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

GRANDI LAVORI FINCOSIT

PROGETTAZIONE:

TECHNITAL S.p.A.

IL RESPONSABILE:

Dott. Ing. Guido Fiorini

PERIZIA DI VARIANTE

ELABORATO N° :

TITOLO ELABORATO

ELABORATI GENERALI
STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE
RELAZIONE SUSSIDIARIA

MI0102-PV-G-B-R-003-00

DATA	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
Dicembre 2015	A. Pomes	G. Fiorini	G. Fiorini

REVISIONE N°	DATA	DESCRIZIONE
00	Dicembre 2015	EMISSIONE PER APPROVAZIONE

NOME FILE

MI0102-PV-G-B-R-003-00.docx

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

PERIZIA DI VARIANTE

ELABORATI GENERALI
STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE
RELAZIONE SUSSIDIARIA

INDICE

1. INTRODUZIONE 6
2. SCENARIO DI ANALISI 7
3. ANALISI AMBIENTALE 8
3.1. Ambiente idrico (acque marino costiere) 8
3.1.1. Moto ondoso 8
3.1.1.1 Propagazione sottocosta di mareggiate significative 11
3.1.2. Aspetti idrodinamici 15
3.1.2.1 Caratteristiche idrodinamiche 17
3.1.2.2 Caratteristiche dispersive 22
3.1.2.3 Capacità di ricambio idrico 27
3.1.2.4 Circolazioni costiere indotte dal moto ondoso 31
3.1.2.1 Trasporto solido litoraneo e tendenze evolutive del fondale 35
3.1.2.2 Tendenze evolutive del fondale 39
3.1.3. Qualità delle acque marino costiere 42
3.2. Suolo e sottosuolo 44
3.2.1. Ambiente marino costiero 44
3.2.1.1 Tendenze evolutive del litorale 44
4. MISURE DI MITIGAZIONE 49
5. ATTIVITA' DI MONITORAGGIO 50
5.1. Monitoraggio dell'evoluzione del litorale 50
6. CONCLUSIONI 53

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1 – Configurazione di analisi di esercizio provvisorio. 7
Figura 3-1 – Rose delle registrazioni (a sinistra), delle energie (a destra) e delle altezze massime (sotto) relative al punto u.k.m.o. 9
Figura 3-2 – Ubicazione del punto "P" di riferimento per le condizioni meteomarine. 9
Figura 3-3 – Rose delle registrazioni (a sinistra) e delle energie (a destra) relative al punto P 10
Figura 3-4 – Rosa delle altezze massime relativa al punto P 10
Figura 3-5 – TEST1 – Propagazione sottocosta Configurazione di analisi HS = 1.64 m - TP = 6.50 s – Dir = 75°N 13
Figura 3-6 – TEST2- Propagazione sottocosta Configurazione di analisi HS = 1.93 m - TP = 6.80 s – Dir = 145°N 13
Figura 3-7 – TEST3 - Propagazione sottocosta Configurazione di analisi HS = 2.22 m - TP = 7.80 s – Dir = 185°N 13
Figura 3-8 – TEST4- Propagazione sottocosta Configurazione di analisi HS = 0.93 m - TP = 5.20 s – Dir = 75°N 14
Figura 3-9 – TEST5 - Propagazione sottocosta Configurazione di analisi HS = 1.17 m - TP = 5.60 s – Dir = 145°N 14
Figura 3-10 – TEST6 - Propagazione sottocosta Configurazione di analisi HS = 1.61 m - TP = 6.80 s – Dir = 185°N 14
Figura 3-11 – Dettaglio della maglia di calcolo nella zona del porto di Vado Ligure. 16
Figura 3-12 – Batimetria (m s.m.m.) della schematizzazione con le opere a mare previste nella configurazione di analisi. 16
Figura 3-13 – Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in assenza di vento - condizione di massimo flusso (Sx) e massimo riflusso (Dx). 17
Figura 3-14 – Distribuzione delle velocità (m/s) nello strato superficiale in presenza di vento da nord est - condizione di massimo flusso (Sx) e massimo riflusso (Dx). 18
Figura 3-15 – Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in presenza di vento da nord est - condizione di massimo flusso (Sx) e massimo riflusso (Dx). 19
Figura 3-16 – Distribuzione delle velocità (m/s) nello strato superficiale in presenza di vento da sud est - condizione di massimo flusso (Sx) e massimo riflusso (Dx). 20
Figura 3-17 – Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in presenza di vento da sud est - condizione di massimo flusso (Sx) e massimo riflusso (Dx). 20

Figura 3-18 – Distribuzione delle velocità (m/s) nello strato superficiale in presenza di vento da nord ovest - condizione di massimo flusso (Sx) e massimo riflusso (Dx). 21
Figura 3-19 – Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in presenza di vento da nord ovest - condizione di massimo flusso (Sx) e massimo riflusso (Dx). 22
Figura 3-20 – Andamento della concentrazione dei traccianti rilasciati dai torrenti in assenza di vento. 24
Figura 3-21 – Andamento della concentrazione dei traccianti rilasciati dai torrenti in condizione di vento da nord est. 25
Figura 3-22 – Andamento della concentrazione dei traccianti rilasciati dai torrenti in condizione di vento da sud est. 26
Figura 3-23 – Andamento della concentrazione dei traccianti rilasciati dai torrenti in condizione di vento da nord ovest. 27
Figura 3-24 – Distribuzione iniziale del tracciante utilizzato per la “fraction analysis” e posizione dei punti di controllo. 28
Figura 3-25 – Risultati della “fraction analysis”. 29
Figura 3-26 – Distribuzione iniziale del tracciante utilizzato per il tempo di ricambio 30
Figura 3-27 – Distribuzione del tempo di ricambio (in ore). 31
Figura 3-28 – TEST1 – Circolazione Costiera Configurazione di analisi HS = 1.64 m - TP = 6.50 s – Dir = 75°N 33
Figura 3-29 – TEST2 - Circolazione Costiera Configurazione di analisi HS = 1.93 m - TP = 6.80 s – Dir = 145°N 33
Figura 3-30 – TEST3 - Circolazione Costiera Configurazione di analisi HS = 2.22 m - TP = 7.80 s – Dir = 185°N 33
Figura 3-31 – TEST4 - Circolazione Costiera Configurazione di analisi HS = 0.93 m - TP = 5.20 s – Dir = 75°N 34
Figura 3-32 – TEST5 - Circolazione Costiera Configurazione di analisi HS = 1.17 m - TP = 5.60 s – Dir = 145°N 34
Figura 3-33 – TEST6 - Circolazione Costiera Configurazione di analisi HS = 1.61 m - TP = 6.80 s – Dir = 185°N 34
Figura 3-34 – TEST1 – Trasporto Solido Configurazione di analisi HS = 1.64 m - TP = 6.50 s – Dir = 75°N 37
Figura 3-35 – TEST2 - Trasporto Solido Configurazione di analisi HS = 1.93 m - TP = 6.80 s – Dir = 145°N 37
Figura 3-36 – TEST3 - Trasporto Solido Configurazione di analisi HS = 2.22 m - TP = 7.80 s – Dir = 185°N 37
Figura 3-37 – TEST4 - Trasporto Solido Configurazione di analisi HS = 0.93 m - TP = 5.20 s – Dir = 75°N 38
Figura 3-38 – TEST5 - Trasporto Solido Configurazione di analisi HS = 1.17 m - TP = 5.60 s – Dir = 145°N 38
Figura 3-39 – TEST6 - Trasporto Solido Configurazione di analisi HS = 1.61 m - TP = 6.80 s – Dir = 185°N 38
Figura 3-40 – TEST1 – Evoluzione del Fondale Configurazione di analisi HS = 1.64 m - TP = 6.50 s – Dir = 75°N 40
Figura 3-41 – TEST2 - Evoluzione del Fondale Configurazione di analisi HS = 1.93 m - TP = 6.80 s – Dir = 145°N 40
Figura 3-42 – TEST3 - Evoluzione del Fondale Configurazione di analisi HS = 2.22 m - TP = 7.80 s – Dir = 185°N 40
Figura 3-43 – TEST4 - Evoluzione del Fondale Configurazione di analisi HS = 0.93 m - TP = 5.20 s – Dir = 75°N 41
Figura 3-44 – TEST5 - Evoluzione del Fondale Configurazione di analisi HS = 1.17 m - TP = 5.60 s – Dir = 145°N 41
Figura 3-45 – TEST6 - Evoluzione del Fondale Configurazione di analisi HS = 1.61 m - TP = 6.80 s – Dir = 185°N 41
Figura 3-46 – Andamento della concentrazione di escherichia coli (C/C_0 x 1000) al termine del rilascio, dopo 3 ore e dopo 6 ore - rilascio Torrente Quiliano (sopra) e rilascio Rio Lusso (sotto). 43
Figura 3-47 – Andamento della concentrazione di escherichia coli (C/C_0 x 1000) al termine del rilascio, dopo 3 ore e dopo 6 ore - rilascio Torrente Segno (sopra) e rilascio rio Sant’Elena (sotto). 43
Figura 3-48 – Configurazione di analisi – ubicazione delle boe virtuali (stazioni) poste alla profondità di –4,5 m s.m.m. 46
Figura 3-49 - Configurazione di analisi – Schematizzazione linea di riva e opere 46
Figura 3-50 – Configurazione di analisi - Andamento trasporto solido longitudinale 47
Figura 3-51 - Configurazione di analisi - Evoluzione della linea di riva 48
Figura 5-1 - Zona interessata dai rilievi di campo 52

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3-1 - Caratteristiche delle onde “al largo” (punto U.K.M.O.) 8
Tabella 3-2 – Condizioni di input imposte nei modelli 11
Tabella 3-3 – Forzanti meteomarine considerate per le simulazioni idrodinamiche 17

1. INTRODUZIONE

La presente Relazione è stata redatta a sussidio dello Studio di Impatto Ambientale (SIA) della Perizia di variante al Progetto esecutivo di Fase 2.

Nel Decreto Dirigenziale n° 254 del 10 Marzo 2015 di approvazione, con prescrizioni, dello Studio di Impatto Ambientale relativo al Progetto Esecutivo di Fase 2 e contestuale Perizia di variante di Fase 1, la Regione ha posto particolare attenzione allo stato di attuazione delle opere dell'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.

Nel corso del 2015 è stata redatta un bozza del documento attuativo dell'Accordo di Programma, che dovrà essere esaminata dal Collegio di Vigilanza, la quale sintetizza gli intendimenti dell'Autorità Portuale e del Comune di Vado Ligure.

La presente relazione sussidiaria è stata redatta per 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 e sulla base del documento attuativo citato.

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 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 di impatto ambientale del Progetto Esecutivo, approvato con DGR 254/2015, e di quello relativo alla Perizia di variante.

In particolare, 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 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.

In considerazione di quanto sviluppato nella Perizia di variante e di quanto riportato nel documento attuativo dell'Accordo di Programma, è stata elaborata un'analisi aggiuntiva rispetto allo SIA che avesse come scenario di analisi uno stato di esercizio transitorio che tenesse conto del funzionamento della piattaforma in assenza del completamento delle opere dell'Accordo di Programma.

L'attenzione si sposta dunque all'analisi dei potenziali effetti sulle componenti ambientali di interesse in assenza del comparto D3 ("area cantieri") e considerando la configurazione di I^{a} fase della nuova diga foranea. Permangono tuttavia le anticipazioni del comparto D3 ("area cantieri") e del comparto D2 ("fronte mare di Vado"), 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, oltre che la darsena turistica.

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.

2. SCENARIO DI ANALISI

Lo scenario di analisi adottato si sviluppa considerando le previsioni della bozza di documento attuativo dell'Accordo di Programma proposto dall'Autorità Portuale, ed è finalizzato allo studio degli impatti della piastra multifunzionale nella configurazione di Perizia di variante sull'ambiente idrodinamico. studiando una fase di esercizio transitorio finalizzato alla verifica della compatibilità delle operazioni, in attesa del completamento delle opere dell'Accordo di Programma per raggiungere la piena funzionalità a regime.

Lo scenario di analisi comprende quindi le seguenti opere:

- la piastra multifunzionale nella configurazione di Perizia di variante (realizzazione tutta a terrapieno);
- la I^{a} fase della nuova diga foranea;
- il sovrappasso della Via Aurelia;
- la darsena turistica;

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, mancano, dunque, gli interventi di riqualificazione costiera di cui al comparto D dello Schema di Assetto Urbanistico del Comune di Vado Ligure. Sono assenti inoltre le opere complementari che non hanno interferenza con l'analisi idrodinamica.

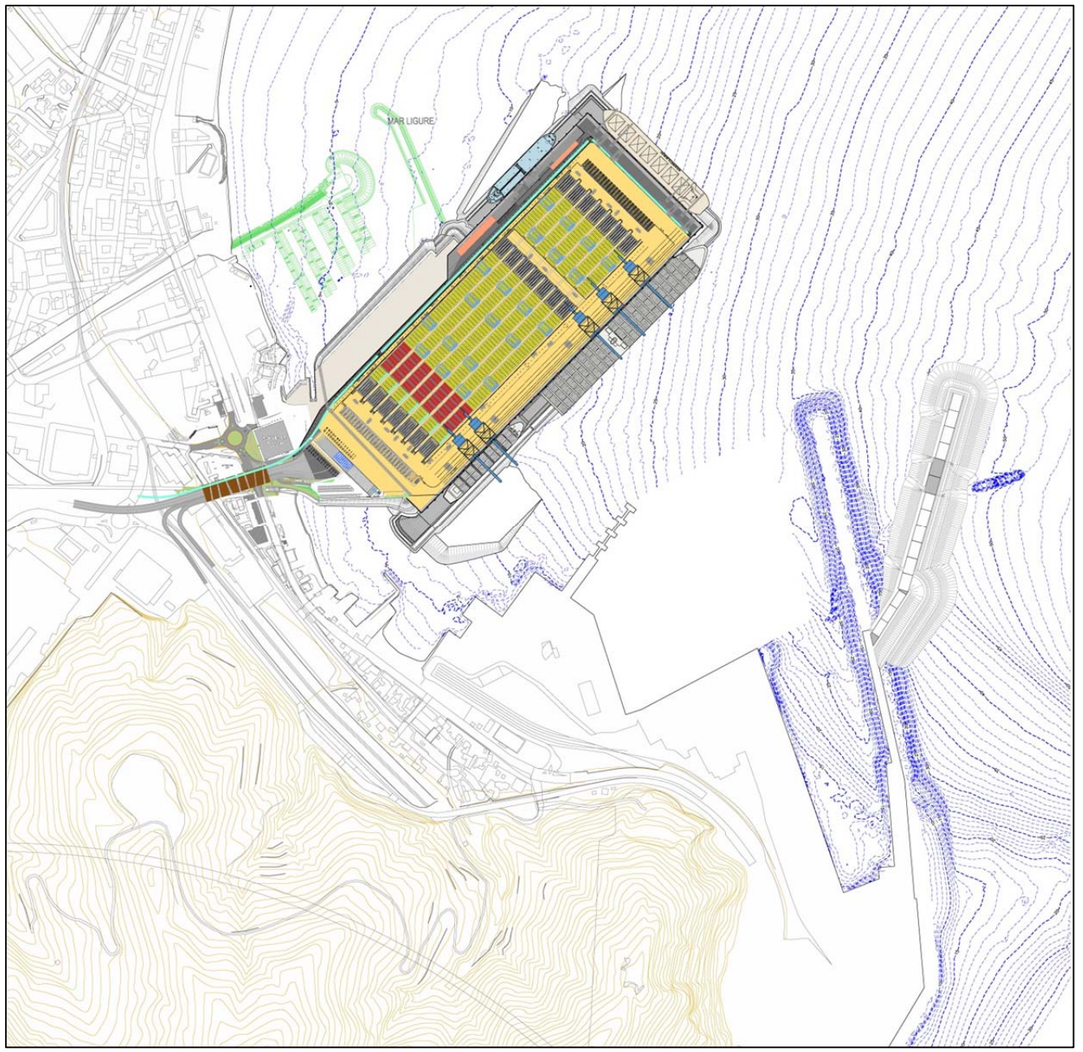


FIGURA 2-1 – CONFIGURAZIONE DI ANALISI DI ESERCIZIO PROVVISORIO.

3. ANALISI AMBIENTALE

3.1. Ambiente idrico (acque marino costiere)

3.1.1. Moto ondoso

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.

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.

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 3-1).

TABELLA 3-1 – 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, delle energie e la rosa delle altezze massime (Figura 3-1).

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).

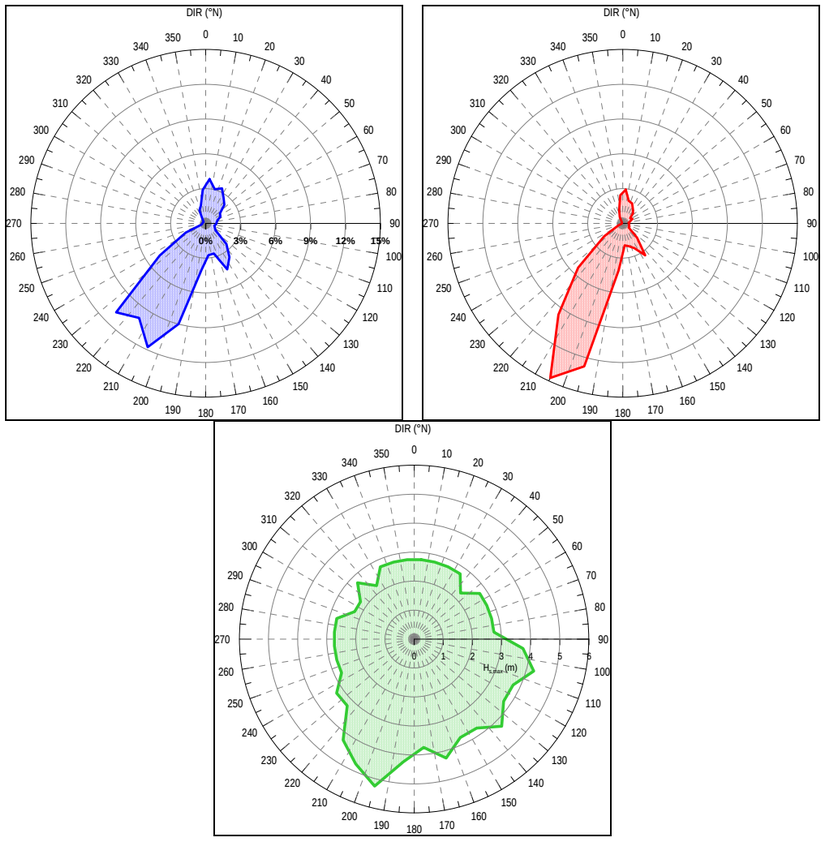


FIGURA 3-1 – ROSE DELLE REGISTRAZIONI (A SINISTRA), DELLE ENERGIE (A DESTRA) E DELLE ALTEZZE MASSIME (SOTTO) RELATIVE AL PUNTO U.K.M.O.

Il clima ondoso al largo è stato propagato in corrispondenza di un punto locale posto di fronte al paraggio oggetto di studio, il punto "P", posto in mare aperto all'esterno della diga foranea su un fondale di circa 100 m, (vedi Figura 3-2).

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, 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 che 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. Per una descrizione dettagliata del codice di calcolo si rimanda al paragrafo 1.2.1 dell'Appendice.

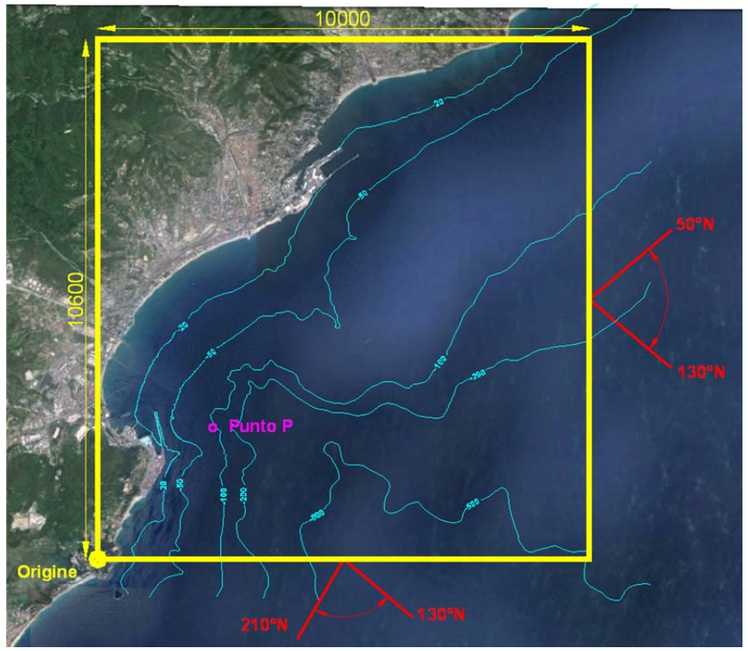


FIGURA 3-2 – UBICAZIONE DEL PUNTO "P" DI RIFERIMENTO PER LE CONDIZIONI METEOMARINE.

