quota +0.8 a -0.2 che, nella zona a ponente del pennello Est, si estende per tutta la lunghezza del pennello sino a raggiungere la testa e la parte esterna alla baia; a partire dalla quota di –0,2m si riscontra una zona di accumulo di sedimento che si estende per circa 24m verso il largo.

Superata la profondità chiusura, si riscontrano punti di accumulo e punti di erosione, senza la netta prevalenza di uno sull’altro; questo come detto in precedenza è dovuto al fenomeno della rifrazione dell’onda cioè all’interazione tra onda e fondale, che genera movimento delle particelle senza l’effettivo trasporto longitudinale di sedimento.

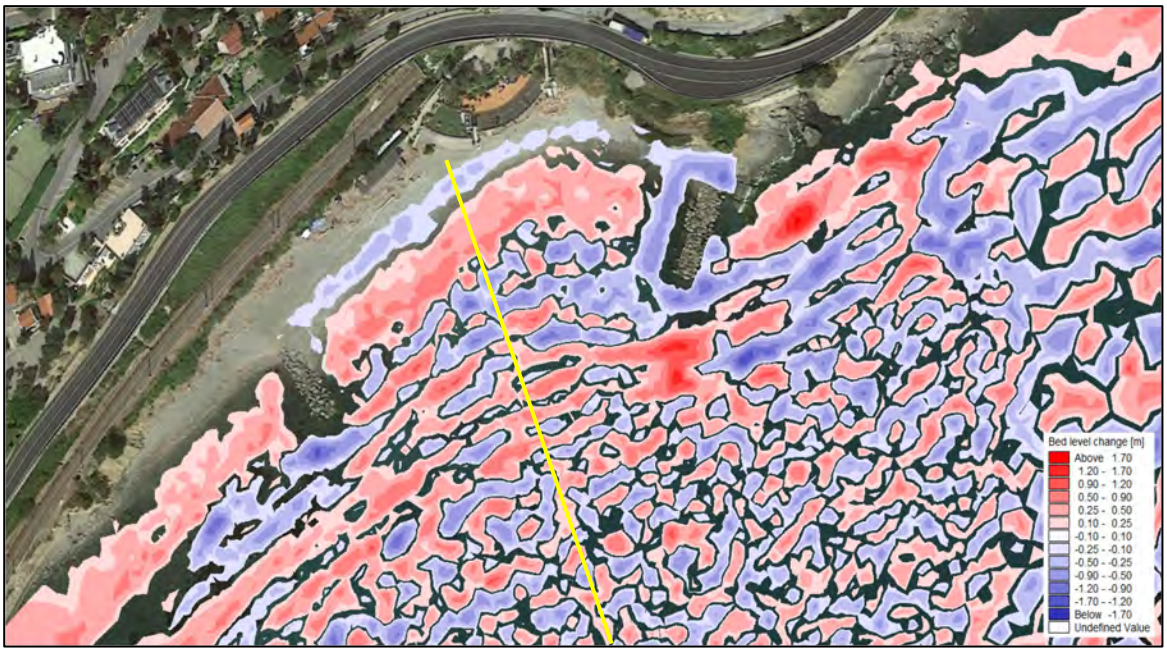


Figura 8.16: Rappresentazione dello stato di erosione/apporto di sedimenti a fine mareggiata; in giallo il profilo utilizzato per determinare la variazione del fondale nella figura seguente.

