PAOLO
GAGGERO
17.02.2026
12:23:37
GMT+01:00

| |
|---|
| |
| |
| |
| |
| Rev.01 |



STUDIOGAGGERO
SAVONA – VIA PIA 130 R – FAX 019/8386702 – TEL 019/829463
CELL. 335/303133 – E-MAIL ing.gaggero@libero.it

El. L

# COMUNE DI IMPERIA

## OPERE DI MESSA IN SICUREZZA E DIFESA DEL LITORALE DI BORGO PERI

## RELAZIONE MODELLISTICA COSTIERA

| | | |
|---|---|---|
| NP 2394 | | Dott. ing. Paolo GAGGERO<br>C.F. GGGPLA49H27I480F |
| Gennaio 2026 | NP 2394 Imperia Borgo Peri | |



NP 2394

# COMUNE DI IMPERIA

---

# OPERE DI MESSA IN SICUREZZA E DIFESA DEL LITORALE DI BORGO PERI

**Rev.01**

## El. L
## RELAZIONE MODELLISTICA COSTIERA

Gennaio 2026

Dott. ing. Paolo GAGGERO

Geoscape Società Cooperativa
Sede legale Via Varese 2 – CAP 16122 (Ge)
Pec: geoscape@pec.geoscape.it
Mail: info@geoscape.it

P.IVA: 02594600997

# Servizio specialistico di valutazione per nuove ipotesi di progetto mediante modellistica costiera lungo il litorale della spiaggia di Imperia (IM) – Borgo Peri




*Redatto: Dott. Luigi Mucerino & Dott.ssa Giorgia Poddi*

Sommario

1. Premessa ..... 3
2. Generalità sulla modellistica costiera applicata ..... 3
3. Moto ondoso ..... 3
3.1. Dati meteo-marini di riferimento ..... 4
4. Area di intervento ..... 4
5. Risultati modello 2DH ..... 5
5.1. Stato attuale ..... 5
5.1.1 Libeccio cinquantennale ..... 6
5.1.2 Libeccio cinquantennale - Correnti ..... 8
5.2.1 Scirocco cinquantennale ..... 10
5.2.2 Scirocco cinquantennale – Correnti ..... 11
5.3.1 Mezzogiorno cinquantennale ..... 13
5.3.2 Mezzogiorno cinquantennale -Correnti ..... 14
6.1. Stato di progetto ..... 15
6.1.1 Libeccio Cinquantennale ..... 16
6.1.2 Libeccio Cinquantennale - Correnti ..... 17
6.2.1 Scirocco Cinquantennale ..... 19
6.2.2 Scirocco Cinquantennale - Correnti ..... 20
6.3.1 Mezzogiorno Cinquantennale ..... 22
6.3.2 Mezzogiorno Cinquantennale - Correnti ..... 23
7.Conclusioni ..... 24
8. Bibliografia citata ..... 26

## 1. Premessa

La committenza ha dato incarico alla società cooperativa Geoscape di fornire il servizio specialistico al progetto di Intervento di difesa del tratto antistante alla spiaggia di Imperia, con l'obiettivo di proteggere dall'azione dei marosi il tratto di costa bassa presa in esame.
Il presente documento presenta i risultati dello studio modellistico implementato sul tratto di litorale investigato.
Lo scopo dell'indagine è quello di definire i principali aspetti idrodinamici dell'area, con particolare riferimento ai risultati riferiti ai nuovi scenari di assetto costiero proposto.

## 2. Generalità sulla modellistica costiera applicata

La modellistica costiera rappresenta uno strumento innovativo nel campo del coastal management, e di notevole supporto per gli interventi di ingegneria costiera. In questo studio è stato utilizzato il modello XBeach (eXtreme Beach), un modello numerico 1D/2DH open-source per la simulazione dell'idro-morfodinamica costiera, distribuito da Deltares (www.deltares.nl), ed ampiamente apprezzato dalla comunità tecno-scientifica internazionale (Roelvink et al., 2009; Bolle et al., 2011). Inoltre, la scelta è stata corroborata anche dal fatto che sono note diverse applicazioni lungo tratti di costa ligure, alcune delle quali anche riportate in letteratura scientifica internazionale (Mucerino et al. 2019; Carpi et al. 2020; Mucerino et al. 2021; Carpi et al. 2021). Dal punto di vista tecnico, il modello risolve coppie di equazioni sul piano orizzontale, relative a propagazione delle onde, correnti, trasporto sedimentario, variazioni del fondale, variazioni spettrali delle onde e correnti al contorno (Roelvink et al., 2015). Per quanto riguarda la simulazione dei processi idrodinamici, XBeach possiede tre differenti opzioni: i) Stationary wave model: utile, ad esempio, per simulare i processi morfodinamici in condizioni di relativa bassa energia; ii) Surfbeat mode: indicato quando l'attenzione è portata sui fenomeni idro-morfodinamici nearshore (es. correnti costiere, zona di swash); iii) Non-hydrostatic mode (1D)(McCall et al., 2014): particolarmente indicato nel caso di spiagge caratterizzate da un'accentuata acclività, come ad esempio le spiagge ghiaiose.
Questa breve descrizione del modello è da intendersi solo come una rapida introduzione allo strumento impiegato, per ulteriori informazioni tecniche e/o approfondimenti, si rimanda alla consultazione del manuale tecnico stilato da Roelvink et al. (2019).
Per quanto concerne l'implementazione di XBeach 2DH lungo la porzione di litorale investigato, è stata creata una griglia di calcolo strutturata con maglia a risoluzione di 2.5 x 5 m lungo la surf zone (area di maggiore interesse), e 5x5 metri al largo. L'ampiezza del dominio di computazionale permette di simulare lo sviluppo del moto ondoso tenendo debitamente in considerazione le dinamiche al contorno, consentendo quindi di simulare il più fedelmente possibile la propagazione del moto ondoso e, in conseguenza, le sue caratteristiche energetiche.

## 3. Moto ondoso

In questo paragrafo vengono illustrati i dati del clima meteomarino estratti dai valori pubblicati nel documento di "MAPPATURA DELLA PERICOLOSITA' DA INONDAZIONEMARINA NELLE AREE COSTIERE DELLA REGIONE LIGURIA", Prodotto da Regione Liguria nel 2014. Tali dati sono da considerarsi idonei ai fini dello studio qui descritto in quanto riferiti ad un'area geograficamente limitrofa e con la medesima esposizione. In questo caso specifico, per i mari di Scirocco e di Mezzogiorno è stato preso in considerazione un sovralzo di 1.6 metri per testare la funzionalità delle modifiche idromorfodinamiche in condizioni estreme come l'evento del 2018, mentre per i mari di Libeccio non è stata apportata nessuna modifica in quanto l'altezza d'onda è stata reputata sufficientemente alta per valutare gli impatti lungo la costa.

### 3.1. Dati meteo-marini di riferimento

Per questo studio sono stati impiegati i seguenti parametri del moto ondoso:

| Altezza d'onda spettrale $H_o$ [m] | Periodo di picco $T_p$ [s] | Direzione [°N] | Periodo di ritorno $T_R$ [anni] |
|---|---|---|---|
| 2.9 +1.6 di sovralzo | 7.5 | 135° Scirocco | Cinquantennale mod |
| 6.7 | 11 | 220° Libeccio | Cinquantennale |
| 3.1+1.6 di sovralzo | 7.5 | 180° Mezzogiorno | Cinquantennale mod |

Tabella 1- Parametri moto ondoso

I dati disponibili sono stati elaborati da regione Liguria applicando il modello matematico STWAVE (Steady-state spectral wave model).
Si tratta di un modello stazionario spettrale alle differenze finite per l'analisi della propagazione verso riva delle onde generate da vento.
Il modello descrive il cambiamento delle caratteristiche delle onde (altezza, periodo, direzione e forma spettrale) nella propagazione da largo verso riva, tenendo conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, di frangimento, diffrazione, interazione tra onde e whitecapping.

## 4. Area di intervento

L'area oggetto di investigazione modellistica è localizzata lungo il litorale del Comune di Imperia, in corrispondenza della spiaggia di Borgo Peri e delle aree limitrofe ad essa. Il dominio di calcolo è stato definito in modo da comprendere l'intero settore costiero compreso tra i promontori rocciosi che delimitano il tratto di litorale e la relativa estensione verso mare, fino a una profondità batimetrica di circa 60 metri. La scelta di utilizzare una griglia a maggiore estensione deriva dalla necessità di includere nel dominio di calcolo anche la morfologia immediatamente adiacente alla spiaggia e le strutture portuali (moli) presenti nel porto contiguo, al fine di rappresentare con maggiore accuratezza le interazioni idrodinamiche e ottenere risultati modellistici più robusti e affidabili. L'orientamento generale della linea di riva è compreso tra sud-ovest e nord-est, con esposizione prevalente ai moti ondosi provenienti dai quadranti meridionali, che rappresentano il principale fattore di sollecitazione idrodinamica dell'area.
La base dati topografica e batimetrica utilizzata per la modellistica deriva da acquisizioni Geoscape effettuate tra ottobre e novembre 2025, comprendenti rilievi topografici a terra tramite tecnologia GNSS e rilievi batimetrici offshore mediante sistema single-beam, successivamente integrati in un unico modello di superficie.; questi dati sono stati implementati per i tratti rocciosi al di sopra del livello del mare con i dati lidar del 2008, mentre il dato batimetrico tra i 15 ed i 60 metri è stato reperito sul geoportale di regione Liguria.
Il prelievo dei campioni, le analisi granulometriche ed i rilievi topobatimetrici sono stati effettuati da Geoscape; nel modello il parametro D50 utilizzato per la simulazioni è pari a 0.004 m.