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. Di conseguenza, 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.

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 (HS – Tz). Utilizzando le correlazioni ricavate dall'interpolazione dei dati di base (ricadenti nel periodo di osservazione gennaio 1987 – dicembre 2008), è stato possibile associare a ciascun evento ondoso il corrispondente periodo Tz in funzione dell'altezza significativa per i tre settori considerati.

I risultati delle propagazioni dal largo verso riva hanno permesso di ricostruire il clima ondoso locale, 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 3-1), 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 (Figura 3-3) e la rosa delle altezze massime (Figura 3-4).

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.

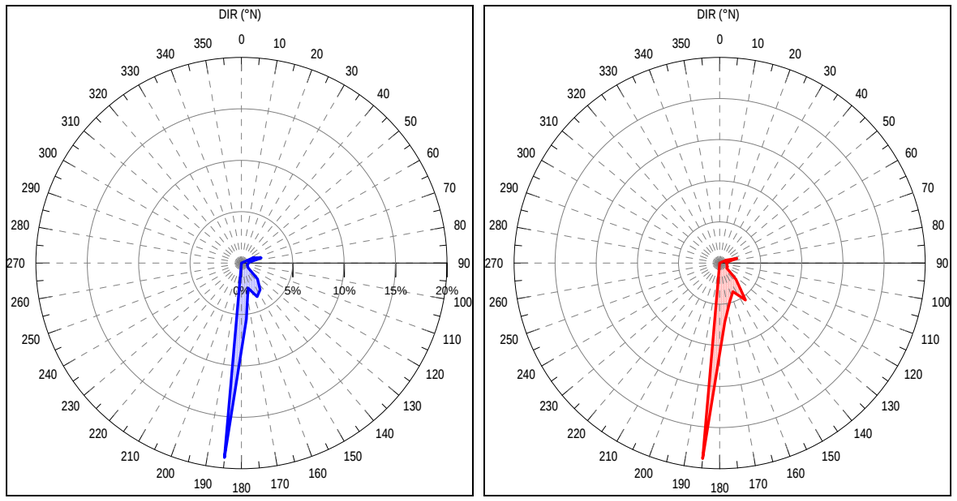


FIGURA 3-3 – ROSE DELLE REGISTRAZIONI (A SINISTRA) E DELLE ENERGIE (A DESTRA) RELATIVE AL PUNTO P

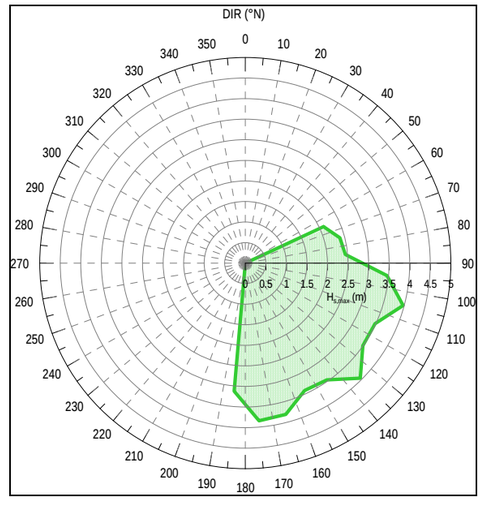


FIGURA 3-4 – ROSA DELLE ALTEZZE MASSIME RELATIVA AL PUNTO P

3.1.1.1 *Propagazione sottocosta di mareggiate significative*

Il campo di moto ondoso sottocosta per alcune mareggiate caratteristiche (in termini di direzione di provenienza e frequenza media annua), per la configurazione di riferimento in fase di realizzazione, è stato ricavato propagando le mareggiate dal largo verso riva per mezzo del modello matematico Delft3D-Wave che fa riferimento al codice di calcolo SWAN (Simulating WAves Nearshore).

Questo modello è basato sull'equazione di bilancio energetico dell'energia dello spettro ondoso (in direzioni e frequenze) ed è in grado di simulare la propagazione di onde di piccolo periodo (wind waves e swell waves) dalle acque profonde verso le regioni costiere, caratterizzate da batimetrie irregolari e acque superficiali.

Le mareggiate caratteristiche, che rappresentano eventi significativi per la dinamica litoranea locale, sono state ricavate a partire dalle condizioni meteomarine nel punto "P" e corrispondono a condizioni di moto ondoso relativamente severe (ma non estreme), caratterizzate da durata media pari a 1g/anno e 5 gg/anno.

Per una dettagliata descrizione delle modalità di definizione del dominio di calcolo utilizzato per le propagazioni sotto costa e delle condizioni di input assegnate al modello. Di seguito, nella Tabella 11 2, si riportano sinteticamente le caratteristiche dei 6 test eseguiti. Una descrizione dettagliata è riportata nell'Appendice.

TABELLA 3-2 – 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

Le schematizzazioni del dominio di calcolo sono state modificate in funzione della configurazione di progetto da analizzare considerando le caratteristiche e le diverse geometrie della piattaforma, delle opere complementari e della diga foranea.

I risultati ottenuti dalla propagazione delle mareggiate caratteristiche nella configurazione di analisi, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine seguenti (da Figura 3-5 a Figura 3-10).

Le figure rappresentano le altezze d'onda significativa in metri, in termini di gradazione cromatica, mentre le direzioni locali dell'onda sono indicate mediante vettori il cui modulo è proporzionale all'intensità dell'altezza d'onda significativa.

I risultati delle propagazioni sottocosta mostrano che l'elemento di maggior rilievo risulta esserla nuova diga foranea del porto di Vado (nella configurazione di 1° fase), la 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 piattaforma 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 (TEST1 e TEST4) 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 anche per la presenza del molo della nuova darsena turistica. In questa configurazione le banchine più protese verso il mare (la banchina rinfuse e container) risultano più esposte al moto ondoso che giunge sostanzialmente indisturbato da largo.

Le mareggiate di Scirocco (TEST2 e TEST5), risentono in misura maggiore rispetto a quelle di Levante della presenza del nuovo molo foraneo che impedisce la propagazione del moto ondoso verso nord e garantisce la protezione del bacino

portuale. L'attenuazione dovuta al molo si fa sentire a partire da qualche centinaia di metri a sud della foce del Quiliano; le altezze d'onda si abbassano sotto il metro a sud dell'area camper per poi attenuarsi ulteriormente proseguendo verso la piattaforma, 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

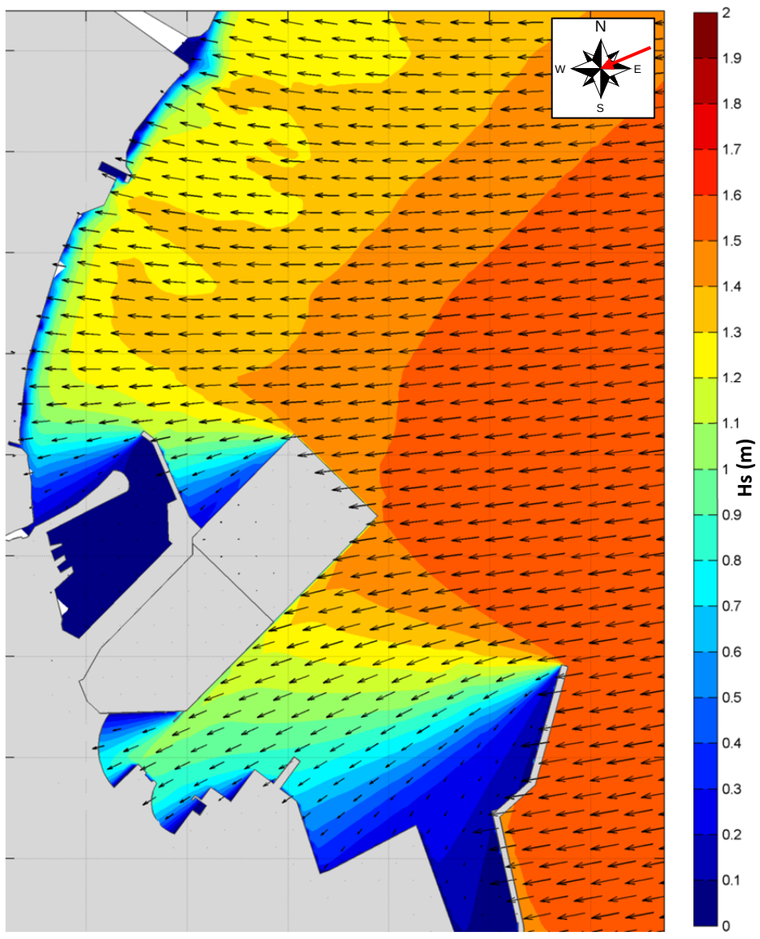


FIGURA 3-5 – TEST1 – PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 1.64 M - TP = 6.50 S – DIR = 75°N

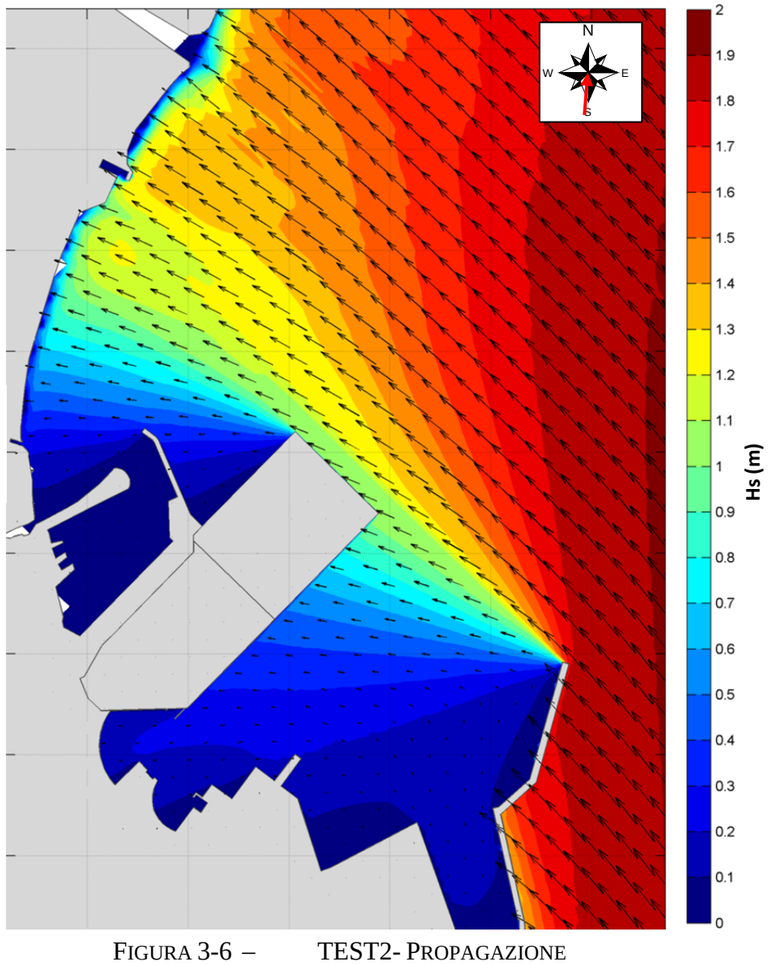


FIGURA 3-6 – TEST2- PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 1.93 M - TP = 6.80 S – DIR = 145°N

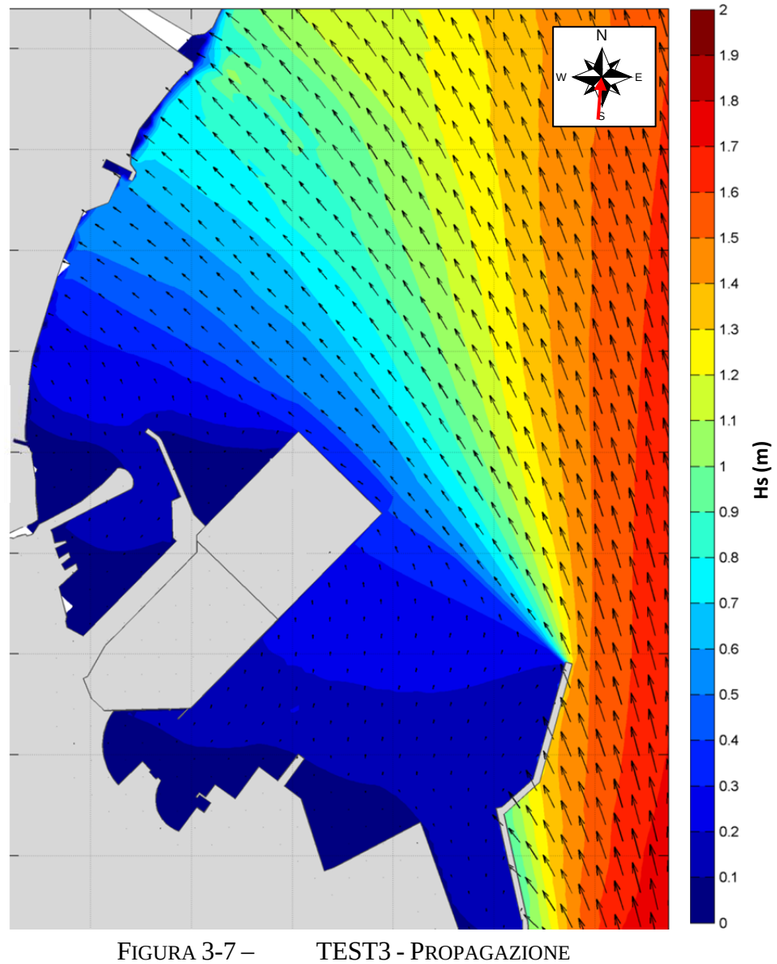


FIGURA 3-7 – TEST3 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 2.22 M - TP = 7.80 S – DIR = 185°N

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

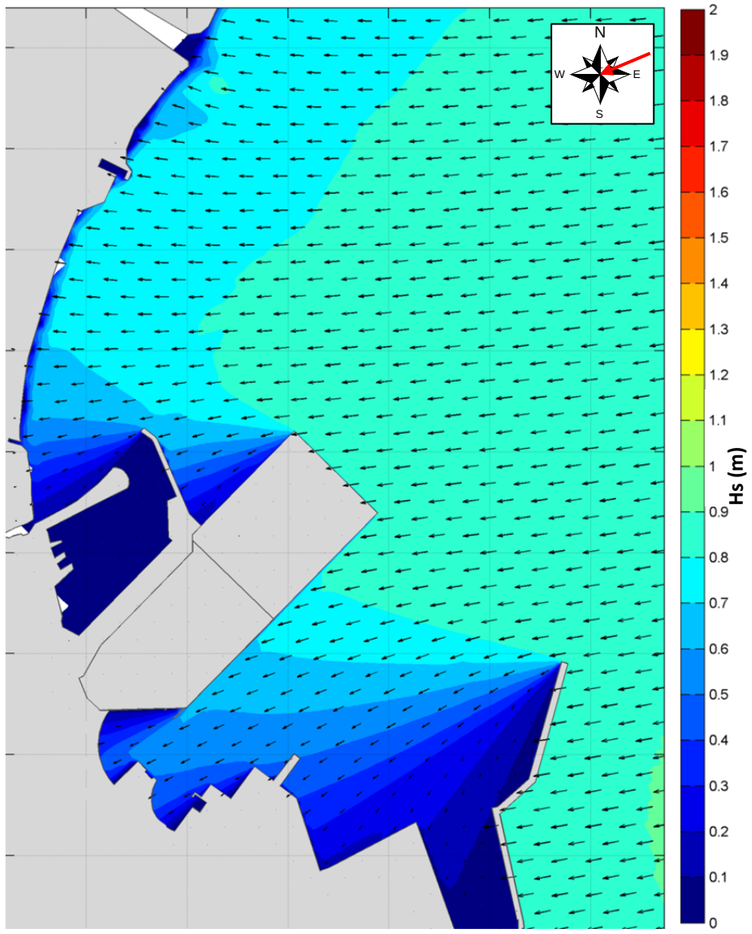


FIGURA 3-8 – TEST4- PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 0.93 M - TP = 5.20 S – DIR = 75°N

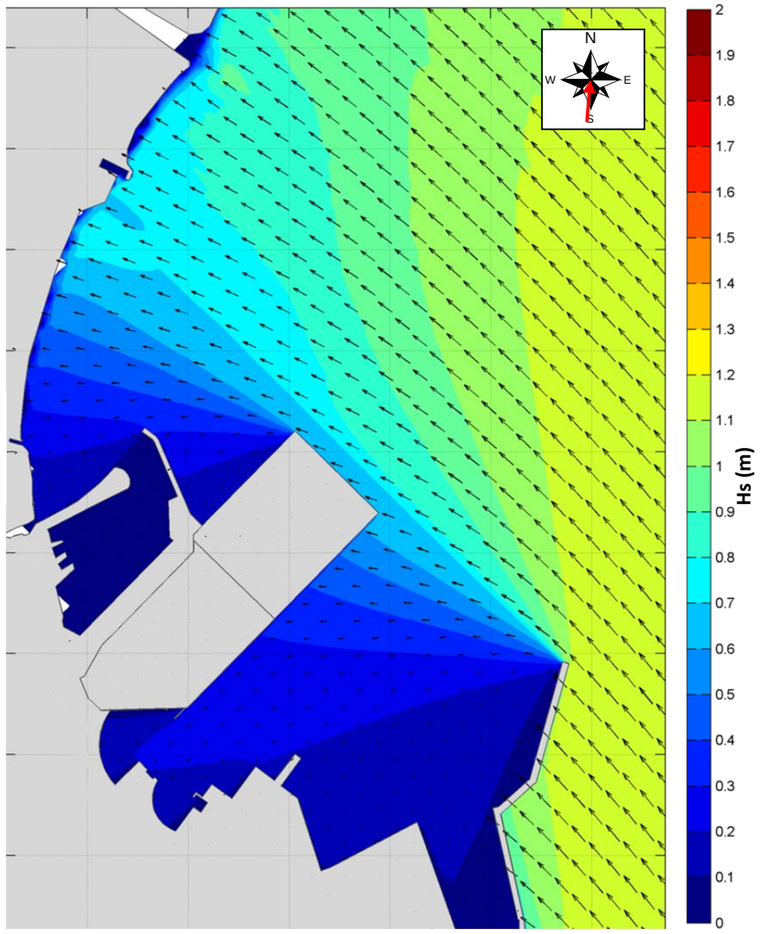


FIGURA 3-9 – TEST5 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 1.17 M - TP = 5.60 S – DIR = 145°N

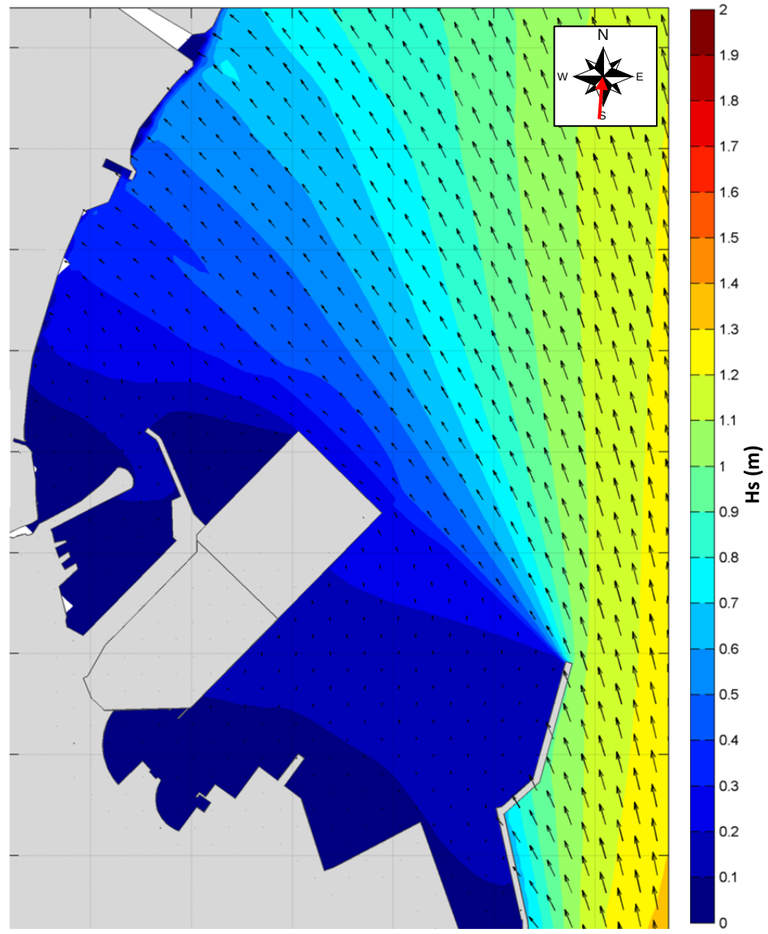


FIGURA 3-10 – TEST6 - PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 1.61 M - TP = 6.80 S – DIR = 185°N

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). Il modello adottato, Delft3D-FLOW, è stato sviluppato dal laboratorio idraulico olandese 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 Perizia di Variante in considerazione del documento attuativo dell'Accordo di Programma, di cui al Capitolo 1, in cui la diga foranea sarà nella configurazione di 1° stralcio, considerando diverse condizioni di marea e meteorologiche.

