AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA
PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

SOCIETÀ DI PROGETTO: APM TERMINALS VADO LIGURE S.p.A.

MAERSK

CLF GRANDI LAVORI FINCOSIT

PROGETTAZIONE:

TECHNITAL S.p.A.

IL RESPONSABILE:

Dott. Ing. Guido Fiorini

PROGETTO ESECUTIVO - FASE 2
E CONTESTUALE PERIZIA DI VARIANTE DELLA FASE 1

ELABORATO N° :

MI010P-PE-G-B-R-4003-C0

TITOLO ELABORATO

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE DELLE VARIANTI DI LIVELLO ESECUTIVO

RELAZIONE SUSSIDIARIA

DATA			
Ottobre 2014	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
SIGLA	F. ANGELOTTI	F. ANGELOTTI	G. FIORINI
REVISIONE 1			
REVISIONE 2			
REVISIONE 3			

NOME FILE

MI010P-PE-G-B-R-4003-C0
Rel Sussidiaria.doc

A TERMINE DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO ELABORATO CON DIVIETO DI RIPRODURLO RENDENDOLO NOTO A TERZI ANCHE PARZIALMENTE SENZA NOSTRA AUTORIZZAZIONE

AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

PROGETTO ESECUTIVO - FASE 2 E CONTESTUALE PERIZIA DI VARIANTE DELLA FASE 1

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE DELLE VARIANTI DI LIVELLO ESECUTIVO

RELAZIONE SUSSIDIARIA

INDICE

1. INTRODUZIONE 4
2. SCENARIO DI ANALISI 5
3. ANALISI AMBIENTALE 7
3.1. Ambiente idrico (acque marino costiere) 7
3.1.1. Moto ondoso 7
3.1.2. Aspetti idrodinamici 11
3.1.3. Capacità di ricambio idrico 33
3.1.4. Circolazioni costiere indotte dal moto ondoso 39
3.1.5. Trasporto solido litoraneo e tendenze evolutive del fondale 43
3.1.6. Qualità delle acque marino costiere 50
3.2. Suolo e sottosuolo 56
3.2.1. Ambiente marino costiero 56
3.3. Paesaggio 61
4. MISURE DI MITIGAZIONE 64
5. ATTIVITA' DI MONITORAGGIO 65
5.1. Monitoraggio dell'evoluzione del litorale 65
6. CONCLUSIONI 68
APPENDICE 70

1. INTRODUZIONE

La presente Relazione è stata redatta a sussidio dello Studio di Impatto Ambientale (SIA) delle varianti di livello esecutivo per poter rispondere ad una delle attenzioni poste dalla Regione Liguria nel Decreto Dirigenziale n° 4604 del 20 Novembre 2013, ovvero di analizzare gli impatti potenziali delle varianti progettuali proposte sulla circolazione delle acque marino costiere e sulla dinamica del litorale tenendo conto dello stato di attuazione delle opere previste nell'Accordo di Programma, sottoscritto in data 15 Settembre 2008 da Regione Liguria, Autorità Portuale di Savona, Provincia di Savona e Comune di Vado Ligure, ed avente l'obiettivo di definire l'assetto definitivo della piastra multifunzionale e delle aree limitrofe.

Tale processo di analisi è stato effettuato esternamente allo SIA in quanto le variazioni nella tempistica di realizzazione delle opere non costituiscono una variante del Progetto Definitivo approvato della piattaforma ed in quanto, ad oggi, il Collegio di Vigilanza dell'Accordo di Programma non ha emanato alcun documento ufficiale relativo a possibili variazioni di tempistica.

In tale contesto viene dunque a mancare il riferimento per poter apportare delle modifiche agli scenari di riferimento (configurazioni della rada portuale) adottati nello Studio che, si sottolinea, fanno parte dello Studio di Impatto Ambientale del Progetto Definitivo approvato dalla Regione Liguria, a conclusione della procedura di valutazione di impatto ambientale (VIA) con Deliberazione della Giunta Regionale n° 1118 del 6 Agosto 2009.

In particolare, come emerso nell'incontro informale avuto con i funzionati del Settore VIA e del Settore Ecosistema Marino Costiero della Regione Liguria in data 27 Gennaio 2014 (Settore Valutazione di Impatto Ambientale e Settore Ecosistema Marino Costiero), le opere dell'Accordo di Programma cui ci si riferisce sono la nuova diga foranea ed il comparto D dello Schema di Assetto Urbanistico (SAU) del Comune di Vado Ligure, cioè la darsena turistica e gli interventi di riqualificazione costiera.

L'Autorità Portuale di Savona, con riferimento ai contenuti del menzionato Decreto 4604/2013, ha comunicato formalmente al soggetto promotore in data 31 Marzo 2014 sia la propria intenzione di mantenere e garantire i tempi di realizzazione della nuova diga foranea sia la plausibilità dell'ipotesi di sfasamento temporale nella realizzazione delle opere del comparto D, pur ribadendo che ad oggi il Collegio di Vigilanza non ha cambiato le previsioni di realizzazione delle opere dell'Accordo.

L'attenzione si sposta dunque all'analisi dei potenziali effetti sulle componenti ambientali di interesse in assenza del comparto D1 ("darsena turistica"), del comparto D2 ("fronte mare di Vado") e del comparto D3 ("area cantieri"). Permangono tuttavia le anticipazioni del comparto D3 ("area cantieri") e del comparto D2 ("fronte mare di Vado"), già incluse nel Progetto Definitivo approvato, ovvero la cassa di colmata e la banchina di servizio di fronte al cantiere navale dell'Eurocraft, necessarie per le fasi di realizzazione della piastra multifunzionale.

A valle del predetto processo di analisi, nella presente Relazione sono state individuate anche le misure di mitigazione che le Autorità e le Amministrazioni coinvolte dovrebbero mettere in atto per contrastare le criticità ambientali riscontrate e sono state individuate le attività di monitoraggio necessarie per controllare l'evoluzione dei parametri di interesse.

Nello scenario di valutazione si considera solo la fase di esercizio, come richiesto dalla Regione in data 27 gennaio 2014.

2. SCENARIO DI ANALISI

Lo scenario di analisi adottato comprende le seguenti opere:

- la piastra multifunzionale nella configurazione di livello esecutivo (Progetto Definitivo approvato più le varianti progettuali proposte);
- la nuova diga foranea;
- il sovrappasso della Via Aurelia;
- il parco ferroviario a servizio del terminal container;
- il casello autostradale e lo svincolo in località "Bossarino".

Sono inoltre compresi il nuovo varco doganale e la nuova viabilità portuale e retro portuale, benché per quest'ultimi esista solo uno sviluppo planimetrico e non ancora documenti progettuali o studi di fattibilità.

Rispetto alla configurazione della rada portuale e delle aree a terra portuali e retro portuali delineata nell'Accordo di Programma, sottoscritto in data 15 Settembre 2008 da Regione Liguria, Autorità Portuale di Savona, Provincia di Savona e Comune di Vado Ligure, avente l'obiettivo di definire l'assetto definitivo della piastra multifunzionale e delle aree limitrofe, manca, dunque, la darsena turistica e gli interventi di riqualificazione costiera di cui al comparto D dello Schema di Assetto Urbanistico del Comune di Vado Ligure.

Permangono tuttavia le anticipazioni del comparto D3 ("area cantieri") e del comparto D2 ("fronte mare di Vado"), già incluse nel Progetto Definitivo approvato, ovvero la cassa di colmata e la banchina di servizio di fronte al cantiere navale dell'Eurocraft, necessarie per recepire i materiali di dragaggio ed evitare interferenze operative, ed i cui profili sono in tutto conformi a quelle definiti nel SAU.

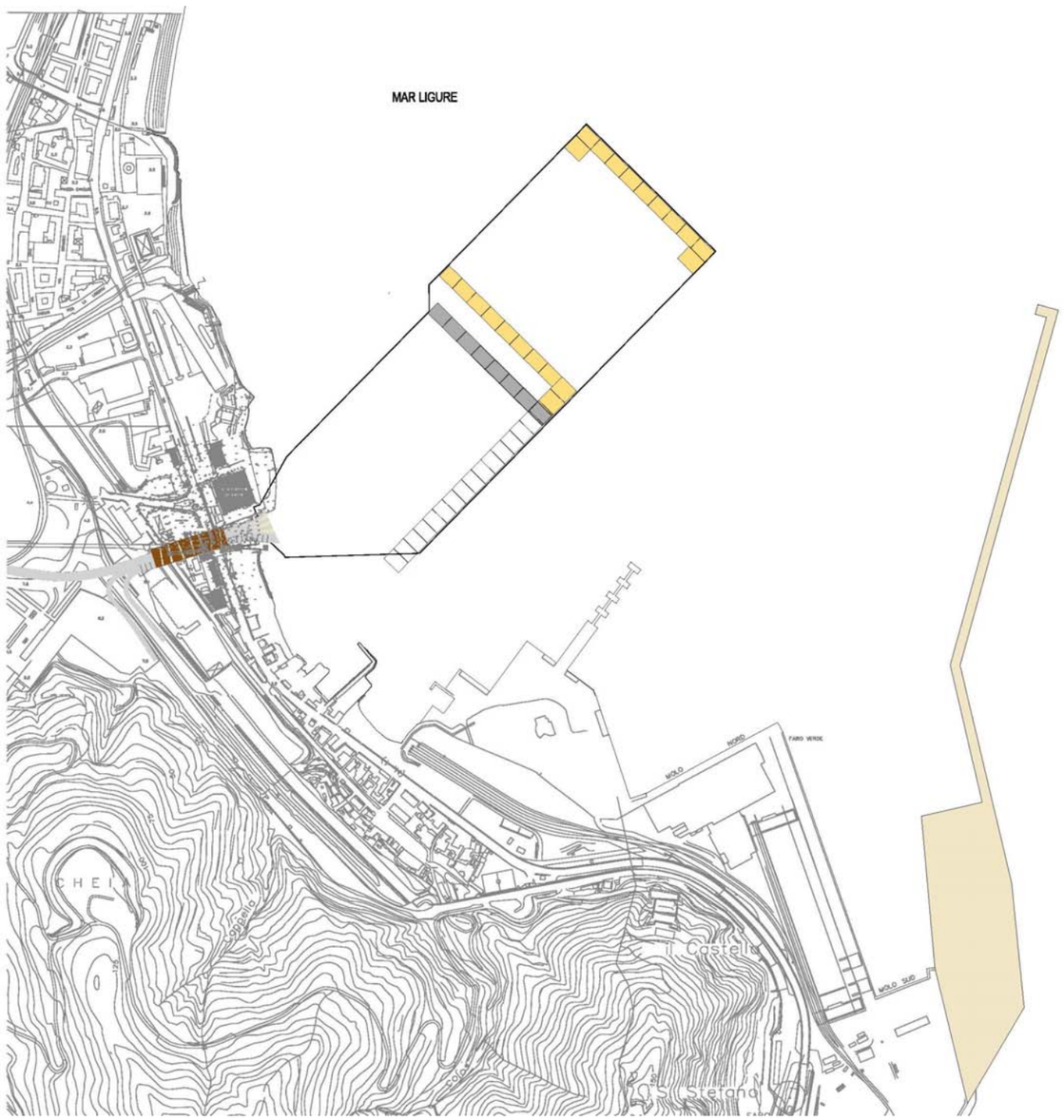


FIGURA 2-1 - SCENARIO DI ANALISI. OLTRE AL LAYOUT GENERALE DELLA PIATTAFORMA, SONO VISIBILI IL SOVRAPPASSO DELLA VIA AURELIA E LA NUOVA DIGA FORANEA COME DA PRP. I CASSONI COLORATI RAPPRESENTANO LE VARIANTI INTRODOTTE NEL PROGETTO ESECUTIVO

3. ANALISI AMBIENTALE

Come già riportato in Introduzione, nella presente relazione si intende rispondere ad una delle attenzioni poste dalla Regione Liguria nel Decreto Dirigenziale n° 4604 del 20 Novembre 2013, ovvero di analizzare gli impatti potenziali delle varianti progettuali proposte sulla circolazione delle acque marino costiere e sulla dinamica del litorale in assenza di quelle opere previste nell'Accordo di Programma che ne costituiscono un potenziale elemento di mitigazione.

L'analisi, dunque sarà condotta con riferimento alle seguenti componenti ambientali: moto ondoso (propagazione sottocosta del moto ondoso, circolazione costiera indotta dal moto ondoso, trasporto solido litoraneo, tendenza evolutiva del litorale), aspetti idrodinamici (caratteristiche idrodinamiche, fenomeni dispersi e tempo di ricambio idrico), qualità delle acque marino costiere, relativamente alla balneazione.

E' stato inoltre ritenuto utile inserire anche la componente Paesaggio in quanto l'assenza del porto turistico e del nuovo fronte urbano induce delle potenziali variazioni nella percezione visiva della piastra e nel suo inserimento nel contento territoriale.

3.1. Ambiente idrico (acque marino costiere)

3.1.1. Moto ondoso

3.1.1.1 Propagazione sottocosta di mareggiate significative

Il campo di moto ondoso sottocosta per alcune mareggiate caratteristiche, per la "configurazione di riferimento in fase di esercizio nell'ipotesi in cui non venga realizzata la darsena turistica", è stato ricavato propagando dal largo verso riva le mareggiate per mezzo del codice di calcolo CMS-Wave. Una descrizione dettagliata del codice di calcolo viene riportata in appendice nel Paragrafo 1.4.1.
Tali mareggiate, che sono eventi rappresentativi della dinamica litoranea locale caratteristica del sito, sono state ricavate a partire dalle condizioni meteomarine nel punto di output "P" e corrispondono a condizioni di moto ondoso relativamente severe (ma non estreme), caratterizzate da durata media annua pari a 1g/anno e 5 gg/anno (cfr paragrafo 1.2.5 in appendice). Per una dettagliata descrizione delle modalità di definizione del dominio di calcolo utilizzato per le propagazioni sottocosta e delle condizioni di input assegnate al modello si rimanda al paragrafo 1.4.4 in appendice. Di seguito nella Tabella 3-1 si riportano sinteticamente le caratteristiche dei 6 test eseguiti. Il dominio di calcolo, così come definito in appendice, è stato modificato inserendo la configurazione e le opere relative alla variante in fase di esercizio, in assenza della darsena turistica.

TABELLA 3-1 - CONDIZIONI DI INPUT IMPOSTE NEI MODELLI

				CARATTERISTICHE NEL PUNTO P			VENTO	
TEST	**Mareggiate**	**Freq. (gg/anno)**	**T.Segno**	**H_S (m)**	**T_P (s)**	**Dir (°N)**	**Velocità (m/s)**	**Dir (°N)**
1	Levante	1	-	1.64	6.5	75	8.7	75
2	Scirocco	1	-	1.93	6.8	145	9.4	145
3	Mezzogiorno	1	-	2.22	7.8	185	11.8	195
4	Levante	5	piena	0.93	5.2	75	6.0	75
5	Scirocco	5	piena	1.17	5.6	145	6.8	145
6	Mezzogiorno	5	piena	1.61	6.8	185	9.5	195

I risultati ottenuti dalla propagazione del moto ondoso sottocosta sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine seguenti (da Figura 3-1 a Figura 3-6).
Le figure rappresentano l'altezza d'onda significativa, in termini di gradazione cromatica, mentre le direzioni locali dell'onda sono indicate mediante vettori il cui modulo è proporzionale all'altezza d'onda significativa.

I risultati delle propagazioni sottocosta mostrano che l'elemento di maggior rilievo risulta essere il nuovo molo del porto di Vado, il quale determina un'importante diffrazione delle mareggiate, generando un notevole abbattimento delle altezze d'onda su un tratto piuttosto esteso del litorale, in particolare per le mareggiate di Scirocco e Mezzogiorno. La presenza della nuova piastra contribuisce ad abbattere sensibilmente l'altezza d'onda significativa sottocosta, e conseguentemente l'energia del moto ondoso, nel tratto più meridionale del litorale.

Le mareggiate di Levante (TEST 1 e TEST 4) giungono sottocosta con altezze d'onda rilevanti nel solo tratto più a Nord, fino al tratto centrale del litorale (indicativamente fino a distanze dell'ordine dei 4÷500 m a Nord della foce del Segno), mentre risulta progressivamente più protetto il litorale più a Sud. A partire dal terrapieno del campo da basket e procedendo verso Sud, fino alla foce del Segno, l'altezza d'onda residua si riduce ulteriormente, fino ad arrivare a valori praticamente nulli oltre la foce.

Le mareggiate di Scirocco (TEST 2 e TEST5), risentono in misura maggiore rispetto a quelle di Levante della presenza del nuovo molo e giungono sottocosta, nella zona della piastra multifunzionale, con altezze d'onda già fortemente attenuate. I cassoni di testata della piastra prima, e il terrapieno, poi, abbattono ulteriormente l'altezza delle onde in grado di arrivare sul litorale. L'attenuazione dovuta al molo si fa sentire a partire dalla foce del Quiliano; le altezze d'onda si abbassano sotto il metro già in corrispondenza dell'area camper per poi attenuarsi ulteriormente verso Sud, annullandosi alla foce del Segno.

Le mareggiate di Mezzogiorno (TEST3 e TEST6) sono caratterizzate da direzione di provenienza molto inclinata rispetto alla normale al litorale; di conseguenza risulta ancora più evidente l'effetto della diffrazione dovuta al prolungamento del molo di Vado che abbatte l'altezza d'onda significativa sottocosta, tanto da rendere sostanzialmente ininfluente la presenza della piastra. I valori di altezza d'onda sono praticamente nulli in un tratto di litorale piuttosto esteso, che si estende da Nord verso Sud a partire dall'area camper fino alla radice del terrapieno della piastra.

Mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 1 giorno

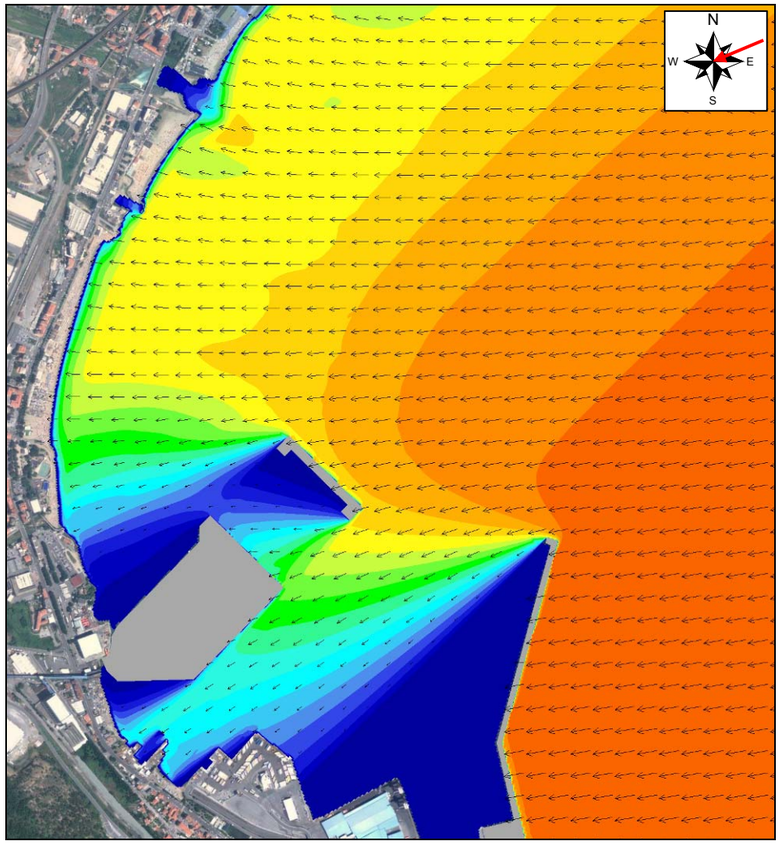


FIGURA 3-1 - TEST1 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
H_S = 1.64 M - T_P = 6.50 S - DIR = 75°N

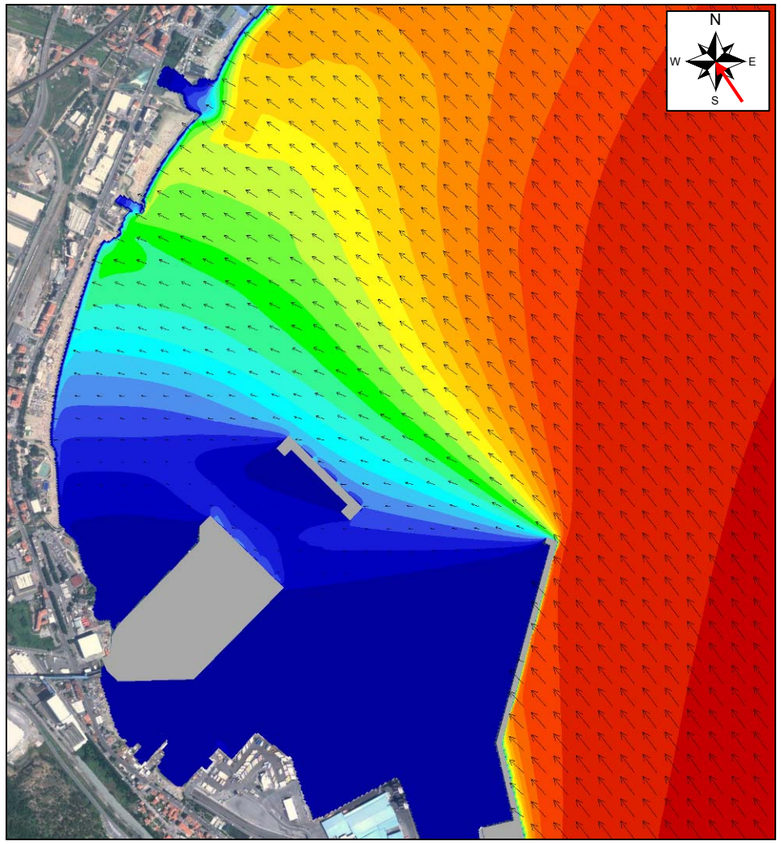


FIGURA 3-2 - TEST2- PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
H_S = 1.93 M - T_P = 6.80 S - DIR = 145°N

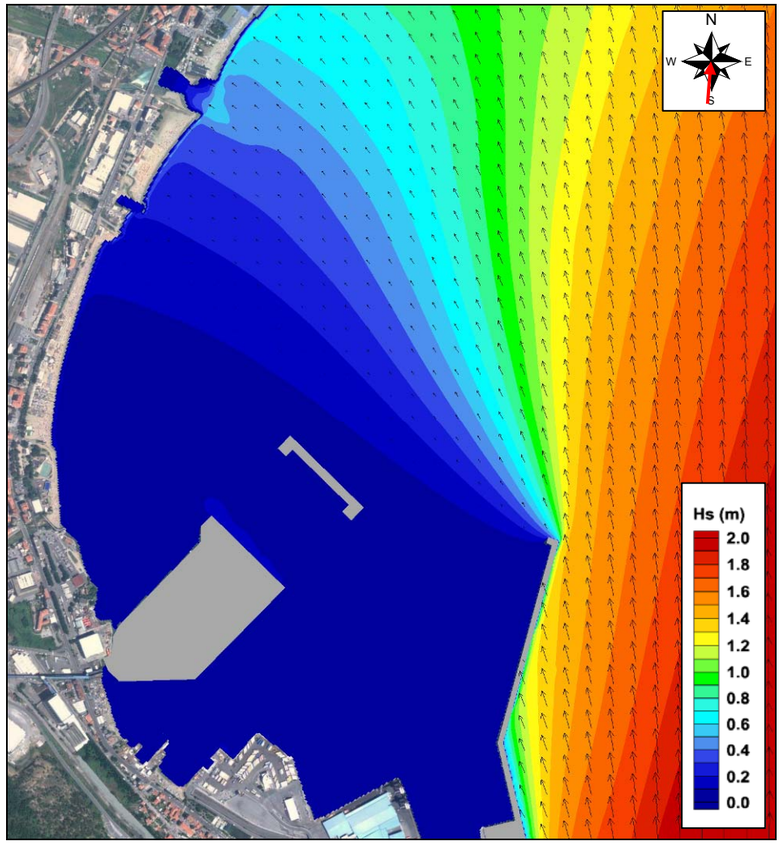


FIGURA 3-3 - TEST3- PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
H_S = 2.22 M - T_P = 7.80 S - DIR = 185°N

Mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 5 giorni e piena del Torrente Segno concomitante

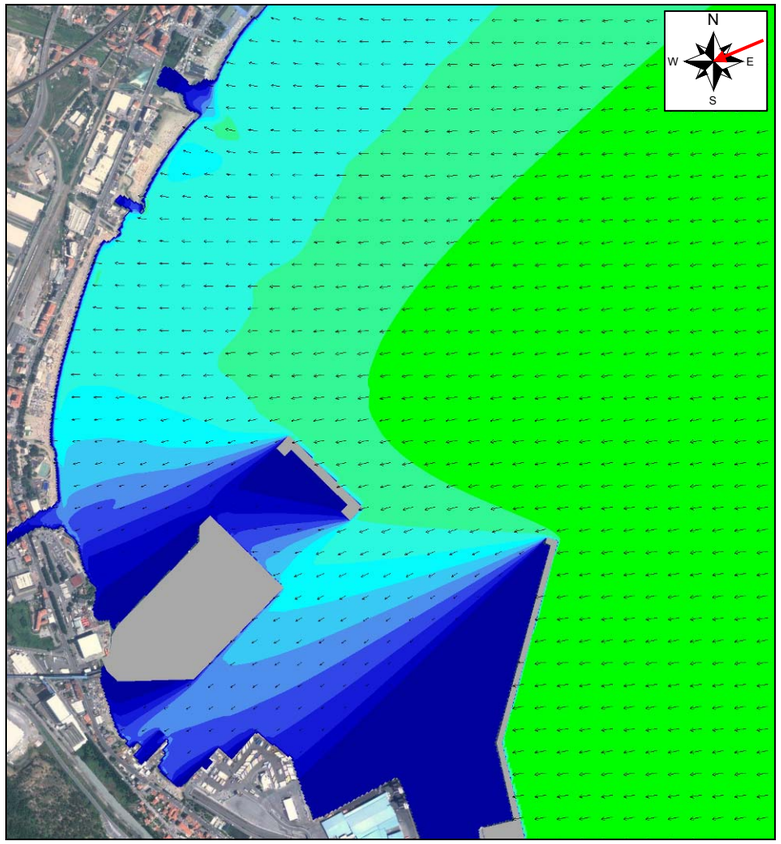


FIGURA 3-4 - TEST4- PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
H_S = 0.93 M - T_P = 5.20 S - DIR = 75°N

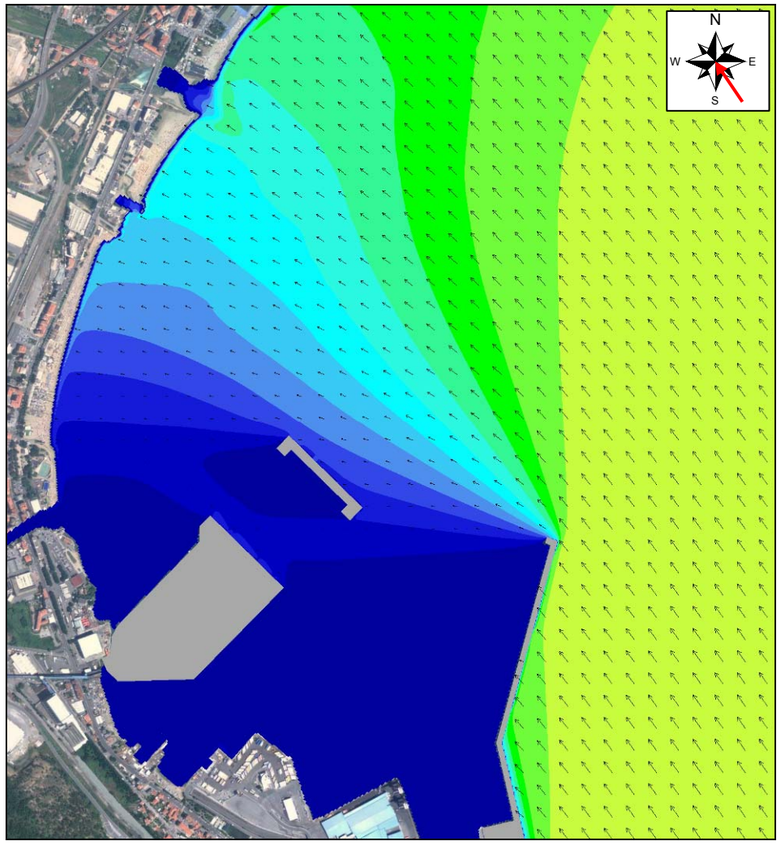


FIGURA 3-5 - TEST5 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
H_S = 1.17 M - T_P = 5.60 S - DIR = 145°N

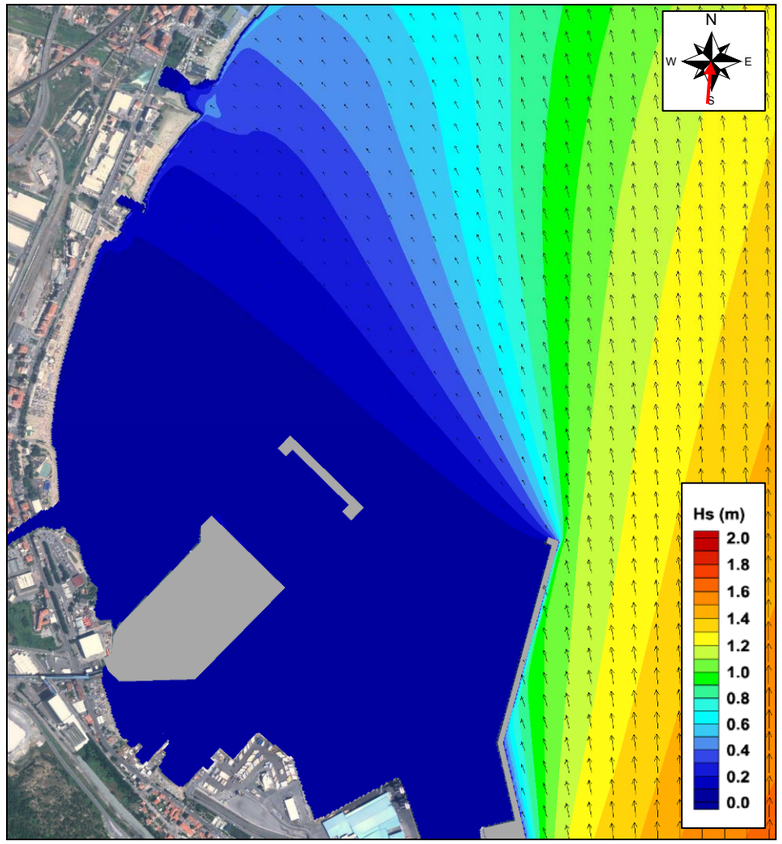


FIGURA 3-6 - TEST6 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
H_S = 1.61 M - T_P = 6.80 S - DIR = 185°N

3.1.2. Aspetti idrodinamici

La valutazione degli effetti indotti dagli interventi previsti sugli aspetti idrodinamici e dispersivi del sistema costiero di Vado Ligure è stata condotta con l'ausilio di modelli numerici in grado di determinare le caratteristiche idrodinamiche e la capacità di ricambio idrico dell'area in esame, importante parametro nella valutazione degli effetti di opere marittime lungo il litorale.

Analogamente al moto ondoso, la definizione delle caratteristiche idrodinamiche è stata condotta considerando l'intera baia di Vado Ligure (da Capo Vado sino al promontorio di Savona).

Il dominio di calcolo è stato inoltre ampliato fino ad includere il tratto di costa che da Capo Vado si estende sino all'isola di Bergeggi, e, a mare, è stata considerata come limite la batimetrica -700 m s.l.m.m. al fine di non risentire delle condizioni al contorno nell'area di interesse.

È stato utilizzato un modello matematico a maglia curvilinea con una risoluzione planimetrica adeguata ai fenomeni oggetto di studio (idrodinamica locale e dispersione di traccianti conservativi) già utilizzato nell'ambito dello Studio di Impatto Ambientale in riferimento al Progetto Definitivo della Piastra multifunzionale .

Il modello adottato, Delft3D-FLOW, è stato sviluppato dal laboratorio idraulico olandese WL|Delft Hydraulics (ora Deltares) ed è stato testato e continuamente aggiornato per rispondere alle diverse richieste.

In questo paragrafo vengono riportati i risultati relativi alle analisi di dettaglio che hanno consentito di analizzare il comportamento idrodinamico che si verrà ad instaurare in seguito alla realizzazione delle opere previste nella variante di Progetto Esecutivo nell'ipotesi che non venga realizzata la darsena turistica, considerando diverse condizioni di marea e meteorologiche.

Nella Figura 3-7 viene riportata la griglia a maglia curvilinea definita per schematizzare la zona del porto di Vado Ligure mentre la batimetria della schematizzazione della configurazione analizzata viene presentata nella Figura 3-8.

Le forzanti meteo-marine applicate per le simulazioni sono state:
- Marea sinusoidale con periodo di 12 ore ed escursione di 20 cm (+/- 10 cm l.m.m.), applicata al limite esterno del dominio di calcolo
- Corrente litoranea parallela alla linea di costa e rivolta in direzione SO con intensità variabile fino a 10 cm/s nella zona più esterna del dominio di calcolo
- Vento: quando richiesto per i diversi scenari, applicato uniforme sul dominio di calcolo e costante nel tempo sia in direzione che in intensità.

Sono stati considerati i seguenti venti:
- Vento da Nord-Est: intensità di 7 m/s
- Vento da Sud-Est: intensità di 7 m/s
- Vento da Nord-Ovest: intensità di 10 m/s

Per una dettagliata descrizione delle modalità di definizione della schematizzazione utilizzata per le simulazioni idrodinamiche e delle condizioni al contorno assegnate al modello si rimanda al appendice di questo documento.



FIGURA 3-7 - DETTAGLIO DELLA MAGLIA DI CALCOLO NELLA ZONA DEL PORTO DI VADO LIGURE

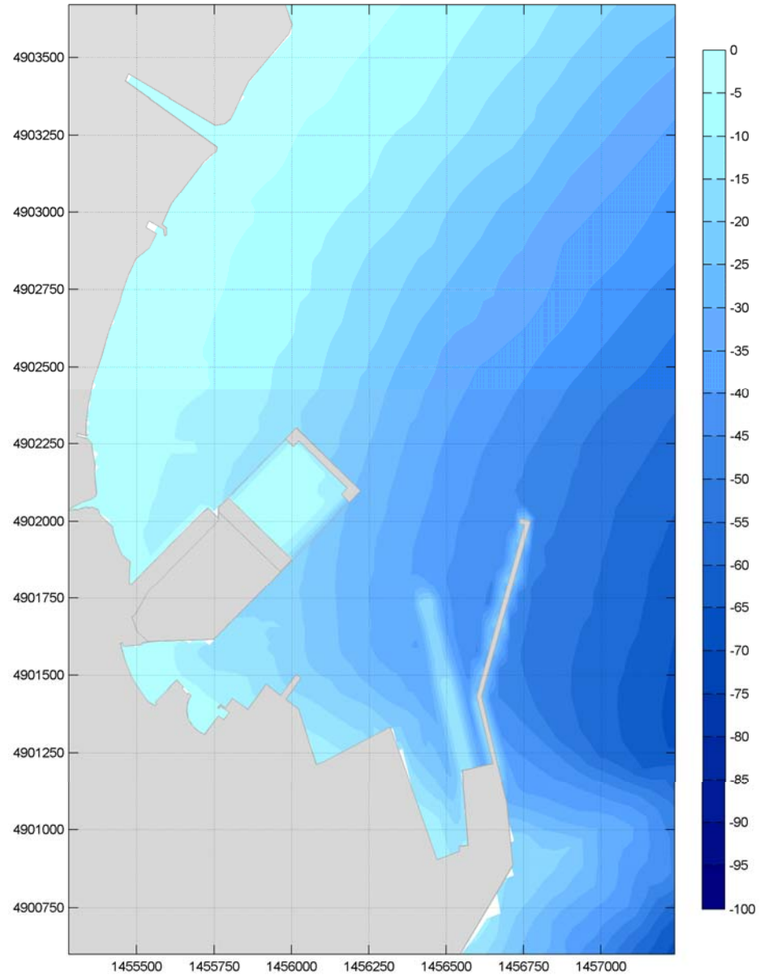


FIGURA 3-8 - BATIMETRIA (M S.M.M.) DELLA SCHEMATIZZAZIONE CON LE OPERE A MARE PREVISTE NELLA CONFIGURAZIONE DI VARIANTE DI PROGETTO DEFINITIVO SENZA LA REALIZZAZIONE DELLA DARSENA TURISTICA.

Nella Tabella 3-2 si riportano le caratteristiche delle simulazioni effettuate.

TABELLA 3-2 - FORZANTI METEOMARINE CONSIDERATE PER LE SIMULAZIONI IDRODINAMICHE

						VENTO	
Run	**Marea (cm)**	**Corrente (cm/s)**	**T.Segno (m^3/s)**	**T.Letimbro (m^3/s)**	**T.Quiliano (m^3/s)**	**Velocità (m/s)**	**Dir (°N)**
1	±10	2 - 10	10	14	15	-	-
2	±10	2 - 10	10	14	15	7	45
3	±10	2 - 10	10	14	15	7	135
4	±10	2 - 10	10	14	15	10	315

I risultati ottenuti sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine seguenti (da Figura 3-9 a Figura 3-22).

3.1.2.1 Caratteristiche idrodinamiche

Condizioni di calma di vento

La marea che si è considerata (± 10 cm rispetto al medio mare) determina dei campi di velocità estremamente contenuti.

Nella Figura 3-9viene riportato il campo di moto in condizione di massimo flusso mentre nella Figura 3-10 viene riportato il campo di moto in condizione di massimo riflusso.

Come si può notare, escludendo le foci dei fiumi dove le velocità sono determina-te dall'acqua dolce in fase di scarico, le velocità in tutta la zona si mantengono al di sotto dei 2 cm/s, quindi molto basse. Questo fatto avrà una notevole influenza sulla dispersione in quanto la componente avvettiva della stessa è da ritenere sostanzialmente non influente e la dispersione avviene principalmente in funzione dei gradienti di concentrazione.

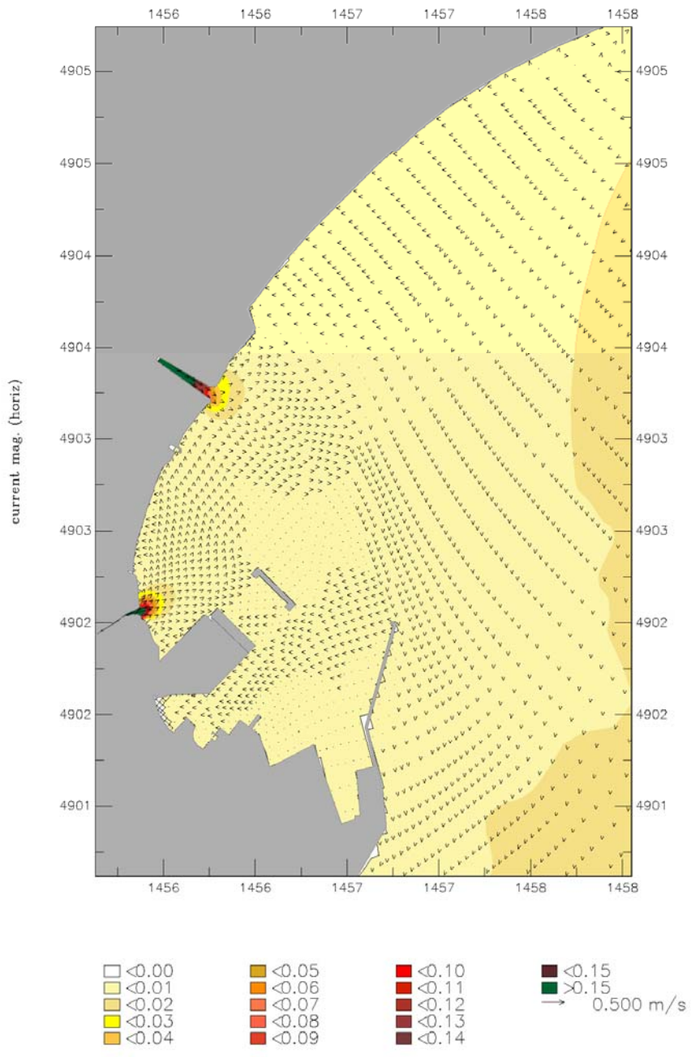


FIGURA 3-9 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) MEDIE SULLA PROFONDITÀ IN CONDIZIONI DI CALMA DI VENTO (MASSIMO FLUSSO)

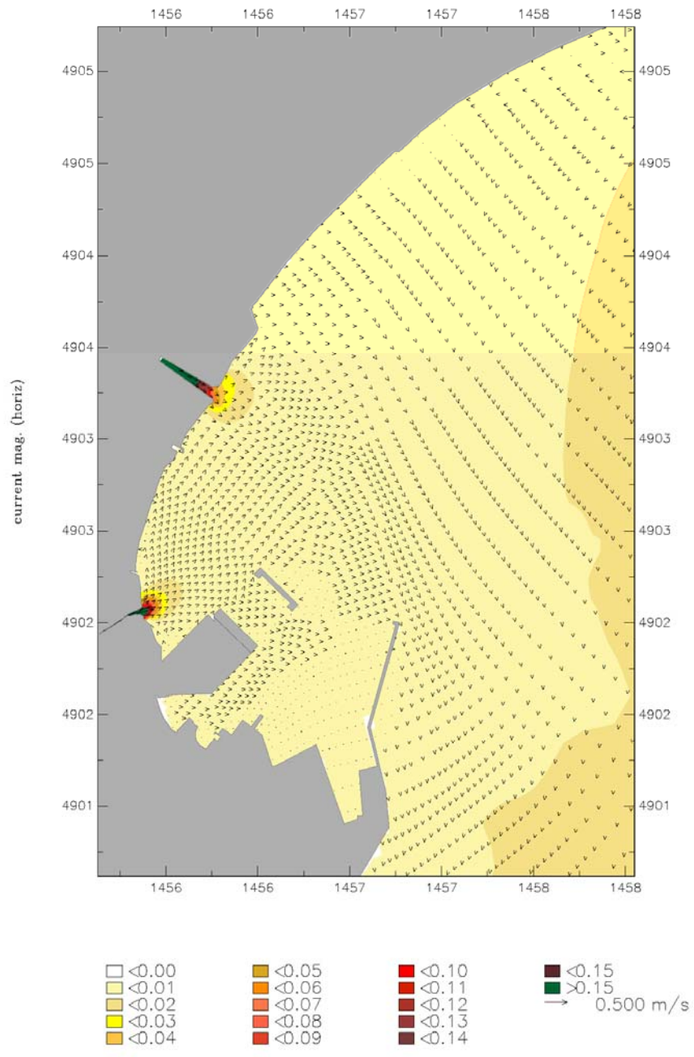


FIGURA 3-10 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) MEDIE SULLA PROFONDITÀ IN CONDIZIONI DI CALMA DI VENTO (MASSIMO RIFLUSSO)

Condizione di vento da Nord Est

In questo caso è stato considerato come forzante aggiuntiva rispetto a quelle utilizzate nello scenario precedente, un vento da Nord-Est con intensità costante di 7 m/s, uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo e costante per l'intera durata della simulazione.

La presenza di questo campo di vento non induce significative alterazioni al regime idrodinamico costiero generale; le velocità medie ed il sistema circolatorio costiero mantengono sostanzialmente lo stesso andamento caratteristico dello scenario senza vento.

Questo fatto non sorprende ed è coerente con tutte le considerazioni precedenti sul modello e sul sito in esame: la circolazione idrodinamica in questa regione, infatti, è regolata dalle forzanti marine ed in particolar modo dalla presenza di un sistema di correnti anticicloniche aderenti alla costa, mentre gli effetti delle correnti di trascinamento dovute al vento sono apprezzabili solo in presenza di fondali poco profondi ed in zone particolarmente esposte al vento considerato.

Dall'analisi dei campi di moto, riportati Figura 3-11 e Figura 3-12, è possibile osservare la formazione di una corrente di superficie che si sviluppa lungo la linea di costa in direzione Sud-Ovest e che raggiunge una velocità massima di 5-6 cm/s.

Questa corrente, tuttavia, non interessa l'area portuale in nessuna delle due configurazioni in esame essendo questa ben protetta e delimitata dai moli e dalle nuove strutture portuali. All'interno del bacino, quindi, le velocità sono del tutto trascurabili.

Questo effetto tende ad annullarsi negli strati immediatamente più profondi dove la marea e le correnti litoranee diventano preponderanti per la determinazione del campo di velocità.

Il vento, infatti, ha un effetto molto modesto se si considera la distribuzione delle velocità mediate sulla profondità come dimostrato nella Figura 3-13 in fase di massimo flusso e nella Figura 3-14 in fase di riflusso.

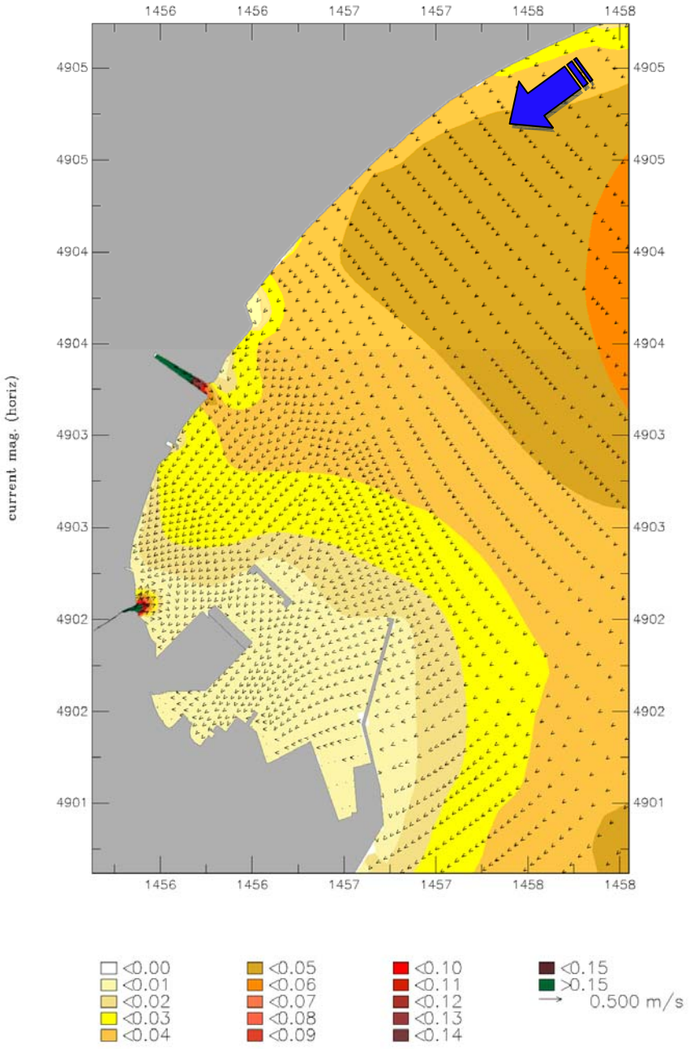


FIGURA 3-11 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST (MASSIMO FLUSSO)

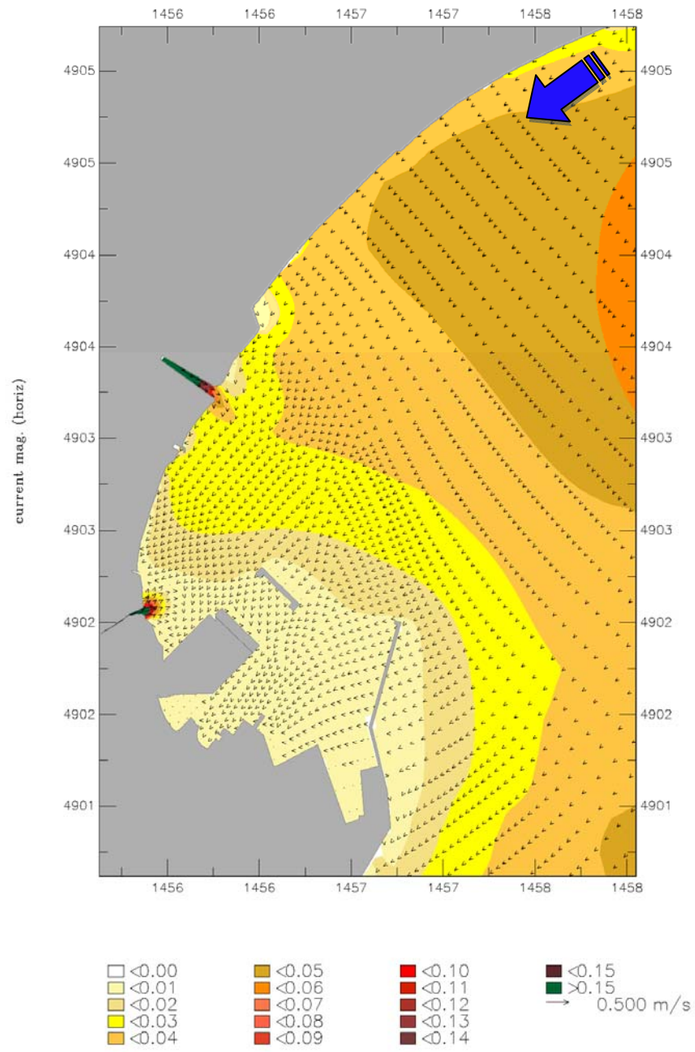


FIGURA 3-12 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST (MASSIMO RIFLUSSO)

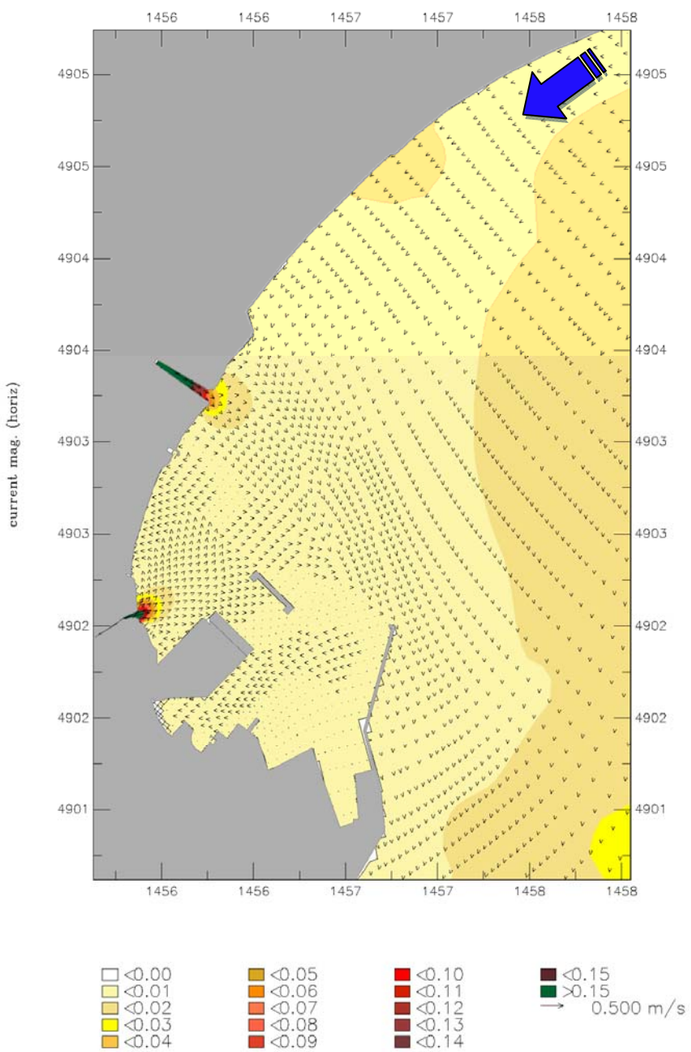


FIGURA 3-13 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST - (MASSIMO FLUSSO)

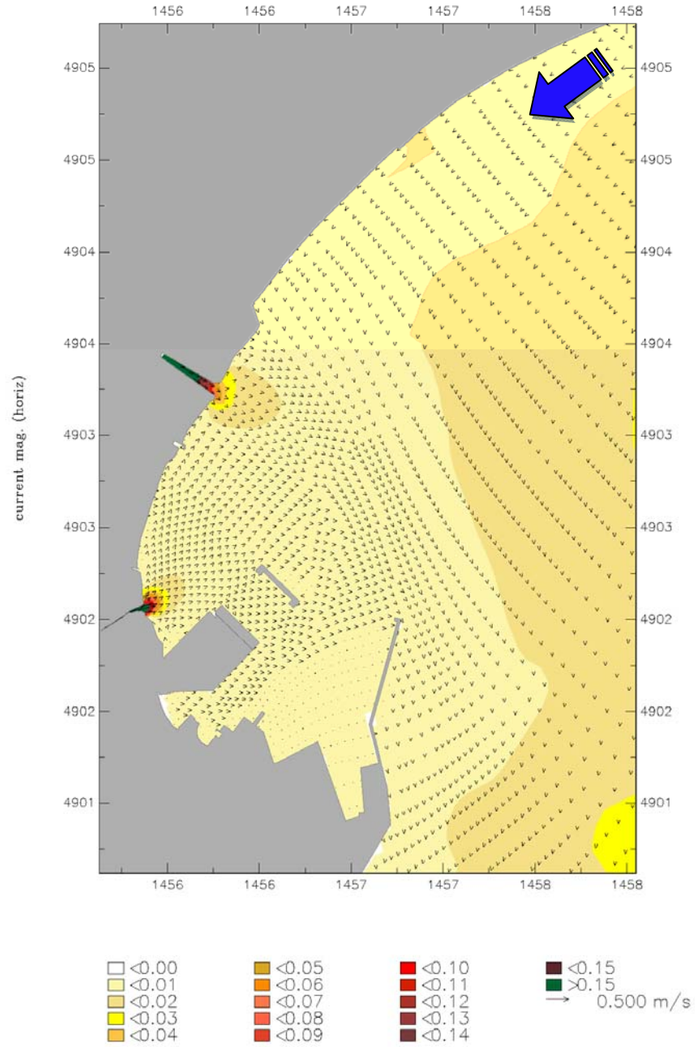


FIGURA 3-14 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST - (MASSIMO RIFLUSSO)

Condizione di vento da Sud Est

In questo scenario è stato considerato, oltre alla marea e alle correnti litoranee, anche un vento da Sud-Est con intensità costante di 7 m/s uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo e costante per l'intera durata della simulazione.

Anche per questo caso valgono le stesse considerazioni esposte per il caso precedente.

La presenza di questo campo di vento non induce significative alterazioni al regime idrodinamico costiero generale; le velocità medie ed il sistema circolatorio costiero permangono molto simili a quelli osservati nei casi precedenti.

In Figura 3-15 e Figura 3-16 è possibile osservare la presenza di correnti più intense negli strati superficiali che raggiungono le velocità di circa 4 cm/s e risulta abbastanza evidente l'effetto schermante del nuovo molo nella situazione finale, che tende ad deviare le correnti superficiali provenienti da Sud-Est e a proteggere il bacino del porto mantenendo le velocità all'interno estremamente basse.

Come già detto precedentemente, questo effetto tende ad annullarsi negli strati immediatamente più profondi e scompare quasi del tutto se si considera la distribuzione delle velocità mediate sulla profondità (Figura 3-17 in fase di massimo flusso e Figura 3-18 in fase di riflusso).

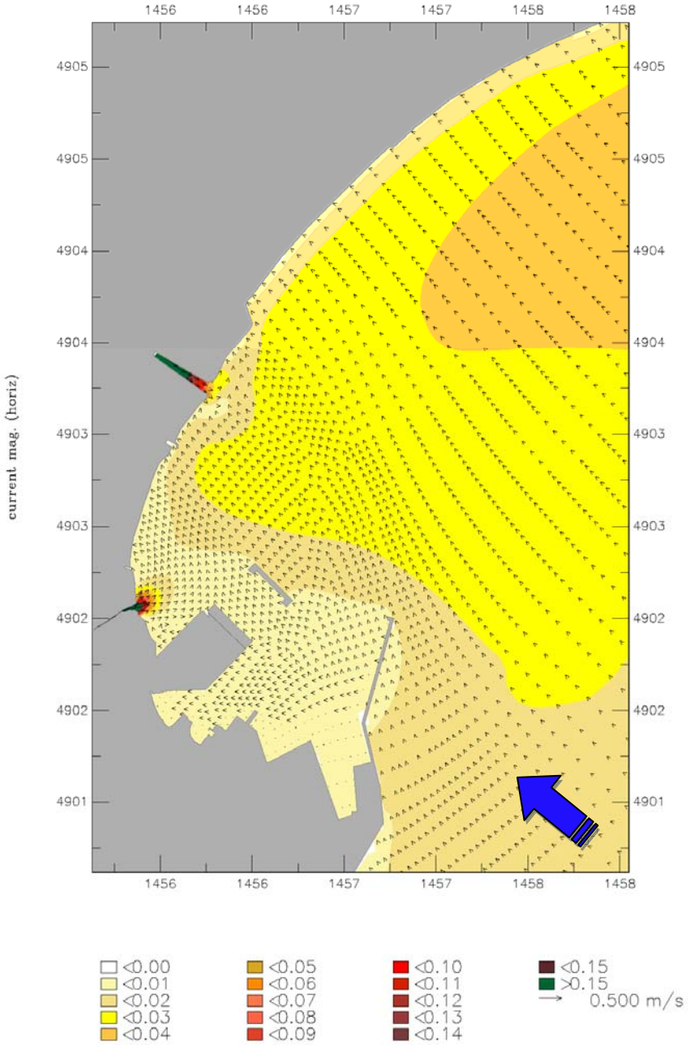


FIGURA 3-15 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST (MASSIMO FLUSSO)

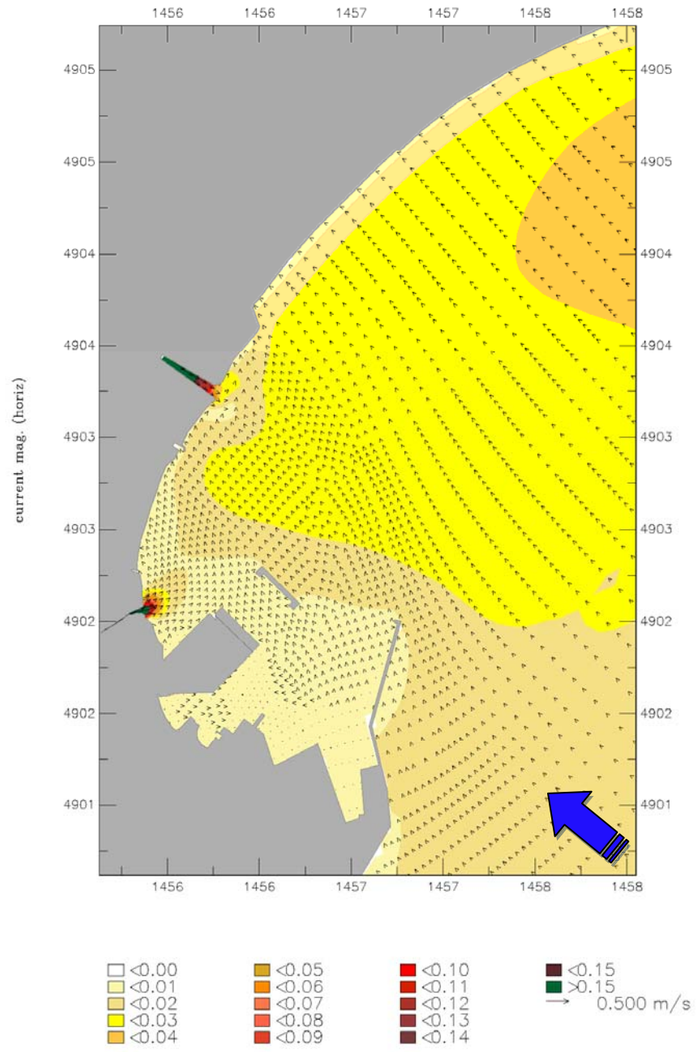


FIGURA 3-16 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST (MASSIMO RIFLUSSO)

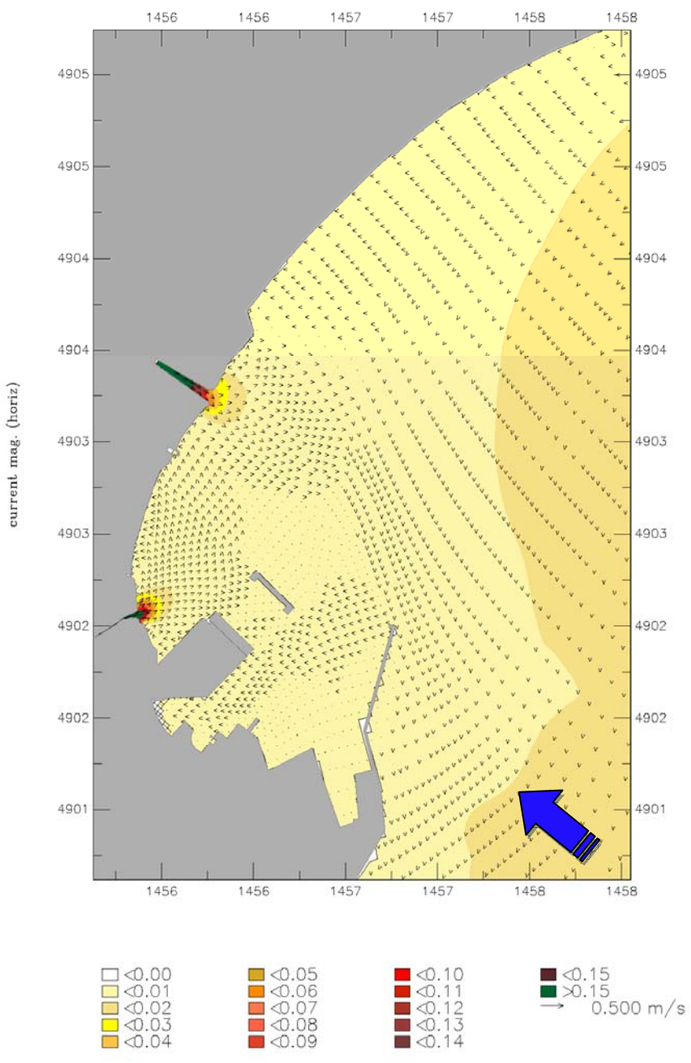


FIGURA 3-17 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST - (MASSIMO FLUSSO)

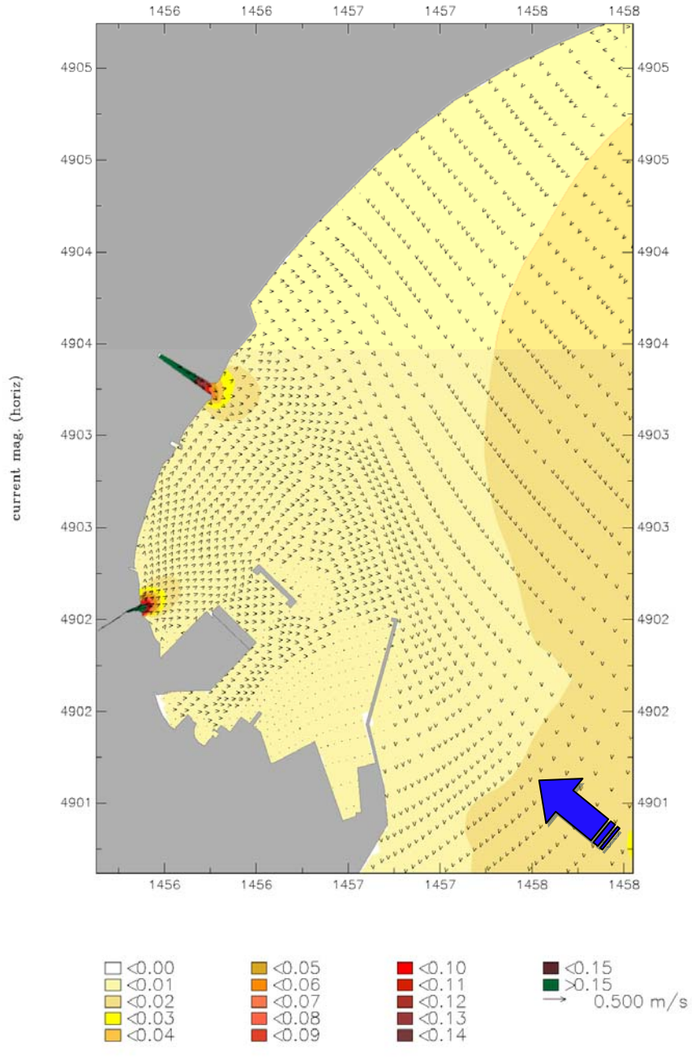


FIGURA 3-18 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST - (MASSIMO RIFLUSSO)

Condizione di vento da Nord Ovest

In questo scenario è stato considerato, oltre alla marea e alle correnti litoranee, anche un vento da Nord-Ovest con intensità costante di 10 m/s uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo e costante per l'intera durata della simula-zione.

In Figura 3-19 e Figura 3-20, è possibile osservare come la presenza di questo campo di vento più intenso e rivolto verso il mare aperto induca una corrente superficiale abbastanza omogenea, con velocità dell'ordine di 5-10 cm/s su tutta l'area costiera, ad eccezione, della zona portuale dove la circolazione è limitata per la presenza dei moli.

A tal proposito, è altresì evidente l'effetto della nuova diga foranea nella configurazione finale che tende a deviare le correnti superficiali ed a mantenere le velocità basse all'interno del bacino portuale.

Questo effetto tende ad annullarsi negli strati immediatamente più profondi dove la marea e le correnti litoranee diventano preponderanti per la determinazione del campo di velocità. Il vento, infatti, ha un effetto molto modesto se si considera la distribuzione delle velocità mediate sulla profondità come dimostrato nella in Figura 3-21 fase di massimo flusso e nella Figura 3-22 in fase di riflusso.

Da un punto di vista più generale anche questo vento non influenza in modo significativo il regime idrodinamico costiero che rimane molto simile a quello osservato nello scenario in condizione di calma di vento.

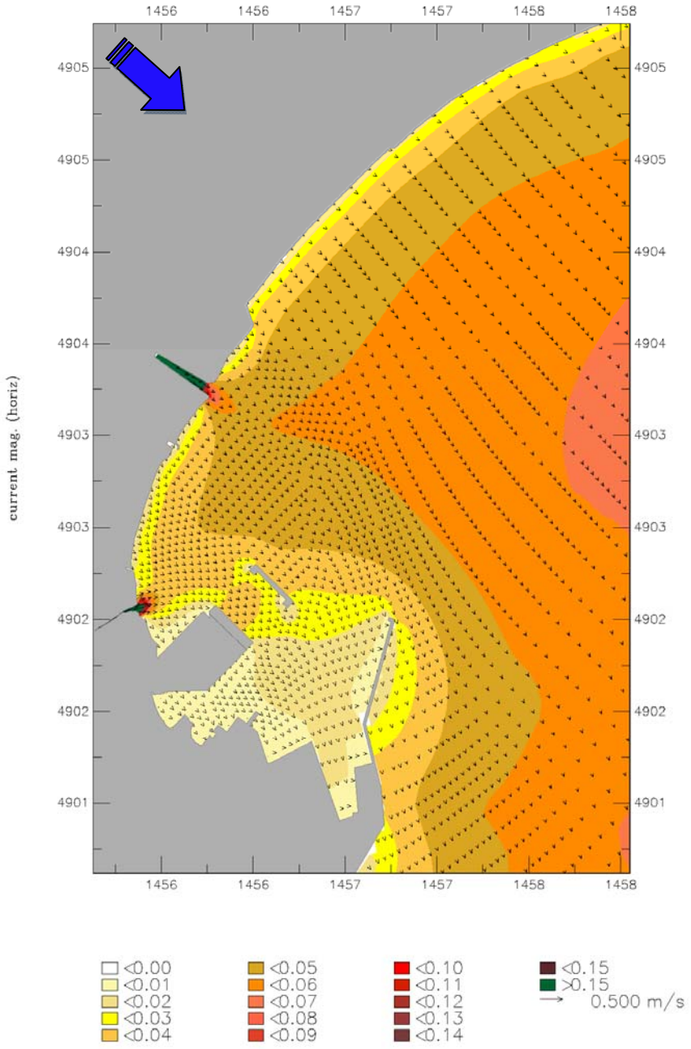


FIGURA 3-19 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST (MASSIMO FLUSSO)

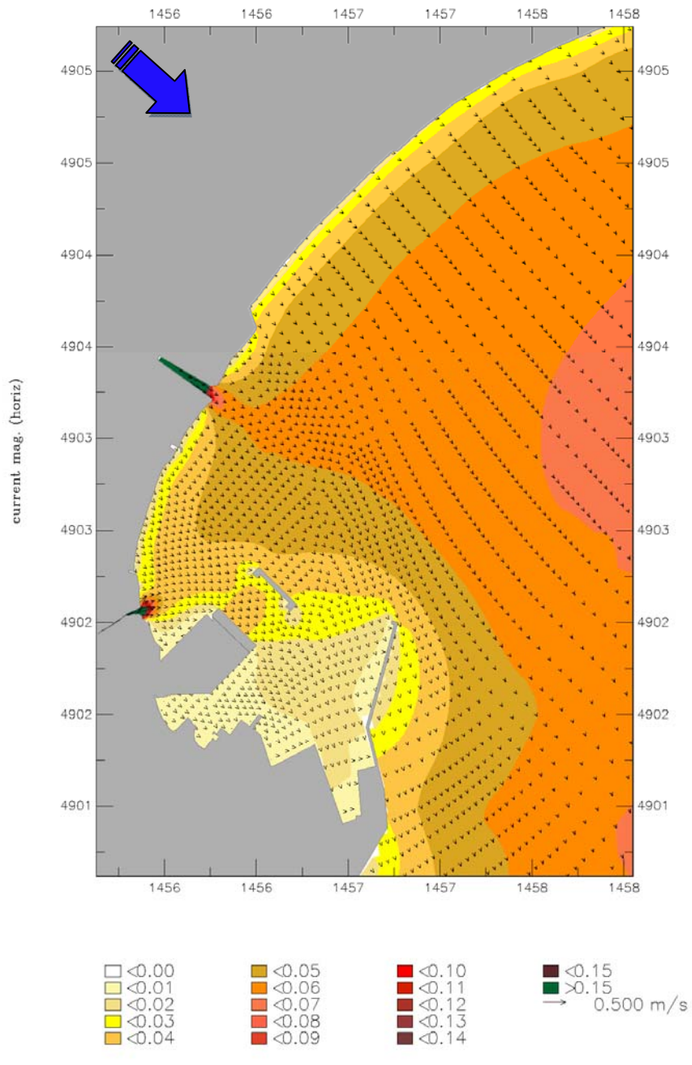


FIGURA 3-20 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST (MASSIMO RIFLUSSO)

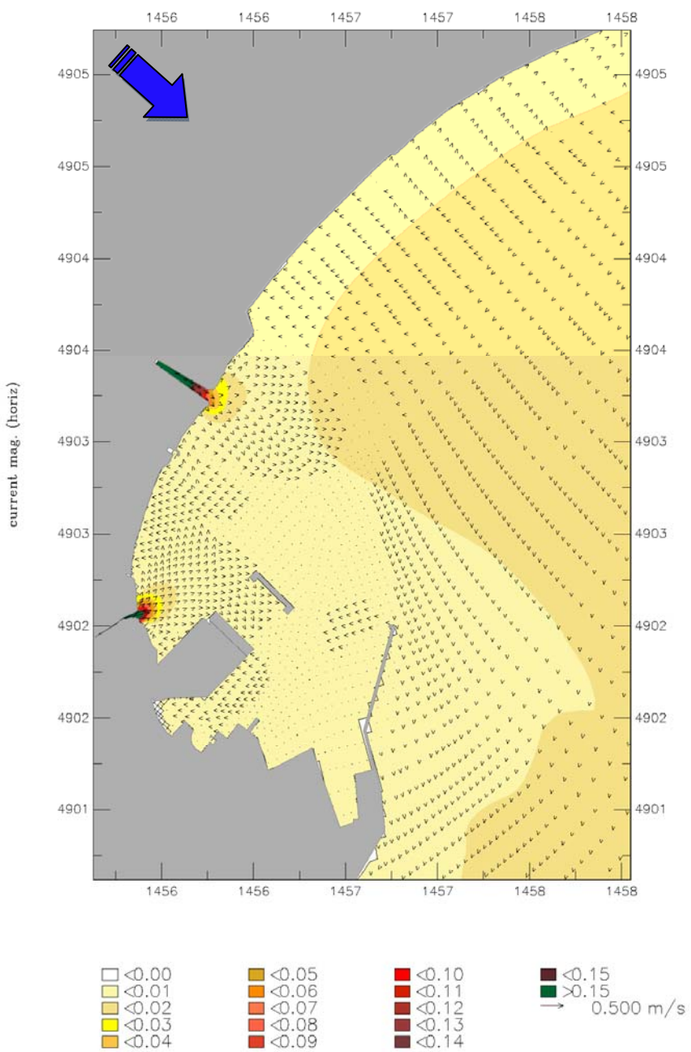


FIGURA 3-21 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST - (MASSIMO FLUSSO)

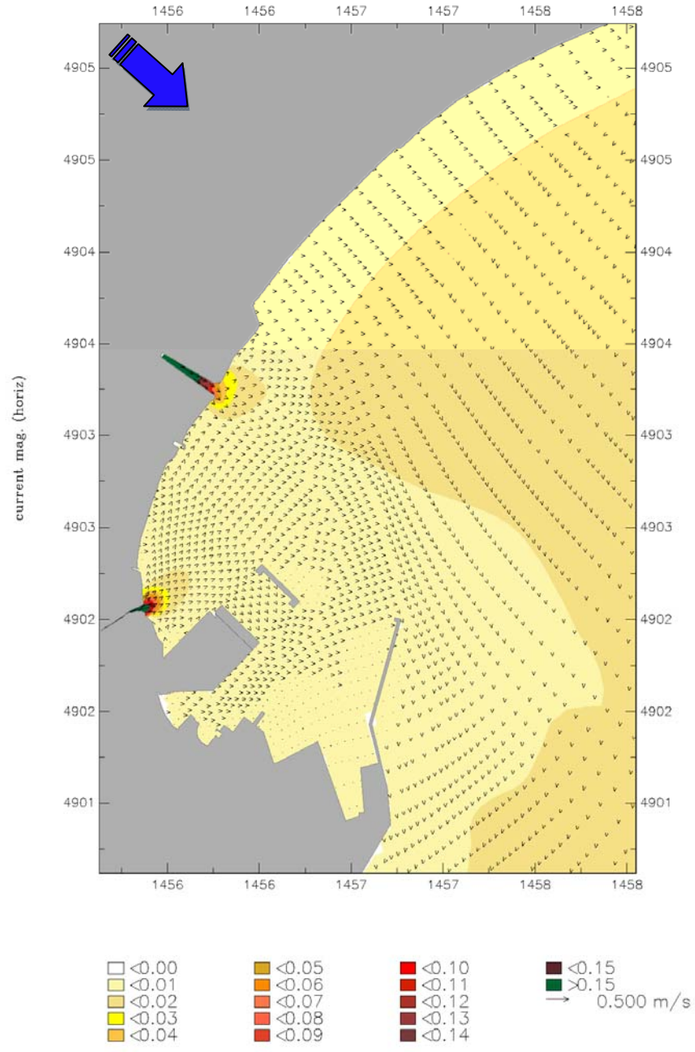


FIGURA 3-22 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST - (MASSIMO RIFLUSSO)

3.1.2.2 Caratteristiche dispersive

Gli indicatori utilizzati per analizzare le caratteristiche dispersive nel tratto litoraneo compreso tra la rada di Vado e la foce del torrente Letimbro nella configurazione di variante di progetto esecutivo senza la realizzazione del porto turistico, sono basati sulle analisi modellistiche della dispersione di un tracciante di origine torrentizia in grado di immettere nel sistema sostanze potenzialmente inquinanti e, quindi, nocive per le aree litoranee di maggiore pregio e ed interesse turistico.