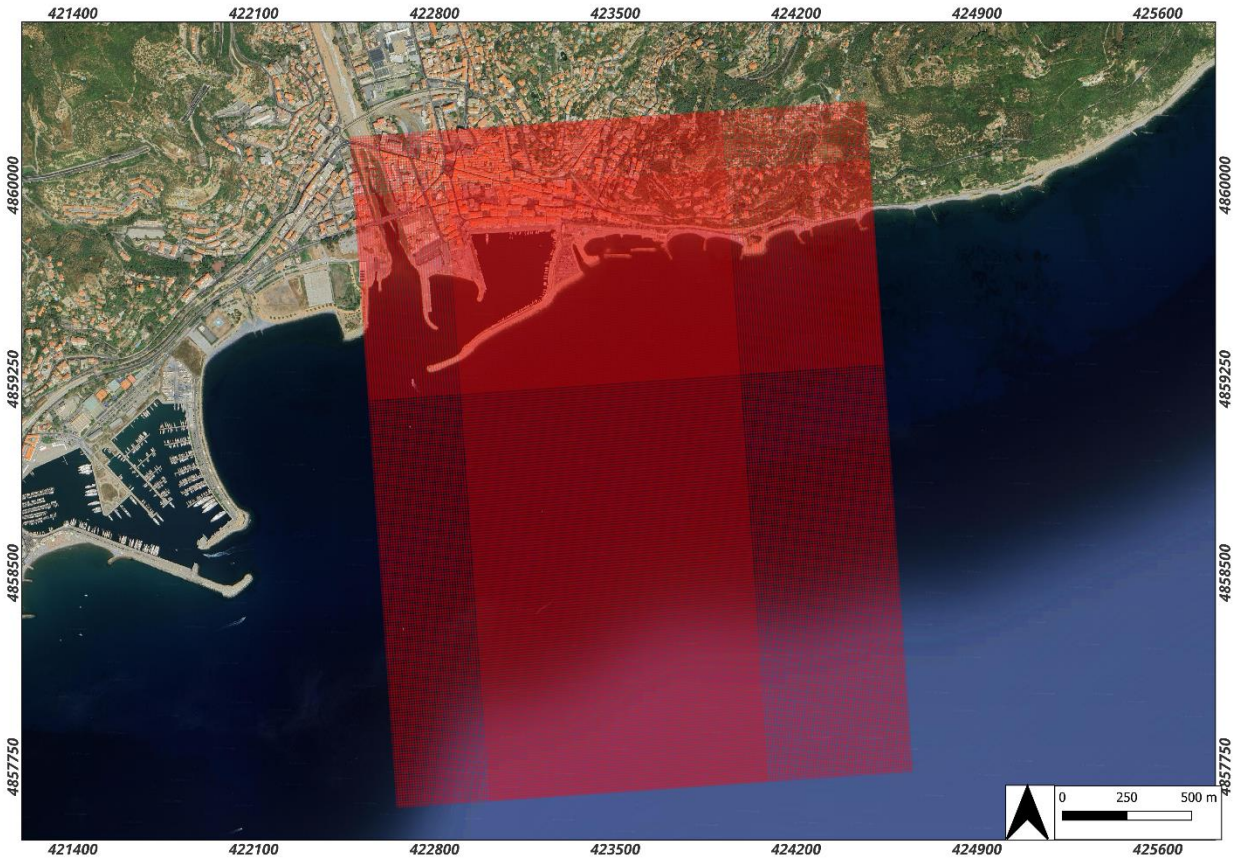



Figura 1- Dominio di calcolo

## 5. Risultati modello 2DH

In questo paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti, in termini di energia del moto ondoso ed evoluzione idrodinamica, dalle simulazioni modellistiche per un moto ondoso incidente con tempo di ritorno cinquantennale, per le direttrici di Libeccio (SW), Scirocco (SE) e Mezzogiorno (S). Dal punto di vista delle tempistiche di simulazione, al fine di garantire un approccio maggiormente conservativo, si è simulato un evento con onda cinquantennale della durata di circa 36000 secondi (6 ore), al fine di simulare il massimo e completo sviluppo del moto ondoso.

### 5.1. Stato attuale

In questo paragrafo sono riportati i risultati delle simulazioni per lo stato attuale con i mari di Libeccio, Scirocco e di Mezzogiorno su un tempo di ritorno annuale e un tempo di ritorno cinquantennale al fine di valutare il comportamento idrodinamico del litorale ad oggi, in questo modo è stato possibile avere un termine di paragone con l'ipotesi di progetto. Per ogni sottoparagrafo sono evidenziati il moto ondoso e le correnti superficiali.

### 5.1.1 Libeccio cinquantennale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno cinquantennale

Nell'immagine riportata in figura è rappresentato lo sviluppo del moto ondoso dal largo fino a costa. La simulazione numerica si basa su un sistema di equazioni non lineari, che produce un'evoluzione non regolare del moto ondoso, ma che maggiormente rappresenta la reale evoluzione delle onde di tempesta.
Il moto ondoso incidente, caratterizzato da un'altezza significativa al largo pari a 6,00 m e da un periodo medio di 10 s, è stato propagato fino a riva mediante un modello numerico basato sulla risoluzione di un sistema di equazioni non lineari a onde corte, in grado di descrivere in modo realistico i fenomeni di rifrazione, diffrazione tipici dell'ambiente costiero.
L'elaborazione evidenzia la progressiva trasformazione del campo d'onda man mano che il treno d'onde si avvicina alla linea di costa. L'energia del moto ondoso, inizialmente distribuita in modo pressoché uniforme al largo, subisce una modulazione spaziale dovuta alle variazioni batimetriche e alla presenza delle opere di difesa che delimitano il tratto costiero della spiaggia dell'imperiese presa in esame.
In particolare, si osservano zone di concentrazione dell'energia (valori più elevati di altezza d'onda significativa, rappresentati dalle aree in tonalità rosso–arancio nella mappa) in corrispondenza delle porzioni centrali del dominio, dove il fronte d'onda viene localmente focalizzato per effetto della rifrazione indotta dalla morfologia del fondale e dalla presenza delle opere sia all'area di studio sia al dominio circostante. L'onda, in prossimità della linea di costa, mostra un'attenuazione dell'energia/altezza significativa rispetto al largo, pur mantenendo condizioni di moto ondoso ancora intense all'impatto con il litorale.

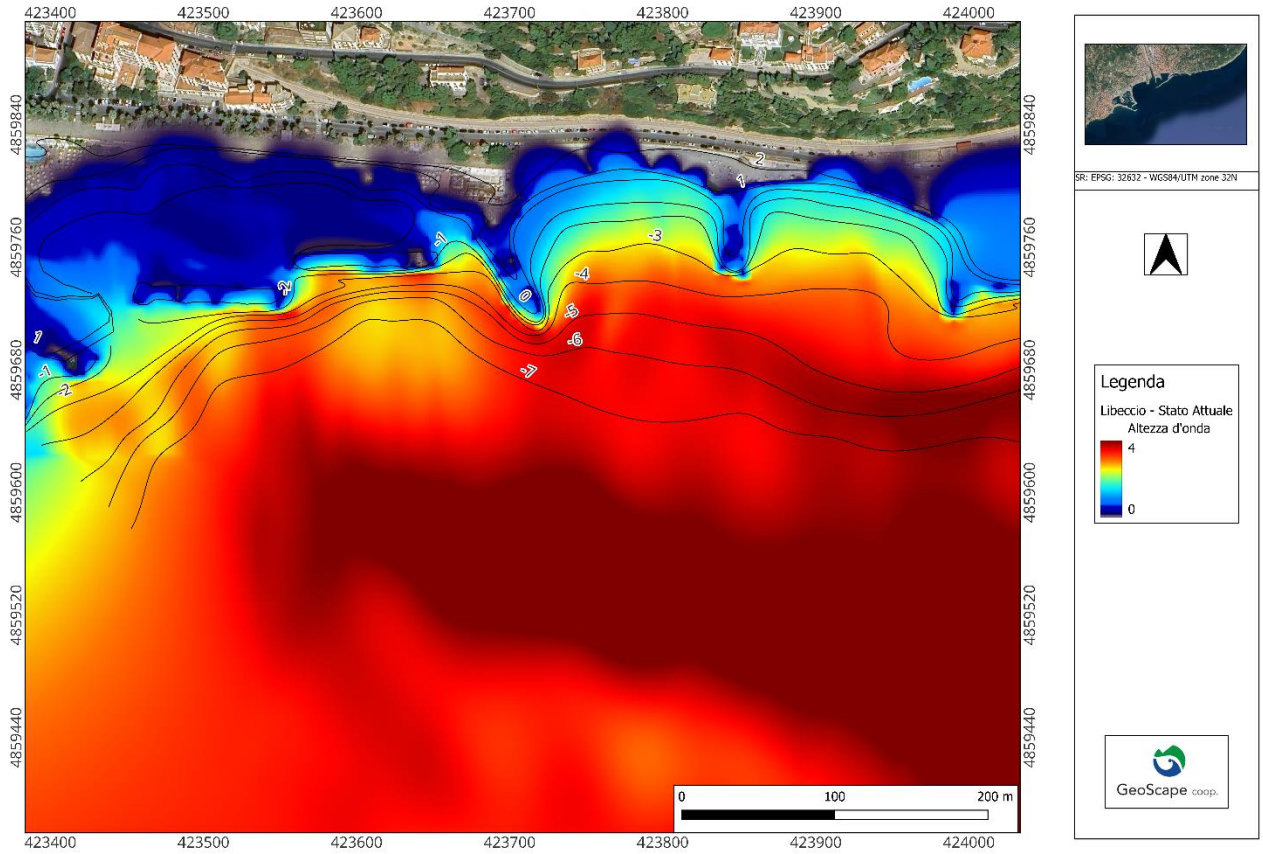



Figura 2

Nel settore di ponente, come evidenziato dalla figura, le due barriere determinano una moderata riduzione dell'altezza d'onda: il passaggio cromatico da rosso a blu in prossimità delle barriere indica una diminuzione dei valori da circa 2,5–3 m a monte delle barriere a circa 0,8 m. Tuttavia, una parte del moto ondoso supera le opere e si propaga all'interno dell'area retrostante, raggiungendo comunque la zona della strada, seppur con altezze ridotte ma con agitazione ancora presente. Nel settore di levante, invece, il campo d'onda risulta soggetto a una dissipazione più graduale, con altezze che decrescono progressivamente fino a valori prossimi a 1,2–1,5 m in corrispondenza della linea di costa, ma si osserva comunque l'inondazione della strada litoranea.

### 5.1.2 Libeccio cinquantennale- Correnti

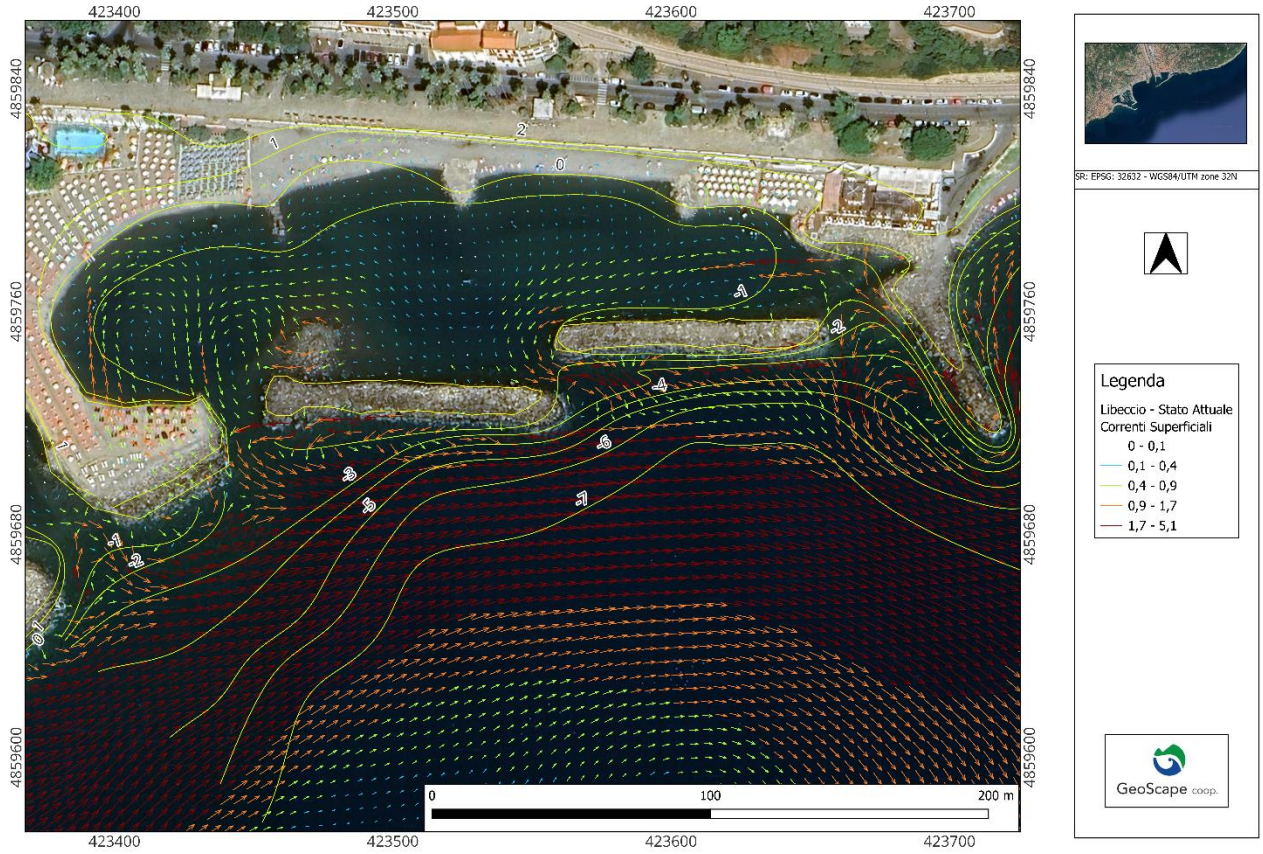



*Figura 3*

Ponendo maggiore attenzione sulla spiaggia di interesse, il campo di corrente mostra a levante un flusso entrante che si disperde attraverso il varco delimitato dalle due barriere. Si evidenziano inoltre correnti in uscita, con intensità dell'ordine di 0,4–0,9 m/s, nel settore compreso tra il molo e la prima barriera di ponente. Tale configurazione delle correnti suggerisce un moto di trasporto solido orientato verso levante, indicativo di potenziale perdita di materiale sedimentario dalla spiaggia oggetto di analisi. Nella zona offshore delle barriere si osservano invece correnti molto forti (1,7–5,1 m/s) dirette verso levante, le quali convergono con quelle in uscita dalla spiaggia generando una zona di convergenza idrodinamica che può influenzare significativamente i processi di trasporto solido esterno alle barriere.