Nella Figura 3-11 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 3-12.

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.

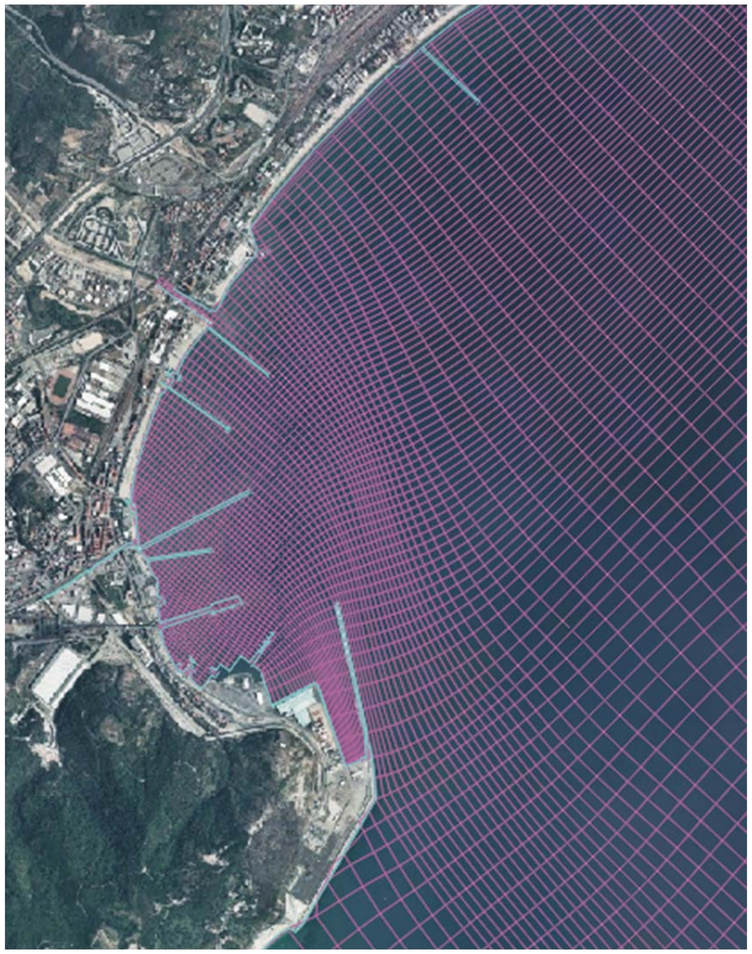


FIGURA 3-11 – DETTAGLIO DELLA MAGLIA DI CALCOLO NELLA ZONA DEL PORTO DI VADO LIGURE.

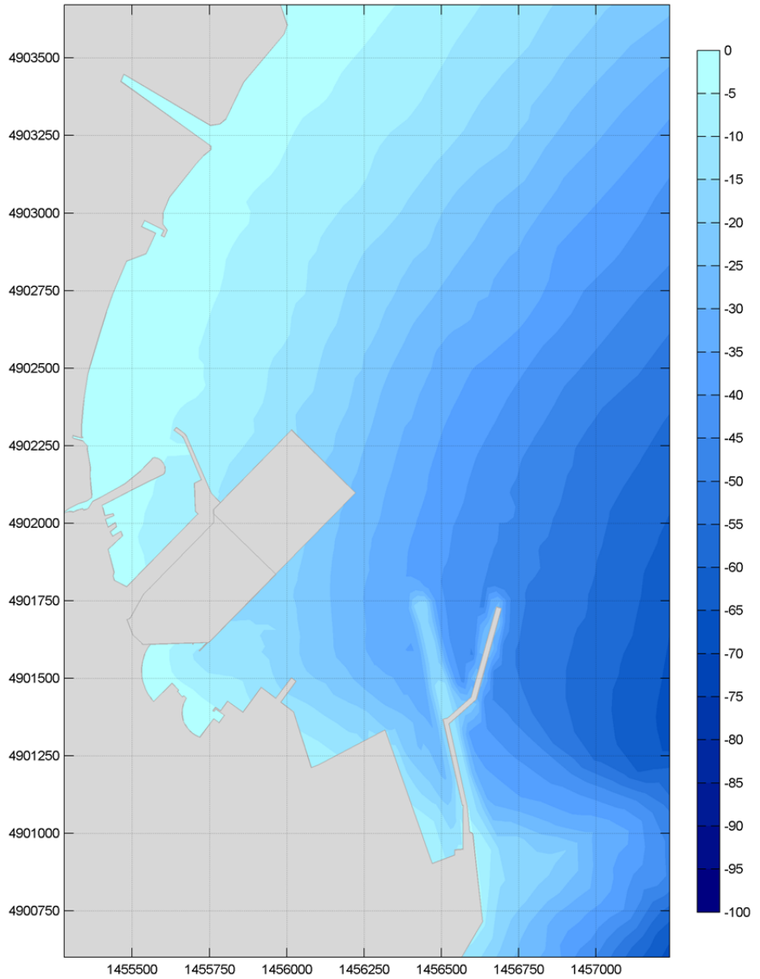


FIGURA 3-12 – BATIMETRIA (M S.M.M.) DELLA SCHEMATIZZAZIONE CON LE OPERE A MARE PREVISTE NELLA CONFIGURAZIONE DI ANALISI.

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

TABELLA 3-3 – 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 3-13 a Figura 3-19).

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. In Figura 3-13 sono riportati i campi di moto in condizione di massimo flusso (a sinistra) e in condizioni di massimo riflusso (a destra)

Come si può notare, escludendo le foci dei fiumi dove le velocità sono determinate 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.

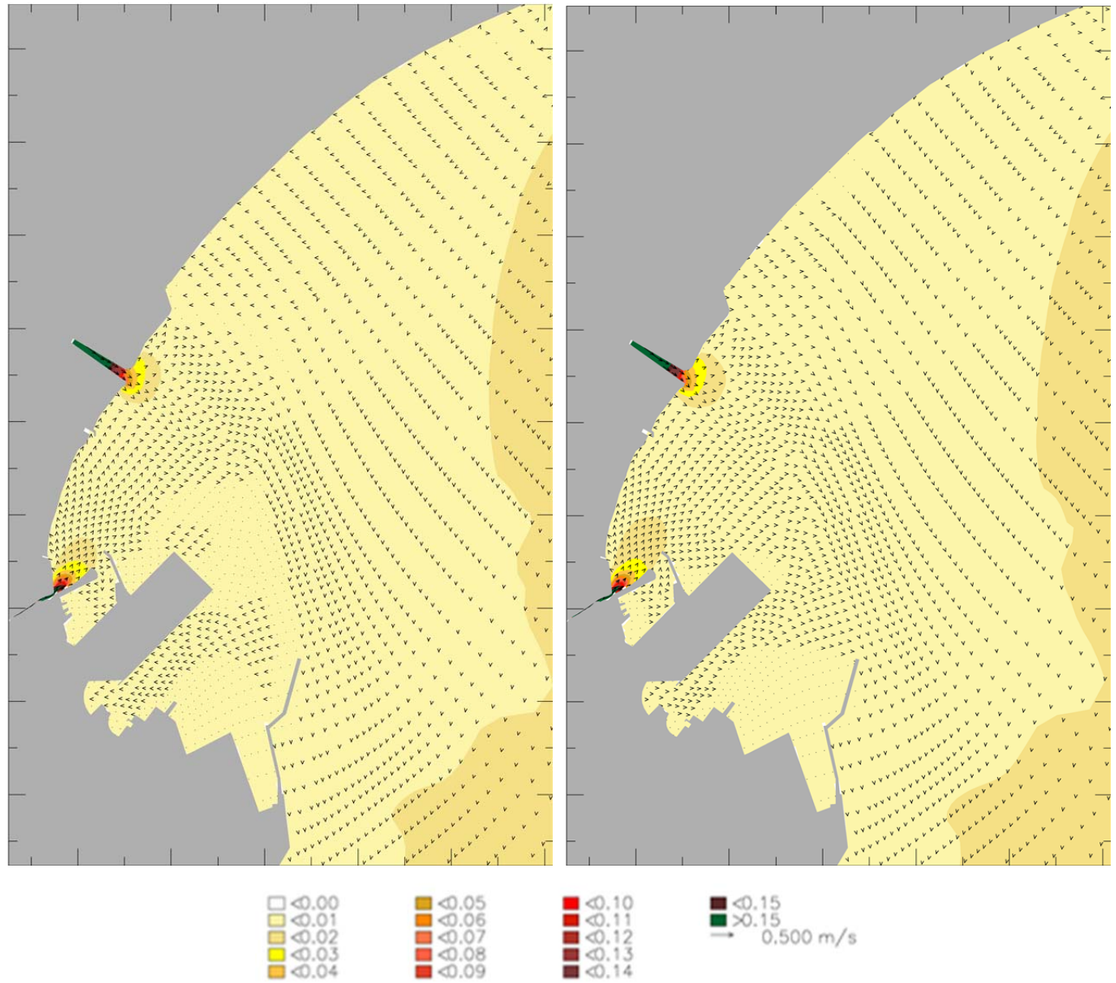


FIGURA 3-13 – DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN ASSENZA DI VENTO - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO (SX) E MASSIMO RIFLUSSO (DX).

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 in Figura 3-14, 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 3-15 sia in fase di massimo flusso che in fase di riflusso.

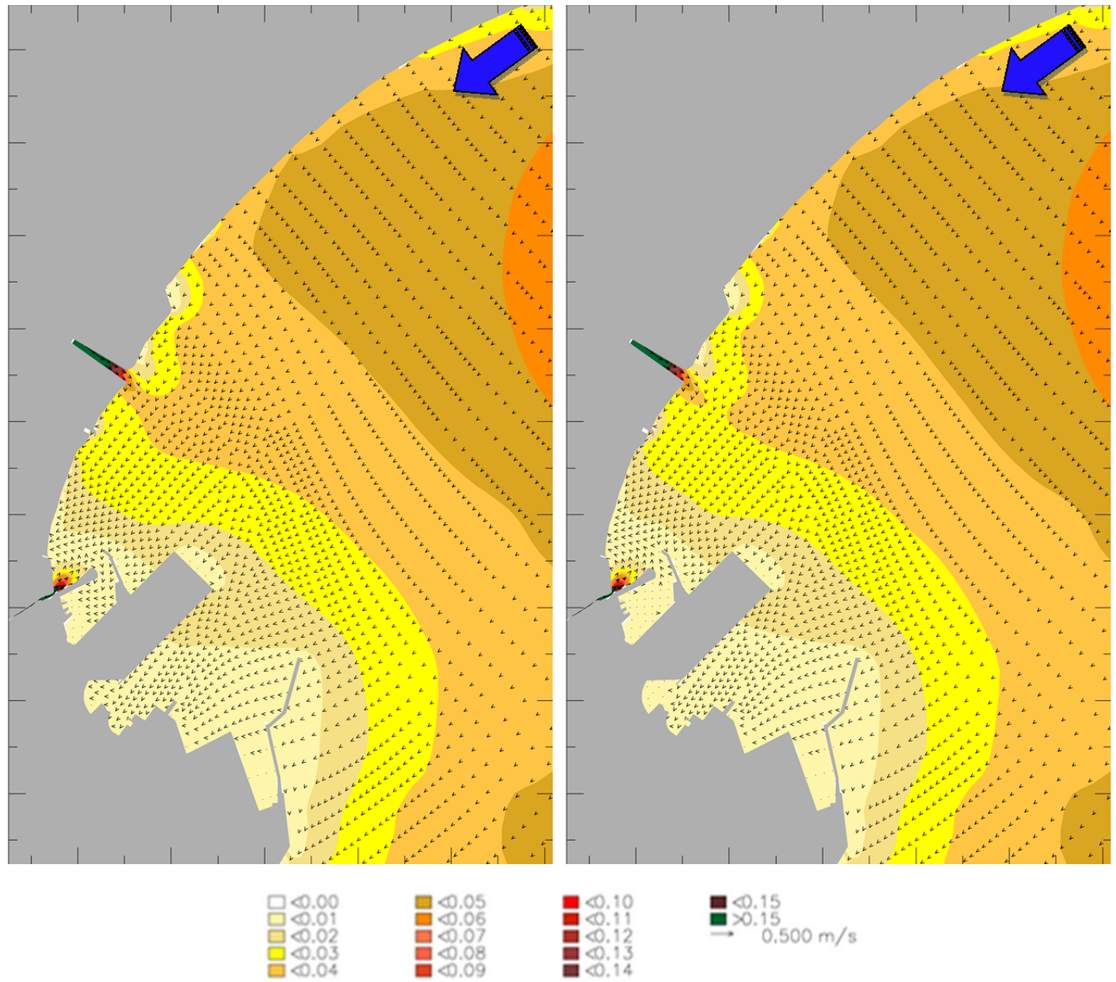


FIGURA 3-14 – DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO (SX) E MASSIMO RIFLUSSO (DX).

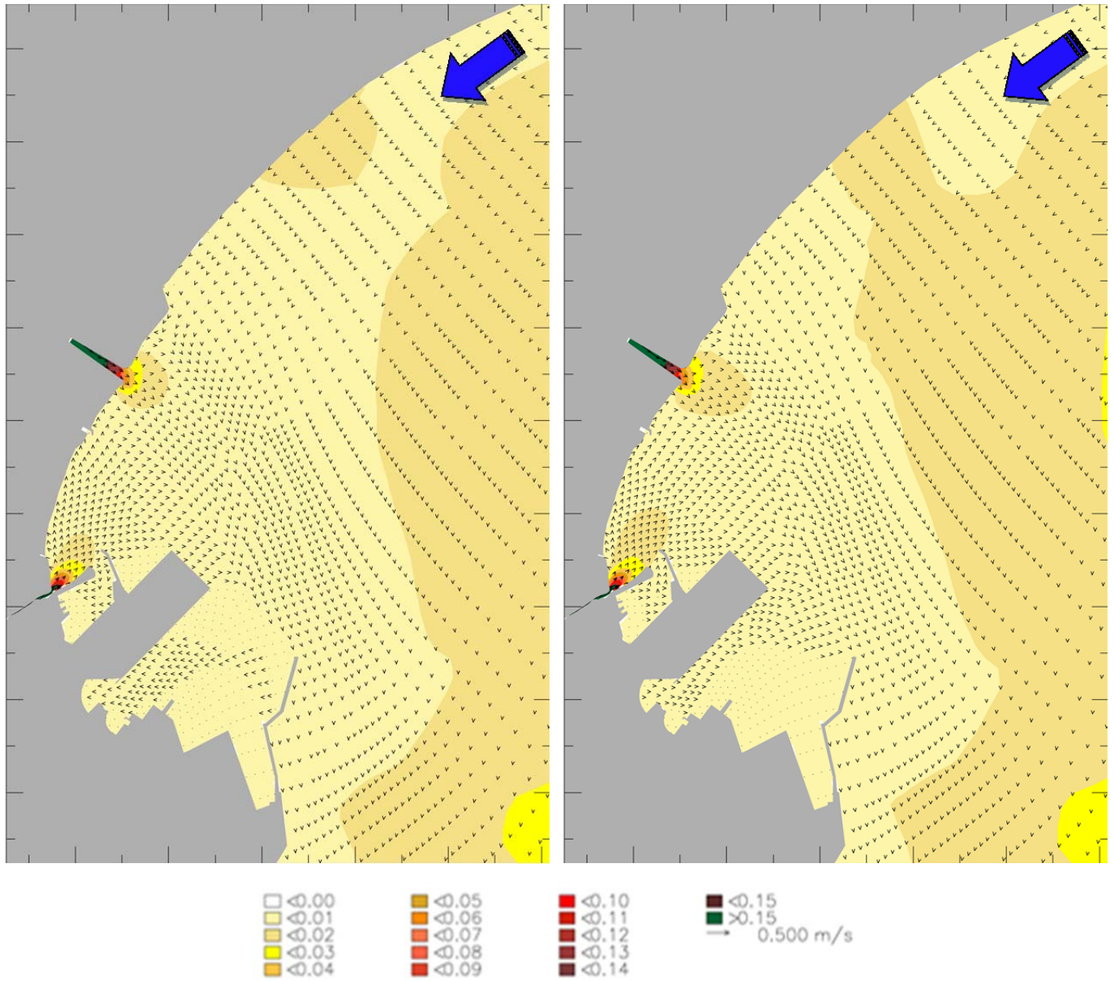


FIGURA 3-15 – DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO (SX) E MASSIMO RIFLUSSO (DX).

Condizione di vento da Sud Est

In questo scenario è stato considerato, oltre alla marea e alle correnti litoranee, an-che 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 3-16 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 (vedi Figura 3-17).

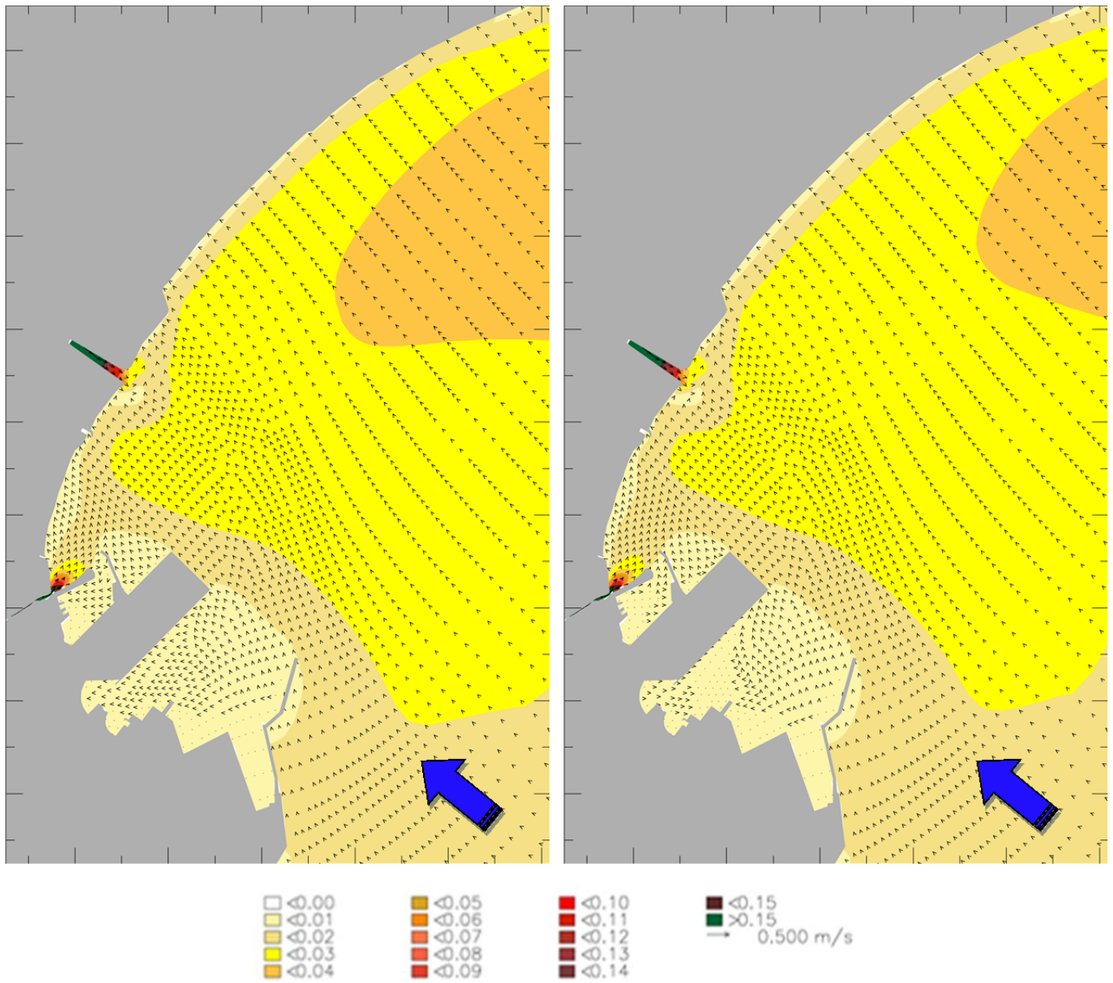


FIGURA 3-16 – DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO (SX) E MASSIMO RIFLUSSO (DX).