Al fine di ottenere una valutazione di tipo parametrico sulla dispersione delle acque dei torrenti che sfociano nella baia di Vado Ligure, è stato assunto che ogni torrente recapitasse in mare acqua caratterizzata dalla medesima concentrazione di un tracciante passivo, ovvero di una sostanza perfettamente solubile in acqua che non subisce trasformazioni né chimiche né fisiche mentre si disperde nella zona.

Nelle simulazioni sono stati considerati tre traccianti diversi, per ciascuno dei tre torrenti con le medesime caratteristiche e con una concentrazione allo scarico pari a 1 g/m³. In questo modo, avendo assunto uno scarico unitario alla sorgente, la concentrazione risultante C(x,t) in un determinato punto dello spazio all'istante temporale t rappresenta anche il rapporto di diluizione tra la concentrazione C(x,t) la concentrazione C_0 al rilascio ed indica quindi l'abbattimento rispetto al carico iniziale immesso nel sistema.

Gli scenari idrodinamici e di deflusso adottati nelle simulazioni, sono quelli già considerati per la definizione delle caratteristiche idrodinamiche.

<u>Condizioni di calma di vento</u>

Per questo scenario l'idrodinamica dell'area di studio è determinata esclusivamente dall'oscillazione periodica della marea e dalla presenza della corrente litoranea.

In Figura 3-23 si riporta, per ogni singolo corso d'acqua, la distribuzione della concentrazione del tracciante considerato.

Lo scarico del Torrente Letimbro interessa un'area di litorale attorno alla sua foce dove si disperde in modo sostanzialmente simmetrico. A maggiori distanze, invece, si può osservare come la presenza di una corrente litoranea, seppure molto debole, tenda a deformare il "plume" nella direzione Sud-Ovest. E' inoltre da rilevare come il tracciante rilasciato dal Torrente Letimbro non vada ad interessare in modo significativo la zona portuale.

Il Torrente Quiliano, ha un comportamento simile a quello del Torrente Letimbro: il "plume" di dispersione si manifesta in modo abbastanza simmetrico nell'intorno del punto di immissione. Le concentrazioni del tracciante tendono rapidamente a decrescere sotto la soglia di 0.05 g/m³ rispetto alla concentrazione iniziale nel raggio di alcune centinaia di metri dal punto di rilascio. In prossimità della foce del Segno, nell'area dove è prevista la realizzazione del nuovo porto turistico, le concentrazioni del tracciante sono nell'ordine di qualche percentuale mentre all'interno della rada assumono valori inferiori, nell'ordine di 0.01 g/m³.

Il Torrente Segno, data la morfologia della zona in cui sfocia e la vicinanza alla zona portuale è quello che manifesta maggiori livelli di concentrazione nella area portuale e, in particolare, nell'area litoranea a nord della foce.

Dai risultati delle analisi è possibile osservare che il "plume" del tracciante rimane tendenzialmente confinato in prossimità della foce e tende a diffondersi maggiormente verso nord mentre verso sud il trasporto è ostacolato dalla presenza della radice della piattaforma. In questa zona le concentrazioni variano nell'intervallo 0.2 - 0.3 g/m³. Il tracciante tende comunque a disperdersi rapidamente e a scendere nel raggio

di qualche centinaio di metri sotto il livello del 0.05 g/m³. Nella rada di vado, infine, le concentrazioni osservate sono nell'ordine di 0.01 - 0.02 g/m³.

In Figura 3-24 si riporta la distribuzione della concentrazione del tracciante conservativo considerato analizzando il contributo di tutti tre i corsi d'acqua contemporaneamente.

Si può notare come l'area di influenza di ogni singolo torrente si sovrapponga con quella degli altri, determinando sotto costa un'area con valori di concentrazione variabili; le massime concentrazioni rimangono comunque in corrispondenza delle tre foci e nelle aree limitrofi.

Mentre il Torrente Letimbro si conferma il corso d'acqua con minore influenza, il Torrente Quiliano e il Torrente Segno tendono a sovrapporsi in termini di effetto e quindi ad incrementare le concentrazioni nell'area litoranea che assumono valori compresi nell'intervallo 0.2 - 0.4 g/m³ in funzione della vicinanza alle foci dei torrenti. Il tracciante tende rapidamente a diminuire spostandosi verso marea aperto ; nella rada di Vado la concentrazione totale è nell'ordine di 0.04 g/m³.

L'inserimento della schiera di cassoni sul lato esterno della piattaforma non è in grado di influire in modo apprezzabile i processi di dispersione dei traccianti conservativi che nell'area adiacente i cassoni presentano dei livelli di diluizione alto e nell'ordine di qualche per mille.

In termini generali è possibile osservare che la componente avvettiva del trasporto (cioè quella legata alle correnti) è molto bassa dati i bassi valori di velocità, mentre è preponderante la componente dispersiva.

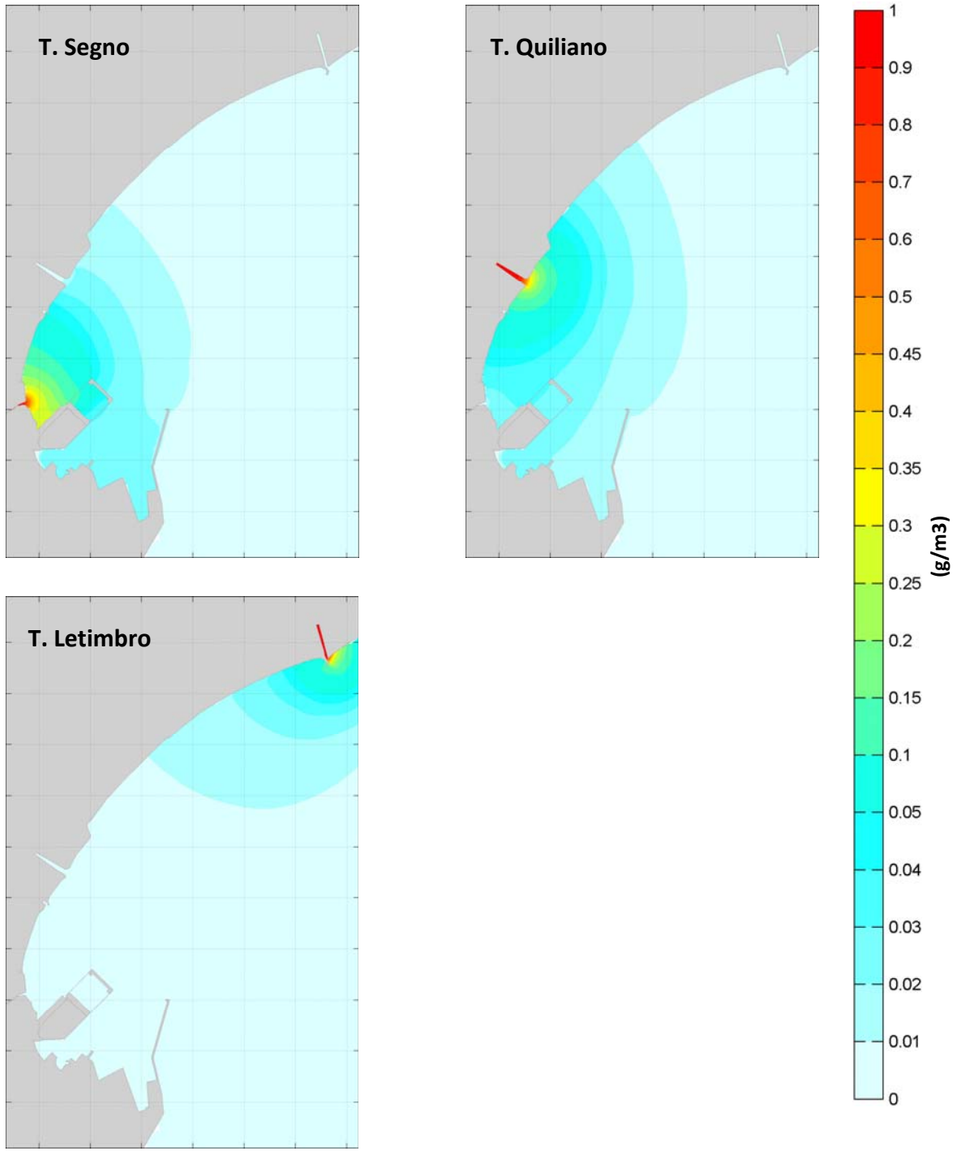


FIGURA 3-23 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI SINGOLI TORRENTI IN CONDIZIONE DI CALMA DI VENTO

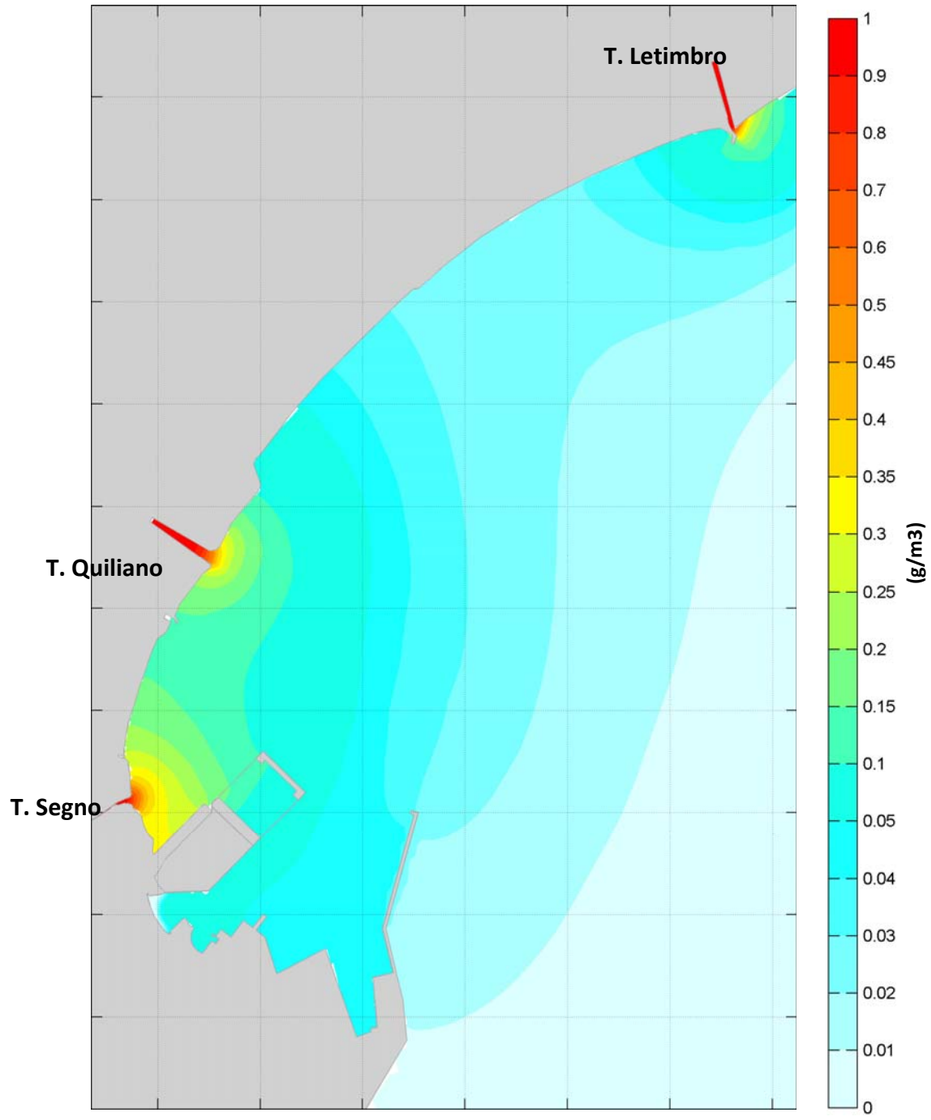


FIGURA 3-24 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI CALMA DI VENTO

Condizione di vento da Nord Est

In questo scenario idrodinamico è stato considerato che un vento da Nord-Est con intensità costante di 7 m/s fosse uniformemente distribuito e presente ininterrottamente per tutta la durata della simulazione.

In Figura 3-25 sono riportate le mappe della concentrazione del tracciante per i tre fiumi considerati singolarmente, e in Figura 3-26 la mappa di concentrazione considerando la somma dei contributi di tutti i fiumi.

Come già osservato nei paragrafi precedenti, l'applicazione di una campo di vento non è in grado di alterare in modo evidente la circolazione idrodinamica nell'area. Gli effetti sono visibili solo sullo strato superficiale dove si instaura una corrente concorde al vento mentre le velocità medie sulla verticale rimangono molto simili a quelle del caso senza vento e sono, quindi, generalmente molto basse.

Anche la dispersione dei traccianti conservativi, di conseguenza, presenta un pattern di diffusione molto simile a quello osservato per il caso senza vento, dal momento che la componente avvettiva del trasporto continua ad avere un peso di secondo ordine rispetto alla componente dispersiva.

Per quanto riguarda il tracciante T. Letimbro, rispetto al caso precedente si può notare un lieve spostamento del "plume" in direzione sud-ovest. In riferimento al T. Quiliano e al T. Segno si osserva che la corrente litoranea superficiale indotta dal vento contrasta la dispersione del "plume" verso Nord e, quindi, l'area litoranea interessata dalla dispersione risulta leggermente minore.

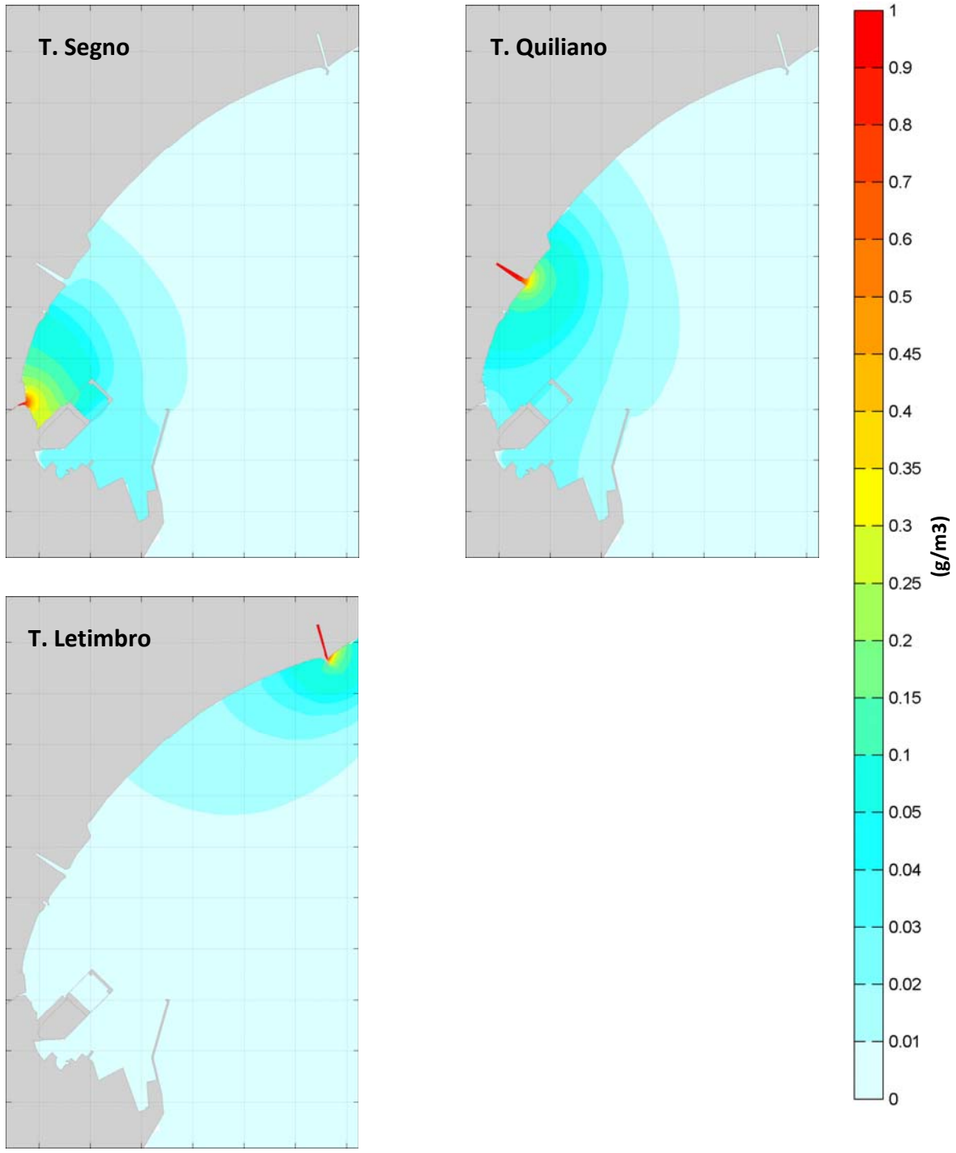


FIGURA 3-25 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI SINGOLI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA NORD-EST

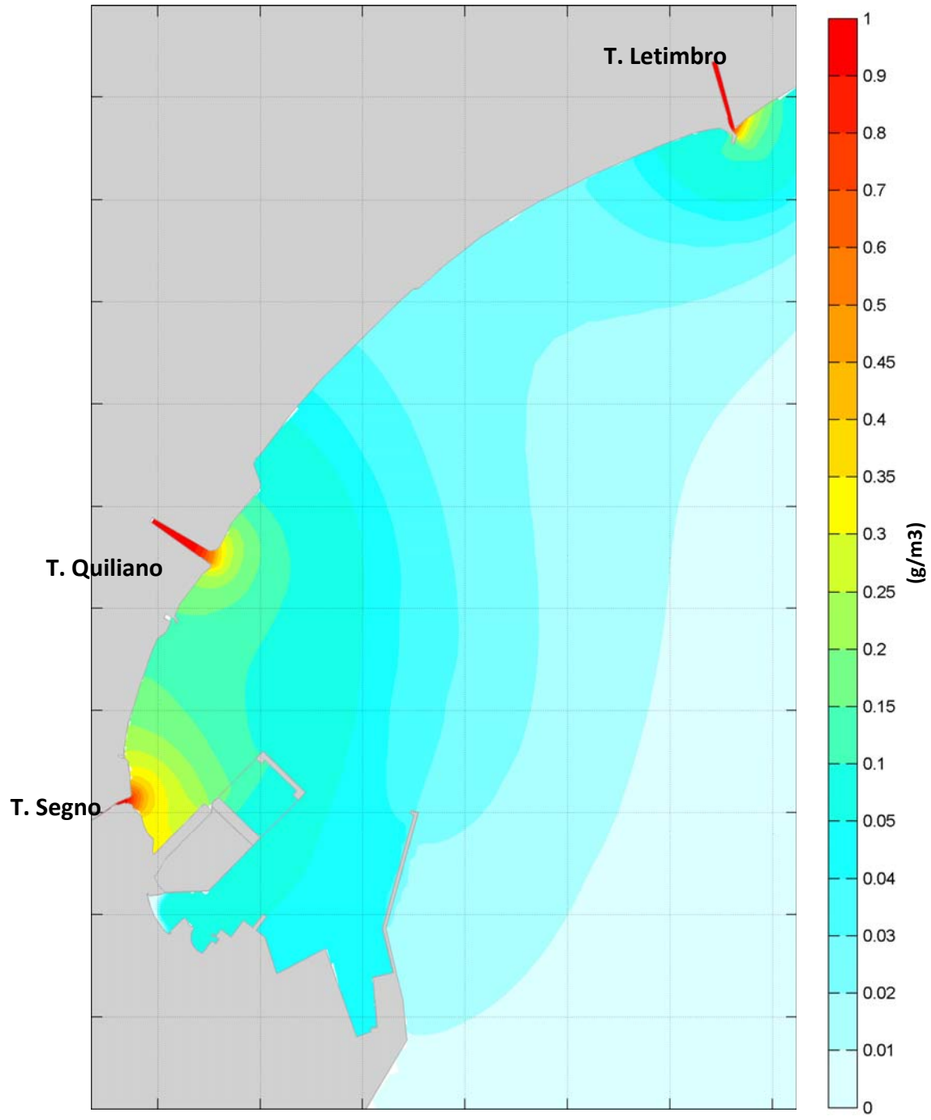


FIGURA 3-26 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA NORD EST

Condizione di vento da Sud Est

In questo scenario è stato considerato che un vento da Sud-Est con intensità costante di 7 m/s fosse uniformemente distribuito e presente ininterrottamente per tutta la durata della simulazione.

Anche per questo scenario valgono le stesse considerazioni svolte per il caso precedente. L'applicazione di una campo di vento non è in grado di alterare in modo sensibile la circolazione idrodinamica e, di conseguenza nemmeno i processi di trasporto del tracciante. Il pattern di diffusione dei traccianti rimane pertanto molto simile a quello dei casi precedenti e valgono le medesime considerazioni fatte a proposito.

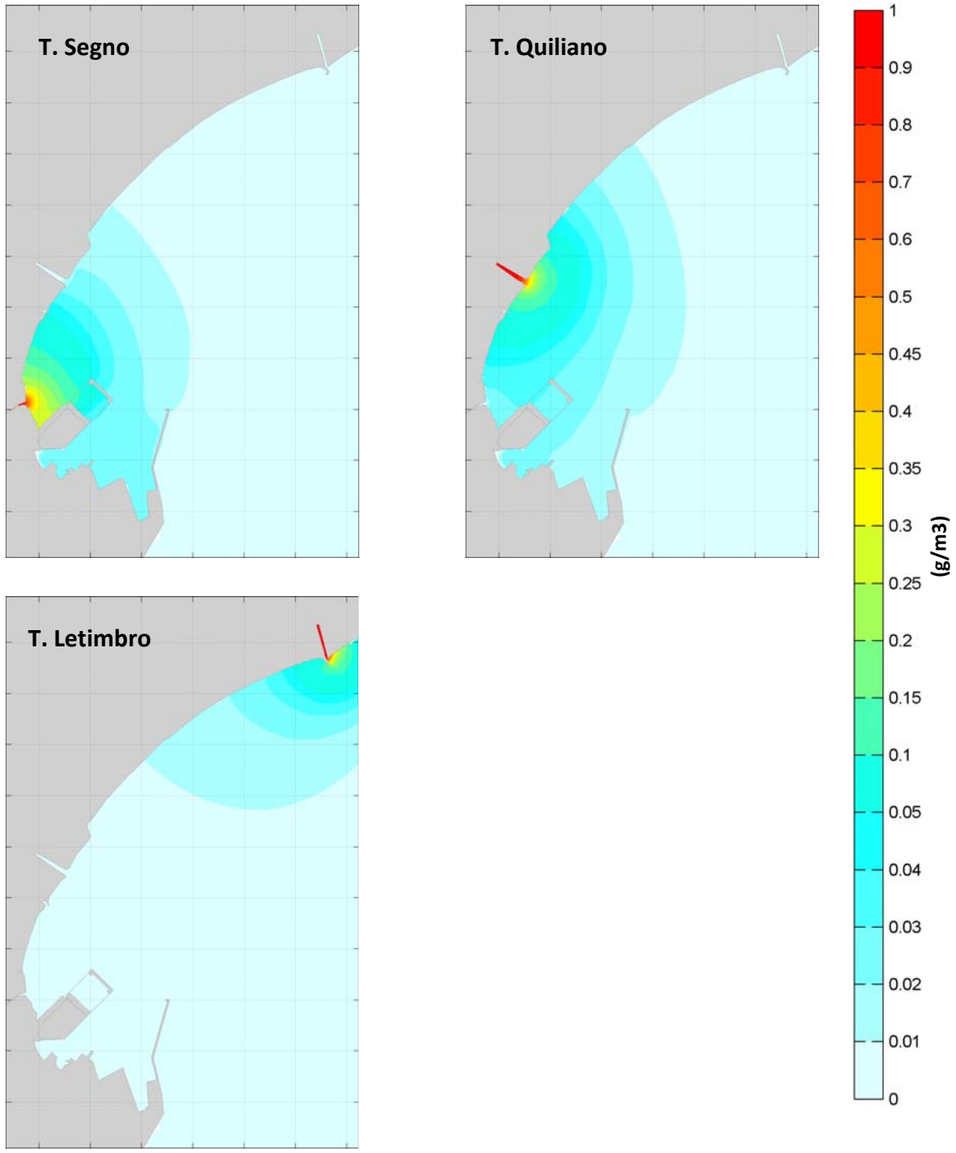


FIGURA 3-27 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI SINGOLI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA SUD-EST

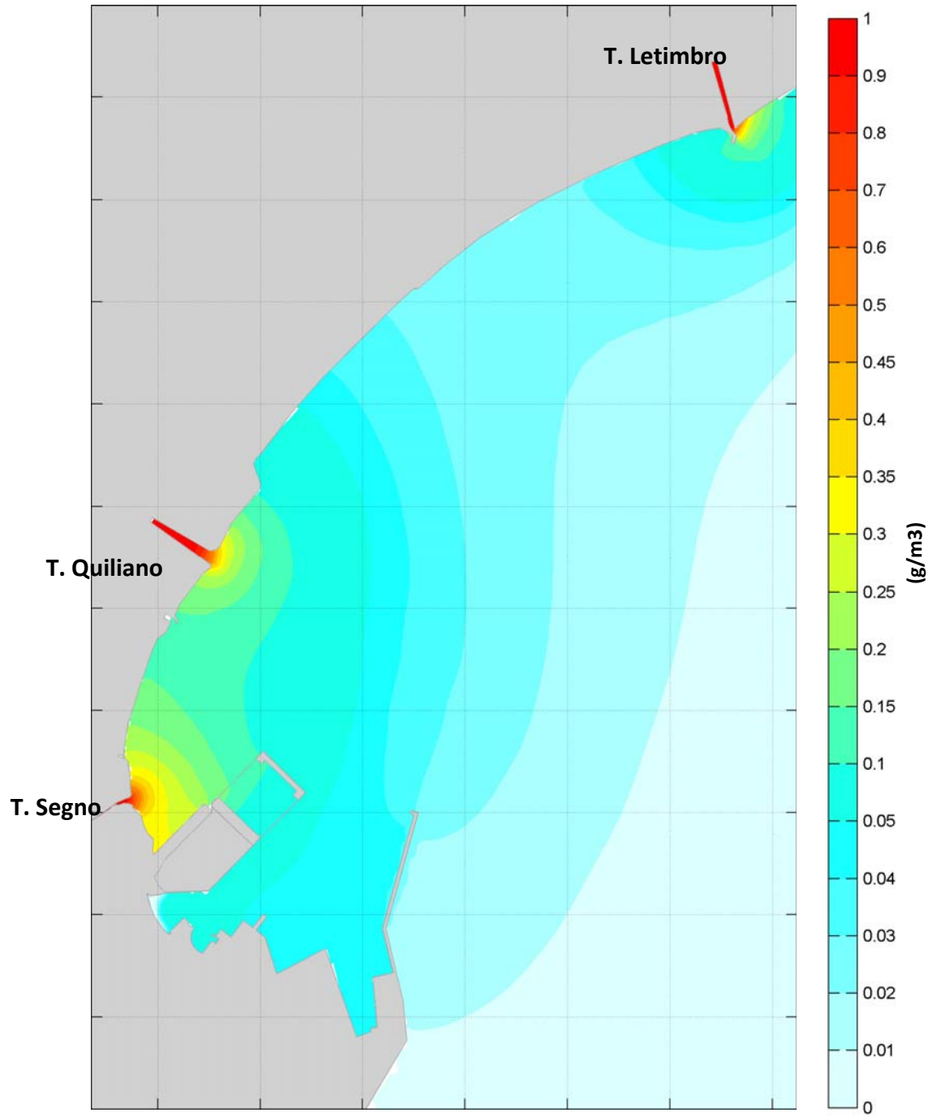


FIGURA 3-28 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA SUD-EST

Condizione di vento da Nord Ovest

In questo scenario è stato considerato che un vento da Nord-Ovest con intensità costante di 10 m/s fosse uniformemente distribuito e presente ininterrottamente per tutta la durata della simulazione.

Anche per questo scenario valgono le stesse considerazioni svolte per il caso precedente. L'applicazione di una campo di vento non è in grado di alterare in modo sensibile la circolazione idrodinamica e, di conseguenza nemmeno i processi di trasporto del tracciante.

Il pattern di diffusione dei traccianti rimane pertanto molto simile a quello dei casi precedenti con una leggero incremento della dispersione verso largo per lo sviluppo di una corrente superficiale concorde al vento.

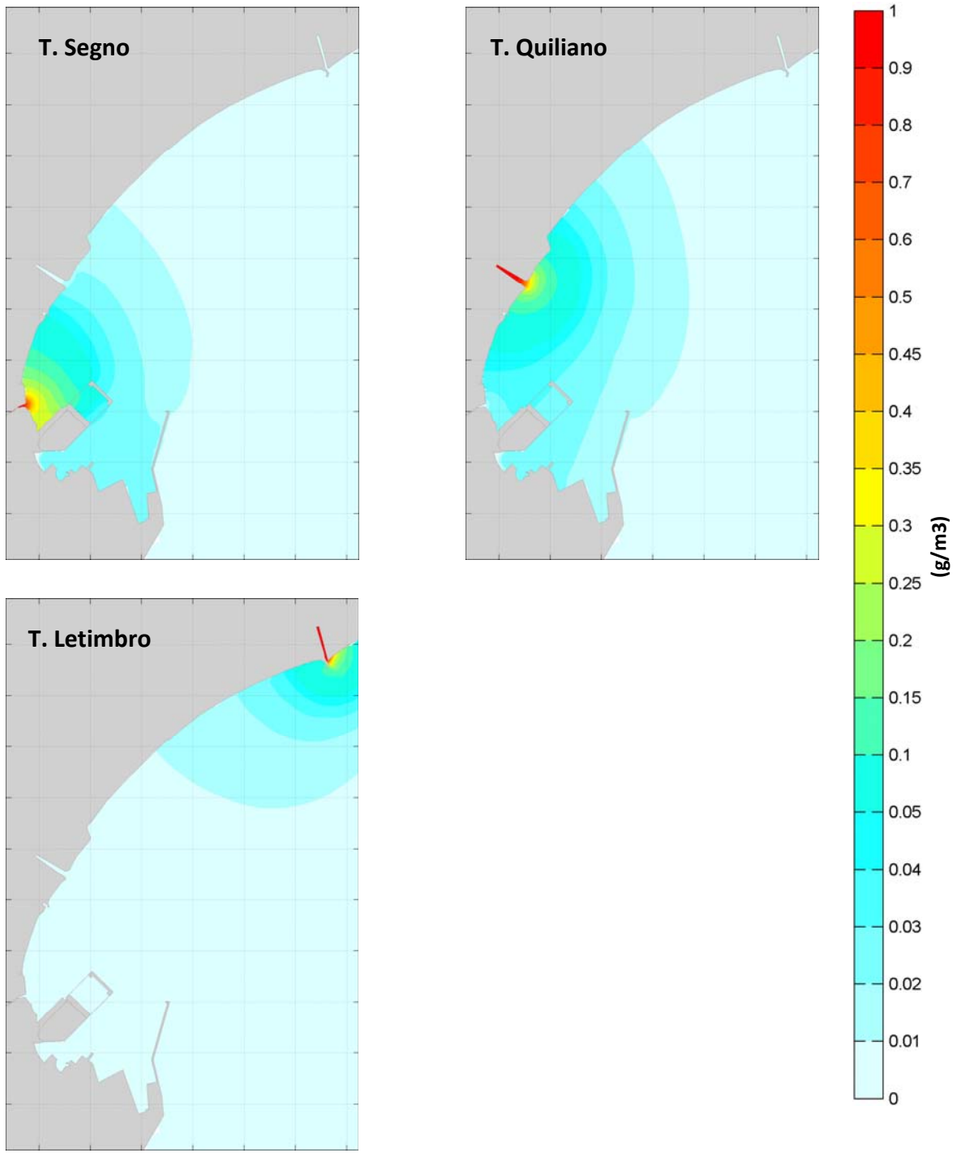


FIGURA 3-29 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI SINGOLI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA NORD-OVEST

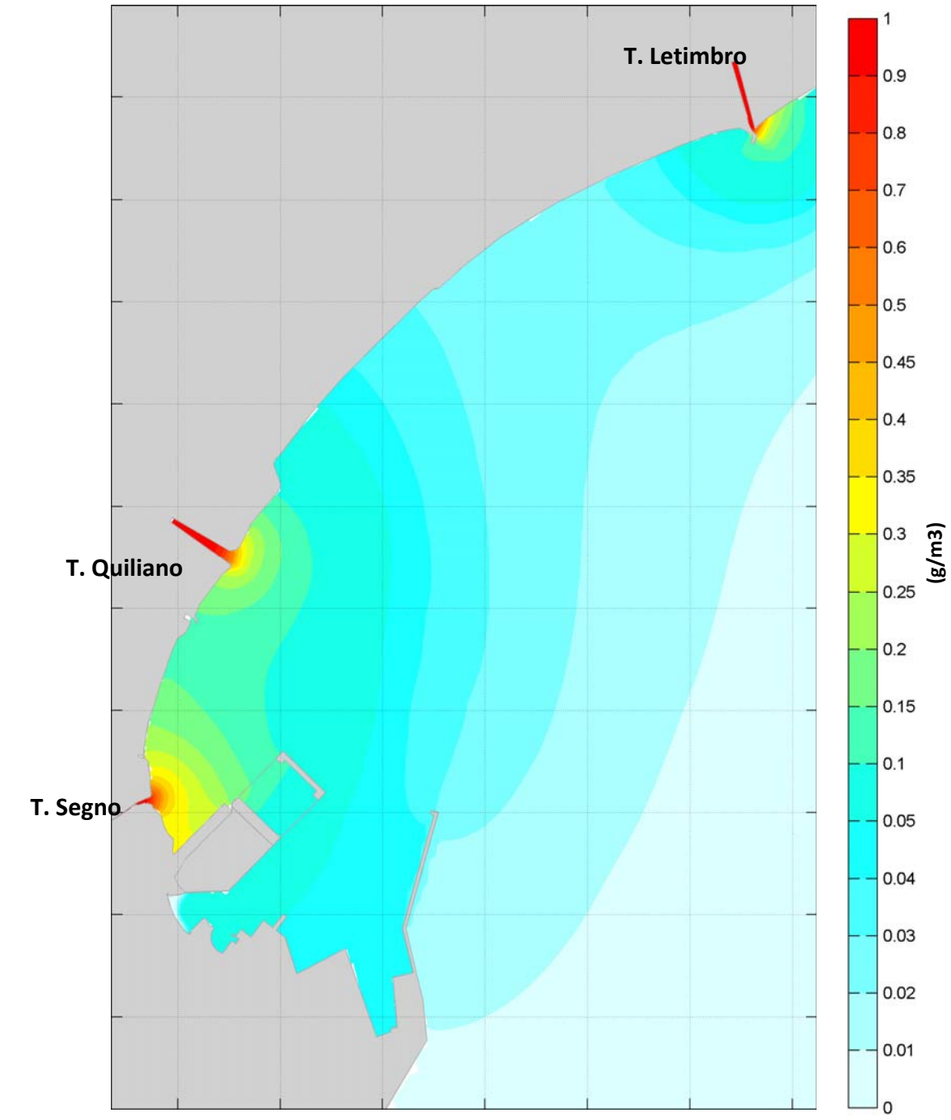


FIGURA 3-30 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA NORD-OVEST

3.1.3. Capacità di ricambio idrico

La capacità di ricambio di un sistema fisico è una caratteristica tipica di ciascun ambiente costiero ed esprime la tendenza di un sistema idraulico a ricambiare le acque interne attraverso processi di scambio e trasporto con il mondo esterno.

Nell'ambito del presente studio, la capacità di ricambio viene studiata e quantificata mediante due tipi di analisi: la "fraction analysis" e la valutazione del tempo di ricambio.

La "fraction analysis"

La "fraction analysis" è un indagine eseguita mediante l'utilizzo di modelli numerici che consente di identificare l'andamento della circolazione in una zona ed il contributo delle diverse sorgenti (torrenti, scarichi, ecc.) alla massa totale d'acqua ivi presente.

In altre parole consente di verificare la capacità del sistema di ricambiare una massa d'acqua presente in un istante iniziale sostituendola con acqua proveniente da diverse sorgenti. Essa è, quindi, strettamente collegata alla capacità dispersiva ed alle caratteristiche idrodinamiche del sistema.

Per effetto dell'idrodinamica e della dispersione, l'acqua contenuta nel sistema individuato prima dell'avvio della simulazione, tenderà ad essere sostituita da acqua proveniente dalle altre sorgenti; da quali, in quale quantità e in quanto tempo è il risultato fondamentale della "fraction analysis".

In particolare questa acqua iniziale sarà sostituita rapidamente nelle aree ad alto ricambio (es.: zone di foce) e più lentamente nelle aree a scarso ricambio (es.: zone interne e confinate di bacini lagunari e/o portuali).

La "fraction analysis" si è articolata nei seguenti passi operativi:

- individuazione delle possibili sorgenti che possono fornire acqua al sistema e che, in linea generale, possono essere identificate con gli apporti dei torrenti sfocianti nella baia e gli apporti dal mare.
- identificazione del sistema di cui si vuole analizzare il comportamento. Delimitazione di un'area all'interno del dominio di calcolo e identificazione tramite un codice di ogni sorgente precedentemente individuata;
- simulazione del periodo prescelto e verifica del comportamento di ogni sorgente, analizzando dove e in quale quantità l'acqua proveniente da ogni sorgente si disperde.

Per la "fraction analysis", è stata identificata come zona di interesse nell'ambito del dominio di calcolo (acqua iniziale), la porzione litoranea di mare ottenuta prolungando il segmento esterno della nuova diga foranea fino ad intersecare il litorale a nord della foce del Letimbro. Le altre sorgenti considerate sono: l'acqua del Torrente Segno, l'acqua del Torrente Quiliano e l'acqua del mare, che entra attraverso il contorno "aperto" del modello.

La delimitazione del sistema considerato nelle analisi è presentata in Figura 3-31, dove vengono indicati anche la posizione dei punti di controllo per cui vengono presentati i risultati della "fraction analysis".

Nelle simulazioni eseguite, sono state considerate come forzanti esterne la marea media e le portate dei tre torrenti che sfociano nella baia, come precedentemente definite. Come regime anemometrico, invece, è stata considerata una condizione di calma di vento, in quanto rappresenta una condizione sfavorevole per il ricambio rispetto alla condizione con vento.

I risultati della "fraction analysis" sono riportati da Figura 3-32 a Figura 3-35.
In queste figure l'acqua iniziale è presentata con colore rosso, l'acqua del Torrente Segno con colore giallo, l'acqua del Torrente Quiliano con colore turchese e l'acqua del mare con colore blu.
Dai risultati ottenuti è possibile osservare che:

- alla fine della simulazione rimangono solamente gli apporti esterni, come corretto che sia, che sono costituiti dall'acqua immessa dai torrenti (Segno, Quiliano e Letimbro) e dall'acqua di mare;
- il tempo necessario per la completa sostituzione dell'acqua iniziale è funzione della posizione del punto di controllo rispetto ai punti di immissione degli apporti;
- la percentuale finale dei diversi apporti (cioè il contributo di ciascuna sorgente) è funzione della localizzazione dei punti considerati; all'interno della rada di Vado la frazione dei acqua proveniente dai torrenti Segno e Quiliano è nell'ordine di qualche percentuale, in prossimità delle foci dei torrenti, invece, il contributo del tracciante proveniente dal torrente più vicino tende ad essere più importante.

All'interno della rada di Vado il contributo dei traccianti di origine fluviale, una volta raggiunta la situazione di equilibrio, rimane sempre nell'ordine di qualche percentuale e le acque di origine marina rappresentano la frazione maggiore (oltre il 95%).

Nei punti più lontani, invece, il contributo delle acque di origine torrentizia è tendenzialmente maggiore in funzione della distanza tra il punto di controllo e la foce del torrente considerata.

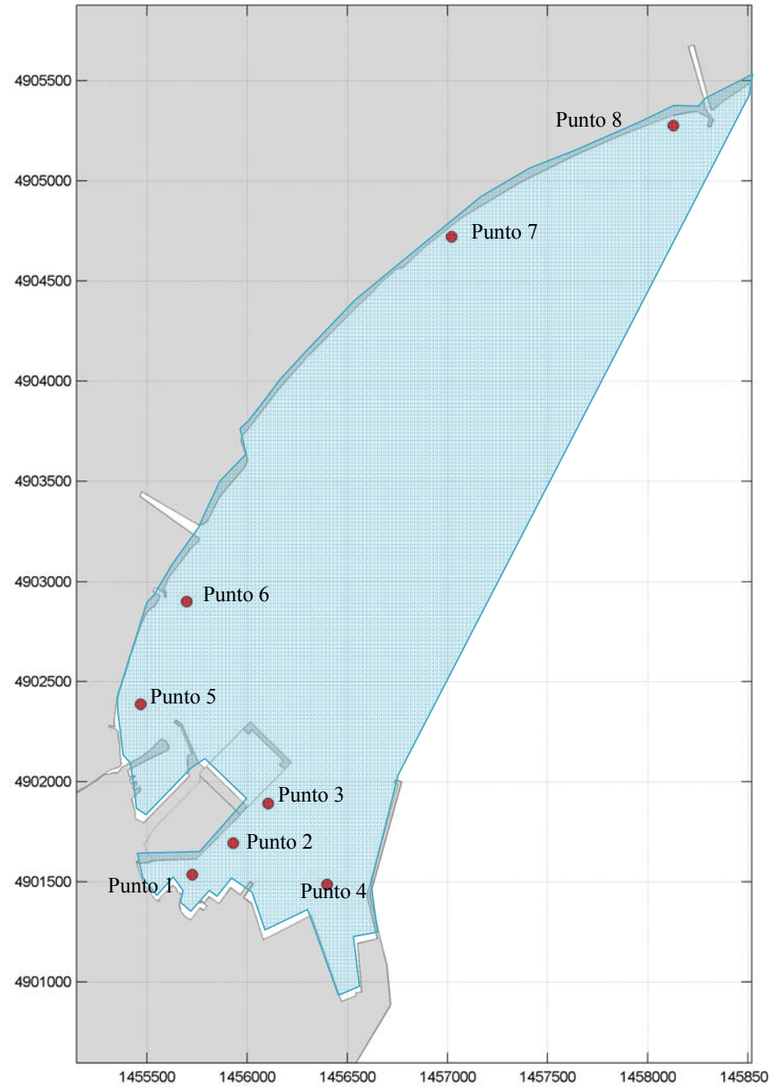


FIGURA 3-31 - DISTRIBUZIONE INIZIALE DEL TRACCIANTE UTILIZZATO PER LA *FRACTION ANALYSIS*. E POSIZIONE DEI PUNTI DI CONTROLLO

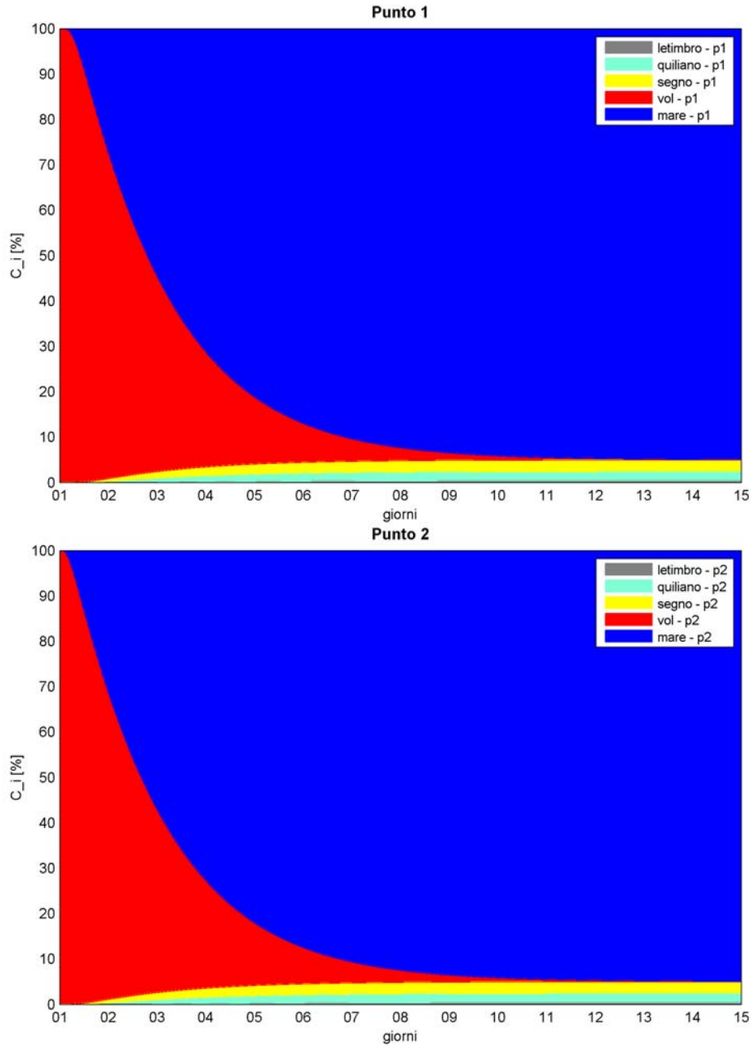


FIGURA 3-32 - PUNTO DI CONTROLLO N° 1 E N° 2: RISULTATI DELLA "FRACTION ANALYSIS"

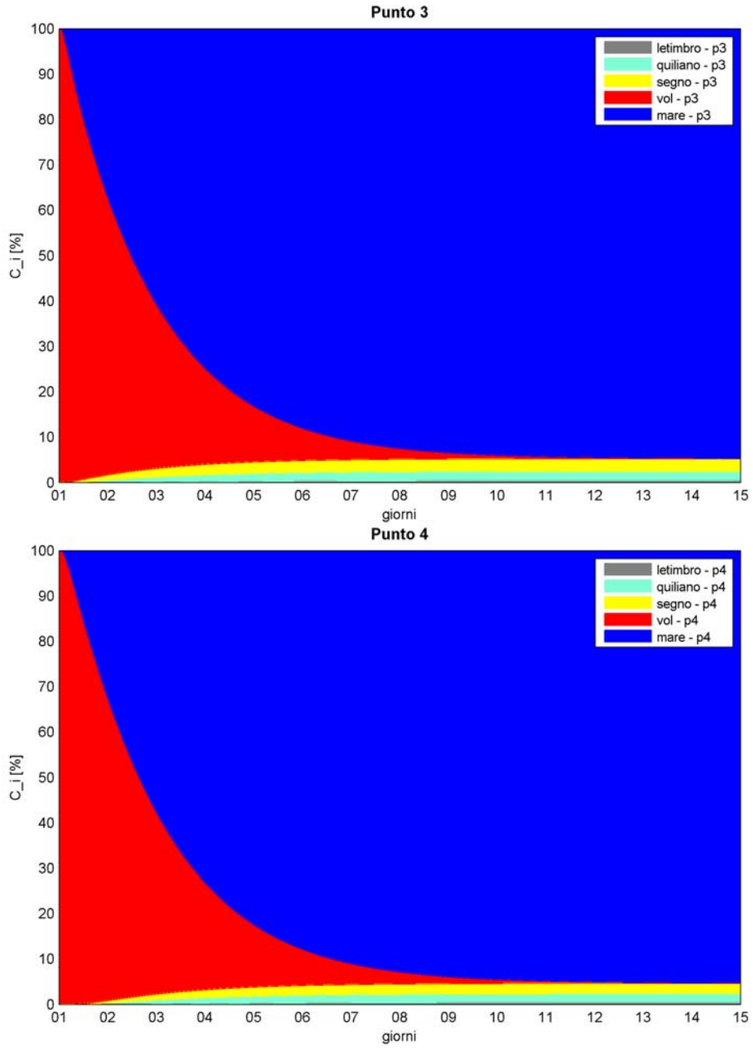


FIGURA 3-33 - PUNTO DI CONTROLLO N° 3 E N° 4: RISULTATI DELLA "FRACTION ANALYSIS"

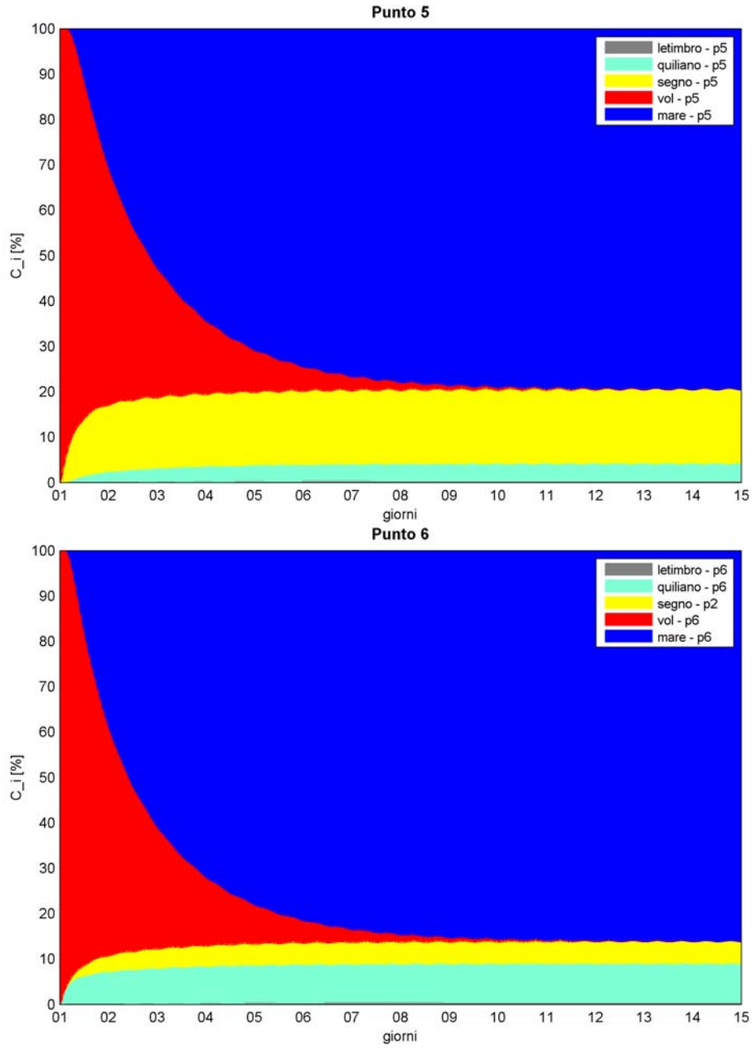


FIGURA 3-34 - PUNTO DI CONTROLLO N° 5 E N° 6: RISULTATI DELLA "FRACTION ANALYSIS"

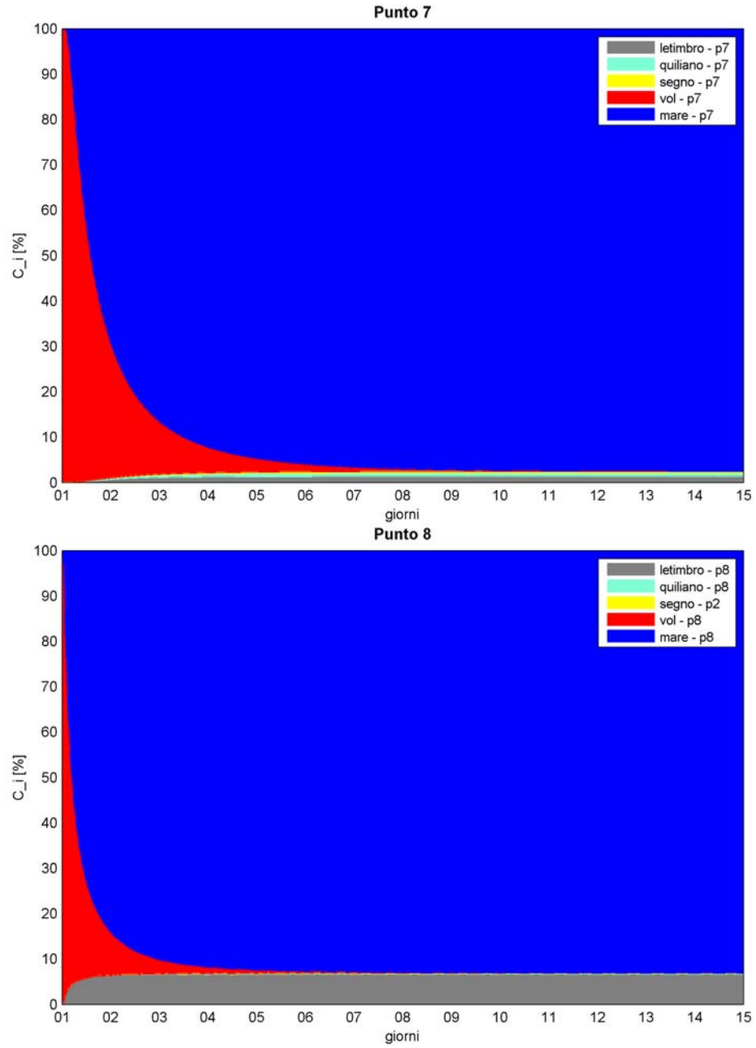


FIGURA 3-35 - PUNTO DI CONTROLLO N° 7 E N° 8: RISULTATI DELLA "FRACTION ANALYSIS"

Il Tempo di ricambio

Un fenomeno che riveste una particolare importanza nella valutazione degli effetti di opere marittime lungo il litorale è la capacità di ricambio del sistema.

Sono state effettuate analisi modellistiche per la determinazione del "tempo di ricambio" che consiste nel valutare il tempo necessario perché la concentrazione di una sostanza conservativa, inizialmente uniformemente distribuita nell'area di interesse, si riduca di circa il 63% rispetto al valore iniziale.

La simulazione idrodinamica utilizzata per queste analisi è stata eseguita applicando le seguenti condizioni:

- Marea media, come precedentemente definita;
- Assenza di vento;
- Portate dei fiumi sfocianti in mare come precedentemente definite.

Il "tempo di ricambio" viene definito in letteratura come il tempo necessario affinché il flusso di marea, supposto composto da acqua "pulita", riduca, in un punto, la concentrazione di una sostanza conservativa, inizialmente uniformemente distribuita nell'area (cioè con una concentrazione iniziale uguale in ogni punto della rada portuale), di un fattore pari al numero di Eulero "***e***" (~ 2.718281…).

In termini analitici, si può scrivere che:

$$C(t) = C_0 e^{-t/\tau}$$

Pertanto viene definito come tempo di ricambio, il tempo τ che è necessario per far diminuire la concentrazione, in quel punto, dalla concentrazione C_0 iniziale alla concentrazione $\frac{C_0}{e}$.

Per utilizzare tale parametro è quindi necessario effettuare una simulazione del comportamento di un tracciante passivo che venga immesso inizialmente nel sistema. Viene quindi a determinarsi una situazione iniziale in cui la concentrazione di tale tracciante è uniforme. A partire da tale situazione, viene attivata l'oscillazione di marea, considerata con concentrazione nulla di tracciante entrante, e si seguono le variazioni di concentrazione in diversi punti della area di studio.

L'area corrispondente alla distribuzione iniziale del tracciante conservativo è stata definita in modo da essere sufficientemente estesa per includere l'intera impronta della piattaforma ,il bacino della rada di Vado e la fascia litoranea a nord della piattaforma fino alla foce del torrente Quiliano. In questo modo è possibile infatti ottenere delle informazioni sull'effetto della configurazione in studio sia all'interno della rada che lungo il litorale. Il volume iniziale occupato dal tracciante è riportato in Figura 3-36.

Per meglio evidenziare il fenomeno, la concentrazione iniziale uniforme è stata posta pari a 1 unità/m³, anche se si deve tenere conto che, essendo la sostanza considerata conservativa, il tempo di ricambio è invariante rispetto alla concentrazione iniziale.

Nelle simulazioni eseguite non sono stati considerati gli apporti di acqua dolce, in modo da poter ottenere delle valutazioni sulla capacità dispersiva del sistema in relazione alla sola forzante mareale.

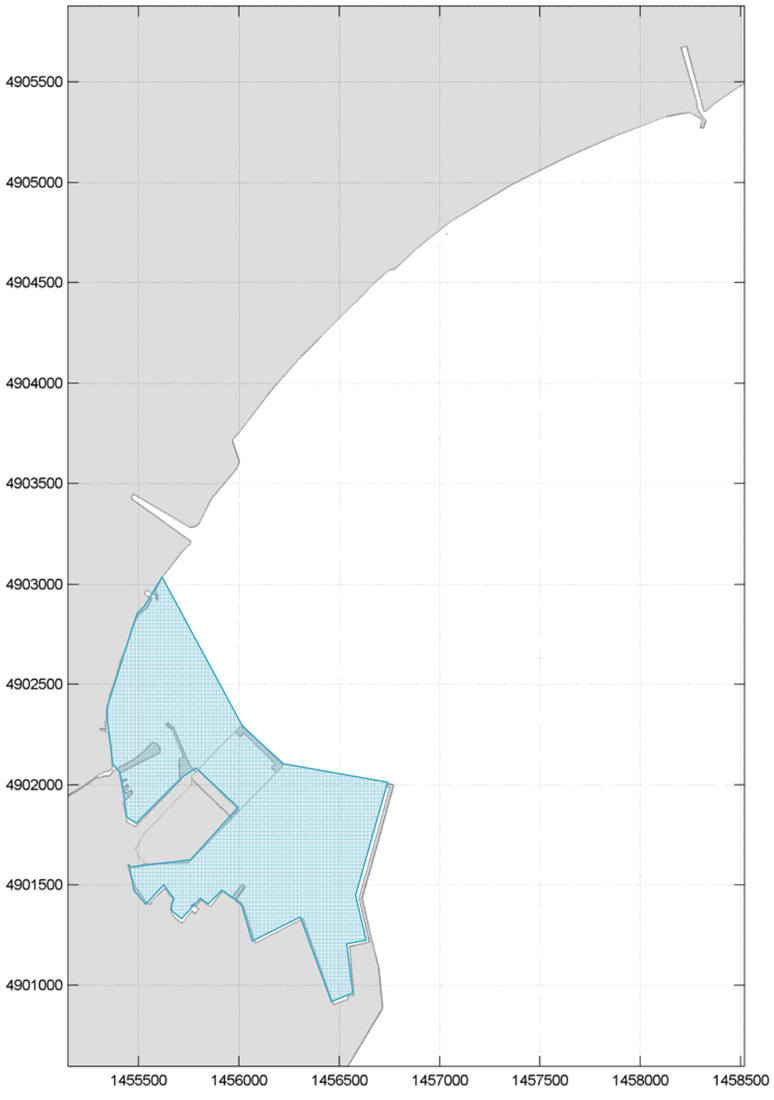


FIGURA 3-36 - DISTRIBUZIONE INIZIALE DEL TRACCIANTE UTILIZZATO PER IL TEMPO DI RICAMBIO

In Figura 3-37 è riportata la mappa con la distribuzione della durata dei tempi di ricambio (espressi in ore) in riferimento alla configurazione oggetto di studio.

Naturalmente l'andamento delle concentrazioni non è regolare, essendo legato all'andamento della marea (oscillazioni più accentuate nelle aree dove lo scambio di marea è maggiore, oscillazioni minori nelle aree a minore ricambio).

Dalla figura si nota che il tempo di ricambio varia da poche ore nelle aree più esterne e vicine alla superficie di scambio con il mare aperto fino ad un massimo di circa 30 ore nelle aree più interne della rada di Vado situate in posizione più distante rispetto alla sezione di scambio.

I valori osservati nelle spiagge a sud della radice della piattaforma sono nell'ordine delle 24 - 26 ore; i valori del tempo di ricambio cadono nell'intervallo 16-18 nell'area litoranea compresa tra la foce del Segno e la radice della piattaforma e diminuiscono rapidamente fino ad annullarsi allontanandosi verso nord. In corrispondenza dell'area su pali della piattaforma si osservano valori compresi tra 10 e 16 ore.

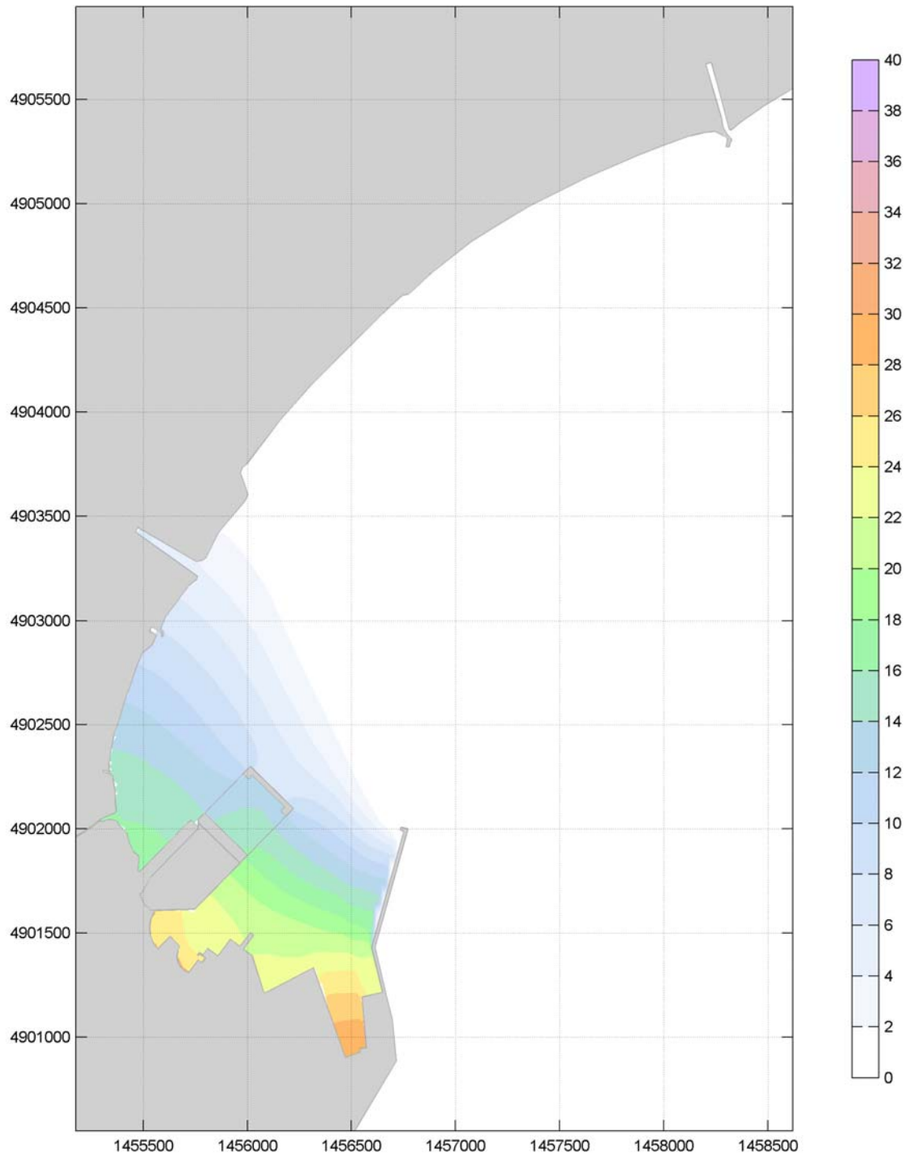


FIGURA 3-37 - DISTRIBUZIONE DEL TEMPO DI RICAMBIO (IN ORE)

3.1.4. Circolazioni costiere indotte dal moto ondoso

Lo studio della dinamica litoranea che si instaura nei fondali antistanti il litorale di Vado in seguito alla persistenza (cioè a regime, in condizioni stazionarie) di determinate forzanti, è stato condotto mediante l'utilizzo del codice di calcolo CMS-Flow, accoppiato al codice di calcolo CMS-Wave. Una descrizione dettagliata dei codici di calcolo viene riportata in appendice nei paragrafi 1.4.1 e 1.4.2.
Per lo studio delle correnti costiere sono state considerate come forzanti principali il moto ondoso, il vento e la portata di piena del T. Segno. Il campo di moto ondoso sottocosta (forzante del modello idrodinamico) è stato ricavato, per mezzo del codice di calcolo CMS-Wave (cfr. paragrafo precedente). Quest'ultimo si interfaccia con il codice di calcolo CMS-Flow, fornendogli i valori dei radiation stress che generano le correnti litoranee.

I test eseguiti sono quelli individuati nel precedente paragrafo e riportati nella Tabella 3-1 e si riferiscono a mareggiate caratterizzate da persistenza pari a 1g/anno e a mareggiate caratterizzate da persistenza pari a 5gg/anno concomitanti con condizioni di piena del T. Segno. Per una dettagliata descrizione delle condizioni di input assegnate al modello si rimanda al paragrafo 1.4.4 in appendice.
I risultati dello studio della circolazione costiera, condotto per mezzo del codice di calcolo CMS-Flow interfacciato con il codice di calcolo CMS-Wave, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Figura 3-38 a Figura 3-43).
I risultati riportano in forma grafica le velocità medie della corrente generata dalle mareggiate (mediate sulla verticale): i moduli delle velocità sono rappresentati in termini di gradazioni cromatiche, mentre la direzione locale della corrente viene indicata mediante vettori il cui modulo è proporzionale alla velocità stessa.

Dall'osservazione dei risultati si ricava che nel tratto di litorale oggetto di studio la circolazione idrodinamica risulta sostanzialmente influenzata dalle diverse orientazioni della linea di riva lungo il litorale. In prossimità della piastra, si osservano locali inversioni e distacchi della corrente litoranea, che peraltro non sono solo una conseguenza delle nuove opere, ma si verificano anche nella configurazione attuale.

Per quanto riguarda le simulazioni effettuate in presenza di piena del T. Segno si può osservare che l'elemento dominante nel campo delle correnti risulta essere sempre e comunque il flusso in uscita dalla foce del torrente.

La mareggiata di Levante con frequenza di 1g/anno (TEST 1) sviluppa una corrente molto intensa e diretta verso Sud-Ovest nel tratto di litorale tra la foce del Quiliano e l'area camper. La corrente prosegue lungo la spiaggia più a Sud (spiaggia in ghiaia tra l'area camper e il T. Segno, nel seguito "spiaggia"), dove subisce un progressivo rallentamento.
In corrispondenza della difesa radente a protezione del terrapieno del campo da basket la corrente litoranea in parte si allontana dal litorale e in parte prosegue oltre tale scogliera continuando a lambire la riva con valori di velocità decrescenti per poi annullarsi poco a Sud della foce del Segno.

L'idrodinamica che si sviluppa a seguito della mareggiata di Scirocco con frequenza di 1g/anno (TEST 2) genera un campo di correnti di modesta intensità, caratterizzato sdalla presenza di un punto di divergenza in corrispondenza della foce del Quiliano e dalla formazione di un esteso vortice anticiclonico localizzato tra la spiaggia e la piastra. La presenza di tale vortice influenza notevolmente il campo di corrente generando un distacco della corrente litoranea diretta verso Sud a partire dall'area camper. L'intensità della corrente a Sud dell'area camper è praticamente nulla.

Il campo di correnti che si osserva per la mareggiata di Mezzogiorno caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 3) risulta generato essenzialmente dall'azione del vento, in quanto la mareggiata giunge in prossimità del litorale con valori di altezza d'onda praticamente nulli e non è in grado di forzare la circolazione idrodinamica. Si osserva che la corrente, diretta verso Nord-Est, risulta piuttosto debole e si sviluppa a partire dalla foce del Segno, sviluppandosi progressivamente nel tratto più a Nord del litorale.

Come anticipato, in presenza della piena del T. Segno il campo delle correnti risulta principalmente influenzato dal flusso di piena in uscita; secondariamente, si può comunque osservare che le correnti generate dalle mareggiate con frequenza di 5 gg/anno confermano, con valori di velocità inferiori, le caratteristiche dei campi di corrente osservati per le mareggiate con frequenza 1g/anno. In particolare si può osservare che per la mareggiata di Levante (TEST 4) si sviluppa una corrente caratterizzata da velocità piuttosto ridotte, che procede da Nord verso Sud fino al tratto centrale della spiaggia, annullandosi poco più a Sud, in prossimità della scogliera radente.

Per quanto riguarda il flusso di piena in uscita dal torrente, si osserva che la direzione di uscita viene condizionata dalle mareggiate, ma solo a distanze da riva superiori ai 2÷300 m; si osserva quindi che con la mareggiata di Levante (TEST 4) il flusso tende a ruotare verso Sud-Est, esaurendosi prima di raggiungere la testata della piastra, mentre con le mareggiate di Scirocco-Mezzogiorno (TEST 5 e TEST 6) ruota verso Nord, Nord-Ovest, con tendenza alla formazione di un vortice ciclonico.