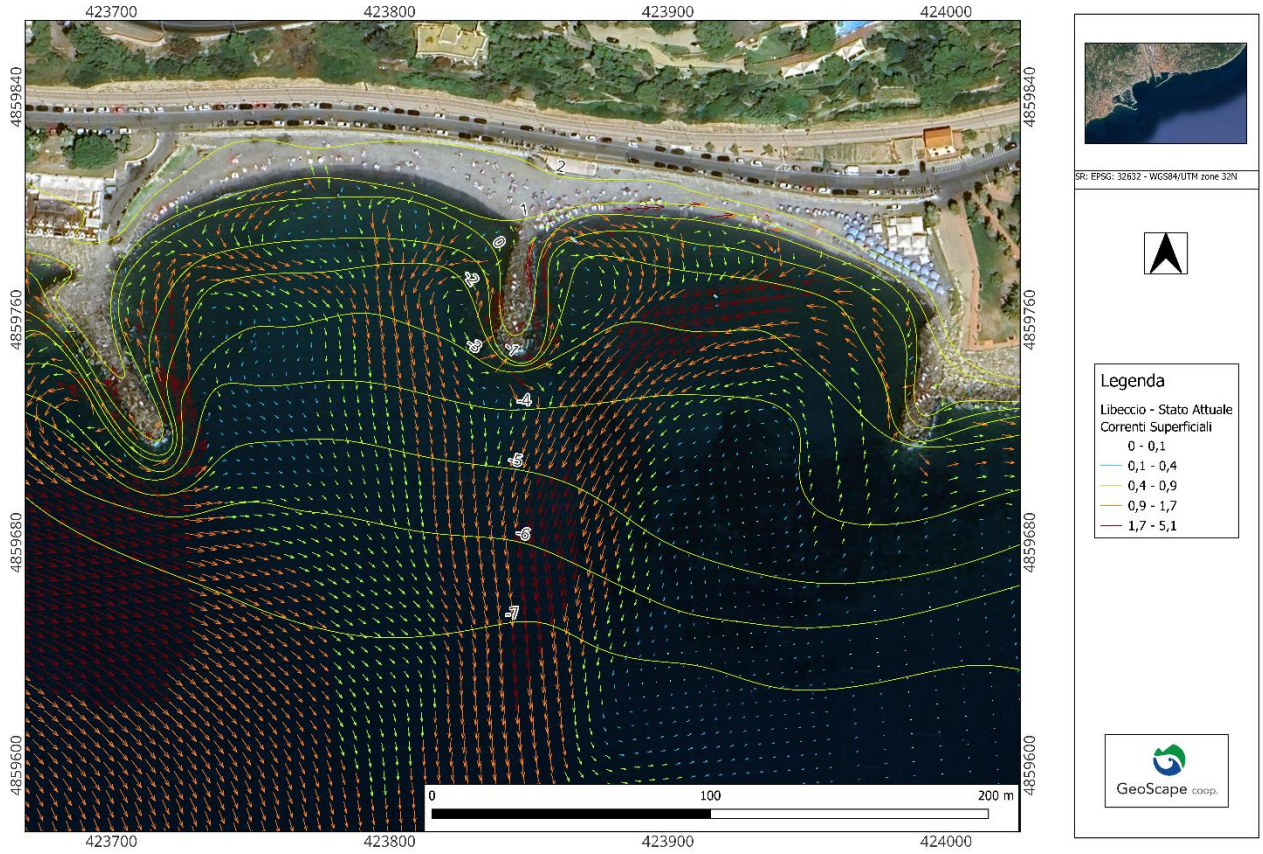



*Figura 4*

Un'analisi più dettagliata della spiaggia situata a levante del dominio di studio evidenzia una zona di convergenza delle correnti in prossimità della linea di riva. Nella parte occidentale rispetto al molo centrale, il campo di corrente mostra un flusso entrante da ponente che, avvicinandosi alla battigia, defluisce verso l'esterno. Allo stesso modo, un secondo sistema di correnti provenienti da levante raggiunge la battigia e successivamente defluisce verso l'offshore.

Queste due correnti in entrata generano un'area di convergenza immediatamente davanti al molo centrale, dove si osserva un aumento dell'intensità della corrente, evidenziato dai colori più scuri delle frecce. In questa zona sono presenti vettori superficiali con velocità comprese tra 1,7 e 5,1 m/s diretti verso il largo, indicativi di un marcato flusso di uscita.

### 5.2.1 Scirocco cinquantennale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno cinquantennale

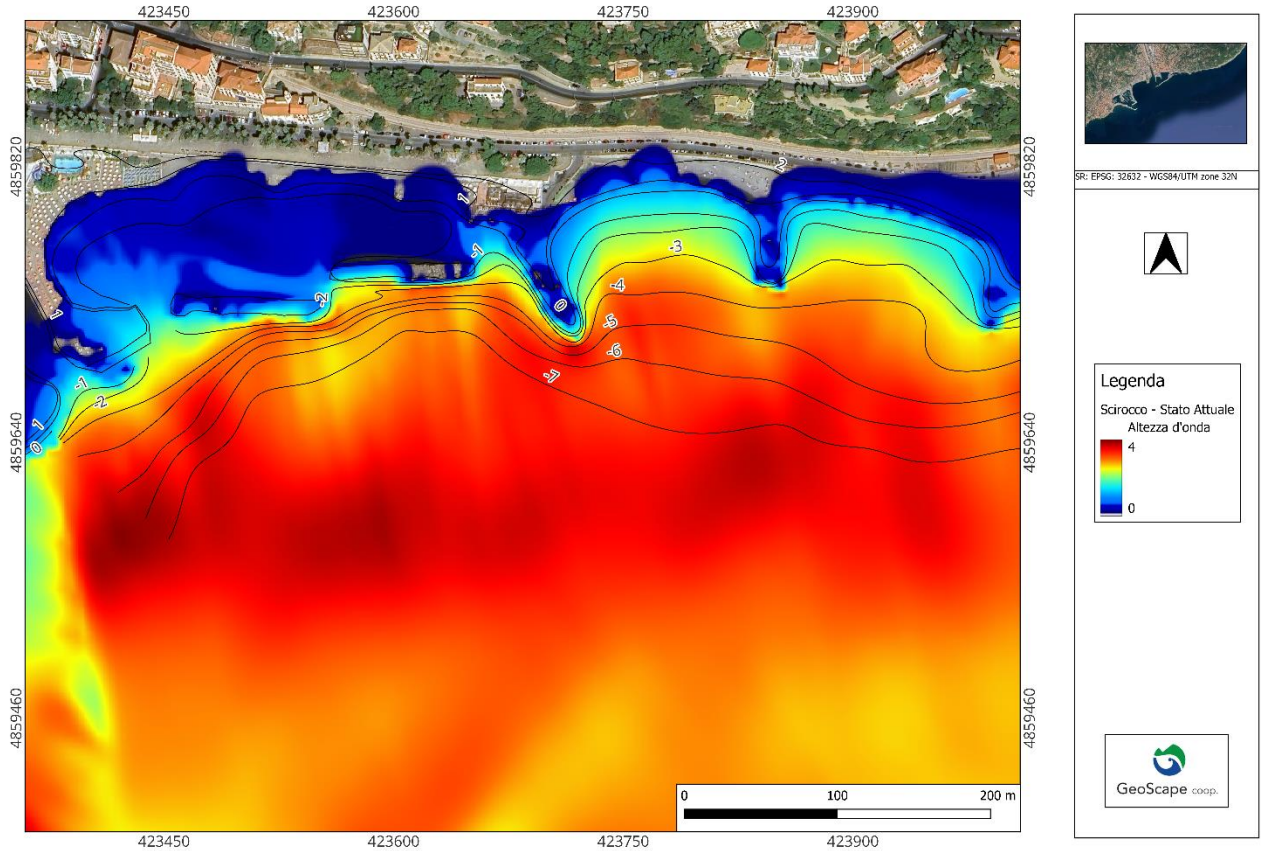



Figura 5

Da questa analisi si osserva che il moto ondoso di scirocco raggiunge il sistema di barriere della spiaggia di ponente con un'altezza prossima ai 2 metri. Nel tratto immediatamente retrostante le barriere l'onda subisce un parziale smorzamento, pur mantenendo valori sufficienti a generare inondazione sulla spiaggia, dell'ordine del metro. Nella porzione più orientale della spiaggia, l'onda giunge in prossimità della linea di riva con intensità maggiore, mostrando altezze comprese tra circa 1,4 e 1,6 metri in corrispondenza della battigia.

### 5.2.2 Scirocco cinquantennale – Correnti

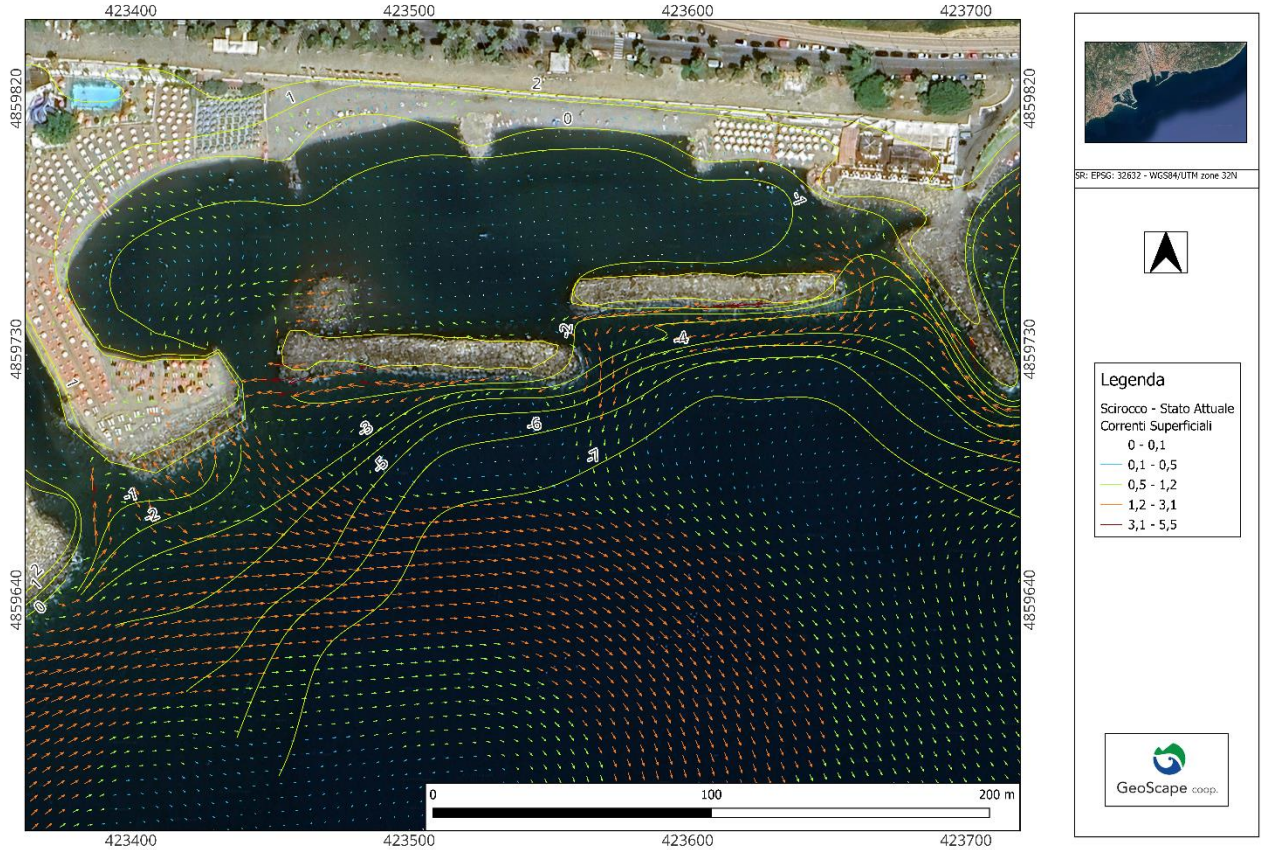



Figura 6

Le correnti generate dallo scirocco con tempo di ritorno cinquantennale risultano meno intense in prossimità della battigia rispetto a quelle associate al libeccio. Nel settore occidentale della spiaggia si osservano correnti dirette verso levante, mentre nel settore orientale è presente un flusso in uscita che, una volta oltrepassate le barriere, si orienta verso ovest.