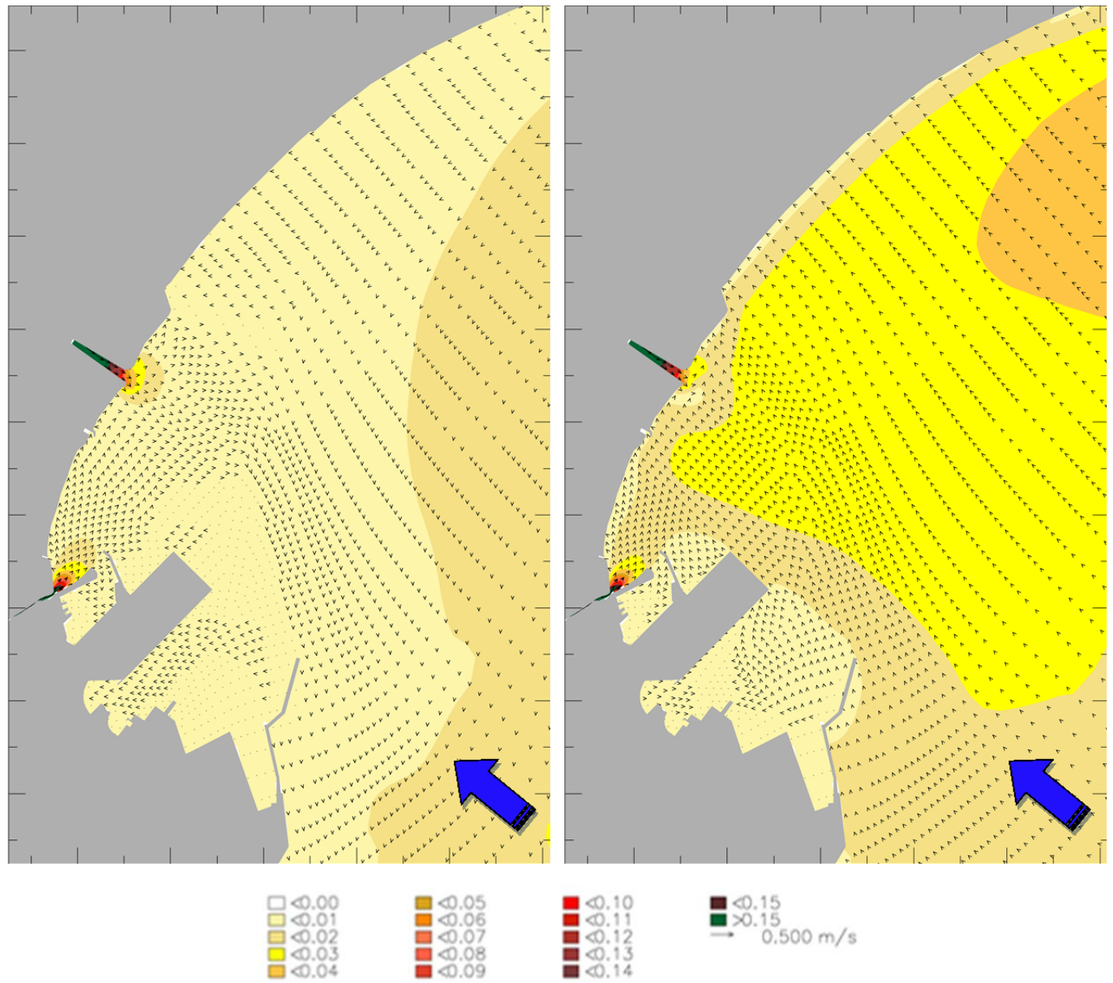


FIGURA 3-17 – DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO (SX) E MASSIMO RIFLUSSO (DX).

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 3-18, 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 che, anche nella configurazione di 1° fase, tende a deviare le correnti superficiali ed a mantenere le velocità basse all'interno del bacino portuale.

Questo effetto è meno visibile 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 3-19.

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.

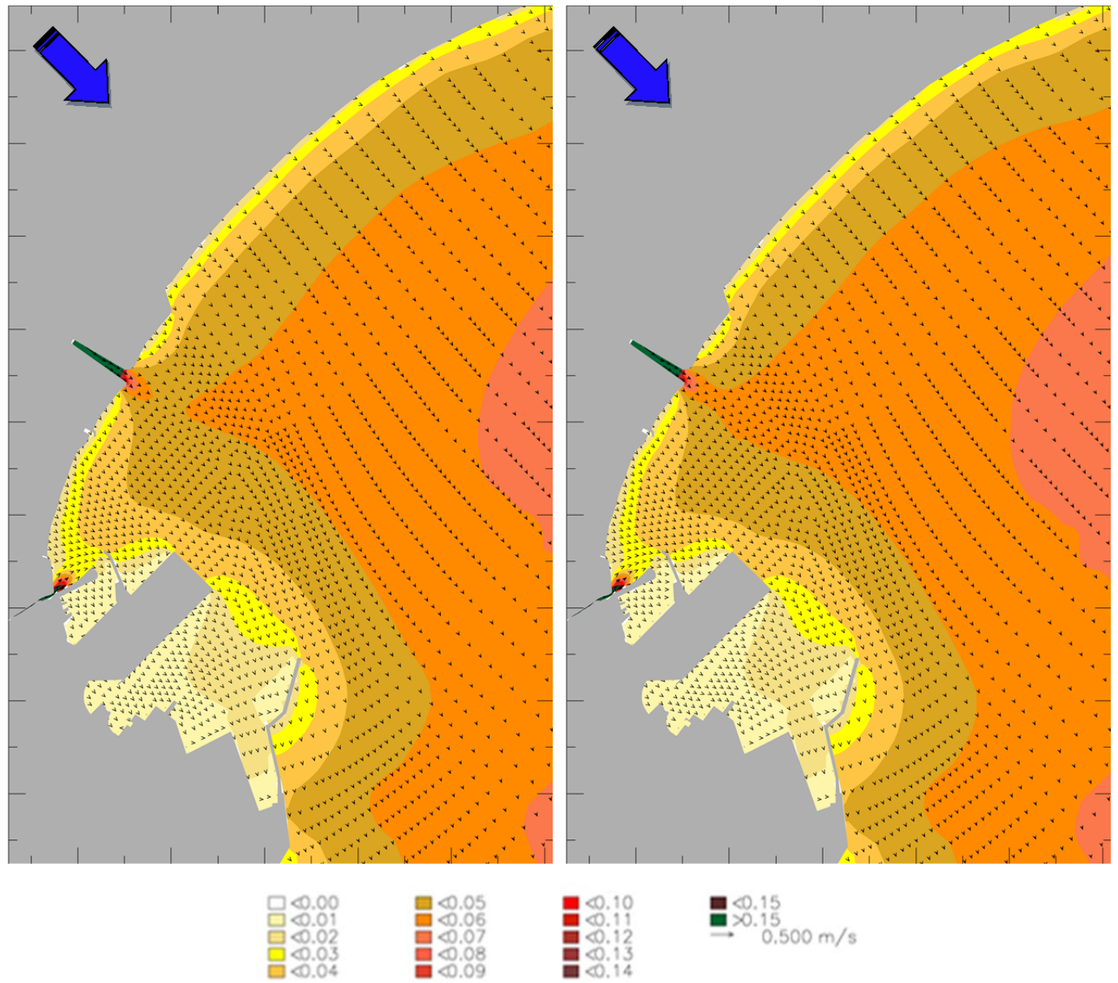


FIGURA 3-18 – DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO (SX) E MASSIMO RIFLUSSO (DX).

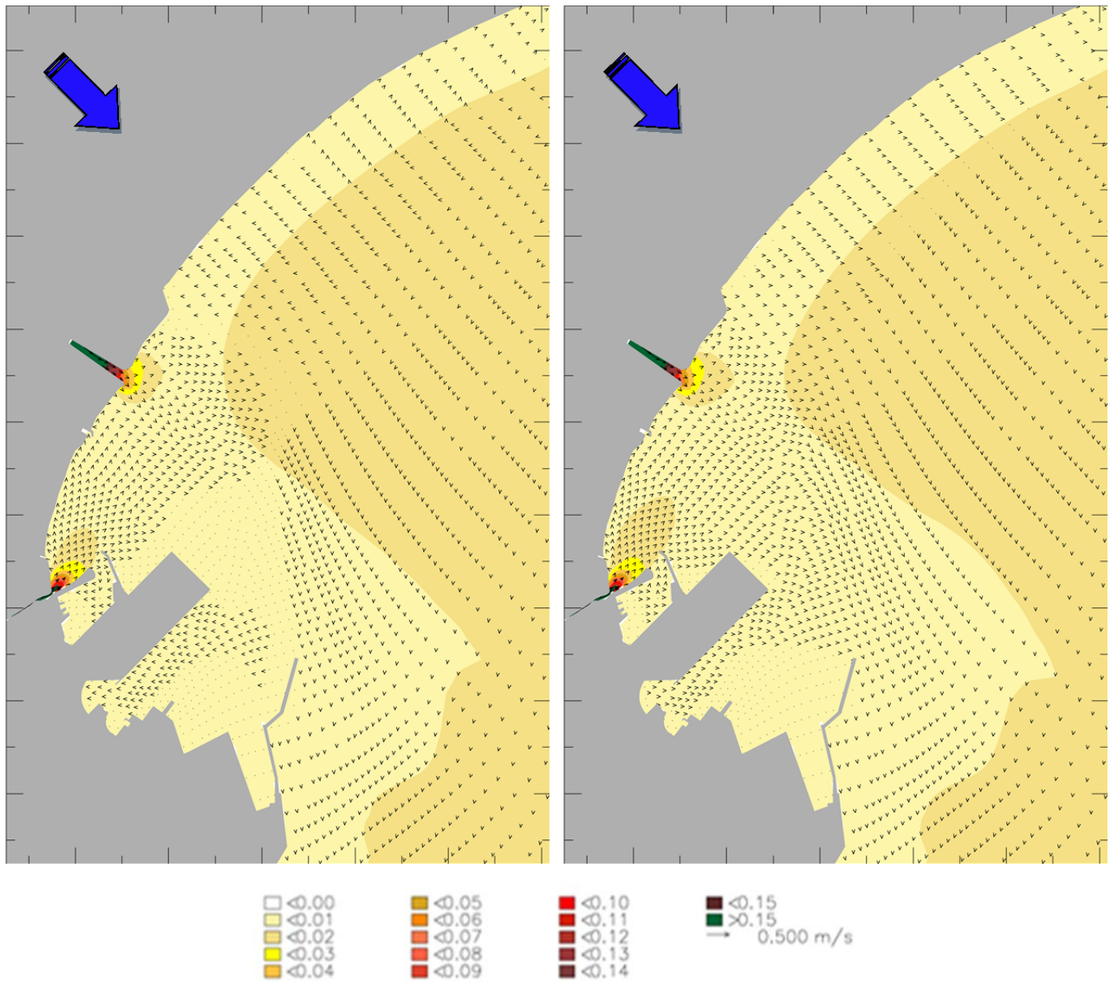


FIGURA 3-19 – DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO (SX) E MASSIMO RIFLUSSO (DX).

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 C0 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 3-20 si riporta la distribuzione della concentrazione del tracciante considerato, analizzando il contributo per ogni singolo corso d'acqua e per tutti tre i corsi d'acqua contemporaneamente.

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.

Per quanto riguarda 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.

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.

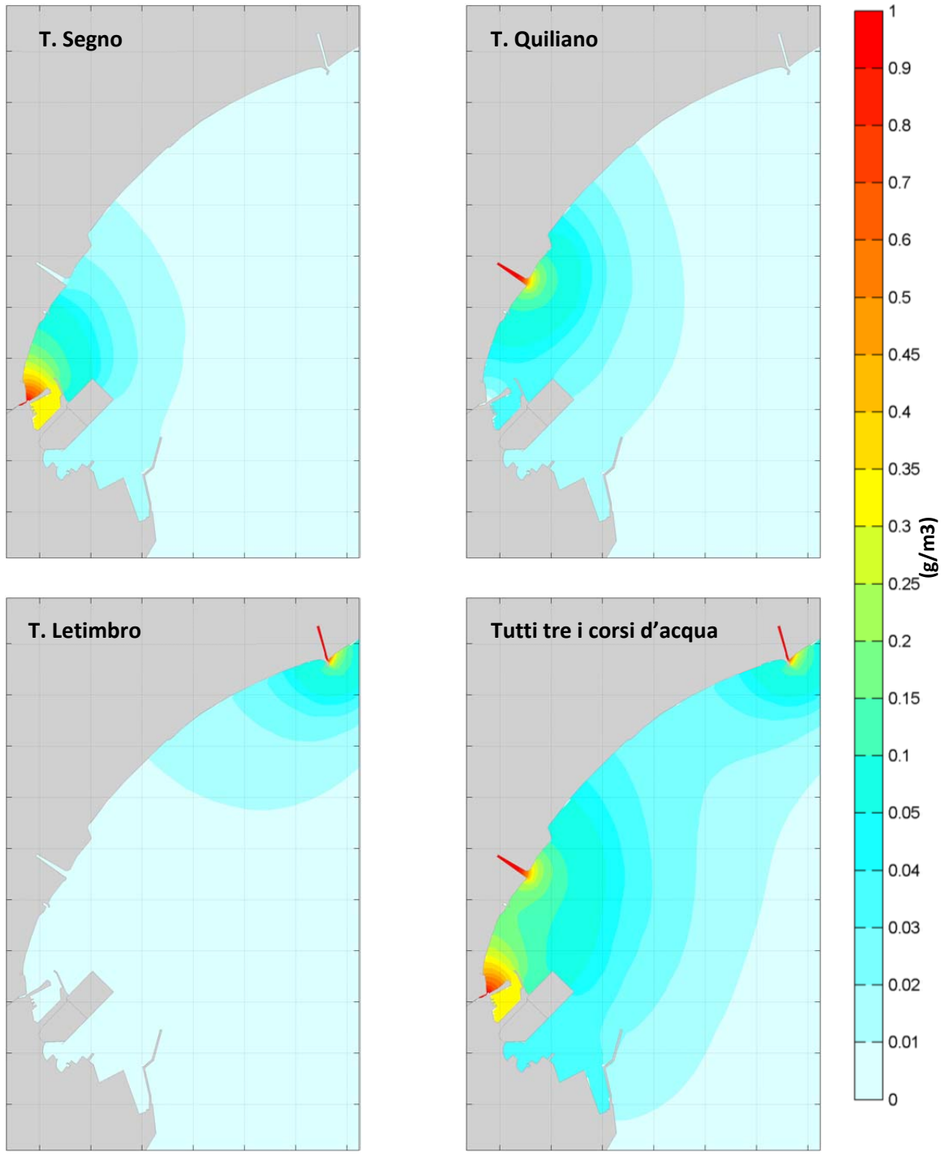


FIGURA 3-20 – ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN ASSENZA DI VENTO.

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 3-21 si riporta la distribuzione della concentrazione del tracciante considerato, analizzando il contributo per ogni singolo corso d'acqua e per tutti tre i corsi d'acqua contemporaneamente.

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.

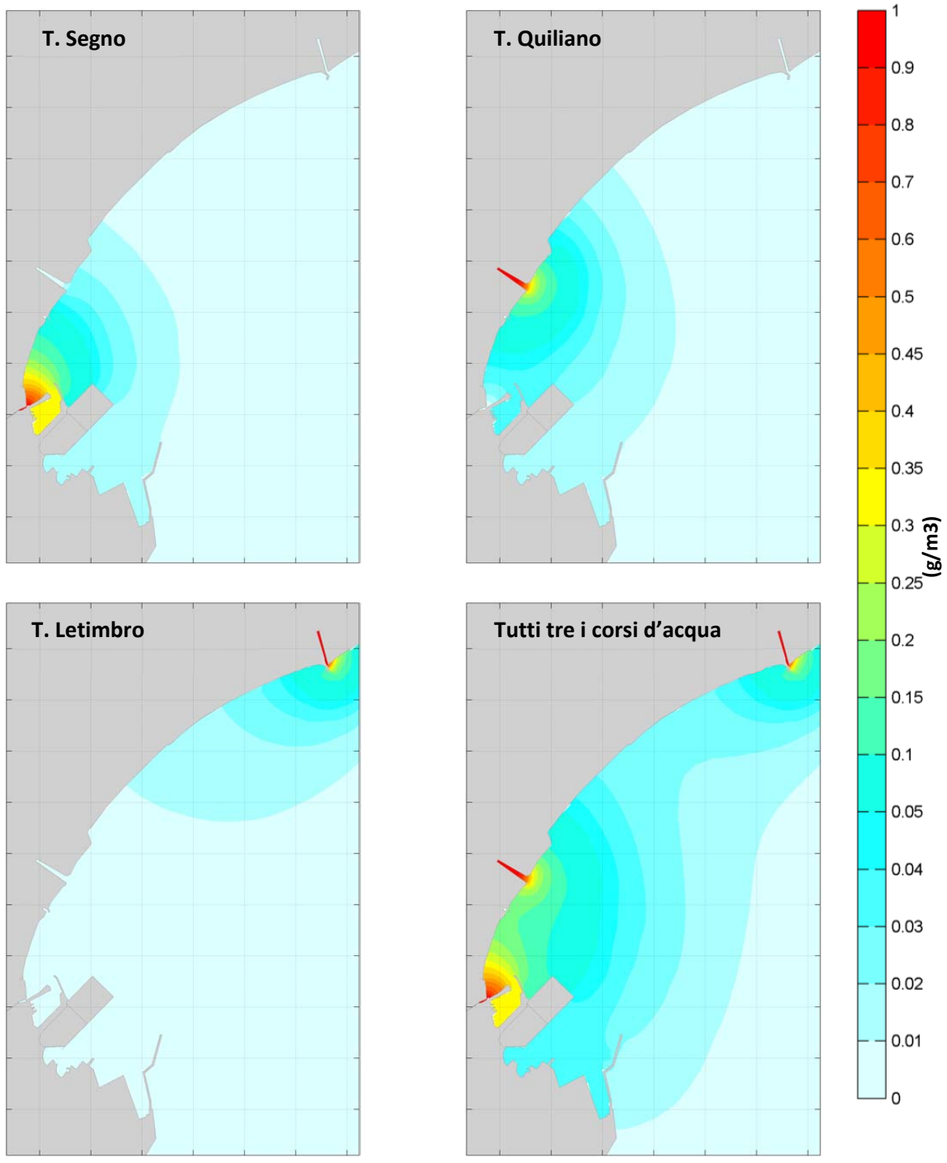


FIGURA 3-21 – ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA NORD EST.

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.

In Figura 3-22 si riporta la distribuzione della concentrazione del tracciante considerato, analizzando il contributo per ogni singolo corso d'acqua e per tutti tre i corsi d'acqua contemporaneamente.

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 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.

Per quanto riguarda il tracciante T. Letimbro, rispetto al caso senza vento, si può notare un leggero schiacciamento del "plume" dovuto alla corrente indotta dal vento che contrasta la dispersione verso Sud-Est mentre per quel che riguarda il tracciante T. Quiliano e per il T. Segno questo effetto è meno evidente.