Circolazioni costiere indotte da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 1 giorno

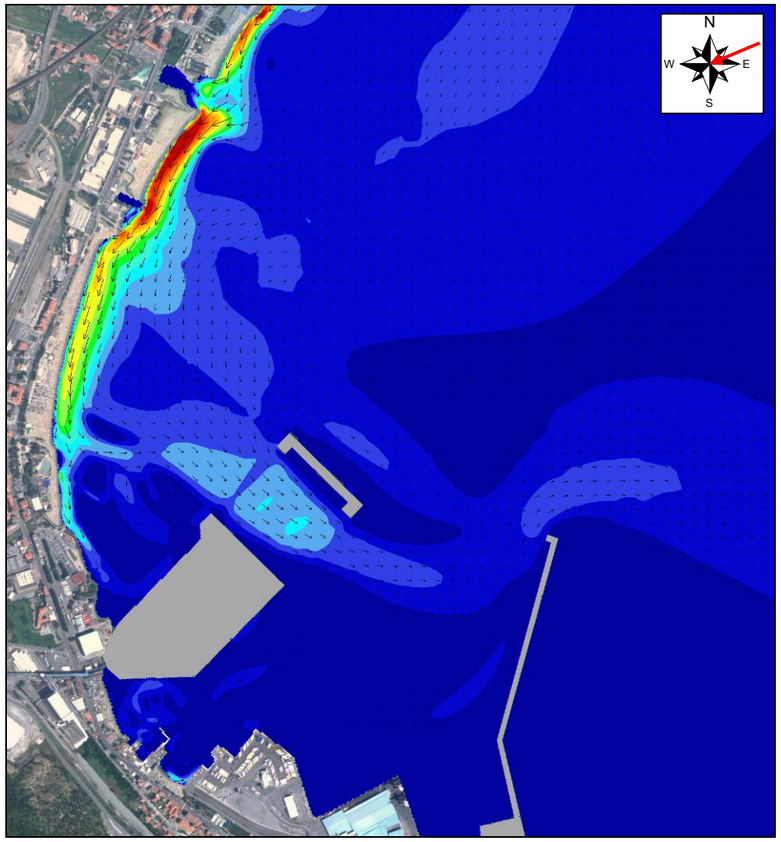


FIGURA 3-38 - TEST1 - CIRCOLAZIONE COSTIERA
H_S = 1.64 M - T_P = 6.50 S - DIR = 75°N

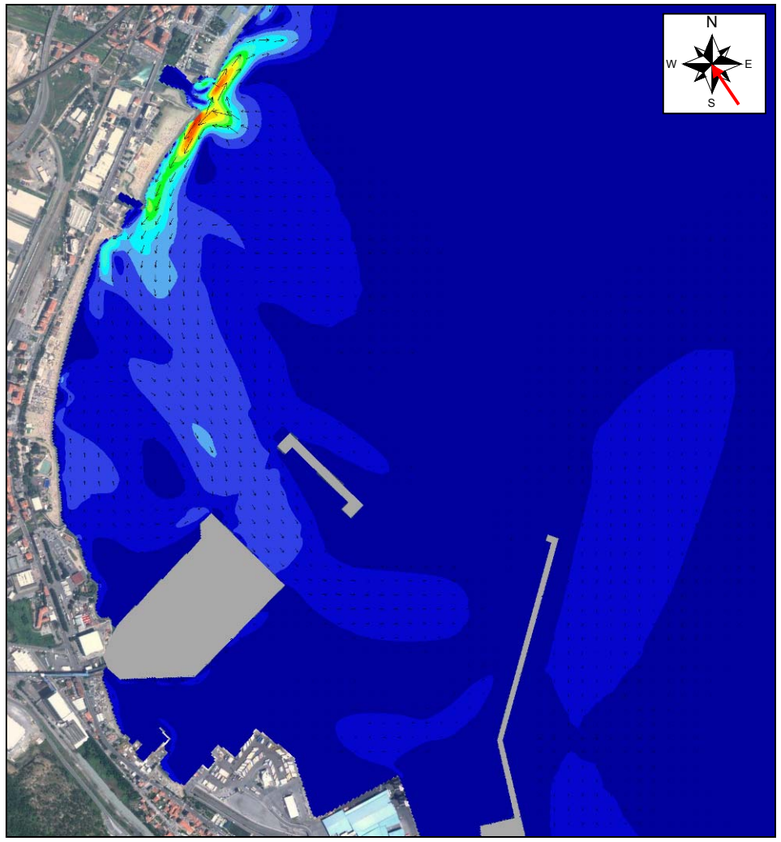


FIGURA 3-39 - TEST2 - CIRCOLAZIONE COSTIERA
H_S = 1.93 M - T_P = 6.80 S - DIR = 145°N

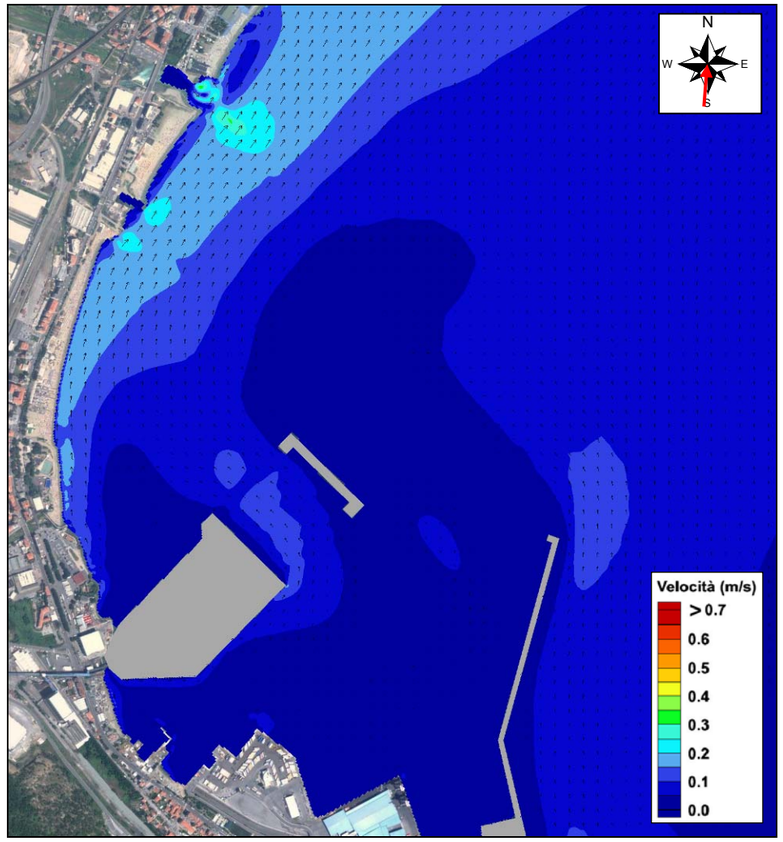


FIGURA 3-40 - TEST3 - CIRCOLAZIONE COSTIERA
H_S = 2.22 M - T_P = 7.80 S - DIR = 185°N

Circolazioni costiere indotte da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 5 giorni e piena del Torrente Segno concomitante

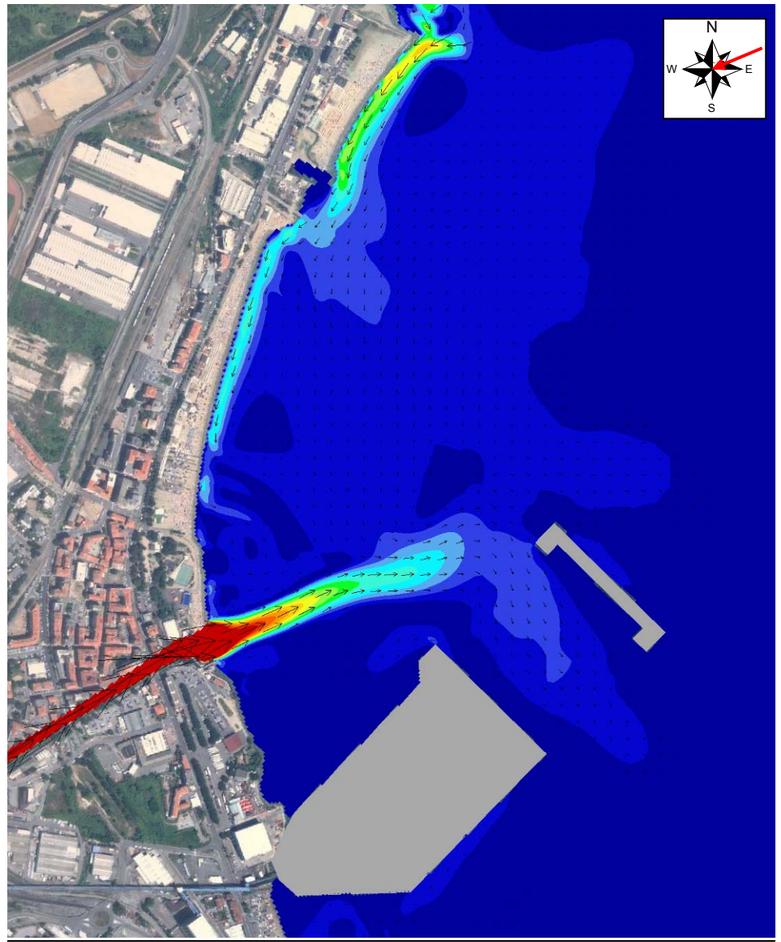


FIGURA 3-41 - TEST4 - CIRCOLAZIONE COSTIERA
H_S = 0.93 M - T_P = 5.20 S - DIR = 75°N

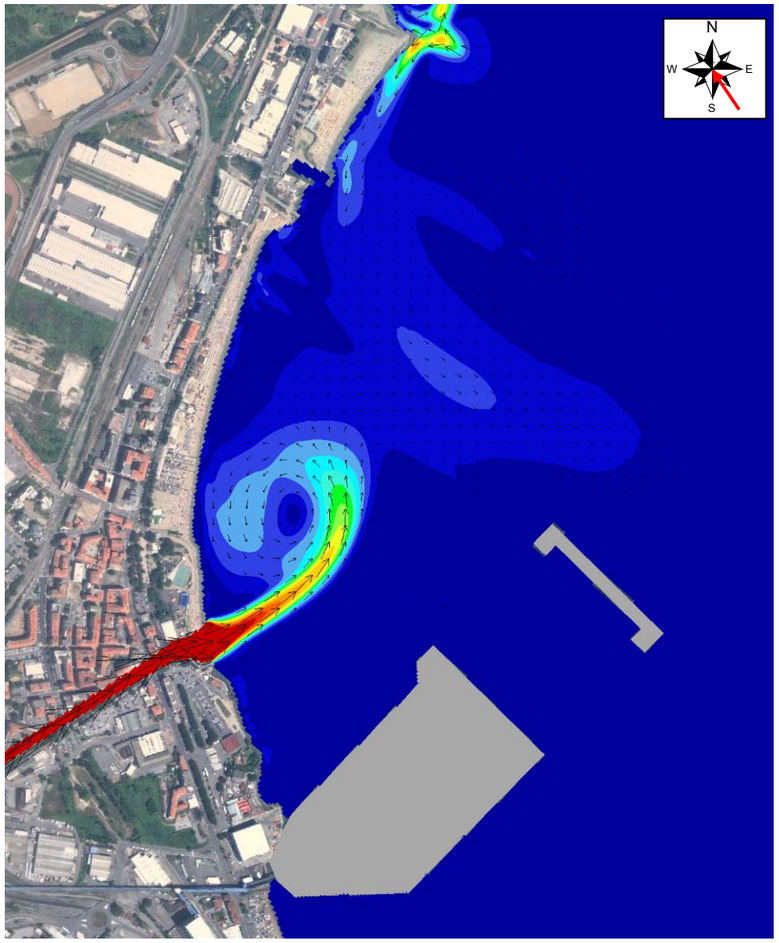


FIGURA 3-42 - TEST5 - CIRCOLAZIONE COSTIERA
H_S = 1.17 M - T_P = 5.60 S - DIR = 145°N

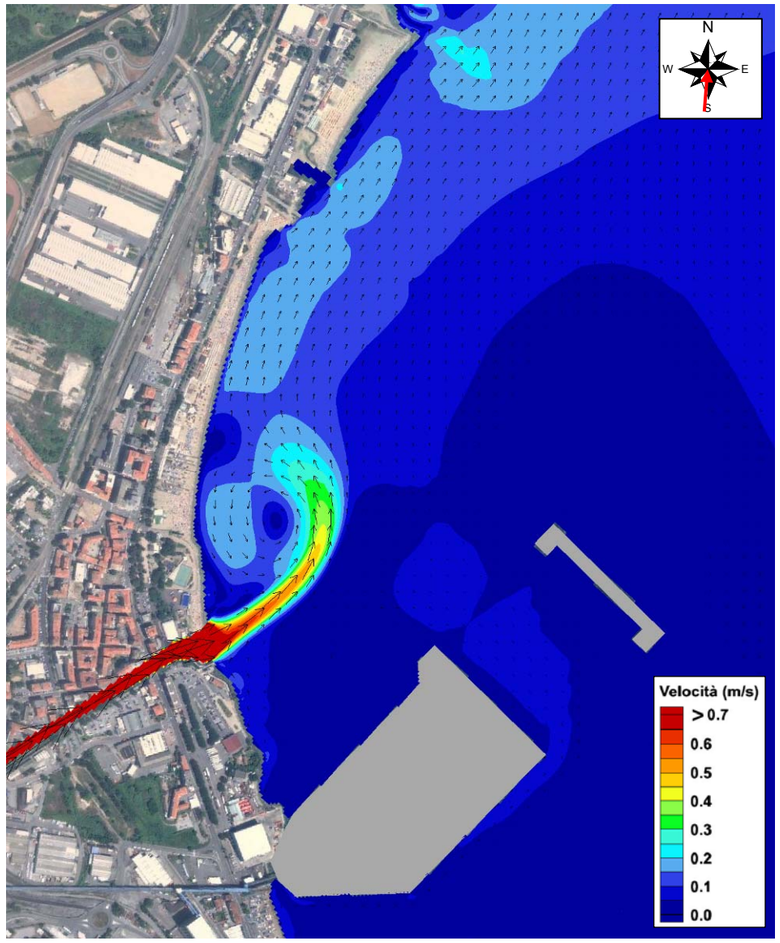


FIGURA 3-43 - TEST6 - CIRCOLAZIONE COSTIERA
H_S = 1.61 M - T_P = 6.80 S - DIR = 185°N

3.1.5. Trasporto solido litoraneo e tendenze evolutive del fondale

Utilizzando l'accoppiamento del codice di calcolo CMS-Flow con il codice di calcolo CMS-Wave, è stato inoltre condotto lo studio del trasporto solido litoraneo. Il codice di calcolo CMS-Flow consente di interpretare correttamente i fenomeni responsabili del trasporto dei sedimenti; le simulazioni condotte consentono di evidenziare, seppur qualitativamente, le aree potenzialmente attive dal punto di vista del trasporto solido generato dall'azione combinata di onde e correnti. Per lo studio del trasporto solido sono state considerate come forzanti principali il campo di moto ondoso (CMS-Wave) e il campo di velocità e di livelli generato dal moto ondoso e dall'evento di piena (risultati del modello CMS-Flow, cfr. precedente paragrafo).

Il modello è in grado di simulare i fenomeni di trasporto che interessano la fascia di spiaggia attiva sommersa; conseguentemente, per lo studio sono state fornite in input al modello le caratteristiche granulometriche del materiale che compone la spiaggia sommersa. Dai dati granulometrici disponibili si è ricavato un valore medio del D_{50} (diametro mediano dei grani) pari a 0.20 mm. Si rimanda al paragrafo 1.3.2 in appendice per una più dettagliata descrizione delle modalità con cui è stato ricavato tale valore. I risultati, in termini di trasporto solido, ottenuti per mezzo del codice di calcolo CMS-Flow interfacciato con il codice di calcolo CMS-Wave, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Figura 3-44 a Figura 3-49). Per ciascuna delle mareggiate analizzate sono stati riportati i risultati che rappresentano, in termini di gradazioni cromatiche, l'andamento del trasporto e la quantità dei sedimenti mobilitati (concentrazione media sulla colonna d'acqua dei sedimenti messi in sospensione).

Dall'analisi dei risultati si osserva che le zone più attive dal punto di vista della movimentazione dei sedimenti sono quelle comprese tra la foce del Quiliano e l'area camper, mentre risulta piuttosto ridotta la mobilitazione dei sedimenti nel tratto centrale e meridionale del litorale. La cuspide fociva del Quiliano è evidentemente la parte più attiva, sia per la morfologia del fondale che per la maggiore esposizione al moto ondoso; è in grado di alimentare sia la spiaggia a Nord che quella a Sud, anche se nella configurazione attuale e di progetto delle opere presenti, il trasporto avviene in prevalenza verso Sud.

La mareggiata di Levante caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 1) genera nel tratto di litorale a Nord, fino al cantiere nautico, un significativo trasporto solido diretto verso Sud-Ovest. Procedendo verso Sud, lungo tutta la spiaggia in ghiaia fino al terrapieno del campo da basket, si osserva una progressiva diminuzione del flusso di sedimenti. Il flusso prosegue, con valori ulteriormente ridotti, anche oltre il terrapieno, fino ad annullarsi poco a Sud della foce del Segno.

La mareggiata di Scirocco caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 2) genera un trasporto solido piuttosto ridotto, ad eccezione dell'area in prossimità della foce del Quiliano, dove la demolizione della cuspide fociva determina una maggior mobilitazione dei sedimenti, che interessa però il solo tratto prossimo alla foce.
A sud del Quiliano il trasporto risulta diretto verso Sud-Ovest ed è caratterizzato da una mobilitazione piuttosto bassa, che si annulla rapidamente poco a Sud dell'area camper.

Per la mareggiata di Mezzogiorno caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 3) si può osservare che, praticamente lungo tutto il tratto di litorale oggetto di interesse, i sedimenti non vengono mobilitati dalla mareggiata.

Per quanto riguarda le mareggiate caratterizzate da frequenza maggiore (5gg/anno), si può osservare che il trasporto solido risulta piuttosto ridotto e assume un certo rilievo solo per la mareggiata di Levante (TEST 4), che genera un trasporto solido diretto verso Sud, tendente ad annullarsi prima della foce del Segno.
Si può inoltre osservare che l'evento di piena è in grado di mobilitare una notevole quantità di materiale lungo l'asta fluviale, generando un intenso trasporto di materiale fino alla foce. Poco oltre la foce si osserva invece, per tutte i test eseguiti, una rapida diminuzione di intensità del trasporto; il materiale infatti sedimenta entro breve distanza dalla foce. Si può quindi osservare che, diversamente dalla portata liquida, il trasporto alla foce non risulta sostanzialmente influenzato dalle concomitanti mareggiate (il sedimento precipita subito, prima che il flusso in uscita venga influenzato

dalla corrente litoranea). Si ricorda che le simulazioni con evento di piena sono state eseguite considerando che il materiale mobilitato dalla piena sia analogo a quello di interesse per lo studio del trasporto solido litoraneo (0.2 mm, come quasi tutto il fondale nell'area di studio), al fine di valutare dove questo venga trasportato per effetto della piena in concomitanza alle mareggiate. Il materiale mobilitato dalla piena è caratterizzato da granulometrie variabili e solo in piccola parte costituito sedimenti di dimensioni uguali o inferiori ai 0.2 mm. Conseguentemente si può considerare che tali simulazioni mostrino una mobilitazione potenziale dei sedimenti. Si rimanda al paragrafo 1.4.7 in appendice per una più esaustiva trattazione con riferimento anche a granulometrie più grossolane.

Trasporto solido litoraneo indotto da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 1 giorno

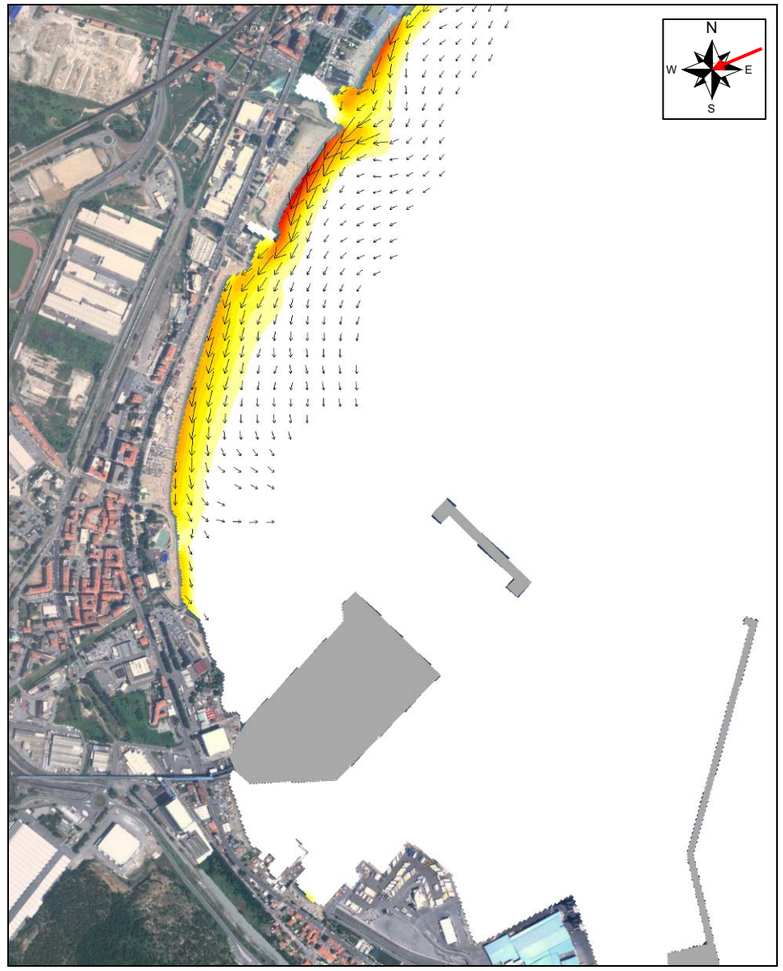


FIGURA 3-44 - TEST1 - TRASPORTO SOLIDO
H_S = 1.64 M - T_P = 6.50 S - DIR = 75°N

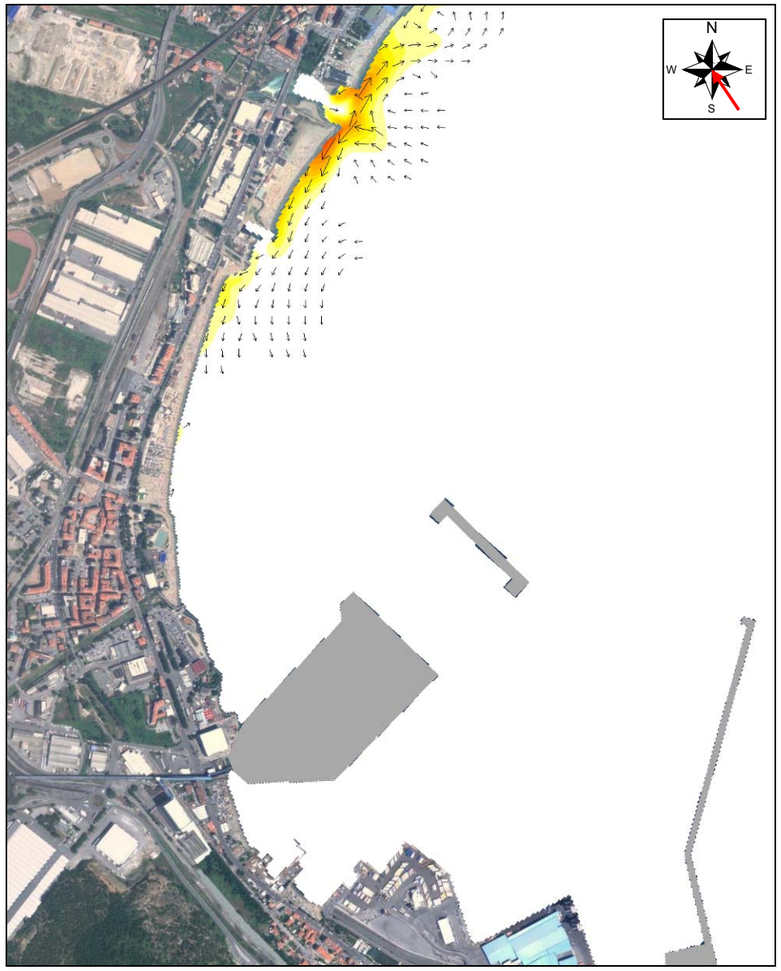


FIGURA 3-45 - TEST2 - TRASPORTO SOLIDO
H_S = 1.93 M - T_P = 6.80 S - DIR = 145°N

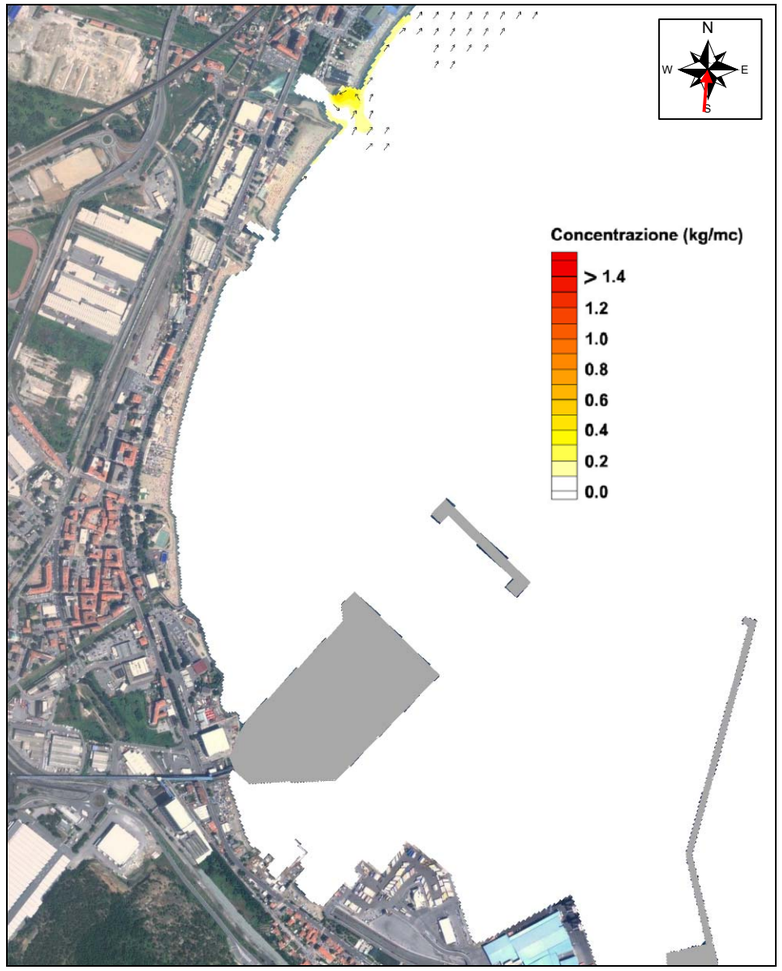


FIGURA 3-46 - TEST3 - TRASPORTO SOLIDO
H_S = 2.22 M - T_P = 7.80 S - DIR = 185°N

Trasporto solido litoraneo indotto da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 5 giorni e piena del Torrente Segno concomitante

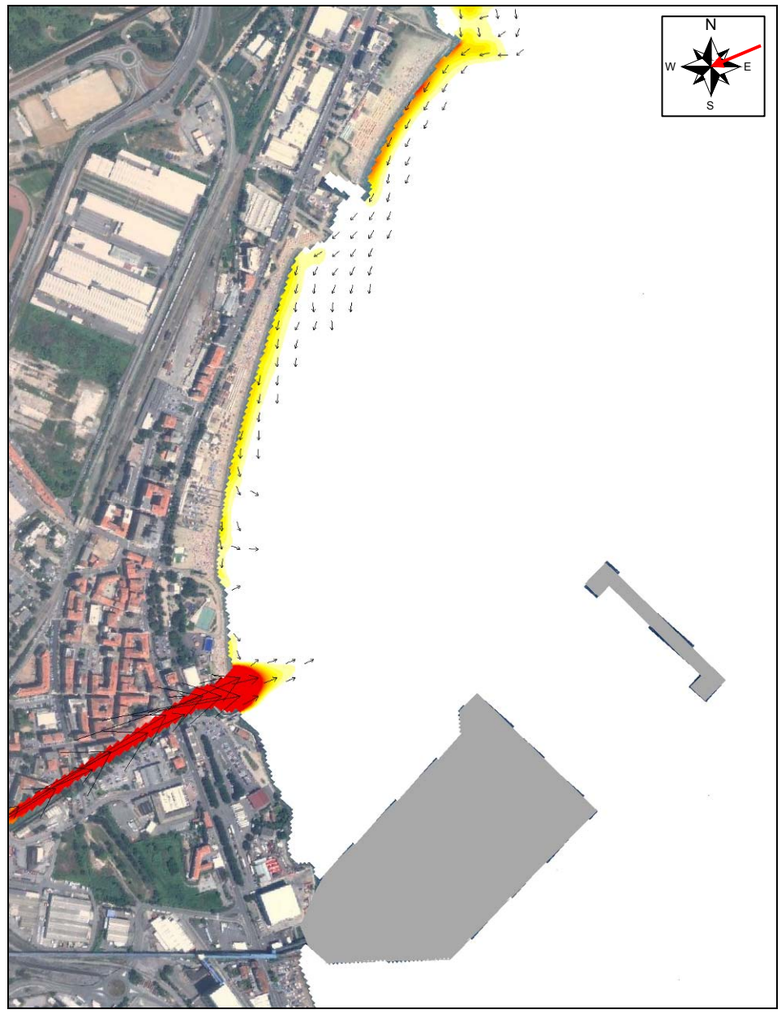


FIGURA 3-47 - TEST4 - TRASPORTO SOLIDO
H_S = 0.93 M - T_P = 5.20 S - DIR = 75°N



FIGURA 3-48 - TEST5 - TRASPORTO SOLIDO
H_S = 1.17 M - T_P = 5.60 S - DIR = 145°N

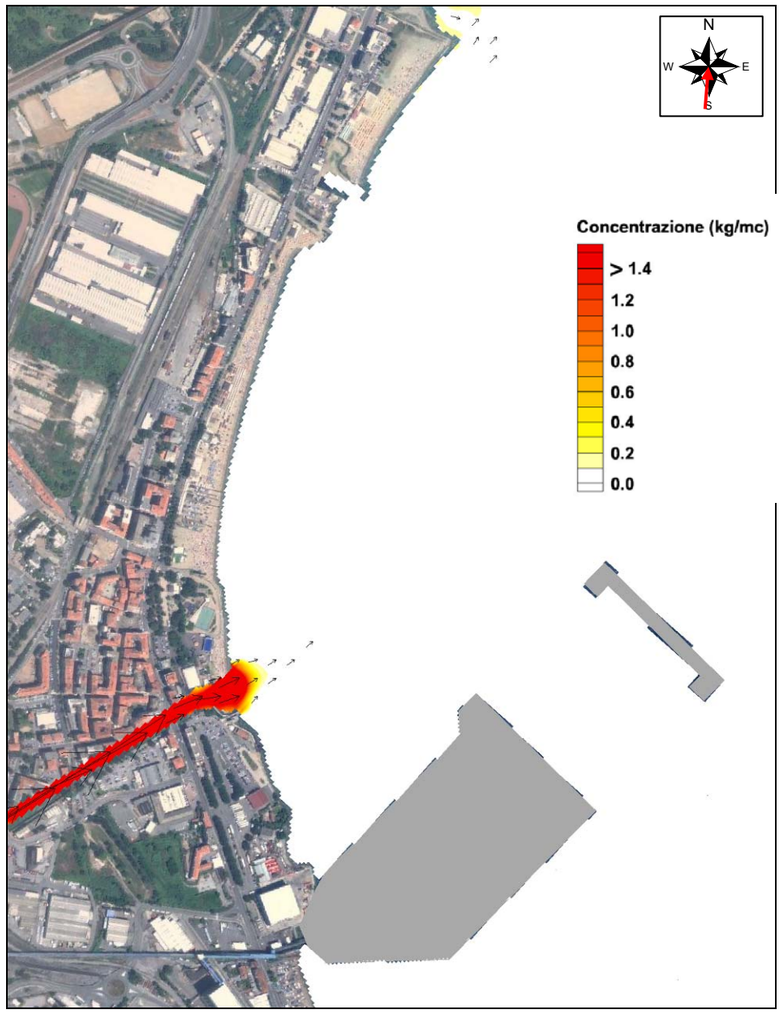


FIGURA 3-49 - TEST6 - TRASPORTO SOLIDO
H_S = 1.61 M - T_P = 6.80 S - DIR = 185°N

3.1.5.1 Tendenze evolutive del fondale

Per ciascuna delle mareggiate precedentemente analizzate sono stati ricavati i risultati, attraverso il codice di calcolo CMS-Flow, in termini di evoluzione del fondale. I risultati forniscono una indicazione sulla tendenza alla sedimentazione e all'erosione e rappresentano sostanzialmente la tendenza evolutiva della fascia di spiaggia attiva sommersa. I risultati si riferiscono alle tendenze sviluppate dalla persistenza delle mareggiate per una durata pari a 12 ore, in condizioni stazionarie, per i TEST 1, 2, e 3, mentre si riferiscono alla durata complessiva dell'evento di piena per i TEST 4, 5 e 6.

I risultati sono riportati nelle figure riportate nelle successive pagine (da Figura 3-50 a Figura 3-55) e rappresentano, in termini di gradazioni cromatiche, le aree tendenzialmente soggette a erosione (valori negativi, blu) e quelle tendenzialmente soggette a deposizione (valori positivi, rossi).

I risultati in termini di trasporto solido (analizzati nelle pagine precedenti) hanno sostanzialmente evidenziato che il litorale risulta soggetto ad una mobilitazione di sedimenti da Nord verso Sud. In termini di tendenza evolutiva dei fondali, questo si traduce in una tendenza generale all'erosione verso Nord e alla deposizione verso Sud, ovviamente con locali eccezioni determinate dalle geometria del fondale e dalle caratteristiche locali di corrente e moto ondoso.

Per la mareggiata di Levante caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 1) si osservano infatti fenomeni erosivi in corrispondenza della cuspide fociva del Quiliano, della spiaggia immediatamente a Sud, e del fondale antistante l'area camper. A fronte di tali fenomeni erosivi si evidenziano aree di deposizione più al largo (effetto della mareggiata sul profilo trasversale di spiaggia), fenomeni di interrimento di fronte allo scalo del cantiere nautico e, soprattutto, estese aree di deposizione di fronte alla spiaggia a Nord del terrapieno del campo da basket e di fronte alla foce del Segno.

Per la mareggiata di Scirocco caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 2), anche se in misura molto inferiore, si osserva la sostanziale tendenza all'erosione del tratto di spiaggia prossimo all'area camper a favore della tratto immediatamente più a Sud. Tale tendenza risulta comunque piuttosto limitata, anche in relazione alla ridotta mobilità dei sedimenti nell'area di interesse.

Per la Mareggiata di Libeccio caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 3) non si rilevano invece variazioni del fondale.

Le simulazioni eseguite con la piena del T. Segno mostrano che i sedimenti provenienti dal torrente non vengono trasportati a grandi distanze dalla foce, ma vengono depositati nei pressi della stessa, comportando un locale accumulo.
Si sottolinea nuovamente che, considerata la dimensione del materiale impiegato nella simulazione (0.2 mm), tali esiti rappresentano un risultato potenziale. Si rimanda al paragrafo 1.4.7 in appendice per una più dettagliata trattazione dell'argomento anche in relazione ad granulometria più grossolana del materiale.

Tendenza evolutiva del fondale indotta da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 1 giorno

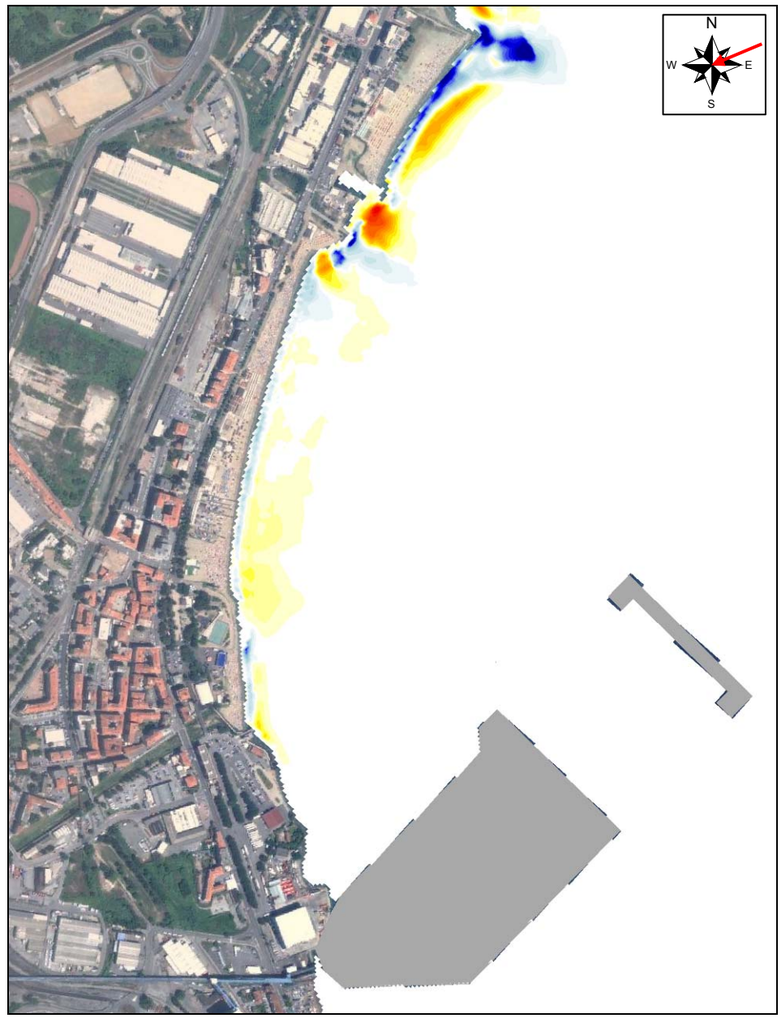


FIGURA 3-50 - TEST1 - EVOLUZIONE DEL FONDALE
H_S = 1.64 M - T_P = 6.50 S - DIR = 75°N

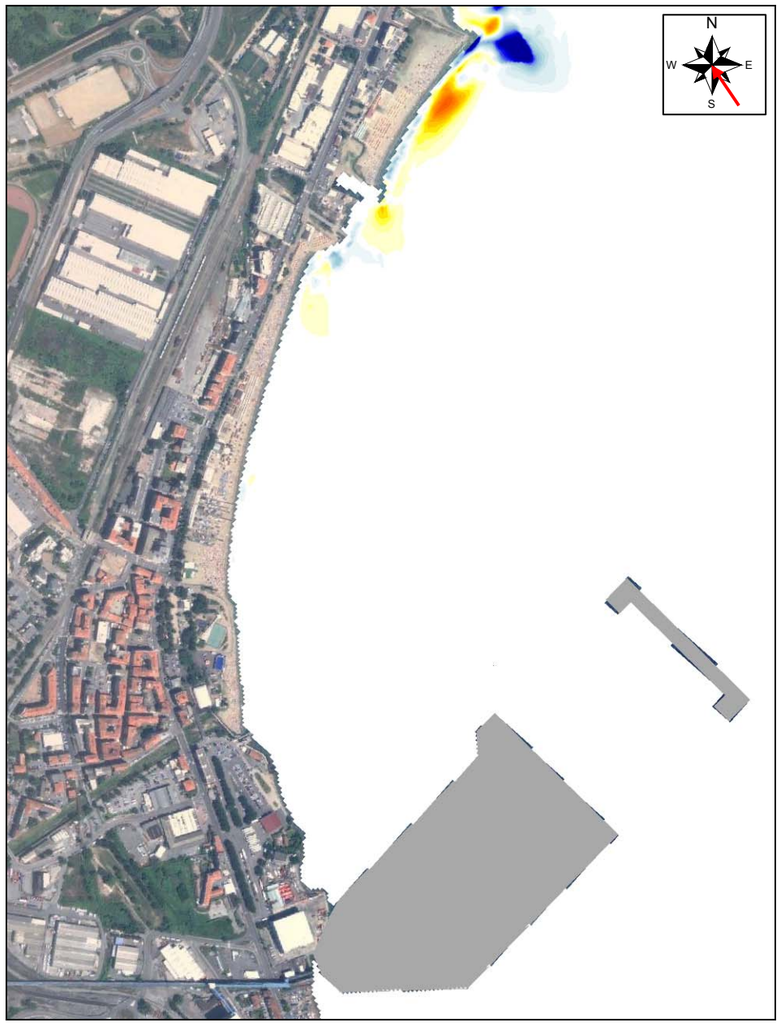


FIGURA 3-51 - TEST2 - EVOLUZIONE DEL FONDALE
H_S = 1.93 M - T_P = 6.80 S - DIR = 145°N

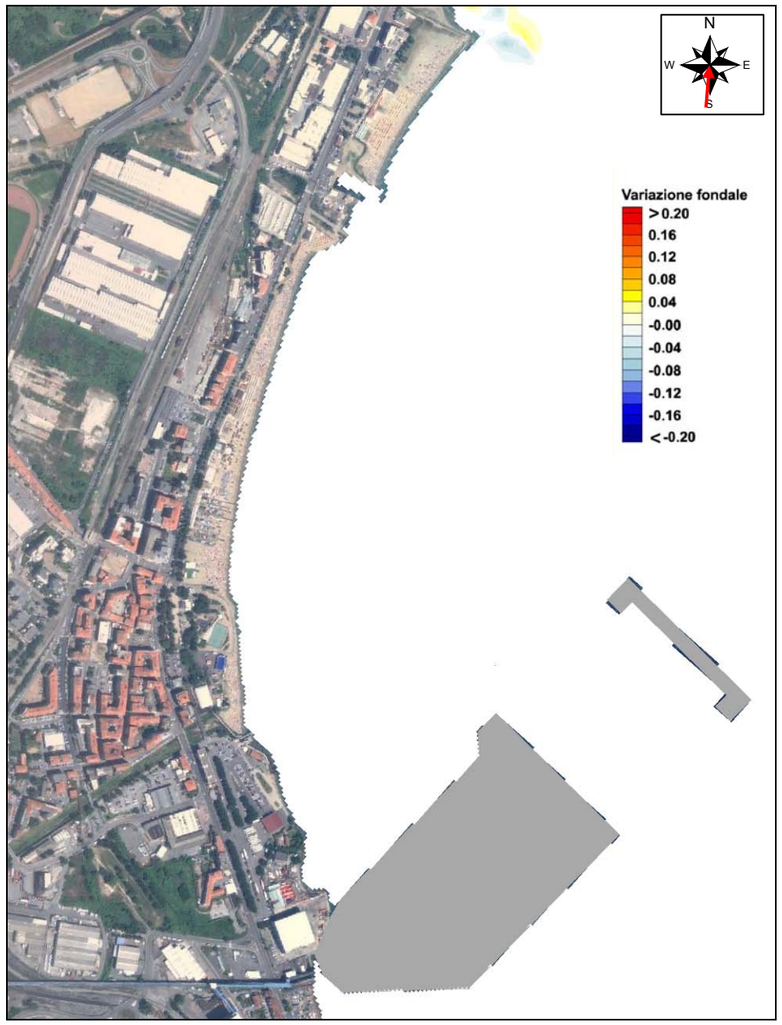


FIGURA 3-52 - TEST3 - EVOLUZIONE DEL FONDALE
H_S = 2.22 M - T_P = 7.80 S - DIR = 185°N

Tendenza evolutiva del fondale indotta da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 5 giorni e piena del Torrente Segno concomitante

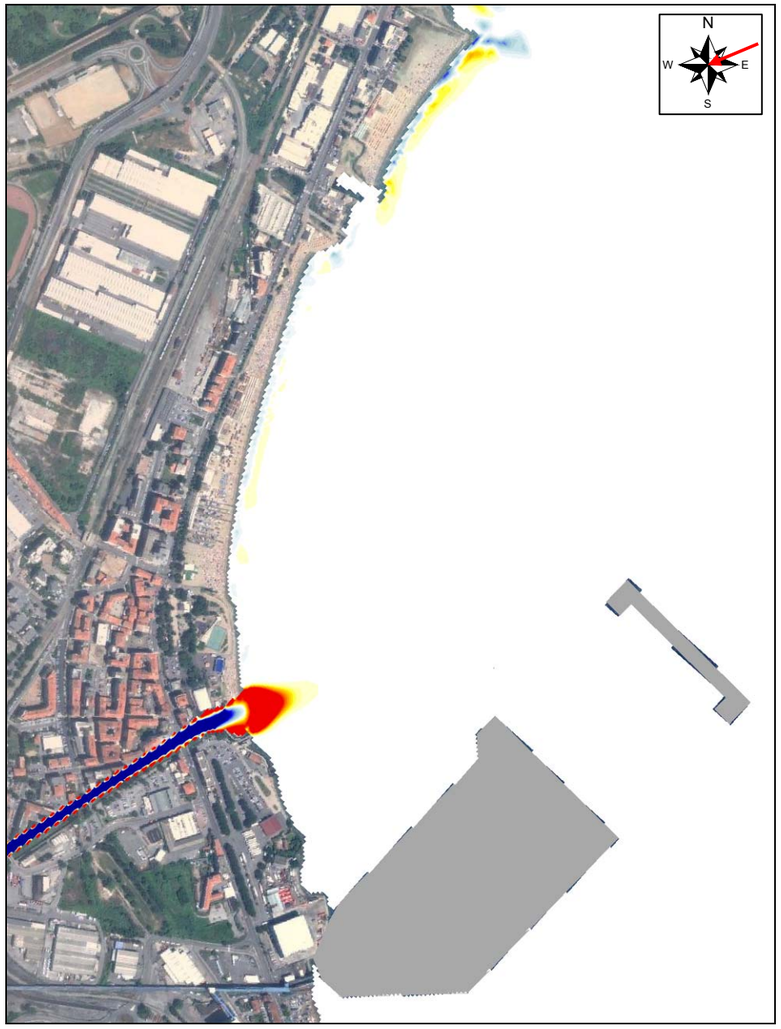


FIGURA 3-53 - TEST4 - EVOLUZIONE DEL FONDALE
H_S = 0.93 M - T_P = 5.20 S - DIR = 75°N

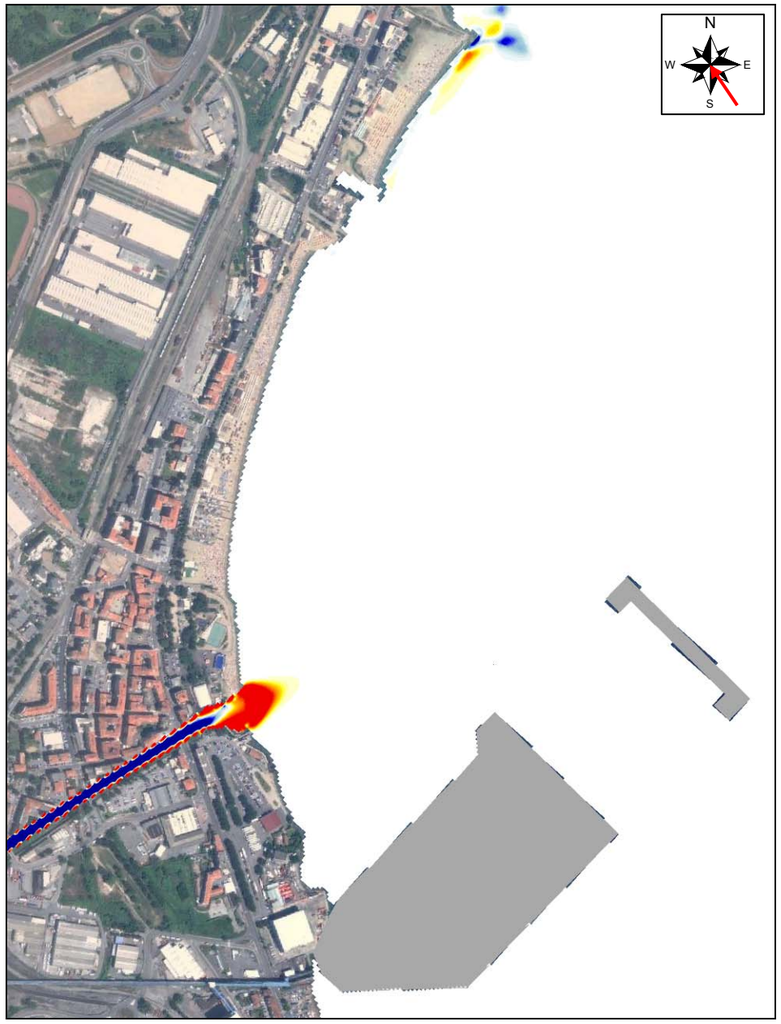


FIGURA 3-54 - TEST5 - EVOLUZIONE DEL FONDALE
H_S = 1.17 M - T_P = 5.60 S - DIR = 145°N

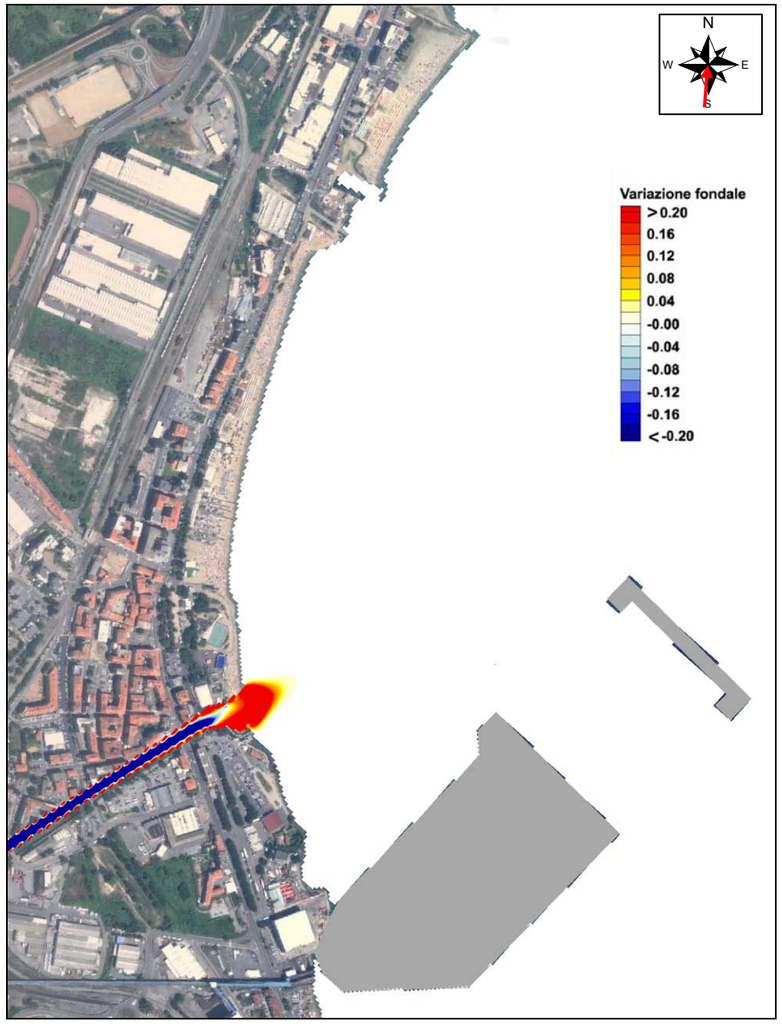


FIGURA 3-55 - TEST6 - EVOLUZIONE DEL FONDALE
HS = 1.61 M - TP = 6.80 S - DIR = 185°N

3.1.6. Qualità delle acque marino costiere

Le analisi sulla qualità delle acque marino costiere lungo i litorali dei Vado è stata basata sulle analisi della dispersione di un tracciante non conservativo di tipo batterico rappresentativo di una possibile sorgente di contaminazione biologica.

Per la valutazione della dispersione del tracciante batterico è stato utilizzato un modello matematico per la qualità delle acque appositamente predisposto e tarato sulla base dei dati disponibili, in grado di simulare i processi di trasporto ed i processi di mortalità batterica.

Il modello utilizzato per lo studio della dispersione di un inquinante di tipo batterico è il Delft3D-WAQ, il modulo per lo studio della qualità delle acque che fa parte della più ampia suite di software Delft3D, un sistema integrato di modelli numerici sviluppato presso i laboratori dell'istituto di ricerca olandese "Deltares" per la simulazione in una schematizzazione 2 e 3 dimensionale dei processi che determinano i flussi, il trasporto di sedimenti, la propagazione del moto ondoso, la qualità delle acque e l'ecologia di un ambiente acquatico costiero e fluviale.

Una descrizione dettagliata del modello utilizzato e della attività di analisi dei dati e taratura del modello sono riportati in appendice al presente documento.

Nello studio della dispersione di un tracciante batterico è stato considerato uno scenario meteomarino caratterizzato dall'assenza di vento e da una marea media come riportato nei paragrafi precedenti. La condizione meteo marina senza vento è infatti il caso più critico in quanto caratterizzato da una minore capacità di trasporto e, quindi, di minore dispersione del tracciante batterico.

Nella predisposizione delle simulazioni sono state fatte le seguenti assunzioni:

– è stato considerato un tracciante differente per ciascuna potenziale sorgente di contaminazione (i torrenti Segno e Quiliano ed i Rii Lusso Fontanazza e Sant'Elena già identificati nel corso della predisposizione del modello) in modo da valutare l'effetto di ciascuna singola immissione;
– a ciascuna sorgente è stato imposto un rilascio unitario (pari a $1 m^3/s$) costante e continuo con una concentrazione batterica pari a 10000 MPN/100ml per una durata di 72 ore; la simulazione è stata quindi fatta proseguire per altre 48 (quindi per un totale di 120 ore) fino alla completa scomparsa della concentrazione batterica su tutto il dominio di calcolo;
– sono stati considerati i medesimi parametri fisici e biologici per la definizione del T_{90} e del tasso di mortalità batterica, come definiti durante la fase di taratura.

Per ciascuna simulazione eseguita sono stati estratti i campi di concentrazione dell'Escherichia Coli a differenti istanti temporali a partire dall'istante finale dello scarico. I livelli di concentrazione si riferiscono allo strato superficiale della colonna d'acqua, ovvero quello di maggiore interesse ai fini della balneazione.

I risultati delle simulazioni per i 5 differenti rilasci considerati sono riportati da Figura 3-56 a Figura 3-60; le mappe spaziali della concentrazione relativa sono riferite al livello superficiale della colonna d'acqua. La concentrazione relativa (in questo caso in per mille) è definita come il rapporto tra la concentrazione C(x,t) in un punto x del dominio di calcolo al tempo t e la concentrazione C_0 al rilascio. Questo rapporto indica anche l'abbattimento della concentrazione rispetto al carico iniziale immesso nel sistema.

Le mappe della concentrazione relativa si riferiscono a tre istanti temporali: all'istante finale del rilascio in cui si manifestano i massimi livelli di concentrazione (T = 72 ore), a tre ore dalla fine del rilascio e a 6 ore dalla fine del rilascio.

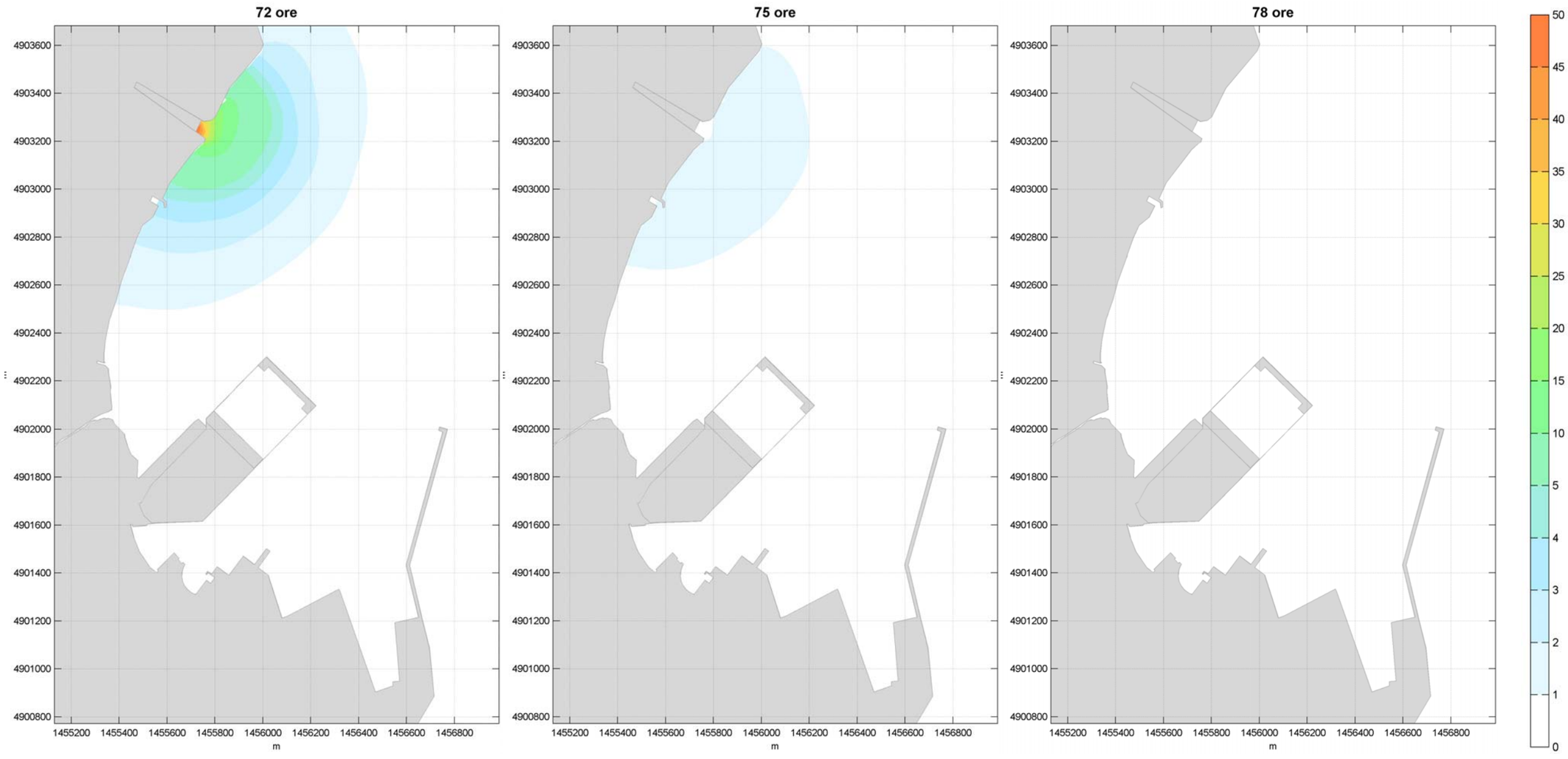


FIGURA 3-56 - RILASCIO FIUME QUILIANO - CONCENTRAZIONE ESCHERICHIA COLI (C/C_0 X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE

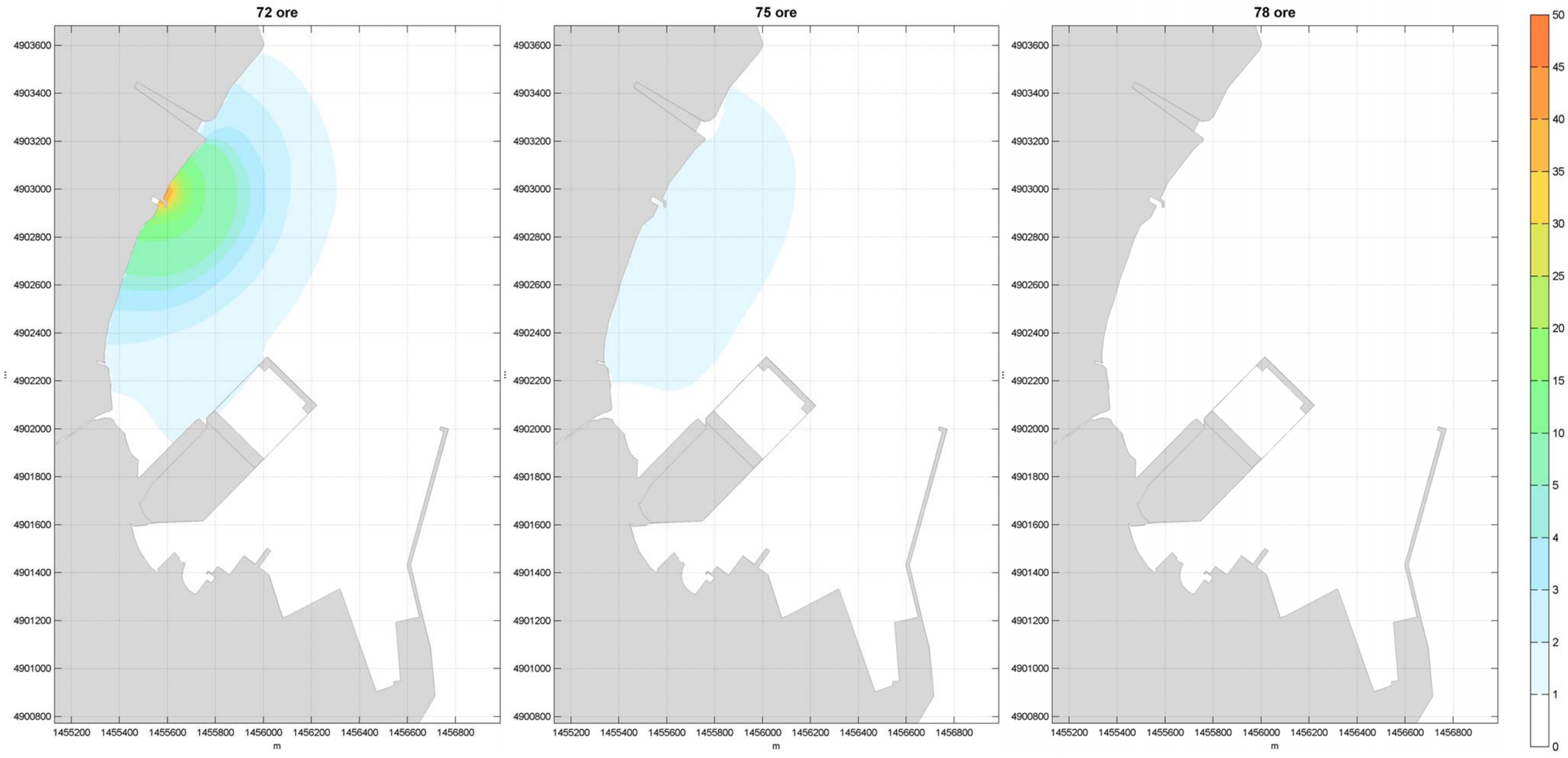


FIGURA 3-57 - RILASCIO RIO LUSSO - CONCENTRAZIONE ESCHERICHIA COLI (C/C_0 X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE

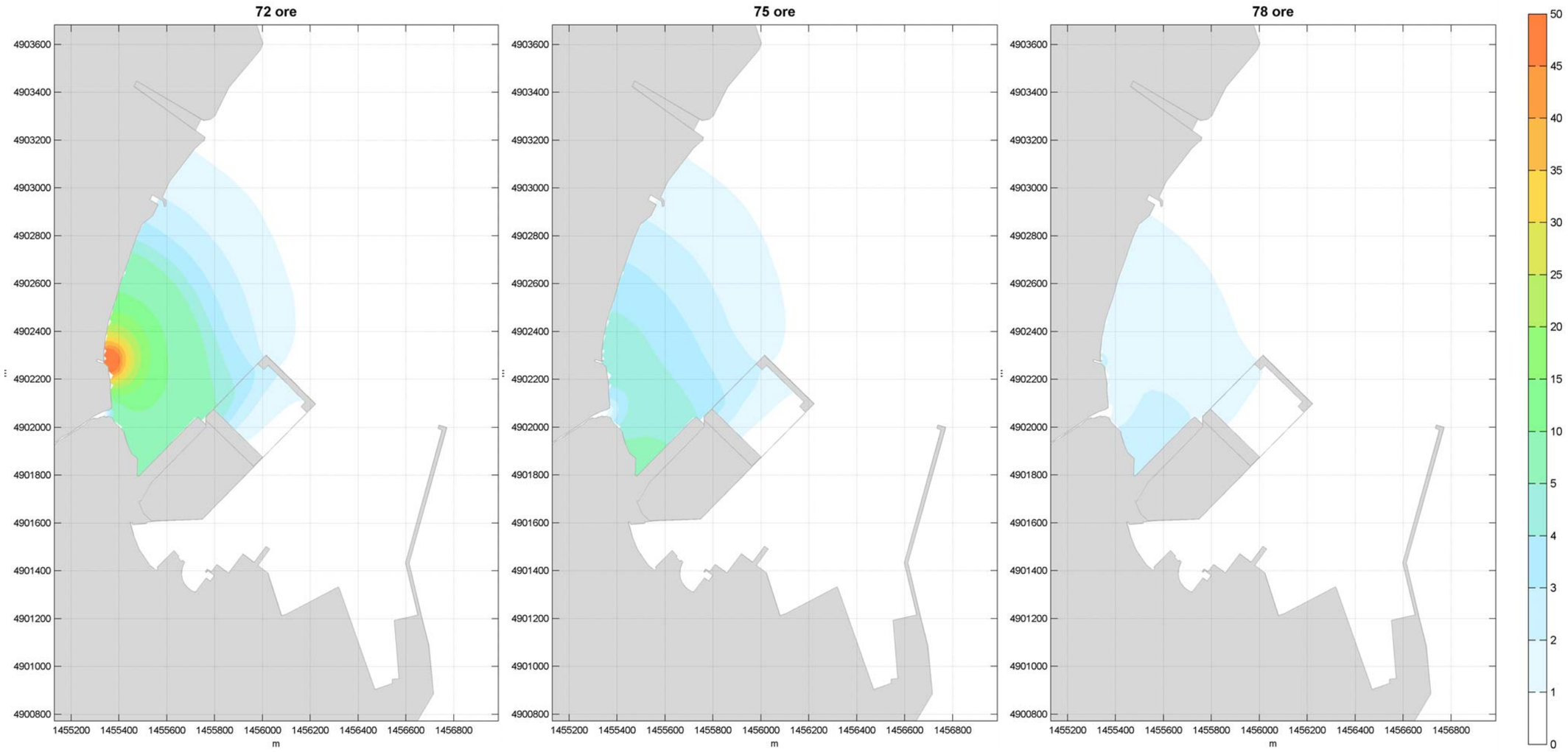


FIGURA 3-58 - RILASCIO RIO FONTANAZZA - CONCENTRAZIONE ESCHERICHIA COLI (C/C_0 X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE

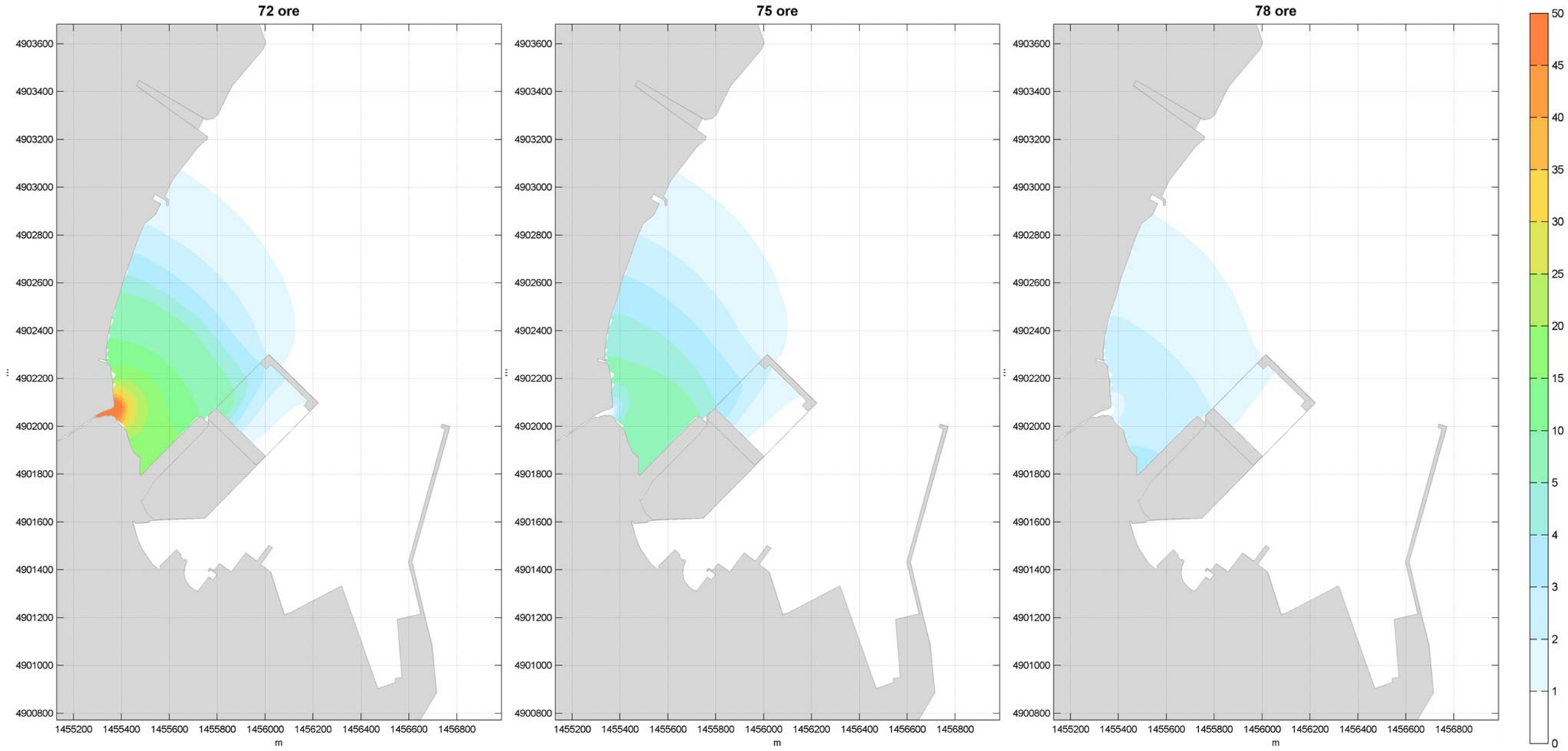


FIGURA 3-59 - RILASCIO TORRENTE SEGNO - CONCENTRAZIONE ESCHERICHIA COLI (C/C_0 X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE

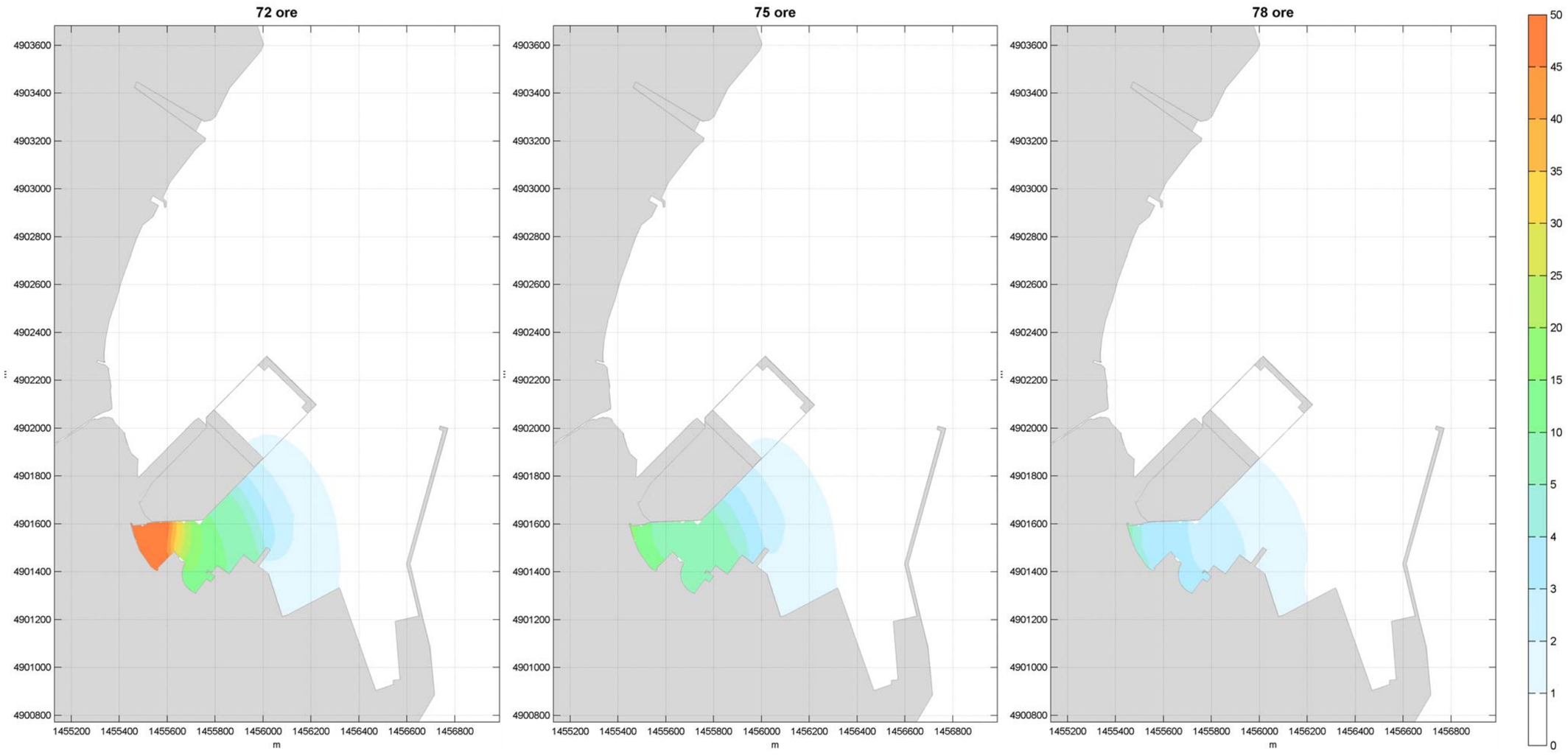


FIGURA 3-60 - RILASCIO RIO SANT'ELENA - CONCENTRAZIONE ESCHERICHIA COLI (C/C_0 X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE

Dai risultati si osserva che:

- In termini generali, come già osservato per le analisi dei traccianti conservativi, la dispersione dei traccianti è abbastanza omogenea attorno al punto di immissione. Questo è dovuto al fatto che la componente avvettiva della dispersione è molto limitata visto la modesta circolazione idrodinamica che caratterizza la zona. Il tracciante batterico tende a disperdersi molto rapidamente attorno alla sorgente e nel raggio di qualche centinaia di metri il carico batterico viene diluito sotto la soglia del 1 ‰.
- In riferimento al torrente Quiliano ed al Rio Lusso il plume del tracciante tende rapidamente a scomparire per l'effetto combinato della pura dispersione idrodinamica e a causa dell' "invecchiamento" del tracciante. Anche nell'istante finale del rilascio, il momento in cui si osservano le massime concentrazioni, le concentrazioni del tracciante sono inferiori al 10-20 ‰ alla distanza di qualche centinaia di metri. Le concentrazioni del tracciante tendono praticamente a scomparire s tutto il dominio di calcolo (valori sotto la soglia del 1 ‰) già a 3 ore dalla fine del rilascio.
- In riferimento al Rio Fontanazza si nota che il plume del tracciante assume una forma semicircolare nelle vicinanze del punto di scarico e tende invece a deformarsi allontanandosi dal punto sorgente. Questo effetto è dovuto alla presenza della radice della piattaforma che impedisce il trasporto del tracciante in direzione sud-est e determina un aumento locale delle concentrazioni. In termini assoluti, nell'istante finale della simulazione, i valori delle concentrazioni sono nell'ordine del 50 ‰ nell'immediato intorno del rilascio variano nell'intervallo 5-20 ‰ nel tratto compreso tra la foce del Rio e la piattaforma. Anche in questo caso la riduzione dei traccianti batterici è rapida e nell'arco di 8 ore le concentrazioni superficiali scendono sotto la soglia del 1 ‰ in tutto il dominio
- In riferimento al Torrente Segno si osserva una situazione simile a quella precedente; in questo caso gli effetti sono più pronunciati data la maggiore vicinanza del T. Segno alla radice della piattaforma. Dalle immagini è percepibile anche l'effetto, seppure modesto, della presenza della schiera di cassoni sul lato esterno della piattaforma che rallentano la diffusione del tracciante verso mare e creano una via preferenziale di propagazione nell'area su palei della piattaforma. Il livelli di concentrazione in queste aree permangono tuttavia molto bassi e nell'ordine di qualche per mille nell'istante di massima dispersione. La riduzione della concentrazione batterica sotto la soglia del 1‰ richiede un tempo di circa 8 ore.
- In riferimento al Rio Sant'Elena si osserva che la propagazione del tracciante risente della conformazione morfologica dell'area che è chiusa verso nord dalla radice della piattaforma e verso sud dalle banchine dell'attuale terminal traghetti. In questo caso il plume del tracciante non potendosi espandere rimane più confinato nella zona circostante il punti di immissione determinando così livelli maggiori di concentrazione. Nell'istante finale della simulazioni i livelli dei concentrazione relativa del tracciante sono nell'ordine del 50-100 ‰ nell'immediato intorno del punto di rilascio e tendono progressivamente a diminuire sotto la soglia del 10 ‰ allontanandosi qualche centinaia di metri verso mare rispetto alla sorgente. Anche in questo caso l'abbattimento nel tempo della concentrazione di tracciante è rapida anche se, in ragione delle maggiori concentrazioni, il completo abbattimento del carico batterico sotto la soglia del 1 ‰ necessità di circa 9 ore.