Si evidenzia inoltre un marcato flusso offshore, ossia la corrente proveniente da ponente si dirige verso levante e successivamente si disperde verso il largo, raggiungendo intensità comprese tra 1,2 e 3,1 m/s.

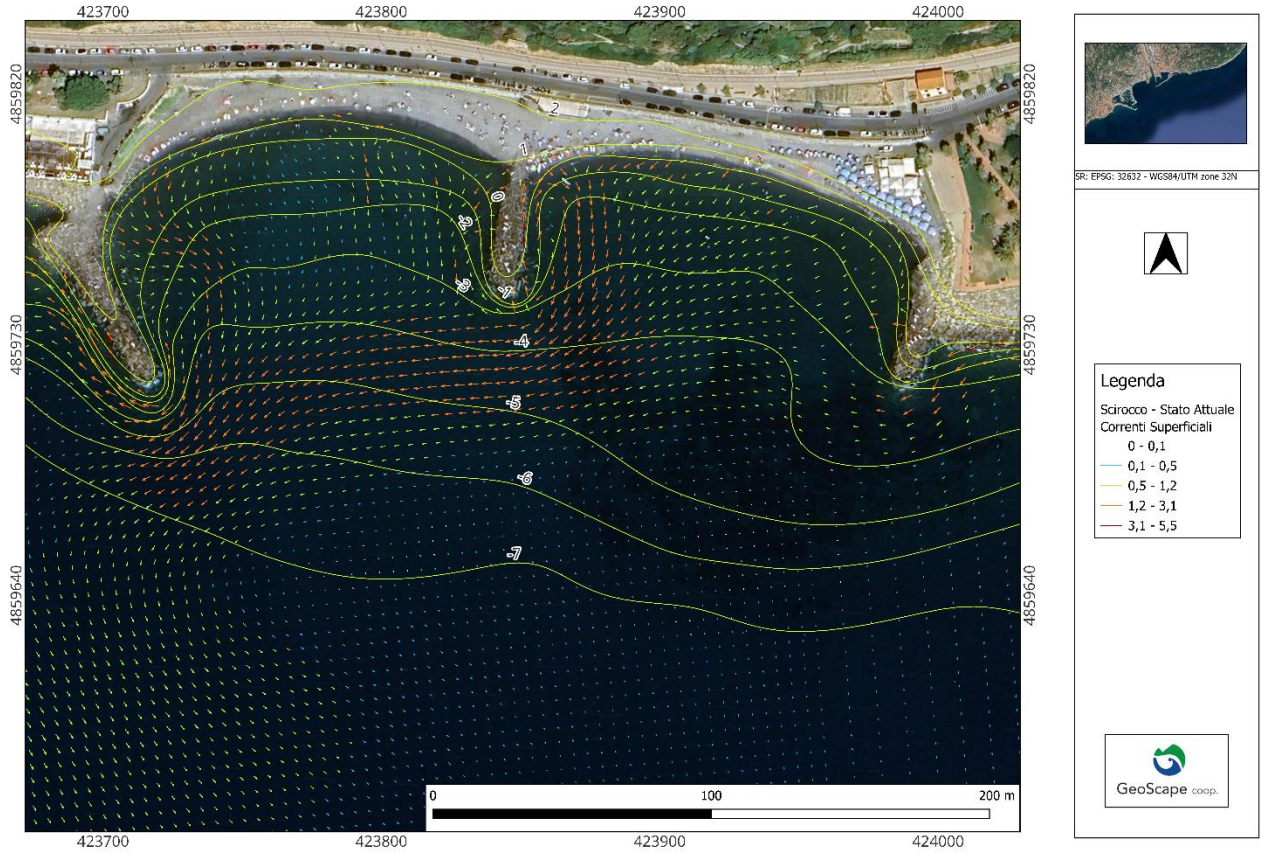



Figura 7

Nella seconda cella si osservano flussi di corrente in uscita sia nel settore occidentale sia in quello orientale della spiaggia. Queste correnti convergono nella porzione ovest del dominio e si dirigono successivamente verso ponente con un'intensità prossima ai 2,8 m/s.

### 5.3.1 Mezzogiorno cinquantennale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno cinquantennale

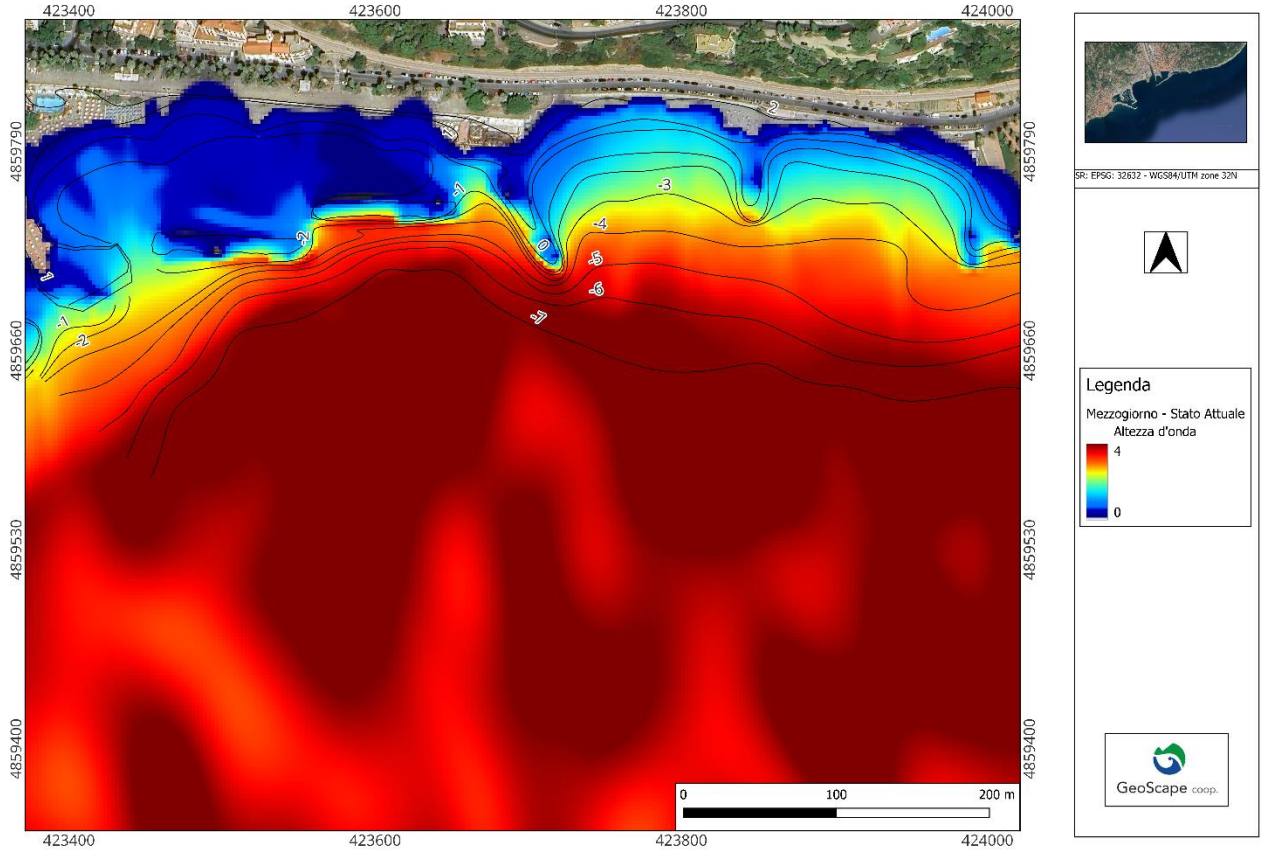



Figura 8

Tramite un'analisi più dettagliata si osserva che il moto ondoso proveniente da mezzogiorno raggiunge le barriere della spiaggia di ponente con altezze comprese tra 2 e 2,5 metri, mentre oltre il sistema di barriere i valori si riducono a circa 1,0–1,2 metri. In prossimità della riva, nel settore occidentale della prima spiaggia, l'onda arriva con altezze dell'ordine di 0,4–0,7 metri, mentre si presentano leggermente inferiori nel resto della cella ma comunque sufficienti a superare la linea di riva. Nella spiaggia orientale, maggiormente esposta, il moto ondoso da mezzogiorno giunge invece con energia più elevata, raggiungendo valori prossimi ai 2 metri in prossimità della battigia, generando fenomeni di inondazione della strada litoranea.