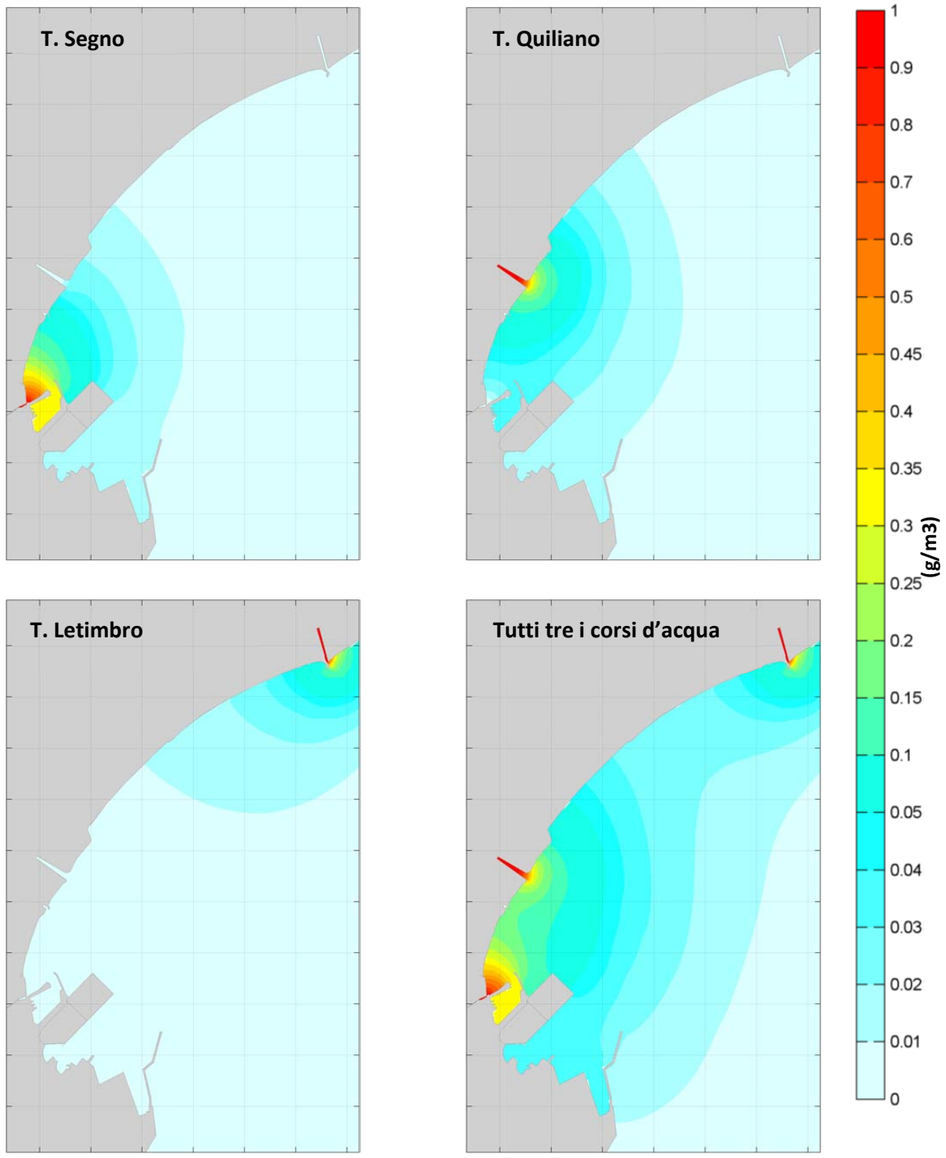


FIGURA 3-22 – ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA SUD EST.

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.

In Figura 3-23 si riporta la distribuzione della concentrazione del tracciante considerato, analizzando il contributo per ogni singolo corso d'acqua e per tutti tre i corsi d'acqua contemporaneamente.

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.

Il pattern di diffusione dei traccianti rimane pertanto molto simile a quello dei casi precedenti e 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.

Per quanto riguarda il tracciante T. Quiliano e T. Segno, rispetto al caso senza vento, si può notare un leggero incremento della dispersione nella direzione Sud-Est dovuto alla corrente indotta dal vento mentre per quel che riguarda il tracciante T. Letimbro questo effetto è meno evidente.

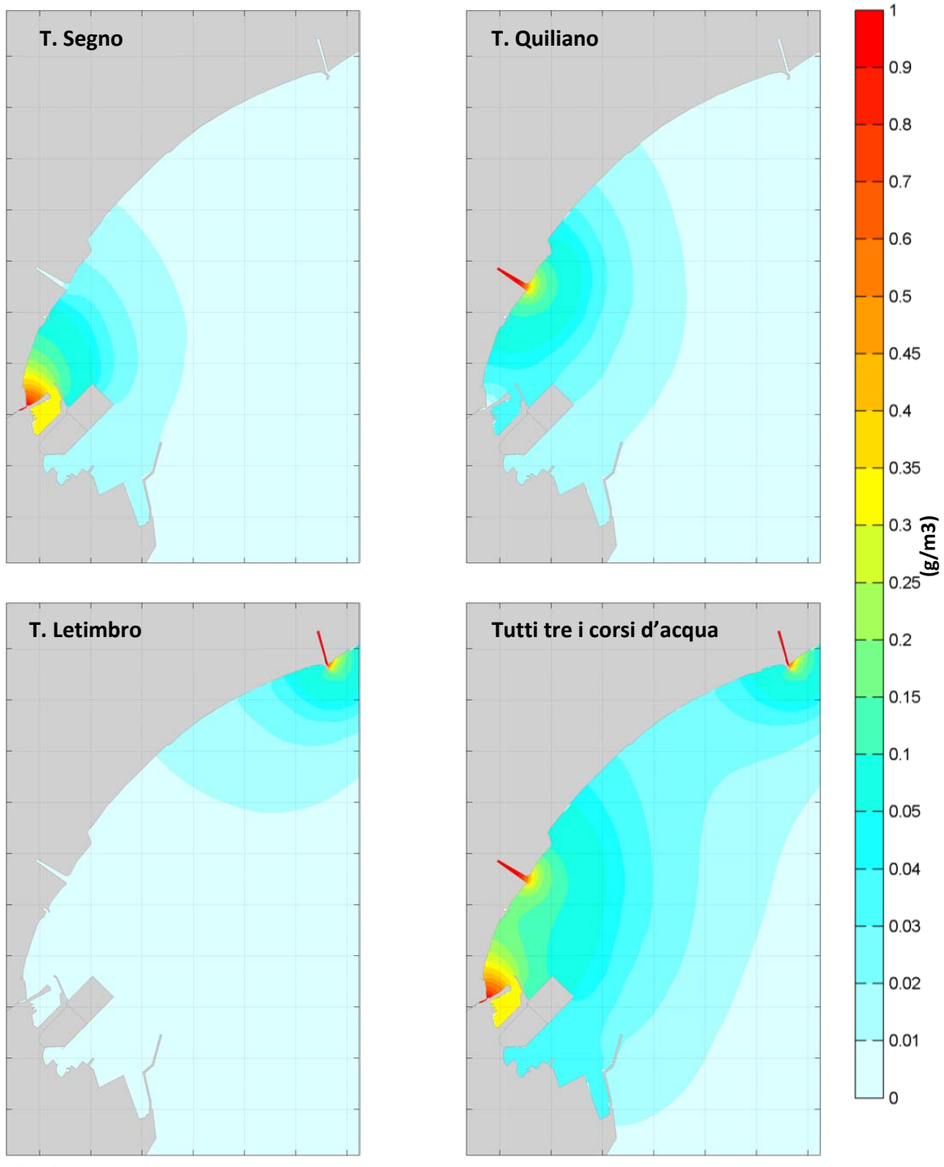


FIGURA 3-23 – ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA NORD OVEST.

3.1.2.3 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.

"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 3-24 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 in Figura 3-25.

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 il colore blu.

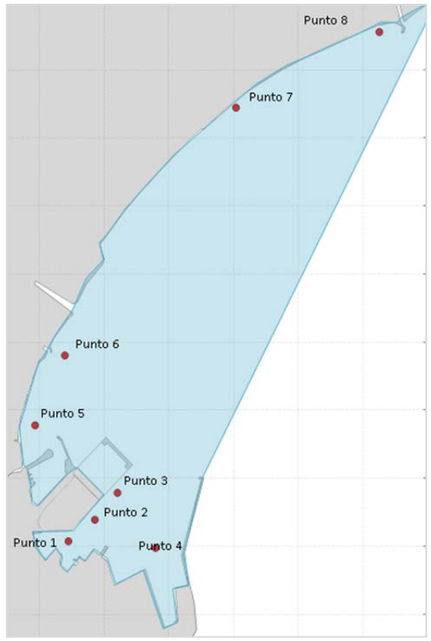


FIGURA 3-24 – DISTRIBUZIONE INIZIALE DEL TRACCIANTE UTILIZZATO PER LA "FRACTION ANALYSIS" E POSIZIONE DEI PUNTI DI CONTROLLO.

Dai risultati ottenuti è possibile osservare che:

– alla fine della simulazione rimangono solamente gli apporti esterni 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 del contributo di ciascuna sorgente è funzione della localizzazione dei punti considerati; all'interno della rada di Vado la frazione di acqua proveniente dai torrenti Segno e Quiliano è nell'ordine di qualche percentuale.

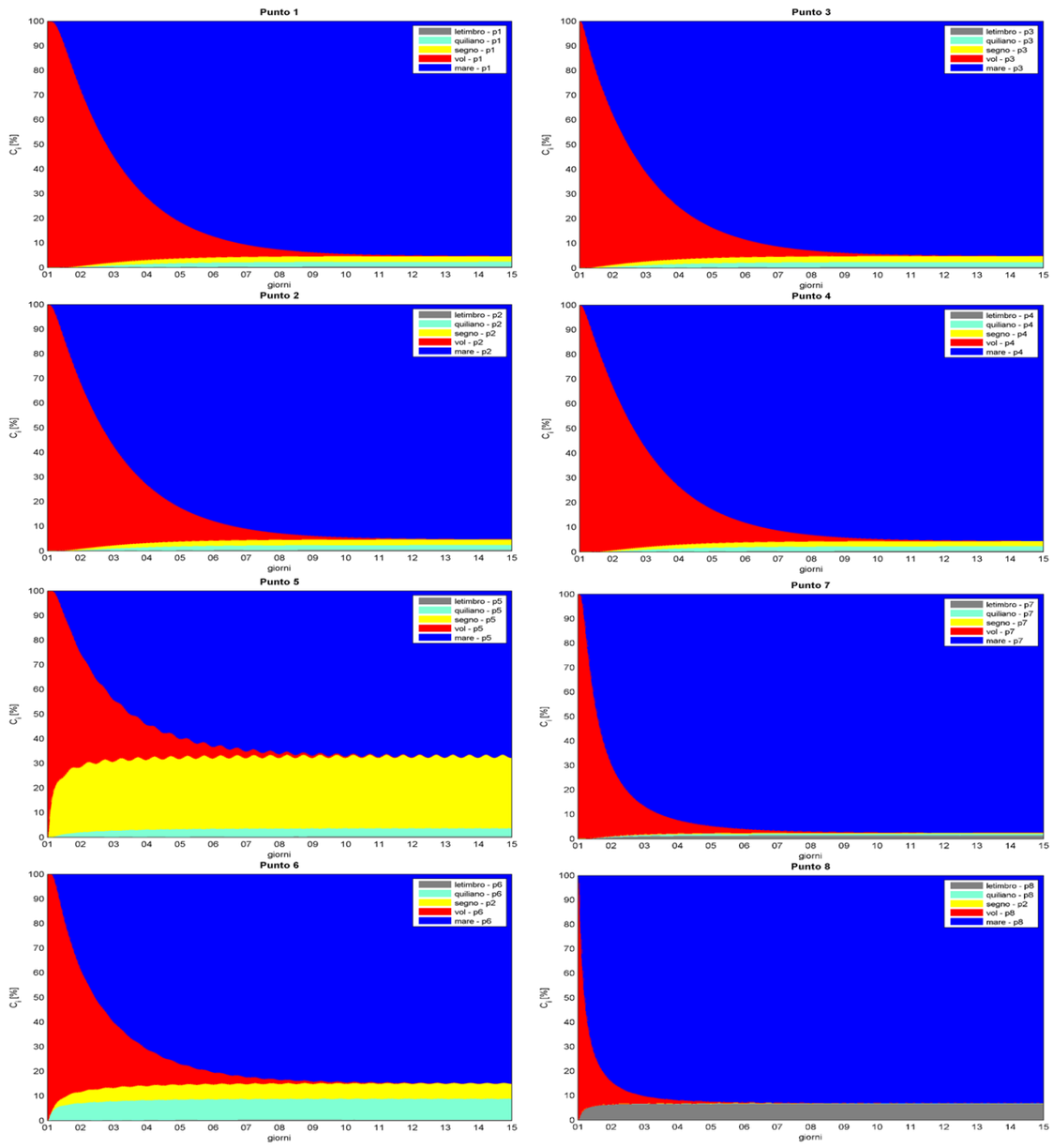


FIGURA 3-25 – RISULTATI DELLA "FRACTION ANALYSIS".

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 3-26.

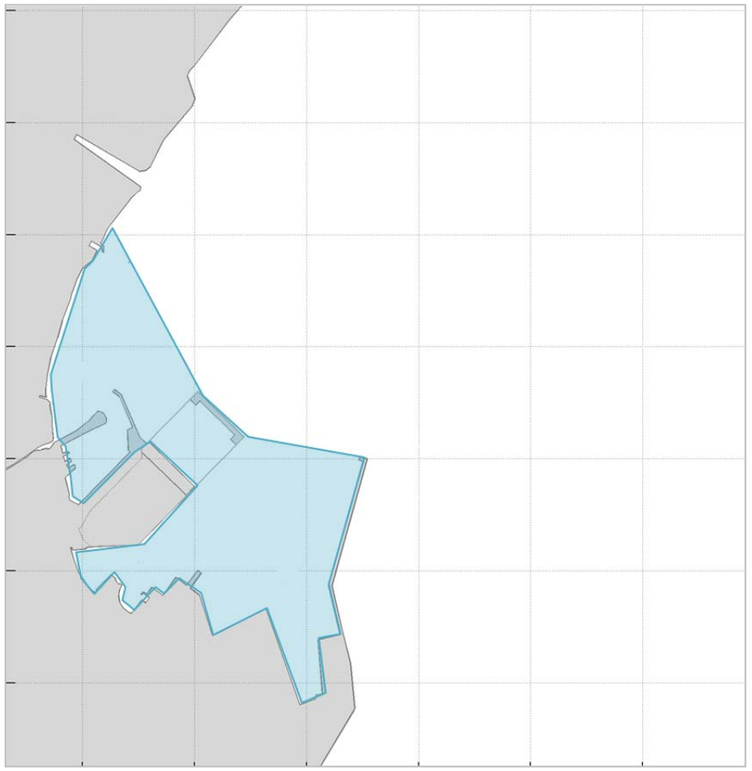


FIGURA 3-26 – DISTRIBUZIONE INIZIALE DEL TRACCIANTE UTILIZZATO PER IL TEMPO DI RICAMBIO

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.

In Figura 3-27 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 3-27 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 20-22 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 14–16 ore; i valori del tempo di ricambio cadono nell'intervallo 18-20 nell'area litoranea compresa tra la foce del Segno e la radice della piattaforma e diminuiscono rapidamente fino ad annullarsi allontanandosi verso nord. All'interno del porto turistico si osservano valori attorno alle 22-24 ore.

In generale, si può notare che la configurazione di analisi con la diga di 1° fase e con il perimetro della piattaforma completamente chiuso, comporta una tendenza alla diminuzione del tempo di ricambio sia nella rada portuale, a sud-est della piattaforma, così come nel bacino del porto turistico.

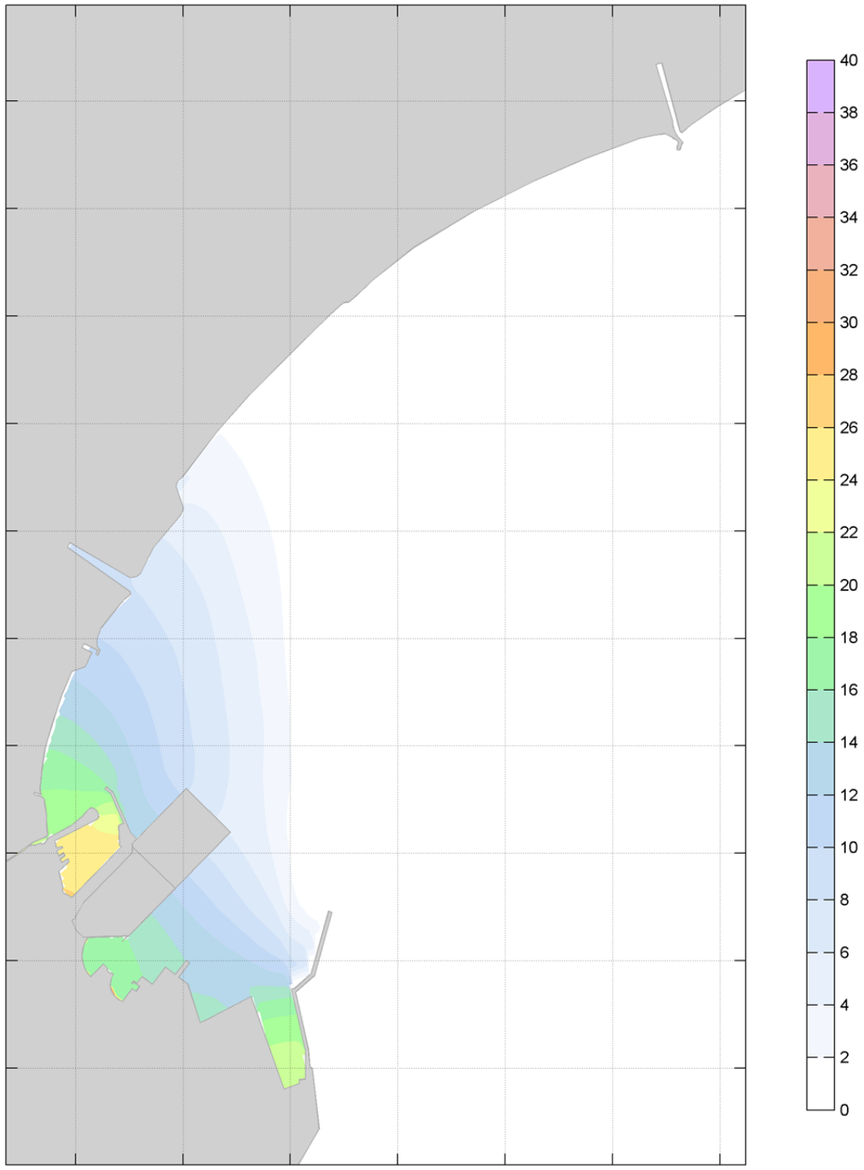


FIGURA 3-27 – DISTRIBUZIONE DEL TEMPO DI RICAMBIO (IN ORE).

3.1.2.4 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 software matematico Delft3D, un modello numerico è in grado di simulare la circolazione idrodinamica che si sviluppa per l'effetto combinato dell'azione delle maree, del moto ondoso e delle correnti litoranee. Una descrizione dei codici di calcolo e del set-up del modello viene riportata in Appendice.

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 Delft3D-Wave. Quest'ultimo si interfaccia in modo dinamico con il codice di calcolo Delft3D-Flow, fornendogli i valori dei "radiation stress" che generano le correnti litoranee.

I test eseguiti sono quelli individuati nel precedente paragrafo 3.1.1.1 e riportati nella Tabella 3-2 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.

I risultati dello studio della circolazione costiera sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Figura 3-28 a Figura 3-33) ei 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.

I risultati mostrano campi di corrente abbastanza articolati, con lo sviluppo di correnti di intensità e direzione varabili, con la formazione anche di vortici locali, in funzione dell'orientamento della linea di costa e dell'angolo di attacco delle onde rispetto al litorale. Per quanto riguarda le simulazioni effettuate in presenza di piena del T. Segno, con le mareggiate più contenute da 5 gg/anno, si può osservare che l'elemento dominante nel campo delle correnti risulta essere il flusso in uscita dalla foce del Torrente; risulta però anche evidente che il flusso in

uscita, pur rimanendo relativamente compatto, risente in maggiore misura delle forzanti associate alle mareggiate.

La circolazione che si sviluppa a seguito della mareggiata di Levante con frequenza di 1g/anno (TEST 1), è caratterizzata da correnti relativamente intense dirette verso Sud-Ovest, che si sviluppano da Nord fino alla foce del Segno fino a lambire il terrapieno della piastra. In quest'area la corrente litoranea diviene progressivamente meno intensa e tende a divergere verso largo con velocità nell'ordine di qualche decina di cm/s a causa della presenza dell'ostacolo opposto dal nuovo molo della darsena turistica..

La mareggiata di Scirocco con frequenza di 1g/anno (TEST 2) induce delle correnti meno intense lungo il litorale dirette rispettivamente verso nord a partire dal punto di divergenza in corrispondenza della cuspide fociva del Quiliano e verso sud nella porzione di litorale più a sud. La corrente che si sviluppa in quest'area è più irregolare e sostanzialmente meno intenso rispetto al caso precedente dato l'andamento della linea di costa con il distacco della vena della corrente e la formazione di un ridotto vortice anticiclonico immediatamente a sud del Quiliano.