3.2. Suolo e sottosuolo

3.2.1. Ambiente marino costiero

3.2.1.1 Tendenze evolutive del litorale

Il presente paragrafo riporta i risultati della simulazione di evoluzione morfologica a 10 anni relativi alla configurazione di variante in fase di esercizio senza porto turistico. La simulazione è stata condotta rappresentando nel modello tutte le opere previste nel Piano regolatore Portuale ad eccezione appunto del porto turistico. Il layout è stato inoltre modificato per tenere in considerazione le variazioni alle opere introdotte con la proposta di variante: estensione verso mare dell'area in rilevato della piastra (per una lunghezza di circa 50 m), modifica delle quote di estradosso dei cassoni nell'area a giorno e inserimento di una fila di cassoni all'estremità lato mare della piastra (in corrispondenza della banchina rinfuse).
Considerando le variazioni introdotte al layout portuale (allungamento diga foranea del porto, realizzazione della piastra multifunzionale con le modifiche di variante), si

è reso necessario modificare il dominio di calcolo STWAVE (rispetto alla fase di taratura riportata in appendice) e ripetere quindi la fase di analisi della propagazione del moto ondoso sottocosta. Ciò ha consentito di rappresentare in maniera corretta l'influenza di tutte le opere presenti nel dominio di calcolo e in grado di influenzare l'evoluzione del litorale.

<u>Propagazione del moto ondoso sottocosta</u>

La fase iniziale della simulazione consiste appunto nel trasferimento sottocosta, al limite esterno della fascia attiva, delle caratteristiche del clima ondoso precedentemente determinate nel punto P, posto su un fondale di -100 m s.m.m. (acque profonde). Nel caso specifico, rispetto alla fase di taratura, il dominio di calcolo STWAVE è stato opportunamente modificato introducendo la nuova diga foranea e la piastra (Figura 3-61). La parte della piastra su pali (parte a giorno) è stata schematizzata nel modello STWAVE modificando la batimetria dell'area, ovvero considerando la quota dell'estradosso dei cassoni di fondazione secondo quanto riportato nelle tavole progettuali di variante.

Il trasferimento del clima ondoso, dal punto P al limite della fascia attiva, è stato condotto mediante il codice di calcolo STWAVE. Sono state scelte una serie di stazioni, poste lungo la costa in corrispondenza della batimetrica -10 m s.m.m., ad una distanza di 40 m tra loro; tali stazioni sono state ritenute significative per rappresentare le differenti condizioni di moto ondoso lungo il litorale (Figura 3-61). Si fa presente che l'inserimento della piastra, unitamente alla particolare conformazione batimetrica dei fondali nella zona meridionale, ha reso necessario introdurre delle modifiche alla posizione di alcune "stazioni".

Le dimensioni della griglia di calcolo STWAVE e il file di input che descrive le caratteristiche del moto ondoso sono stati mantenuti invariati rispetto alla simulazione di taratura (cfr. paragrafo 1.5.9).

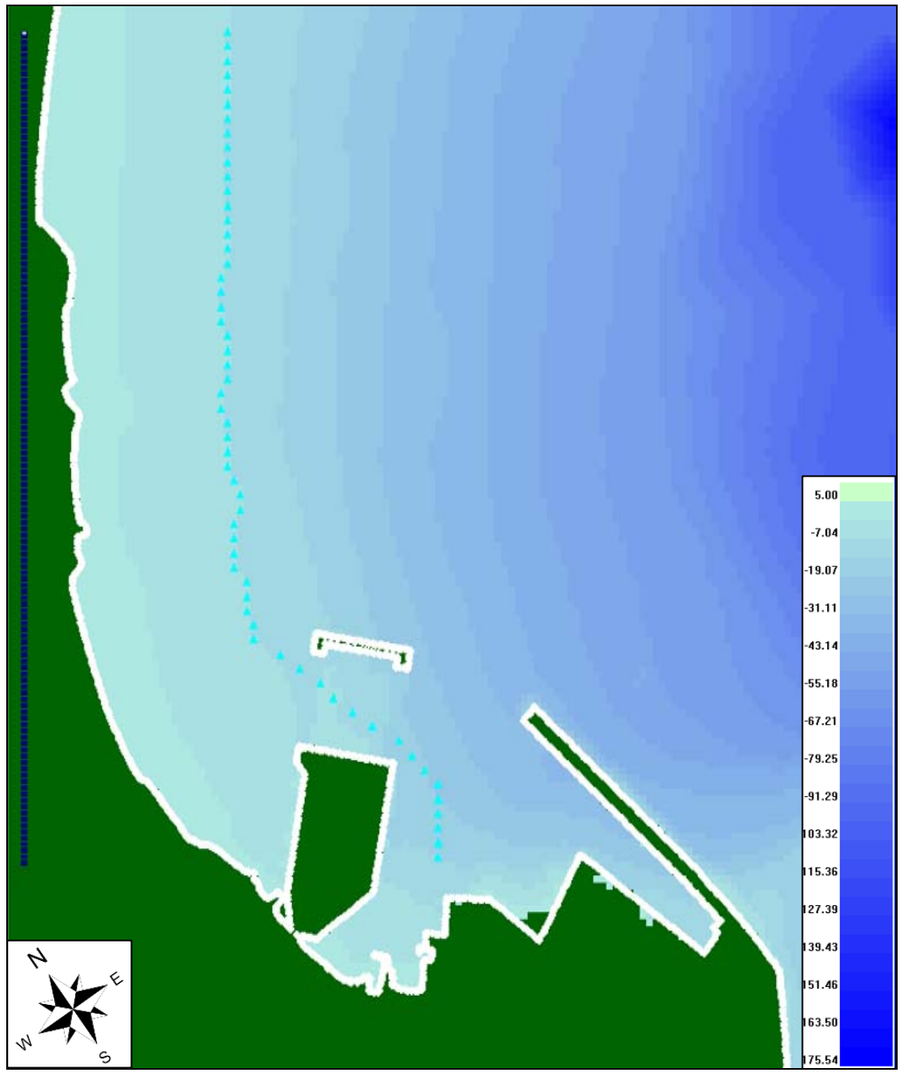


FIGURA 3-61 - GRIGLIA DI CALCOLO STWAVE - CONFIGURAZIONE DI VARIANTE IN FASE DI ESERCIZIO
UBICAZIONE DELLE BOE VIRTUALI (STAZIONI) POSTE ALLA PROFONDITÀ DI -10 M S.M.M.

Parametri utilizzati nel modello

Il dominio di calcolo, le condizioni al contorno del modello e le caratteristiche granulometriche dei sedimenti che costituiscono la spiaggia attiva sono state mantenute invariate rispetto a quelle della simulazione di taratura (cfr. successivo paragrafo 1.5.9). La simulazione è stata condotta considerando l'apporto solido del torrente Quiliano, mentre quello del Torrente Segno è stato considerato trascurabile ai fini dello studio in oggetto.

Anche nel modello GENESIS, come nella griglia STWAVE, è stata opportunamente schematizzata la parte in rilevato della piastra multifunzionale, attraverso l'accoppiamento di una barriera impermeabile collegata a terra con una struttura di tipo "non diffracting".
Nel caso specifico la barriera è stata allungata per rappresentare la fila di cassoni della parte in rilevato. La fila esterna di cassoni è, invece, stata rappresentata solamente nel modello STWAVE.
La linea di riva iniziale inserita nel modello è quella del rilievo di marzo 2010). Di seguito, in Figura 3-62, si riporta la griglia di calcolo GENESIS con le opere previste nella configurazione di variante in fase di esercizio senza porto turistico.

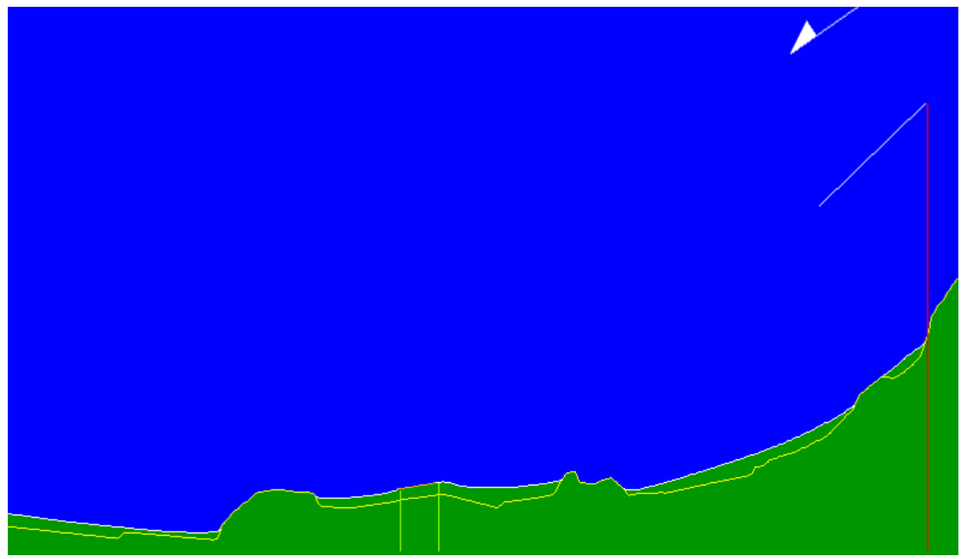


FIGURA 3-62 - GRIGLIA GENESIS - CONFIGURAZIONE DI VARIANTE IN FASE DI ESERCIZIO SENZA PORTO TURISTICO

Risultati dell'evoluzione morfologica

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di evoluzione morfologica a 10 anni nella configurazione di variante in fase di esercizio, senza porto turistico.
I risultati sono rappresentati nella successiva Figura 3-63 sia in termini di trasporto solido che di evoluzione della linea di riva, con riferimento all'intera griglia di calcolo.

Per quanto riguarda il verso e l'andamento del trasporto solido si osservano delle evidenti variazioni rispetto alla simulazione di taratura (cfr. paragrafo 1.5.10 dell'appendice). Le variazioni nel verso e nell'entità del trasporto sono da attribuire principalmente alle modifiche apportate al molo di sopraflutto del porto commerciale di Vado e, solo secondariamente (e con effetto comunque localizzato), alla realizzazione della piastra multifunzionale.

Nel tratto di litorale a Nord del campo da calcio (spiaggia di Zinola), il trasporto solido risulta diretto verso Nord-Est, con valori medi annui (trasporto netto) dell'ordine di 1500 m^3/anno. La configurazione allungata della diga foranea del porto di Vado determina la presenza di un punto di inversione del trasporto (punto di divergenza) in corrispondenza della radice meridionale del terrapieno del campo da calcio. Da questo punto in poi, verso il porto di Vado, il trasporto risulta sempre diretto verso Sud e si annulla in corrispondenza della foce del Quiliano e del cantiere nautico.
Per quanto riguarda il tratto di spiaggia a Sud del cantiere nautico, il trasporto diretto verso Sud si attiva nuovamente; la fila esterna di cassoni (previsti in variante) garantisce una maggiore protezione del tratto di litorale, con conseguente riduzione del trasporto e una maggiore tendenza all'accumulo nella zona protetta.

In termini di evoluzione della linea di riva, si riscontra una tendenza all'arretramento delle linea di riva nella spiaggia di Zinola a ridosso del terrapieno del campo da calcio per un tratto di circa 200 m. Per quanto riguarda invece il tratto di litorale compreso tra il terrapieno e la foce del Quiliano, si osserva una tendenza all'avanzamento della linea di riva, con una zona di accumulo alla radice della difesa radente del terrapieno.
Dalla foce del Quiliano, procedendo verso Sud, fino al cantiere nautico alla radice del pontile Tirreno Power, la linea di riva subisce una rotazione con arretramento a ridosso dell'armatura di foce del Quiliano e avanzamento a Sud (in corrispondenza del terrapieno del cantiere).
L'impatto degli interventi proposti in variante è limitato alla sola spiaggia compresa tra il piazzale dei camper e la foce del Segno, dove continua ad evidenziarsi una tenenza erosiva della spiaggia antistante l'area camper ed una contestuale tendenza all'accrescimento della spiaggia adiacente al terrapieno del campo da basket. Va comunque sottolineato che si tratta di variazioni modeste: il trasporto, che rimane sempre orientato verso Sud (verso il porto di Vado) si riduce sensibilmente.

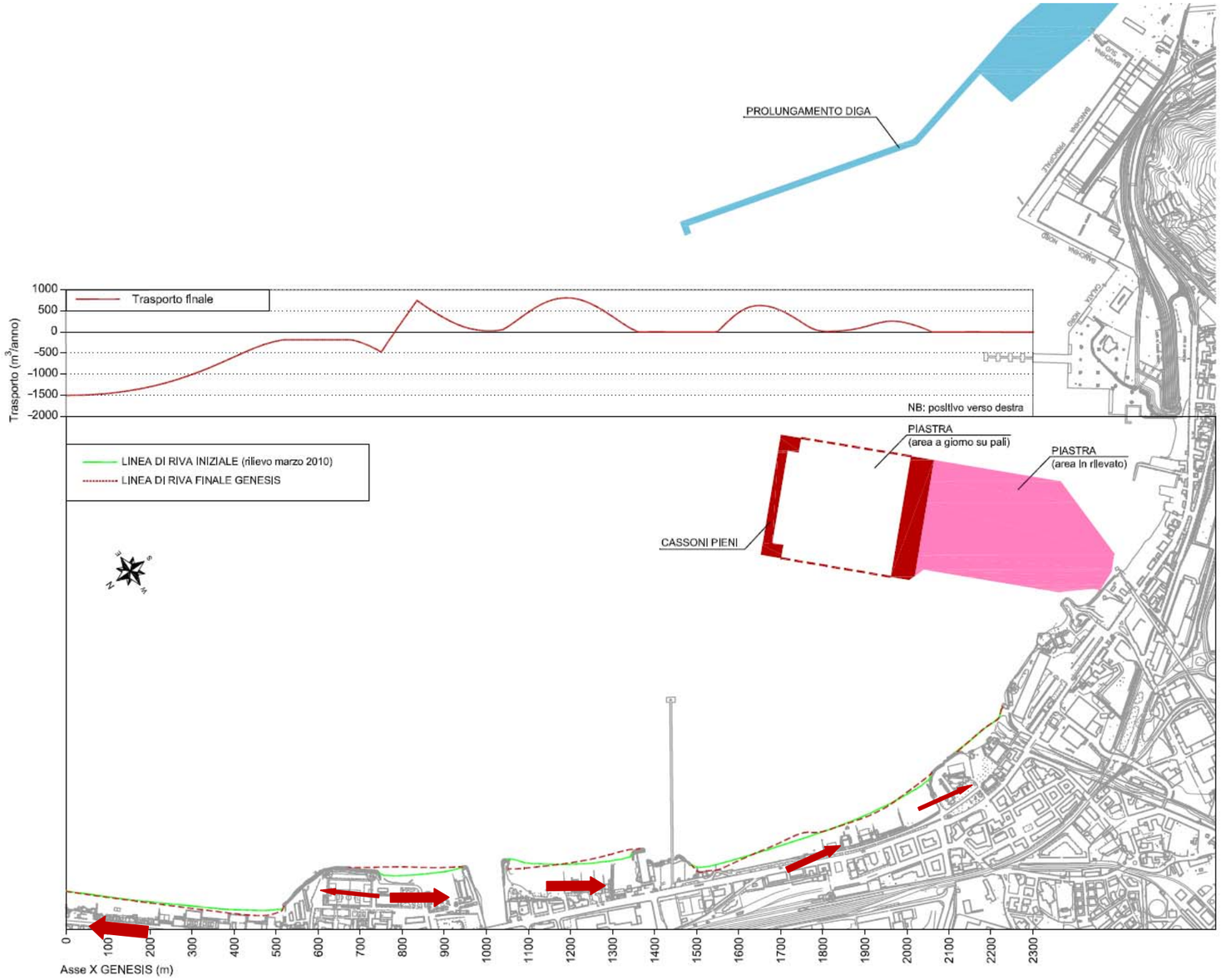


FIGURA 3-63 - CONFIGURAZIONE DI VARIANTE IN FASE DI ESERCIZIO SENZA PORTO TURISTICO - ANDAMENTO TRASPORTO SOLIDO LONGITUDINALE ED EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA

3.3. Paesaggio

Lo scenario di analisi (cfr. Capitolo 2) comporta modifiche nelle strutture di mascheramento.

Gli elementi di mitigazione ambientale previsti per la piattaforma multifunzione e per gli edifici annessi sono rimasti sostanzialmente quelli descritti nel progetto definitivo.

In fase di stesura del progetto esecutivo sono state tuttavia apportate delle variazioni non sostanziali che riguardano:

a) l'estensione e lo sviluppo planimetrico della palificata
b) il materiale delle schermature a setti nel lato Sud/Ovest in adiacenza al corpo D dell'edificio amministrativo.

Per quanto riguarda il punto A, la variazione consiste nel terminare la palificata in prossimità della colonna nord dell'arcata di sostegno del nastro traportatore numero 3.04 per poi riprenderla nel lato sud della strada dall'arcata 3.05 fino oltre all'arcata 3.07, in prossimità dell'arcata 3.06 si avrà un'ulteriore breve interruzione della palificata di circa 3 metri per poi riprenderla fino ad oltre l'arcata 3.07 per circa trentadue metri.

In prossimità dell'arcata 3.07 la palificata procede lineare mentre in prossimità dell'arcata 3.06 viene interrotta per permettere lo sviluppo del passaggio pedonale di servizio, considerando la ridotta distanza tra il limite della carreggiata e la colonna.

Tali variazioni nascono dall'esigenza da parte di Eurocraft di avere una superficie perimetrata da una recinzione su elementi new jersey amovibili tali da permettere all'occorrenza, soprattutto per il varo d'imbarcazioni di elevate dimensioni, di aprire sulla strada lo spazio di competenza agevolando quindi le manovre.

Riguardo le variazioni al punto B, si è scelto di omologare la finitura della palificata con quella dei setti, i setti non saranno in corten ma, in c.a. armato realizzati con una miscela che comprende cemento grigio, pigmento rosso di ossido di ferro e granulati lucenti e di porfido e/o simili, recuperati come ultimo sfrido di cava.

I singoli setti nel segmento nord saranno installati su una fondazione in c.a., mentre nel segmento a sud verso l'acqua saranno fissati al perimetro del cassone numero 18 della piattaforma.

Le variazioni sopra descritte non pregiudicano in alcun modo la funzione per le quali sono state concepite, assecondano esigenze derivanti dall'analisi e dallo sviluppo delle parti che insisteranno sulla piattaforma senza tuttavia venir meno alla mitigazione studiata in fase di progetto definitivo.

Gli elementi di mitigazione studiati, la palificata sul lato nord della piattaforma, la schermatura, l'edificio che fungerà da quinta verso il paese, la falda inclinata verde sopra l'autorimessa che prolunga visivamente la passeggiata del lungo mare verso la piattaforma, la schermatura a pali verso la spiaggia di levante, la schermatura di setti verso la spiaggia di ponente sono stati pensati per integrare il più possibile la nuova piattaforma.

Le vicine opere accessorie (il porto turistico e i piccoli cantieri di rimessaggio, ecc.) sarebbero ovviamente degli ulteriori elementi di mitigazione tipici di un paesaggio portuale, anche in assenza di queste opere però la piattaforma trova una sua dimensione armonizzata al paesaggio circostante.

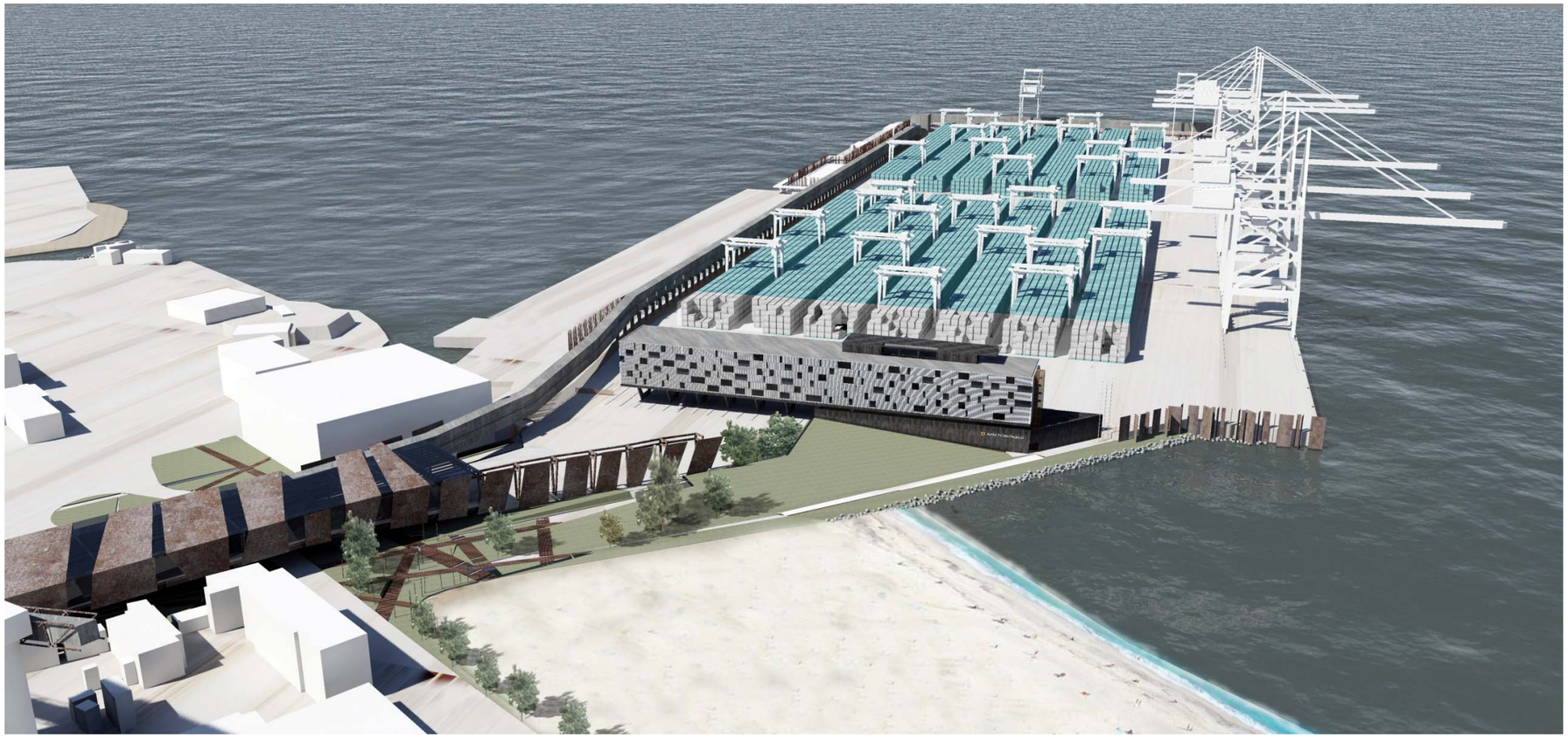


FIGURA 3-64 - VISTA SIMULATA DELLA PIASTRA MULTIFUNZIONALE IN CONFIGURAZIONE DI VARIANTE DALL'ALTO IN ASSENZA DI ALCUNE DELLE OPERE DEL COMPARTO D



FIGURA 3-65 - VISTA SIMULATA DELLA PIASTRA MULTIFUNZIONALE IN CONFIGURAZIONE DI VARIANTE DALLA SPIAGGIA UBICATA A NORD OVEST (VERSO LEVANTE)

4. MISURE DI MITIGAZIONE

Il litorale di interesse, e in particolare la spiaggia a Nord del Segno, compresa tra il terrapieno del campo da basket e l'area camper, risulta già oggi (stato di fatto) oggetto di una tendenza evolutiva caratterizzata dalla rotazione della linea di riva, con erosione localizzata a Nord (area camper) e accrescimento a Sud (a ridosso del terrapieno del campo da basket).

La realizzazione delle nuove opere, sia in conformità al nuovo P.R.P. che nella configurazione di variante, sia in fase di realizzazione che di esercizio, non modifica questa tendenza evolutiva..

La presenza dei cassoni nella testata della piastra potrebbe modificare la forma della spiaggia, ma non modificare la tendenza all'erosione di fronte all'area camper. Giova ricordare che, sia dalla stima modellistica che dall'analisi delle linee di riva, l'ordine di grandezza del trasporto solido netto è inferiore ai 1000 m^3/anno, potenzialmente ancora più basso nella configurazione di variante con la testata della piastra in cassoni.

Le misure per contrastare gli effetti erosivi localizzati all'area camper, peraltro già in atto nello stato di fatto, da quantificare attraverso il monitoraggio sistematico del litorale, potrebbero prevedere il periodico ripascimento della spiaggia nel tratto dell'area camper. Il sito di prelievo più opportuno è rappresentato dall'area di foce del T. Segno, che, prima della realizzazione del molo di Vado, forniva la naturale alimentazione alla spiaggia più a Nord.

5. ATTIVITA' DI MONITORAGGIO

5.1. Monitoraggio dell'evoluzione del litorale

I risultati delle analisi svolte hanno consentito di valutare gli effetti delle nuove opere sull'evoluzione morfologica del litorale.

Il litorale di interesse, e in particolare la spiaggia a Nord del Segno, compresa tra il terrapieno del campo da basket e l'area camper, risulta già oggi (stato di fatto) oggetto di una tendenza evolutiva caratterizzata dalla rotazione della linea di riva, con erosione localizzata a Nord (area camper) e accrescimento a Sud (a ridosso del terrapieno del campo da basket).

La realizzazione delle nuove opere, sia in conformità al nuovo P.R.P. che nella configurazione di variante, sia in fase di realizzazione che di esercizio, non modifica questa tendenza evolutiva.

La presenza dei cassoni nella testata della piastra (variante al progetto definitivo) potrebbe modificare la forma della spiaggia, ma non modificare la tendenza all'erosione di fronte all'area camper. Si tratta di fenomeni localizzati e di entità assai modesta, peraltro difficilmente quantificabili mediante l'utilizzo dei tradizionali strumenti modellistici d'indagine. Pertanto si raccomanda a riguardo la programmazione di un monitoraggio sistematico del litorale, per verificare l'evoluzione anche su scala locale della costa a seguito del completamento degli interventi al fine di predisporre eventuali misure compensative.

Il monitoraggio era già stato discusso con i funzionari del Settore Valutazione di Impatto Ambientale e del Settore Ecosistema Costiero della Regione Liguria nell'ambito della procedura di "scoping" nell'ambito dello SIA del progetto definitivo, ed in particolare nell'incontro avvenuto in data 8 Maggio 2008. La stessa Regione, riprendendo una prescrizione resa in sede di prefattibilità ambientale (Parere n° 136/216 del 5 Giugno 2007), aveva inserito tali attività in una delle osservazioni formulate a conclusione della suddetta procedura.

Nell'ambito dello SIA del progetto definitivo era già stato previsto pertanto il monitoraggio del litorale e poi in seguito era stata redatta una specifica tecnica di dettaglio concordata con la Regione Liguria. Per i dettagli si rimanda alla specifica tecnica, di seguito si ricordano in sintesi le linee guida cui si è fatto riferimento per la redazione del piano di monitoraggio.

Il monitoraggio dovrà essere effettuato secondo quanto stabilito nella Deliberazione della Giunta Regionale n° 1793 del 30 Dicembre 2005 "Criteri generali per il monitoraggio delle opere di difesa della costa e degli abitati costieri e di ripascimento degli arenili".

I dati raccolti in ciascuna campagna di rilievi verranno validati ed elaborati al fine di ricostruire la tendenza evolutiva del litorale e valutare gli effetti delle nuove opere.

<u>Sintesi del programma dei rilievi di campo</u>

Il piano di monitoraggio del litorale che interesserà il tratto di costa indicato in Figura 5-1, dovrà essere avviato dall'inizio dei lavori di costruzione della piattaforma e protrarsi per almeno 5 anni dopo la fine dei lavori.

Si fa notare che secondo il programma temporale previsto nei documenti progettuali, la costruzione delle opere dovrebbe interessare un periodo di circa 4 anni.

Il rilievo della linea di costa verrà effettuato prima dell'inizio della costruzione e per 5 anni dopo la fine della costruzione delle opere, con cadenza annuale alla fine della stagione invernale.
Il rilievo topografico della spiaggia emersa, batimetrico della spiaggia sommersa e sedimentologico verrà eseguito prima dell'inizio della costruzione delle opere e nel primo anno dopo la fine della costruzione delle opere.
Il rilievo topografico della spiaggia emersa, batimetrico della spiaggia sommersa e sedimentologico verrà eseguito nei 4 anni successivi alla fine della costruzione (anno 6, 7, 8 e 9 secondo quanto riportato in tabella seguente) con cadenza annuale, nel ca-

so in cui venissero riscontrate differenze significative della linea di costa. Sarà competenza dell'Autorità Portuale di concerto con la Regione, esaminata l'evoluzione della linea di costa, valutare l'effettiva necessità di eseguire i rilievi della spiaggia emersa e sommersa e sedimentologico.

Durante la costruzione delle opere, verrà valutata dall'Autorità Portuale anche la necessità di effettuare, alla fine dell'inverno (prima degli interventi di sistemazione delle spiagge) o a seguito di eventi meteomarini di particolare intensità, un controllo della linea di riva nel tratto di litorale d'interesse.

Nella tabella seguente è riportato in sintesi il programma dei rilievi.

Rilievi	**Anni**								
	Periodo di costruzione				**Anni successivi alla costruzione**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
linea di riva (*)									
spiaggia emersa (**)									
Batimetrie (**)									
sedimentologia (**)									

(*) Durante la costruzione delle opere, verrà valutata dall'Autorità Portuale la necessità di effettuare un controllo della linea di riva a seguito delle mareggiati invernali o a seguito di significativi eventi meteomarini

(**) Negli anni successivi alla fine della costruzione (dal 6° al 9°) verrà eseguito solo il rilievo della linea di costa con cadenza annuale. Sulla base dell'evoluzione della linea di costa, l'Autorità Portuale di concerto con la Regione, valuterà ogni anno l'effettiva necessità di approfondimenti eseguendo anche i rilievi della spiaggia emersa e sommersa e sedimentologico.

Analisi interpretativa dei dati raccolti

Verranno acquisiti i dati di moto ondoso, in termini di altezza, periodo e direzione dell'onda, relativi al periodo in cui verranno effettuati i rilievi sul litorale (includendo anche l'anno precedente al rilievo prima dell'inizio della costruzione): si farà riferimento alle 'time series' ricostruite con il modello European Wave Model (altezza d'onda significativa, direzione e periodo) che verranno acquisite presso il centro meteorologico di Bracknell (UKMO) per il punto al largo di coordinate 44° N e 8,74° E.

I dati di moto ondoso raccolti verranno elaborati al fine di estrarre le caratteristiche (intensità e direzione) delle mareggiate più significative verificatesi nel periodo precedente la data dei rilievi sul litorale.

Con i dati di moto ondoso raccolti ogni anno verrà estesa la serie storica utilizzata per il progetto delle nuove opere (serie storica relativa al periodo 1989-2008) e verrà aggiornato il clima di moto ondoso e la statistica degli estremi direzionali.

Questa analisi potrà consentire di caratterizzare la significatività delle condizioni meteomarine nel periodo precedente la data dei rilievi sul litorale, rispetto alle condizioni medie valutate sulla base dell'intera storica, e pertanto di esaminare l'evoluzione del litorale in un determinato periodo oggetto del monitoraggio con riferimento alle condizioni meteomarine occorse.

I dati e le informazioni ottenute dalle attività di campo sul litorale verranno accuratamente esaminate, validate e rese in un formato tale da poter essere utilizzate per definire le tendenze evolutive del litorale d'interesse e individuare eventuali effetti delle nuove opere.

Verranno messi a confronto le linee di riva rilevate nei vari anni evidenziando i ratei di avanzamento/arretramento e di conseguenza i valori di ampiezza di spiaggia.

Anche gli eventuali rilievi topografici della spiaggia emersa e batimetrici della sommersa, ovviamente se eseguiti, verranno messi a confronto e verrà valutata l'evoluzione del volume di spiaggia per tratti significativi di litorale.

Queste valutazioni saranno effettuate con riferimento a 2 rilievi consecutivi ed in modo cumulato rispetto al primo rilievo.

Le informazioni relative alle eventuali campagne sedimentologiche verranno anch'esse elaborate per definire le variazioni in termini spaziali delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti della spiaggia emersa e sommersa.

Le suddette analisi consentiranno di valutare gli effetti delle nuove opere mettendo a confronto:

– l'evoluzione del litorale nel periodo precedente alla costruzione delle nuove opere, ottenuta sulla base delle informazioni/rilievi storici disponibili relativamente allo stato di fatto delle opere;
– l'evoluzione del litorale nel periodo durante e successivo alla costruzione delle nuove opere, ottenuta sulla base delle informazioni/dati del piano di monitoraggio.

Questa attività di analisi dei dati raccolti verrà svolta nei 5 anni dopo la fine della costruzione delle nuove opere, e con cadenza annuale dopo il completamento di ciascun rilievo annuale sul litorale.

I risultati delle analisi saranno discussi tra Regione ed Autorità Portuale con lo scopo di individuare congiuntamente gli eventuali effetti evolutivi del litorale imputabili alle nuove opere ed il connesso piano di manutenzione da porre a carico delle stesse, restando esclusiva competenza dell'Autorità Portuale la realizzazione degli interventi di mitigazioni individuati e la ripartizione degli oneri tra i vari attori.

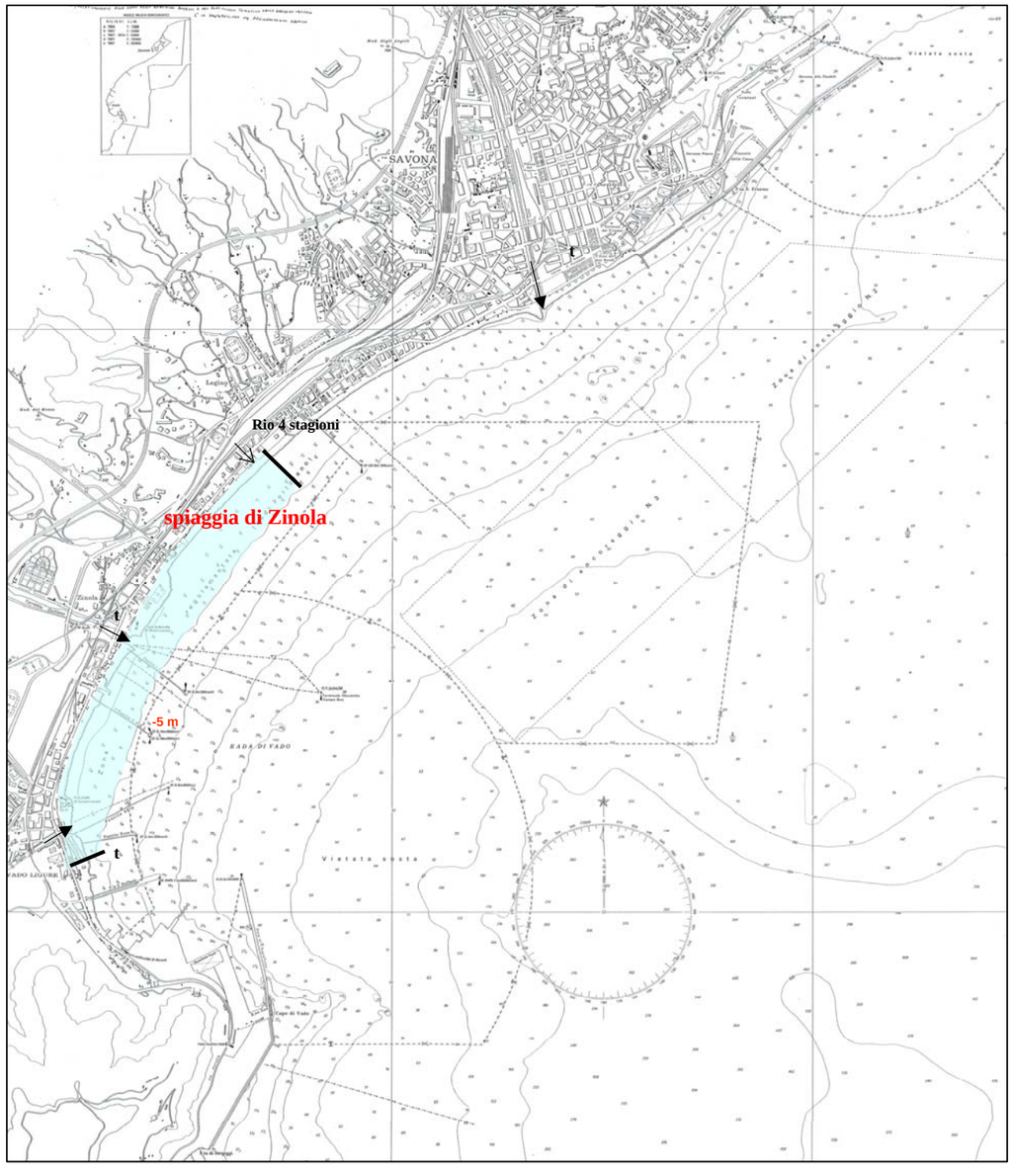


FIGURA 5-1 - ZONA INTERESSATA DAI RILIEVI DI CAMPO

6. CONCLUSIONI

Le analisi sulla circolazione costiera e sulla capacità dispersiva del sistema sono state condotte con l'ausilio di un modello matematico ed hanno riguardato gli aspetti idrodinamici in diverse condizioni meteo climatiche e la capacità dispersiva e di ricambio del sistema.

Per le analisi idrodinamiche sono stati considerati 4 scenari meteomarini rappresentativi di condizioni tipiche del paraggio e caratterizzate da assenza di vento, da un vento da Nord-Est, da Nord-Ovest ed uno da Sud-Est. Le analisi hanno dimostrato come la circolazione idrodinamica all'interno della rada di baia sia caratterizzata da velocità medie molto contenute che superano i 2 cm/s solo in corrispondenza delle foci dei torrenti a causa del deflusso delle acque di origine torrentizia. L'applicazione di un campo di vento costante ed uniforme non è in grado di alterare in modo apprezzabile l'idrodinamica locale e gli unici effetti di una certa rilevanza sono visibili solo nello strato superficiale dove, per effetto dell'attrito con la superficie dell'acqua, si genera una corrente concorde alla direzione del vento con velocità massime nell'ordine di 4-8 cm/s. L'area compresa tra la foce del Segno e la radice della piattaforma appare molto tranquilla con velocità del tutto trascurabili in ogni condizione di marea e vento.

Per quanto riguarda le analisi sulla dispersione dei traccianti conservativi si è osservato che il trasporto dipende principalmente dalla componente dispersiva mentre la componente avvettiva, date le basse velocità, ha un effetto di minore importanza. La frazione di acqua di origine torrentizia presenta valori di concentrazione nell'ordine di 0.2 - 0.4 g/m³ in prossimità delle foci e tende rapidamente a diminuire spostandosi verso mare aperto. Nell'area compresa tra la foce del Segno e la Piattaforma i valori di concentrazione del tracciante conservativo sono nell'ordine di 0.2 - 0. 3 g/m³ ed è visibile l'effetto della presenza della piattaforma che impedisce la diffusione del pennacchio verso sud.

Il tempo di ricambio presenta un andamento molto simile a quello valutato per la configurazione di progetto completa con dei valori nell'ordine delle 24-26 ore in corrispondenza delle spiagge a sud della piattaforma e di circa 30 ore nelle zone più interne della rada portuale. Nell'area compresa tra la piattaforma ed il Segno si osservano valori compresi tra 10 e 16 ore.

Sono state, inoltre, condotte delle analisi sulla dispersione di un tracciante non conservativo rappresentativo di potenziali fonti di contaminazione di tipo batterico recapitate a mare dai principali Torrenti e Rii sfocianti nel litorale di Vado. Anche per queste analisi è stato fatto uso di un modello matematico di qualità delle acque appositamente predisposto e tarato per questo studio.

In termini generali, come già osservato per le analisi dei traccianti conservativi, si è notato che la dispersione dei traccianti è abbastanza omogenea attorno al punto di immissione. Questo è dovuto al fatto che la componente avvettiva della dispersione è molto limitata visto la modesta circolazione idrodinamica che caratterizza la zona. Il tracciante batterico tende a disperdersi molto rapidamente attorno alla sorgente e nel raggio di qualche centinaia di metri il carico batterico viene diluito sotto la soglia del 1 ‰.

I torrenti più lontani dalla zona di intervento, cioè il Quiliano ed il Rio Lusso non risentono della assenza della darsena turistica ed il decadimento batterico al di sotto del 1 ‰, per effetto della dispersione idrodinamica e dell'invecchiamento del tracciante si esaurisce nell'arco di 3 ore circa. In riferimento ai torrenti più vicini, il Rio Fontanazza e il T. Segno a nord ed il Rio Sant'Elena tra la radice e Porto Vado, si osserva una situazione simile a quella precedente; in questo caso è percepibile l'effetto della radice della piattaforma che limita il trasporto del tracciante batterico causando un aumento locale delle concentrazione. Il decadimento batterico al disotto della soglia del 1 per mille , appare in ogni caso rapido e si completa nell'arco di circa 8-9 ore.

In conclusione l'assenza della darsena del nuovo porto turistico determina differenze poco significative sulla circolazione idrodinamica e sulla capacità dispersiva e di ricambio del sistema a quelle con la configurazione di progetto completa.

L'analisi della dinamica litoranea è stata condotta in termini di propagazione del moto ondoso, circolazione idrodinamica durante le mareggiate, trasporto solido bidimensionale associato all'azione combinata di onde e correnti, evoluzione dei fondali, trasporto solido litoraneo ed evoluzione della linea di riva.

L'insieme dei risultati delle simulazioni effettuate, sia in termini di eventi singoli rappresentativi della dinamica (mareggiate caratteristiche) che di bilancio basato sul clima medio annuale (modello di evoluzione della linea di riva e processi associati), consente di avere una quadro d'insieme delle dinamiche che si verificano nelle diverse configurazioni

e delle prevedibili differenze, soprattutto in termini di evoluzione dei fondali e della linea di riva.

L'assenza delle opere foranee del nuovo porto turistico determina modeste differenze nella dinamica litoranea rispetto a quella che si verifica con la configurazione di progetto completa (che prevede la presenza del porto turistico).

L'area di interesse è sicuramente rappresentata dalla spiaggia a Nord del Segno, tra il terrapieno del campo da basket e l'area camper, e dalla zona di foce di quest'ultimo. La parte emersa, ove non protetta da scogliere radenti, è costituita da materiale ghiaioso, mentre la parte sommersa da sabbia medio-fine. Le dinamiche della parte più grossolana sono meglio descritte dal modello di evoluzione della linea di riva, mentre quelle della frazione più fine sono correttamente rappresentate dalla modellazione bidimensionale. Le tendenze evolutive stimate con i due diversi approcci si trovano comunque in buon accordo, a conferma della significatività dei risultati ottenuti.

L'unico, e limitato, effetto dell'assenza della darsena turistica nell'area di interesse è legato alla distribuzione ed all'entità della sedimentazione determinata dalle mareggiate di Levante, che restano comunque qualitativamente simili a quelle che si verificano nella configurazione di progetto completa. La principale differenza è legata alla localizzazione della sedimentazione di fronte alla foce del Segno, che in assenza del molo di sottoflutto della darsena avviene in un'area più estesa ed è quantitativamente meno consistente.

Si tratta in ogni caso di fenomeni di modestissima entità, che potrebbero anche non richiedere misure specifiche, salvo l'esecuzione di piccole manutenzioni da attuare sostanzialmente nell'area camper (il trasporto solido litoraneo netto è inferiore ai 1000 m^3/anno) con materiale ghiaioso prelevabile dalla spiaggia alla foce del Segno (dove si fermerà tutto l'apporto solido fluviale).

APPENDICE

1. DATI DI RIFERIMENTO PER L'ANALISI DELLA DINAMICA LITORANEA

1.1. Moto ondoso al largo (punto u.k.m.o.)

Il clima ondoso al largo del paraggio di Vado Ligure è stato definito utilizzando i dati U.K.M.O., forniti dal centro meteorologico inglese "UK Meteorological Office". Il modello European Wave Model dell'U.K.M.O. ricostruisce lo stato del mare a partire dai dati meteorologici (carte bariche) e dal campo di moto.

I modelli U.K.M.O. Global Wave Model e European Wave Model sono modelli della seconda generazione per la parametrizzazione non lineare dello spettro del moto ondoso. I dati ottenibili, con cadenza di 30 minuti, sono relativi ad ogni nodo della maglia.

Il modello UK Met Office Wave Model copre le acque europee con una griglia locale (European Wave Model) le cui maglie hanno lati di 25÷30 km. L'archivio del modello, che elabora con continuità i dati meteorologici, fornisce dati sequenziali di vento e moto ondoso a partire dall'ottobre 1986.

Con riferimento al paraggio di Vado Ligure, è stato considerato il punto di coordinate geografiche (44.0°N, 8.73°E), situato nel Mar Ligure tra Imperia e Genova su un fondale di oltre 1000 m (Figura 1-1).

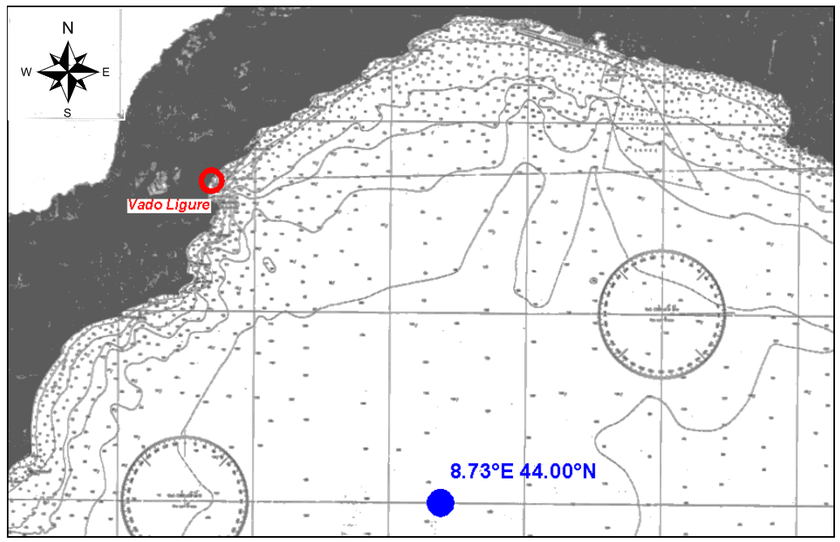


FIGURA 1-1 - PUNTO UKMO 8.73°E - 44.0°N

I dati dell'UKMO si riferiscono al periodo di osservazione che va dal 1 gennaio 1987 al 31 dicembre 2008 e sono costituiti da registrazioni triorarie che sono state elaborate in modo da ottenere il clima delle onde in forma di tabelle delle frequenze, organizzate secondo classi di direzione intervallate di 10° e di altezza d'onda con ampiezza 0.5 m (vedi tabella seguente).

TABELLA 1-1 - CARATTERISTICHE DELLE ONDE "AL LARGO" (PUNTO U.K.M.O.)

Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.75	≥ 1.25	≥ 1.75	≥ 2.25	≥ 2.75	≥ 3.25	≥ 3.75	≥ 4.25	≥ 4.75	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.75	< 1.25	< 1.75	< 2.25	< 2.75	< 3.25	< 3.75	< 4.25	< 4.75	< 5.25	
5	0.694	1.614	1.092	0.345	0.065	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.832
15	0.415	1.495	0.860	0.223	0.039	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.036
25	0.424	1.843	0.836	0.193	0.033	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.331
35	0.328	1.479	0.704	0.154	0.019	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.686
45	0.303	1.319	0.506	0.100	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.271
55	0.252	0.866	0.289	0.068	0.019	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.500
65	0.251	0.729	0.282	0.098	0.037	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.398
75	0.228	0.568	0.163	0.084	0.018	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.065
85	0.226	0.522	0.121	0.046	0.019	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.939
95	0.235	0.482	0.109	0.042	0.019	0.011	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.899
105	0.196	0.417	0.112	0.033	0.007	0.002	0.002	0.002	0.004	0.000	0.000	0.774
115	0.224	0.445	0.131	0.039	0.028	0.004	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.876
125	0.240	0.559	0.159	0.056	0.026	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	1.044
135	0.336	1.463	0.505	0.161	0.046	0.016	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	2.530
145	0.401	1.861	0.818	0.289	0.138	0.030	0.016	0.004	0.000	0.000	0.000	3.557
155	0.776	2.681	0.661	0.168	0.058	0.014	0.009	0.007	0.000	0.000	0.000	4.373
165	0.440	1.510	0.501	0.166	0.040	0.019	0.019	0.002	0.002	0.000	0.000	2.700
175	0.489	1.526	0.503	0.154	0.044	0.030	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000	2.754
185	0.606	1.959	0.887	0.370	0.105	0.063	0.018	0.011	0.002	0.000	0.000	4.019
195	0.878	3.736	2.376	1.263	0.494	0.159	0.054	0.012	0.011	0.007	0.002	8.992
205	0.890	5.770	2.945	1.344	0.552	0.175	0.067	0.025	0.011	0.005	0.000	11.783
215	0.836	5.158	2.541	0.986	0.310	0.077	0.035	0.014	0.002	0.000	0.000	9.959
225	1.458	6.464	2.358	0.499	0.063	0.014	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	10.858
235	0.647	3.163	0.866	0.112	0.026	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	4.817
245	0.566	1.207	0.098	0.012	0.007	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.894
255	0.217	0.119	0.014	0.009	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.364
265	0.170	0.100	0.016	0.007	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.294
275	0.165	0.077	0.016	0.005	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.266
285	0.144	0.070	0.011	0.002	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.231
295	0.156	0.065	0.012	0.012	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.249
305	0.126	0.063	0.026	0.004	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.224
315	0.121	0.109	0.023	0.014	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.273
325	0.186	0.233	0.060	0.011	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.491
335	0.223	0.760	0.189	0.047	0.018	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.240
345	0.258	0.711	0.454	0.109	0.044	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.582
355	0.315	1.276	0.957	0.272	0.061	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.896
Tot.	14.418	52.416	22.199	7.497	2.400	0.706	0.231	0.086	0.032	0.012	0.002	100.00

A partire dal clima ondoso al largo così ricostruito è stato possibile ricavare le rose delle registrazioni e delle energie (Figura 1-2) e la rosa delle altezze massime (Figura 1-3).

Si può notare che gli eventi con percentuale di apparizione più elevata corrispondono a mareggiate provenienti da Libeccio (205°N), caratterizzate da altezze massime superiori ai 4 m. In termini di energia del moto ondoso, si evidenzia ancora un picco di energia in corrispondenza della medesima direzione (Libeccio 205°N).

É stato inoltre possibile ricostruire la curva di durata, che consente di mettere in relazione le caratteristiche di un evento con la sua durata media annuale. Il grafico relativo alla curva di durata viene riportato nella Figura 1-4; si può notare che eventi con altezza d'onda superiore ai 2 m si presentano mediamente per meno di 7÷8 giorni all'anno.

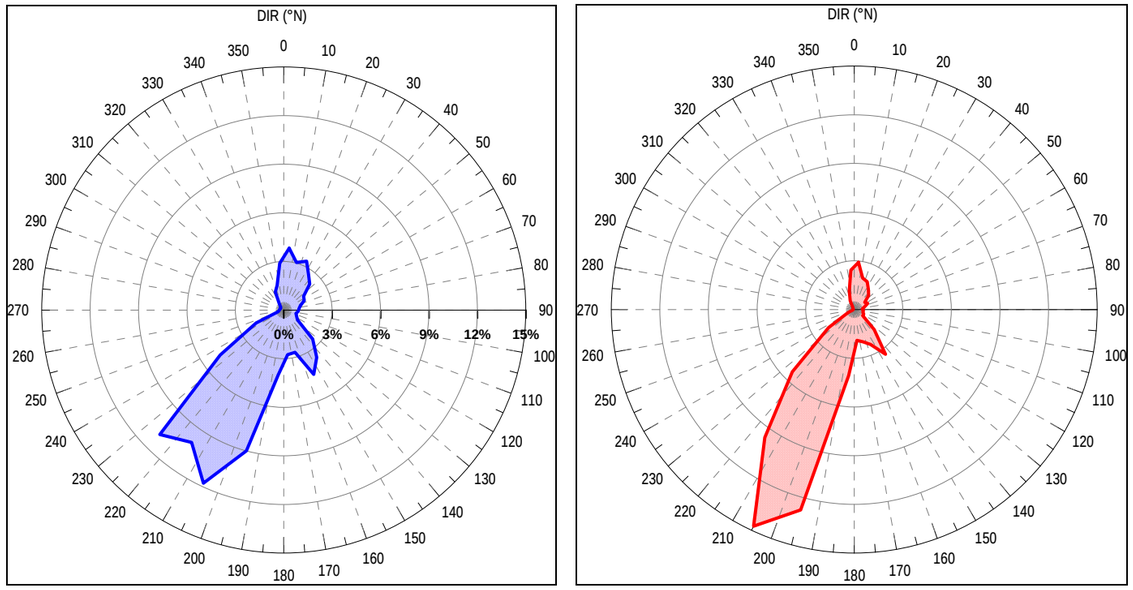


FIGURA 1-2 - ROSE DELLE REGISTRAZIONI (A SINISTRA) E DELLE ENERGIE (A DESTRA) RELATIVE AL PUNTO U.K.M.O.

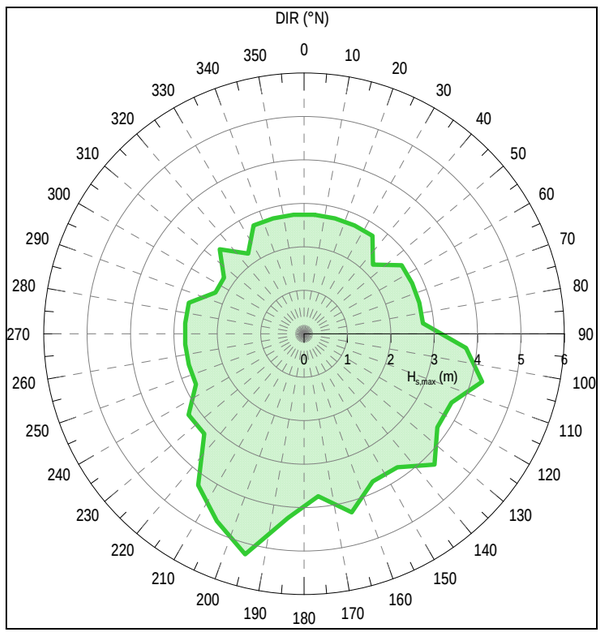


FIGURA 1-3 - ROSA DELLE ALTEZZE MASSIME RELATIVA AL PUNTO U.K.M.O.

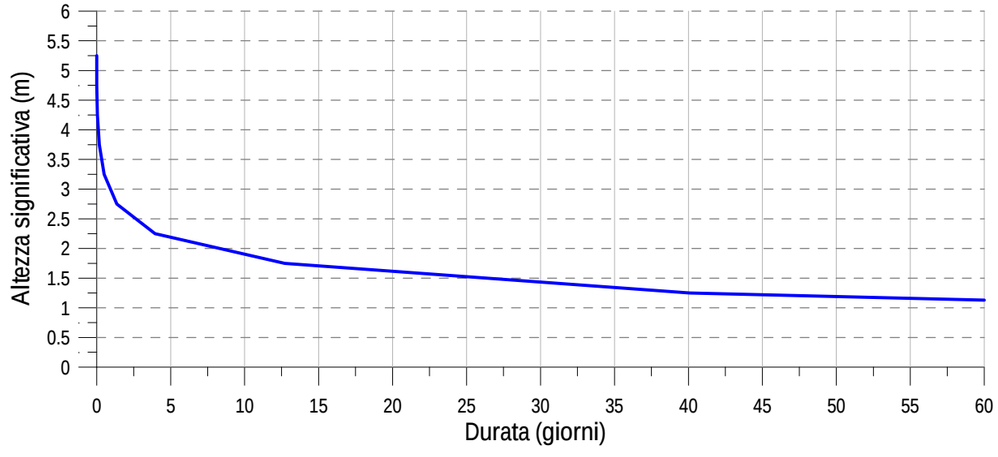


FIGURA 1-4 - CURVA DI DURATA RELATIVA LA PUNTO U.K.M.O.

1.2. Caratteristiche del moto ondoso di fronte al paraggio

Il clima ondoso al largo descritto nel precedente paragrafo è stato propagato in corrispondenza di un punto locale posto di fronte al paraggio oggetto di studio (punto P).

Il moto ondoso in questo punto, più vicino a riva, è stato successivamente utilizzato per definire i dati di input per lo studio della propagazione locale, della circolazione idrodinamica e del trasporto litoraneo (codici di calcolo CMS-WAVE, CMS-FLOW), con riferimento ad alcune mareggiate ritenute significative, nonché per lo studio dell'evoluzione morfologica del litorale.

La propagazione locale del clima ondoso è stata condotta per mezzo del codice di calcolo STWAVE descritto in dettaglio nel successivo paragrafo 1.2.1.

1.2.1. Descrizione del codice di calcolo STWAVE

Il modello matematico STWAVE (Steady-state spectral WAVE model) (Resio 1987, 1988; Davis 1992; Smith, Resio, Zundel 1999) è un modello stazionario spettrale alle differenze finite basato sull'equazione di conservazione dell'azione.

Il modello descrive il cambiamento dei parametri caratteristici della mareggiata (altezza significativa, periodo, direzione media di propagazione, forma dello spettro di frequenza e spreading direzionale) dalle acque profonde, dove il campo d'onda è relativamente omogeneo su scala chilometrica e le zone sottocosta (le onde in tali zone sono fortemente influenzate dalle variazioni della batimetria, dal livello del mare, dalle correnti locali), dove i parametri caratteristici variano significativamente su scala dell'ordine della decina di metri.

Il modello STWAVE simula la rifrazione e lo shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, il frangimento, la diffrazione, l'interazione tra onde e il fenomeno di whitecapping.

Uno spettro d'onda è una rappresentazione statistica di stato del mare. Essenzialmente, uno spettro è rappresentato da una sovrapposizione lineare di onde monocromatiche e descrive la distribuzione dell'energia del moto ondoso come una funzione della frequenza (spettro monodimensionale di frequenza) o della frequenza e direzione (spettro bidimensionale). Un esempio di spettro monodimensionale è rappresentato in Figura 1-5.

Il periodo di picco dello spettro è dato dal reciproco della frequenza corrispondente al picco dello spettro. L'altezza d'onda significativa è pari a 4 volte la radice quadrata dell'area sottostante lo spettro (momento di ordine 0 dello spettro).

STWAVE è basato sulle seguenti assunzioni:

- è un modello semi-piano, ovvero l'energia del moto ondoso può propagarsi soltanto dal largo verso riva (±87.5° rispetto all'asse X della griglia di calcolo, che è tipicamente la direzione approssimata della normale al litorale). Le onde riflesse dalla spiaggia e dal fondale si muovono in direzioni al di fuori di questo semipiano e sono, pertanto, trascurate;
- la variazione dello spettro d'onda lungo il bordo più "al largo" del dominio di calcolo è generalmente poco rilevante (lo è senz'altro nel caso in oggetto, dato che tale bordo è lungo circa 3 km e disposto lungo batimetriche regolari). Pertanto lo spettro di input in STWAVE è costante lungo tale limite;
- è un modello stazionario: ciò riduce il tempo di calcolo ed è appropriato per condizioni ondose che variano più lentamente del tempo impiegato dalle onde per "attraversare" la griglia di calcolo;
- tiene conto soltanto di rifrazione e shoaling lineare e non rappresenta l'asimmetria dell'onda;
- l'interazione onda-corrente è basata su una corrente con velocità costante attraverso la colonna d'acqua: se si verificano forti gradienti verticali nella corrente, la loro variazione per rifrazione e shoaling non è rappresentata nel modello;
- l'attrito sul fondo viene trascurato;
- il radiation stress è calcolato sulla base della teoria d'onda lineare.

STWAVE è un modello numerico alle differenze finite, basato su una griglia cartesiana ortogonale. Le celle della griglia sono assunte quadrate ($\Delta x = \Delta y$). Si possono ottenere griglie a diversa risoluzione andando a costruire griglie annidate. Ciò può essere ottenuto facendo "girare" il modello a una risoluzione più grossolana, salvando uno spettro per un punto più a riva. Questo spettro può quindi essere utilizzato come una condizione al contorno per una griglia di risoluzione maggiore. STWAVE opera in un sistema di coordinate locali, con l'asse X orientato in direzione perpendicolare alla spiaggia (con origine al largo) e asse Y orientato parallelamente alla costa, formando un sistema di coordinate che rispettano la regola della mano destra. L'orientazione dell'asse X (±87.5°) definisce il semipiano che è rappresentato nel modello. L'asse Y è generalmente allineato con le batimetriche al largo. Gli angoli di provenienza delle onde sono computati in senso antiorario dall'asse X. I confini laterali nel modello possono essere specificati come terra o mare indicando la profondità delle celle come positiva (mare) o negativa (terra). Si riassume alla seguente Figura 1-6 gli input e gli output forniti dal modello. Per generare uno spettro occorre specificare i seguenti parametri:

- periodo di picco (Tp);
- altezza d'onda;
- profondità;
- parametro di appuntimento dello spettro (γ).

Il parametro di appuntimento controlla la larghezza dello spettro in frequenza (numeri bassi forniscono picchi "larghi", ovvero condizioni di mare vivo, numeri elevati picchi "ristretti", ovvero condizioni di mare di swell). La distribuzione direzionale dello spettro è invece specificata mediante una direzione media e un coefficiente di spreading direzionale (*nn*).

L'energia nello spettro di frequenza è proporzionale a $\cos^{nn}(\alpha - \alpha_m)$, dove α è la direzione della componente spettrale e α_m è la direzione media di propagazione dell'onda. Una guida per la scelta di γ e *nn* è fornita nella TABELLA 1-2. Gli spettri con periodi di picco elevati sono generalmente ristretti sia in frequenza che in direzione. Per piccoli periodi di picco gli spettri sono tipicamente allargati sia in frequenza che in direzione.

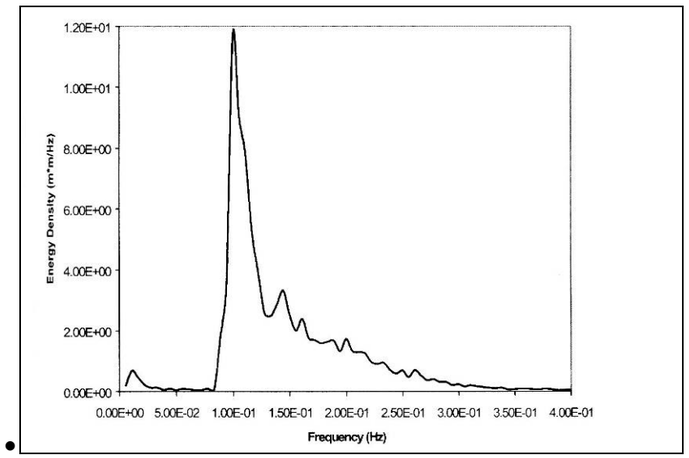


FIGURA 1-5 - SPETTRO MONODIMENSIONALE

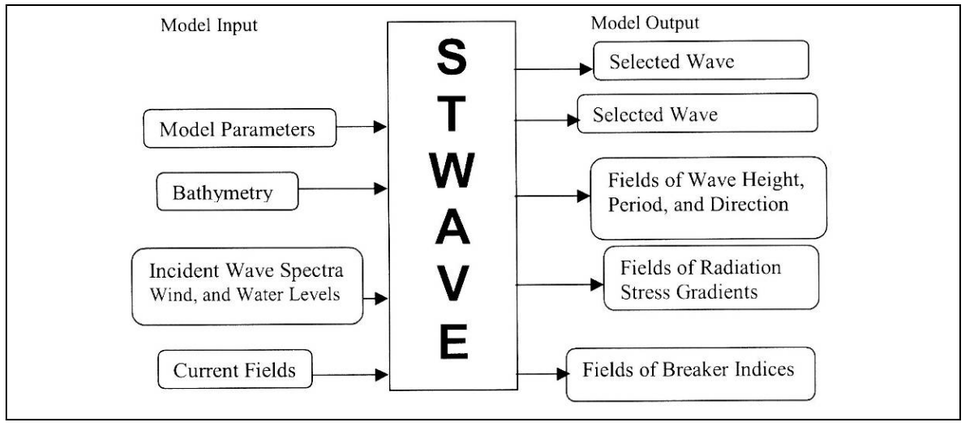


FIGURA 1-6 - INPUT E OUTPUT STWAVE

TABELLA 1-2 - CORRELAZIONE TRA PARAMETRI SPETTRALI (THOMPSON ET AL., 1996)

Tp (s)	γ	***nn***
≤ 10	3.3	4 (JONSWAP)
11	4	8
12	4	10
13	5	12
14	5	16
15	6	18
16	6	20
17	7	22
18	7	26
19	8	28
20	8	30

1.2.2. Settore di traversia

Sulla base dell'analisi del moto ondoso al largo e sulla base della conformazione geografica e dell'ubicazione dell'area oggetto di studio, è stato possibile individuare il settore di traversia caratteristico del paraggio, che risulta compreso tra 50° e 210°N (Figura 1-7).

Di conseguenza, le propagazioni del clima ondoso sottocosta, sono state condotte propagando gli eventi ondosi compresi all'interno del settore 50°÷210°N.

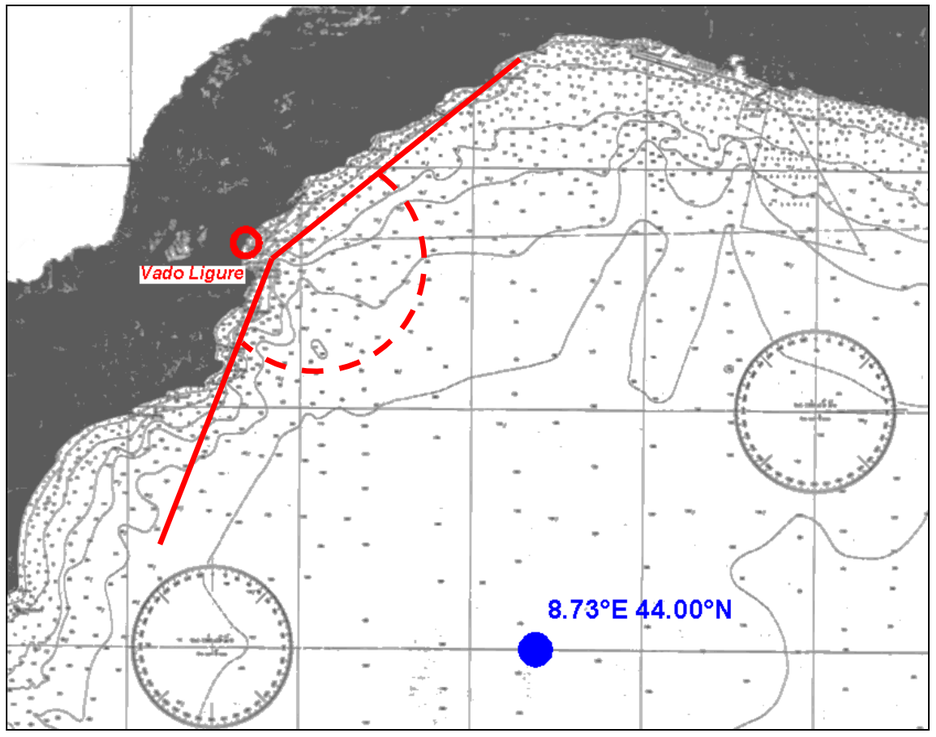


FIGURA 1-7 - SETTORE DI TRAVERSIA

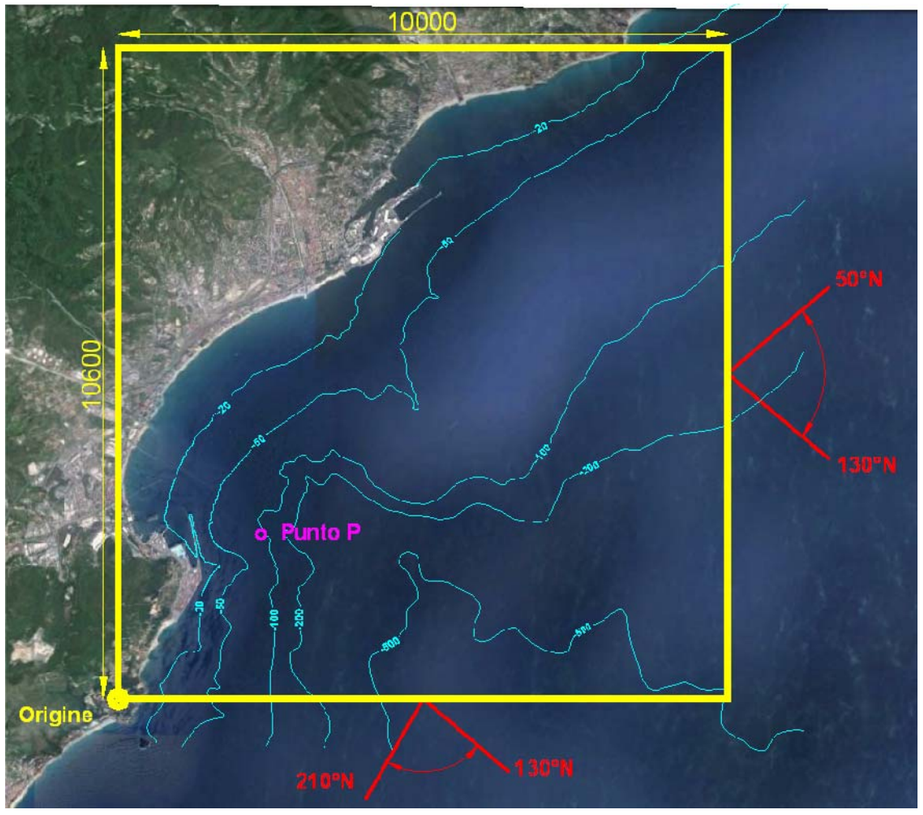


FIGURA 1-8 - GRIGLIA DI CALCOLO E UBICAZIONE DEL PUNTO P

1.2.3. Settaggio del modello di propagazione del clima

Definizione della griglia di calcolo STWAVE

Per la costruzione del dominio di calcolo del modello STWAVE sono stati impiegati i dati batimetrici a disposizione, ovvero le carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina e i più recenti rilievi locali disponibili. In particolare si è fatto riferimento al rilievo di agosto 2008, che copre il tratto che va dal Porto di Vado fino al terrapieno del campo da calcio (fino a profondità maggiori di -55 m s.m.m.), e al rilievo di aprile 2010, che copre il tratto di litorale compreso tra il pontile Esso e il pontile Chevron (fino a profondità comprese tra -6.5 e -9.0 m s.m.m.).

Il dominio di calcolo è stato discretizzato attraverso una griglia con maglia ortogonale a celle quadrate di passo 50 m, con lati paralleli agli assi cartesiani. La griglia ha origine nel punto di coordinate (1455250 m E; 4898770 m N) e dimensioni 10'000 x 10'600 m (Figura 1-8).

Con riferimento al clima ondoso relativo al punto UKMO al largo, sono stati propagati nel dominio di calcolo tutti gli eventi provenienti dal settore 50°÷210°N. In particolare le mareggiate provenienti da NE-E-SE (50°÷130°N) sono state propagate utilizzando come bordo offshore il lato Est della griglia e quelle provenienti da SE-

S-SO (135°÷210°N) sono state propagate utilizzando come bordo offshore il lato Sud della griglia.