### 5.3.2 Mezzogiorno cinquantennale -Correnti

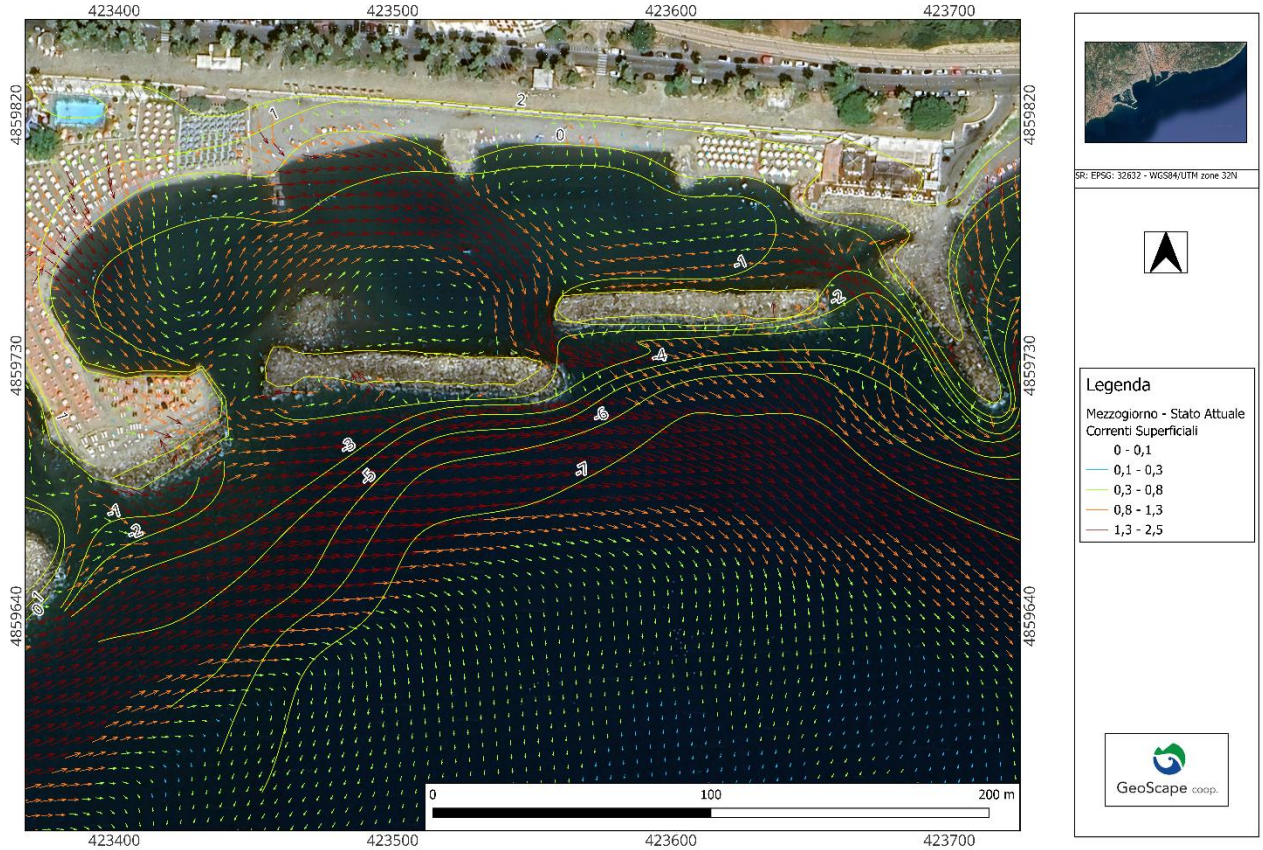



Figura 9

Concentrandoci con maggiore dettaglio sulla dinamica litoranea, la spiaggia di ponente mostra un primo flusso di corrente orientato verso sud che successivamente devia verso levante. Nella seconda cella, in prossimità della battigia, è infatti presente un flusso di corrente di elevata intensità (1,3–2,5 m/s, evidenziato dalle tonalità rosse) inizialmente diretto verso levante e che poi defluisce verso l'esterno attraverso lo spazio compreso tra le due opere antistanti la spiaggia. Una parte di questo flusso, sempre orientata verso est, defluisce poi all'esterno attraverso il varco tra la seconda barriera e il molo divisorio delle spiagge.

Al largo delle opere si sviluppa una marcata corrente direzionale proveniente da ovest e diretta verso est, che converge con i flussi in uscita dalla spiaggia. L'interazione tra questi contributi genera un'intensificazione della corrente, che prosegue il suo percorso verso levante lungo il settore offshore.

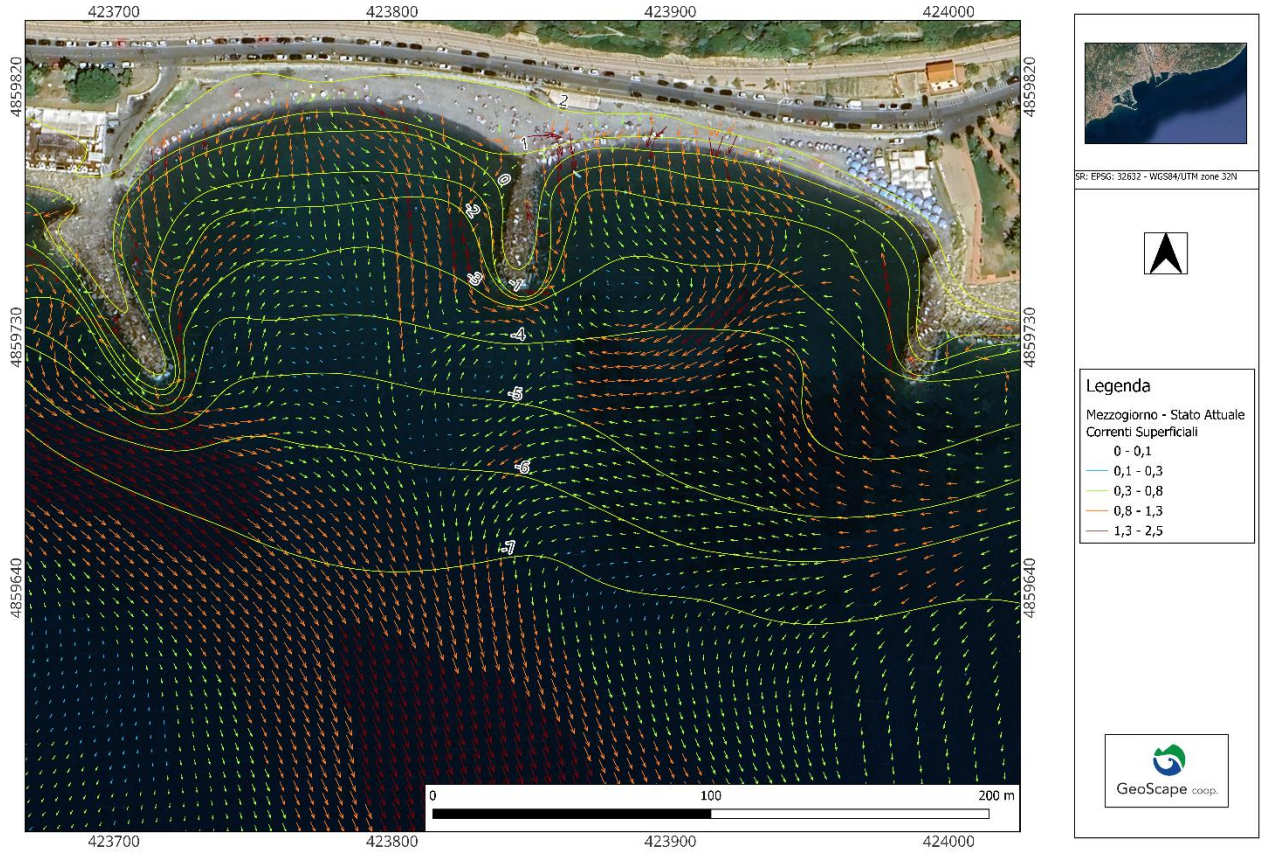



Figura 10

Nella spiaggia più orientale le intensità delle correnti risultano superiori rispetto a quelle generate dai marosi di libeccio e di scirocco. Nella porzione iniziale della battigia si osserva un flusso diretto verso l'offshore, che va a convergere con il sistema di correnti offshore presente nella parte centrale della spiaggia. Questi flussi in uscita si uniscono nel tratto antistante il pennello divisorio che separa le due spiagge, dove si combinano con la corrente di elevata intensità proveniente da ponente e diretta verso sud-ovest.

Si rileva inoltre, nella porzione orientale della spiaggia, un flusso entrante diretto verso ponente che va a convergere con il flusso di correnti in uscita, contribuendo alla complessità del campo idrodinamico locale.

### 6.1. Stato di progetto

Per lo stato di progetto è stato inserito un ripascimento complessivo nella parte di spiaggia oggetto di intervento di 30.000 metri cubi, con granulometria pari a 8 mm e sono state rimosse le due barriere esistenti e sostituite con due isole artificiali aventi dimensioni pari a 40 m di larghezza e 20 m di lunghezza. Le isole sono state progettate con quota al livello medio mare e sezione trapezoidale.

Il molo situato a ponente è stato posto a quota +1 m e riposizionato, come evidenziato dalle tracce riportate nella figura di progetto. Anche il molo di levante, che separa le due spiagge, è stato oggetto di modifica: il tratto connesso alla spiaggia

è stato elevato a +1 m e, di fronte ad esso, è stata collocata una terza isola artificiale analoga alle precedenti, anch'essa posta a livello medio mare.

Infine, nella porzione più occidentale, alla foce del rio, è stato aggiunto una piccola protuberanza costituita di massi con quota +1 m, con la funzione di attenuare parzialmente le correnti provenienti da libeccio.

### 6.1.1 Libeccio Cinquantennale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno cinquantennale

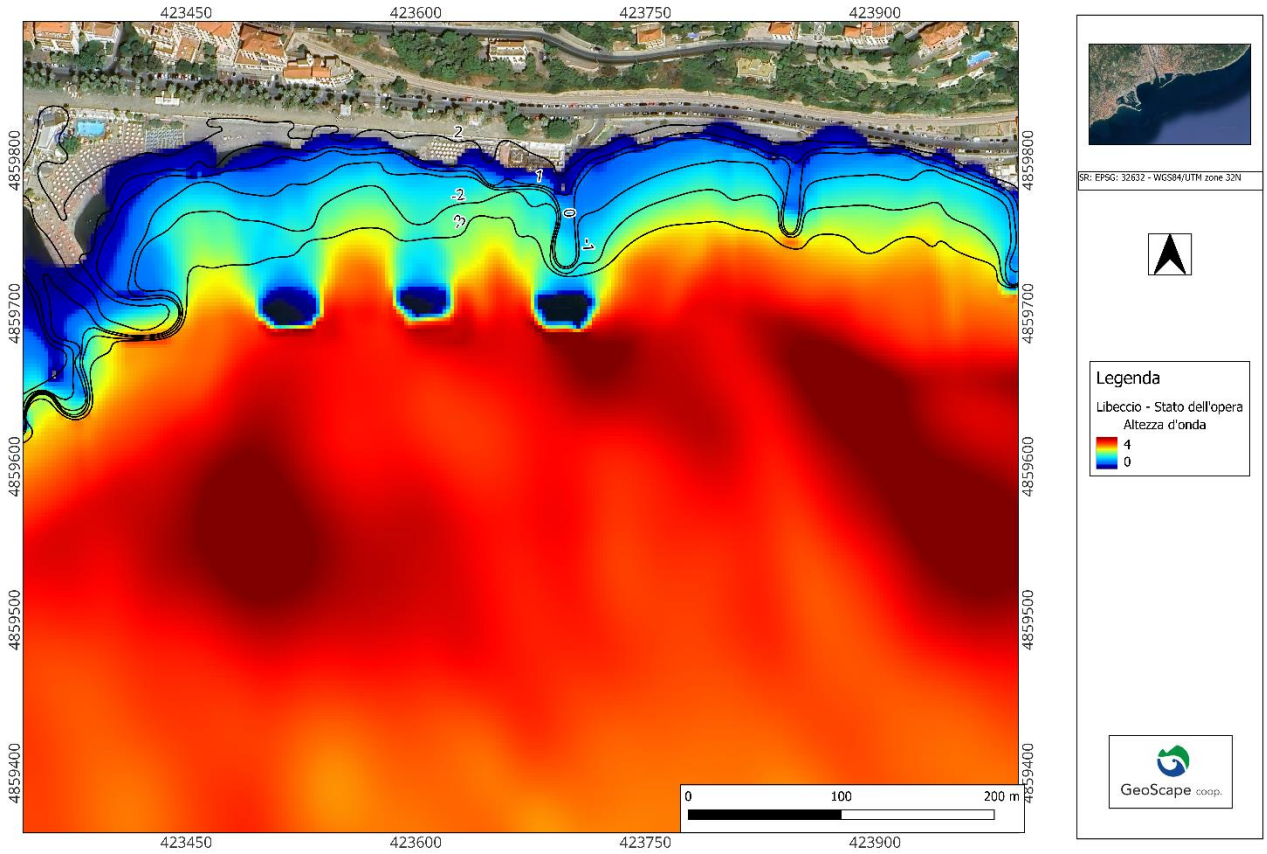



Figura 11

Analizzando con maggiore dettaglio la configurazione di progetto, si osserva che nella porzione occidentale della spiaggia il molo, modificato nella forma e posto a quota +1 m, garantisce una protezione efficace dell'intero tratto a ponente per la presenza del ripascimento artificiale. In questo settore il moto ondoso raggiunge la battigia con altezze inferiori rispetto allo stato attuale. Le isole artificiali contribuiscono ulteriormente allo smorzamento del moto ondoso di libeccio, riducendo l'energia dell'onda che giunge in prossimità della linea di riva. Anche la spiaggia orientale mostra un effetto di attenuazione, in particolare nel tratto più occidentale, che risulta parzialmente schermato dall'importante ripascimento strutturale previsto e dalle opere poste a protezione dell'intervento morbido.