Per la mareggiata di Mezzogiorno con frequenza di 1g/anno (TEST 3), si osserva come la circolazione sia caratterizzata da intensità assai debole e sia diretta pressoché ovunque verso Nord-Est.

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 co-unque 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 generale, si può osservare che la configurazione di analisi della piattaforma multifunzionale di Vado Ligure (con la piattaforma conterminata da cassoni e la diga di 1° fase), non comporta variazioni significative nell'andamento della circolazione costiera indotta dal moto ondoso.

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

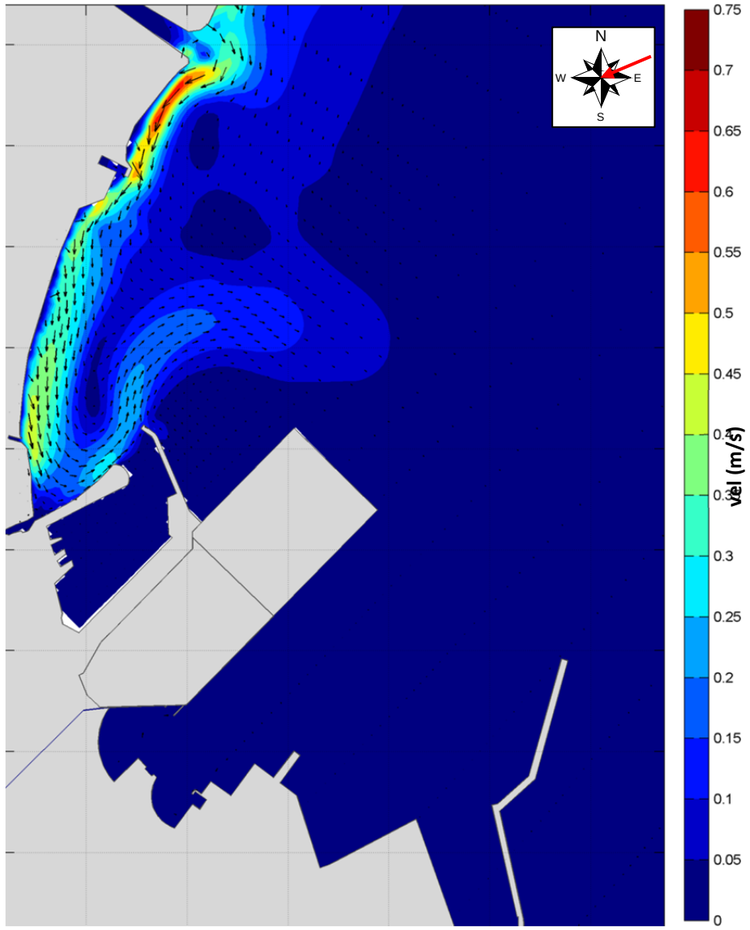


FIGURA 3-28 – TEST1 – CIRCOLAZIONE COSTIERA CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 1.64 M - TP = 6.50 S – DIR = 75°N

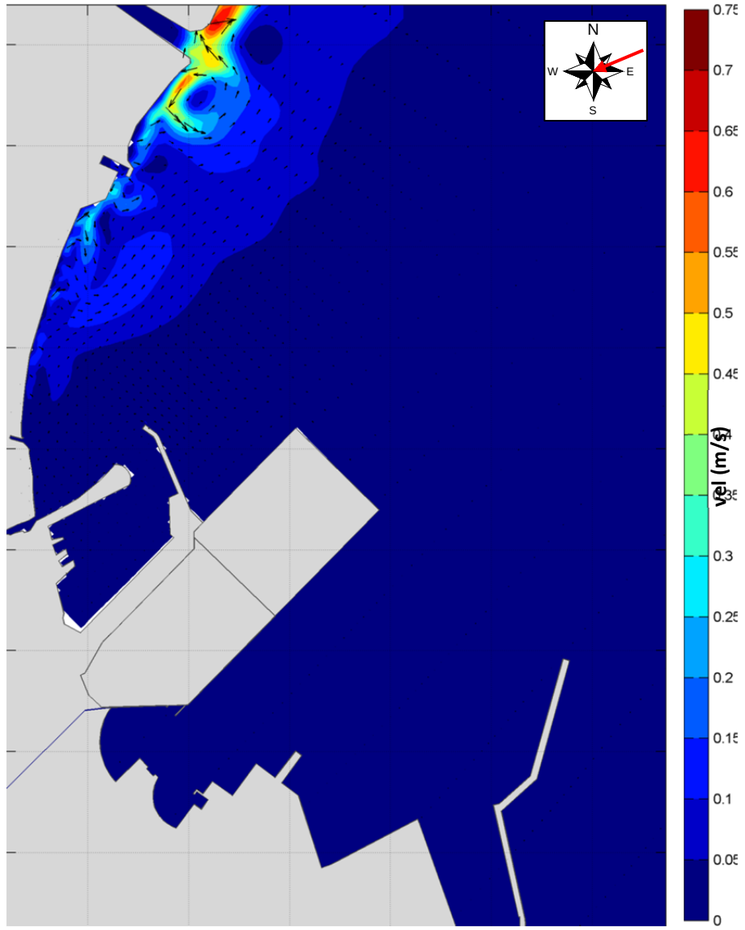


FIGURA 3-29 – TEST2 - CIRCOLAZIONE COSTIERA CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 1.93 M - TP = 6.80 S – DIR = 145°N

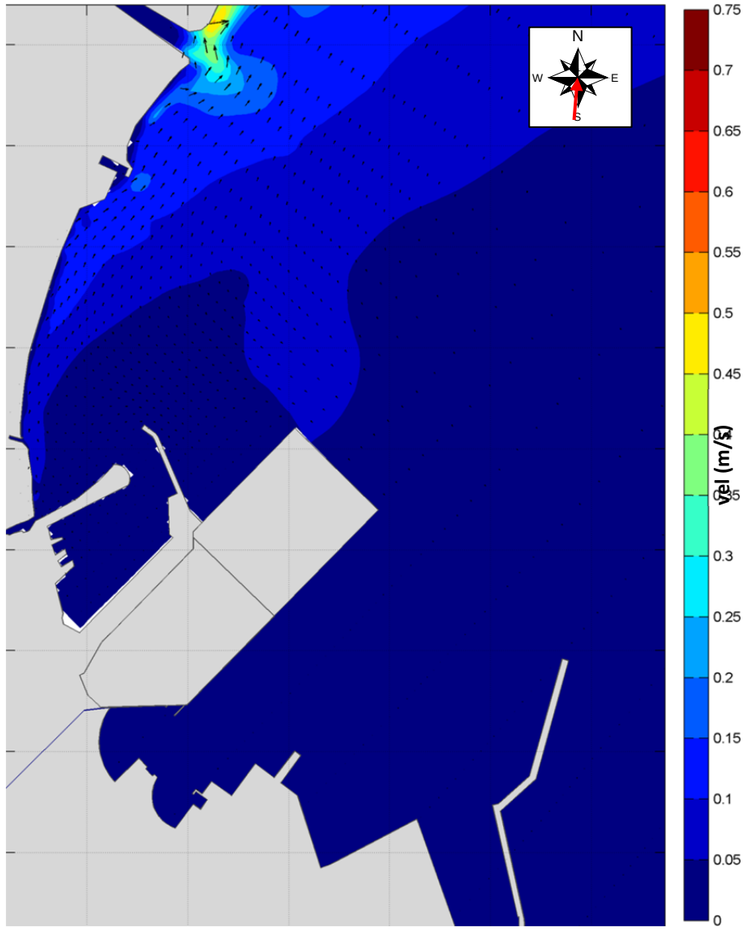


FIGURA 3-30 – TEST3 - CIRCOLAZIONE COSTIERA CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 2.22 M - TP = 7.80 S – DIR = 185°N

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

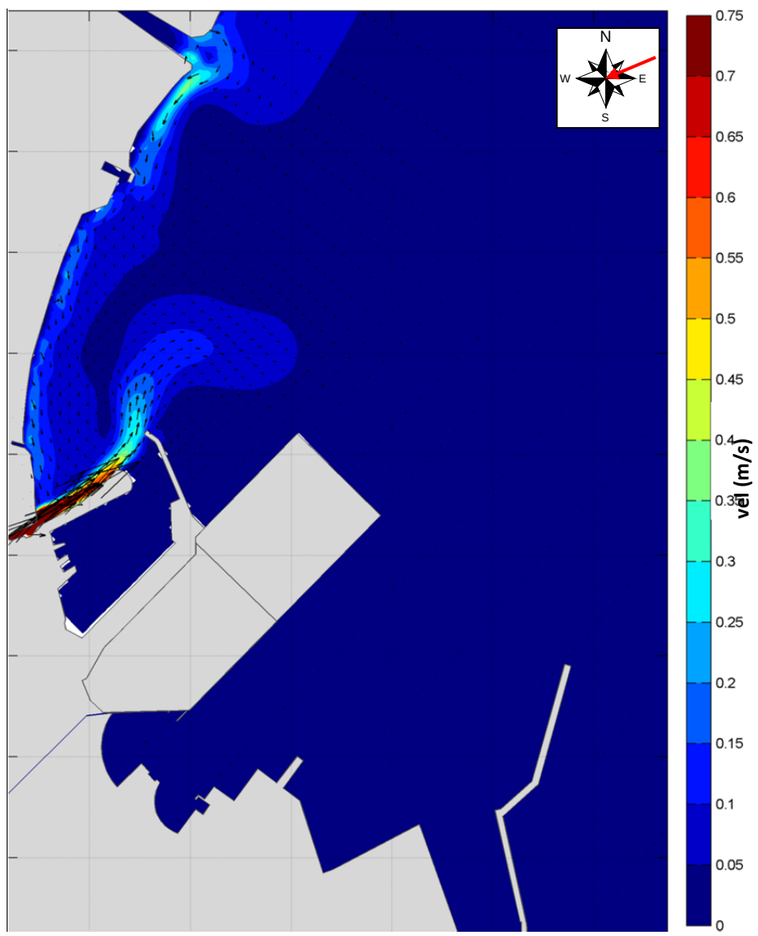


FIGURA 3-31 – TEST4 - CIRCOLAZIONE COSTIERA CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 0.93 M - TP = 5.20 S – DIR = 75°N

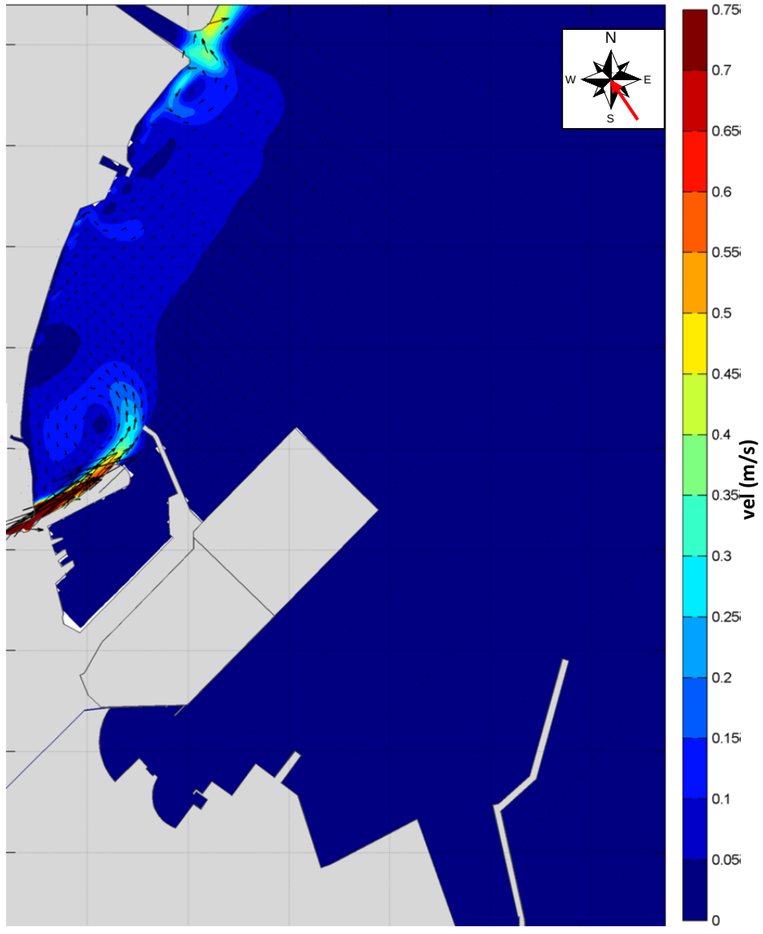


FIGURA 3-32 – TEST5 - CIRCOLAZIONE COSTIERA CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 1.17 M - TP = 5.60 S – DIR = 145°N

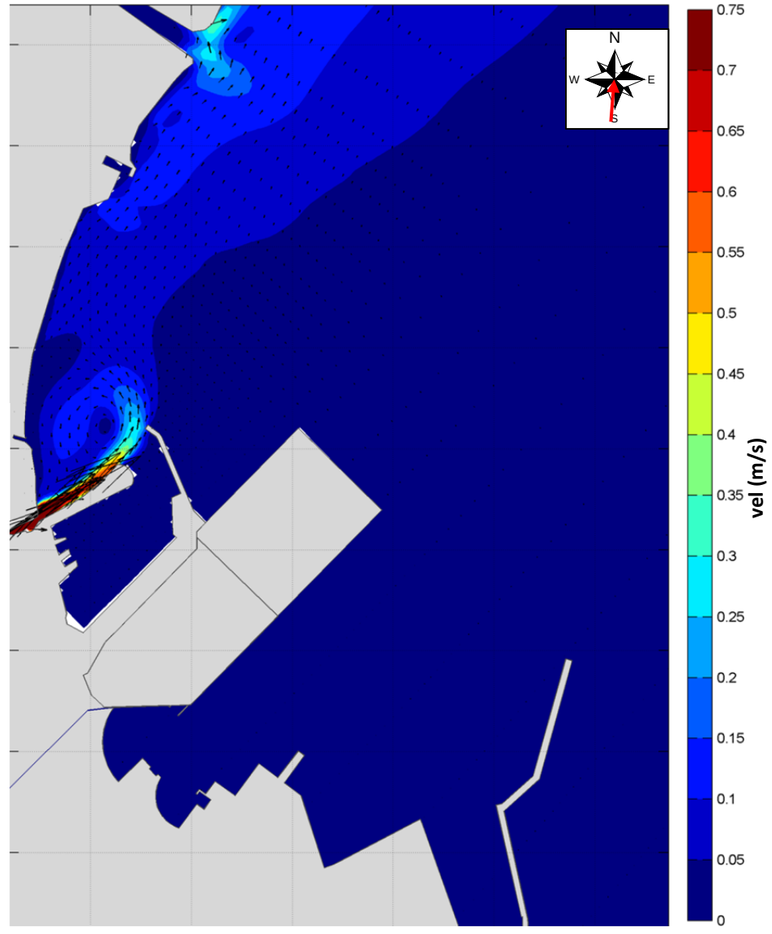


FIGURA 3-33 – TEST6 - CIRCOLAZIONE COSTIERA CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 1.61 M - TP = 6.80 S – DIR = 185°N

3.1.2.1 Trasporto solido litoraneo e tendenze evolutive del fondale

Utilizzando l'accoppiamento del codice di calcolo Delft3D-FLOW con il codice di calcolo Delft3D-WAVE, è stato inoltre condotto lo studio del trasporto solido litoraneo.

Il codice di calcolo Delft3D-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 (Delft3D -WAVE) e il campo di velocità e di livelli generato dal moto ondoso e dall'evento di piena (risultati del modello Delft3D-FLOW).

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 D50 (diametro media-no dei grani) pari a 0.20 mm. Si rimanda all'Appendice per una più dettagliata descrizione delle modalità con cui è stato ricavato tale valore.

I risultati in termini di trasporto solido, per la configurazione di riferimento in fase di realizzazione, ottenuti per mezzo del codice di calcolo Delft3D-FLOW interfacciato con il codice di calcolo Delft3D-WAVE, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Figura 3-34 a Figura 3-39).

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).

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 (cuspide fociva sommersa), mentre risulta piuttosto ridotta la mobilitazione dei sedimenti nel tratto centrale e meridionale del litorale ghiaioso-sabbioso tra le due foci.

La mareggiata di Levante caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 1) gene-ra nel tratto di litorale a Nord, fino al cantiere nautico / parcheggio 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 si osserva una sensibile diminuzione della mobilitazione dei sedimenti, per effetto delle ridotte velocità della corrente. La mobilitazione prosegue poco oltre la scogliera radente a protezione del campo di basket fino ad annullarsi poco a Nord 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 sostanzialmente 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, non si genera una mobilitazione di sedimenti significativa.

Per quanto riguarda la mobilitazione di sedimenti generata dalle mareggiate caratterizzate da frequenza maggiore (5gg/anno), si può osservare come questa risulti piuttosto ridotta e assuma un modesto 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 potenzialmente in grado di mobilitare una notevole quantità di materiale lungo l'asta fluviale, generando un intenso tra-sporto di materiale fino alla foce. Oltre la foce, invece, si osserva, per tutte i test eseguiti, una rapida diminuzione di intensità del trasporto, con il materiale che sedimenta entro breve distanza non appena la corrente cala di intensità. Si può, quindi, osservare che il trasporto alla foce non risulta sostanzialmente influenzato dalle concomitanti mareggiate.

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 da sedimenti di dimensioni uguali o inferiori ai 0.2 mm.

In generale, si può osservare che la configurazione di analisi della piattaforma multifunzionale di Vado Ligure (con la piattaforma conterminata da cassoni e la diga di 1° fase), non comporta variazioni significative nell'andamento trasporto solido litoraneo.