Il punto di output del clima locale (punto P - rappresentato in Figura 1-8) si trova su un fondale di circa 100 m, in corrispondenza del punto di coordinate (1457590 m EST, 4901450 m NORD). Le coordinate del punto P e dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga - Fuso Ovest.

Dati di input

I dati forniti in input al modello sono stati ricavati dal clima al largo, discretizzato per classi di altezza significativa e direzione di provenienza con riferimento al settore 50°÷210°N.

A ciascun evento ondoso al largo (caratterizzato da una determinata altezza d'onda significativa e direzione di provenienza) è stato associato un valore del periodo, ricavato a partire dall'elaborazione dei periodi di tutti gli eventi ricadenti nel periodo di osservazione (gennaio 1987 - dicembre 2008).

Nel dettaglio, sulla base delle caratteristiche del clima ondoso al largo, sono stati individuati tre differenti settori (50°÷90°N, 90°÷180°N e 180°÷210°N), per ciascuno dei quali è stata ricavata una curva di interpolazione tra altezza d'onda significativa e periodo (H_S - Tz).

Nelle successive figure Figura 1-9, Figura 1-10 e Figura 1-11 vengono riportate le 3 curve di interpolazione ricavate per i differenti settori. Utilizzando le correlazioni ricavate dall'interpolazione dei dati di base è stato possibile associare a ciascun evento ondoso il corrispondente periodo T_z in funzione dell'altezza significativa per i tre settori considerati.

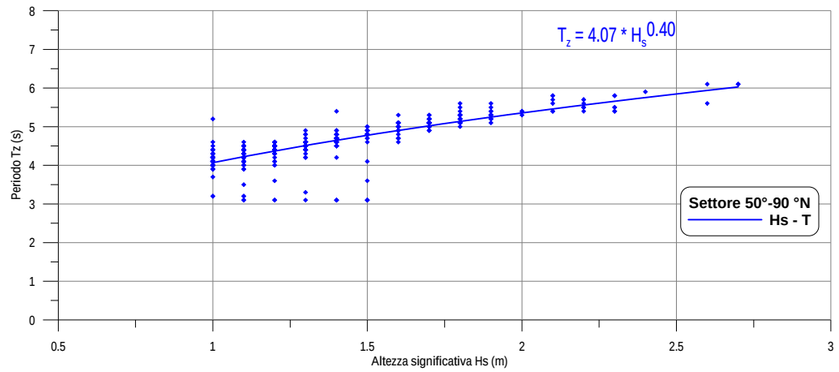


FIGURA 1-9- CORRELAZIONE H_S-T_Z PER IL SETTORE 50°÷90°N

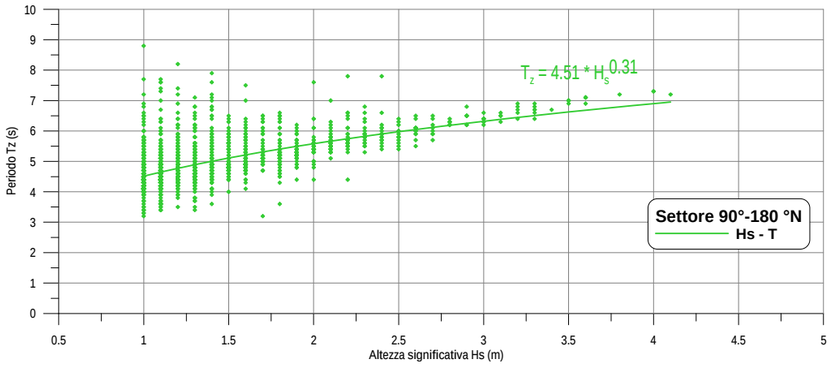


FIGURA 1-10- CORRELAZIONE H_S-T_Z PER IL SETTORE 90°÷180°N

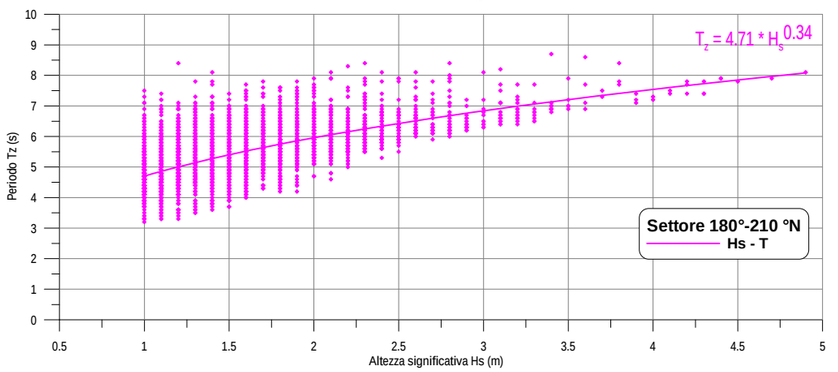


FIGURA 1-11- CORRELAZIONE H_S-T_Z PER IL SETTORE 180°÷210°N

Applicando poi le note relazioni tra T_z, T_s e T_p:

– $T_z=0.78*T_p$ (Carter et al.);

– $T_z=0.83*T_s$ (Sapkaya),

si ricava che $T_p= 1.28*T_z$.

1.2.4. Clima ondoso locale

Il clima ondoso locale è stato ricostruito ordinando i risultati delle propagazioni dal largo verso riva, per classi di altezza significativa e di direzione locale dell'onda. Utilizzando le corrispondenze tra i risultati delle simulazioni (clima locale) e la tabella delle registrazioni relative al clima nel punto al largo (TABELLA 1-1), è stato possibile associare a ciascun evento nel punto P una percentuale di apparizione e, quindi, ricostruire le rose delle registrazioni e delle energie sottocosta.

Di seguito, si riportano graficamente i risultati delle elaborazioni della climatologia locale; in particolare sono state rappresentate le rose delle registrazioni e delle energie (Figura 1-12) e la rosa delle altezze massime (Figura 1-13).

Dall'analisi della rosa delle registrazioni e di quella delle energie, si osserva che nella propagazione verso costa il clima ondoso subisce una sensibile rotazione, per effetto della conformazione locale del paraggio, rientrando nel settore di traversia locale 60°÷190°N.

Si osserva che l'energia è concentrata nel settore di Mezzogiorno (con picco a 185°N) con un picco secondario nel settore di Scirocco (a 145°N); per il settore di Grecale si osserva infine un picco caratterizzato da energia piuttosto contenuta in corrispondenza della direzione 75°N.

Le mareggiate con i valori massimi di altezza significativa (compresi tra 3.5 e 4 m) provengono dai settori di Levante-Scirocco e Mezzogiorno; mentre per il settore di Grecale si presentano mareggiate con altezza significativa inferiore a 2.5 m.

É stata infine ricostruita la curva di durata nel punto P che consente di mettere in relazione le caratteristiche di un evento con la sua durata media annuale (Figura 1-14). Si può osservare come l'altezza significativa di 2 m, che nel punto al largo veniva superata mediamente per 7÷8 giorni all'anno, nel punto P venga superata per circa 3 giorni all'anno.

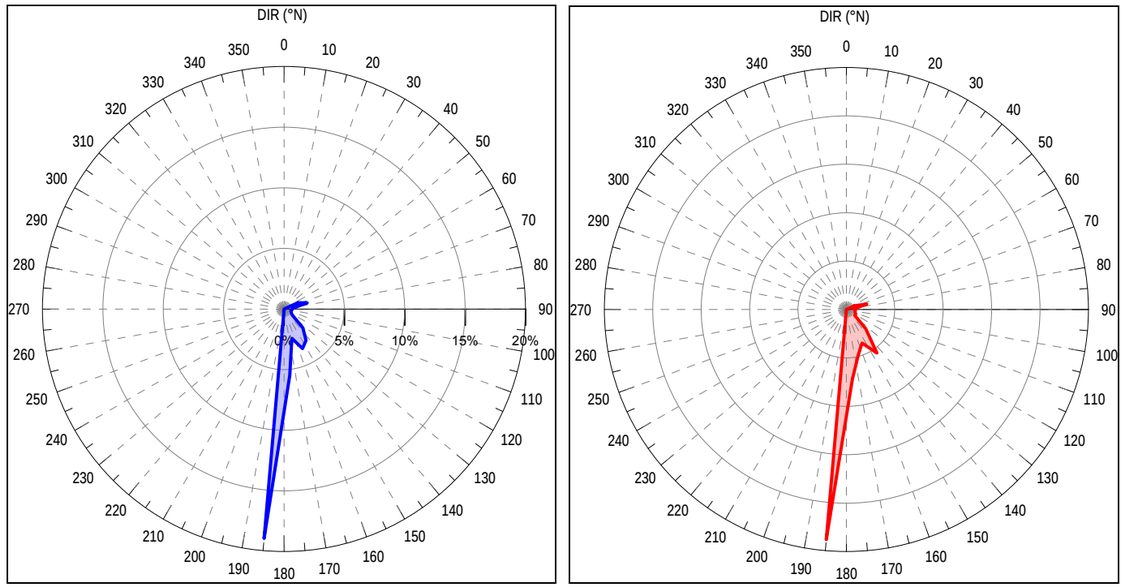


FIGURA 1-12 - ROSE DELLE REGISTRAZIONI (A SINISTRA) E DELLE ENERGIE (A DESTRA) RELATIVE AL PUNTO P

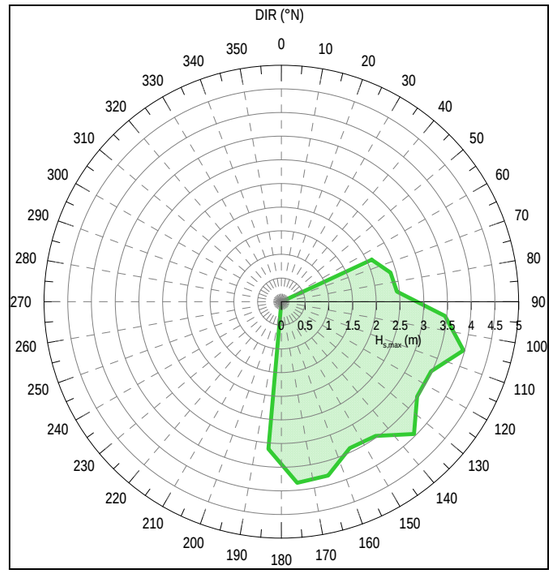


FIGURA 1-13 - ROSA DELLE ALTEZZE MASSIME RELATIVA AL PUNTO P

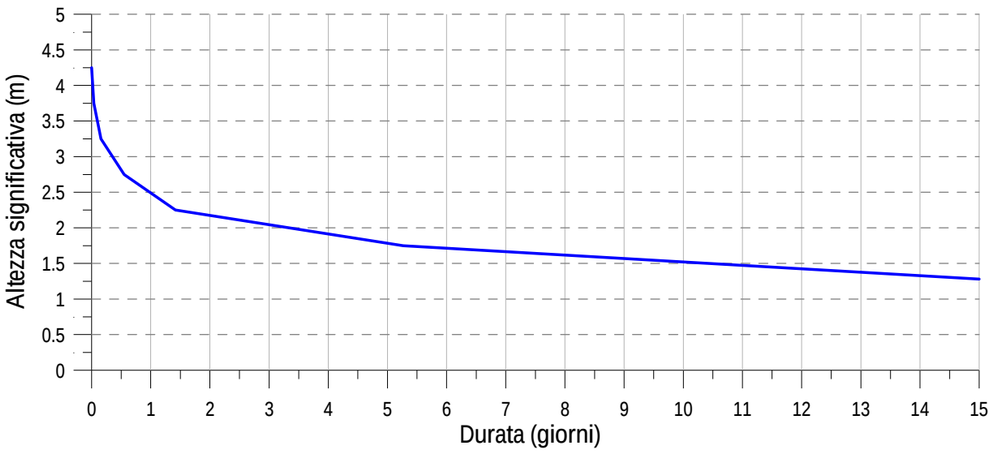


FIGURA 1-14 - CURVA DI DURATA RELATIVA LA PUNTO P

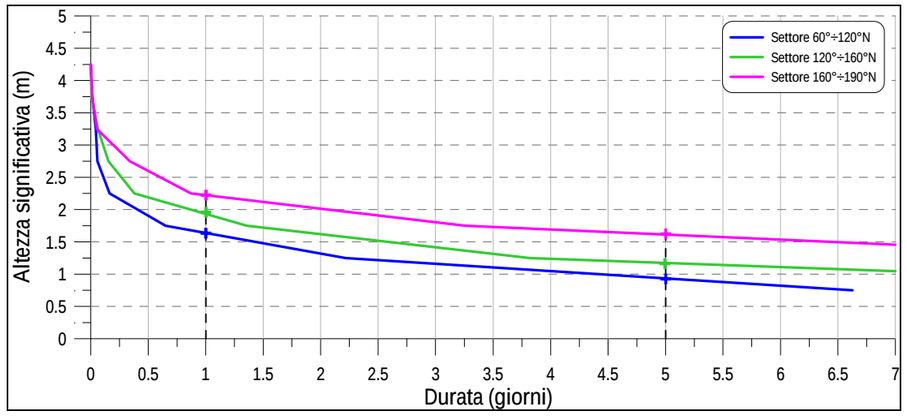


FIGURA 1-15 - CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO P PER I 3 SETTORI INDIVIDUATI

1.2.5. Mareggiate caratteristiche

La climatologia disponibile nel punto P, ricavata dalle propagazioni dal largo verso riva, è stata impiegata per definire alcune mareggiate caratteristiche che sono state impiegate nello studio delle circolazioni costiere e del trasporto solido.

In particolare, sono state individuate alcune mareggiate ritenute significative per la dinamica litoranea locale e che corrispondono rispettivamente a condizioni di moto ondoso relativamente severe (ma non estreme), caratterizzate da persistenza pari a 1g/anno e 5 gg/anno. L'analisi è stata condotta con riferimento a 3 differenti settori, individuati a partire dalla distribuzione delle energie del clima ondoso locale (Figura 1-12): Greco-Levante (60°÷120°N), Scirocco (120°-160°N) e Mezzogiorno (160°÷190°N). I valori di altezza d'onda significativa, per le mareggiate individuate, sono stati ricavati dalla curva di durata nel punto P ricostruita per i 3 settori di Greco-Levante, Scirocco e Mezzogiorno, per le suddette frequenze di 1 g e 5 gg/anno (Figura 1-15).

Sempre con riferimento alla distribuzione locale dell'energia (Figura 1-12), sono state individuate 3 direzioni principali di provenienza (75°N per il settore di Greco-Levante, 145°N per il settore di Scirocco e 185°N per quello di Mezzogiorno), rappresentative dei picchi di energia.

I valori del periodo di picco da associare a ciascuna mareggiata sono stati ricavati in funzione delle caratteristiche locali dell'evento ondoso sulla base delle corrispondenze tra clima locale e clima al largo ottenuto attraverso le propagazioni.

Le mareggiate caratteristiche così individuate, considerate come input per lo studio della propagazione locale e, successivamente, della dinamica litoranea e del trasporto solido, sono riportate nella successiva Tabella 1-3.

TABELLA 1-3 - MAREGGIATE CARATTERISTICHE NEL PUNTO P

		CARATTERISTICHE NEL PUNTO P		
Mareggiate	**Frequenza (gg/anno)**	**H_S (m)**	**T_P (s)**	**Dir (°N)**
Levante	1	1.64	6.5	75
Scirocco	1	1.93	6.8	145
Mezzogiorno	1	2.22	7.8	185
Levante	5	0.93	5.2	75
Scirocco	5	1.17	5.6	145
Mezzogiorno	5	1.61	6.8	185

1.3. Caratteristiche morfologiche e sedimentologiche

1.3.1. Ricostruzione storica dell'evoluzione morfologica del litorale

La ricostruzione storica dell'evoluzione del litorale di Vado Ligure, tra Villa Gavotti e il porto di Vado, è stata condotta sulla base dei dati forniti dal Committente e, in particolare, sulla base del confronto tra le seguenti linee di riva (Figura 1-16):

- linea di riva 1944;
- linea di riva 1973;
- linea di riva 1983;
- linea di riva 1993;
- linea di riva 2003
- linea di riva rilievo di marzo 2010.

L'analisi dell'evoluzione storica della linea di costa è stata condotta con riferimento al tratto di litorale compreso tra la foce del torrente Quiliano e la foce del torrente Segno.
La linea di riva del 1944 si presenta notevolmente arretrata rispetto a quelle degli ultimi 40 anni (dal 1973 al 2010), in parte perché le opere foranee del porto di Vado nel 1944 non raggiungevano i fondali attuali e in parte perché non erano ancora stati realizzati i terrapieni e le armature di foce del Quiliano.
Per quanto riguarda la spiaggia compresa tra la foce del Quiliano e il terrapieno del cantiere navale, dal 1973 al 1993 si osserva un avanzamento sostanzialmente uniforme della linea di costa di circa 6÷7 m. Dal 1993 al 2003 si riscontra un avanzamento piuttosto consistente (circa 15÷16 m), mentre nel corso degli ultimi anni la linea di costa risulta sostanzialmente stabile.
Con riferimento al tratto di litorale più a Sud (tra il cantiere navale e la foce del Segno), si osserva un riorientamento della linea di costa piuttosto evidente dal 1973 al 1993, con arretramento a Nord e avanzamento a Sud a ridosso della scogliera radente. Questo fenomeno va sicuramente attribuito al completamento delle opere foranee del porto di Vado e soprattutto all'allungamento del molo di sopraflutto.
Questa tendenza diminuisce nel corso del decennio successivo (dal 1993 al 2003) e nel corso dell'ultimo decennio si riscontra una sostanziale stabilità della linea di costa.

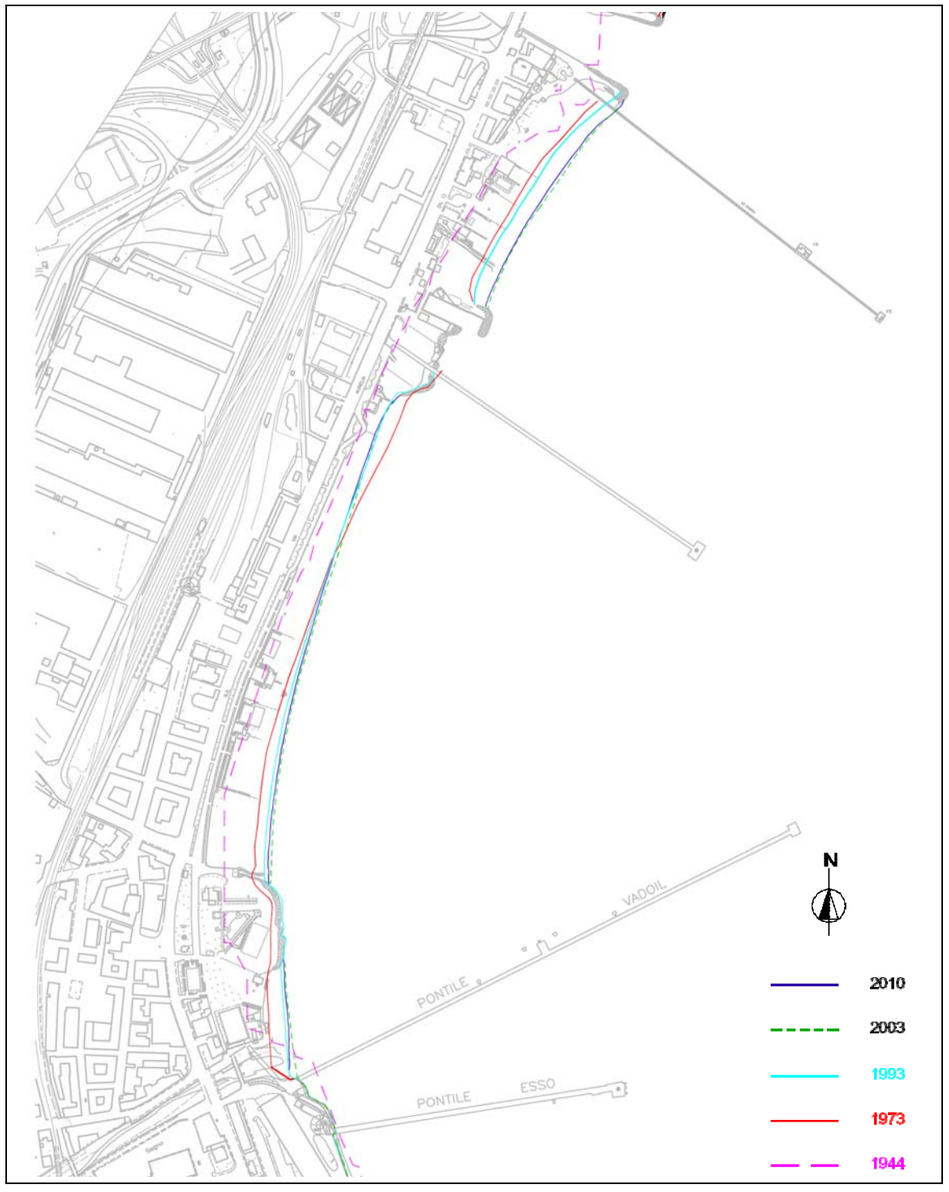


FIGURA 1-16 - RICOSTRUZIONE STORICA DELL'EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA DAL 1944 AL 2010

1.3.2. Dati sedimentologici

Le caratteristiche sedimentologiche del materiale presente sulla fascia attiva del litorale sono state ricavate sulla base dei risultati della campagna di indagini eseguita tra febbraio e maggio 2010, i cui risultati sono descritti in dettaglio nell'elaborato "Analisi sedimentologiche dei prelievi di campione eseguiti sulla spiaggia emersa e sommersa compresa tra il Torrente Segno e il Rio 4 Stagioni ad integrazione del progetto definitivo 'Piastra multifunzionale' del porto di Vado Ligure - Savona", redatto da Drafinsub Survey S.r.l. (maggio 2010).

Ai fini dello studio di cui in oggetto sono state considerate le caratteristiche dei campioni prelevati all'interno dell'area di interesse, compresa tra la foce del torrente Quiliano e la foce del torrente Segno (area riquadrata in rosso in Figura 1-17).

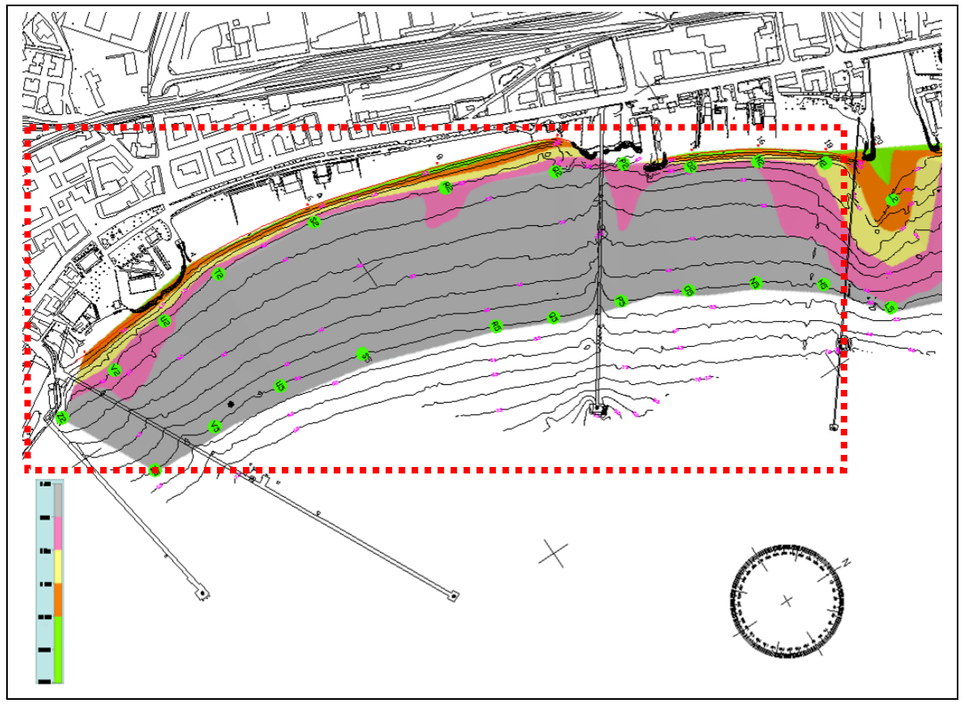


FIGURA 1-17 - UBICAZIONE DEI PUNTI DI PRELIEVO (CAMPAGNA DI INDAGINI DI FEBBRAIO-MAGGIO 2010)

Nelle successive Tabella 1-4 e Tabella 1-5 si riportano i valori del diametro medio dei grani per i campioni prelevati sulla spiaggia sommersa ed emersa, all'interno del tratto di litorale oggetto del presente studio.

TABELLA 1-4 - DIAMETRO MEDIO DEI GRANI - CAMPIONI SPIAGGIA SOMMERSA

Campione	Profondità (m s.m.m.)	D_{50} (mm)
H2	-2	0.276
H5	-5	0.304
N2	-2	0.213
N5	-5	0.132
O2	-2	0.216
O5	-5	0.129
P2	-2	0.318
P5	-5	0.191
Q2	-2	0.166
Q5	-5	0.199
R2	-2	0.303
R5	-5	0.136
S2	-2	0.137
S5	-5	0.159
T2	-2	0.157
U2	-2	0.289
U5	-5	0.157
V2	-2	0.318
V5	-5	0.154
Z2	-2	0.118
Z5	-5	0.162

TABELLA 1-5 - DIAMETRO MEDIO DEI GRANI - CAMPIONI SPIAGGIA EMERSA

Campione	Profondità (m s.m.m.)	D_{50} (mm)
0	battigia	1.867
4	battigia	2.405
6	battigia	2.735
8	battigia	4.273
10	battigia	2.990
14	battigia	6.408
16	battigia	3.362
18	battigia	4.353

Sulla base dei risultati delle indagini eseguite, si evince che la spiaggia sommersa fino alla profondità di circa -5 m s.m.m. (ovvero all'interno della fascia attiva) è costituita da sabbia medio-fine con diametro medio dei grani compreso tra 0.1 e 0.3 mm. La spiaggia emersa risulta, invece, costituita da ghiaia fine con diametro medio dei grani compreso tra 2 e 6 mm.

Vista la differente classazione del materiale tra spiaggia emersa e sommersa, si è scelto di procedere con l'analisi modellistica dell'evoluzione morfologica e della dinamica del litorale come di seguito specificato.
Ai fini dello studio della circolazione e del trasporto solido dei sedimenti che costituiscono il profilo sommerso del litorale (analisi condotta per mezzo di codici di calcolo CMS-WAVE e CMS-FLOW) sono state fornite in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sulla spiaggia sommersa. Nel caso specifico si ottiene un valore medio del D_{50} (diametro medio dei grani) pari a 0.20 mm (Tabella 1-4).
Per quanto riguarda, invece, l'evoluzione della linea di riva e lo studio del trasporto solido longitudinale (analisi condotta per mezzo di codici di calcolo STWAVE e GENESIS), si è scelto di fornire in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sulla battigia. Il codice di calcolo GENESIS, infatti, consente di inserire un unico valore del diametro medio dei grani per rappresentare i sedimenti della fascia attiva del litorale e, quindi, non permette di distinguere tra zona sommersa ed emersa. Poiché nel caso specifico l'evoluzione della linea di riva risulta maggiormente influenzata dal materiale che costituisce la spiaggia emersa, nella modellazione è stato considerato un valore medio del D_{50} pari a 3.55 mm (Tabella 1-5).

1.3.3. Sedimenti provenienti dal Torrente Segno

All'interno del tratto di litorale oggetto di studio si inserisce il Torrente Segno. Questo corso d'acqua, che sottende un bacino di circa 21 km^2, è in grado di generare un modesto apporto di sedimenti. Infatti, la fitta copertura vegetale limita fortemente le condizioni predisponenti a fenomeni di ruscellamento diffuso e arealmente esteso, ad eccezione di qualche area in cui gli incendi hanno comportato una maggiore esposizione agli agenti erosivi.
Studi sul trasporto solido del Torrente Segno hanno fornito una stima del trasporto medio annuo in grado di essere generato dal torrente, fornendo un range variabile tra i 3400 e gli 8600 m^3/anno relativo al materiale in grado di raggiungere la foce (cfr. "Valutazione del trasporto solido del Torrente Segno", redatto dal Dott. Geol. Guido Paliaga nel giugno 2014). Il valore più elevato si riferisce alla stima effettuata considerando gli effetti dei recenti incendi che hanno interessato alcune aree del bacino.

Il materiale costituente il fondo alveo, inizialmente più grossolano (ciottoli e ghiaie), diminuisce progressivamente verso la foce sino a granulometrie più fini (sabbie).
Le analisi granulometriche eseguite su un campione di materiale prelevato in prossimità della foce hanno mostrato che circa il 25% del campione è costituito da sabbie (dimensioni inferiori ai 2 mm secondo classificazione ASTM).

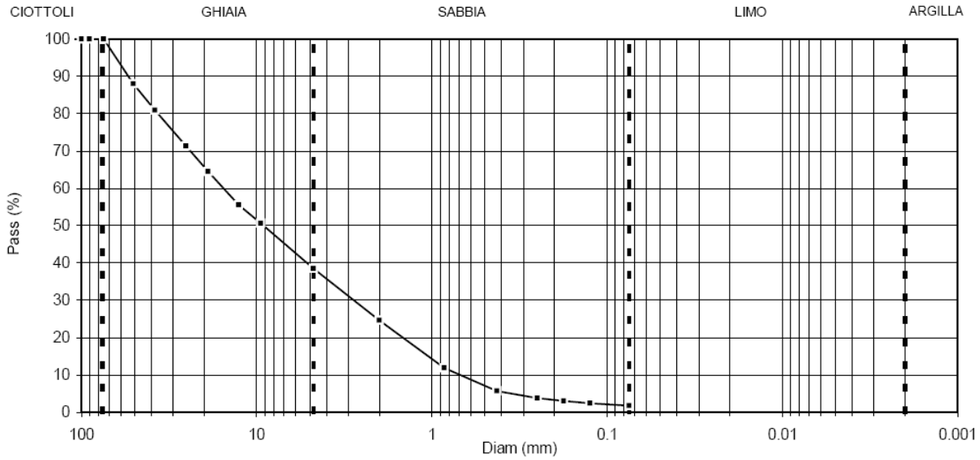


FIGURA 1-18 - CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE DI MATERIALE PRELEVATO ALLA FOCE DEL TORRENTE SEGNO

1.4. Analisi dello stato attuale

Al fine di poter comprendere le attuali dinamiche del litorale, nonché di eseguire una verifica dei risultati dei modelli di circolazione e trasporto in relazione alle reali dinamiche, è stato eseguito lo studio su modello matematico dello stato attuale.

Lo studio della dinamica litoranea e del trasporto solido che si instaurano nei fondali antistanti il litorale di Vado in seguito alla persistenza (cioè a regime, in condizioni

stazionarie) di determinate forzanti, è stato condotto mediante l'utilizzo del codice di calcolo CMS-Flow, accoppiato al codice di calcolo CMS-Wave. Una descrizione dettagliata dei codici di calcolo viene riportata nei successivi paragrafi 1.4.1 e 1.4.2.

Per lo studio delle correnti costiere sono state considerate come forzanti principali il moto ondoso e il vento. Il campo di moto ondoso sottocosta (forzante del modello idrodinamico) è stato ricavato, a partire dalle condizioni meteomarine nel punto di output "P" (cfr. precedente paragrafo 1.2.5), per mezzo del codice di calcolo CMS-Wave. Quest'ultimo si interfaccia con il codice di calcolo CMS-Flow, fornendogli i valori dei radiation stress che generano le correnti litoranee.

In modo analogo, utilizzando l'accoppiamento del codice di calcolo CMS-Flow con il codice di calcolo CMS-Wave, è stato condotto lo studio del trasporto solido litoraneo. Il codice di calcolo CMS-Flow consente di interpretare correttamente i fenomeni responsabili del trasporto dei sedimenti; le simulazioni condotte consentono di evidenziare, seppur qualitativamente, le aree potenzialmente attive dal punto di vista del trasporto solido generato dall'azione combinata di onde e correnti. Per lo studio del trasporto solido sono state considerate come forzanti principali il campo di moto ondoso (CMS-Wave) e il campo di velocità e di livelli generato dal moto ondoso (risultati del modello CMS-Flow).

Al fine di analizzare la dinamica delle correnti e del trasporto anche in presenza di trasporto solido proveniente dal Torrente Segno sono stati analizzati alcuni scenari di mareggiate concomitanti ad un evento di piena del torrente.

1.4.1. Descrizione del codice di calcolo CMS-Wave

Il modello matematico CMS-Wave (Lin L., H. Mase, F. Yamada e Z. Demirbilek, 2006; Demirbilek Z., L. Lin e A. Zundel 2007), precedentemente denominato WABED (Wave-Action Balance Equation Diffraction), è un modello bidimensionale stazionario spettrale basato sull'equazione di conservazione dell'azione integrata per tener conto della riflessione e della diffrazione dell'onda (Mase H., H. Amamori e T. Takayama, 2005). Il modello è stato sviluppato all'interno del progetto Coastal Modeling System (CMS), nell'ambito del programma di ricerca statunitense Coastal Inlets Research Program (C.I.R.P.) condotto nel Coastal and Hydraulic Laboratory (C.H.L.) del U.S. Army Engineer Research and Development Center (E.R.D.C.).

CMS-Wave è in grado di simulare la trasformazione spettrale dell'onda, anche in presenza di correnti litoranee, tenendo conto dei processi di rifrazione (dovuta al fondale, alle strutture e ai gradienti di corrente), di shoaling (dovuto al fondale e a gradienti di corrente), di riflessione (dovuta alla linea di costa e alle strutture) e di blocking (dovuto alle correnti). Sono inoltre considerati dal modello diversi processi di generazione e dissipazione dell'onda, tra i quali la generazione da vento, l'attrito al fondo, frangimento, la ridistribuzione dell'energia sullo spettro, il whitecapping e le interazioni non lineari tra onde.

Equazione di conservazione dell'azione con diffrazione

CMS-Wave è basato sulla equazione di conservazione dell'azione dell'onda, e non della densità dell'energia, in quanto lo spettro della densità d'azione è conservativo anche in presenza di correnti (Bretherton e Garret 1968; Whitham 1974):

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x}+\frac{\partial(C_y N)}{\partial y}+\frac{\partial(C_\theta N)}{\partial x}=\frac{\kappa}{2\sigma}\left[\left(CC_g\cos^2\theta N_y\right)_y-\frac{CC_g}{2}\cos^2\theta N_{yy}\right]-\varepsilon_b N-S$$

dove:

$N=\frac{E(\sigma,\theta)}{\sigma}$ è la densità di azione dell'onda (funzione della frequenza σ e della direzione θ) e si ottiene dividendo la densità di energia E per la frequenza;

C e Cg sono le celerità d'onda e di gruppo;

Cx,Cy e Cθ sono le velocità caratteristiche della corrente rispetto x, y e θ ;

x e y sono le coordinate del piano orizzontale;

Ny e Nyy sono le derivate del primo e del secondo ordine della densità di azione.

Nell'equazione sono implementate sia la diffrazione dell'onda, integrata con un termine derivato dall'approssimazione parabolica, che la dispersione dell'energia: κ è un parametro empirico che rappresenta l'intensità dell'effetto di diffrazione, ε_b è la parametrizzazione della dissipazione energetica dovuta al frangimento ed S (composto da S_{in} e S_{ds}) indica eventuali sorgenti o perdite addizionali (forzante da vento, attrito al fondo, interazione non lineare delle onde).

Interazione onda-correnti

Le velocità caratteristiche C_x, C_y e C_θ nel primo membro dell'equazione di conservazione dell'azione possono essere espresse come:

$$C_x = C_g \cos\theta + U$$
$$C_y = C_g \sin\theta + V$$
$$C_\theta = \frac{\sigma}{\sinh 2kh}\left(\sinh\theta\frac{\partial h}{\partial x} - \cosh\theta\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \cos\theta\sin\theta\frac{\partial U}{\partial x} - \cos^2\theta\frac{\partial U}{\partial x} + \sin^2\theta\frac{\partial V}{\partial x} - \sin\theta\cos\theta\frac{\partial V}{\partial x}$$

dove U e V le componenti della velocità della corrente, mediate sulla profondità, lungo le due direzioni del piano x e y, k è il numero d'onda e h è la profondità. La dispersione dell'azione dell'onda dovuta alla presenza di correnti può essere ricavata a partire dalla relazione tra la frequenza relativa σ, la frequenza assoluta ω, il vettore del numero d'onda $\vec{k}$ e la velocità della corrente $\vec{Q} = \vec{U} + \vec{V}$ (Johnsson 1990):

$$\sigma = \omega - \vec{k}\cdot\vec{Q} \qquad \text{e} \qquad \sigma^2 = g\,k\,\tanh(kh)$$

dove:

$\vec{k}\cdot\vec{Q}$ è il termine che indica la variazione di frequenza (effetto Doppler);

g è l'accelerazione di gravità;

Impiegando la precedente formulazione è quindi possibile valutare la dispersione di azione dell'onda dovuta alla presenza di correnti e quindi la variazione di frequenza. Con tale formulazione non vi è alcuna soluzione per la condizione di wave blocking, cioè nel caso di un treno d'onde che incontra una corrente la cui velocità è superiore alla celerità di gruppo (Smith et al. 1998; Larson e Kraus 2002):

$$C_g = \frac{\partial\sigma}{\partial k} < \frac{\vec{k}\cdot\vec{Q}}{k}$$

In condizioni di wave blocking l'onda non è in grado di propagarsi oltre la corrente e l'energia viene in parte riflessa (o trasformata con componenti a frequenza inferiore) e in parte dissipata per frangimento. In CMS-Wave in condizioni di wave blocking l'azione dell'onda è posta pari a zero.

Diffrazione dell'onda

Il termine κ, nel primo termine al secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda, è il parametro che rappresenta la diffrazione dell'onda, formulato a partire dalla teoria dell'approssimazione parabolica (Mase, 2001). Questo termine può variare tra 0 (il modello non considera diffrazione dell'onda) e 4 (massimo effetto di diffrazione) e necessita, nell'applicazione del modello, di una valutazione e di una calibrazione applicata al caso specifico.

Riflessione dell'onda

L'energia dell'onda riflessa (da una struttura o dalla linea di costa) viene valutata nell'assunzione che l'angolo di incidenza e quello riflesso, rispetto alla normale all'ostacolo, siano uguali e che l'energia riflessa sia una frazione di quella incidente. In particolare si assume che l'azione d'onda riflessa N_r sia linearmente proporzionale a quella dell'onda incidente N_i (cfr. secondo termine a secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda):

$$N_r = K_r^2 N_i$$

dove K_r è il coefficiente di riflessione (0 nessuna riflessione e 1 riflessione totale) definito come il rapporto tra l'altezza d'onda riflessa e quella incidente (Dean e Dalrymple 1984).

Frangimento dell'onda

In CMS-Wave la dissipazione dovuta al frangimento può essere valutata attraverso 4 differenti espressioni: formulazione perfezionata di Goda (Sakai et al., 1989), formulazione perfezionata di Miche (Battjes, 1972; Mase et al. 2005 b), formulazione di Battjes e Janssen (Battjes e Janssen, 1978) e formulazione di Chawla e Kirby (2002). Queste espressioni, considerate più accurate per valutare il frangimento in presenza di correnti rispetto ad altre formulazioni esistenti in letteratura, possono essere suddivise in due distinte categorie:

– formulazioni che valutano la dissipazione di energia troncando la coda della distribuzione dell'altezza d'onda di Rayleigh (Goda e Miche);
– formulazioni che valutano la dissipazione come perdita totale di energia nello spettro mutuando l'approccio utilizzato per la modellazione del risalto idraulico - "salto di Bidone" - (Battjes-Janssen e Chawla-Kirby).

Il modello consente di scegliere l'espressione per il calcolo della dissipazione di energia, ma limita comunque l'altezza d'onda significativa frangente (H_b) a valori inferiori a quelli che si ottengono applicando il criterio di frangimento in funzione della profondità h (Smith et al. 1999):

$$\frac{H_b}{h} \le 0.64$$

e il criterio più generale, che dipende anche dalla ripidità del fondale:

$$H_b = \frac{0.64}{k_p}\tanh(k_p h)$$

dove k_p è il numero d'onda corrispondente al picco dello spettro.

Trasferimento di energia dal vento

Il termine S_{in}, componente generativa del terzo termine a secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda, è il parametro che rappresenta l'incremento di energia dovuto al vento.

Questo termine viene espresso in funzione del rapporto tra la celerità dell'onda C e la velocità del vento W , del rapporto tra la celerità di gruppo C_g e la velocità del vento, della differenza tra la velocità del vento e la celerità dell'onda e della differenza tra la direzione del vento θ_w e la direzione dell'onda θ (Lin e Lin 2006b).

$$S_{in} = \frac{a_1\sigma}{g} F_1(\vec{W}-\vec{C}_g)F_2(\frac{C_g}{W})E^*_{PM}(\sigma\sigma)\Phi(\theta+\frac{a_2\sigma^2}{g}F_1(\vec{W}-\vec{C}_g)F_2(\frac{C_g}{W})F_3(\frac{C_g}{W})N$$

dove

$$E^*_{PM}(\sigma\sigma = g/\sigma^2 \exp(-0.74\sigma_0^4/\sigma^4)$$

è l'espressione dello spettro nella forma di Pierson-Moskowitz (PM), con σ0=g/W costante di Phillips;

$$\Phi(\theta) = 8/3\pi\ \cos^4(\theta-\theta_{wind}) \qquad per\ \ |\theta-\theta_{wind}| \le \pi/2$$

è lo spreading direzionale normalizzato;

$$F_1(\vec{W}-\vec{C}_g) = \begin{cases} W\cos(\theta_{wind}-\theta)-C_g \\ 0 \end{cases} \qquad F_2(\frac{C_g}{W}) = \begin{cases} (\frac{C_g}{W})^{1.15} \\ 1 \end{cases} \qquad F_3(\frac{C_g}{W}) = \begin{cases} \log_{10}[(\frac{C_g}{W})^{-1}] & \text{se } C_g < W \\ 0 & \text{se } C_g \ge W \end{cases}$$

sono le funzioni che tengono conto: F_1 della forzante del vento, F_2 dell'effetto dei meccanismi di risonanza di Phillips (Phillips 1957) e F3 dell'"invecchiamento" dell'onda.

Dissipazione di energia dovuta al whitecapping

La perdita di energia dovuta al fenomeno del whitecapping è rappresentata nella componente dissipativa (S_{ds}) del terzo termine del secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda; questo termine può essere espresso, tenendo conto della presenza di correnti e degli effetti turbolenti come segue:

$$S_{ds} = -c_{ds}(a_e k)^{1.5}\sigma^2/g\ C_g(\sigma\sigma,\theta)\ {}_4(\vec{W},\vec{Q},\vec{C}_g)\ F_5(kh)\ N$$

dove

$$F_4(\vec{W},\vec{Q},\vec{C}_g) = \frac{v+W}{\left|\vec{W}+\vec{Q}+\vec{C}_g\right|} \qquad \text{e} \qquad F_5(kh) = \frac{1}{\tanh(kh)}$$

con c_{ds} coefficiente di proporzionalità, $a_e = \sqrt{E(\sigma,\theta)d\sigma d\theta}$ l'ampiezza dell'onda e v il coefficiente di dissipazione turbolenta.

Dissipazione per attrito al fondo

La dissipazione energetica dovuta alle interazioni con il fondo è rappresentata nella componente dissipativa (S_{ds}) del terzo termine del secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda; può essere causata dall'attrito sul fondo o da movimenti del materiale del fondo e può essere rappresentata con la seguente espressione (Collins 1972):

$$S_{ds} = -c_f \frac{\sigma^2}{g}\frac{\langle u_b\rangle}{\sinh^2(kh)}N$$

dove $\langle u_b\rangle = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{g}{h}E_{total}}$ rappresenta la media dei moduli delle velocità orbitali al fondo ed E_{total} è la densità di energia totale.

Infine, c_f è il coefficiente di attrito di Darcy-Weisbach che può assumere, per fondali sabbiosi, valori compresi tra 0.004 e 0.007 (Hasselmann et al. 1973; Bouws e Komen 1983), mentre per fondali rocciosi o corallini può assumere valori tra 0.05 e 0.40 (Hardy 1993; Hearn 1999; Lowe et al. 2005). Conseguentemente, nell'applicazione del modello, tale coefficiente necessita di una valutazione e, possibilmente, di una calibrazione applicata al caso specifico.

1.4.2. Descrizione del codice di calcolo CMS-Flow

Il modello matematico CMS-Flow (Militello et al., 2004) è un codice alle differenze finite in grado di simulare la circolazione idrodinamica e il trasporto solido indotti da

forzanti quali moto ondoso, marea e vento. Il codice è stato sviluppato nell'ambito del progetto Coastal Modeling System (CMS), sviluppato a sua volta nel contesto del programma di ricerca statunitense Coastal Inlets Research Program (C.I.R.P.) condotto nel Coastal and Hydraulic Laboratory (C.H.L.) dello U.S. Army Engineer Research and Development Center (E.R.D.C.).

CMS-Flow risolve in un dominio bidimensionale le equazioni di continuità e della quantità di moto della fluidodinamica, integrate sulla verticale, attraverso una approssimazione ai volumi finiti. Il codice implementa inoltre le equazioni di avvezione-diffusione e di continuità dei sedimenti per risolvere il problema del trasporto e dell'evoluzione del fondale.
Il dominio di calcolo bidimensionale viene discretizzato con una griglia ortogonale con maglia di elementi quadrati di dimensioni variabili: il modello implementa la funzione di "telescoping grid" che permette la costruzione di un dominio con elementi le cui dimensioni possono essere variate in funzione delle caratteristiche locali del fondale e della complessità delle opere presenti.
Il codice risolve in una prima fase le equazioni della quantità di moto attraverso una discretizzazione nel tempo e successivamente procede alla soluzione dell'equazione di continuità con le velocità aggiornate con i valori ottenuti dalla soluzione della quantità di moto. Il calcolo del trasporto viene condotto sui valori aggiornati di sovralzo e velocità indotte dalle correnti, nonché dall'azione delle onde se incluse nella simulazione.

Per lo studio delle correnti costiere e del trasporto generato vengono normalmente considerate come forzanti principali il moto ondoso e il vento. Il campo di moto ondoso sottocosta (forzante del modello idrodinamico) è normalmente ricavato per mezzo del codice di calcolo CMS-Wave, che si interfaccia con il codice di calcolo CMS-Flow, fornendogli i valori dei radiation stress che generano le correnti litoranee.

Problema idrodinamico - Equazioni del moto
Per la soluzione del problema idrodinamico, CMS-Flow risolve le equazioni che governano il problema idrodinamico (equazione di continuità e di conservazione della quantità di moto) in un dominio bidimensionale applicando il metodo dei volumi finiti.
Le equazioni che governano il moto sono:

$$\frac{\partial(h-\eta)}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=0 \qquad \text{(FL1)}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t}+\frac{\partial u q_x}{\partial x}+\frac{\partial v q_x}{\partial y}+\frac{1}{2}g\frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial q_x}{\partial y}+fq_x-\tau_{bx}+\tau_{wx}+\tau_{Sx} \qquad \text{(FL2)}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t}+\frac{\partial u q_y}{\partial x}+\frac{\partial v q_y}{\partial y}+\frac{1}{2}g\frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial q_y}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial q_y}{\partial y}+fq_y-\tau_{by}+\tau_{wy}+\tau_{Sy} \qquad \text{(FL3)}$$

dove:

h		profondità del fondale
η		elevazione libera della superficie del mare
q_x	q_y	flussi per unità di larghezza parallelo alle direzioni x e y
u	v	velocità della corrente integrate sulla verticale parallela alle direzioni x e y
D_x	D_y	termini di diffusione per le direzioni x e y
f		parametro di Coriolis
τ_{bx}	τ_{by}	sforzi al fondo paralleli alle direzioni x e y
τ_{wx} e	τ_{wy}	sforzi(vento)sulla superficie libera del mare paralleli alle direzioni x e y
τ_{Sx}	τ_{Sy}	sforzi dovuti alle onde paralleli alle direzioni x e y

Sforzi al fondo
In presenza di onde, gli sforzi al fondo derivano dalla combinazione degli effetti delle correnti (generate da vento, oscillazioni di marea, moto ondoso) e della velocità orbitale delle onde. Per il calcolo di tali sforzi il modello impiega la sequente espressione approssimata, mediata sul tempo, (Nishimura 1988):

$$\tau_{bx}=C_b\left\{\left(U_{wc}+\frac{\omega_b^2}{U_{wc}}\cos^2\alpha\right)u+\left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}}\cos\alpha\sin\alpha\right)v\right\} \qquad \text{(FL4)}$$

$$\tau_{by} = C_b\left\{\left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}}\cos\alpha\sin\alpha\right)u + \left(U_{wc} + \frac{\omega_b^2}{U_{wc}}\sin^2\alpha\right)v\right\} \qquad \text{(FL5)}$$

dove
C_b è il coefficiente di attrito al fondo ed è dato $C_b = g/C^2$ con $C = R^{1/6}/n$ coefficiente di Chezy,
α è l'angolo rispetto l'asse *x*, e U_{wc} e ω_b sono dati da:

$$U_{wc} = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{\left|u^2+v^2+\omega_b^2+2(u\cos\alpha+v\sin\alpha)\omega_b\right|} + \sqrt{\left|u^2+v^2+\omega_b^2+2(u\cos\alpha+v\sin\alpha)\omega_b\right|}\right\}$$

$$\omega_b = \frac{\sigma H}{\pi\sinh\left[k(h+\eta)\right]}$$

dove σ è la frequenza, *H* è l'altezza d'onda e *k* è il numero d'onda.

Sforzi sulla superficie libera

Gli sforzi sulla superficie libera del mare dovuti al vento sono dati dalle seguenti espressioni:

$$\tau_{bx} = C_d\frac{\rho_a}{\rho_w}W^2\sin(\theta) \quad \text{e} \quad \tau_{by} = C_d\frac{\rho_a}{\rho_w}W^2\cos(\theta) \qquad \text{(FL6)}$$

dove C_d è il coefficiente di attrito del vento, ρ_a e ρ_w sono le densità dell'aria e dell'acqua, *W* e θ sono la velocità e la direzione del vento.

Sforzi dovuti alle onde

Gli sforzi dovuti alle onde sono calcolati a partire dai gradienti dei radiation stress:

$$\tau_{Sx} = -\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) \quad \text{e} \quad \tau_{Sy} = -\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right) \qquad \text{(FL7)}$$

dove *Sxx*, *Sxy* e *Syy* sono i radiation stress indotti dal moto ondoso e forniti in input dal modello di propagazione del moto ondoso (CMS-Wave).

Coefficiente di diffusione

Il coefficiente di diffusione laterale *D* è fortemente influenzato dal fenomeno del mescolamento verticale della colonna d'acqua, che varia in funzione dei processi coinvolti. Dove il contributo del moto ondoso può essere trascurato (alto fondale), il coefficiente può essere espresso in funzione della colonna d'acqua, delle velocità delle correnti e della scabrezza del fondale (Falconer, 1980):

$$D_0 = \frac{1}{2}\left[1.156g(h+\eta)\frac{|U|}{C^2}\right] \qquad \text{(FL8)}$$

Dove invece il contributo del moto ondoso risulta importante, come nella surf zone, il coefficiente può essere espresso come segue (Smith, Larson e Kraus, 1993; Kraus e Larson, 1991):

$$D_w = \varepsilon_L \quad \text{con} \quad \varepsilon_L = \Lambda u_m H \quad \text{e} \quad u_m = \frac{gHT}{\left[2\lambda\cosh\left(\frac{2\pi(h+\eta)}{\lambda}\right)\right]} \qquad \text{(FL9)}$$

dove Λ è un coefficiente empirico che dipende dalla forza di miscelazione laterale e u_m è l'ampiezza della componente orizzontale della velocità orbitale al fondo.

Problema del trasporto solido - equazioni del trasporto e di continuità dei sedimenti

Per la soluzione del problema del trasporto solido, CMS-Flow implementa l'equazione del trasporto secondo la formulazione Lund-CIRP (Camenen e Larson, 2005 e 2006), che tiene conto sia del trasporto in sospensione che del trasporto al fondo. I valori di trasporto solido, ottenuti applicando l'equazione del trasporto, vengono successivamente impiegati per la valutazione dell'evoluzione dei fondali, calcolata applicando l'espressione di continuità dei sedimenti.
In CMS-Flow l'evoluzione morfologica del fondale è controllata da due vincoli principali: (a) il fondo fisso e (b) l"avalanching". Il primo permette di definire all'interno del dominio aree che non possono essere erose, e sono quindi soggette solo fenomeni di deposizione (es. substrato roccioso), mentre il secondo interviene, nelle aree a fondo mobile, quando la pendenza del fondale supera un prefissato angolo critico: oltre questo angolo, il modello induce un franamento di materiale verso il basso fino al ripristino di una pendenza inferiore a quella critica.
Di seguito si riporta una breve trattazione delle espressioni implementate da CMS-Flow per la risoluzione del problema del trasporto solido e dell'evoluzione morfologica dei fondali; si rimanda ai manuali del codice (*ERDC/CHL TR-06-9, Agosto 2006*) per una più esaustiva trattazione.

Coefficienti di attrito e di scabrezza del fondo

Il coefficiente di scabrezza k_s, assunto costante nel modello, è costituito da tre termini:

$$k_s = k_{sd} + k_{sf} + k_{ss} \qquad \text{(FL10)}$$

Il termine k_{sd} è la scabrezza legata alla dimensione (d_{50}) del materiale: $k_{sd} = 2.5 d_{50}$.

Il termine k_{sf} è la scabrezza legata al trascinamento del materiale, funzione delle caratteristiche dei ripple (Soulsby 1997): $k_{sf} = 7.5 H_r^2 / L_r$ con H_r e L_r: rispettivamente altezza e lunghezza del ripple.

Le caratteristiche del ripple dipendono essenzialmente (Soulsby 1997) dalla dimensione del sedimento in presenza di sola corrente, mentre dipendono dalla mobilità delle particelle (van Rijn 1993) in presenza di onde.

Il termine k_{ss} è la scabrezza legata alla mobilità (d_{50}) del materiale (Wilson 1966,1989): $k_{ss} = 5 d_{50} \theta_i$ dove θ_i indica genericamente il parametro di Shields, per correnti θ_c e per onde θ_w:

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{\rho(s-1)g d_{50}} \quad \text{e} \quad \theta_w = \frac{\tau_c}{\rho(s-1)g d_{50}} \qquad \text{(FL11)}$$

dove s è il rapporto tra le densità dei materiali (ρ_s/ρ_w).

Le espressioni FL11 dipendono essenzialmente dalle tensioni tangenziali al fondo dovute alla corrente τ_c e al moto ondoso τ_{wc}:

$$\tau_c = \frac{1}{2}\rho_w f_c U_c^2 \quad \text{e} \quad \tau_{wc} = 0.5\tau_w = 0.5 \cdot \frac{1}{2}\rho_w f_w U_w^2 \qquad \text{(FL12)}$$

dove ρ_w è la densità dell'acqua, U_c e U_w sono la velocità della corrente e la velocità orbitale, e f_c e f_w sono i coefficienti di attrito per correnti (Soulsby 1997) e onde (Swart 1974) che dipendono principalmente dal coefficiente di scabrezza k_s; conseguentemente le equazioni FL11 e FL12 vengono risolte iterativamente per successive approssimazioni.

Trasporto al fondo

Una espressione generale per il calcolo del trasporto generato dalla combinazione di onde e correnti è stato sviluppato da Camenen e Larson (2005):

$$\frac{q_{bw}}{\sqrt{(s-1)g d_{50}^3}} = a_w \sqrt{\theta_{net}}\,\theta_{cw,m} \exp\left(-b\frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right)$$
$$\frac{q_{bm}}{\sqrt{(s-1)g d_{50}^3}} = a_n \sqrt{\theta_{cn}}\,\theta_{cw,m} \exp\left(-b\frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right) \qquad \text{(FL13)}$$

dove i pedici w e n si riferiscono, rispettivamente, alle componenti in direzione parallela e normale alla direzione dell'onda, a e b sono dei coefficienti di derivazione sperimentale, θ_{cr} è il parametro critico di Shield, $\theta_{cw,m}$ e θ_{cw} sono i parametri di Shields massimo e medio in presenza di onde e correnti, e $\theta_{cw,m}$ e θ_{cw} sono i contributi netti delle tensioni tangenziali durante un ciclo dell'onda, rispettivamente in direzione parallela e normale all'onda. I parametri $\theta_{cw,m}$,θ_{cw} ,$\theta_{cw,m}$ e θ_{cw} dipendono principalmente dai coefficienti di attrito e dalle velocità della corrente e orbitali.

I coefficienti di derivazione sperimentale assumono i seguenti valori: a_n = 12, b = 4.5 e (Camenen e Larson 2005) a_w = 6 + 6 X_t con $X_t = \theta_c/(\theta_c - \theta_w)$ si ricava dai parametri di Shield θ_c e θ_w.

Trasporto in sospensione

Il trasporto in sospensione viene calcolato assumendo che la concentrazione dei sedimenti abbia un profilo esponenziale lungo la colonna d'acqua e la velocità sia costante (Camenen e Larson 2006):

$$q_s = U_c c_r \frac{\varepsilon}{w_s}\left(1 - \exp\left(\frac{w_f d}{\varepsilon}\right)\right) \qquad \text{(FL14)}$$

dove:

w_s è la velocità di caduta dei sedimenti;

c_r è la concentrazione di riferimento
$c_r = 3.5 \cdot 10^{-3} \exp(-0.3 d_*)\theta_{cw,m} \exp(-b\theta_{cr}/\theta_{cw})$

con $d_* = ((s-1)g/v^2)^{1/3} d_{50}$ che è la dimensione del grano adimensionalizzata;

ε è la diffusività dei sedimenti (coefficiente di mescolamento), correlata alla perdita di energia (Battjes 1975): $\varepsilon = (D_e/\rho)^{1/3} d$.

Il termine D_e rappresenta il coefficiente di dissipazione totale ed è pari a:

$$D_e = k_c^3 D_{ec} + k_w^3 D_{ew} + k_b^3 D_{eb} \quad \text{con} \quad D_{ec} = \tau_c u_{c*} = \sqrt{\tau_c/\rho_w}, \quad D_{ew} = \tau_w u_{w*} = \sqrt{\tau_w/\rho_w} \quad \text{e}$$

$k_c = 1/6\sigma_c\kappa$
$k_w = 1/6\sigma_w\kappa$

dove σ_i è il numero di Schmidt e κ è la costante di Von Karman (assunta pari a 0.4). Il termine D_{eb} è fornito direttamente dal modello di propagazione, mentre il termine k_b è assunto pari a 0.017.

Evoluzione morfologica del fondale

Le variazioni di quota del fondale vengono valutate applicando l'equazione di continuità dei sedimenti, nella quale vengono utilizzate le portate solide medie (mediate nel tempo). Con questo tipo di approccio, nel modello sono impostati un intervallo temporale dt_{sed}, per il calcolo delle portate istananee $q_{tot,x}$ e $q_{tot,y}$, e un intervallo temporale dt_{morph}, per il calcolo delle portate medie $\underline{q}_{tot,x}$ e $\underline{q}_{tot,y}$ e delle variazioni di fondale. Per tenere conto delle variazioni di portata solida indotte dalla componente diffusiva (che tende ad incrementare il trasporto verso le zone di fondale più depresse e viceversa ridurre quello diretto verso le zone più elevate) le portate medie vengono calcolate secondo le formule (Watanabe, 1987):

$$\underline{q}^{*}_{tot,x} = \underline{q}_{tot,x} + D_s \left|\underline{q}_{tot}\right| \frac{\partial h}{\partial x}$$
$$\underline{q}^{*}_{tot,y} = \underline{q}_{tot,x} + D_s \left|\underline{q}_{tot}\right| \frac{\partial h}{\partial y} \qquad \text{(FL15)}$$

dove D_s è un coefficiente empirico (variabile tipicamente nel range 5-30).

In conclusione, l'equazione di continuità dei sedimenti viene risolta calcolando le variazioni di quota del fondale nell'intervallo temporale dt_{morph} :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{1}{1-p}\right)\left(\frac{\partial \underline{q}^{*}_{tot,x}}{\partial x} + \frac{\partial \underline{q}^{*}_{tot,y}}{\partial y}\right) \qquad \text{(FL16)}$$

1.4.3. Definizione delle griglie di calcolo

Per la costruzione del dominio del modello matematico sono stati impiegati i dati batimetrici a disposizione, cioè le carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina e i rilievi locali disponibili (rilievi agosto 2008 e aprile 2010).

Per lo studio della propagazione locale del moto ondoso, mediante il codice di calcolo CMS-Wave, è stato definito un dominio di calcolo incentrato nell'area oggetto di studio (vedi Figura 1-19) avente origine nel punto di coordinate (1460450 m E; 4904090 m N) e ruotato di 138.5° rispetto alla direzione Est. Il dominio ha dimensioni 3'250 x 6'900 m ed è stato discretizzato con una griglia a maglia ortogonale a celle quadrate di passo 5 m; il bordo offshore della griglia è posto su una profondità variabile con valore massimo pari a 200 m e passa in prossimità del punto P. Le coordinate delle origini delle griglie di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga - Fuso Ovest.

Lo studio della circolazione e del trasporto è stato condotto mediante il codice di calcolo CMS-Flow, impiegando un dominio costituito da una griglia sovrapposta alla precedente ma caratterizzata da una maglia ortogonale a passo variabile (da 5 m sottocosta a 80 m verso il largo).

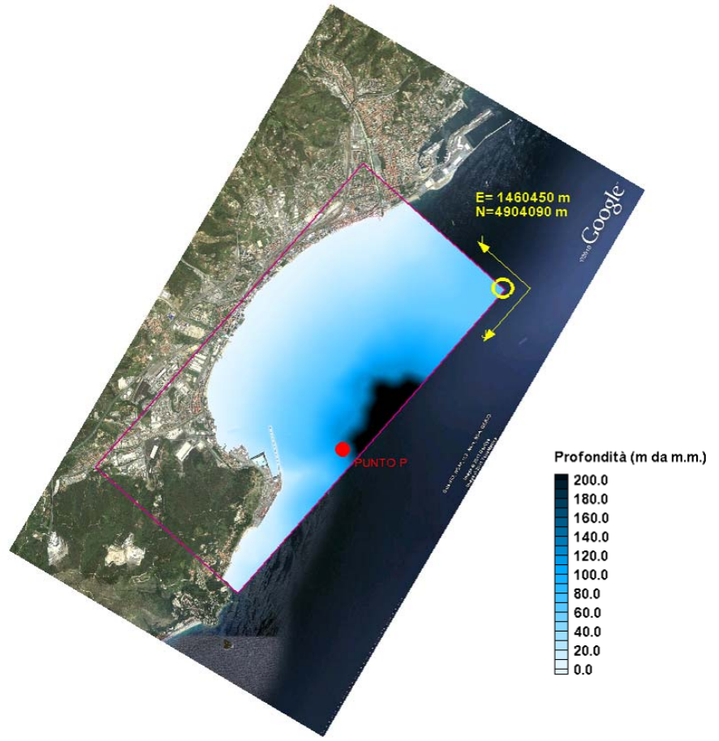


FIGURA 1-19 - GRIGLIA DI CALCOLO IMPIEGATA PER LO STUDIO DELLA CIRCOLAZIONE COSTIERA E DEL TRASPORTO SOLIDO

1.4.4. Dati di input

Le condizioni assegnate in input al modello matematico vengono di seguito esplicitate e successivamente sintetizzate nella Tabella 1-6.

Condizioni ondametriche imposte nel modello

Le condizioni ondametriche impiegate nello studio si riferiscono alle mareggiate caratteristiche definite in precedenza con riferimento al clima nel punto P (si rimanda a quanto descritto nel precedente paragrafo 1.2.5).

Condizioni anemometriche imposte nel modello

Le condizioni anemometriche, imposte come condizione di input nel modello idrodinamico, sono state individuate ricavando per ciascuna delle mareggiate analizzate una condizione anemometrica congrua con i valori di altezza d'onda e periodo di picco. In particolare, per la stima del vento congruo relativo a ciascuna mareggiata è stata utilizzata la correlazione proposta da Svedrup, Munk e Bertschneider (nota come "metodo SMB") che, nell'ipotesi di condizione di mare completamente sviluppato, associa i parametri della mareggiata (H_S,T_P) alla velocità del vento (U_A):

$$U_A = H_S^2 \times 929.5/T_p^3.$$

Le condizioni anemometriche sono state individuate considerando la velocità del vento a 10 m dal suolo (U), dove: $U=U_A^{(1/1.23)}/0.71$.

La direzione di provenienza del vento è stata assegnata pari quella di provenienza delle mareggiate al largo.

Condizioni di piena del Torrente Segno

Come anticipato, al fine di analizzare la dinamica dei sedimenti in uscita dal Torrente Segno sono stati analizzati alcuni scenari di eventi ondosi concomitanti con un evento di piena del torrente.

Nel dettaglio, è stato considerato un evento di piena definito da un idrogramma di piena ordinaria caratterizzato da una portata massima pari a circa 60 m^3/s (vedi Figura 1-20). Tale portata (cfr. portata "indice", Relazione idraulica del T. Segno, Giugno 2014) è, con buona approssimazione, la portata morfodinamicamente significativa in quanto in grado di riprodurre gli effetti morfodinamici degli eventi (idrogramma) di piena che, nel tempo, hanno condotto all'attuale configurazione del fondo alveo.

L'evento di piena è caratterizzato da una frequenza di accadimento piuttosto limitato, conseguentemente si è scelto di associare tale evento alle condizioni di moto ondoso (tra quelle simulate) che più probabilmente si possono verificare in concomitanza con la piena; si è quindi scelto di associare l'evento di piena alle mareggiate caratteristiche con frequenza media annua pari a 5 giorni/anno.

È stato inoltre possibile stimare la portata solida e la quantità di sedimenti che possono essere mobilitati e trasportati a mare da tale evento di piena: 400 m^3**.** Tale valore è stato stimato considerando gli effetti dei recenti incendi che hanno interessato alcune aree del bacino. Tale quantità di sedimenti risulta comunque solo parzialmente di interesse per l'analisi del trasporto solido litoraneo in quanto solo i sedimenti più fini sono in grado di essere mobilitati dalla dinamica litoranea. Sulla base delle analisi granulometriche si è infatti osservato che solo il 25% del materiale risulta essere di dimensione inferiore ai 2 mm.

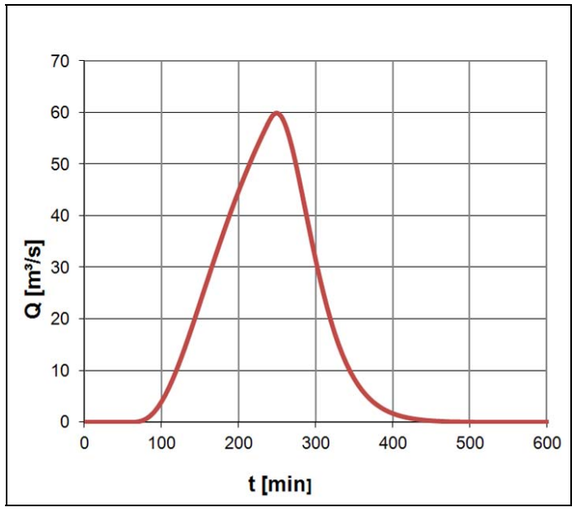


FIGURA 1-20 - IDROGRAMMA DI PIENA DELLA PORTATA "INDICE"

Dati sedimentologici

Ai fini dello studio della circolazione litoranea e del trasporto solido dei sedimenti che costituiscono la spiaggia sommersa sono state fornite in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sulla spiaggia sommersa (cfr precedente paragrafo 1.3.2). Nel caso specifico si è ottenuto un valore medio del D_{50} (diametro medio dei grani) pari a 0.20 mm (Tabella 1-4).

In definitiva sono state individuate 6 condizioni di input per lo studio su modello, costituite da 3 mareggiate caratterizzate da una frequenza pari a 1 giorno nell'anno medio e da 3 mareggiate caratterizzate da una frequenza pari a 5 giorni concomitanti a un evento di piena. Di seguito nella Tabella 1-6 si riportano sinteticamente le caratteristiche dei 6 test individuati.

TABELLA 1-6 - CONDIZIONI DI INPUT IMPOSTE NEI MODELLI

				CARATTERISTICHE NEL PUNTO P			VENTO	
TEST	**Mareggiate**	**Freq. (gg/anno)**	**T.Segno**	**H_S (m)**	**T_P (s)**	**Dir (°N)**	**Velocità (m/s)**	**Dir (°N)**
1	Levante	1	-	1.64	6.5	75	8.7	75
2	Scirocco	1	-	1.93	6.8	145	9.4	145
3	Mezzogiorno	1	-	2.22	7.8	185	11.8	195
4	Levante	5	piena	0.93	5.2	75	6.0	75
5	Scirocco	5	piena	1.17	5.6	145	6.8	145
6	Mezzogiorno	5	piena	1.61	6.8	185	9.5	195

1.4.5. Propagazione sottocosta delle mareggiate caratteristiche

I risultati ottenuti dalla propagazione del moto ondoso sottocosta in stato attuale, applicando il codice di calcolo CMS-Wave, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine seguenti (da Figura 1-21 a Figura 1-26).
Le figure rappresentano le altezze d'onda significativa, in termini di gradazione cromatica, mentre le direzioni locali dell'onda sono indicate mediante vettori il cui modulo è proporzionale all'altezza d'onda significativa.

I risultati delle propagazioni sottocosta mostrano che il campo di moto ondoso risulta influenzato principalmente dalla presenza del molo del porto di Vado, che offre al tratto di litorale oggetto di studio un certo grado di protezione dalle mareggiate di Scirocco e Mezzogiorno. Si osserva inoltre che la presenza della cuspide fociva del Torrente Quiliano e le diverse orientazioni della linea di riva lungo il litorale favoriscono la formazione di locali concentrazioni e dispersioni di energia.

Le mareggiate di Levante (TEST 1 e TEST 4) sono caratterizzate da una direzione di provenienza inclinata rispetto alla normale al litorale, conseguentemente risulta evidente (in particolare nel tratto a Nord) l'effetto della rifrazione (rotazione della mareggiata verso la normale) e l'abbattimento dell'altezza d'onda. Si può osservare che il tratto centrale del litorale (spiaggia in ghiaia tra area camper e T.Segno) risulta interessato da altezze d'onda sensibilmente maggiori (in particolare nel TEST1). Si osserva inoltre che l'effetto di protezione offerto dal molo del porto di Vado è limitato ad una porzione del tratto di litorale a Sud del T. Segno.

Le mareggiate di Scirocco (TEST 2 e TEST5), caratterizzate da direzioni poco inclinate rispetto alla normale al litorale, mostrano invece un minor abbattimento dell'altezza d'onda, mentre risulta piuttosto evidente l'effetto di protezione offerto dal molo del porto di Vadoche, per effetto della diffrazione, abbatte notevolmente le altezze d'onda nel tratto di litorale a Sud dell'area camper.

Le mareggiate di Mezzogiorno (TEST3 e TEST6) sono caratterizzate da direzione di provenienza quasi parallela al litorale, conseguentemente risulta ancora più evidente l'effetto della diffrazione dovuta alla presenza del molo del porto di Vado che abbatte l'altezza d'onda significativa a valori praticamente nulli in un tratto di litorale piuttosto esteso, che si estende verso Sud a partire dall'area camper.

Mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 1 giorno

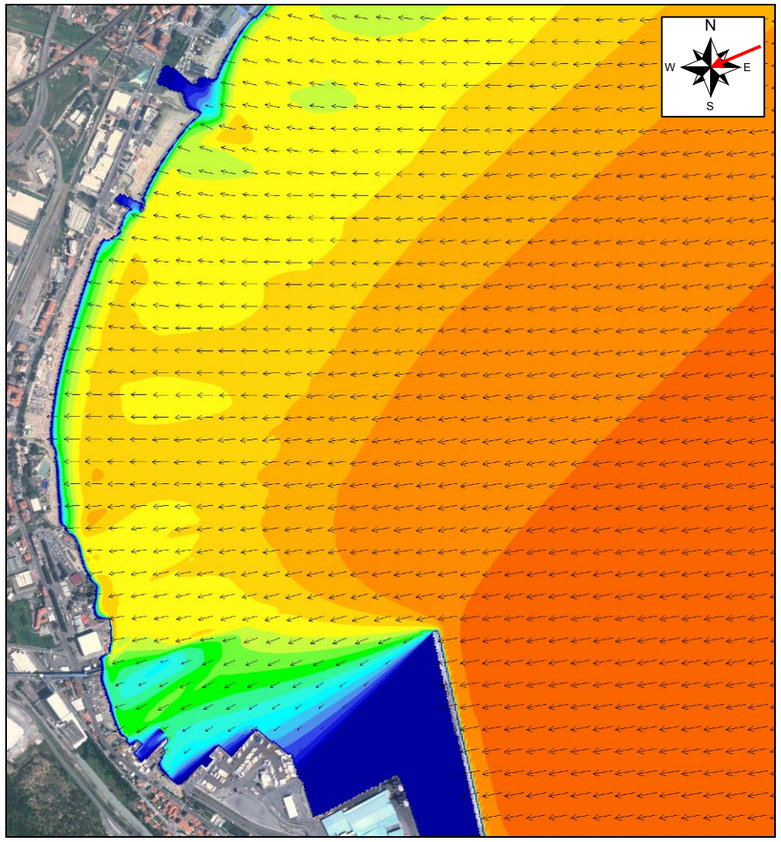


FIGURA 1-21 - TEST1 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
STATO ATTUALE
H_S = 1.64 M - T_P = 6.50 S - DIR = 75°N

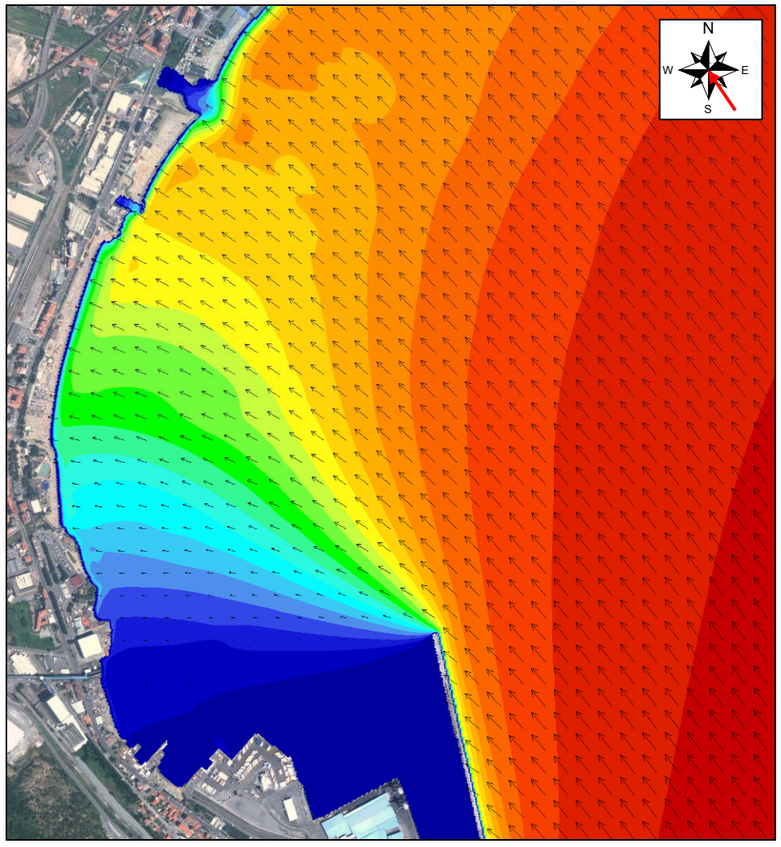


FIGURA 1-22 - TEST2 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
STATO ATTUALE
HS = 1.93 M - TP = 6.80 S - DIR = 145°N

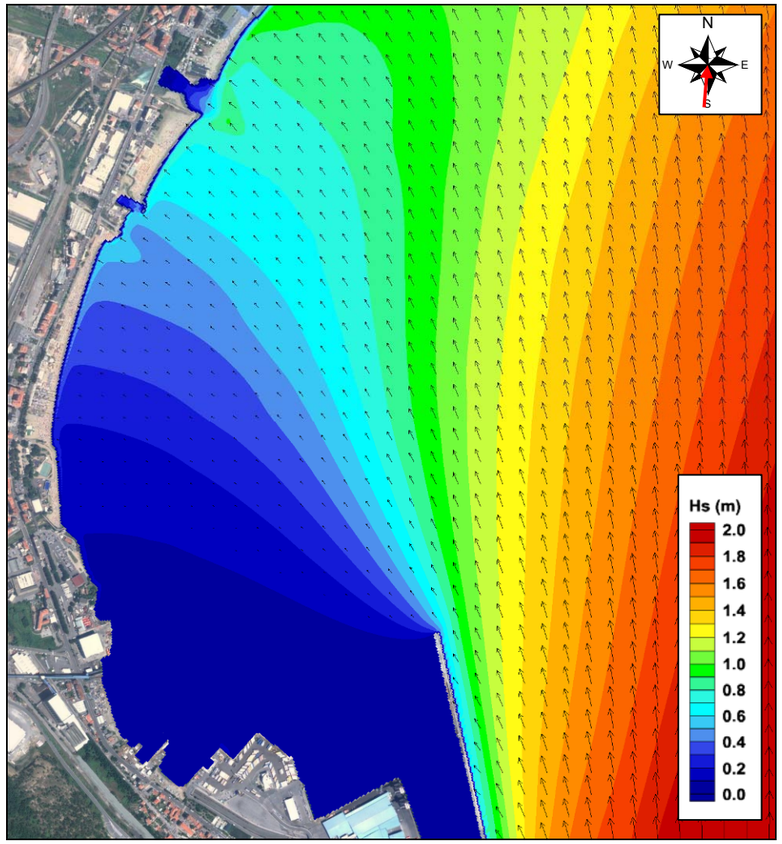


FIGURA 1-23 - TEST3 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
STATO ATTUALE
HS = 2.22 M - TP = 7.80 S - DIR = 185°N

Mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 5 giorni

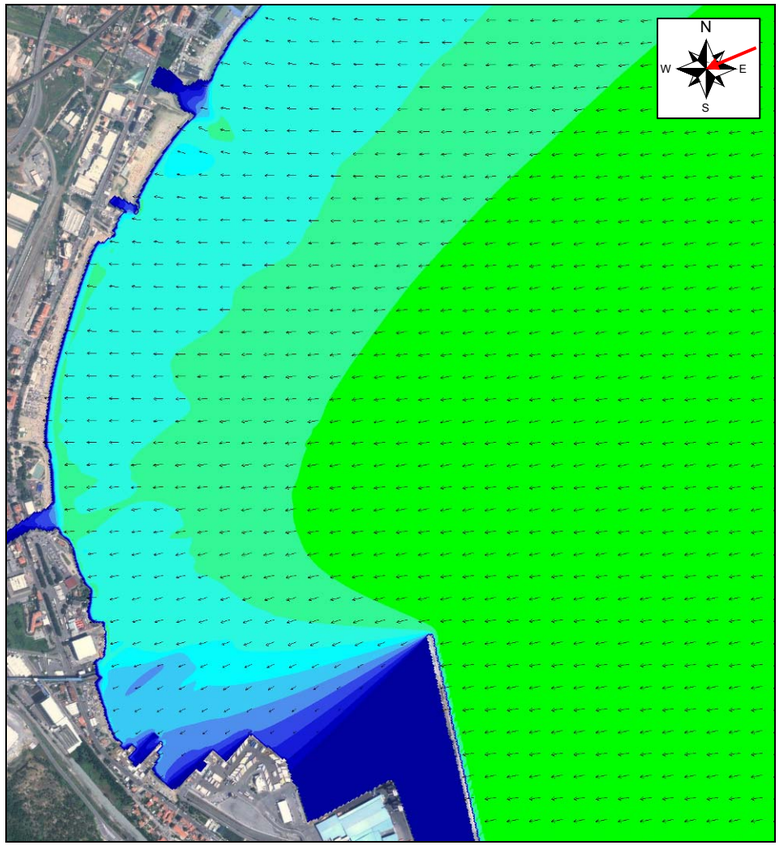


FIGURA 1-24 - TEST4 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
STATO ATTUALE
HS = 0.93 M - TP = 5.20 S - DIR = 75°N

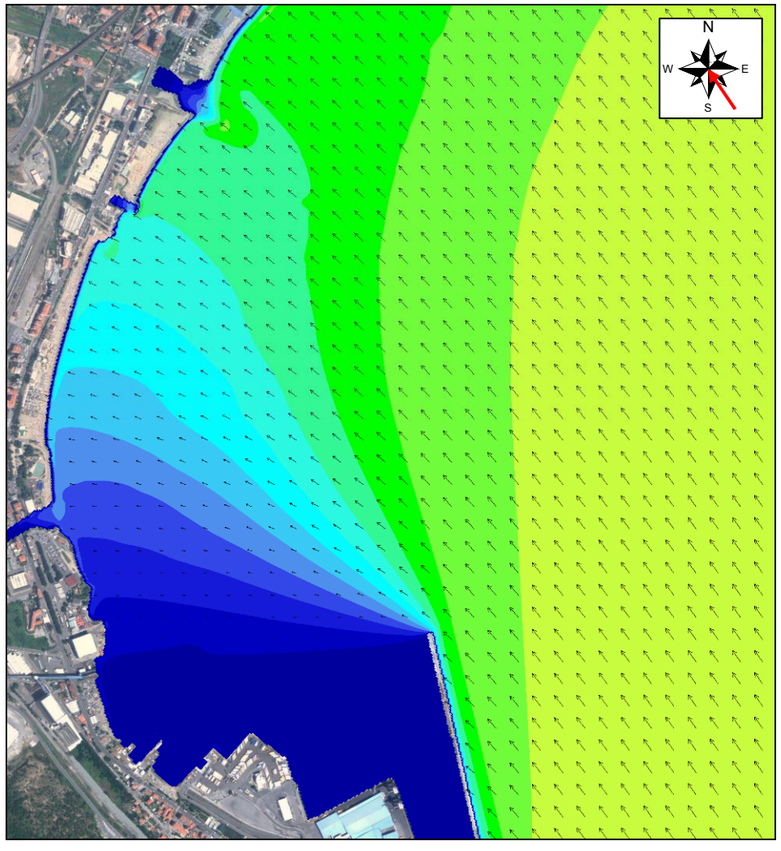


FIGURA 1-25 - TEST5 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
STATO ATTUALE
HS = 1.17 M - TP = 5.60 S - DIR = 145°N

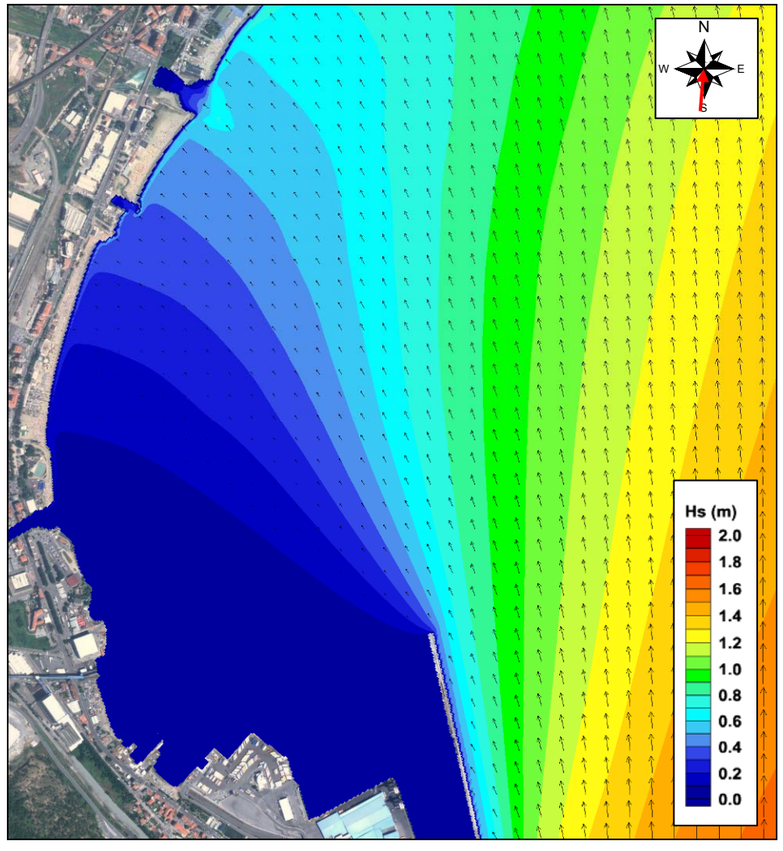


FIGURA 1-26 - TEST6 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
STATO ATTUALE
HS = 1.61 M - TP = 6.80 S - DIR = 185°N

1.4.6. Circolazioni costiere indotte dal moto ondoso

I risultati dello studio della circolazione costiera in stato attuale, condotto per mezzo del codice di calcolo CMS-Flow interfacciato con il codice di calcolo CMS-Wave appena descritto, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Figura 1-27 a Figura 1-32).

I risultati riportano in forma grafica le velocità medie della corrente generata dalle mareggiate (mediate sul profilo verticale): le velocità sono rappresentate in termini di gradazioni cromatiche, mentre la direzione locale della corrente viene indicata mediante vettori il cui modulo è proporzionale alla velocità stessa.

Di risultati ottenuti si può osservare che la circolazione idrodinamica risulta sostanzialmente influenzata dalle diverse orientazioni nei vari tratti del litorale e dalla presenza del molo del porto di Vado. In particolare, si può osservare che tali elementi favoriscono la locale formazione di inversioni e di distacchi localizzati della corrente.

La corrente che si sviluppa a seguito della mareggiata di Levante caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 1), genera nel tratto di litorale a Nord (tra la foce del Quiliano e l'area camper) una circolazione idrodinamica rilevante diretta verso Sud-Ovest. Procedendo verso Sud, oltre il cantiere nautico, la corrente subisce un sensibile smorzamento, per poi subire il distacco dal litorale nella zona centrale della spiaggia a causa delle locali correnti di direzione opposta che si formano invece nel tratto più a Sud. A sud della foce del T. Segno le correnti presentano direzione variabile, pur essendo mediamente dirette verso Nord.

L'idrodinamica che si sviluppa seguito della mareggiata di Scirocco con frequenza di 1g/anno (TEST 2) genera una circolazione meno intensa, caratterizzata nel tratto centrale del litorale da due correnti distinte: una più ridossata al litorale diretta verso Nord , e una diretta verso Sud, che si genera in corrispondenza del tratto di spiaggia di fronte all'area camper, che si porta poi rapidamente verso il largo.

Il campo di correnti che si osserva per la mareggiata di Mezzogiorno con frequenza di 1g/anno (TEST 3) risulta generato principalmente dall'azione del vento, in quanto, come osservato nelle pagine precedenti, la mareggiata giunge in prossimità del litorale con altezza d'onda praticamente nulla e non è in grado di forzare la circolazione idrodinamica. La corrente è diretta verso Nord-Est, risulta piuttosto debole e interessa sostanzialmente solo il tratto a Nord del litorale.

Le correnti generate dalle mareggiate con frequenza di 5 gg/anno confermano, con valori di velocità inferiori, le caratteristiche dei campi di corrente osservati per le mareggiate con frequenza 1g/anno.
In presenza della piena del T. Segno il campo delle correnti risulta comunque sostanzialmente influenzato dal flusso di piena in uscita che risulta diretto verso Sud-Est, per le mareggiate di Levante e Scirocco (TEST 4 e TEST 5), mentre risulta diretto verso Nord per la mareggiata di Libeccio (TEST 6).

Circolazioni costiere indotte da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 1 giorno

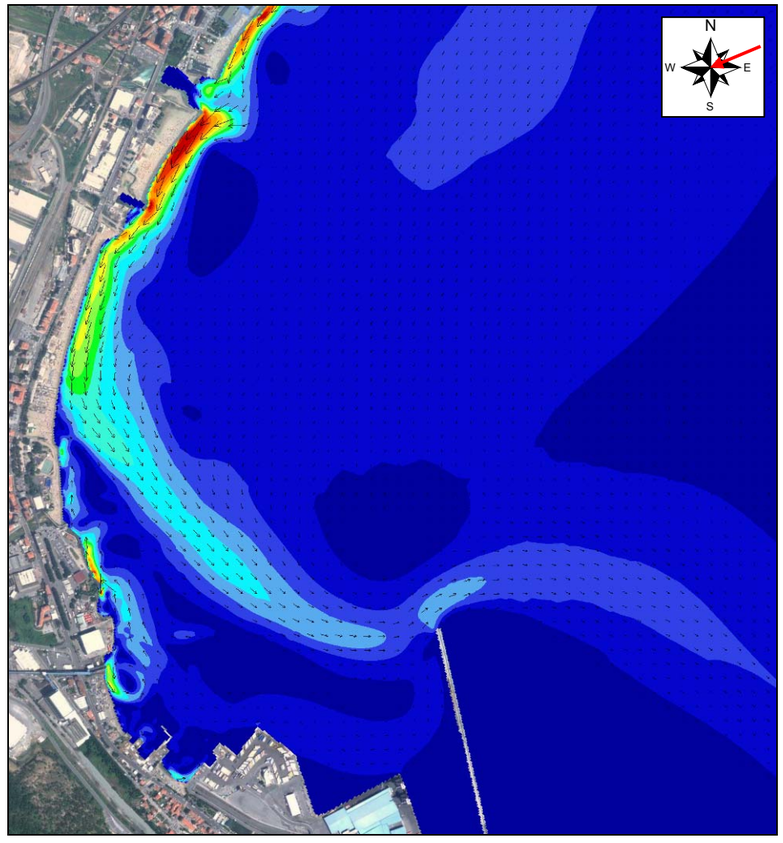


FIGURA 1-27 - TEST1 - CIRCOLAZIONE COSTIERA
STATO ATTUALE
HS = 1.64 M - TP = 6.50 S - DIR = 75°N

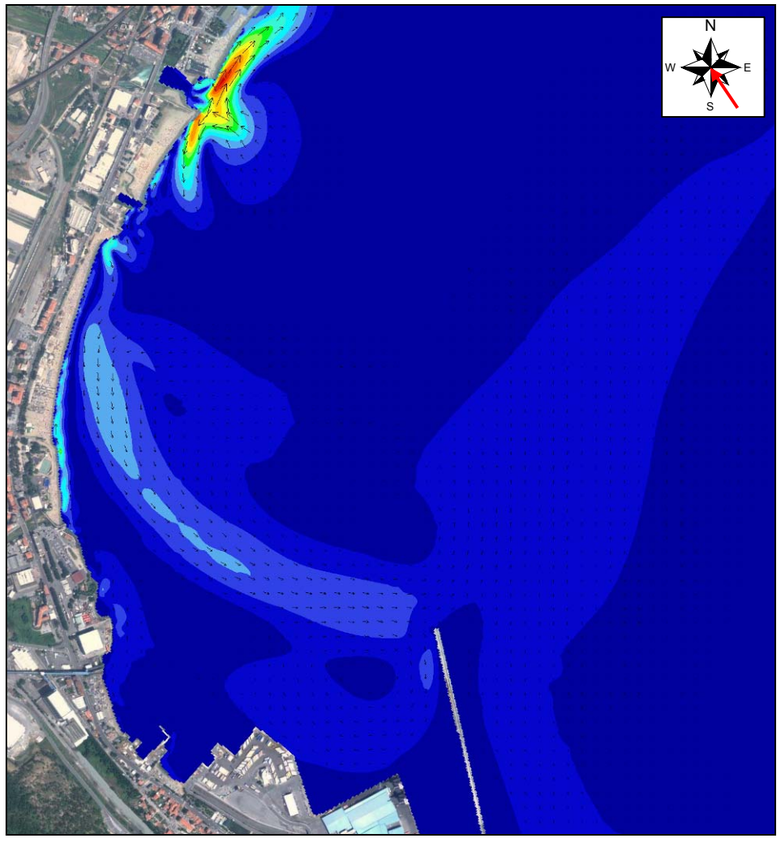


FIGURA 1-28 - TEST2 - CIRCOLAZIONE COSTIERA
STATO ATTUALE
HS = 1.93 M - TP = 6.80 S - DIR = 145°N

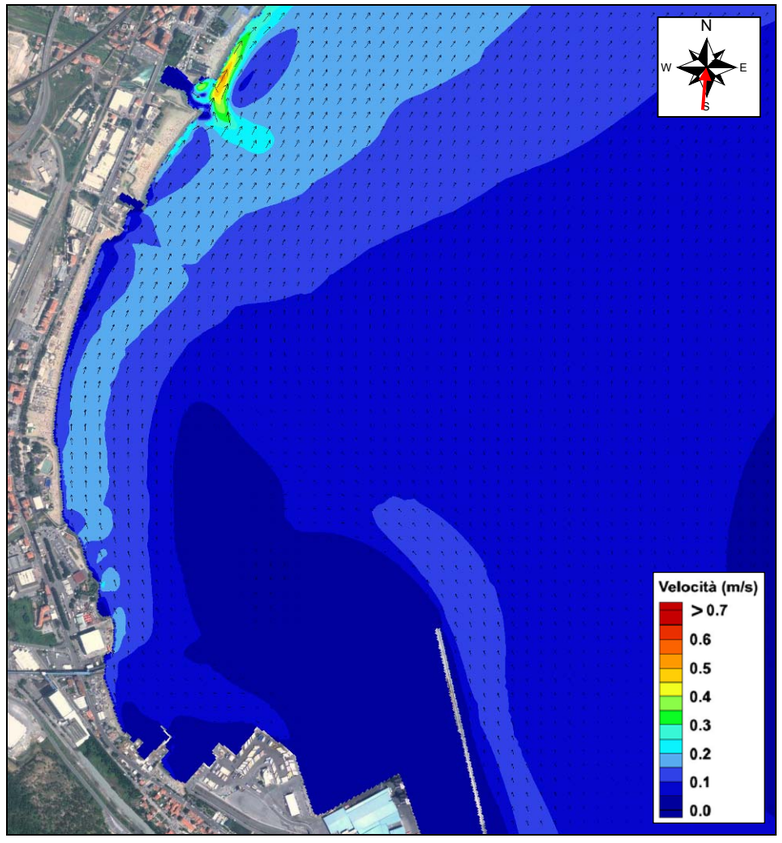


FIGURA 1-29 - TEST3 - CIRCOLAZIONE COSTIERA
STATO ATTUALE
HS = 2.22 M - TP = 7.80 S - DIR = 185°N

Circolazioni costiere indotte da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 5 giorni e piena del Torrente Segno concomitante

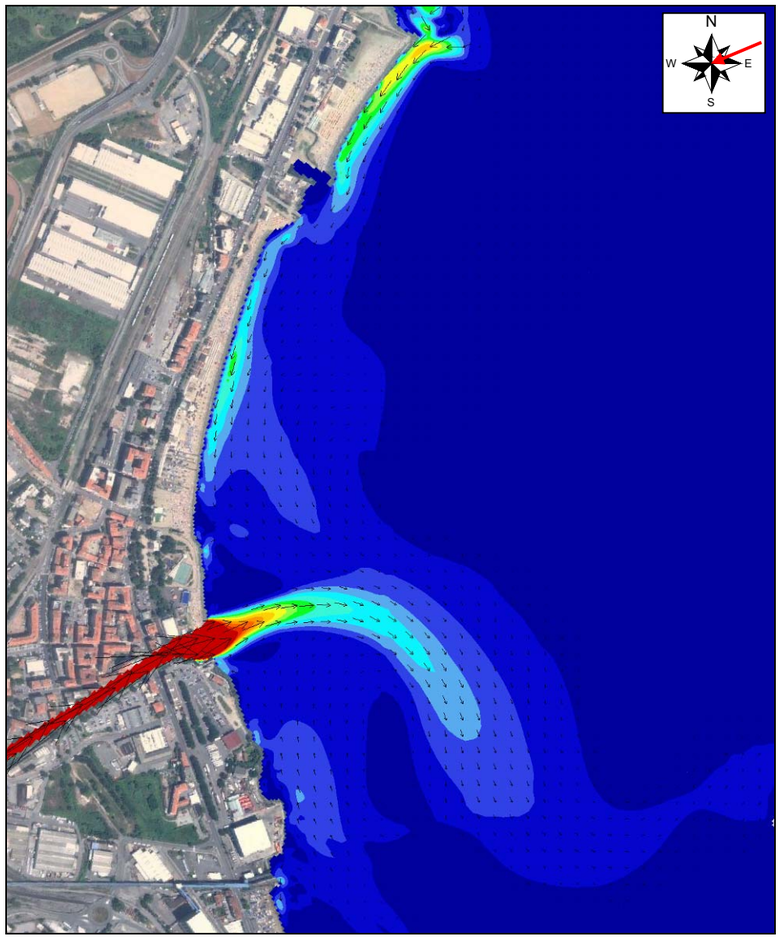


FIGURA 1-30 - TEST4 - CIRCOLAZIONE COSTIERA STATO ATTUALE
HS = 0.93 M - TP = 5.20 S - DIR = 75°N

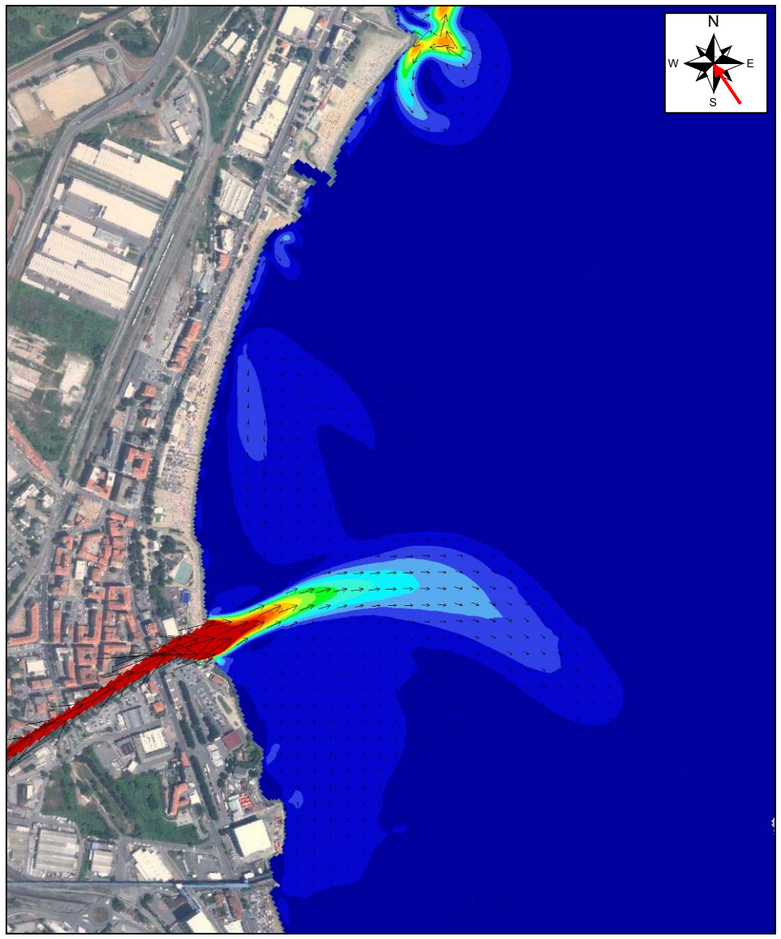


FIGURA 1-31 - TEST5 - CIRCOLAZIONE COSTIERA STATO ATTUALE
HS = 1.17 M - TP = 5.60 S - DIR = 145°N

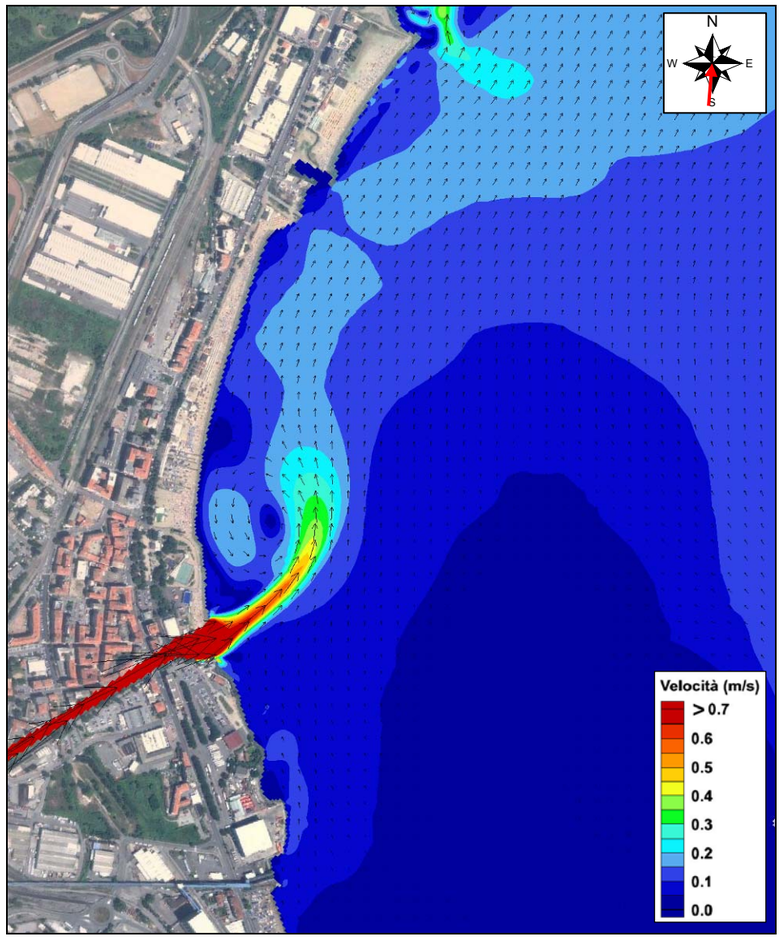


FIGURA 1-32 - TEST6 - CIRCOLAZIONE COSTIERA STATO ATTUALE
HS = 1.61 M - TP = 6.80 S - DIR = 185°N

1.4.7. Trasporto solido litoraneo

Utilizzando l'accoppiamento del codice di calcolo CMS-Flow con il codice di calcolo CMS-Wave, è stato inoltre condotto lo studio del trasporto solido litoraneo. I risultati sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Figura 1-33 a Figura 1-39). Per ciascuna delle mareggiate analizzate sono stati riportati i risultati che rappresentano, in termini di gradazioni cromatiche, l'andamento del trasporto e la quantità dei sedimenti mobilitati (concentrazione dei sedimenti messi in sospensione).

Da una analisi preliminare dei risultati si osserva che le zone più attive dal punto di vista della movimentazione dei sedimenti sono il tratto più a Nord del litorale e la zona di foce del Quiliano.

La mareggiata di Levante con frequenza di 1g/anno (TEST 1) genera nel tratto di litorale più a Nord compreso fino al cantiere nautico/area camper un significativo trasporto solido, diretto verso Sud-Ovest. Procedendo verso Sud, nel tratto di spiaggia compreso tra l'area camper e la spiaggia in ghiaia (zona centrale) si osserva una diminuzione della mobilitazione dei sedimenti, per effetto delle ridotte velocità della corrente. Nella zona di foce del Segno si osserva una modestissima mobilitazione di sedimenti, tendenzialmente da Sud verso Nord, fino a giungere ad un punto di convergenza con il trasporto proveniente da Nord all'estremità meridionale della spiaggia, indicativamente in corrispondenza della scogliera radente posta a protezione del campo da basket.

La mareggiata di Scirocco caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 2) genera un trasporto solido piuttosto ridotto, ad eccezione dell'area in prossimità della foce del Quiliano dove la demolizione della cuspide fociva determina una maggior mobilitazione dei sedimenti, che interessa comunque il solo tratto prossimo alla foce. A sud del Quiliano, il trasporto risulta caratterizzato da intensità molto ridotta, con direzione che localmente subisce anche inversioni. Nel complesso si osserva che nel tratto centrale il trasporto solido risulta diretto da Sud verso Nord e interessa una fascia di spiaggia sommersa piuttosto ridotta e piuttosto ridossata al litorale.

Per la mareggiata di Mezzogiorno caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 3) si osserva che non si genera una mobilitazione dei sedimenti significativa in tutto il tratto di litorale oggetto di interesse.

Per quanto riguarda la mobilitazione di sedimenti generata dalle mareggiate caratterizzate da frequenza maggiore (5gg/anno) si può osservare che risulta piuttosto ridotta e assume un certo rilievo solo per la mareggiata di Levante (TEST 4) che genera un trasporto solido diretto verso Sud.

Come anticipato, il modello è in grado di simulare i fenomeni di trasporto che interessano la fascia di spiaggia attiva sommersa e quindi i fenomeni di mobilitazione del materiale che compone il fondale, risultanti dalla combinazione degli effetti delle velocità orbitali indotte dal moto ondoso e della circolazione idrodinamica. Conseguentemente, per i test eseguiti in presenza dell'evento di piena si è scelto di valutare la dinamica del materiale in arrivo dal T. Segno, con caratteristiche analoghe a quello che compone il fondale e che è di interesse per lo studio del trasporto solido (0.2 mm). Al fine di fornire un confronto sulla dinamica dei sedimenti caratterizzati da granulometria più grossolana (maggiore di 0.2 mm), che rappresentano oltre il 90% del materiale in arrivo con l'evento di piena, sono state condotte due ulteriori simulazioni, per la sola mareggiata di Levante (TEST 4), con dimensione dei sedimenti rispettivamente pari a 2 e 3.5 mm. I risultati ottenuti per le 3 diverse granulometrie, messi tra loro a confronto sono riportati nella Figura 1-39. Si può osservare che per dimensioni dei sedimenti maggiori le quantità di materiale mobilitato e in grado di essere trasportato oltre la foce del T. Segno risultano molto ridotte.
Dai risultati dei test eseguiti con granulometria pari a 0.2 mm si può osservare che l'evento di piena è in grado di mobilitare una notevole quantità di materiale lungo l'asta fluviale generando un intenso trasporto di materiale fino alla foce. Poco oltre la foce si osserva, per tutte i test eseguiti, una rapida diminuzione di intensità: il materiale sedimenta entro breve distanza dalla foce. Si può quindi osservare che il trasporto alla foce non risulta sostanzialmente dalla direzione assunta dalla direzione della corrente litoranea forzata dalle concomitanti mareggiate e. Si ricorda che il materiale mobilitato dalla piena è caratterizzato da granulometrie variabili e solo in mi-

nima parte costituito da sedimenti di dimensioni uguali o inferiori ai 0.2 mm. Conseguentemente, si può considerare che tali simulazioni mostrino una mobilitazione potenziale dei sedimenti. L'ipotesi che la quantità di materiale caratterizzato da granulometria fine in arrivo dal T. Segno non sia elevata è inoltre confermata dal fatto che, nella realtà, non si osservano depositi di materiale di fronte alla foce del torrente.

Trasporto solido litoraneo indotto da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 1 giorno

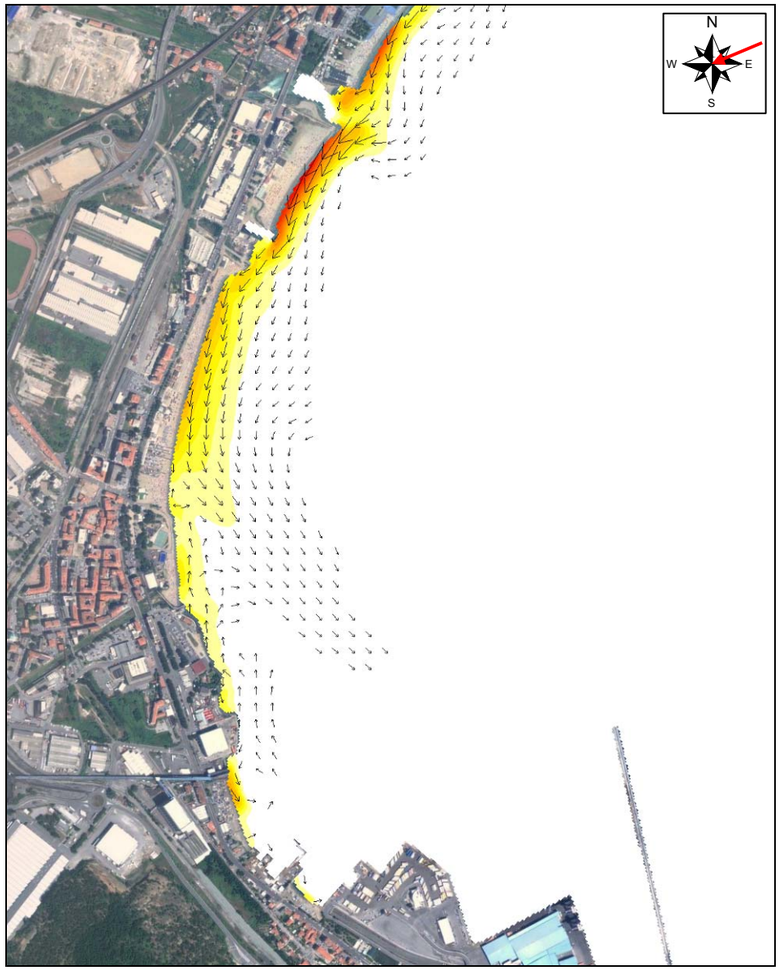


FIGURA 1-33 - TEST1 - TRASPORTO SOLIDO
STATO ATTUALE
H_S = 1.64 M - T_P = 6.50 S - DIR = 75°N

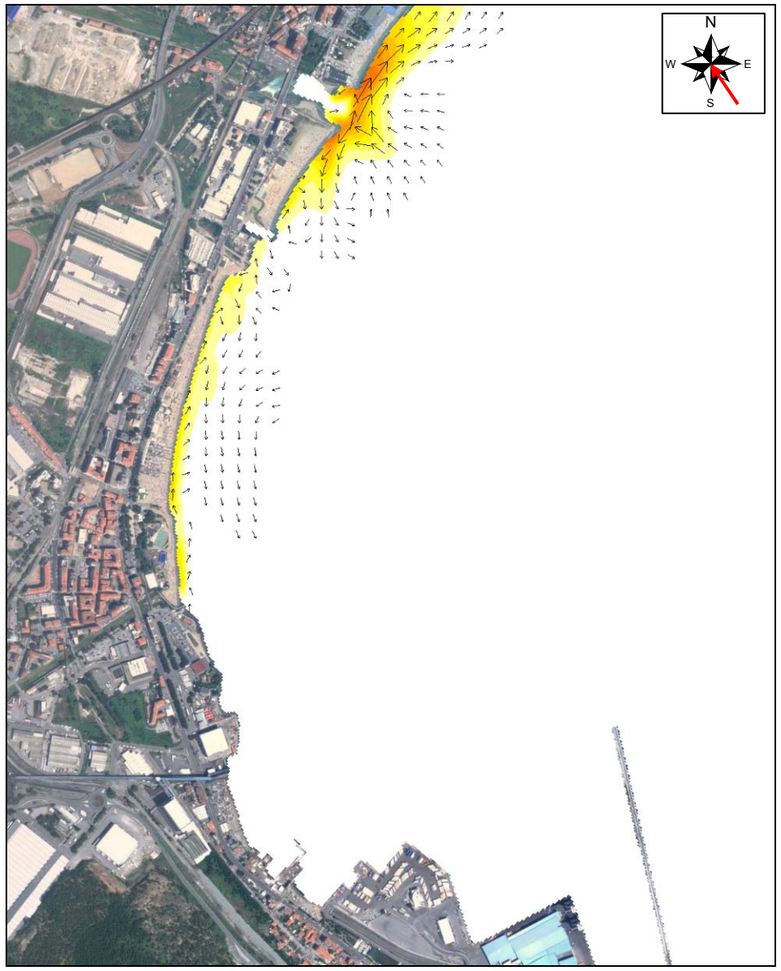


FIGURA 1-34 - TEST2 - TRASPORTO SOLIDO
STATO ATTUALE
H_S = 1.93 M - T_P = 6.80 S - DIR = 145°N

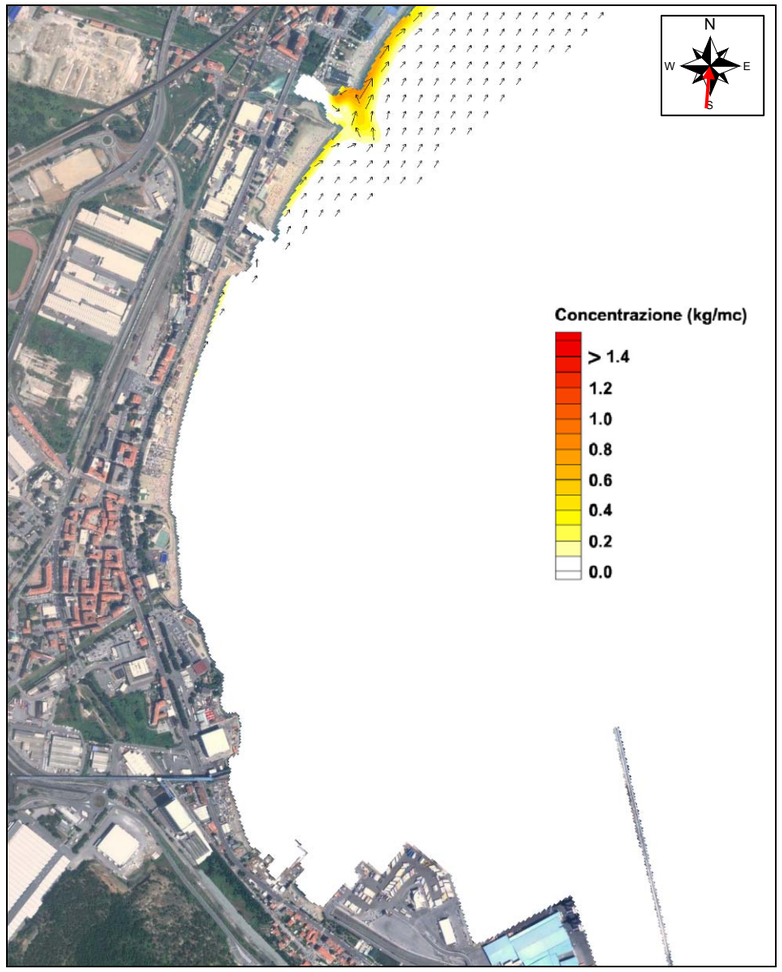


FIGURA 1-35 - TEST3 - TRASPORTO SOLIDO
STATO ATTUALE
H_S = 2.22 M - T_P = 7.80 S - DIR = 185°N

Trasporto solido litoraneo indotto da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 5 giorni e piena del Torrente Segno concomitante

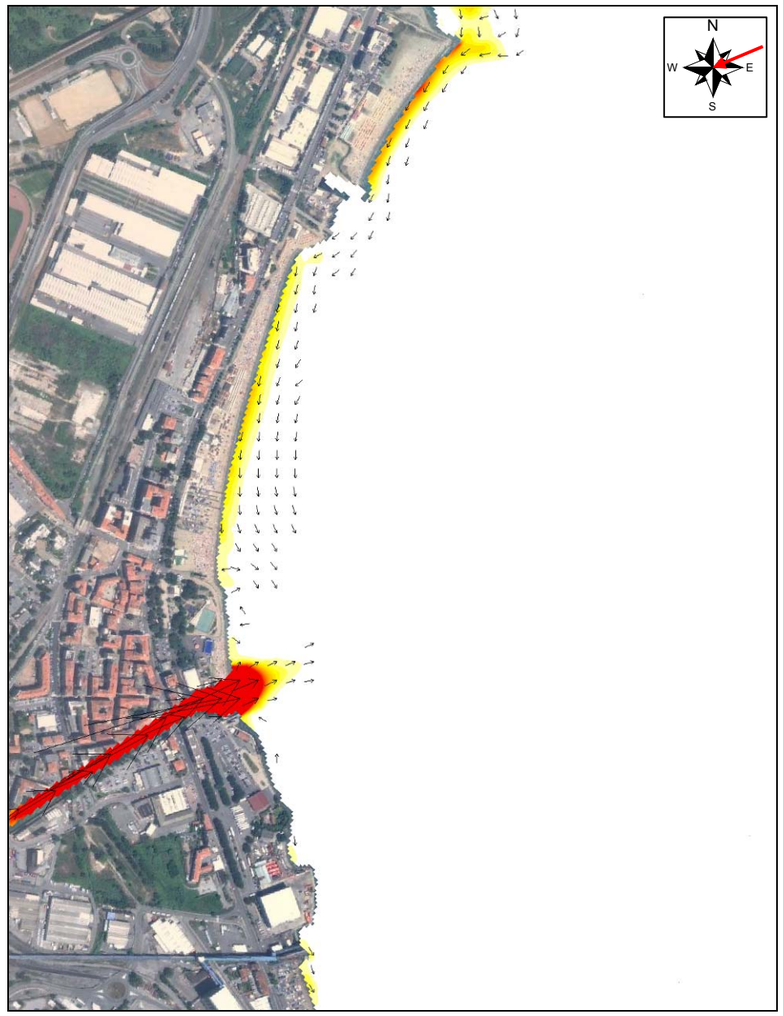


FIGURA 1-36 - TEST4 - TRASPORTO SOLIDO
STATO ATTUALE
H_S = 0.93 M - T_P = 5.20 S - DIR = 75°N

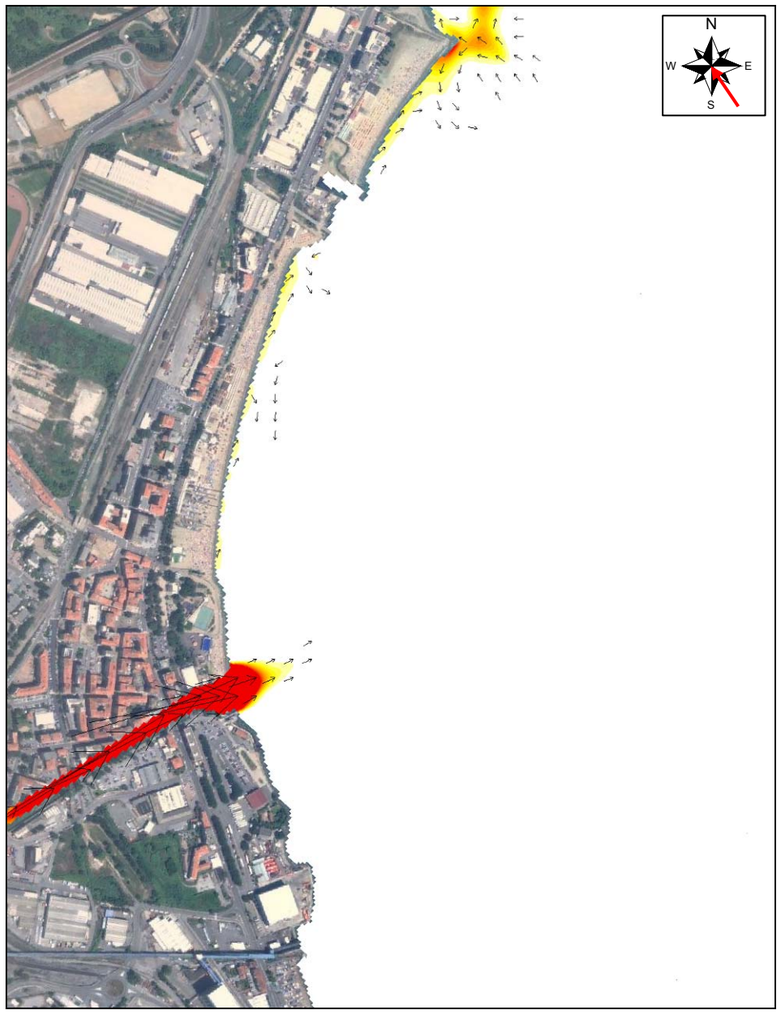


FIGURA 1-37 - TEST5 - TRASPORTO SOLIDO
STATO ATTUALE
H_S = 1.17 M - T_P = 5.60 S - DIR = 145°N

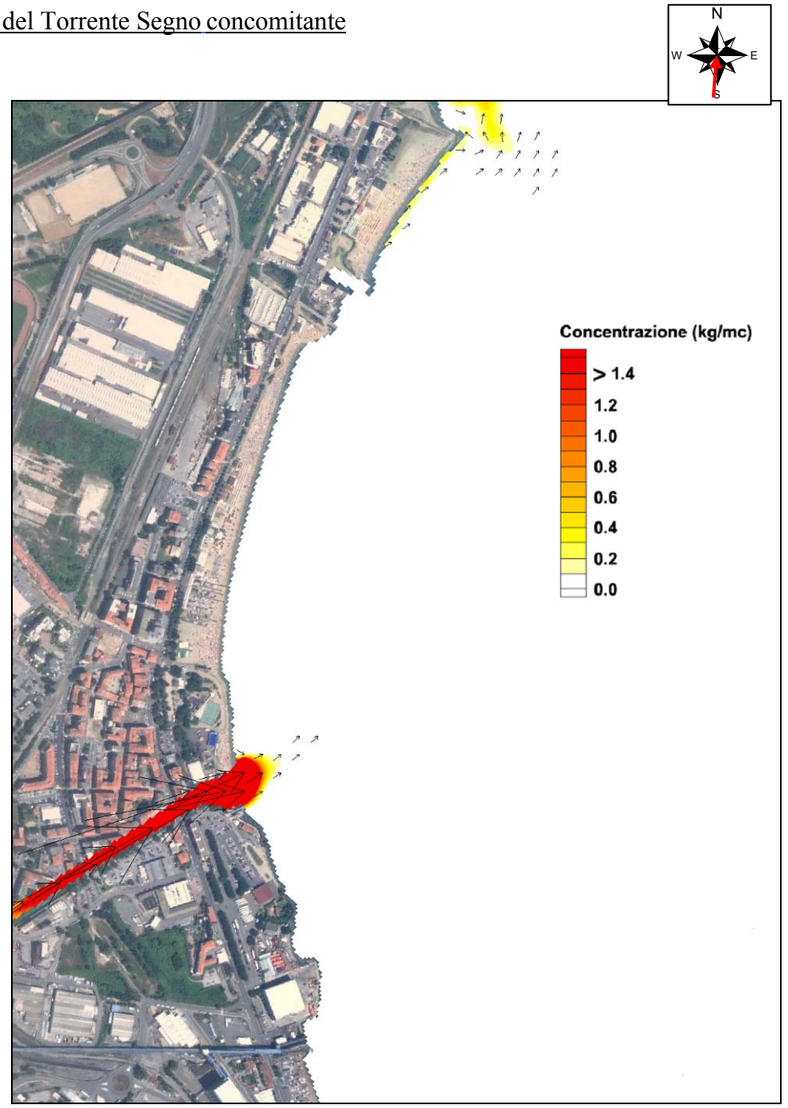


FIGURA 1-38 - TEST6 - TRASPORTO SOLIDO
STATO ATTUALE
H_S = 1.61 M - T_P = 6.80 S - DIR = 185°N

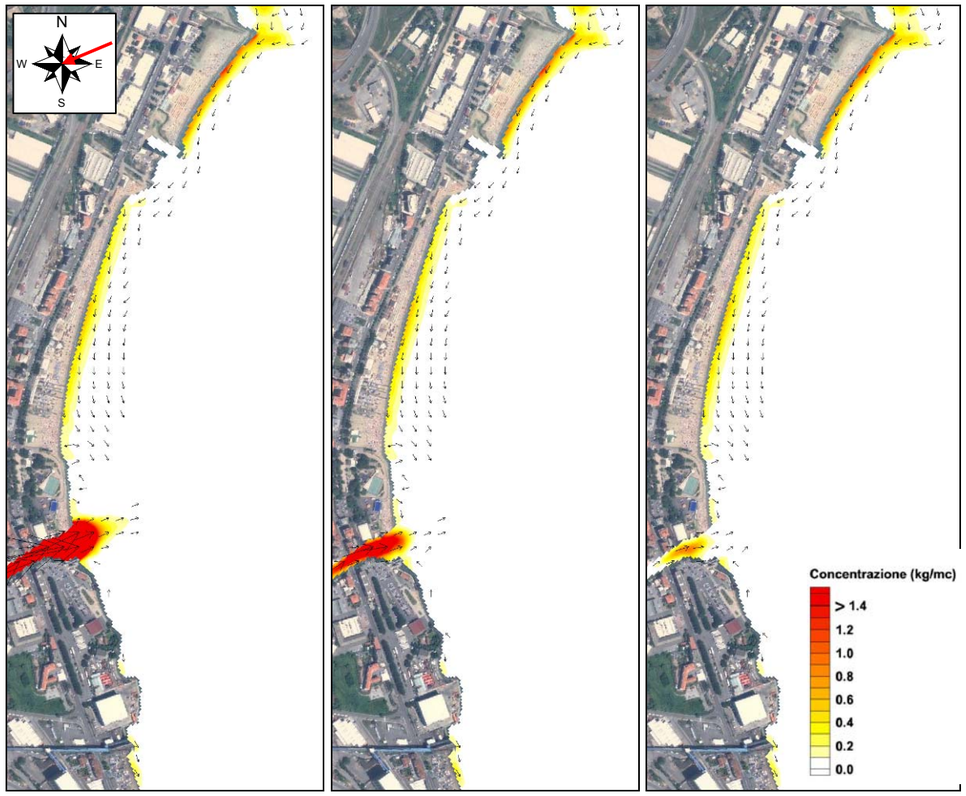


FIGURA 1-39 - TEST4 - TRASPORTO SOLIDO IN STATO ATTUALE CONFRONTO RISULTATI PER DIVERSI DIAMETRI (0.2 MM A SINISTRA, 2 MM AL CENTRO E 3.5 MM A DESTRA)

1.4.8. Evoluzione del fondale

Per ciascuna delle mareggiate precedentemente analizzate sono stati ricavati i risultati, attraverso il codice di calcolo CMS-Flow, in termini di evoluzione del fondale. I risultati forniscono una indicazione sulla tendenza alla sedimentazione e all'erosione e rappresentano sostanzialmente la tendenza evolutiva della fascia di spiaggia attiva sommersa. I risultati si riferiscono alle tendenze sviluppate dalla persistenza delle mareggiate per una durata pari a 12 ore, in condizioni stazionarie, per i TEST 1, 2, e 3, mentre si riferiscono alla durata complessiva dell'evento di piena per i TEST 4, 5 e 6.

I risultati sono riportati nelle figure riportate nelle successive pagine (da Figura 1-41 a Figura 1-46) e rappresentano, in termini di gradazioni cromatiche, le aree tendenzialmente soggette a erosione (valori negativi, blu) e quelle tendenzialmente soggette a deposizione (valori positivi, rossi).

I risultati in termini di trasporto solido (analizzati nelle pagine precedenti) hanno sostanzialmente confermato l'attuale tendenza del litorale che è soggetto ad una mobilitazione di sedimenti da Nord verso Sud. In termini di tendenza evolutiva questo si traduce in una migrazione dei sedimenti dalla zona Nord (in erosione) verso la zona Sud (accrescimento).

Per la mareggiata di Levante con frequenza di 1g/anno (TEST 1) i risultati ottenuti confermano l'attuale tendenza della spiaggia compresa tra il l'area camper e la scogliera radente a protezione del campo di basket; si osserva infatti che, nel tratto Nord della spiaggia, in particolare in prossimità dell'area camper sono presenti aree soggette ad erosione, mentre nel tratto Sud si osservano aree soggette a deposizione. Più a Sud, in prossimità della foce del Segno, si rilevano trascurabili variazioni del fondale, caratterizzate da debole erosione davanti alla foce e corrispondente deposizione poco a Nord della stessa.
Nella zona di foce del Quiliano si osserva una significativa erosione, associata alla demolizione della cuspide fociva, che ha come conseguenza la presenza di fenomeni deposizionali nel tratto di litorale immediatamente a Sud, tra la foce e l'inizio della spiaggia (area camper).

Anche per la mareggiata di Scirocco caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 2), anche se in misura molto inferiore, si osserva la tendenza all'erosione del tratto di spiaggia di fronte all'area camper.
Nella configurazione attuale, nel tratto meridionale della spiaggia (verso il Segno), si osserva una debole tendenza all'erosione dell'area a Nord del Segno a favore della zona centrale del litorale. Tale tendenza risulta comunque piuttosto limitata, anche in

relazione alla effettiva disponibilità di sedimenti nell'area: non si ravvisano, infatti, attualmente quantità rilevanti di materiale provenienti dal Segno che possano essere trasportati dall'area della foce verso Nord.

Per la Mareggiata di Libeccio con frequenza di 1g/anno (TEST 3) dai risultati ottenuti si rileva una sostanziale assenza di variazioni rilevanti del fondale su tutto il tratto di interesse.

Le simulazioni eseguite con la piena del Segno mostrano che i sedimenti provenienti dal torrente non vengono trasportati a grandi distanze dalla foce, ma vengono depositati nei pressi della stessa, comportando un locale accumulo. Si sottolinea nuovamente che, considerata la dimensione del materiale impiegato nella simulazione (0.2 mm), tali esiti rappresentano un risultato potenziale; nella realtà, attualmente non si osservano importanti deposizioni nei pressi della foce, e si può dedurre che le quantità di materiale fine trasportate dal Segno siano in realtà molto limitate.

Tali conclusioni vengono confermate dal confronto dei risultati ottenuti per il TEST 4 per le 3 diverse granulometrie (vedi successiva Figura 1-40), che mostrano tendenze deposizionali ancora più ridotte, in termini di distanza dalla foce, per le granulometrie maggiori.

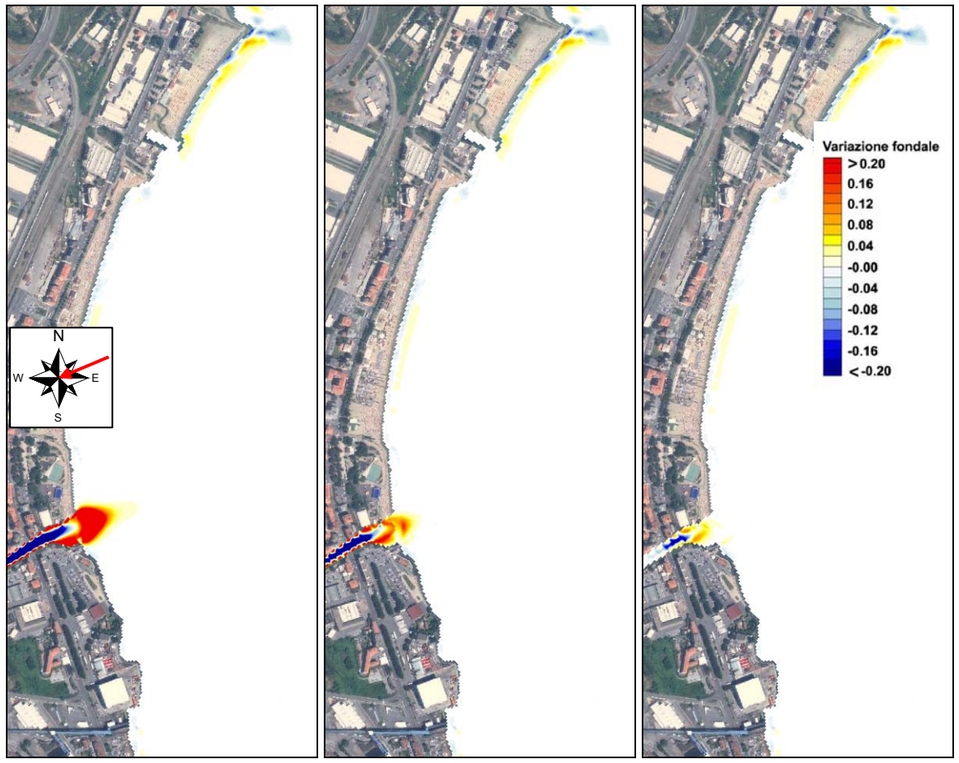


FIGURA 1-40 - TEST4 - EVOLUZIONE FONDALE IN STATO ATTUALE CONFRONTO RISULTATI PER DIVERSI DIAMETRI (0.2 MM A SINISTRA, 2 MM AL CENTRO E 3.5 MM A DESTRA)

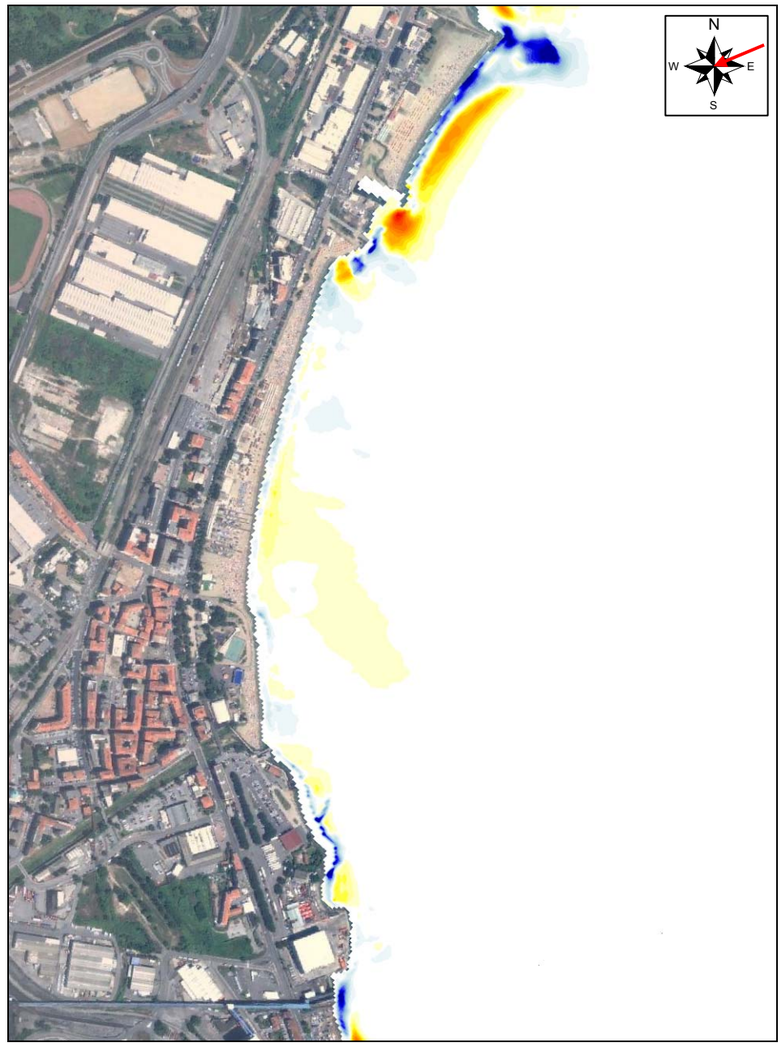


FIGURA 1-41 - TEST1 - EVOLUZIONE FONDALE
STATO ATTUALE
H_S = 1.64 M - T_P = 6.50 S - DIR = 75°N



FIGURA 1-42 - TEST2 - EVOLUZIONE FONDALE
STATO ATTUALE
HS = 1.93 M - TP = 6.80 S - DIR = 145°N

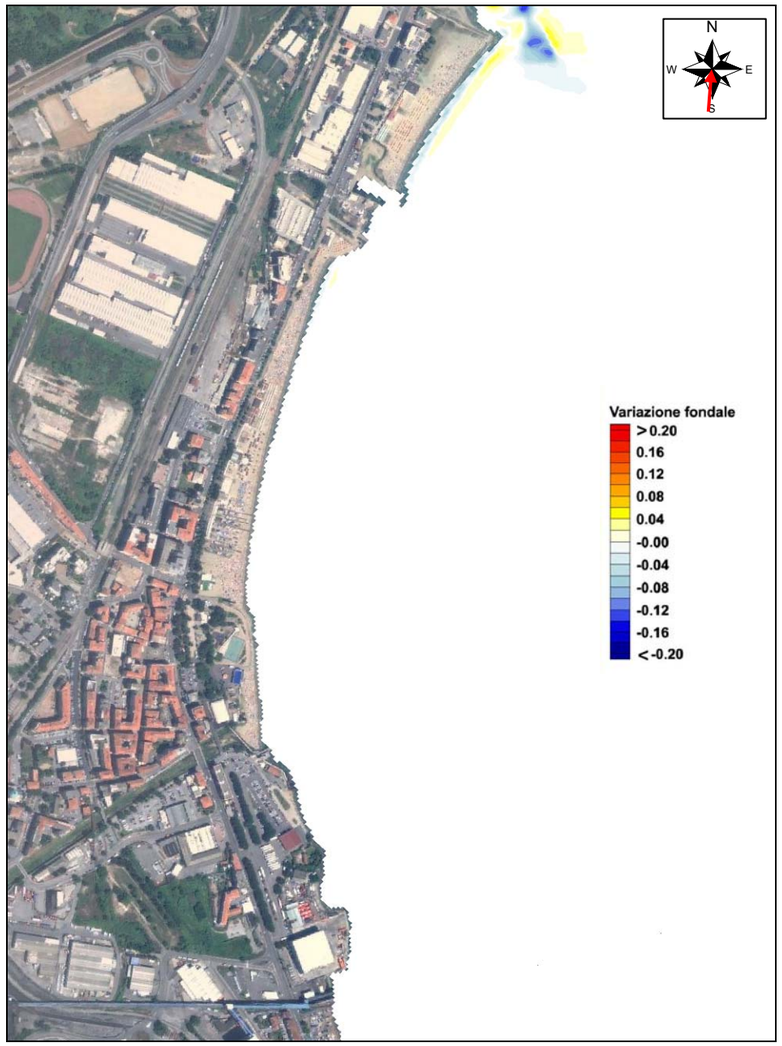


FIGURA 1-43 - TEST3 - EVOLUZIONE FONDALE
STATO ATTUALE
H_S = 2.22 M - T_P = 7.80 S - DIR = 185°N

Trasporto solido litoraneo indotto da mareggiate caratterizzate da frequenza media annua pari a 5 giorni e piena del Torrente Segno concomitante

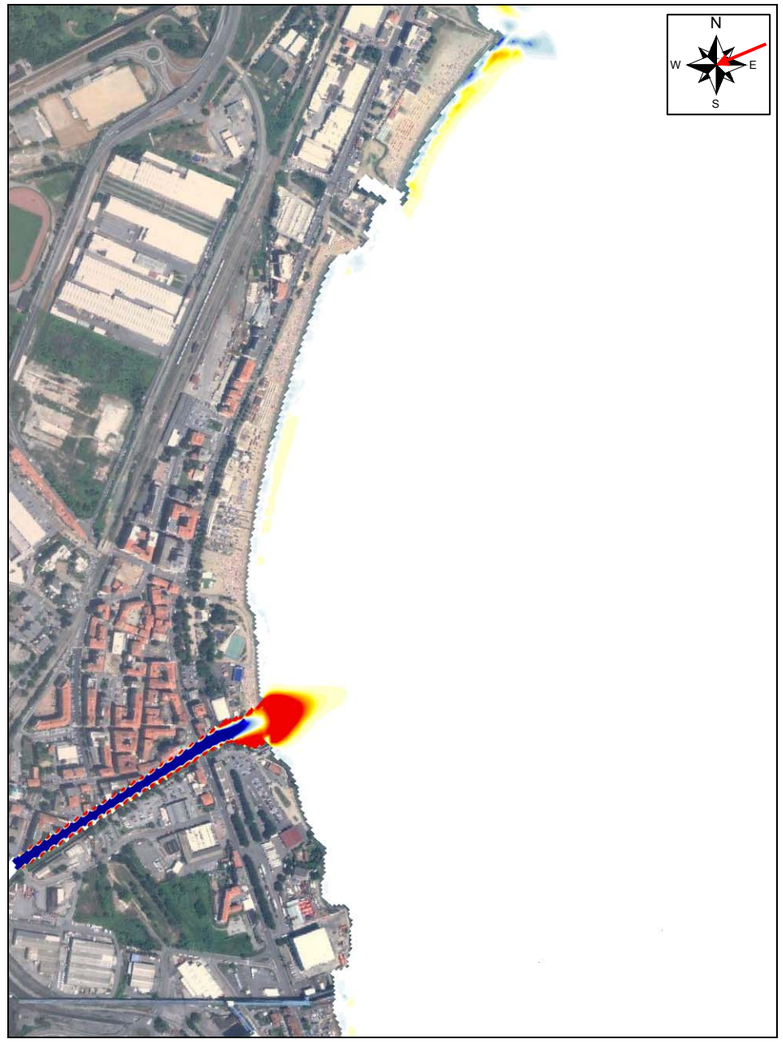


FIGURA 1-44 - TEST4 - EVOLUZIONE FONDALE
STATO ATTUALE
H_S = 0.93 M - T_P = 5.20 S - DIR = 75°N

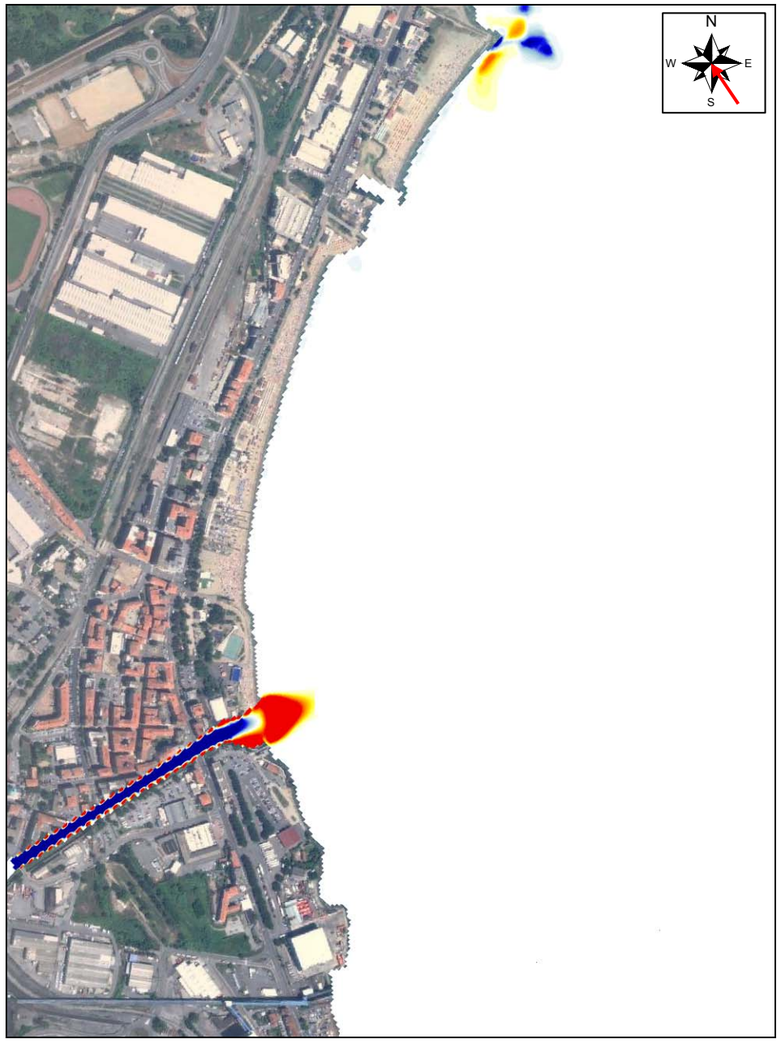


FIGURA 1-45 - TEST5 - EVOLUZIONE FONDALE
STATO ATTUALE
H_S = 1.17 M - T_P = 5.60 S - DIR = 145°N

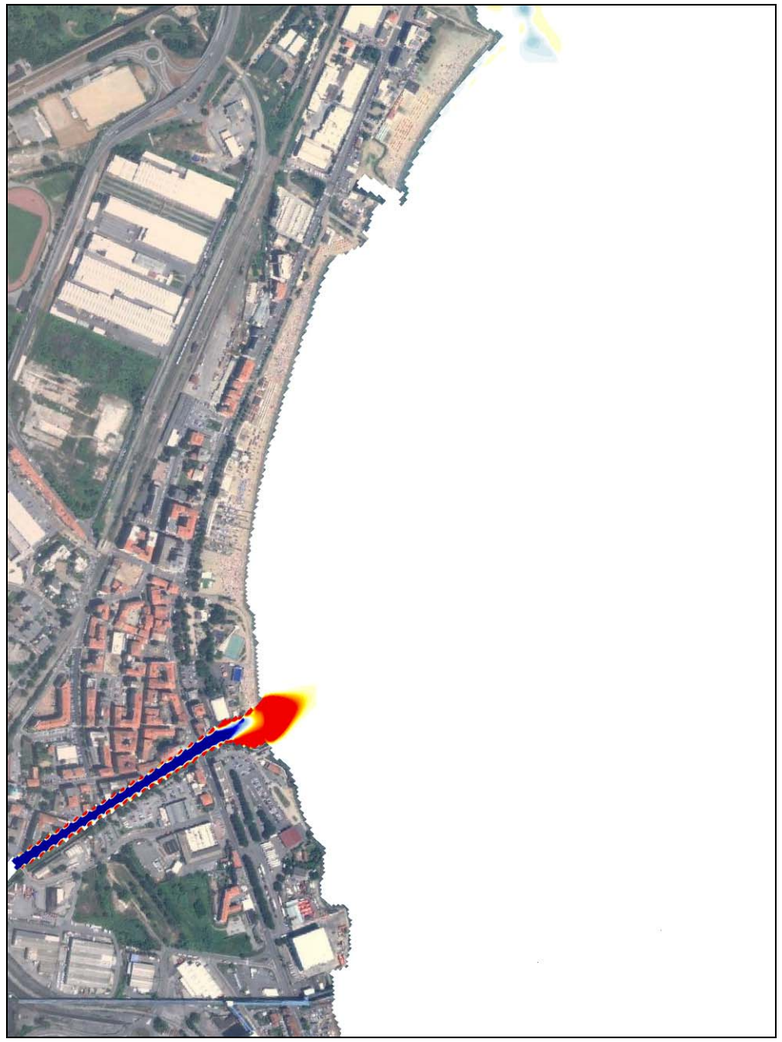


FIGURA 1-46 - TEST6 - EVOLUZIONE FONDALE
STATO ATTUALE
H_S = 1.61 M - T_P = 6.80 S - DIR = 185°N

1.5. Taratura del modello di evoluzione morfologica

Lo studio morfologico dell'evoluzione della Spiaggia di Vado Ligure (SV) è stato condotto mediante l'utilizzo del codici di calcolo STWAVE e GENESIS, sviluppati dal centro di ricerca americano C.E.R.C. (U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center). Per la definizione del dominio di calcolo sono stati utilizzati come base i più recenti rilievi locali disponibili: rilievo di agosto 2008 che copre il tratto che va dal Porto di Vado fino al terrapieno del campo da calcio (fino a profondità maggiori di -55 m s.m.m.) e rilievo di aprile 2010 che copre il tratto di litorale compreso tra il pontile Esso e il pontile Chevron (fino a profondità comprese tra -6.5 e -9.0 m s.m.m.).