### 6.1.2 Libeccio Cinquantennale - Correnti

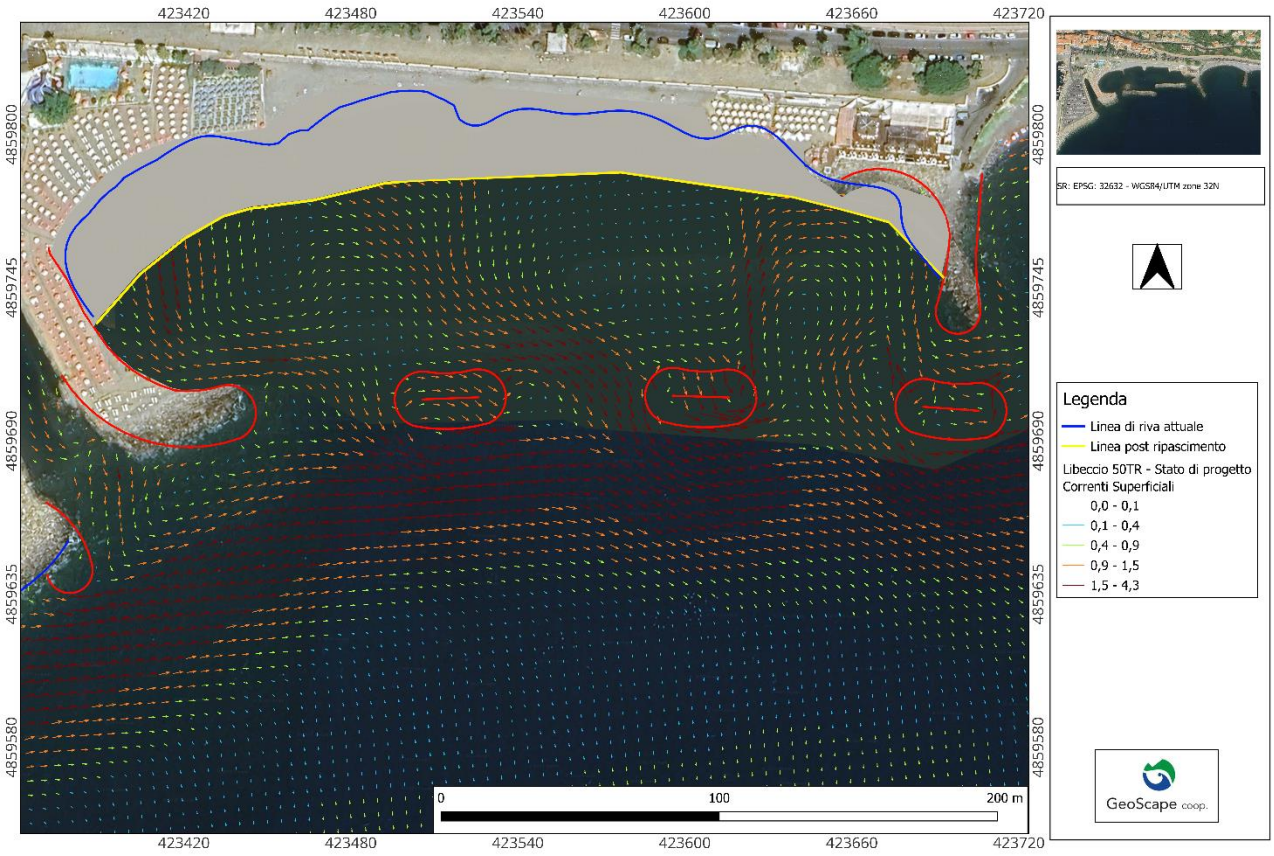



Figura 12

Per quanto riguarda le correnti generate dal libeccio, in presenza delle nuove opere si osserva un flusso in uscita nella porzione occidentale della prima cella. Nella seconda cella le correnti risultano invece orientate verso sud-est e defluiscono attraverso lo spazio compreso tra la prima e la seconda isola, convergendo con i flussi in uscita provenienti dalla parte più orientale della spiaggia. In quest'ultima area si rileva infatti un ulteriore flusso in uscita che attraversa il varco tra la seconda e la terza isola. Al di fuori del sistema di isole, nel settore offshore, è presente un flusso di corrente in uscita di elevata intensità (1,5–4,3 m/s), diretto verso levante, dovuto alla presenza della diga del porto.

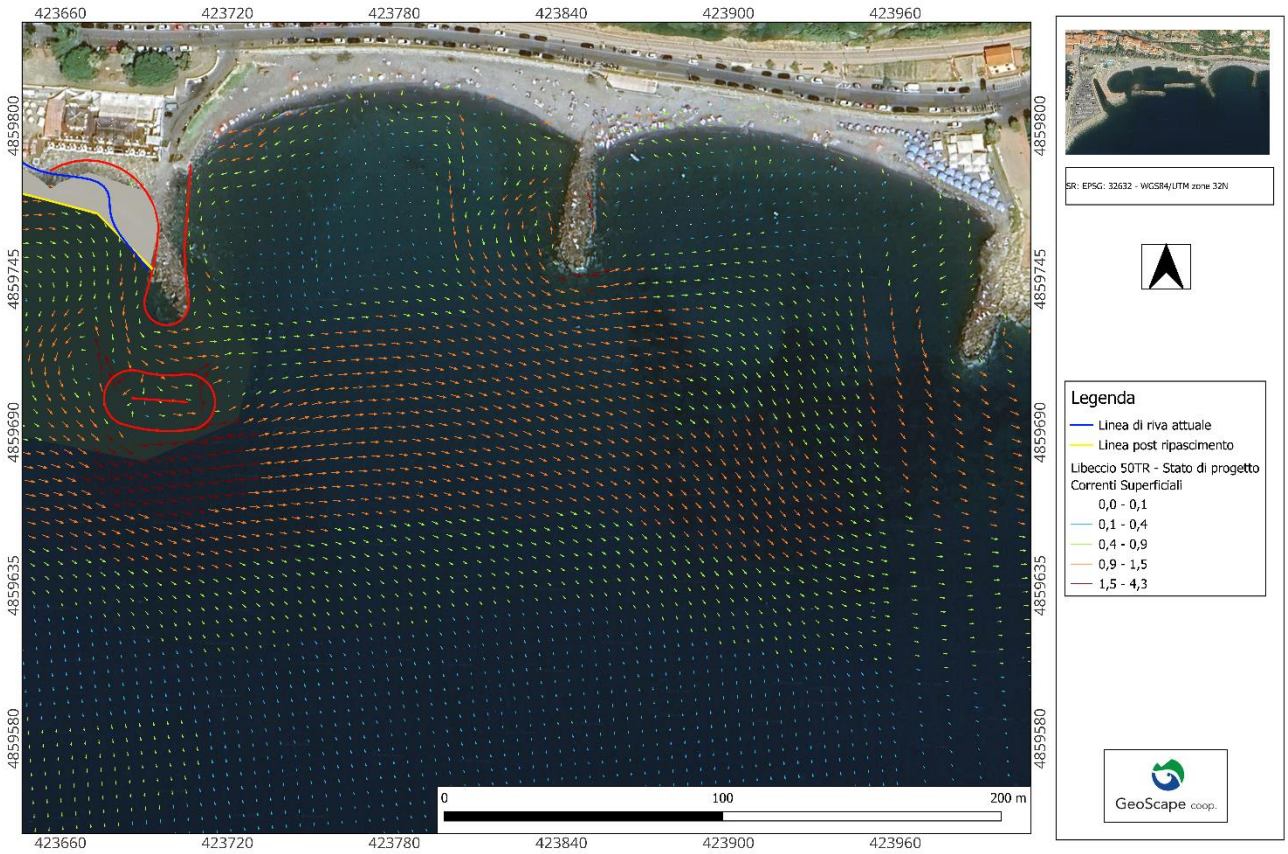



Figura 13

Nella spiaggia di levante si osservano, in prossimità della battigia, correnti dirette verso ovest che defluiscono all'esterno in corrispondenza del pennello occidentale, andando a unirsi alla forte corrente offshore orientata verso levante. Analogamente, nel settore posto a ovest del molo centrale si rilevano correnti che, pur dirigendosi inizialmente verso levante lungo la battigia, defluiscono successivamente verso l'esterno, confluendo anch'esse nelle intense correnti direzionali offshore. Nella porzione più orientale della seconda spiaggia sono presenti invece correnti deboli, anch'esse orientate verso ovest.

### 6.2.1 Scirocco Cinquantennale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno cinquantennale

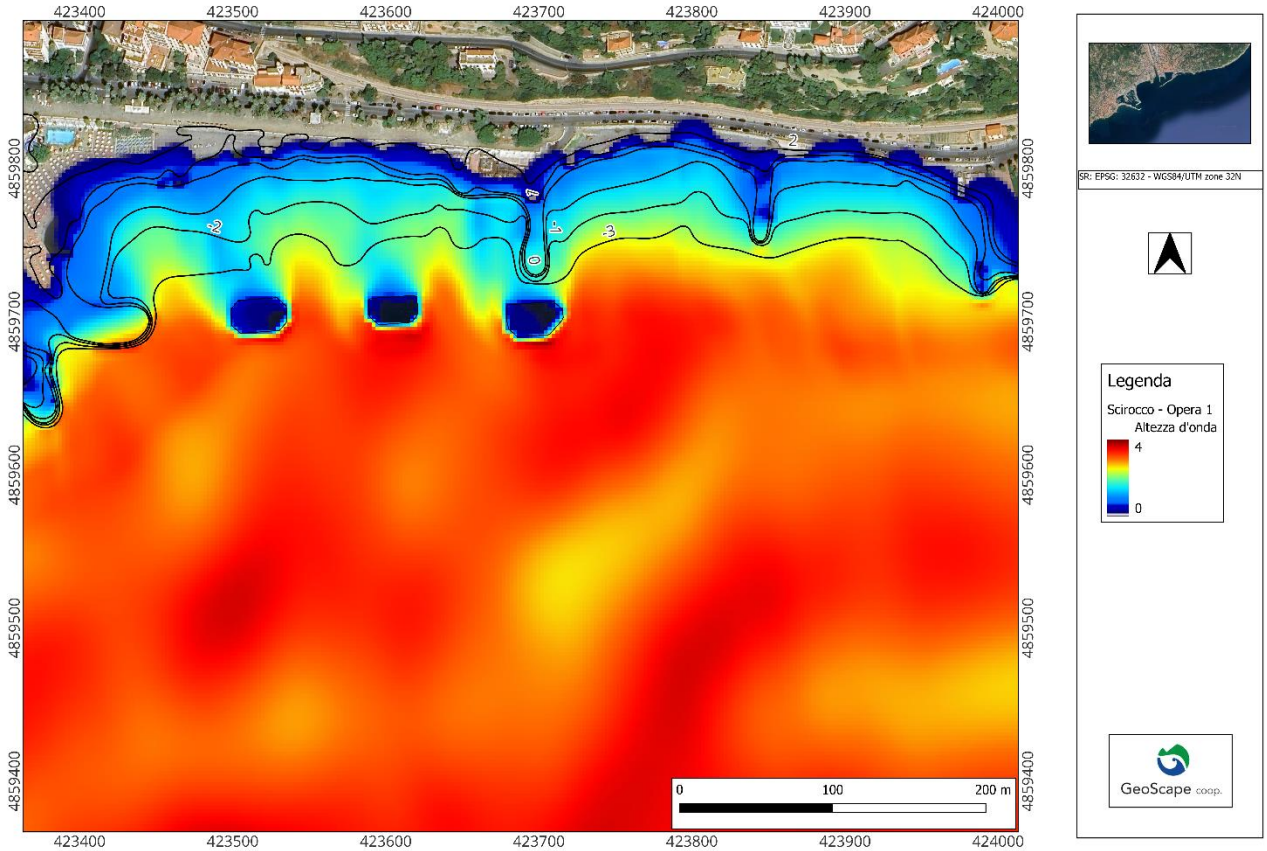



Figura 14

Da un'analisi più dettagliata della spiaggia in esame si osserva che, anche sotto l'azione dello scirocco cinquantennale, il ripascimento, le tre isole previste da progetto e le modifiche ai moli determinano una sostanziale riduzione dell'altezza d'onda nel settore retrostante le opere e, di conseguenza, in prossimità della battigia e della strada litoranea. L'onda raggiunge infatti la spiaggia in forma attenuata, con altezze dell'ordine di pochi centimetri. La porzione di spiaggia posta a levante, invece, con il vento di scirocco non mostra variazioni significative rispetto allo stato attuale.