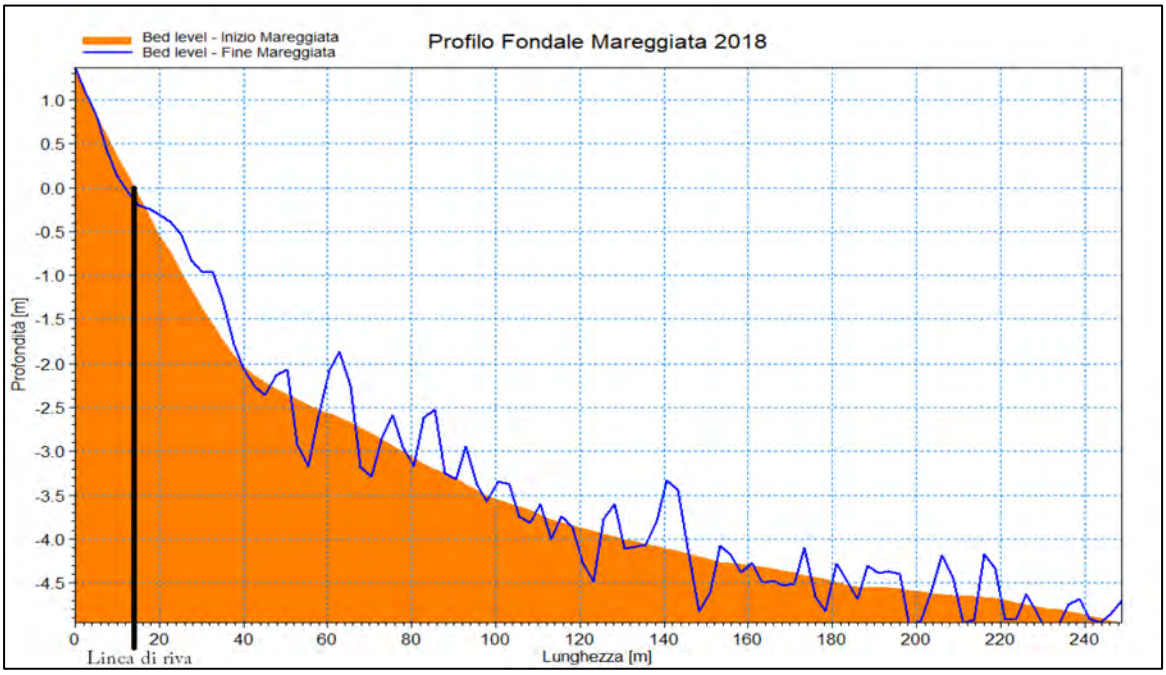


Figura 8.17: Grafico di confronto tra la morfologia del fondale prima e dopo la mareggiata

RISULTATI MODULO SW

La figura seguente (figura 8.18) è rappresentativa del campo d'onda relativo allo stato di mare più significativo della mareggiata e, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, mostra in modo evidente come l'attuale conformazione dell'arenile non consenta una efficace riduzione dell'energia delle onde provenienti dalla direzione di circa 140°; queste raggiungono un'altezza di 1,85m in corrispondenza della testa del pennello di levante.

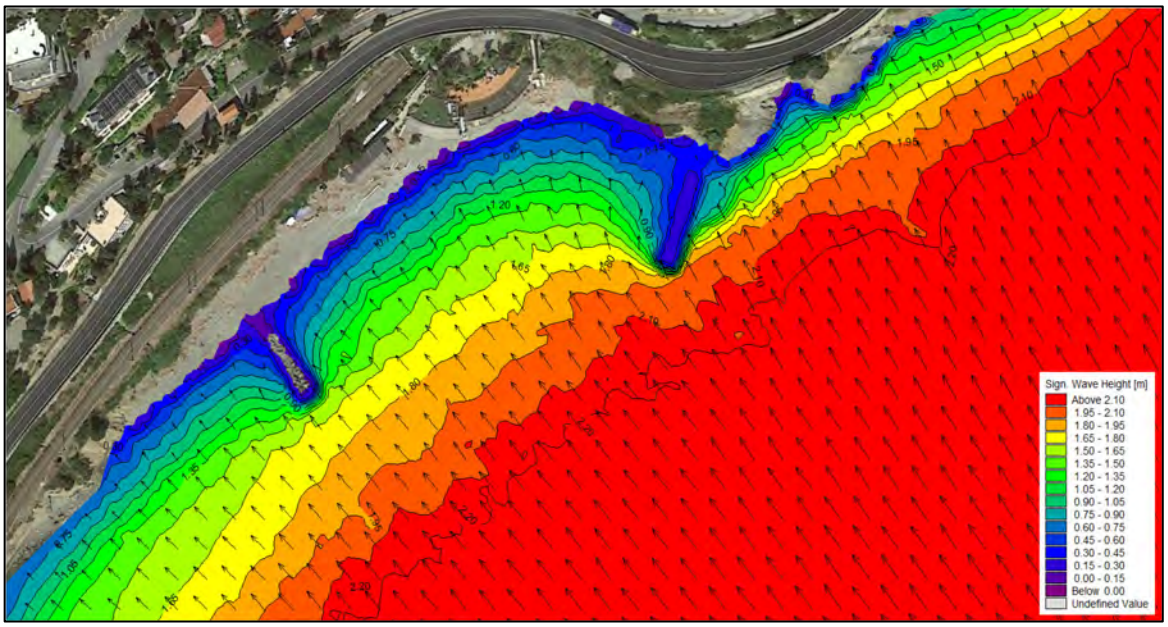


Figura 9.7: Rappresentazione delle altezze d'onda significative alle ore 09.00 del 29/10/2018