Inizialmente si è proceduto con una fase di taratura del modello e successivamente, una volta individuati i valori più idonei per le costanti di taratura (K1 e K2), sono state eseguite le simulazioni di evoluzione in stato attuale e nelle varie configurazioni progettuali previste nel presente Studio di Impatto Ambientale e riportate nei precedenti paragrafi.

La fase di taratura permette di adattare il modello matematico alla situazione del paraggio oggetto di studio (il modello, infatti, interpreta la realtà fisica in maniera semplificata), tenendo conto qualitativamente dei principali fenomeni che governano l'evoluzione morfologica della costa.

L'operazione di taratura consente, pertanto, di tenere conto in maniera implicita di tutti i fattori non direttamente esplicitabili sotto la forma di relazioni causa-effetto. Il principale obiettivo della taratura è la determinazione dei coefficienti K1 e K2, che correggono la formula del CERC (1984), esprimente la relazione tra trasporto solido e flusso di energia in direzione parallela alla riva.

Ai fini della modellazione matematica, è stato individuato un dominio di calcolo idoneo per il sito in esame, schematizzando opportunamente (come in seguito specificato) le singolarità presenti.

Il codice di calcolo STWAVE è descritto nel precedente paragrafo 1.2.1, mentre il codice di calcolo GENESIS è descritto nel successivo paragrafo 1.5.1

1.5.1. Descrizione del codice di calcolo GENESIS

Il modello matematico "GENESIS" (GENEralized model for SImulating Shoreline change), impiegato per lo studio dell'evoluzione morfologica del litorale in oggetto, è in grado di calcolare le modificazioni subite dalla linea di riva in conseguenza di variazioni nello spazio o nel tempo del trasporto solido litoraneo in direzione parallela alla linea di riva indotto dall'azione del moto ondoso.
L'estensione costiera che può essere convenientemente modellata può variare da meno di un chilometro a qualche decina di chilometri, mentre gli intervalli di calcolo delle variazioni della posizione della linea di riva variano in genere da alcuni mesi alle decine di anni.
Il modulo di calcolo che determina lo spostamento della linea di riva in funzione del trasporto solido e della sua variazione nello spazio, è basato sulla teoria dei modelli a una linea: tale teoria assume che il profilo trasversale della spiaggia (in direzione quindi perpendicolare alla linea di riva) si mantenga costante nel tempo, traslando semplicemente verso il largo o verso terra (Figura 1-47).

In questo modo, l'evoluzione del profilo completo della spiaggia può essere descritta attraverso la traslazione orizzontale di un unico punto appartenente al profilo stesso.
Nelle suddette ipotesi, è quindi possibile descrivere l'evoluzione del litorale attraverso una unica linea: a tale scopo appare conveniente scegliere come riferimento la linea cui appartengono tutti i punti che si trovano alla quota del medio mare (cioè la linea di riva), che risulta sempre un indicatore di primaria importanza negli studi di idraulica marittima.
Una seconda ipotesi geometrica fondamentale assunta dal modello è che il trasporto solido indotto dal moto ondoso avvenga tra due quote fissate all'interno del profilo trasversale: si assume cioè che la zona "attiva" della spiaggia, ossia quella interessata dal trasporto solido longitudinale, e dalle modificazioni ad essa connesse, sia solamente quella compresa tra la massima quota D_B della spiaggia attiva emersa (di solito assunta pari alla quota di massima risalita) e la cosiddetta "profondità di chiusura" D_C, al disotto della quale il fondale si mantiene sensibilmente costante nel tempo

(nel medio termine). Come accennato in precedenza questi ultimi valori sono determinabili in funzione delle caratteristiche del moto ondoso incidente.

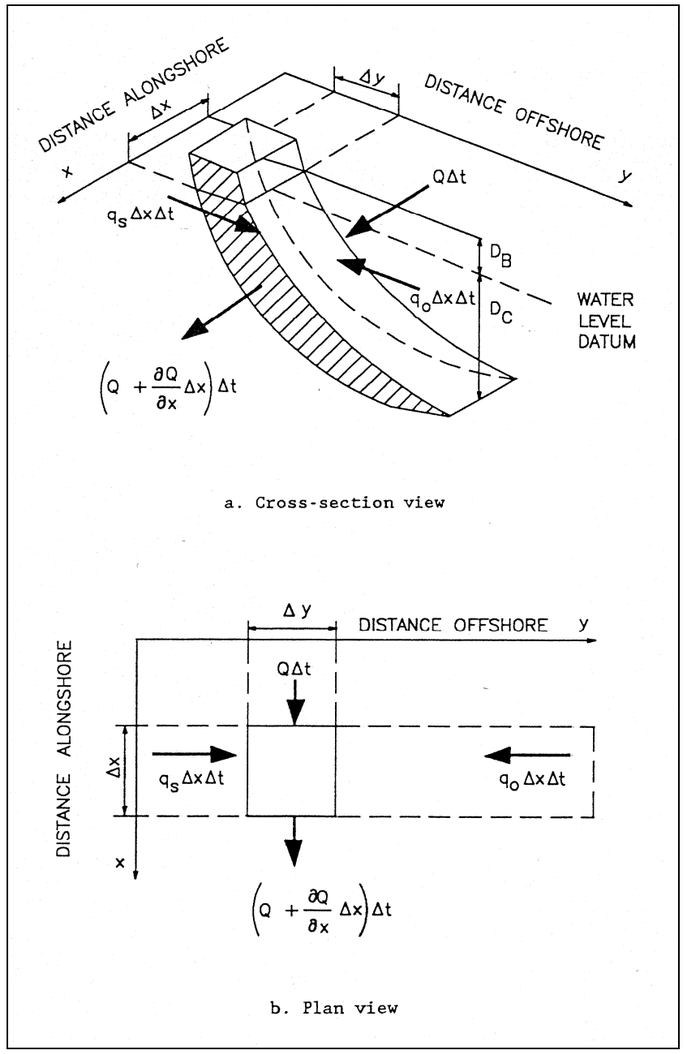


FIGURA 1-47 - SCHEMATIZZAZIONE DEL LITORALE

L'equazione di continuità dei sedimenti in una generica sezione, con riferimento al significato dei simboli indicato in Figura 1-47, può essere scritta nella forma seguente:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)}\left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q\right) = 0 \qquad (1)$$

dove Q rappresenta il trasporto solido longitudinale e q la quantità di materiale eventualmente apportato (ripascimenti o apporti fluviali) o asportato (dragaggi) dalla generica sezione.

Il trasporto solido longitudinale viene determinato in funzione delle caratteristiche dell'onda al largo e della conseguente onda frangente (altezza e direzione), della granulometria dei sedimenti e dell'eventuale presenza di opere costiere.

Viene altresì tenuto conto di due coefficienti di calibrazione K_1 e K_2, da determinarsi con un procedimento di "taratura" per il particolare sito oggetto di studio, che consentono di calcolare correttamente il valore del trasporto dovuto rispettivamente all'azione diretta del moto ondoso (proporzionale a $H^{2.5}$) ed alla variazione dell'altezza lungo la costa (cioè $\partial H/\partial x$, se con x viene indicato un asse localmente parallelo alla linea di riva). La formula empirica impiegata per il calcolo del trasporto solido longitudinale è la seguente:

$$Q = \left(H_b^2 c_{gb}\right)\left[a_1 \operatorname{sen}(2\theta_{bs}) - a_2 \cos(\theta_{bs})\frac{\partial H_b}{\partial x}\right] \qquad (2)$$

dove il pedice b è riferito alla condizione di frangimento, H è l'altezza significativa dell'onda incidente, θ l'angolo di incidenza rispetto alla normale al litorale nella sezione e c_g la celerità di gruppo. I coefficienti a_1 e a_2 sono così definiti:

$$a_1 = \frac{K_1}{16\,(s-1)(1-n)(1.416)^{2.5}} \qquad (3.1)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8\,(s-1)(1-n)(\tan\beta)(1.416)^{2.5}} \qquad (3.2)$$

dove s indica il rapporto tra il peso specifico del costituente solido del sedimento caratteristico della spiaggia ed il peso specifico dell'acqua marina, n la porosità del se-

dimento in sito e β la pendenza media del profilo trasversale della spiaggia dalla linea di riva alla profondità di chiusura.
L'angolo β viene calcolato per ciascuna mareggiata simulata nel modello, essendo funzione delle caratteristiche dell'onda incidente ed è ottenuto dalla seguente relazione:

$$\tan\beta = \left(\frac{A^3}{D_{LT0}}\right) \qquad (4)$$

dove A è il parametro semiempirico di Dean (1977) e D_{LT0} è la massima profondità interessata dal trasporto solido longitudinale, definita dalla relazione di Hallermaier (1983):

$$D_{LT0} = (2.3 - 10.9\,H_S)\frac{H_S}{L_0} \qquad (5)$$

dove L_0 rappresenta la lunghezza d'onda ed H_S l'altezza significativa in acque profonde.
Il trasporto solido viene calcolato sezione per sezione, tenendo conto della direzione e dell'altezza d'onda al frangimento in ciascuna delle sezioni; tali grandezze vengono determinate attraverso moduli di calcolo interni a GENESIS, che tengono conto degli effetti di shoaling, rifrazione e diffrazione.

Il modello è altresì in grado di descrivere il comportamento del litorale in presenza di opere rigide quali protezioni di sponda, pennelli, dighe foranee e difese staccate (per queste ultime tre categorie di opere il modello è anche in grado di valutare l'interazione tra queste ed il moto ondoso incidente), oppure di interventi morbidi quali by-pass o ripascimenti.

Le condizioni al contorno imponibili agli estremi dell'area modellata possono essere di varia natura; in particolare, è possibile fissare lo spostamento nel tempo della linea di riva nelle sezioni di estremità, ovvero porre in queste un pennello di varia lunghezza e controllare così il trasporto solido nelle stesse.

1.5.2. Andamento del trasporto solido longitudinale e valutazione del bypass

La larghezza della zona interessata dal trasporto solido longitudinale è necessaria alla determinazione della quantità di materiale che supera l'estremità delle strutture perpendicolari alla riva, quali pennelli o moli foranei, durante una mareggiata. Dal momento che la massima concentrazione del trasporto solido avviene nella zona dei frangenti, tale larghezza è legata all'altezza dell'onda frangente.
L'algoritmo di calcolo del bypass implementato nel modello GENESIS richiede la determinazione di una grandezza chiamata "profondità del trasporto attivo longitudinale" D_{LT}, pari alla profondità di frangimento della $H_{1/10}$ (media del decimo di onde più alte). Nelle ipotesi di validità della distribuzione di Rayleigh per le altezze d'onda ed avendo assunto un indice di frangimento γ pari a 0.78 (rapporto tra altezza d'onda e profondità al frangimento), si ottiene:

$$D_{LT} = \frac{1.27}{\gamma}(H_S)_b \approx 1.6\,(H_S)_b \qquad (6)$$

Va osservato che la profondità del trasporto attivo è minore della profondità di chiusura D_C, salvo il caso delle mareggiate estreme.
Per la valutazione del bypass, nel caso di strutture impermeabili al trasporto solido longitudinale, viene introdotto un fattore di bypass F_{BYP}, definito come segue:

$$F_{BYP} = 1 - \frac{D_G}{D_{LT}} \qquad \text{se } D_G \le D_{LT} \qquad (7.1)$$

$$F_{BYP} = 0 \qquad \text{se } D_G \ge D_{LT} \qquad (7.2)$$

dove D_G rappresenta la profondità della testata del molo foraneo o del pennello.

F_{BYP} rappresenta la frazione di trasporto solido longitudinale nella cella sopraflutto adiacente alla struttura trasversale che è in grado di superare la struttura stessa.
D_{LT} e F_{BYP} vengono calcolati in corrispondenza di ciascuna opera trasversale, per ciascuna mareggiata simulata dal modello.

1.5.3. Profilo trasversale del litorale

Lo studio del profilo trasversale è necessario per la valutazione dell'andamento trasversale del trasporto solido longitudinale e quindi del bypass. Si assume che la for-

ma del profilo trasversale sia esprimibile tramite la semplice relazione proposta da Bruun (1954) e Dean (1977), che lega la profondità d alla distanza dalla linea di riva y:

$$d = A\,y^{2/3} \qquad (8)$$

dove A rappresenta un parametro semiempirico, definito da Moore (1982), funzione del diametro caratteristico d_{50} (espresso in mm e corrispondente al diametro del vaglio che trattiene il 50% in peso del materiale) del sedimento che costituisce la spiaggia attiva.

Di seguito, si riportano le formule proposte da Larson e Kraus nel 1992 (CERC 1995) per il calcolo del parametro A, in funzione del diametro medio dei grani:

$A = 0.2665(d_{50})^{0.614}$ se $d_{50} \le 0.26$ mm (9.1)

$A = 0.2275(d_{50})^{0.496}$ se $0.26 < d_{50} \le 0.47$ mm (9.2)

$A = 0.2143(d_{50})^{0.4161}$ se $0.47 < d_{50} \le 0.70$ mm (9.3)

$A = 0.2101(d_{50})^{0.361}$ se $0.70 < d_{50} \le 1.00$ mm (9.4)

$A = 0.21(d_{50})^{0.48}$ se $1.00 < d_{50} \le 1.77$ mm (9.5)

$A = 0.23(d_{50})^{0.32}$ se $1.77 < d_{50} < 10.0$ mm (9.6)

$A = 0.263(d_{50})^{0.261}$ se $10.0 \le d_{50} < 40.0$ mm (9.7)

$A = 0.46(d_{50})^{0.11}$ se $d_{50} \ge 40.0$ mm. (9.8)

1.5.4. Profondità di chiusura e altezza di swash

La profondità di chiusura rappresenta la profondità limite al di sotto della quale il profilo trasversale non subisce cambiamenti significativi, nell'intervallo di tempo per cui si esegue la simulazione. La valutazione corretta della profondità di chiusura per un dato sito è condotta sulla base dell'analisi di dati storici che documentino l'evoluzione del tempo del profilo trasversale in sezioni significative del sito in oggetto.

Qualora tali dati non siano disponibili, è possibile valutare la profondità tramite la relazione proposta da Hallermeier:

$$h_c = 2.28 \cdot H_{0,12} - 68.5 \cdot \left(\frac{H_{0,12}^{\,2}}{g \cdot T^2} \right),$$

dove $H_{0,12}$ rappresenta il valore dell'altezza significativa superata in media per 12 ore all'anno e T il periodo ad essa associato.

1.5.5. Determinazione delle caratteristiche dell'onda al frangimento

Le caratteristiche dell'onda al frangimento da impiegare nelle formule 2 e 6 sono calcolate per mezzo di un modulo interno al modello GENESIS; tale modello propaga le onde a partire dalle acque profonde fino alla profondità di frangimento, senza tenere conto dell'eventuale effetto di diffrazione di opere presenti lungo il litorale. Tale effetto viene considerato in una fase successiva, correggendo i risultati di questo primo calcolo.

L'altezza d'onda al frangimento $(H_S)_b$ è calcolata attraverso la seguente relazioni:

$$(H_S)_b = K_R\, K_S\, H_{S0} \qquad (10)$$

dove K_R e K_S sono rispettivamente i coefficienti di rifrazione e di shoaling, ed H_{S0} l'altezza d'onda significativa in acque profonde.
I valori di K_R e K_S sono determinati nelle ipotesi di batimetriche parallele, di costanza del flusso di energia all'interno di ciascun tubo di flusso e di validità della legge di Snell. Nelle medesime ipotesi è possibile determinare anche la direzione di propagazione al frangimento θ_b; le relazioni che esprimono le grandezze finora citate sono le seguenti:

$$K_R = \left(\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_b} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (11)$$

$$K_S = \left(\frac{c_{g0}}{c_{gb}} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (12)$$

$$\theta_b = \operatorname{arcsen}\left(\frac{L_b \operatorname{sen}\theta_0}{L_0} \right) \qquad (13)$$

dove θ_0 è l'angolo di incidenza dell'onda al largo (rispetto ad una batimetrica di riferimento, il cui orientamento è ottenuto dallo smoothing e dalla traslazione della linea di riva esistente durante lo step temporale di calcolo), c_{g0} e c_{gb} rispettivamente la celerità di gruppo del treno d'onde al largo ed al frangimento, L_b ed L_0 la lunghezza d'onda al frangimento ed in acque profonde.

1.5.6. Propagazione del moto ondoso sottocosta

La fase iniziale della taratura del modello di evoluzione morfologica è consistita nel trasferimento sottocosta, al limite esterno della fascia attiva, delle caratteristiche del clima ondoso precedentemente determinate nel punto P posto su un fondale di -100 m s.m.m. (cfr. paragrafo 1.2.4).
Il trasferimento del clima ondoso dal punto P al limite della fascia attiva è stato condotto mediante il codice di calcolo STWAVE. Sono state scelte una serie di stazioni (in pratica una serie di boe virtuali), poste lungo la costa in corrispondenza della batimetrica -10 m s.m.m. e posizionate ad una distanza di 40 m tra loro; tali stazioni sono state ritenute significative per rappresentare le differenti condizioni di moto ondoso lungo il litorale (Figura 1-48).

La griglia di calcolo STWAVE, rappresentata in Figura 1-48 e Figura 1-50, ha origine nel punto di coordinate 1458500 m EST e 4902760 m NORD (vertice in alto a destra), dimensioni 2700x3000, maglia quadrata con passo 20 m, inclinata di 35° rispetto alla direzione EW. Le coordinate dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga Fuso Ovest.

Il file di input che descrive il moto ondoso nelle simulazioni condotte con il modello GENESIS è stato ricavato creando una sequenza di eventi casualmente ordinata, sulla base del clima ondoso nel punto P. Una volta fissato l'intervallo temporale di calcolo (pari a 3 ore, nel caso in esame), l'andamento del clima meteomarino dell'anno medio risulta descritto da un numero di eventi pari al numero di intervalli di calcolo compresi nell'anno. Il codice di calcolo associa a ciascuno degli intervalli temporali una serie di valori di altezza significativa, periodo e direzione media di provenienza, tale per cui l'andamento globale del clima ottenibile dalla sequenza ricostruita rappresenta efficacemente il clima vero.
Gli eventi caratterizzati da altezza significativa inferiore a 0.25 m, nel punto UKMO al largo, sono stati considerati come calme.

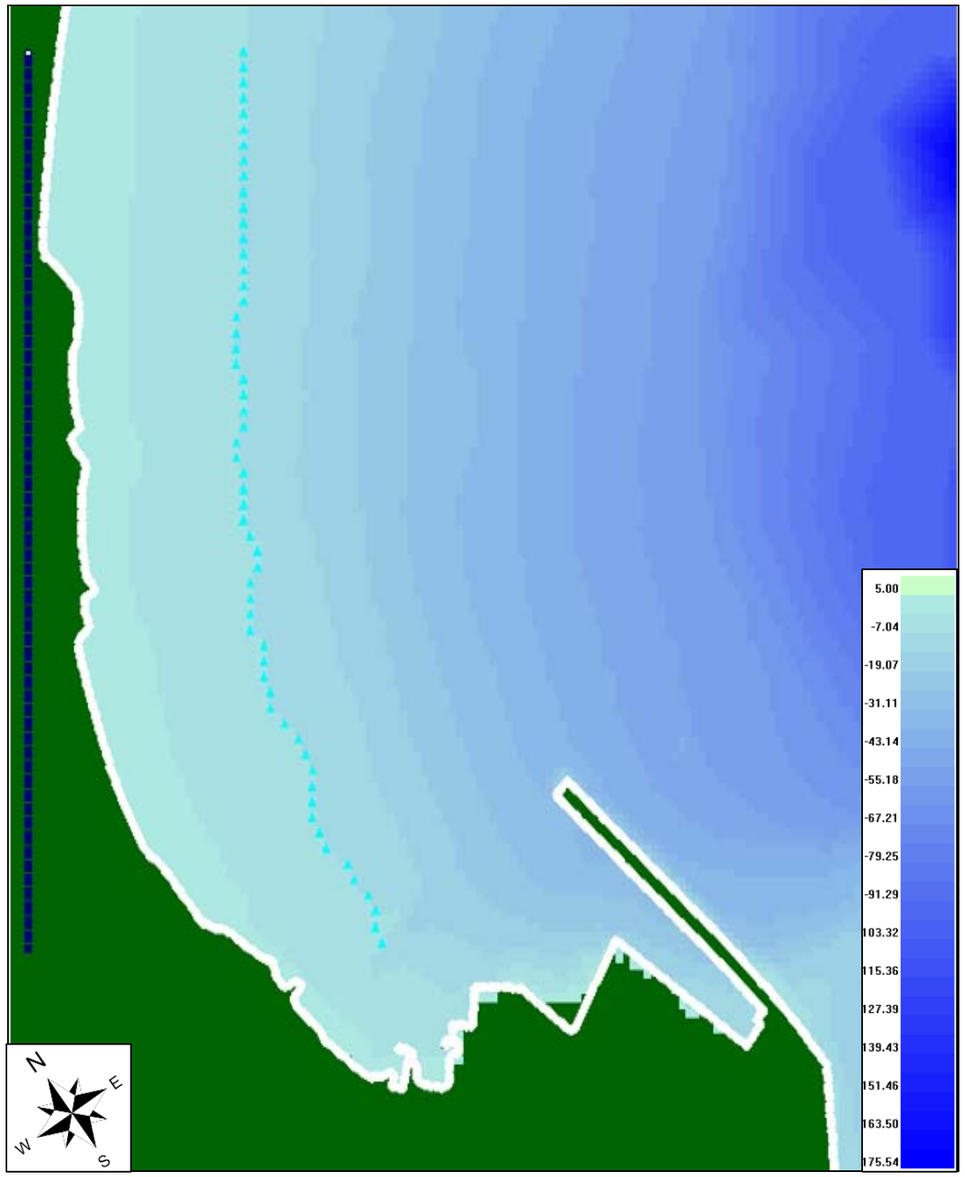


FIGURA 1-48 - GRIGLIA STWAVE - SIMULAZIONE DI TARATURA UBICAZIONE DELLE STAZIONI (BOE VIRTUALI) POSTE ALLA PROFONDITÀ DI -10 M S.M.M.

1.5.7. Premessa alla modellazione

I modelli matematici costituiscono un valido strumento per l'analisi e la previsione dell'evoluzione della morfologia costiera. Il principale vantaggio dei modelli matematici risiede nella possibilità, una volta implementati, di studiare in tempi ragionevolmente brevi diverse soluzioni progettuali ovvero l'effetto di forzanti di natura diversa (mareggiate eccezionali, variazioni del clima, ecc…).
La modellazione dell'evoluzione morfologica di un litorale coinvolge fenomeni di natura diversa quali il moto ondoso incidente il litorale stesso, la presenza di correnti costiere, il trasporto solido longitudinale (in direzione parallela alla linea di riva), il trasporto solido trasversale (perpendicolare alla linea di riva), l'influenza di strutture collocate all'interno della zona attiva della spiaggia (quella cioè interessata da fenomeni di migrazione dei sedimenti per azione del moto ondoso) e di eventuali interventi di dragaggio o ripascimento artificiale.

In primo luogo è fondamentale la determinazione delle forzanti del sistema, cioè del clima meteomarino locale. Sulla base di questi dati è possibile quindi valutare il trasporto solido nelle diverse direzioni nelle diverse celle che compongono il modello matematico. Una volta determinate le forzanti, si passa quindi alla valutazione del trasporto solido nelle diverse direzioni, valutazione che si basa su criteri semiempirici che legano le caratteristiche del moto ondoso alla geometria della spiaggia ed alle caratteristiche dei sedimenti che la costituiscono.

Va quindi analizzata l'influenza delle strutture collocate all'interno della zona attiva, sia in termini di modificazione della propagazione locale del moto ondoso che di interazione con il regime di trasporto solido, cioè di valutazione della variazione indotta localmente sulle forzanti del sistema dalla presenza di opere e della capacità di queste ultime di intercettare, totalmente o in una parte da quantificare, il trasporto solido. Alla stregua delle opere in zona attiva vanno considerati gli interventi di dragaggio e ripascimento, che modificano localmente il campo di moto delle onde incidenti e alterano in alcune zone il budget di sedimenti passibile di migrazione per effetto delle forzanti già determinate.

1.5.8. Profondità di chiusura e altezza di swash

La profondità di chiusura rappresenta la profondità limite al di sotto della quale il profilo trasversale non subisce cambiamenti significativi, nell'intervallo di tempo per cui si esegue la simulazione. La valutazione corretta della profondità di chiusura per un dato sito è normalmente condotta sulla base dell'analisi di dati storici che documentino l'evoluzione del tempo del profilo trasversale in sezioni significative del sito in oggetto.
Qualora tali dati non siano disponibili, è possibile valutare la profondità tramite la relazione di Hallermeier (1983):
$h_c = 1.6 \cdot H_{0,12}$.

dove $H_{0.12}$ rappresenta il valore dell'altezza significativa superata in media per 12 ore all'anno.

Utilizzando la tabella del clima ondoso medio ricostruito nel punto P (descritto in dettaglio al precedente paragrafo 1.2.1) è stato possibile ricostruire la curva di durata e determinare il valore di $H_{0,12}$. In Figura 1-49 è rappresentata la curva di durata per il calcolo della $H_{0,12}$. Sulla base della frequenza annua è stata valutata un'altezza d'onda $H_{0,12}$ pari a 2.8 m. La profondità di chiusura h_c è risultata di conseguenza pari a circa 4.5 m; l'altezza di swash D_B è stata stimata in 1.5 m. L'altezza complessiva della fascia attiva risulta di 6.0 m.

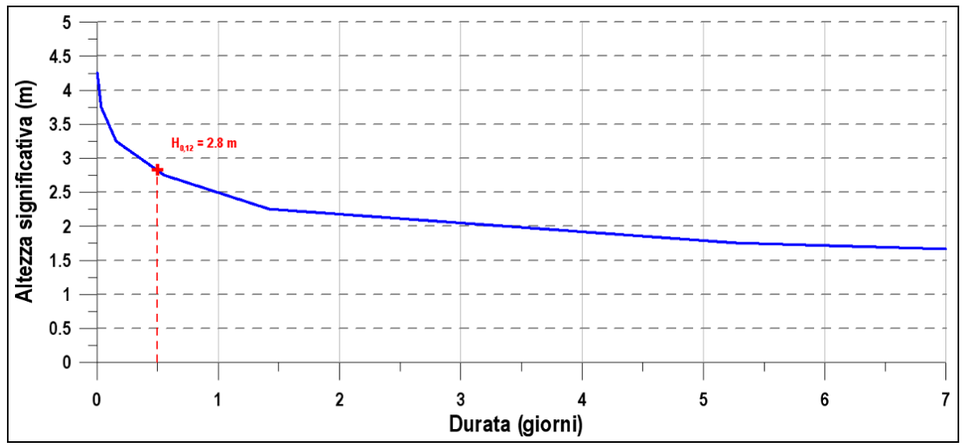


FIGURA 1-49 - INDIVIDUAZIONE DI $H_{0,12}$ - CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO P

1.5.9. Considerazioni preliminari e settaggio del modello GENESIS

La taratura è stata condotta con riferimento alle linee di riva fornite dal Committente (cfr. paragrafo 1.3.1); in particolare si è scelto di tarare il modello con riferimento all'evoluzione del litorale avvenuta nel periodo che va dal 1993 al 2010.
La fase di taratura del modello consiste sostanzialmente nel variare i parametri di calibrazione del codice di calcolo fino ad ottenere dal modello la ricostruzione più fedele possibile dell'evoluzione della linea di costa misurata nell'intervallo temporale 1993-2010.
Il dominio di calcolo GENESIS, che comprende il tratto di costa tra la spiaggia di Zinola (circa 500 m a Nord-Est del terrapieno del campo da calcio) e il pontile Esso, è stato costruito suddividendo il litorale in 460 celle della lunghezza di 5 m ciascuna, per un totale di 2300 m (Figura 1-50).

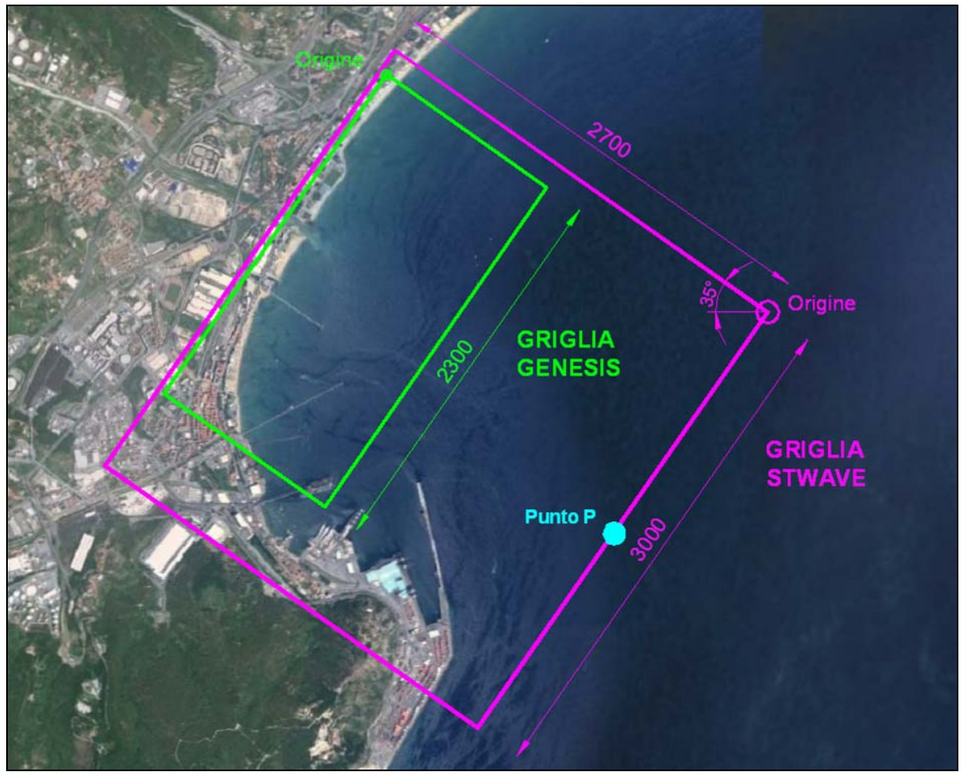


FIGURA 1-50 - GRIGLIE DI CALCOLO GENESIS E STWAVE

La griglia GENESIS ha i lati paralleli a quelli della griglia STWAVE e ha origine nel punto di coordinate (1456235.0 m EST; 4904162.8 m NORD - vertice in alto a sinistra); le coordinate dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest.
L'estensione del dominio di calcolo è stata determinata in base alla conformazione del litorale e delle opere presenti, che ha consentito di porre gli estremi in corrispondenza di punti notevoli dove fissare univocamente le condizioni al contorno. L'estremo sinistro del dominio di calcolo è stato fissato in corrispondenza del litorale di Zinola, mentre l'estremo destro della griglia si trova in prossimità del pontile Esso.

In linea generale, relativamente alle opere presenti sul litorale e schematizzate nelle simulazioni, si fa presente che il porto di Vado è stato inserito solamente nel modello di propagazione STWAVE, mentre nel dominio di calcolo GENESIS verranno rappresentate solamente le opere realizzate più sottocosta (piastra e porto turistico previsti in progetto).
Pertanto, nella simulazione di taratura si è provveduto ad inserire nel dominio STWAVE il porto di Vado nella configurazione attuale (Figura 1-48), mentre nella griglia GENESIS sono state opportunamente schematizzate solamente le opere presenti nel periodo di taratura (1993-2010).

I parametri impiegati nel modello sono riassunti nella seguente TABELLA 1-7. In particolare, si riportano i valori dei coefficienti di taratura K_1 e K_2, le caratteristiche della griglia di calcolo (dimensioni e spaziatura), il periodo individuato per la simulazione, lo step temporale di calcolo, le caratteristiche della climatologia fornita in input al modello (profondità della fascia attiva, ubicazione delle "stations") e le condizioni al contorno.

La linea di riva iniziale è quella del 1993; i sedimenti presenti all'interno della fascia attiva sono stati rappresentati con un valore del diametro mediano dei grani pari a 3.5 mm (valore rappresentativo dei campioni prelevati sulla spiaggia emersa - cfr. precedente paragrafo 1.3.2).

TABELLA 1-7 - PARAMETRI IMPIEGATI NEL MODELLO GENESIS - TARATURA

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Coefficiente di calibrazione K_1	0.03	
Coefficiente di calibrazione K_2	0.01	
Numero di celle totali	460	
Dimensioni di ogni cella	5	m
Data inizio simulazione	01/04/1993	
Data di fine simulazione	01/04/2010	
Dimensione step temporale di calcolo	3	h
Profondità a cui sono ubicate le stations	-710.0	m
Profondità di chiusura	-4.5	m
Altezza di swash	+1.5	m
Estremo destro	Aperto (Pinned Beach)	
Estremo sinistro	Aperto (Pinned Beach)	

Di seguito, procedendo da Nord verso Sud, si riporta una breve descrizione delle opere presenti litorale e rappresentate nel modello GENESIS.
Il terrapieno esistente tra Villa Gavotti e il torrente Quiliano (terrapieno del campo da calcio) è stato rappresentato avanzando la linea inerodibile in corrispondenza della scogliera radente. La foce del Quiliano è stata schematizzata con due pennelli di tipo "non diffracting", con una lunghezza idonea e permeabilità nulla.
La zona del cantiere navale e il terrapieno adiacente sono stati schematizzati avanzando la linea inerodibile in corrispondenza della difesa radente presente lato mare.

Il pontile Tirreno Power e i pontili Vadoil e Esso (posti più a Sud in prossimità della foce del Segno), essendo su pali, non sono stati rappresentati nel modello in quanto completamente permeabile in relazione al flusso di sedimenti.

Per quanto riguarda i ripascimenti eseguiti sul litorale oggetto di studio nell'arco dell'ultimo ventennio (dal 1993 al 2010) si fa presente che non è stato possibile reperire un elenco completo di tutti gli interventi.
Pertanto, secondo le indicazioni fornite dal Committente, sono stati inseriti nel modello GENESIS solamente due interventi:

- Ripascimento del 2005: versamento di 19'000 m3 di materiale nel tratto di litorale a Nord-Est del terrapieno da calcio fino alla foce del torrente Letimbro, eseguito con sabbia e ghiaia proveniente dalle attività di scavo per la costruzione del complesso della Torre nella vecchia darsena del porto di Savona;
- Ripascimento di marzo-aprile 2009: versamento di 2'800 m3 di materiale nella spiaggia a Nord-Est del terrapieno da calcio (per un tratto di circa 500 m), eseguito con ghiaia naturale proveniente da cava.

Di seguito, in Figura 1-51, si riporta il dominio di calcolo GENESIS utilizzato per la simulazione di taratura.

Tutte le simulazioni condotte con GENESIS, sia quella di taratura che quelle in cui sono state analizzate le varie configurazioni progettuali, sono state eseguite considerando l'immissione di sedimenti da parte del torrente Quiliano. L'immissione di sedimenti è stata schematizzata con un ripascimento localizzato in corrispondenza della foce, che è stato qualitativamente stimato in circa 2000 m^3/anno.

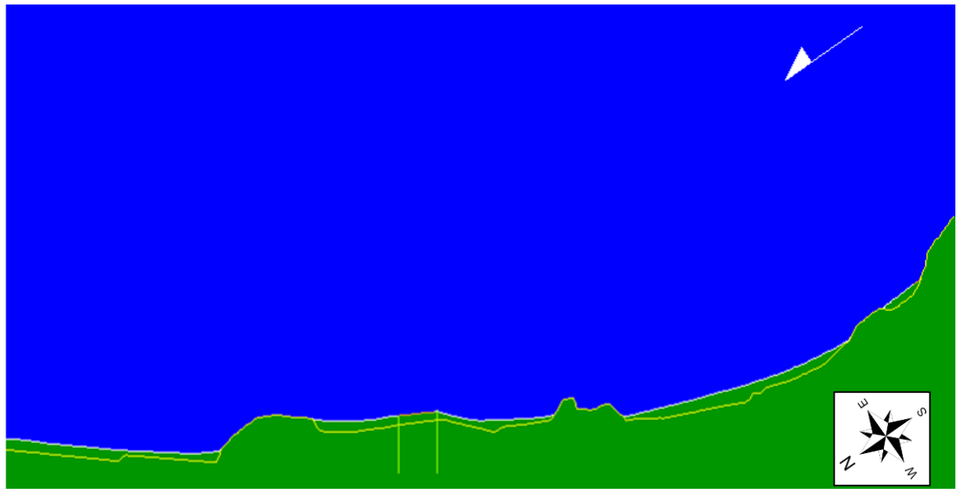


FIGURA 1-51 - GRIGLIA DI CALCOLO GENESIS - TARATURA 1993-2010

Per quanto riguarda, invece, l'immissione di sedimenti da parte del torrente Segno, posto in corrispondenza dell'estremo destro del dominio di calcolo, nella fase di taratura è stata condotta un'analisi per valutare l'influenza dei sedimenti provenienti dal Segno sul trasporto solido locale. Di conseguenza sono state condotte due simulazioni: la prima senza immissione di sedimenti e la seconda considerando un valore di portata solida del torrente stimato sulla base dei risultati degli studi idraulici condotti sul Torrente Segno (cfr. precedente paragrafo 1.3.3).

Per la stima della portata solida del torrente Segno da inserire nella simulazione GENESIS si è fatto riferimento al valore massimo del trasporto medio annuo in grado di essere generato dal torrente e di raggiungere la foce, pari appunto a circa 8600 m^3/anno (stima effettuata considerando gli effetti dei recenti incendi). Considerando che le simulazioni GENESIS sono state condotte facendo riferimento alle caratteristiche sedimentologiche del materiale della spiaggia emersa (costituito da ghiaia medio-fine), sulla base della curva granulometrica del materiale prelevato alla foce del Segno è stata individuata la percentuale di sedimenti corrispondente alla granulometria considerata (Figura 1-52).

Ne consegue che la portata solida del torrente Segno relativa alla classe di sedimenti compresa tra 2 e 20 mm (ghiaia medio-fine), risulta pari a circa il 40% del totale, ovvero circa 3400 m^3/anno.

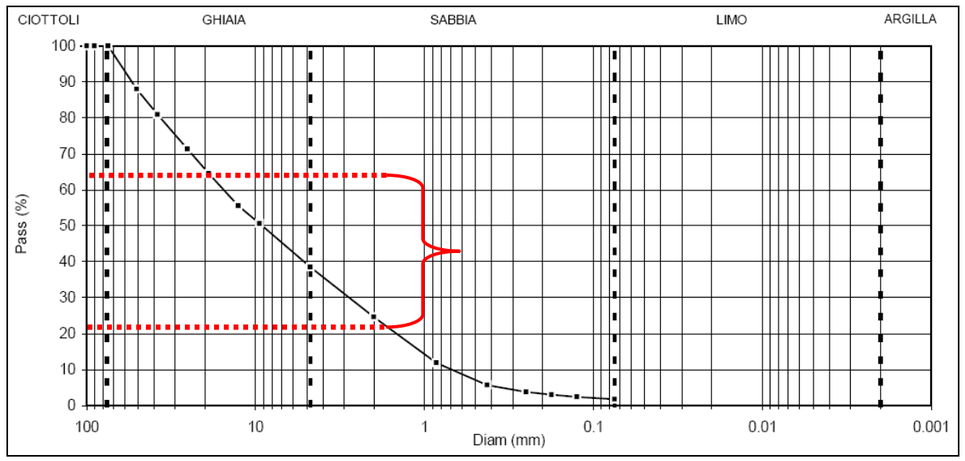


FIGURA 1-52 - INDIVIDUAZIONE DELLA CLASSE DI SEDIMENTI CORRISPONDENTI ALLE GHIAIE MEDIO-FINI SULLA BASE DELLA CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE DI MATERIALE PRELEVATO ALLA FOCE DEL TORRENTE SEGNO

1.5.10. Risultati taratura

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di taratura relativa al periodo 1993-2010, condotta per mezzo del codice di calcolo GENESIS.

I risultati sono rappresentati sia in termini di trasporto solido che di evoluzione della linea di riva (Figura 1-53), con riferimento all'intera griglia di calcolo.

Il modello, opportunamente tarato, è in grado di riprodurre con discreta approssimazione l'evoluzione della linea di riva per il tratto di litorale analizzato. In particolare, una buona corrispondenza tra la linea di riva stimata dal modello e quella rilevata a marzo 2010 si riscontra nel tratto di litorale a Nord-Est del terrapieno del campo da calcio (spiaggia di Zinola), per il quale è stato possibile reperire informazioni più accurate relativamente ai ripascimenti eseguiti nel periodo di taratura.

Per quanto riguarda, invece, la spiaggia tra la foce del Quiliano e il cantiere nautico, il modello non riproduce fedelmente l'evoluzione avvenuta nel periodo 1993-2010; sono infatti stati eseguiti degli interventi (ad esempio modifiche dell'armatura di foce del Quiliano e/o ripascimenti) non facilmente documentabili.

Procedendo verso Sud, il modello è in grado di riprodurre con buona approssimazione la tendenza evolutiva del litorale; la linea di riva nel periodo 1993-2010 ha, infatti, subito una sensibile rotazione con arretramento a Nord (in corrispondenza del cantiere nautico) e un avanzamento a Sud (a ridosso della difesa radente).

Per quanto riguarda il trasporto solido, i risultati sono presentati sia considerando l'apporto solido del Torrente Segno che in assenza di immissione di sedimenti. Si osserva che il trasporto risulta praticamente coincidente nei due casi; la variazione è limitata alla zona di foce ed, in particolare, al tratto di spiaggia compreso tra la difesa radente e la foce del Torrente Segno (circa 200 m). I sedimenti uscenti dalla foce vanno ad alimentare in parte i litorali a Nord e, in parte minore, quelli a Sud; tuttavia la loro influenza è appunto limitata alla zona di foce.

Ne consegue che il contributo dei sedimenti immessi dal Torrente Segno alla dinamica delle spiagge poste più a Nord risulta trascurabile; tale affermazione trova conferma anche da quanto emerso dagli studi di dettaglio del trasporto solido e dell'evoluzione del fondale, i cui risultati sono riportati nei precedenti paragrafi 1.4.7 e 1.4.8.

In linea generale, il trasporto è diretto verso Nord-Est (ovvero verso il porto di Savona) nel tratto di litorale a Nord della foce del Torrente Quiliano, mentre la zona compresa tra il Quiliano e il cantiere nautico è, invece, caratterizzata da trasporto pressoché nullo. Procedendo verso Sud si osserva un'inversione nel verso del trasporto che, nell'arcata litoranea compresa tra il cantiere nautico e la difesa radente, risulta diretto verso Sud (ovvero verso il Porto di Vado). Il trasporto, infine, si annulla in corrispondenza della difesa radente per poi cambiare nuovamente verso.

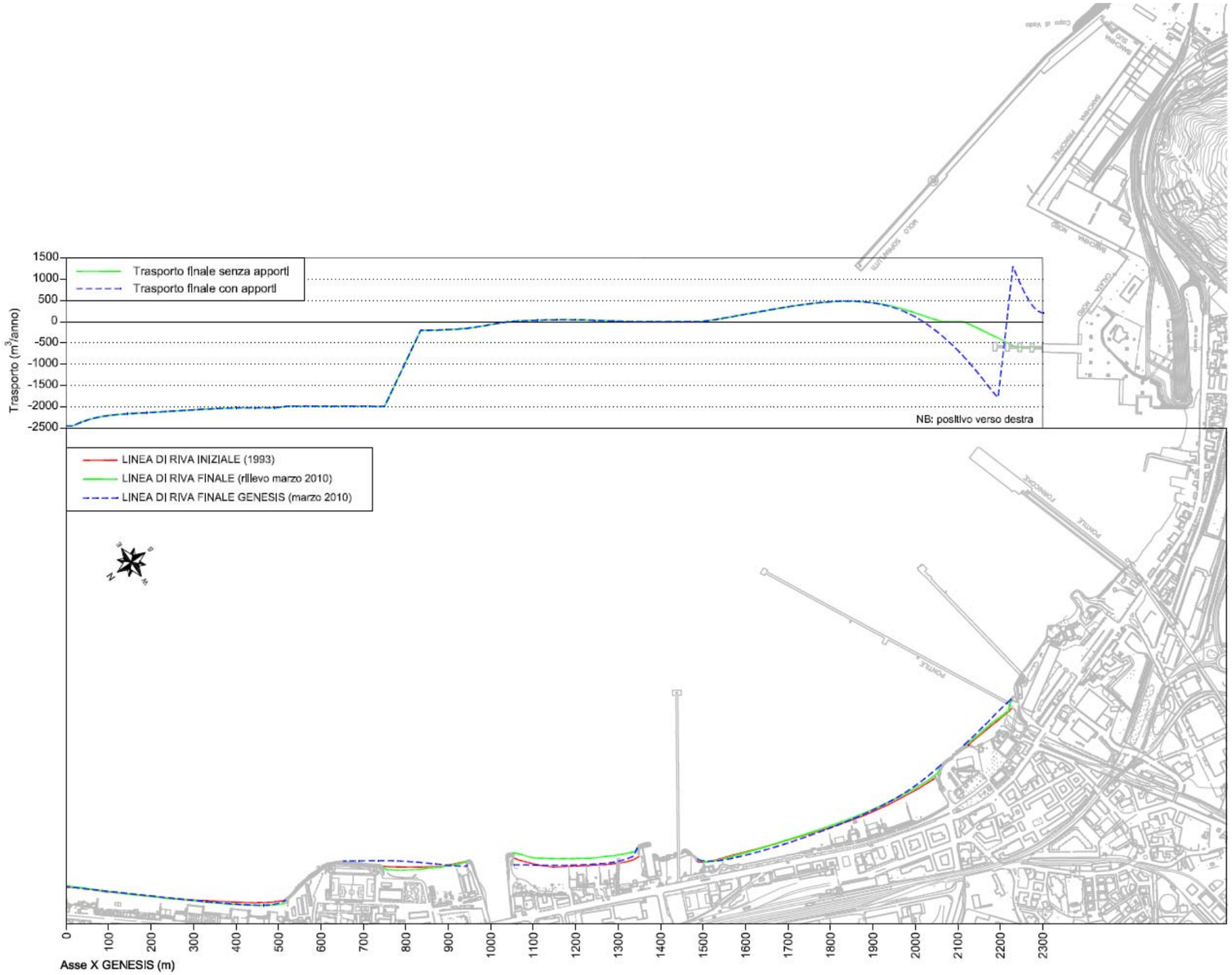


FIGURA 1-53 - TARATURA DEL MODELLO GENESIS (1993-2010) - EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA E ANDAMENTO DEL TRASPORTO SOLIDO

1.6. Evoluzione morfologica in configurazione attuale

Il modello di evoluzione morfologica, con i parametri definiti al precedente paragrafo 1.5.9, è stato impiegato per la previsione dell'evoluzione della linea di riva in assenza di interventi (configurazione attuale del litorale).

Per stimare la tendenza evolutiva del litorale in assenza di interventi è stata condotta una simulazione dell'evoluzione della linea di riva a 10 anni; è stato scelto il medesimo periodo temporale utilizzato per le simulazioni in configurazione di progetto.

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle simulazioni relative all'evoluzione morfologica del litorale in configurazione attuale.

1.6.1. Parametri utilizzati nel modello

Le opere rigide attualmente presenti nel tratto di litorale compreso tra la spiaggia di Zinola e il porto di Vado sono state opportunamente schematizzate nel modello GENESIS. Si tratta sostanzialmente delle stesse opere presenti nella simulazione di taratura e descritte nel precedente paragrafo 1.5.9.

La linea di riva iniziale è quella del rilievo di marzo 2010; i sedimenti presenti all'interno della fascia attiva sono stati rappresentati con un valore del diametro mediano dei grani pari a 3.5 mm (come per la simulazione di taratura). La simulazione è stata condotta considerando l'immissione di sedimenti da parte del torrente Quiliano; mentre, per quanto riguarda il Torrente Segno, il suo contributo alla dinamica litoranea è stato considerato trascurabile.

Di seguito, in Figura 1-54 si riporta la griglia di calcolo GENESIS con le opere presenti in configurazione attuale.

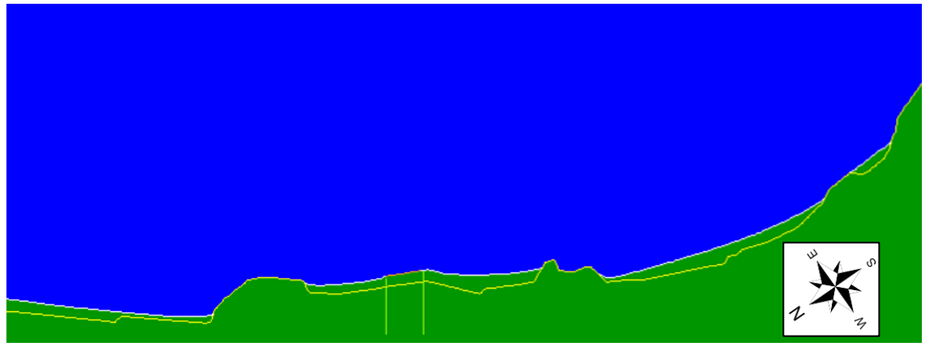


FIGURA 1-54 - GRIGLIA GENESIS IN CONFIGURAZIONE ATTUALE

1.6.2. Risultati evoluzione morfologica in configurazione attuale

Di seguito si riportano i risultati della simulazione di evoluzione morfologica a 10 anni in configurazione attuale.

I risultati sono rappresentati nella successiva Figura 1-55 sia in termini di trasporto solido, che di evoluzione della linea di riva, con riferimento all'intera griglia di calcolo.

Per quanto riguarda il verso e l'andamento del trasporto solido valgono le stesse considerazioni formulate per la simulazione di taratura.

Il trasporto solido longitudinale a Nord del terrapieno del campo da calcio (spiaggia di Zinola), risulta diretto verso Nord-Est, quindi verso Savona. Procedendo verso la foce del Torrente Quiliano, il trasporto si riduce di entità, fino ad annullarsi nel tratto di litorale compreso tra la foce e il cantiere nautico. Nel tratto di litorale a Sud del cantiere nautico si osserva un'inversione nel verso del trasporto che risulta quindi diretto verso Sud (verso il Porto di Vado), per annullarsi infine in corrispondenza della difesa radente e cambiare nuovamente verso.

In termini di evoluzione della linea di costa, si riscontra una tendenza all'arretramento della linea di riva nella spiaggia di Zinola, a ridosso del terrapieno del campo da calcio, per un tratto di circa 200 m. Per quanto riguarda invece il tratto di litorale compreso tra il terrapieno e la foce del Quiliano, si osserva una tendenza all'avanzamento della linea di riva, con una zona di accumulo alla radice della difesa radente del terrapieno. Il trasporto, in accordo con l'andamento della linea di riva, ri-

sulta infatti ancora diretto verso Nord-Est (verso il terrapieno), per poi annullarsi a Sud del Quiliano.

Dalla foce del Quiliano, procedendo verso Sud, fino al cantiere nautico alla radice del pontile Tirreno Power, la linea di riva risulta sostanzialmente stabile.

A Sud del terrapieno del pontile Tirreno Power si osserva un riorientamento della linea di riva, con una tendenza all'avanzamento in corrispondenza della difesa radente che si trova a Nord della foce del Torrente Segno.

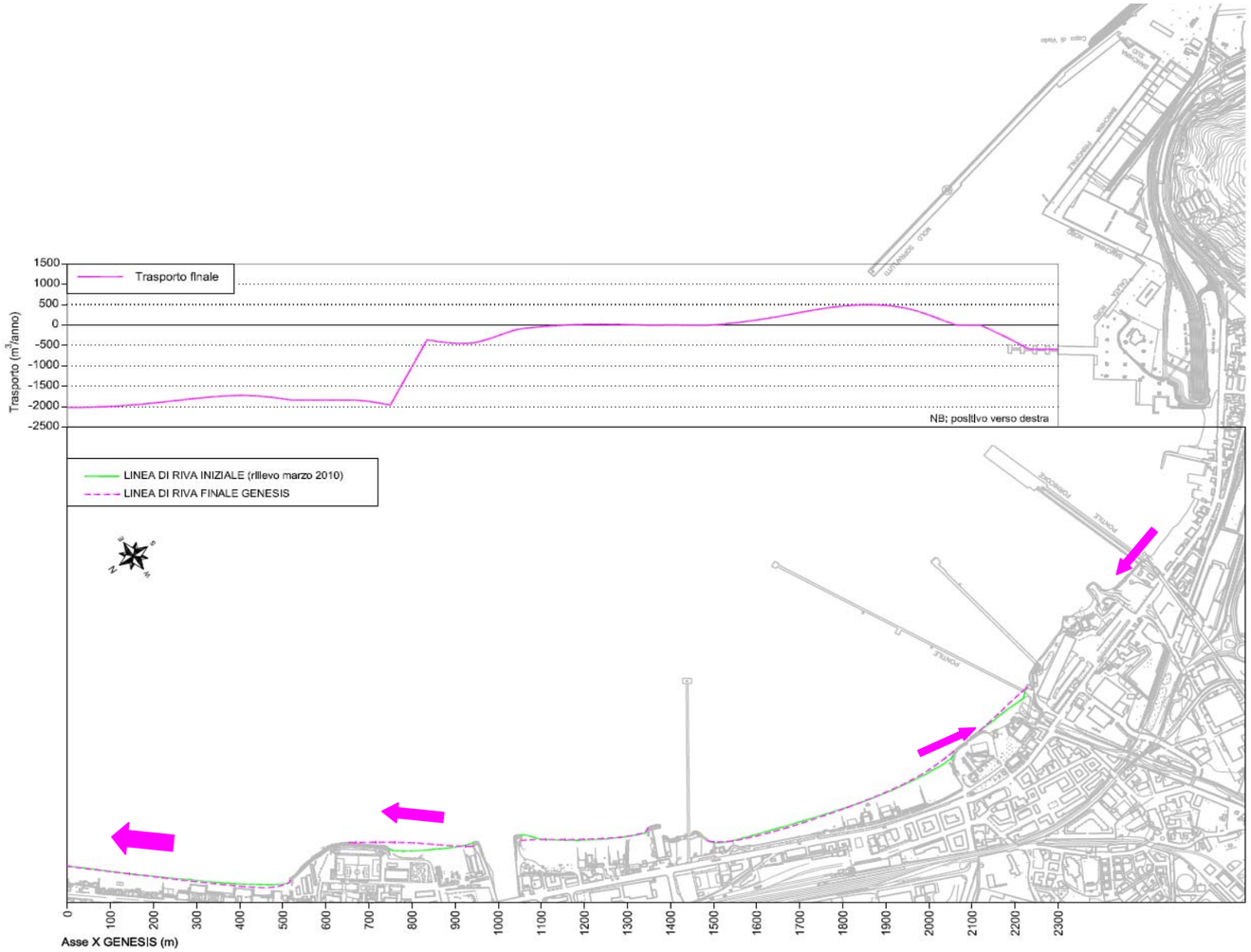


FIGURA 1-55 - CONFIGURAZIONE ATTUALE - EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA E ANDAMENTO DEL TRASPORTO SOLIDO

2. DATI DI RIFERIMENTO PER L'ANALISI DEGLI ASPETTI IDRODINAMICI

2.1. Marea

2.1.1. Condizioni frequenti di marea

L'analisi della marea, ovvero l'identificazione di una marea sintetica sinusoidale che risulti rappresentativa della marea media (condizioni frequenti), è stata condotta considerando i dati registrati dai mareografi di Imperia e di Genova.

Per Imperia sono disponibili le registrazioni dal 1987 al 2008, mentre per Genova il periodo di osservazione considerato è stato dal 1998 al 2008.

L'identificazione è consistita nella valutazione del periodo e dell'ampiezza.

Per quanto riguarda il periodo è stato verificato che a Vado Ligure la marea è di tipo semidiurno, e cioè con un periodo caratteristico di 12 ore.

Per quanto riguarda l'ampiezza, invece, sono state svolte, per entrambe le stazioni di misura, due differenti tipi di analisi; un'analisi sulle frequenze e sulla probabilità di superamento delle ampiezze di marea, ed un'analisi sui gradienti medi delle maree registrate.

I risultati di queste analisi sono riportati rispettivamente in Figura 1-56 (Imperia) e in Figura 1-57 (Genova). Nei grafici sono riportati gli istogrammi di frequenza (scala di lettura a sinistra) e le curve di durata (scala di lettura a destra) delle ampiezze di marea.

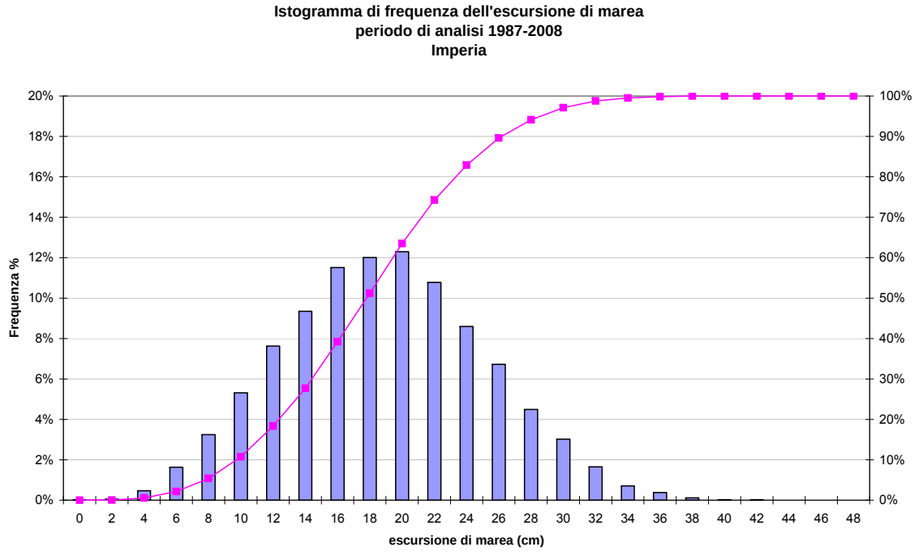


FIGURA 1-56 - STATISTICA DELL'AMPIEZZA DI MAREA AD IMPERIA (1997-2008)

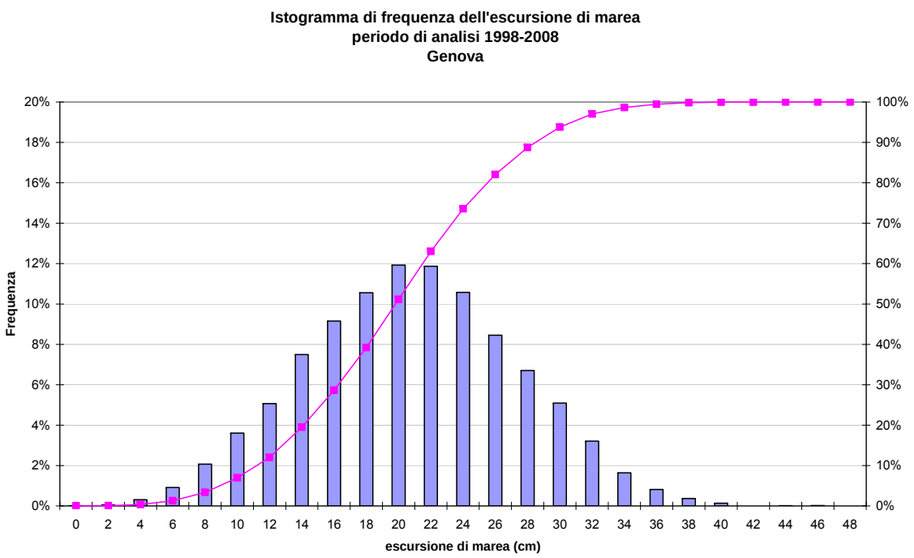


FIGURA 1-57 - STATISTICA DELL'AMPIEZZA DI MAREA A GENOVA (1998-2008)

Si può osservare che le ampiezze di marea più frequenti sono comprese tra 18 e 22 cm, sia per Genova che per Imperia, e che circa il 50% delle onde di marea ha un'ampiezza inferiore a 20 cm.

Per ottenere una maggiore informazione si è proceduto anche, per ogni onda di marea in fase crescente, all'analisi del gradiente medio, che è un indice della ripidità dell'onda di marea:

$$i = \frac{H_{max} - H_{min}}{T}$$

dove:
i = gradiente medio di marea (cm/h)
H_{max} = livello massimo della marea in quel ciclo (cm)
H_{min} = livello minimo di mare precedente al colmo (cm)
T = periodo di tempo intercorso tra H_{min} e H_{max} (h)

L'analisi statistica del gradiente medio è riportata nelle precedenti Figure (secondo diagramma, con analogo metodo di lettura dell'istogramma).

Si può osservare che il gradiente medio di marea più frequente è quello di 3 cm/h circa (18% circa a Imperia, 22% circa a Genova), ma con valori significativi anche più elevati (3,5 cm/h con una frequenza di circa il 16% sia a Imperia che Genova).

La marea media rappresentativa nella rada di Vado Ligure può essere dunque considerata come un marea sintetica sinusoidale con ampiezza 20 cm (+/- 10 cm rispetto al livello medio del mare), corrispondente ad un gradiente medio di 3,33 cm/h e con un periodo di 12 ore.

2.1.2. Condizioni estreme di marea

Le variazioni del livello marino definiscono un segnale complesso, che può considerarsi il risultato delle interazioni tra due componenti fondamentali: la marea astronomica, di natura periodica e causata dalle forze di attrazione combinate della Luna e del Sole, e la componente meteorologica, aleatoria e dovuta agli effetti indotti sulla superficie marina dalle variazioni delle condizioni atmosferiche.

Con riferimento ai porti marittimi, i fenomeni meteorologici in grado di influenzare il livello del mare sono essenzialmente le variazioni di pressione atmosferica ed il vento, i cui effetti, in generale, non possono essere identificati separatamente.

Per poter eseguire un'analisi statistica della componente meteorologica del segnale di marea, e fare quindi previsioni di livello legate al tempo di ritorno, le registrazioni di marea sono state elaborate al fine di separare le due componenti astronomica e meteorologica.

L'elaborazione è stata effettuata sulla serie storica delle registrazioni disponibili per il mareografo di Genova, relative al periodo 1998-2008 (dati in formato orario e riferiti allo 0 IGM).

La marea meteorologica, ηm(t), può essere determinata eliminando dal segnale registrato, η(t), le oscillazioni dovute alle componenti di frequenza tipiche della banda diurna della marea astronomica, ηa(t).

Gli effetti meteorologici, infatti, influenzano largamente le componenti armoniche sub-mareali dello spettro di frequenza del livello marino comprese nella banda limitata dalle componenti mareali diurna e mensile.

Pertanto la componente meteorologica ηm(t) è stata determinata applicando al mareogramma rilevato η(t) un opportuno filtro orario passa-basso, in grado di trattenere le componenti semi-diurna e diurna della marea lasciando passare i contributi associabili a frequenze più basse.

La marea astronomica è costituita dalla differenza tra il mareogramma registrato e quello residuo ottenuto applicando il filtro passa-basso, ovvero il mareogramma meteorologico.

Nella Tabella seguente sono riportati, per i diversi anni di registrazione considerati, i valori massimi della componente meteorologica della marea.

TABELLA 1-8 - VALORI MASSIMI ANNUALI DELLA MAREA METEOROLOGICA

Anno	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
$\eta_{m,max}$ **(m)**	0,27	0,33	0,4	0,3	0,46	0,44	0,37	0,29	0,33	0,32	0,28

L'analisi statistica di tali valori estremi è stata effettuata adattando la distribuzione di probabilità di Gumbel e la distribuzione Tipo III di Pearson.

Per determinare il livello estremo complessivo, occorre sommare al valore massimo stimato del contributo meteorologico un valore rappresentativo delle più elevate altezze di marea astronomica.

A tale proposito sono stati individuati, per l'intero periodo 1998-2008 e relativamente a ciascun giorno mareale, i valori delle più elevate alte maree astronomiche.

Facendo la media di tali dati si è stimata la marea astronomica di riferimento per il calcolo dei livelli estremi complessivi, che è risultata pari a +0,12 m. I valori estremi complessivi del livello marino sono indicati nella Tabella seguente.

TABELLA 1-9 - RISULTATI DELL'ANALISI STATISTICA DEI LIVELLI ESTREMI.

T_r (anni)	Marea meteorologica (m)		Mare astronomica (m)	Livello marino (m)
	Pearson (tipo III)	Gumbel		
1	0,26	0,26	0,12	0,38 / 0,38
5	0,40	0,41	0,12	0,52 / 0,53
10	0,43	0,46	0,12	0,55 / 0,58
20	0,46	0,50	0,12	0,58 / 0,62
50	0,50	0,56	0,12	0,62 / 0,68

2.2. Correnti litoranee

Il Mare Ligure è il bacino più settentrionale del Mediterraneo Occidentale.

Si estende per un'area di circa 50.000 Km^2, circondato dalle coste della Liguria, della Provenza orientale e, a Sud, dalla Corsica settentrionale.

Il bacino ligure è allungato nella direzione Nord Est-Sud Ovest, e si apre, nella sua parte occidentale, verso il Golfo del Leone ed il bacino Algerino-Provenzale.

Nella sua parte orientale, il Mar Ligure è collegato al Mar Tirreno attraverso il Canale di Corsica, un passaggio ampio in superficie circa 90 Km, e circa 30 Km sul fondo, posto a 450 m di profondità tra la Corsica e l'Isola di Capraia.

Lo sviluppo della piattaforma continentale è molto ridotto (con la sola eccezione della costa Toscana) e ciò pone la fascia costiera sotto l'effetto diretto del mare profondo. La batimetria della scarpata continentale segue l'andamento della costa, degradando rapidamente fino ai 1.000 m.

Tra le particolarità più evidenti sono da citare due canyon presenti rispettivamente al largo di Genova e di Punta Mesco ed un promontorio sottomarino che si estende al largo di Nizza.

Il centro del bacino è uniformemente profondo degradando progressivamente fino ad una profondità massima di 2.700 m.

Il Mar Ligure, per la sua collocazione geografica, risente principalmente dei venti legati alle perturbazioni provenienti dall'Atlantico. Spostandosi da Ovest verso Est, queste richiamano dapprima venti da Sud mentre, quando si allontanano dall'area, lasciano il posto a venti da Nord Ovest.

Il vento dominante è il Libeccio, che proviene da Sud-Ovest e dà luogo a forti mareggiate che interessano soprattutto la riviera di levante e le coste toscane, mentre lo Scirocco, che proviene dal Golfo della Sirte (Sud Est), interessa maggiormente la riviera di ponente, con aria caldo/umida portatrice di pioggia e temporali.

Senza entrare nel dettaglio delle complesse dinamiche che si sviluppano nel bacino ligure, è da sottolineare come esista, sotto costa, una corrente litoranea con circolazione antioraria, variabile come intensità a livello stagionale ed interannuale, ma comunque persistente in quanto alimentata sia dalla corrente del Mediterraneo Occidentale che dalla corrente tirrenica (Figura 1-58).

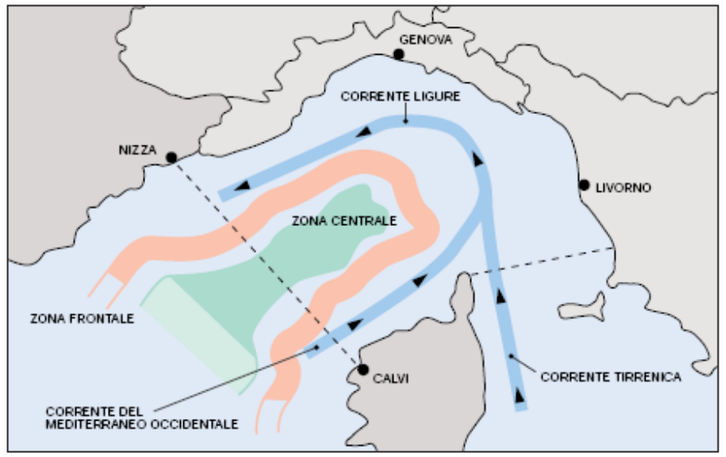


FIGURA 1-58 - MARE LIGURE: LE PRINCIPALI STRUTTURE DINAMICHE E LE CORRENTI

Sulla base dei dati disponibili in letteratura[1], l'intensità della corrente che lambisce le coste liguri può essere stimata, al largo, in alcune decine di cm/s (mediamente circa 20 cm/s).

Nella baia di Vado Ligure tale corrente può essere considerata proveniente da Nord Est, parallela alla costa, con intensità variabile sino a 10 cm/s

2.3. Deflussi dei corsi d'acqua superficiali

La baia di Vado Ligure è caratterizzata dalla presenza di tre corsi d'acqua che in essa sfociano. Da Sud a Nord essi sono: il Torrente Segno, la cui foce è ubicata immediatamente a ponente della piastra multifunzionale, il Torrente Quiliano, che delimita verso ponente l'abitato di Zinola e segna l'inizio del Comune di Savona, e, infine, il Torrente Letimbro.

Nella Figura 1-59 si riporta la posizione della foce e la superficie del bacino di ciascuno dei tre corsi d'acqua.

Essi presentano un regime di tipo torrentizio, caratterizzato da intensi e poco frequenti picchi di portata e da lunghi periodi di siccità.

In assenza di misure dirette di portata, e volendo comunque fornire dei valori di portata che siano rappresentativi di una situazione media e ricorrente, potenzialmente in grado di influenzare in modo apprezzabile lo stato di qualità delle acque litoranee, sono ipotizzabile le seguenti entità:

- Torrente Segno = 10 m^3/s
- Torrente Quiliano = 14 m^3/s
- Torrente Letimbro = 15 m^3/s

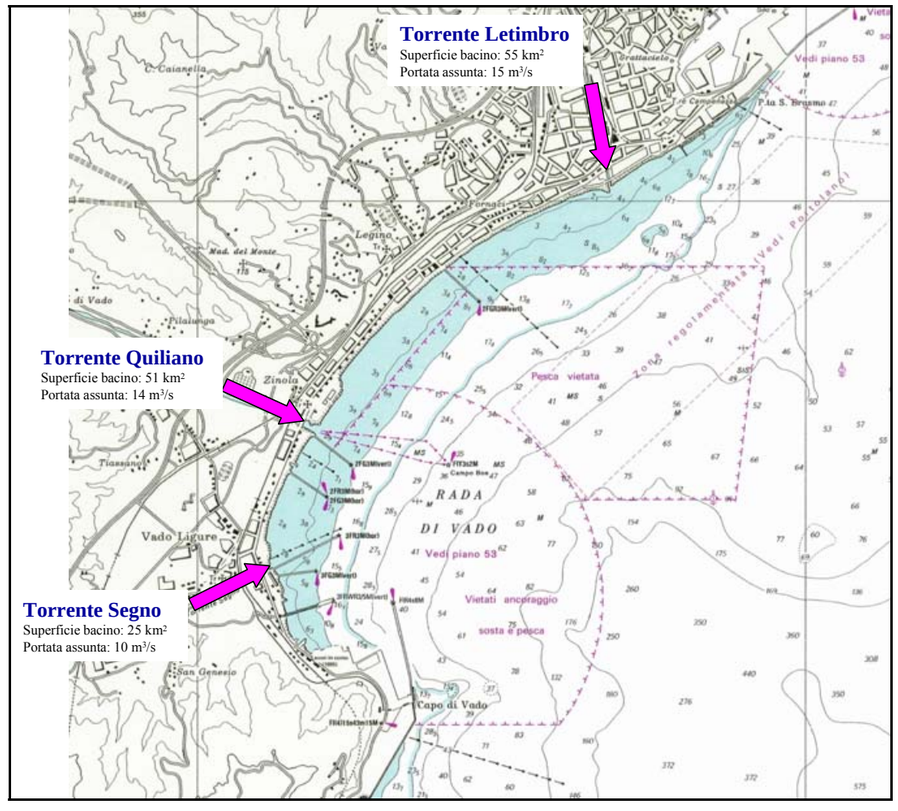


FIGURA 1-59 - CORSI D'ACQUA CHE SFOCIANO NELLA BAIA DI VADO LIGURE

1 Astraldi, M., G. Gasparini, "La circolazione costiera nel Mar Ligure orientale". Ist. Biol. Univ. Genova, 1986.
Cerrano C., Ponti M., Silvestri S. "Guida alla biologia marina del Mediterraneo". Ananke Edizioni, ISBN 88-7325-050-5, 2004.
Relini G., "Dominio pelagico; il Santuario dei cetacei Pelagos". Museo Friulano di Storia Naturale, Udine, ISBN 88 88192 30 1, 2007.
Laghi, M., "Analisi della variabilità della circolazione del Mar Mediterraneo". Tesi di laurea in Oceanografia e Meteorologia, Università di Bologna, 2003.

2.4. Il modello matematico Delft3D-Flow

Il modello idrodinamico e dispersivo Delft3D-FLOW simula flussi e fenomeni di trasporto indotti dal regime mareale o da particolari situazioni meteorologiche in regime di moto vario sia con schematizzazioni bidimensionali che tridimensionali compresi gli effetti delle differenze di densità dovute a temperature non uniformi o alla distribuzione di salinità.