### 6.2.2 Scirocco Cinquantennale - Correnti

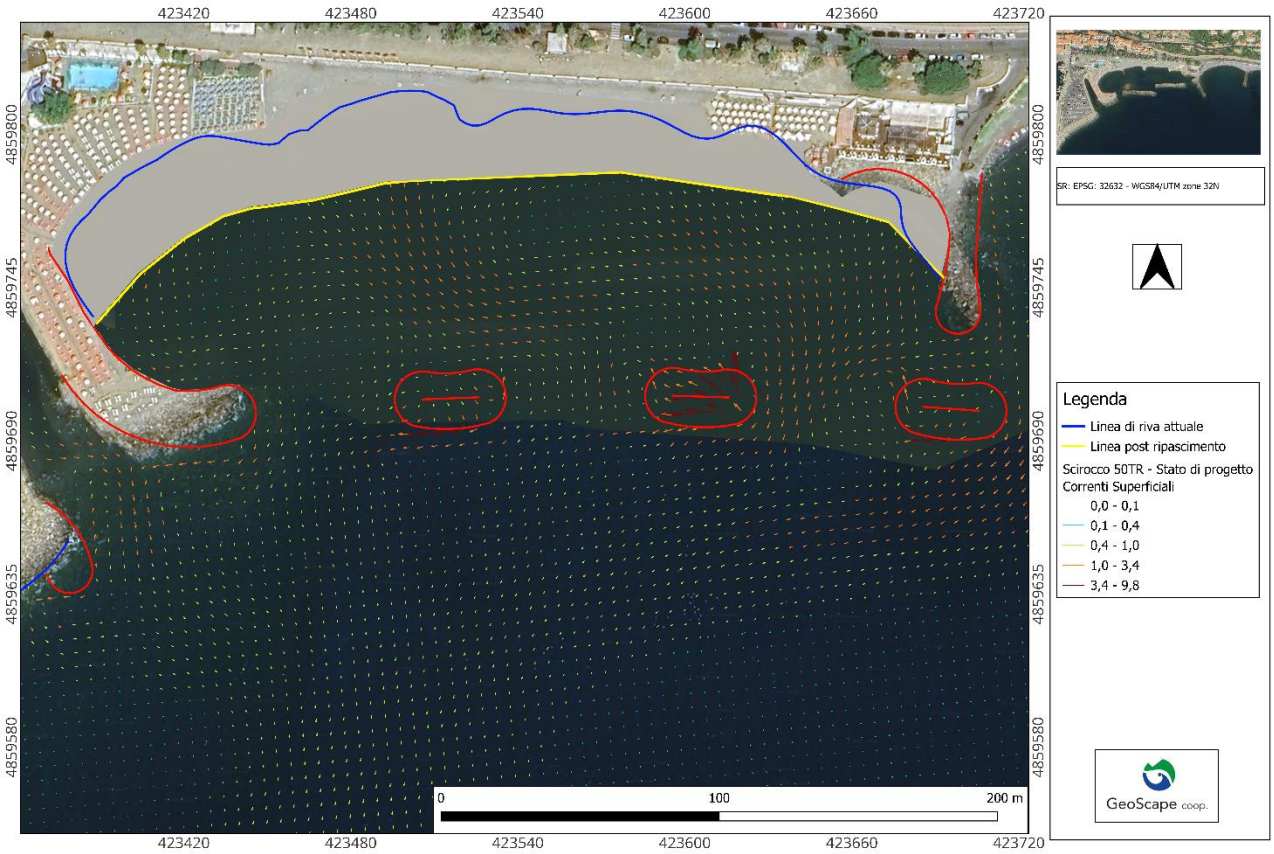



Figura 15

Dall'analisi delle correnti generate dallo scirocco cinquantennale si osserva che, rispetto allo stato attuale, l'intensità del campo di corrente risulta notevolmente ridotta, con vettori di bassa intensità in prossimità della battigia. Nel settore occidentale, in corrispondenza delle modifiche apportate al molo, le correnti risultano prevalentemente orientate verso sud. Si rileva inoltre un flusso proveniente dalla porzione orientale della spiaggia che si dirige verso ponente, per poi defluire in offshore attraversando i varchi tra le isole.

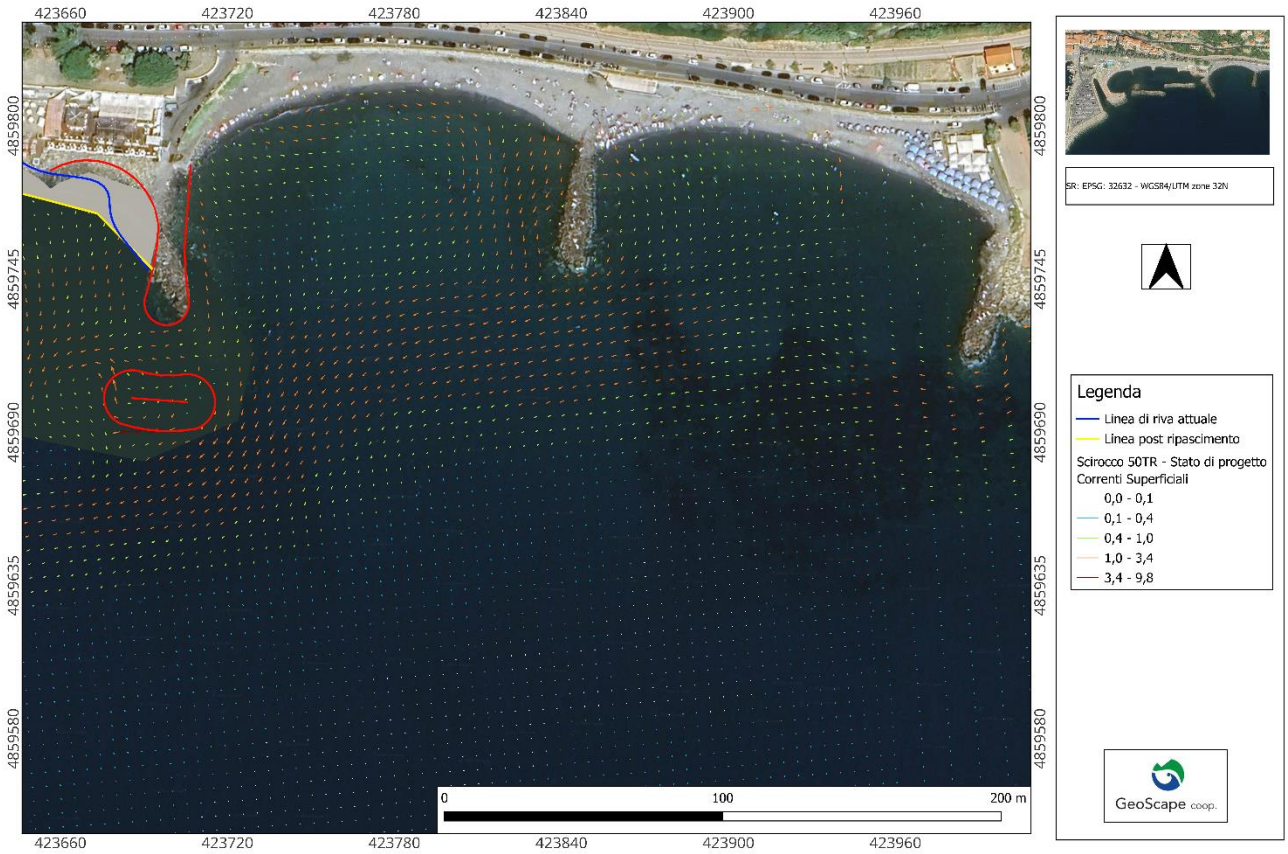



Figura 16

La porzione orientale della spiaggia non risulta influenzata dalle modifiche introdotte. In prossimità della battigia, nel settore occidentale, si osserva un'inversione della direzione del flusso, con correnti orientate verso levante, mentre nel settore orientale si rileva un'ulteriore diminuzione dell'intensità del moto ondoso incidente.

### 6.3.1 Mezzogiorno Cinquantennale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno cinquantennale

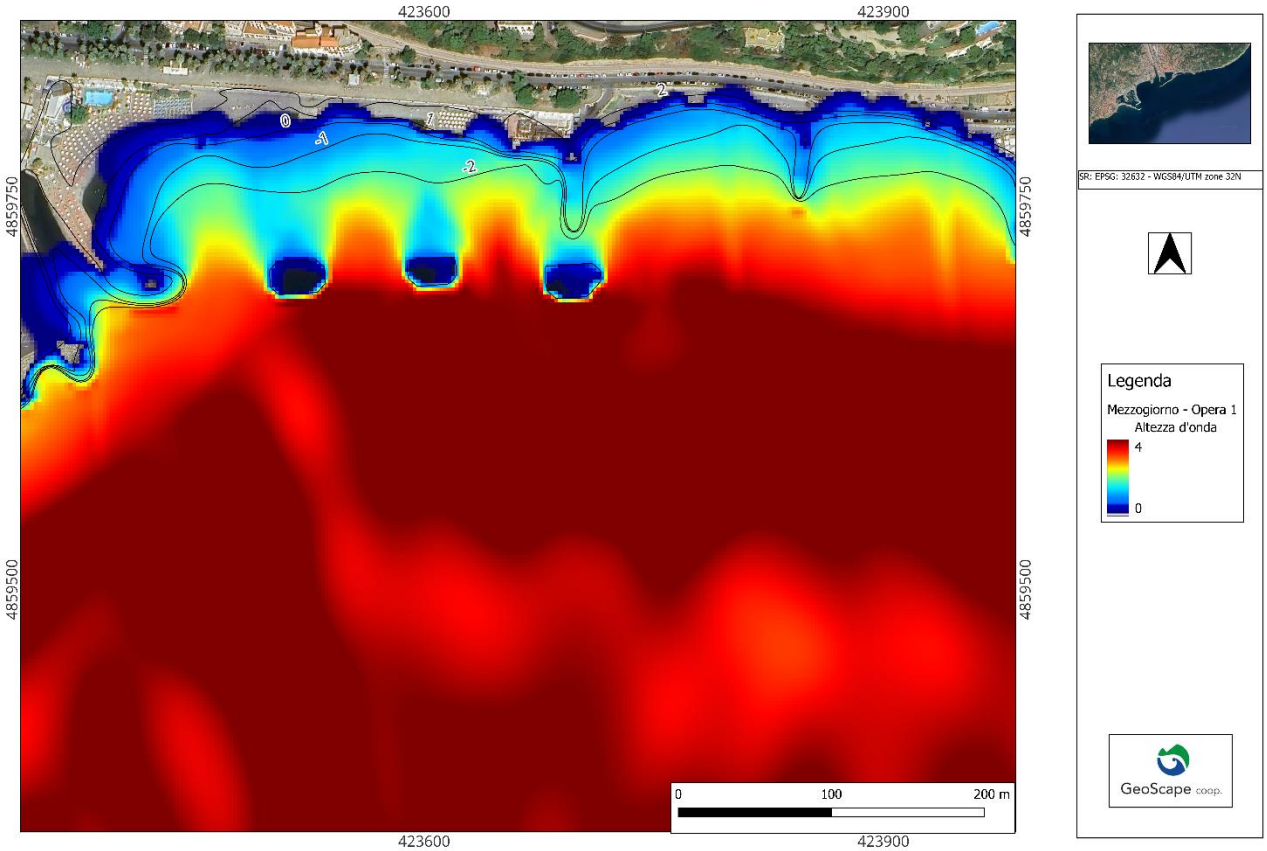



Figura 17

Analizzando più nel dettaglio il tratto di costa in esame, si osserva, rispetto allo stato attuale, una significativa riduzione dell'altezza d'onda incidente sulla battigia sotto l'azione dei marosi di mezzogiorno cinquantennale. La presenza del ripascimento e delle tre isole poste a protezione determina un efficace smorzamento del moto ondoso, producendo valori sensibilmente inferiori a ridosso della spiaggia, dell'ordine di 0,2–0,5 m. Inoltre, la modifica apportata al molo orientale contribuisce a ridurre ulteriormente l'altezza d'onda nel settore occidentale della battigia, dove si osserva un ulteriore smorzamento rispetto alle condizioni dello stato attuale.