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

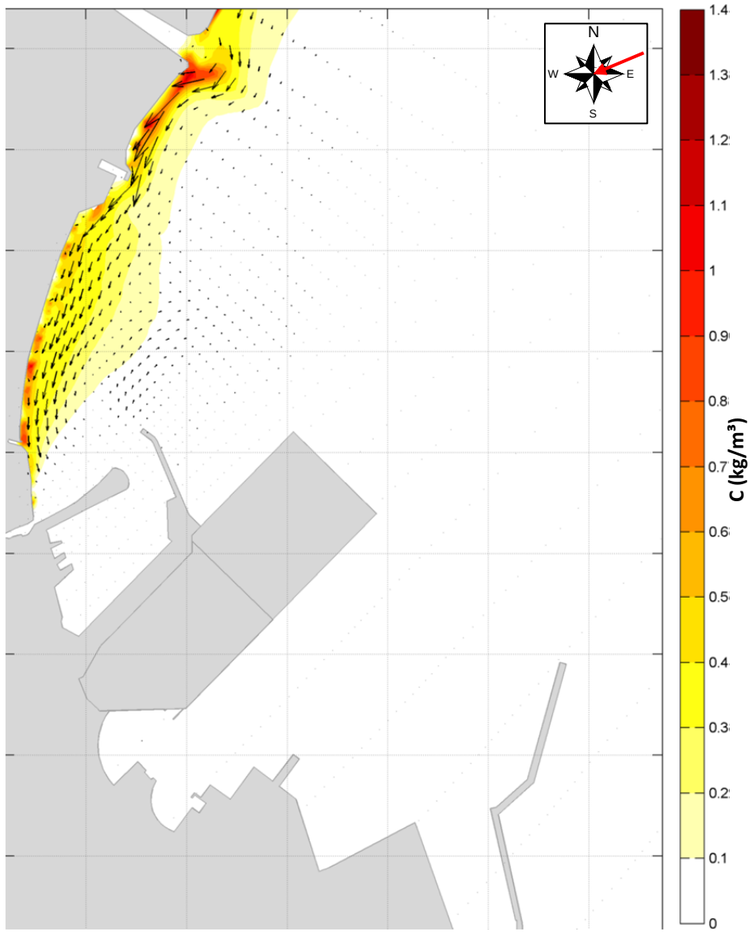


FIGURA 3-34 – TEST1 – TRASPORTO SOLIDO
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 1.64 M - TP = 6.50 S – DIR = 75°N

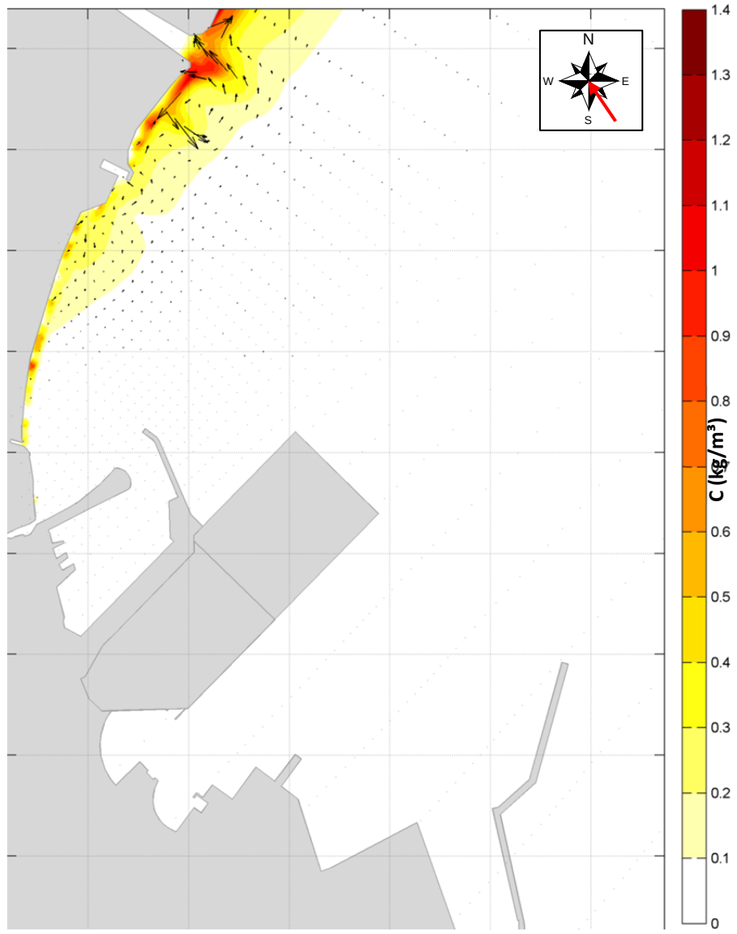


FIGURA 3-35 – TEST2 - TRASPORTO SOLIDO
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 1.93 M - TP = 6.80 S – DIR = 145°N

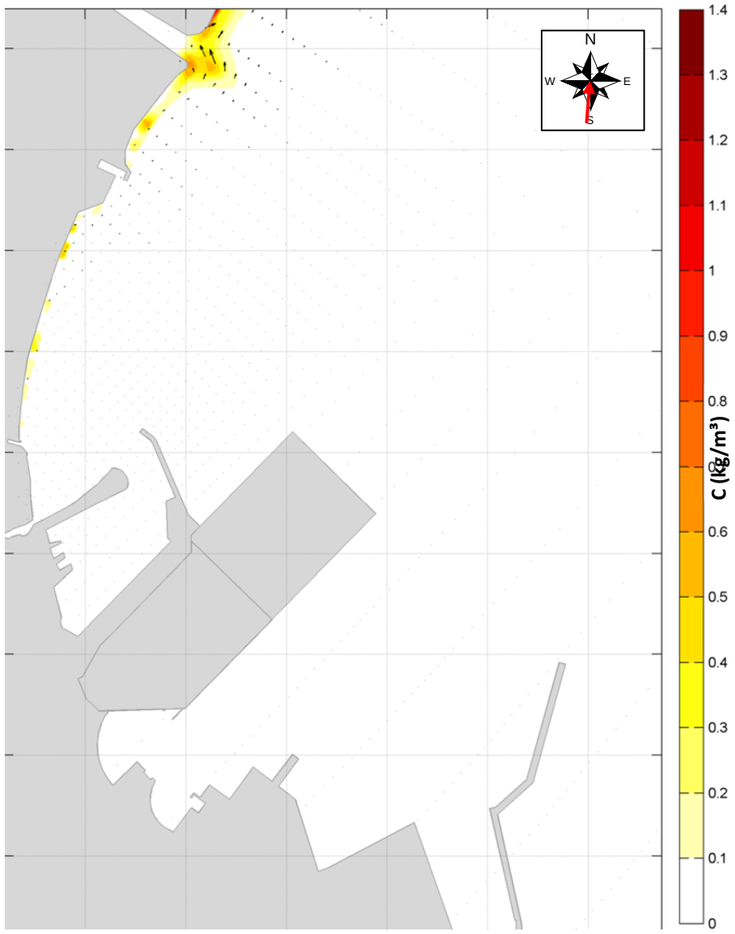


FIGURA 3-36 – TEST3 - TRASPORTO SOLIDO
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 2.22 M - TP = 7.80 S – DIR = 185°N

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

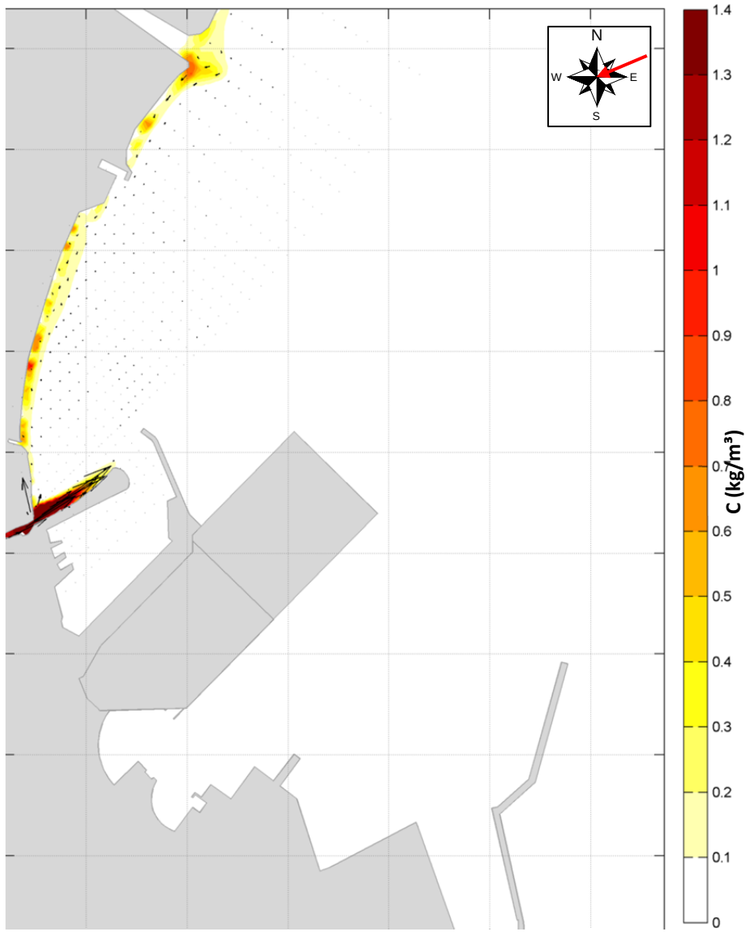


FIGURA 3-37 – TEST4 - TRASPORTO SOLIDO CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 0.93 M - TP = 5.20 S – DIR = 75°N

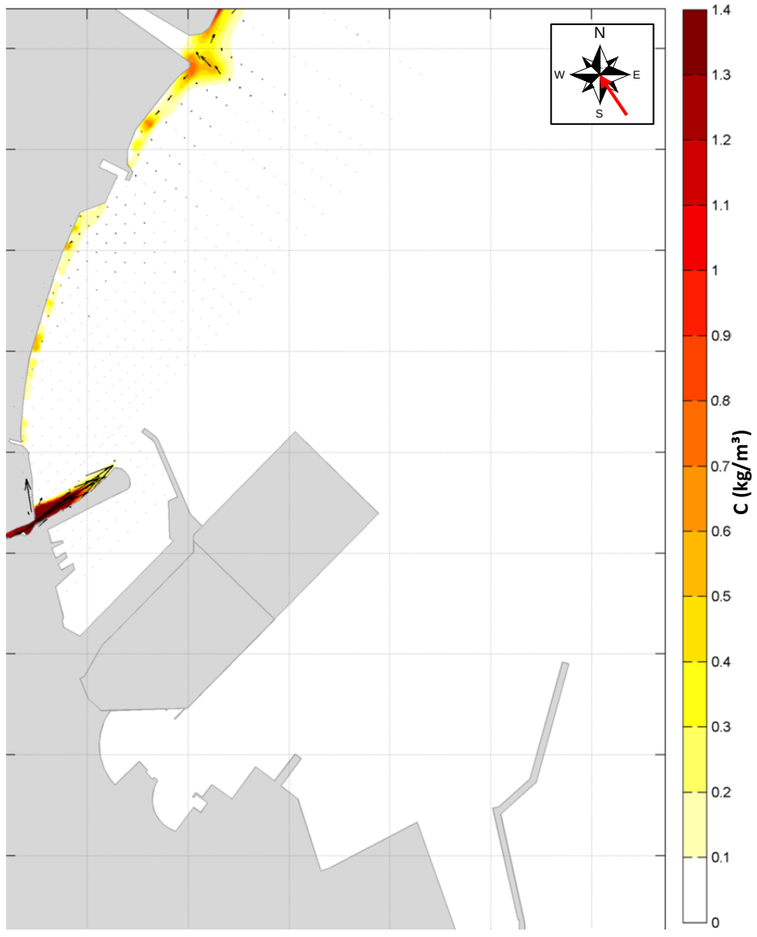


FIGURA 3-38 – TEST5 - TRASPORTO SOLIDO CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 1.17 M - TP = 5.60 S – DIR = 145°N

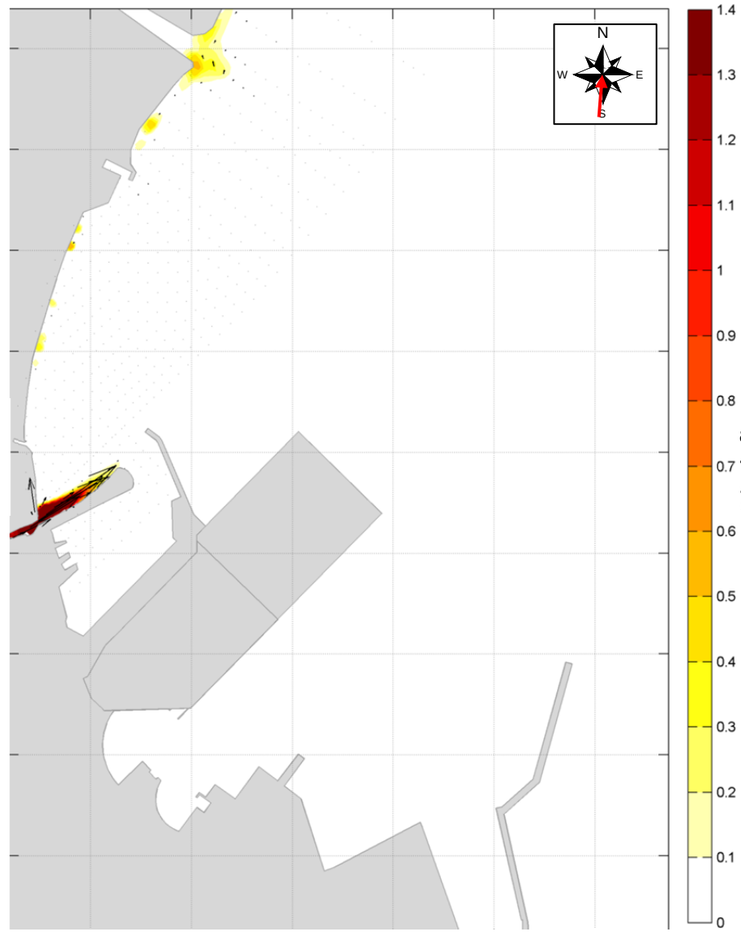


FIGURA 3-39 – TEST6 - TRASPORTO SOLIDO CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 1.61 M - TP = 6.80 S – DIR = 185°N

3.1.2.2 Tendenze evolutive del fondale

Per ciascuna delle mareggiate precedentemente analizzate sono stati ricavati i risultati, attraverso il codice di calcolo Delft3D-FLOW, in termini di evoluzione del fondale. I risultati delle simulazioni 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 delle simulazioni per la configurazione di riferimento in fase di esercizio, in termini di evoluzione del fondale, sono riportati nelle figure successive (da Figura 3-40 a Figura 3-45) 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 migrazione dei sedimenti dalla zona Nord (in erosione) verso la zona Sud (accrescimento).

Per la mareggiata di Levante caratterizzata da una frequenza di 1g/anno (TEST 1) si osserva infatti che nel tratto a Nord, della spiaggia compresa tra l'area camper e la scogliera radente a protezione del campo di basket, sono presenti aree soggette ad erosione, mentre nel tratto meridionale si osservano aree soggette a deposizione. Nel tratto più a Sud, fino al T. Segno, non si rilevano invece tendenze evolutive rilevanti ad esclusione di una tendenza alla deposizione di materiale anche poco oltre scogliera del campo da basket.

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).

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 centrale della spiaggia stessa. Tale tendenza risulta comunque piuttosto limitata, anche in relazione alla effettiva disponibilità di sedimenti nell'area.

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

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 nuova-mente che, considerata la dimensione del materiale impiegato nella simulazione (0.2 mm), tali esiti rappresentano un risultato potenziale.

Dai risultati ottenuti, si può osservare che la configurazione di analisi della piattaforma multifunzionale di Vado Ligure (con la piattaforma conterminata da cassoni e la diga di 1° fase), non induce modificazioni significative delle tendenze evolutive del fondale.

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

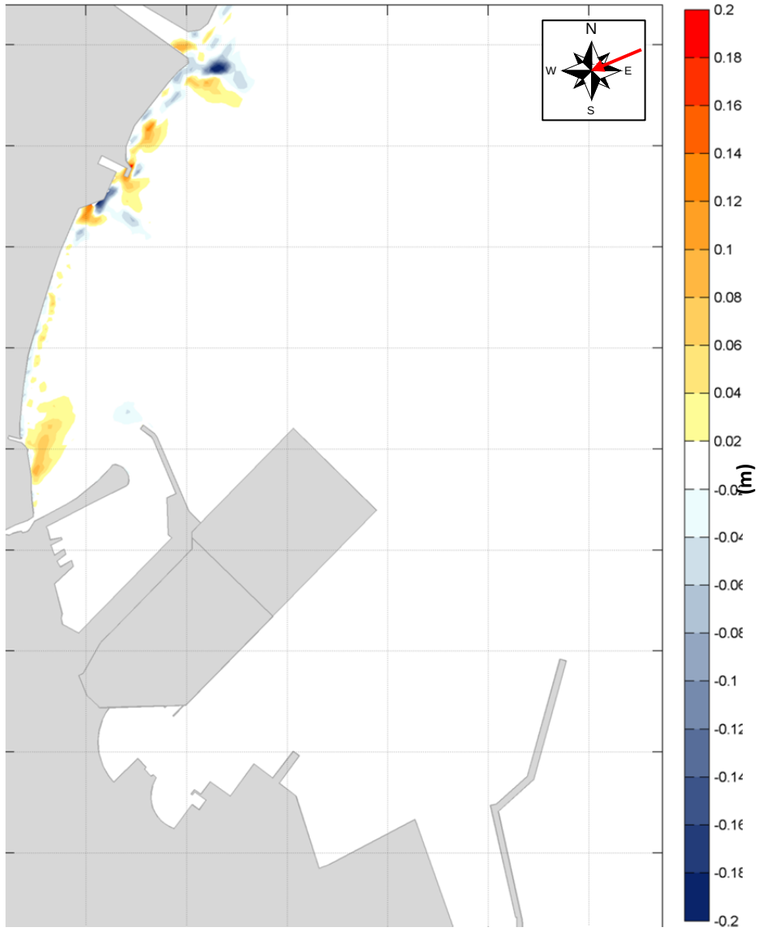


FIGURA 3-40 – TEST1 – EVOLUZIONE DEL FONDALE CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 1.64 M - TP = 6.50 S – DIR = 75°N

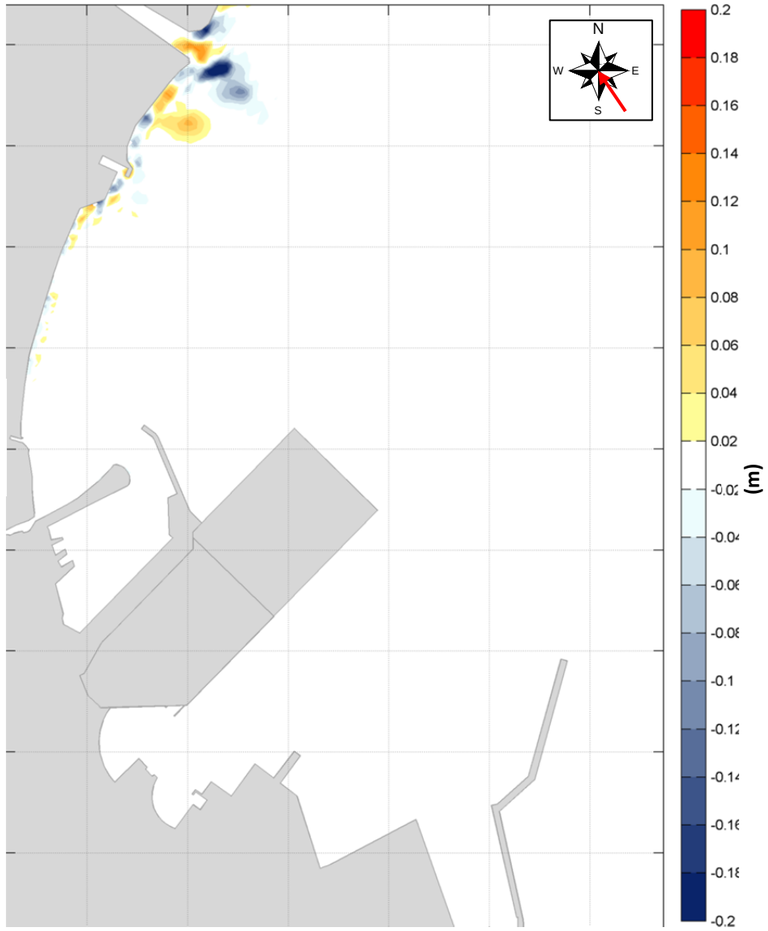


FIGURA 3-41 – TEST2 - EVOLUZIONE DEL FONDALE CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 1.93 M - TP = 6.80 S – DIR = 145°N