Le equazioni del moto, risolte con uno schema numerico incondizionatamente implicito alle differenze finite, vengono applicate lungo una griglia curvilinea che permette, per questa sua caratteristica, di seguire bene le variazioni batimetriche del fondale adottando elementi di dimensioni ridotte nelle zone di maggiore interesse, ed elementi di maggiori dimensioni nelle aree in cui non esistano apprezzabili variazioni geometriche.

Il modello include algoritmi che tengono conto dei seguenti fenomeni fisici:

- Gradienti della superficie libera (effetti barotropici)
- Effetti della rotazione terrestre (forza di Coriolis)
- Acqua con densità variabile (equazioni di stato)
- Gradienti orizzontali di densità (effetti baroclinici)
- Turbolenza indotta dai flussi (turbolenza di massa e di quantità di moto - modello di chiusura della turbolenza)
- Trasporto del sale e di altre sostanze conservative - scambio di calore
- Forzante dovuta all'oscillazione mareale al contorno libero
- Sforzo tangenziale sulla superficie liquida dovuto al vento, variabile nello spazio e nel tempo
- Sforzo tangenziale sul fondo variabile nello spazio
- Pressione atmosferica sulla superficie liquida, variabile nello spazio e nel tempo
- Processo di allagamento ed emersione dei bassifondi soggetti a marea
- Scambio di calore attraverso la superficie libera
- Processi di pioggia ed evaporazione
- Forze generate dalla marea
- Effetti di flussi secondari nelle equazioni della quantità di moto nel caso bidimensionale e scabrezza laterale lungo i muri verticali
- Influenza delle onde sulla scabrezza di fondo (2D e 3D), sforzi indotti dalle onde e flussi di massa (solo nel caso bidimensionale) attraverso strutture idrauliche.

Il modello risolve le equazioni di moto vario in due (valori medi sulla profondità) o in tre dimensioni, considerando un sistema costituito dalle equazioni orizzontali del moto, l'equazione di continuità e le equazioni di trasporto.

Per completezza vengono riportate le equazioni fondamentali mentre per ulteriori approfondimenti si rimanda alla descrizione concettuale del modello riportata nella documentazione ufficiale del modello edita a cura del laboratorio di Idraulica di Delft (Olanda).

L'equazione di continuità (mediata sulla profondità) in coordinate curvilinee ortogonali lungo il piano orizzontale è la seguente:

$$\frac{\partial(\zeta)}{\partial t}+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)u\right]}{\partial\xi}+\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)v\right]}{\partial\eta}\right\}=Q$$

con Q = quantità sorgente per unità di superficie dovuta a scarichi o prelievi d'acqua, precipitazione e evaporazione.

Le equazioni della quantità di moto nelle direzioni □□e□□□sono le seguenti:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial u}{\partial\xi}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial u}{\partial\eta}+\frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial u}{\partial\sigma}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial\eta}+$$

$$-\frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial\zeta}-fv=-\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\xi\xi}}}P_\xi+F_\xi+\frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\nu_v\frac{\partial u}{\partial\sigma}\right)+M_\xi$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial v}{\partial \xi}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial v}{\partial \eta}+\frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial v}{\partial \sigma}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi}+$$
$$-\frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta}-fu=-\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\eta\eta}}}P_\eta+F_\eta+\frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\nu_v\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right)+M_\eta$$

Per una maggiore comprensione dell'equazione precedente si riporta la spiegazione dei principali simboli in essa contenuti:

ξ,η	=	coordinate curvilinee orizzontali [m]
ζ	=	livello del pelo libero sopra il piano di riferimento [m]
d	=	profondità [m]
σ	=	coordinate verticali scalate, valutate come funzione della profondità e del livello del pelo libero(d,ζ)
u,v	=	componenti orizzontali della velocità [m/s]
ω	=	componente nel sistema σ delle velocità nella direzione σ [m/s]
$\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}$	=	coefficienti per trasformare coordinate curvilinee in coordinate rettangolari [m]
P_ξ , P_η	=	gradiente pressione orizzontale nelle direzioni ξ e η
F_ξ , F_η	=	corrispondono alle"tensioni tangenziali" di Reynolds

L'effetto della variazione di densità è considerato solo nel termine del gradiente di pressione orizzontale, P_ξ e P_η (approssimazione di Boussinesq).
La profondità è assunta essere molto minore della scala delle lunghezze orizzontali e quindi si può ritenere valida l'approssimazione che usualmente si utilizza per "acque basse" per la quale l'equazione della quantità di moto verticale si riduce alla relazione della pressione idrostatica:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma}=-g\rho H$$

In questo modo si assume che le accelerazioni verticali siano piccole se paragonate all'accelerazione di gravità e possano quindi non essere prese in considerazione.

L'equazione di trasporto è formulata in coordinate curvilinee ortogonali lungo il piano orizzontale e in un sistema di coordinate **σ** lungo la verticale.

$$\frac{\partial (d+\zeta)c}{\partial t}+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc\right]}{\partial \xi}+\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc\right]}{\partial \eta}\right\}+\frac{\partial \omega c}{\partial \sigma}=$$
$$\frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left[D_H\frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial c}{\partial \xi}\right]+\frac{\partial}{\partial \eta}\left[D_H\frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial c}{\partial \eta}\right]\right\}+$$
$$\frac{1}{d+\zeta}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left[D_v\frac{\partial c}{\partial \sigma}\right]-\lambda_d(d+\zeta)c+S$$

con λ_d che rappresenta il processo di decadimento del primo ordine e S la quantità sorgente per unità di superficie dovuta a scarichi o prelievi d'acqua.

Per una maggiore comprensione dell'equazione precedente si riporta la spiegazione dei principali simboli in essa contenuti:

ξ,η	=	coordinate curvilinee orizzontali [m]
σ	=	coordinate verticali scalate valutate come funzione della profondità e del livello del pelo libero(d,ζ)
u,v	=	componenti orizzontali della velocità [m/s]
ω	=	componente nel sistema σ delle velocità nella direzione σ [m/s]
$\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}$	=	coefficienti per trasformare coordinate curvilinee in coordinate rettangolari [m]
D_H e D_V	=	coefficienti di dispersione orizzontale e verticale [m^2/s]

Poiché nelle simulazioni prese in esame nel presente studio vengono adottati solo traccianti passivi conservativi, il termine che contiene il parametro □d non viene considerato.

Il coefficiente di diffusione orizzontale viene usualmente considerato costituito da 3 parti: una parte dovuta alla "turbolenza 2D", una parte dovuta alla "turbolenza 3D" ed una parte dovuta alla diffusione molecolare.

La parte 2D è associata al rimescolamento dovuto a moti e forze orizzontali che non possono essere risolte dalla maglia orizzontale (sub-grid scale turbulence). La parte 3D si riferisce alla turbolenza tridimensionale ed è legata alla viscosità dinamica che è valutata seguendo il modello di chiusura della turbolenza.

Indicando questi 3 termini con D_{2d}, D_{3d} e D_{mol} , si può dire che:

$D_H = D_{2d} + D_{3d} + D_{mol}$

La somma degli ultimi 2 termini costituisce il coefficiente di diffusione verticale:

$D_V = D_{3d} + D_{mol}$

Nel caso di simulazioni strettamente bi-dimensionali, l'unico coefficiente di diffusione che rimane è DH.
Per le simulazioni, eseguite nel presente studio, sono state fatte alcune assunzioni e semplificazioni di seguito brevemente riportate:

- l'effetto della curvatura terrestre non è stata considerata e il parametro di Coriolis è stato assunto uniforme;
- considerando la scala delle analisi effettuate, per la simulazione degli sforzi tangenziali, la scabrezza laterale lungo i contorni chiusi non è stata presa in considerazione (free slip);
- il flusso attraverso contorni chiusi o attraverso il fondo è pari a zero;
- i gradienti di pressione sulla superficie libera (barotropici) non sono stati considerati.

Le equazioni del moto, risolte con uno schema numerico incondizionatamente implicito alle differenze finite, vengono applicate lungo una griglia curvilinea che permette, per questa sua caratteristica, di seguire bene le variazioni batimetriche del fondale adottando elementi di dimensioni ridotte nelle zone di maggiore interesse, ed elementi di maggiori dimensioni nelle aree in cui non esistano apprezzabili variazioni geometriche.

2.4.1. La schematizzazione dell'area di studio

La predisposizione del modello matematico idrodinamico richiede, come attività preliminare e indispensabile, la definizione della maglia di calcolo, rispetto alla quale tutte le grandezze di interesse verranno poi definite.

In Figura 1-60 si riportata la griglia a maglia curvilinea definita per schematizzare la zona della baia di Vado Ligure. Come si può notare la maglia è a risoluzione variabile, con una grande densità di maglie nella zona del porto, dove le informazioni devono essere maggiormente dettagliate, e si vanno via via diradando verso il mare aperto dove la morfologia della zona è meno variabile e, quindi, viene richiesta una minore precisione locale nella sua descrizione.

La batimetria associata a tale maglia è invece riportata in Figura 1-61.

I dati batimetrici, interpolati sulla maglia di calcolo, sono stati desunti dalle carte nautiche a diverso dettaglio, integrate, nella zona del porto, dai rilievi batimetrici più recenti fatti condurre dall'Autorità Portuale di Savona nel Febbraio 2006.

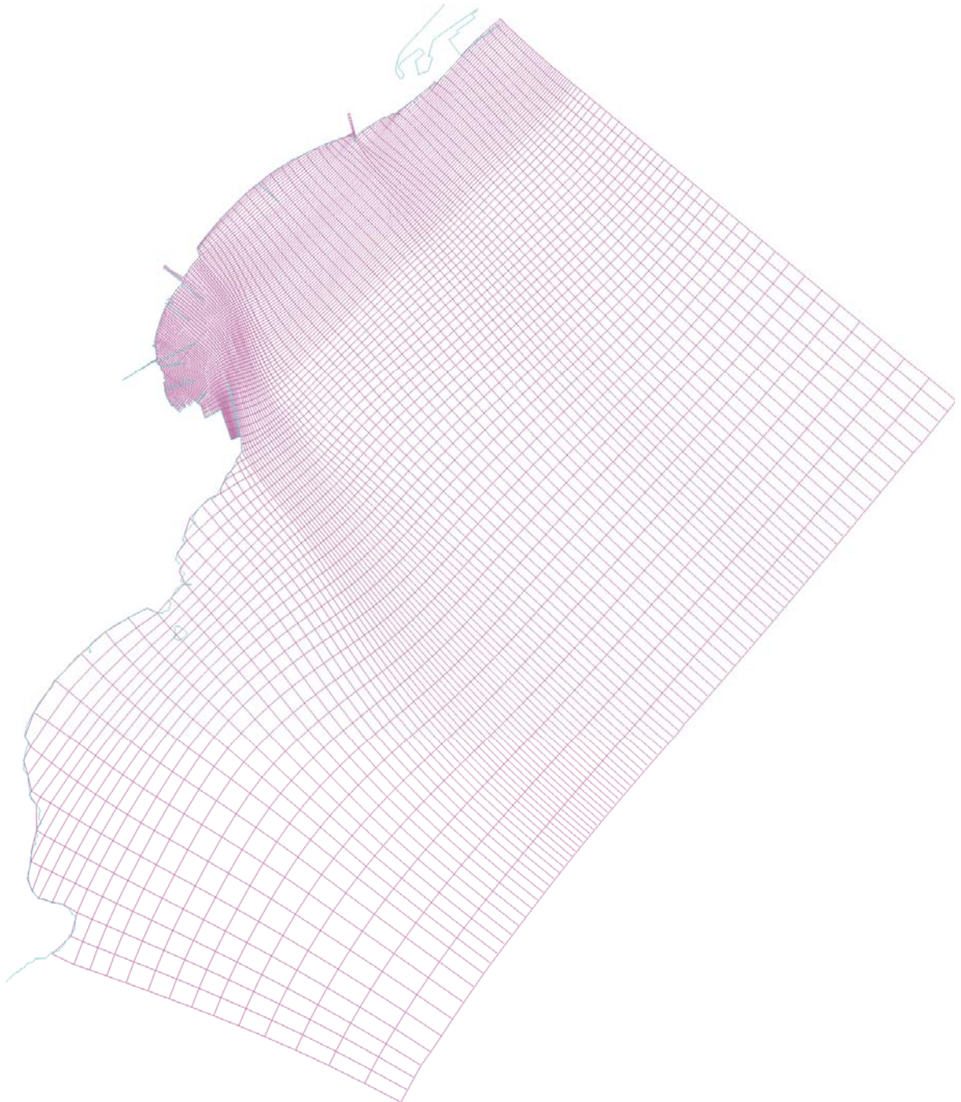


FIGURA 1-60 - SCHEMATIZZAZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO DEL MODELLO IDRODINAMICO CON UNA GRIZLIA A MAGLIA CURVI-LINEA

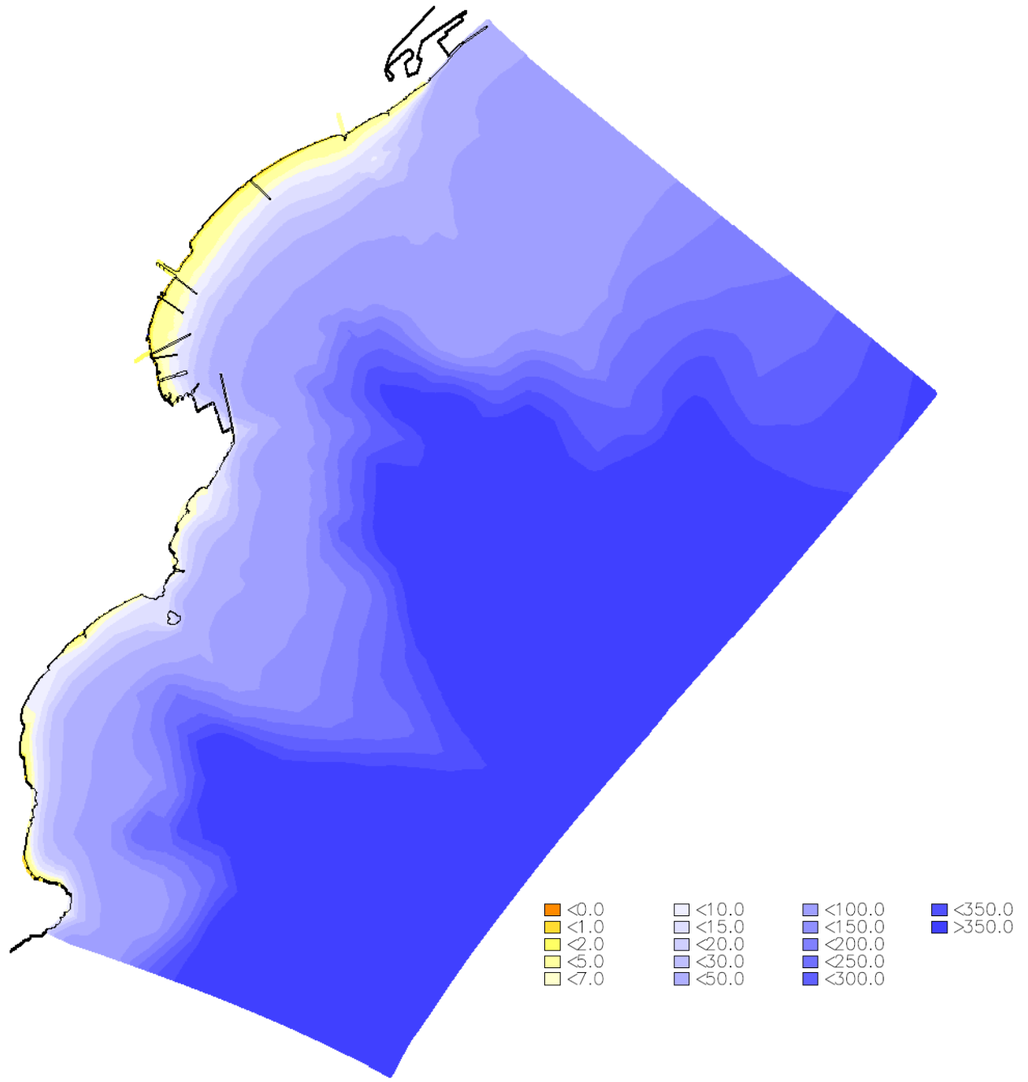


FIGURA 1-61 - BATIMETRIA APPLICATA ALLA MAGLIA DI CALCOLO DELLA FIGURA 1-60.

Il fondale marino degrada rapidamente a profondità elevate raggiungendo, all'interno del dominio di calcolo, i 700 m di profondità. Questa caratteristica ha implicato che, soprattutto per identificare gli effetti idrodinamici indotti dal vento, è stato necessario utilizzare il modello secondo uno schema tridimensionale.
Adottando una schematizzazione 3D, è stato possibile analizzare l'effetto del vento sugli strati superficiali e, di conseguenza, la distribuzione delle velocità in profondità. In particolare è stata utilizzata una discretizzazione a strati continui (i cosiddetti "σ-layers") con gli spessori suddivisi come nel seguito (dal meno profondo al più profondo):

- primo strato: 5% della profondità (strato superiore)
- secondo strato: 10% della profondità
- terzo strato: 20% della profondità
- quarto strato: 30% della profondità
- quinto strato: 35% della profondità (strato più profondo)

Un esempio di schematizzazione tridimensionale è riportata nella Figura seguente.

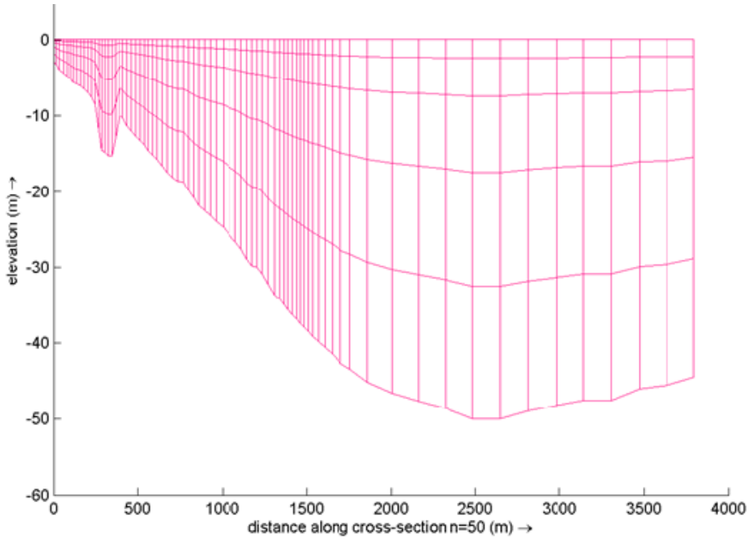


FIGURA 1-62 -ESEMPIO DI SCHEMATIZZAZIONE TRIDIMENSIONALE A "σ-LAYERS"

Le forzanti, descritte nei paragrafi precedenti, in grado di condizionare la circolazione idrodinamica nella baia di Vado Ligure, ed in particolare nella zona del porto, sono le seguenti; :

- vento;
- marea;
- correnti litoranee;
- deflussi dei corsi d'acqua superficiali.

Con riferimento alle condizioni anemometriche, considerando che le correnti da vento diventano significative solo se le velocità del vento sono superiori a 5 m/s, si è ritenuto che gli scenari predisposti nell'ambito dell'analisi dovessero considerare:

- vento da Sud-Est (Scirocco) con intensità di 7 m/s;
- vento da Nord-Est (Grecale) con intensità di 7 m/s;
- vento da Nord-Ovest (Maestrale) con intensità di 10 m/s.

Per le altre forzanti, invece, sono stati considerati i seguenti valori:

- marea sinusoidale con periodo di 12 ore ed escursione di 20 cm (± 10 cm s.l.m.m.), applicata al limite esterno del dominio di calcolo;
- corrente litoranea parallela alla linea di costa e rivolta in direzione Sud-Ovest, con intensità variabile fino a 10 cm/s nella zona più esterna del dominio di calcolo;
- deflussi da Torrente Segno, dal Torrente Quiliano e dal Torrente Letimbro pari, rispettivamente, a 10 m^3/s, 14 m^3/s e 15 m^3/s.

3. DATI DI RIFERIMENTO PER L'ANALISI DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE MARINO COSTIERE

L'area litoranea in cui sono previsti in nuovi interventi per la realizzazione della piastra di Vado Ligure, la costruzione del nuovo porto turistico e la risistemazione dei tratti fronte mare, è caratterizzata dalla presenza di lidi balenabili a nord della radice della piattaforma verso i litorali di Zinola e Fornaci e a sud nel tratto compreso tra la piattaforma e porto Vado.

In seguito alla modifica del progetto Definitivo con l'avanzamento dell'area in rilevato di circa 50 m e l'inserimento di una schiera di cassoni sul bordo esterno della piattaforma era emersa da parte della Regione Liguria, era emersa la necessità di indagare ad un livello più approfondito anche il potenziale impatto delle varianti di progetto sulla qualità della acque di balneazione. Una riduzione della capacità di scambio del sistema potrebbe infatti determinare un potenziale peggioramento della qualità delle acque litoranee compromettendo così l'uso legittimo delle coste, in primis, la balneazione in prossimità delle spiagge locate a nord ed a sud della piattaforma.

Per rispondere alle richieste della Regione è stato quindi predisposto uno studio ad hoc volto ad analizzare la qualità delle acque costiere con specifico riferimento a quegli aspetti collegati alla balneazione.

La normativa vigente, il Decreto Legislativo n.116 del 30 maggio 2008 che recepisce la direttiva 2006/7/CE concernente la gestione delle acque di balneazione stabilisce che i principali indicatori utilizzati per valutare la qualità delle acque di balneazione costiere e superficiali sono costituiti dalla concentrazione delle popolazioni batteriche dell'Escherichia Coli e degli Enterococchi Intestinali.

Per la valutazione della qualità delle acque balneazione nel tratto litoraneo di interesse è stato ritenuto nelle condizioni di riferimento, vale a dire nella configurazione delle opere di Progetto Definitivo approvata, è stato ritenuto di utilizzare come parametro di riferimento per la qualità delle acque, la concentrazione di un inquinante non conservativo rappresentativo una popolazione batterica.

Il presente capitolo illustra le attività eseguite nell'ambito dello studio per l'analisi di un tracciante non conservativo di tipo batterico che sono consistite ne:

- la raccolta ed le analisi dei dati esistenti sulla qualità delle acque
- l' identificazione delle potenziali sorgenti di inquinamento batterico
- la predisposizione e la taratura del modello per la dispersione di un tracciante di tipo batterico

3.1. I dati disponibili

La prima attività eseguita è stata la raccolta e l'analisi dei dati disponibili di qualità delle acque con particolare riferimento alle misure di concentrazione di contaminanti batterici. Queste analisi hanno avuto un duplice obbiettivo: la caratterizzazione dell'ambiente nella situazione attuale e l'identificazione delle più probabili e potenziali sorgenti di un carico batterico nell'area litoranea in esame.

La base di partenza per le analisi di qualità delle acque è costituita dal set di dati raccolti dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Regione Liguria (ARPAL) nell'ambito della attività per il monitoraggio e classificazione della qualità delle acque di balneazione cos' come previsto a termine di legge.

ARPA Liguria dispone di una rete di controllo lungo tutto il tratto costiero regionale interessato da attività balneari per un totale di 368 punti di cui 97 punti nella sola provincia di Savona.

Nell'ambito di questo studio i punti di maggiore interesse sono quelli localizzati in prossimità dell'area di intervento e sono:

- La stazione Foce del Torrente Quiliano immediatamente a nord della foce stessa
- La stazione Aurelia 5 a sud della foce del Quiliano
- La stazione Aurelia 100
- La stazione Foce del Torrente Segno
- La stazione Aurelia 320 in località porto Vado

La mappa con l'ubicazione dei punti di misura di ARPAL è riportata di seguito in Figura 1-63.



FIGURA 1-63 - UBICAZIONE DELLE STAZIONI ARPAL PER LA MISURA DEI PARAMETRI DI QUALITÀ DELLE ACQUE DI BALNEAZIONE

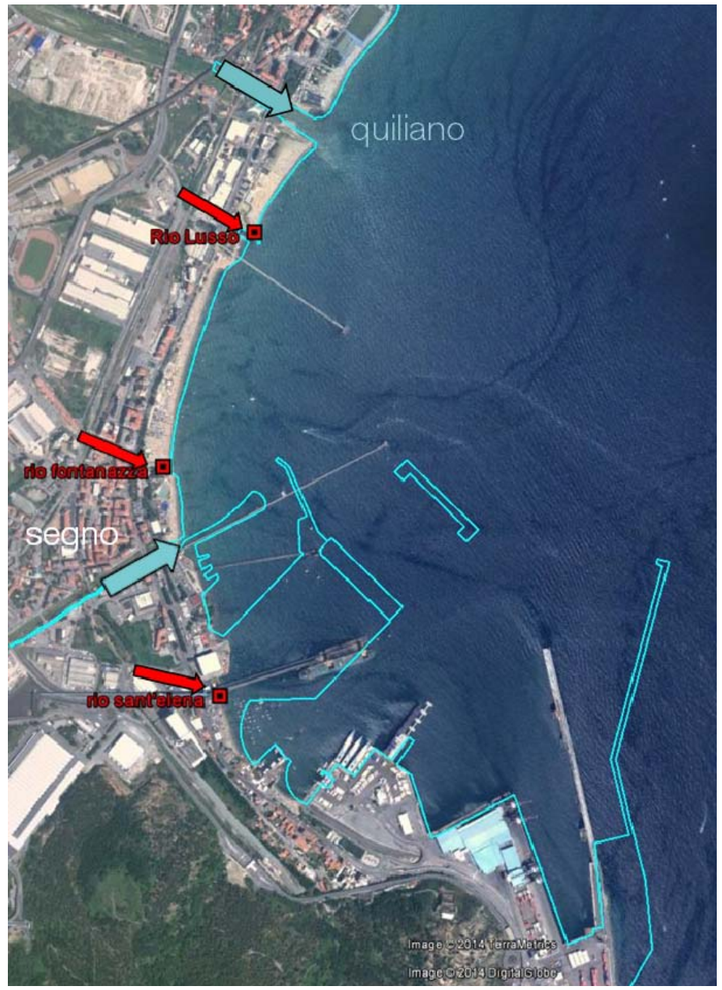


FIGURA 1-64 - POSIZIONE DEI RILASCI DEI CARICHI BATTERICI IN CORRISPONDENZA DEI CORSI D'ACQUA E RII SFOCIANTI NELLA RADA DI VADO

Il set di dati ambientali sulla qualità delle acque reso disponibile da ARPAL non si presenta tuttavia omogeno né in riferimento alla frequenza dei campionamenti eseguiti né ai parametri rilevati. Le modalità di monitoraggio ed acquisizione dei dati sono infatti cambiate nel corso del tempo in seguito al recepimento della nuova Direttiva Europea sulle acque di balneazione ed al conseguente aggiornamento della normativa tecnica di riferimento.

La normativa nazionale sulle acque di balneazione in vigore fino al 2009 derivava dalla direttiva comunitaria n. 76/160 dell'8 dicembre 1975 che perseguiva due obbiettivi fondamentali: la tutela della salute pubblica e la salvaguardia dell'ambiente ed è stata recepita in Italia con il DPR n. 470 dell'8 giugno 1982

Per definire la balneabilità delle acque il DPR 470/82 considerava 12 parametri: tre erano indicatori di inquinamento fecale (Coliformi totali, Coliformi fecali, Streptococchi fecali); due, facoltativi, erano rivolti alla ricerca di specifici patogeni (Salmonella e Enterovirus); altri quattro parametri erano essenzialmente indicatori di inquinamento di origine industriale (pH, fenoli, sostanze tensioattive, oli minerali); i restanti tre parametri (ossigeno disciolto, colorazione, trasparenza) fornivano indicazioni correlabili ai processi eutrofici e ai problemi estetici delle acque ma potevano anche interessare l'aspetto igienico-sanitario in caso di "fioritura" di alghe produttrici di biotossine. La misura dei parametri di qualità era prevista con una frequenza minima bimensile secondo i metodi previsti in letteratura.

La nuova normativa sulla qualità della acque che subentra a partire dal 2010 alla vecchia normativa è riportata nel Decreto Legislativo 30 maggio 2008, n. 116 che recepisce la Direttiva Europea 2006/7/CE relativa alla gestione della qualità delle acque di balneazione e abroga la direttiva 76/160/CEE.

La nuova legge stabilisce i nuovi criteri e parametri per la valutazione delle acque di balneazione ed istituisce anche un sistema per la gestione e la classificazione delle acque di balneazione. In conformità a questa normativa i nuovi parametri di controllo sono:

– la concentrazione degli Enterococchi intestinali espressi in UFC/100 ml
– la concentrazione dell'Escherichia Coli espressi in UFC/100 ml

Oltre a questi, per ciascuna stazione, è previsto anche il monitoraggio di altri parametri di tipo fisico quali: Temperatura aria, Temperatura acqua, Direzione vento, Intensità vento, Stato del mare, Direzione di provenienza onde, Intensità della corrente, Stima visuale altezza onde, Condizioni meteo presenza di pioggia e Copertura nuvolosa.

Il Decreto legge stabilisce anche le norme tecniche che definiscono le distanze minime tra due punti di prelievo, le modalità di prelevamento dei campioni e le metodiche analitiche. La norma stabilisce anche che i campioni devono essere prelevati 30 centimetri sotto la superficie dell'acqua e in acque profonde almeno 1 metro. Le date di prelievo sono distribuite nell'arco di tutta la stagione balneare, con un intervallo tra le date di prelievo che non supera mai la durata di un mese. Nel caso del superamento dei limiti di legge sono previste delle misure aggiuntive di controllo secondo quanto previsto dalla legge.

Il set di dati di qualità delle acque a disposizione può dunque esser suddiviso in due blocchi: il primo raccoglie dati di qualità dal 2006 al 2009 e contiene le misure sulla concentrazione di Coliformi Totali e Fecali oltre che ad altri parametri fisici/chimici. Il secondo copre il periodo dal 2010 al 2014 e raccoglie i dati sulle concentrazioni dell'Escherichia Coli e degli Enterococchi intestinali ed altri parametri fisici.

3.2. L'analisi dei dati

La seconda attività scolta dopo avere raccolto e classificati il set di dati di qualità a disposizione è stata l'esecuzione delle analisi statistica dei dati temporali in ciascun punto di controllo, e le analisi sulla correlazione spaziale dei dati e la correlazione con i dati di precipitazione locali.

Le analisi statistiche

Le analisi statistiche dei dati sono state condotte in riferimento a ciascuno dei parametri di contaminazione batterica (Coliformi totali, Coliformi Fecali e Streptococchi in riferimento al DPR 470/82 e L'Escherichia Coli ed Enterococchi intestinali per il D.Lgs 116/08) e per ciascuna stazione di misura.

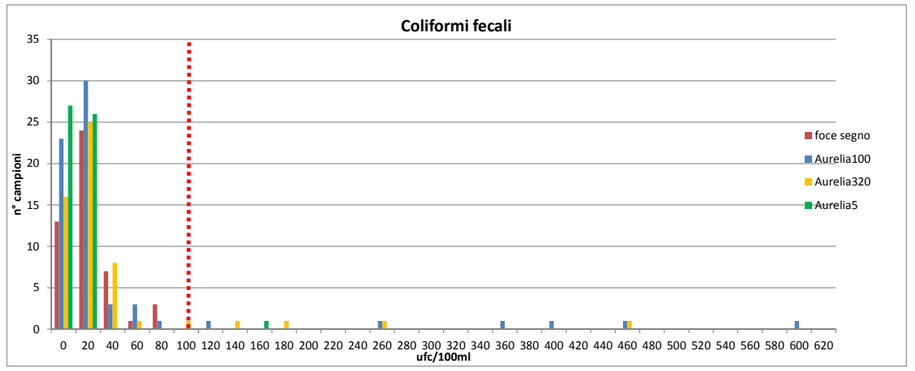
Nei grafici sottostanti sono riportati per ciascuna parametro microbiologico considerato gli istogrammi di frequenza dei valori campionati. In rosso tratteggiato è riportato anche il valore limite di legge per un singolo campione così come previsto dalla normativa.

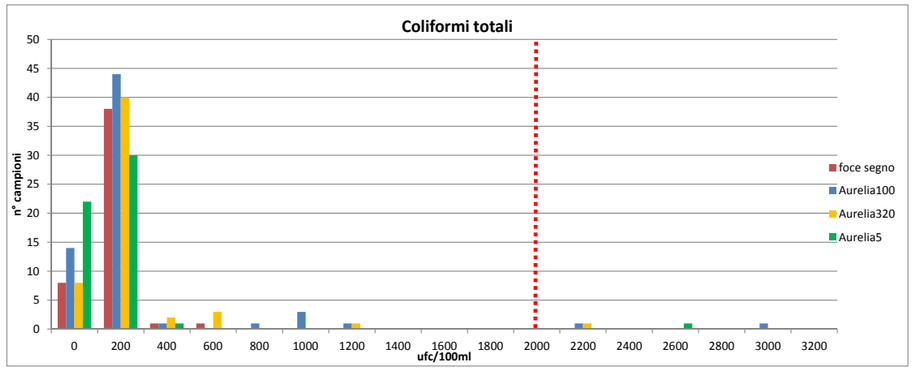
Dall'analisi dei dati si osserva che lo stato generale delle acque di balneazione lungo il litorale di vado si presenta in uno stato di qualità "eccellente" e tutto il tratto costiero ha ricevuto la certificazione di bandiera blu nel corso degli ultimi anni.

Gli episodi di superamento dei limiti di legge sono stati sporadici ed occasionali; in riferimento alla normativa precedente tra il 2006 ed il 2009 si sono registrati complessivamente 11 superamenti dei limiti di concentrazione dei Coliformi fecali, 10 degli Streptococchi fecali mentre i Coliformi totali hanno ecceduto i limiti di legge solo in 4 occasioni.

In riferimento alla nuova normativa entrata in vigore nel 2010, si sono verificati due superamenti nell'Aprile-Maggio 2014 sia nei valori dell'Escherichia Coli che degli Enterococchi Intestinali. In ogni caso, gli episodi di superamento sono stati isolati e non si sono verificati dei superamenti in giorni consecutivi, segno che l'abbattimento del carico batterico è stato molto rapido.

Dalle analisi di frequenza si osserva inoltre che in tutte le stazioni i limite di legge vengono rispettati nella misura del 90-100% in funzione del parametro considerato.





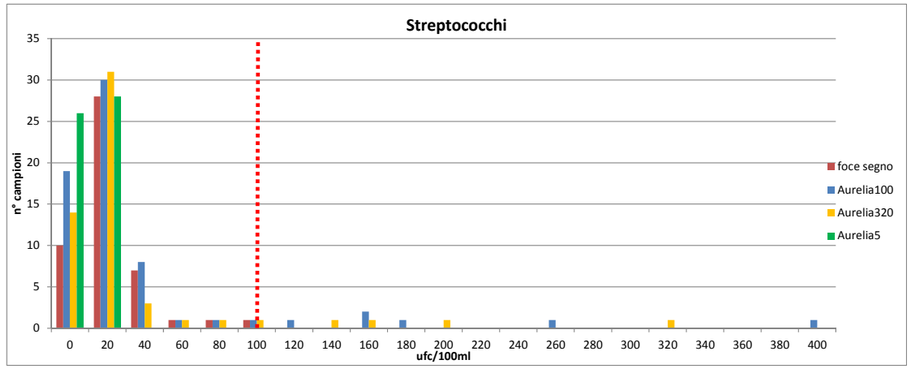
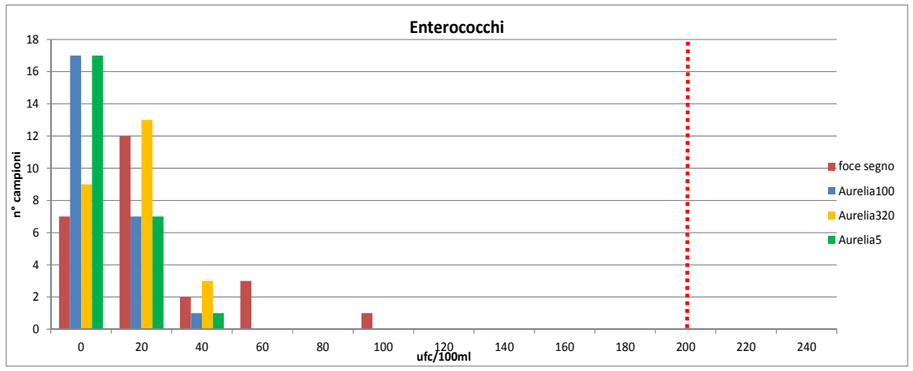


FIGURA 1-65 - ISTOGRAMMA DI FREQUENZA DELLE MISURE DI CONTAMINAZIONE MICROBIOLOGICA TRA IL 2006 E IL 2009 (RIF. DPR 470/82) PER IL LITORALE DI VADO LIGURE



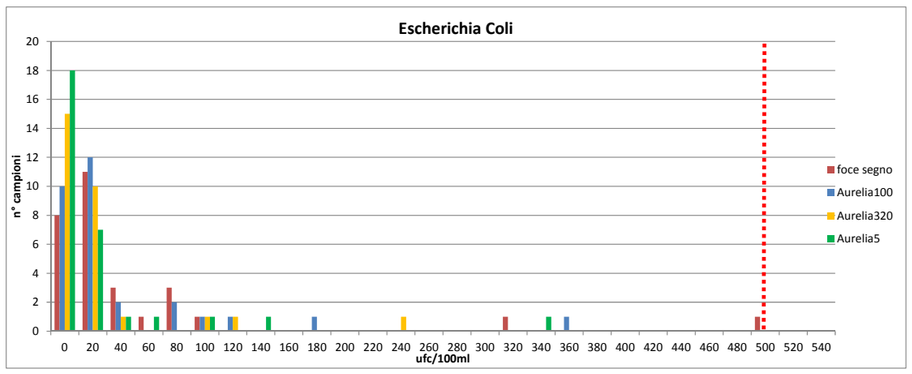


FIGURA 1-66 - ISTOGRAMMA DI FREQUENZA DELLE MISURE DI CONTAMINAZIONE MICRO-BIOLOGICA TRA IL 2010 E IL 2014 (RIF. D.LGS 116/08) PER IL LITORALE DI VADO LIGURE

Le correlazioni spaziali

Le analisi dell'andamento nello spazio dei valori misurati di concentrazione batteriche , hanno un duplice obbiettivo

- verificare una possibile correlazione spaziale tra gli episodi di inquinamento o di incremento delle concentrazioni batteriche rilevati lungo il litorale di Vado;
- verificare il trend di dispersione del tracciante, analizzando i valori in stazioni vicine.

Un incremento simultaneo dei valori di concentrazione in punti situati a grande distanza indica infatti che l'origine dell'episodio di contaminazione è determinato da fattori naturali esterni che interessano tutta l'area investigata (come ad esempio le precipitazioni). Viceversa una assenza di correlazione spaziale a larga scala indica che gli episodi di contaminazione sono probabilmente legati a delle immissioni puntuali e locali dovute presumibilmente a malfunzionamenti delle condotte di adduzione del depuratore civile di Savona oppure a scarichi occasionali di altra natura.

Per le analisi delle correlazioni spaziali si sono inizialmente identificati tutti gli episodi caratterizzati da dei livelli significativi di concentrazione batterica, considerando le popolazioni batteriche più importanti come Coliformi e l'Escherichia Coli. Successivamente si è proceduto ad una analisi visiva dei dati riportando su una mappa i valori misurati riferiti alla stessa campagna di misura. Le mappe della distribuzione spaziale delle concertazioni batteriche sono riportate nelle seguenti figure. Per facilità di lettura a fianco del valore misurato è stata anche inserito un pallino pieno con un diametro proporzionale al relativo valore in mood da enfatizzare l'importanza della misura.

L'analisi visiva dei dati rivela che gli episodi in cui è visibile un significativo incremento dei valori di concentrazione presentano una scarsa correlazione spaziale. I picchi di concentrazione sono generalmente localizzati nell'intorno di un punto e nella stazione vicina ma non si osservano incrementi di concentrazione nei punti più distanti. Questo indica che i fenomeni di contaminazione hanno un carattere locale e che l'abbattimento del carico batterico è di fatto rapido.

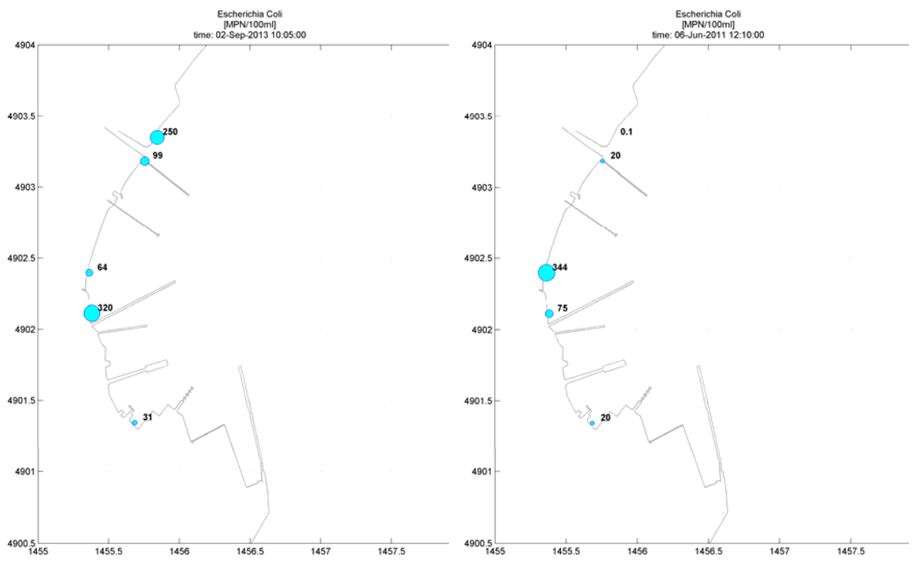


FIGURA 1-67 - DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'ANDAMENTO DELL'ESCHERICHIA COLI IN TRE EPISODI SIGNIFICATIVI

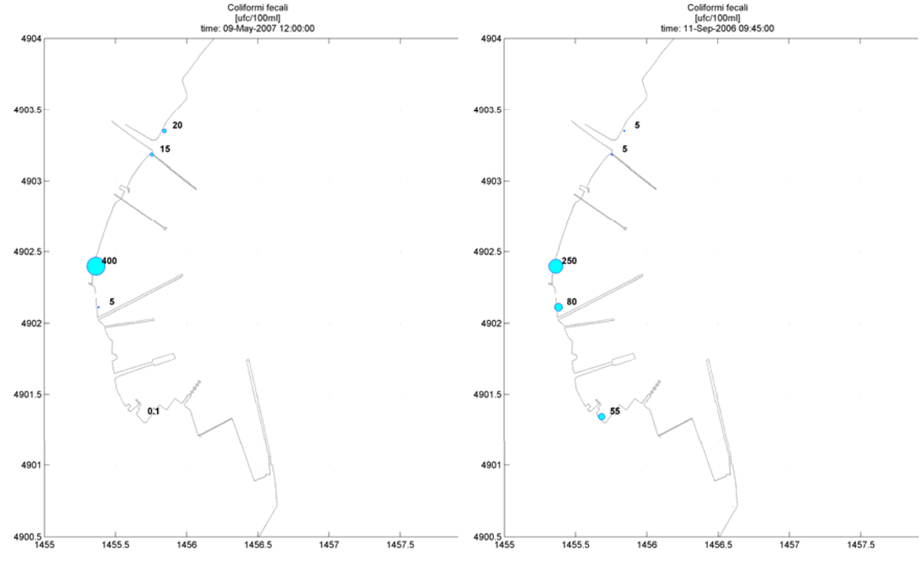
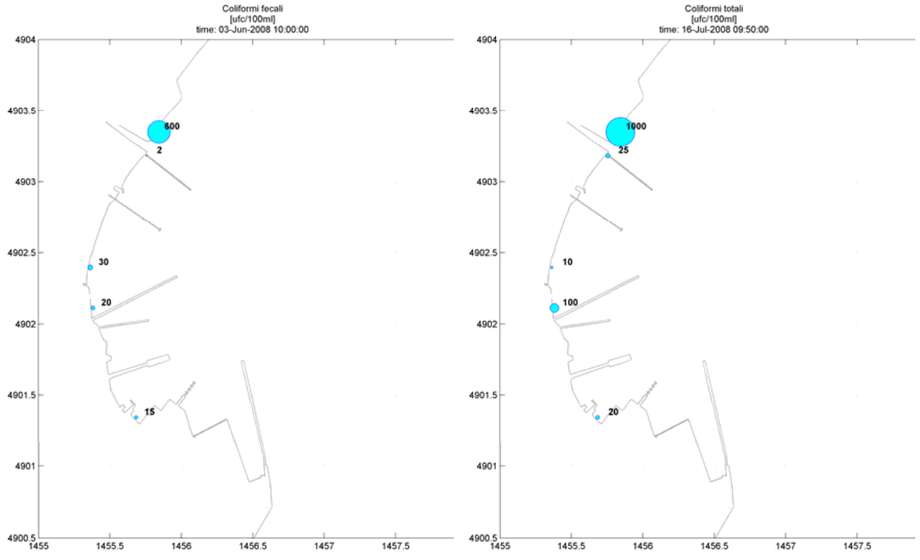


FIGURA 1-68 - DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'ANDAMENTO DEI COLIFORMI FECALI IN TRE EPISODI SIGNIFICATIVI



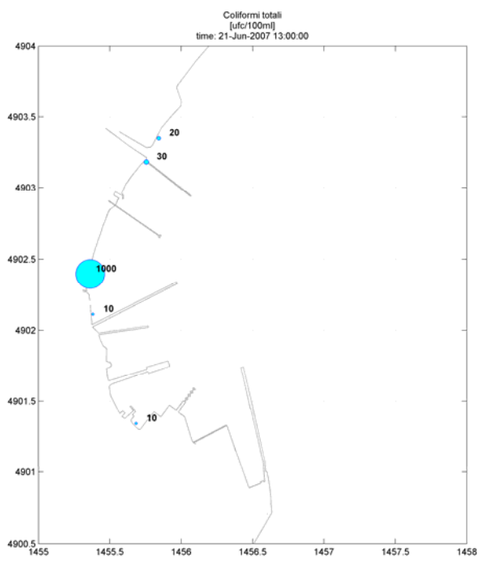


FIGURA 1-69 - DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'ANDAMENTO DEI COLIFORMI TOTALI IN TRE EPISODI SIGNIFICATIVI

Le correlazioni con le precipitazioni

Un ulteriore analisi dei dati disponibili è consistita nella correlazione tra i dati di precipitazione ed i valori di concentrazione batterica per capire se le fonti di contaminazione potessero essere legate al deflusso dei corsi d'acqua susseguente ad un evento piovoso.

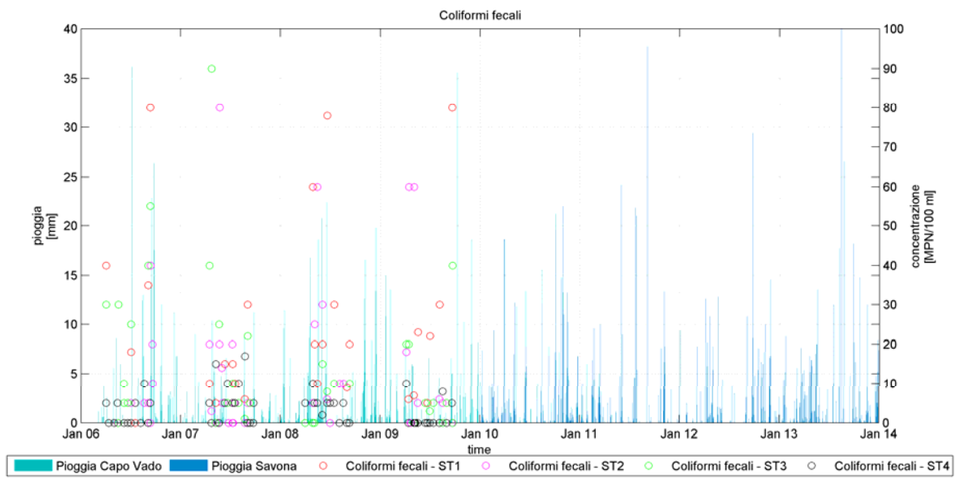
Per l'analisi sulla correlazione sono stati assunti come riferimento i dati di concentrazione batterica riportati in precedenza in tutte le stazioni di misura e le precipitazioni misurate alle stazioni meteorologiche di Capo Vado e all'Istituto Nautico di Savona. La correlazione è stata fatta considerando i valori di concentrazione batterica (dei Coliformi, degli Streptococchi e dell'Escherichia Coli) e i valori di precipitazione cumulata nelle 36 ore antecedenti l'evento considerato. I risultati per tipologia batterica sono presentati da Figura 1-70 a Figura 1-72.

Dalle analisi dei dati si nota come non vi sia un'apparente correlazione tra i dati di precipitazione e quelli di concentrazione.

Dalle analisi eseguite è quindi possibile concludere che eventuali contaminazioni batteriche nell'area sono molto probabilmente legate a delle immissioni accidentali di un carico batterico che viene quindi recapitato a mare attraverso i rii ed i torrenti che sfociano nell'area. L'origine di queste immissioni non è definita; potrebbe essere legata a malfunzionamenti delle condotte di adduzione del depuratore civile di Savona oppure a scarichi occasionali di altra natura.

Le principali sorgenti identificate di un carico batterico sono rappresentate dai Torrenti Segno, Quiliano e Letimbro e dai rii minori quali il Rio Fontanazza, il Rio Lusso ed il Rio Sant'Elena.

L'ubicazione delle fonti di contaminazione considerate in questo studio è riportata in Figura 1-64.



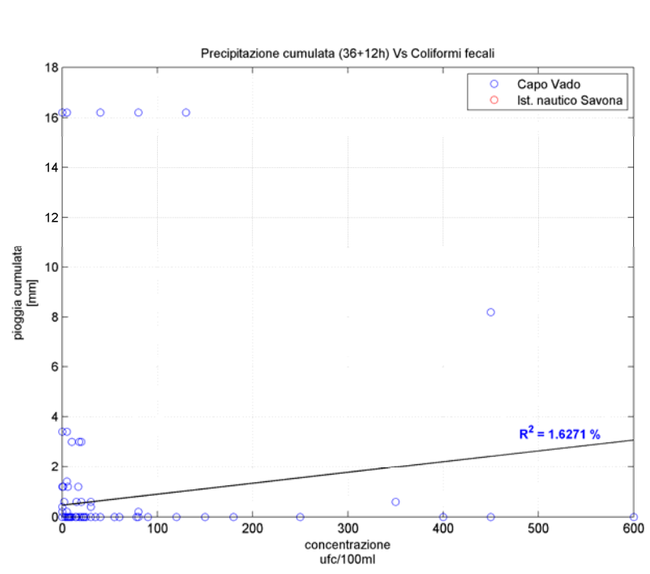
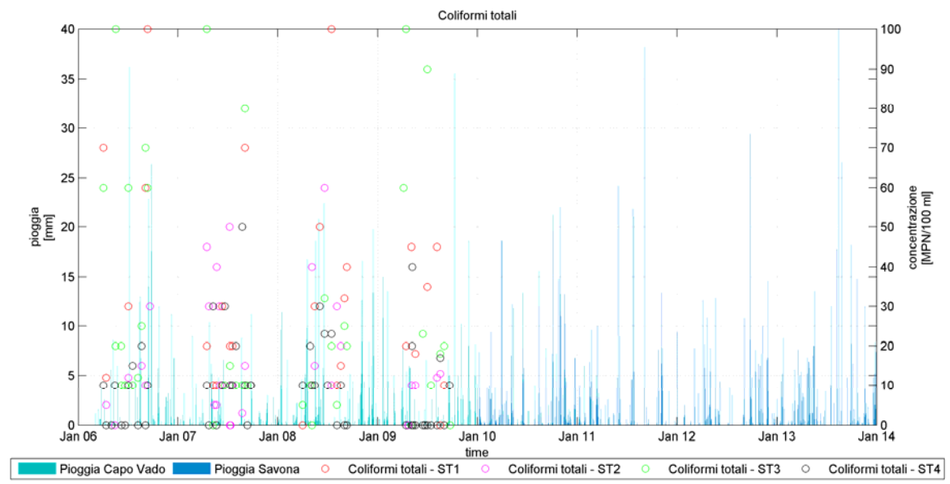


FIGURA 1-70 - ANALISI DI CORRELAZIONE TRA LA PRECIPITAZIONE CUMULATA E LE CONCENTRAZIONI DI COLIFORMI TOTALI



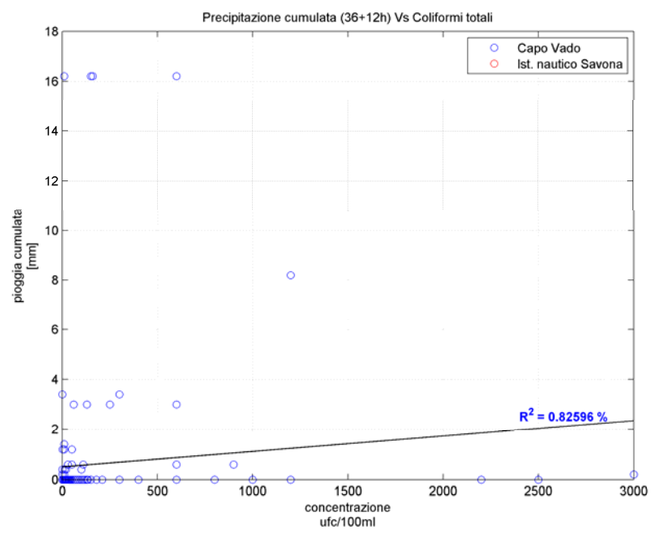


FIGURA 1-71 - ANALISI DI CORRELAZIONE TRA LA PRECIPITAZIONE CUMULATA E LE CONCENTRAZIONI DI COLIFORMI FECALI

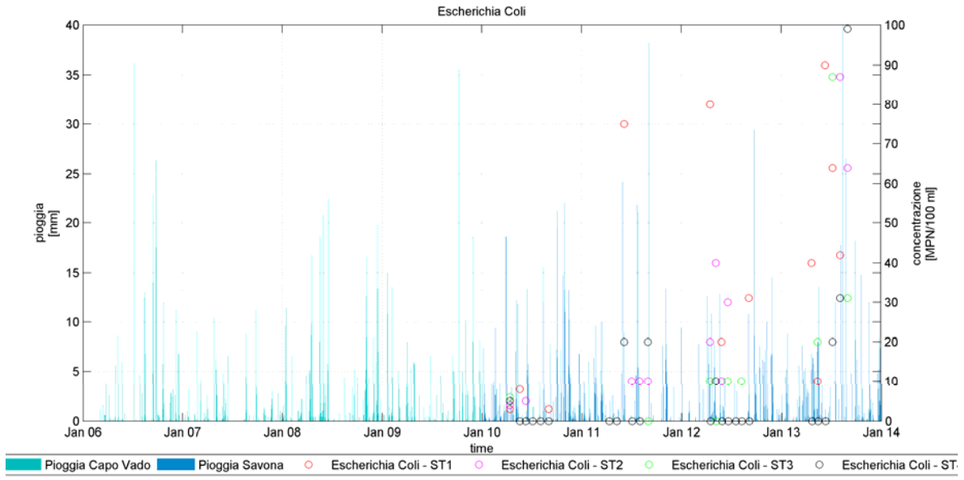


FIGURA 1-72 - ANALISI DI CORRELAZIONE TRA LA PRECIPITAZIONE CUMULATA E LE CONCENTRAZIONI DI ESCHERICHIA COLI

3.3. Il modello matematico Delft3D-WAQ

Conclusa l'analisi dei dati, elemento di base per la comprensione del sistema nello stato attuale e per l'identificazione delle principali forzanti naturali come fonte di potenziale contaminazione batterica, si è proceduto alla predisposizione di uno strumento modellistico in grado di simulare i processi di natura batterica osservati nella realtà ed idoneo quindi a valutare gli effetti in termine di dispersione di un inquinante batterico in differenti configurazioni di progetto.

Il modello utilizzato per lo studio della dispersione di un inquinante di tipo batterico è il Delft3D-WAQ, il modulo per lo studio della qualità delle acque che fa parte della più ampia suite di software Delft3D, un sistema integrato di modelli numerici sviluppato presso i laboratori dell'istituto di ricerca olandese "Deltares" per la simulazione in una schematizzazione 2 e 3 dimensionale dei processi che determinano i flussi, il trasporto di sedimenti, la propagazione del moto ondoso, la qualità delle acque e l'ecologia di un ambiente acquatico costiero e fluviale.

Il modello Delft3D-WAQ è in grado di riprodurre tutti i principali processi di tipo fisico, (bio) chimico e biologico che avvengono in un ambiente acquatico marino/fluviale e di determinare, quindi, l'evoluzione sia nello spazio che nel tempo dei principali parametri che descrivono da un punto di vista qualitativo lo stato del corpo idrico.

Il modello utilizza come base di riferimento per il calcolo dei processi, il database idrodinamico generato dal corrispettivo modulo idrodinamico Delft3D-FLOW, in cui sono archiviati, per ciascun cella di calcolo ed in molteplici istanti di tempo, le informazioni idrodinamiche riguardanti i flussi, i livelli del tirante idrico, la temperatura, la salinità, la viscosità e la diffusività.

In particolare, il Delft3D-WAQ utilizza delle librerie di calcolo basate su delle formulazioni matematiche riconosciute in letteratura scientifica, che sono in grado di simulare i processi che regolano la mortalità e la dinamica di una popolazione batterica sottoposta a delle forzanti naturali. In particolare in questo studio è stato fatto ri-

ferimento alle formulazioni empiriche sviluppate da Mancini (1978) per la valutazione del T_{90} ovvero il tempo necessario per abbattere del 90% la concentrazione iniziale del carico batterico ("Numerical estimates of Coliform bacteria mortality rates under various conditions").

Nelle presenti analisi, la dinamica della popolazione batterica è simulata supponendo un tasso di decadimento del primo ordine secondo la formulazione

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -k \times C(x,t)$$

in cui:

C è la concentrazione batterica
t il tempo
x il vettore indicante la posizione spaziale
k il coefficiente di decadimento batterico

Il coefficiente di decadimento k esprime il tasso di mortalità della popolazione batterica ed è in generale un parametro che dipende dalla intensità della radiazione ultravioletta, il principale agente di inattivazione della carica batterica, dalla salinità, dalla temperatura dell'acqua e dalle caratteristiche peculiari del ceppo batterico.

Il modello matematico utilizza come base di riferimento la medesima schematizzazione 3 dimensionale, caratterizzata dalla suddivisione della colonna d'acqua in 5 σ-layers di spessore variabile del modello idrodinamico così come spiegato nell'allegato sulle analisi idrodinamiche.

Nel modello utilizzato viene considerata la variazione della salinità dovuta alla dispersione dell'acqua dolce proveniente dai fiumi. La temperatura dell'acqua e l'intensità della radiazione ultravioletta, invece, sono stati considerati costanti ed uniformi assumendo dei valori tipici di uno scenario estivo.

Il tasso di mortalità della popolazione batterica (in questo caso l'Escherichia Coli), risulta, quindi, un parametro variabile nello spazio, nella colonna d'acqua e nel tempo.

3.3.1. La taratura del modello

La taratura del modello per la dispersione di un tracciante batterico ha riguardato essenzialmente la definizione dei parametri fisici che definiscono il coefficiente di decadimento tempo della popolazione batterica. Il tasso di mortalità batterica dipende infatti sostanzialmente da 4 fattori.

- La radiazione solare il principale agente di inattivazione batterica
- La temperatura dell'acqua
- La salinità
- La mortalità intrinseca del ceppo batterico considerato

Per la taratura del modello dispersivo è stata seguita la seguente procedura:

- inizialmente sono stati identificati degli eventi caratterizzati da valori significativi di contaminazione batterica che sono risultati essere 5, idonei ad essere utilizzati come termine di confronto;
- per ciascuno degli eventi considerati è stata predisposta una simulazione applicando come forzanti al contorno una marea media e uno scenario senza vento considerato che in tutti i casi esaminati le condizioni meteomarine erano caratterizzate da uno stato di agitazione da onda molto basso o assente e come condizione di rilascio una immissione costante nel tempo in modo da ottenere una condizione stazionaria;
- è stata eseguita un'analisi di sensitività del modello variando in modo sistematico i parametri relativi alla concentrazione di immissione e alle grandezze che determinano il coefficiente di mortalità batterica k.

Sulla base dei test effettuati è stato infine appurato che i valori che consentivano di ottenere la migliore corrispondenza tra i risultati misurati e quelli calcolati sono ca-

ratterizzati da valori tipici di uno scenario estivo con dei valori di circa 200 W/m^2 per la radiazione solare incidente ed di 26 °C per la temperatura dell'acqua di mare.

Riguardo la salinità è stata considerata una concentrazione salina al boundary del mare aperto pari a 38 ppt ed una concentrazione salina pari a zero in corrispondenza delle immissioni fluviali. Ovviamente questo ha determinato un campo di salinità non uniforme nell'area litoranea sia nello spazio che lungo la colonna d'acqua. Le zone più vicine alle foci , caratterizzate da una frazione maggiore di acqua di origine torrentizia presentano valori di salinità minori rispetto alle zone poste in mare aperto vicino al boundary esterno.

Applicando questi parametri si ottengono dei valori del T_{90}, ovvero il tempo necessario per abbattere la concentrazione iniziale del 90% variabile tra le 15 e le 35 ore in funzione della posizione spaziale e lungo la colonna d'acqua. In questo particolare contesto, infine , le variazioni temporali dei valori del k di decadimento sono risultate minime e sostanzialmente stazionarie. Le forzanti meteo-marine nell'area, infatti , come ampiamente discusso precedentemente, non sono in grado di determinare significativi cambiamenti nella circolazione idrodinamica locale e quello che ne risulta è di fatto una situazione di quasi stazionarietà sia in relazione alla circolazione idrodinamica che ai livelli di salinità.

I risultati delle simulazioni per la taratura del modello dispersivo-batterico sono presentati nelle seguenti figure in Figura 1-73 e Figura 1-74 per ciascuno dei casi simulati. Nelle figure i valori misurati sono rappresentati da cerchietti colorati mentre i valori calcolati dal modello vengono presentati come curve di iso-concentrazione. Entrambi i valori si riferiscono ai livelli di concentrazione misurati nello strato superficiale della colonna d'acqua. nell'istante finale della simulazione quando è stato raggiunto la condizioni di equilibrio stazionario. Si noti che i limiti superiori delle scale di colore nelle figure sono diversi.

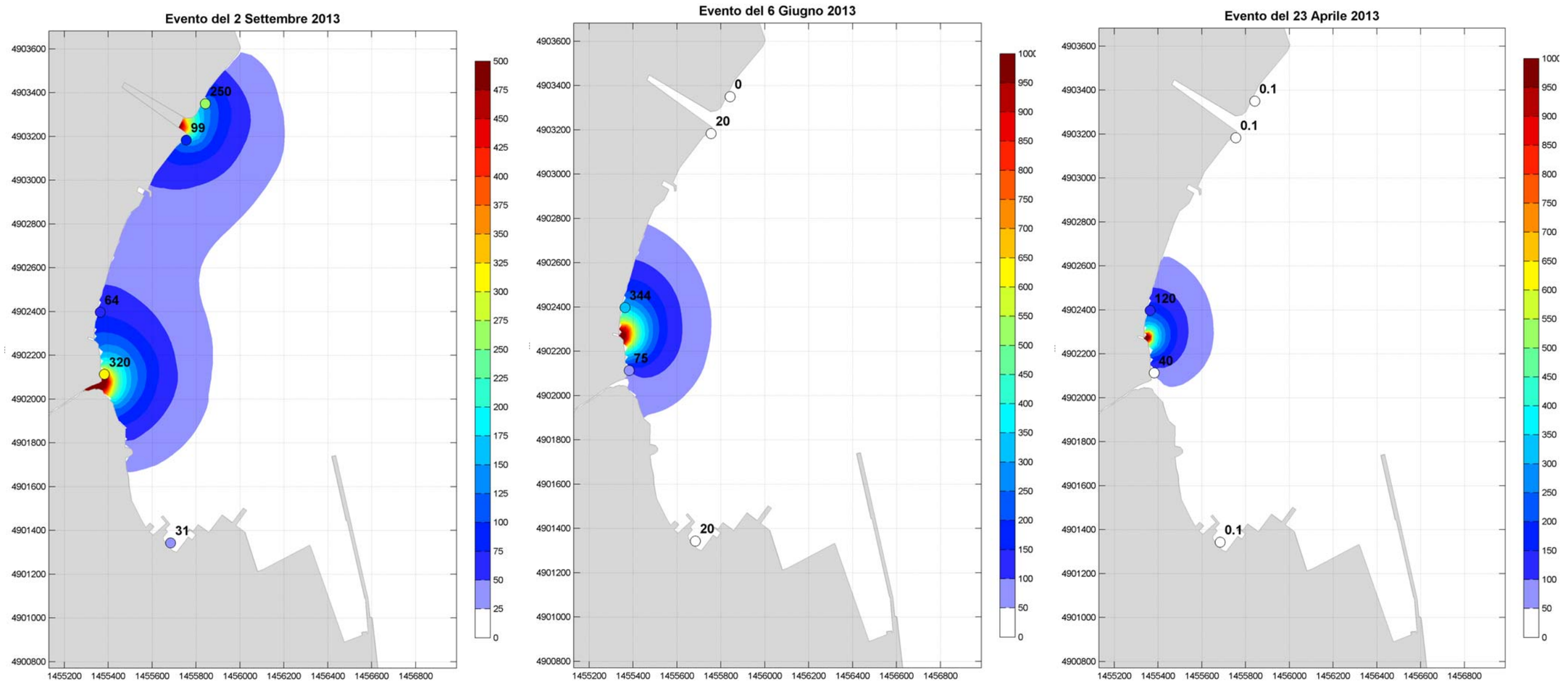


FIGURA 1-73 - CONCENTRAZIONE DELL'ESCHERICHIA COLI (UFC/100ML) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN TRE EVENTI SIGNIFICATIVI

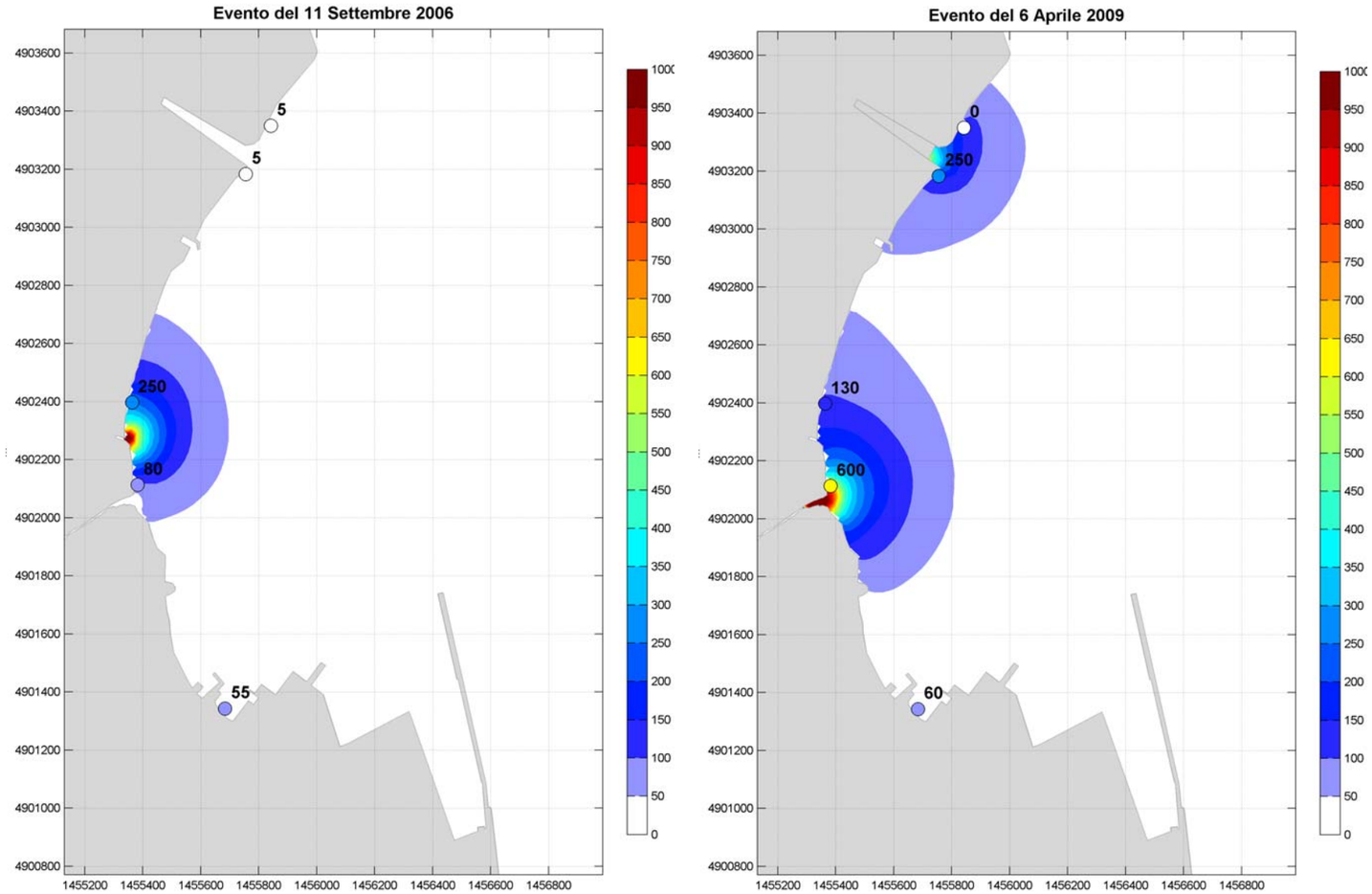


FIGURA 1-74 - CONCENTRAZIONE DEI COLIFORMI FECALI (A SINISTRA) E DEI COLIFORMI TOTALI (A DESTRA) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN DUE EVENTI SIGNIFICATIVI

Nell'evento del 2 Settembre 2013 si osserva che nelle stazioni in prossimità della foce del Quiliano (Stazione Foce Quiliano) e del Segno (Stazione Foce T. Segno) i valori misurati della concentrazione della Escherichia Coli erano superiori a 250 UFC/100 ml. La stazione Aurelia 5 immediatamente a sud della foce del Quiliano riportava un valore di 99 UFC/100 ml mentre la stazione Aurelia 100 situata tra le foci dei due torrenti i valori erano più bassi e pari a 64 UFC/100ml. Considerando che i valori più elevati di concentrazione erano stati misurati vicino alle foci dei torrenti è stata, quindi, eseguita una simulazione ipotizzando un rilascio costante in corrispondenza dei due torrenti. I risultati della simulazione indicano che con queste condizioni di rilascio si genera un campo di concentrazione verosimile alla situazione effettivamente misurata. Nelle stazioni Foce T. Segno e Aurelia 100 si osserva un'ottima corrispondenza dei valori, mentre in prossimità del Torrente Quiliano la corrispondenza appare soddisfacente anche se meno accurata.

Nell'evento del 6 Aprile 2013 si nota una situazione simile a quella del caso precedente; i valori di concentrazione più alti sono osservati in prossimità delle foci del Segno e del Quiliano con i valori maggiori (600 UFC/100 ml) in prossimità della foce del T. Segno. Anche in questo caso sono stati considerati due rilasci in corrispondenza dei due torrenti con un carico all'immissione differente. I risultati delle simulazioni evidenziano un'ottima corrispondenza per le stazioni T.Segno e Aurelia 100. Per le stazioni in prossimità del Quiliano la corrispondenza appare meno accurata ma valori misurati sono probabilmente troppo bassi e quindi non completamente idonei per una taratura del modello.

Nell'evento del 6 Giugno 2013 è possibile osservare dei valori significativi (ma comunque al di sotto dei limiti di legge) di concentrazione dell'Escherichia Coli nelle stazioni ARPAL Aurelia 100 e Foce T. Segno con dei valori misurati pari rispettivamente a 344 e 65 UFC/100ml. Nelle rimanenti stazioni di misura i valori di Escherichia coli sono risultati assenti o molto bassi. Considerando che le stazioni più vicine alle foci dei Torrenti Quiliano e Segno presentavano dei valori molto bassi è stata eseguita una simulazione numerica ipotizzando un solo rilascio in corrispondenza del Rio Lusso, una sorgente posta tra le due stazioni di misura dove era stato misurato un incremento della concentrazione batterica. I risultati della simulazione denotano una corrispondenza con i valori misurati molto soddisfacente in entrambi i punti di controllo; dalle mappe della concentrazione si osserva anche un rapido decadimento della concentrazione batterica che scende sotto la soglia di 50 UFC/100 ml nel raggio di qualche centinai di metri dal punto sorgente.

Negli evento dell'11 Settembre 2006 e del 23 Aprile 2013 è stato considerato un unico rilascio in corrispondenza del Rio Fontanazza; In entrambi gli eventi infatti le concentrazioni maggiori sono state misurate alla stazione Aurelia 100 locata a nord della foce del Rio Fontanazza mentre nella Stazione T.Segno i valori erano visibilmente inferiori, indice che la contaminazione batterica era originata verosimilmente in un punto tra le due stazioni. Anche in questo caso le mappe simulate dal modello hanno evidenziato un'ottima corrispondenza con i valori misurati in entrambi gli scenari simulati ed un rapido decadimento del carico batterico a distanza di poche centinaia di metri dalla sorgente