### 6.3.2 Mezzogiorno Cinquantennale - Correnti




Figura 18

Le correnti superficiali, in presenza delle nuove opere, evidenziano una marcata riduzione dell'intensità rispetto allo stato attuale. I flussi che precedentemente si dirigevano con elevate velocità verso sud risultano qui significativamente attenuati, sia nel settore occidentale sia lungo il resto della battigia.

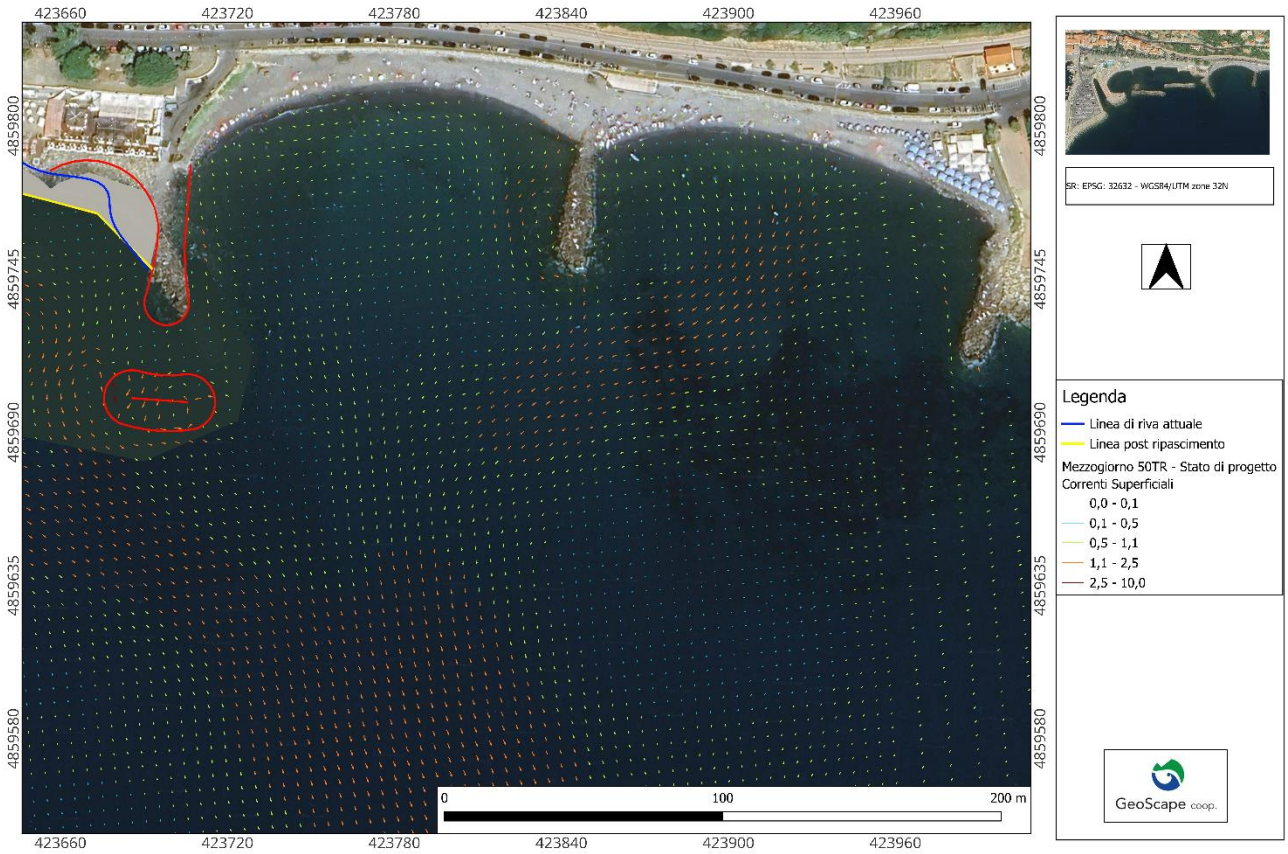



Figura 19

Anche nella seconda parte della spiaggia, procedendo verso levante, si registra una sensibile diminuzione dell'intensità delle correnti superficiali. Questa riduzione è legata all'influenza delle opere posizionate nel tratto antistante la prima parte della spiaggia, che modificano il campo di corrente e limitano l'energia che raggiunge solo la zona più occidentale.

## 7.Conclusioni

Il lavoro svolto ha riguardato lo sviluppo di uno studio modellistico idrodinamico finalizzato alla valutazione delle condizioni meteomarine lungo il litorale della spiaggia di Imperia Borgo Peri, sia nello stato attuale sia in configurazione di progetto. Attraverso l'utilizzo del modello numerico XBeach 2DH sono stati simulati tre scenari di moto ondoso estremo (Libeccio, Scirocco e Mezzogiorno, tutti con tempo di ritorno cinquantennale), analizzando la propagazione dell'onda verso costa e l'evoluzione del campo di corrente. L'obiettivo principale era verificare l'efficacia del progetto di difesa, che prevede un ripascimento strutturale, la sostituzione delle barriere emerse con isole artificiali rasate a medio mare e la modifica dei moli esistenti.

Le simulazioni condotte mostrano come lo stato attuale presenti significative criticità in tutti i casi di mareggiata analizzati. Le altezze d'onda che raggiungono la riva risultano elevate e capaci di causare frequenti fenomeni di inondazione della strada litoranea, mentre le correnti superficiali — talvolta superiori a 3–5 m/s — favoriscono la perdita di sedimento verso l'offshore e l'erosione della spiaggia, in particolare nei settori esposti ai moti ondosi provenienti dai quadranti meridionali.

Lo scenario di progetto determina un miglioramento sostanziale del comportamento idrodinamico del litorale. In particolare:

- il ripascimento e le isole artificiali riducono in modo significativo l'altezza d'onda alla battigia, eliminando in parte il rischio di ingressione marina nella spiaggia oggetto di indagine;
- le correnti superficiali risultano molto attenuate, con diminuzione delle intensità massime e maggiore regolarità dell'idrodinamica in gioco;
- la stabilità morfologica della spiaggia aumenta, grazie alla drastica riduzione dei flussi in uscita ad alta energia che nello stato attuale favorivano la dispersione dei sedimenti;
- le modifiche ai moli contribuiscono a schermare ulteriormente il tratto costiero e a rendere più efficiente l'azione delle opere previste.

Nel complesso, il progetto proposto si dimostra efficace nel raggiungere gli obiettivi prefissati: migliorare la protezione costiera, ridurre l'energia del moto ondoso incidente, limitare l'erosione e garantire una maggiore sicurezza e fruibilità dell'area litorale anche durante eventi meteomarini estremi.

Alla luce dei risultati ottenuti, si ritiene opportuno:

1. in corso d'opera valutare eventuale distribuzione del materiale da ripascimento più a favore dell'area di levante della spiaggia interessata da intervento, in modo da realizzare un avanzamento della linea di riva omogeneo lungo tutto il tratto di costa;
2. prevedere un monitoraggio morfodinamico post-intervento (ripascimento + opere) per verificare la risposta reale del sistema costiero.

## 8. Bibliografia citata

*Bolle, A., Mercelis, P., Roelvink, D., Haerens, P., & Trouw, K. (2011). Application and validation of XBeach for three different field sites. Coastal Engineering Proceedings, 1(32), sediment-40.*

*Carpi, L., Mucerino, L., Besio, G., Corradi, N., & Ferrari, M. (2020). MAREGOT project experience: Integrated approach to understanding coastal dynamics behaviour. In 2019 IMEKO TC19 International Workshop on Metrology for the Sea: Learning to Measure Sea Health Parameters, MetroSea (pp. 167-171).*

*Carpi, L., Bicenio, M., Mucerino, L., & Ferrari, M. (2021). Detached breakwaters, yes or not? A modelling approach to evaluate and plan their removal. Ocean & Coastal Management, 210, 105668.*

*McCall, R. T., Masselink, G., Poate, T. G., Roelvink, J. A., Almeida, L. P., Davidson, M., & Russell, P. E. (2014). Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. Coastal Engineering, 91, 231-250.*

*Mucerino, L., Albarella, M., Carpi, L., Besio, G., Benedetti, A., Corradi, N., Firpo M. & Ferrari, M. (2019). Coastal exposure assessment on Bonassola bay. Ocean & coastal management, 167, 20-31.*

*Mucerino, L., Carpi, L., Schiaffino, C. F., Pranzini, E., Sessa, E., & Ferrari, M. (2021). Rip current hazard assessment on a sandy beach in Liguria, NW Mediterranean. Natural Hazards, 105(1), 137-156.*

*Roelvink, D. (2011). A guide to modeling coastal morphology, volume 12. World Scientific.*

*Roelvink, D., Van Dongeren, A., McCall, R., Hoonhout, B., Van Rooijen, A., Van Geer, P., De Vet, L., Nederhoff, K., and Quataert, E. (2019). XBeach technical reference: Kingsday release. Delft, The Netherlands: Deltares, Technical report.*

*Balkema, A., de Haan, L., 1974. Residual Life Time at Great Age. The Annals of Probability. 2(5):792-804*

*Boccotti, P. (1997). Idraulica marittima. UTET Universita.*

*De Leo, F., S. Solari, and G. Besio (2020). Extreme wave analysis based on atmospheric pattern classication: an application along the italian coast. Natural Hazards and EarthSystem Sciences 20 (5), 1233{1246}.*

*Goda, Y. (2003). Revisiting wilson's formulas for simplied wind-wave prediction. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering 129 (2), 93{95.*

*Gumbel, E. J. (1958). Statistics of extremes. Columbia university press.*

*Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods, 4$^{th}$ edition, Charles Griffin, London.*

*MacQueen, J. et al. (1967). Some methods for classication and analysis of multivariate observations. In Proceedings of the fth Berkeley symposium on mathematical statisticsand probability, Volume 1, pp. 281{297. Oakland, CA, USA*

*Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the econometric society, 245-259.*

*Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2013). Developing and validating a forecast/hindcast system for the Mediterranean Sea. Journal of Coastal Research, (65 (10065)), 1551-1556.*

*Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2015). Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. Ocean Modelling, 90, 82-94.*

*Pickands III, J. (1975). Statistical inference using extreme order statistics. the Annals of Statistics, 119-131.*