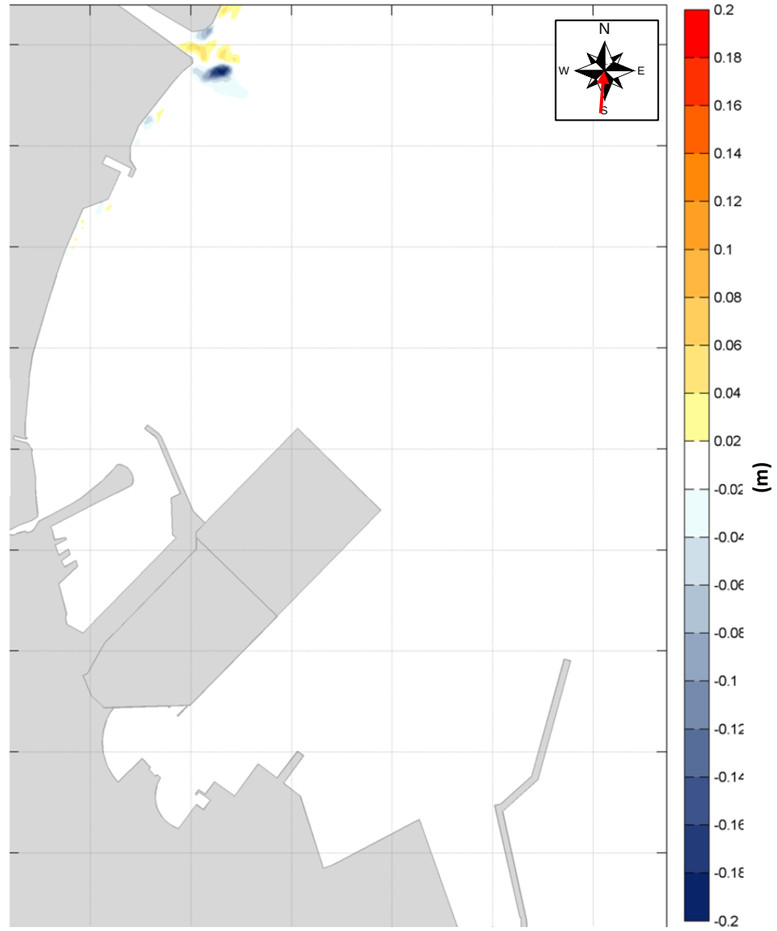


FIGURA 3-42 – TEST3 - EVOLUZIONE DEL FONDALE CONFIGURAZIONE DI ANALISI HS = 2.22 M - TP = 7.80 S – DIR = 185°N

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

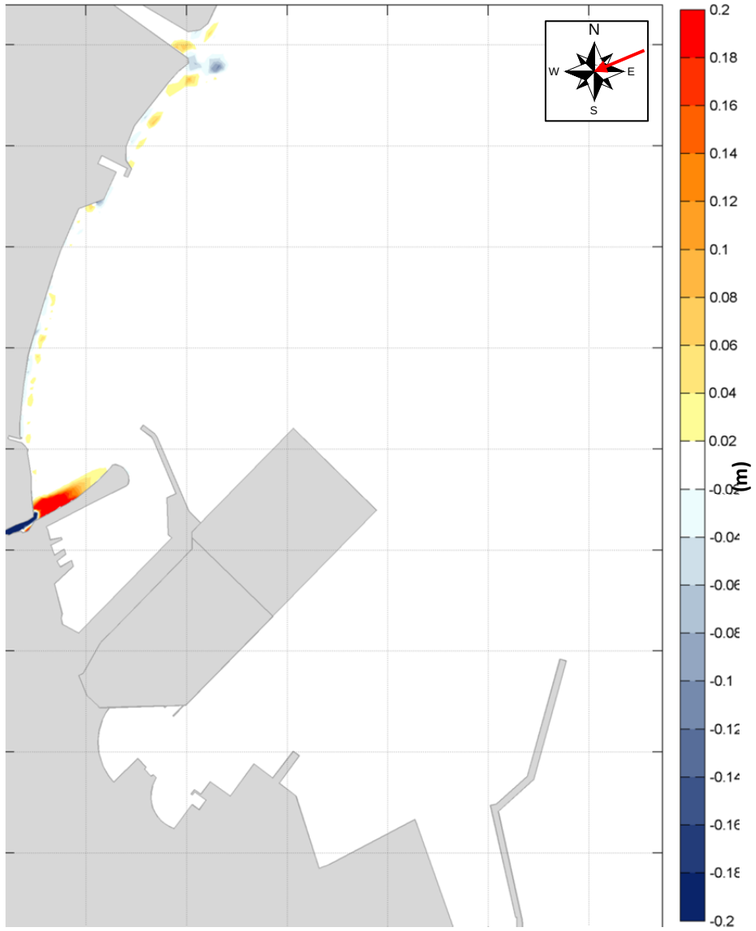


FIGURA 3-43 – TEST4 - EVOLUZIONE DEL FONDALE
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 0.93 M - TP = 5.20 S – DIR = 75°N

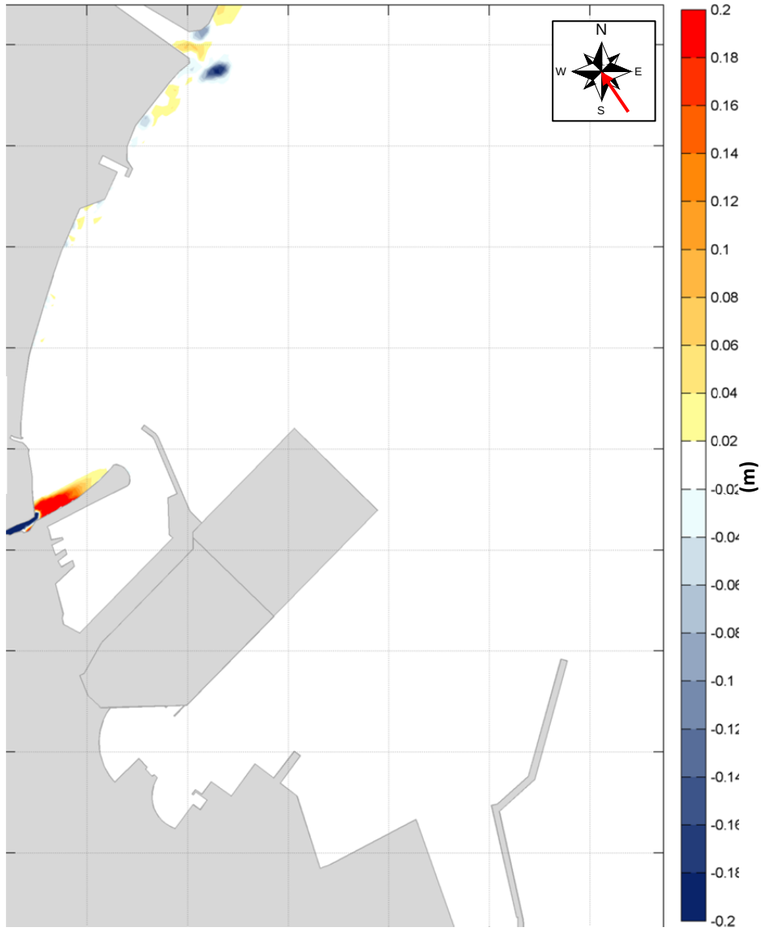


FIGURA 3-44 – TEST5 - EVOLUZIONE DEL FONDALE
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 1.17 M - TP = 5.60 S – DIR = 145°N

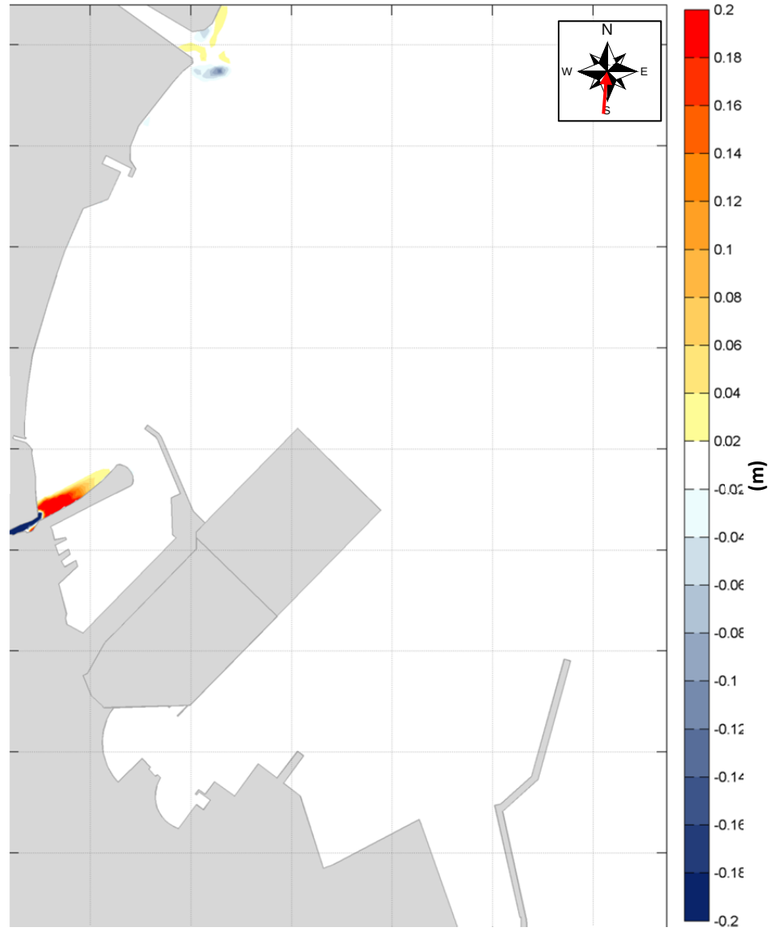


FIGURA 3-45 – TEST6 - EVOLUZIONE DEL FONDALE
CONFIGURAZIONE DI ANALISI
HS = 1.61 M - TP = 6.80 S – DIR = 185°N

3.1.3. 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 del-la più ampia suite di software Delft3D, un sistema integrato di modelli numerici sviluppato presso i laboratori dell'istituto di ricerca "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 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 1m³/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 3-46 a Figura 3-47; 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.

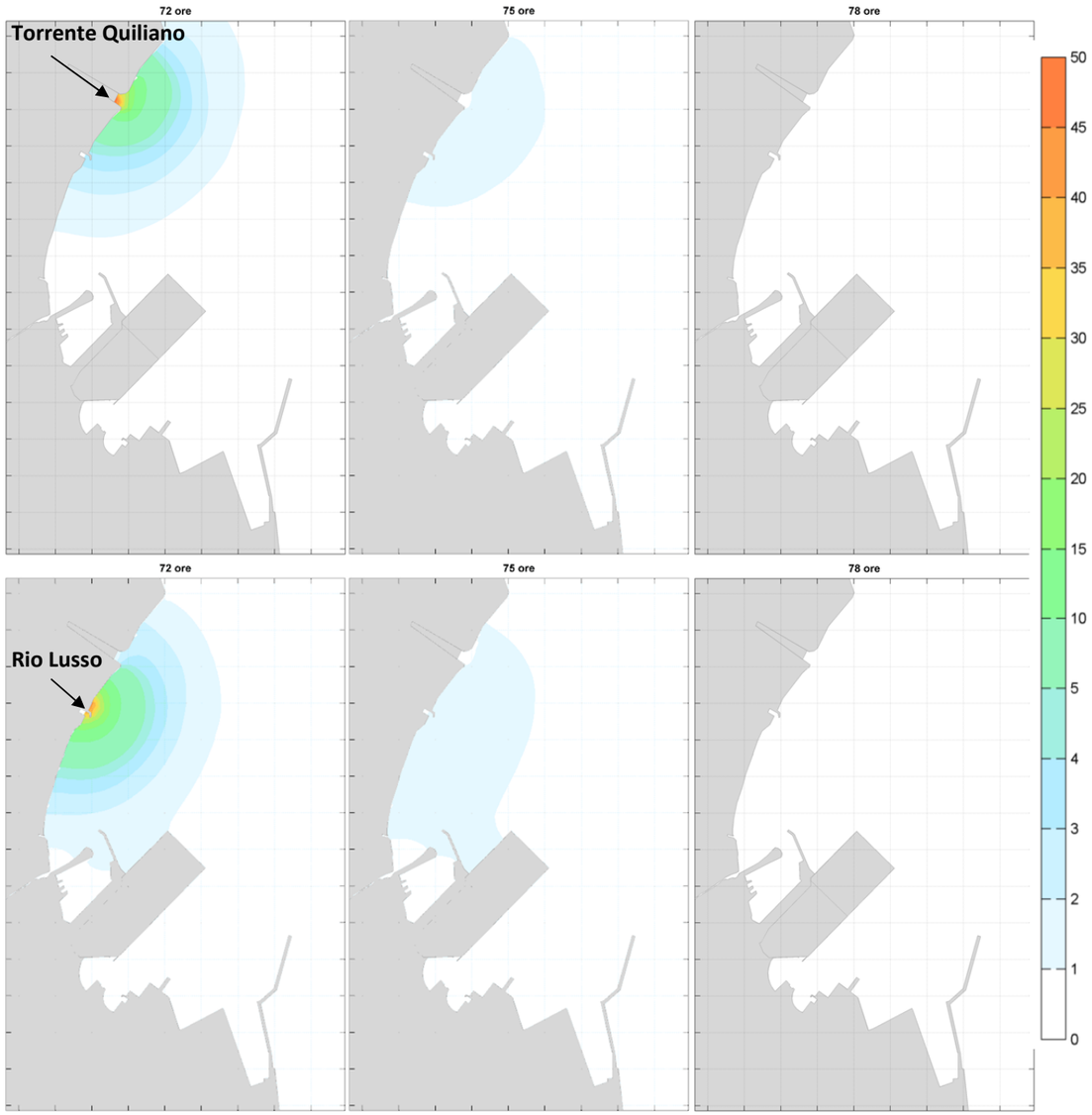


FIGURA 3-46 – ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI ESCHERICHIA COLI (C/C_0 X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE - RILASCIO TORRENTE QUILIANO (SOPRA) E RILASCIO RIO LUSSO (SOTTO).

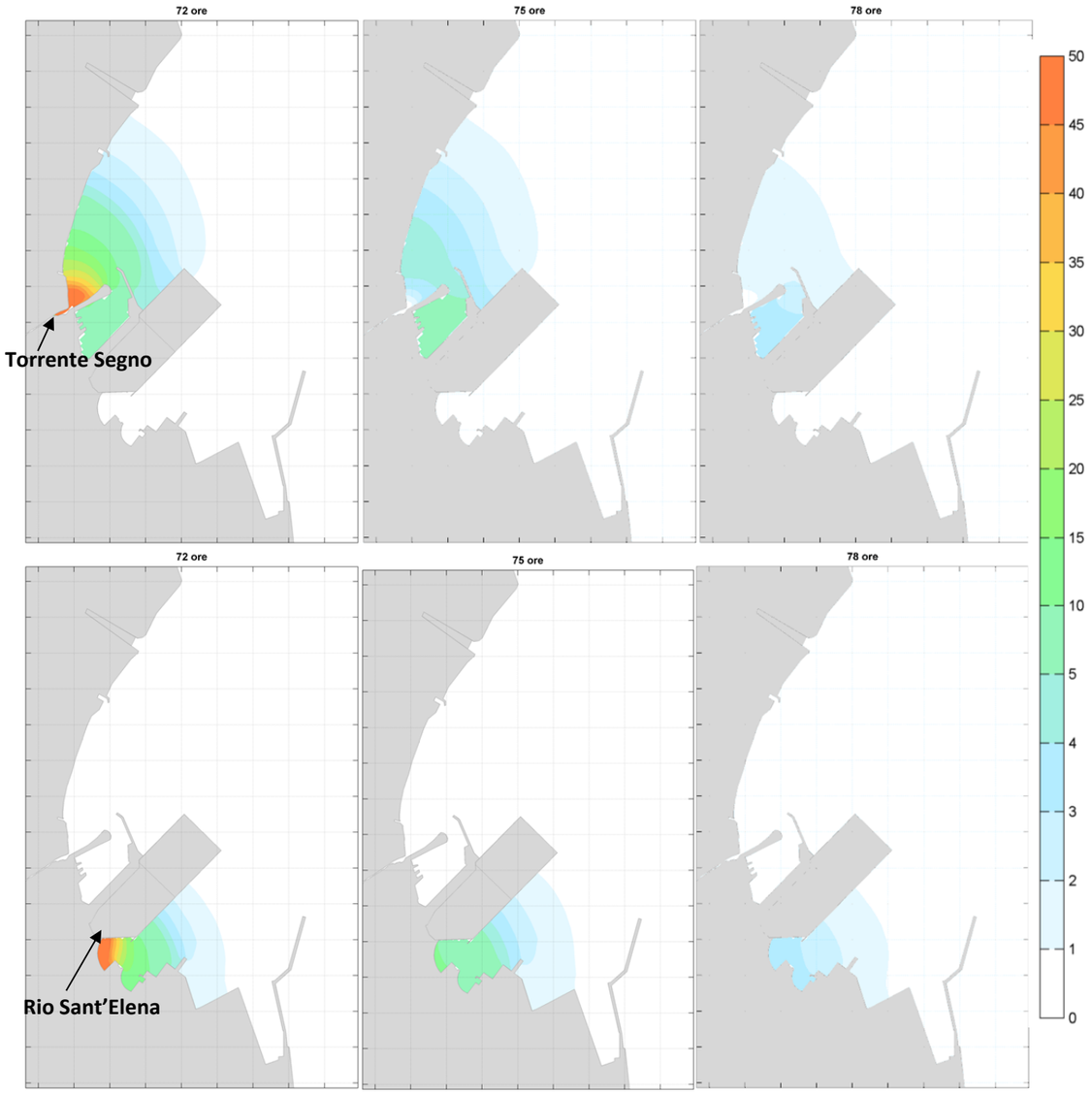


FIGURA 3-47 – ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI ESCHERICHIA COLI (C/C_0 X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE - RILASCIO TORRENTE SEGNO (SOPRA) E RILASCIO RIO SANT'ELENA (SOTTO).

Dai risultati si osserva che, 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 un arco temporale variabile tra le 5 e le 9 ore dalla fine del rilascio.

Per quanto riguarda il Torrente Quiliano ed il Rio Lusso il pennacchio del tracciante assume una forma semicircolare nelle vicinanze del punto di scarico e 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 Torrente Segno si nota che la presenza del molo di sopraflutto della darsena turistica che si estende a partire dalla foce del Segno e la radice della piattaforma rappresentano un ostacolo fisico alla propagazione del tracciante batterico. Questo determina un aumento locale delle concentrazioni nelle immediate vicinanze della foce e all'interno del porto turistico. In termini assoluti, nell'istante finale della simulazione, i valori delle concentrazioni sono nell'ordine del 50 ‰ nell'immediato intorno del rilascio e tendono rapidamente a scendere sotto il 10 ‰ alla distanza di qualche centinaio di metri. Anche in questo caso la riduzione dei traccianti batterici è rapida e nell'arco di 6 ore le concentrazioni superficiali scendono sotto la soglia del 1 ‰ in tutto il dominio ad eccezione del bacino racchiuso all'interno della darsena turistica.

Per quanto concerne il 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 pennacchio 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 8 ore.

In generale, si può osservare che la configurazione di analisi, con la piattaforma conterminata da cassoni e la diga di 1° fase, non modifica la qualità delle acque marino costiere lungo i litorali dei Vado Ligure per quanto riguarda la dispersione di traccianti di tipo batterico.

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 relativa alla configurazione della Perizia di variante del Progetto Esecutivo, considerando lo stato di attuazione delle opere di cui ai Capitoli 1 e 2.

La simulazione è stata condotta considerando le due principali variazioni alle opere introdotte con la perizia di variante (la chiusura totale della piastra multifunzionale, che viene quindi ad essere interamente costituita da un'area in rilevato conterminata da cassoni e la Ia fase della diga foranea, consistente nella ricollocazione di una parte dei cassoni della diga foranea esistente e realizzazione di due cassoni ex novo).

Le opere, nella configurazione prevista, sono state rappresentate nel dominio di calcolo DELFT3D-WAVE assieme al porto turistico (Figura 3-48). Con

riferimento a questa configurazione è stata quindi ripetuta la fase di propagazione del moto ondoso sottocosta.

Propagazione del moto ondoso sottocosta

La fase iniziale del modello di evoluzione morfologica consiste nel trasferimento sottocosta, al limite esterno della fascia attiva, delle caratteristiche del clima ondoso note in un punto al largo (punto U.K.M.O.).

La propagazione del moto ondoso sottocosta è stata eseguita mediante il modello DELFT3D-WAVE. Il clima ondoso è stato ricostruito in una serie di stazioni (in pratica una serie di boe virtuali) poste lungo la costa in corrispondenza della batimetrica –4,5 m s.m.m., ritenute significative per rappresentare le differenti condizioni di moto ondoso lungo il litorale (Figura 3-48).

Le dimensioni della griglia di calcolo DELFT3D-WAVE sono state mantenute invariate rispetto alla simulazione di taratura (riportata in appendice).

Parametri utilizzati nel modello

La simulazione di previsione dell'evoluzione della linea di costa a 10 anni (2014-2024) è stata eseguita mediante il modello matematico UNIBEST-CL+ (si rimanda all'Appendice per la descrizione dettagliata del 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 (riportata in Appendice). 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, sulla base dei risultati della simulazione di taratura.

Si evidenzia che nel modello UNIBEST la piastra multifunzionale e il molo di sopraflutto del porto turistico non sono stati schematizzati, in quanto l'effetto di schermatura dal moto ondoso da essi determinato viene già considerato nelle simulazioni di propagazione del moto ondoso sottocosta eseguite mediante il modello DELFT3D-WAVE . Il molo di sottoflutto del porto turistico è stato invece schematizzato anche nella griglia di calcolo UNIBEST, in quanto interferisce con l'evoluzione della linea di costa nel tratto meridionale del litorale oggetto di analisi. Tale molo è stato rappresentato nel modello con una barriera completamente impermeabile ai sedimenti, radicata a terra.

La linea di riva iniziale inserita nel modello è quella desunta dall'immagine satellitare di Google Earth, datata giugno 2014. A riguardo si evidenzia che tale linea di riva, che rappresenta la più recente disponibile, è stata utilizzata in sostituzione della linea di riva del 2010 considerata nell'ambito dello SIA approvato, al fine di studiare l'evoluzione del litorale a partire da una sua configurazione che si avvicini il più possibile a quella attuale.

Di seguito, in Figura 3-49, si riporta la schematizzazione adottata per la linea di riva del 2014 e le opere presenti lungo il litorale, in relazione alla configurazione di variante.

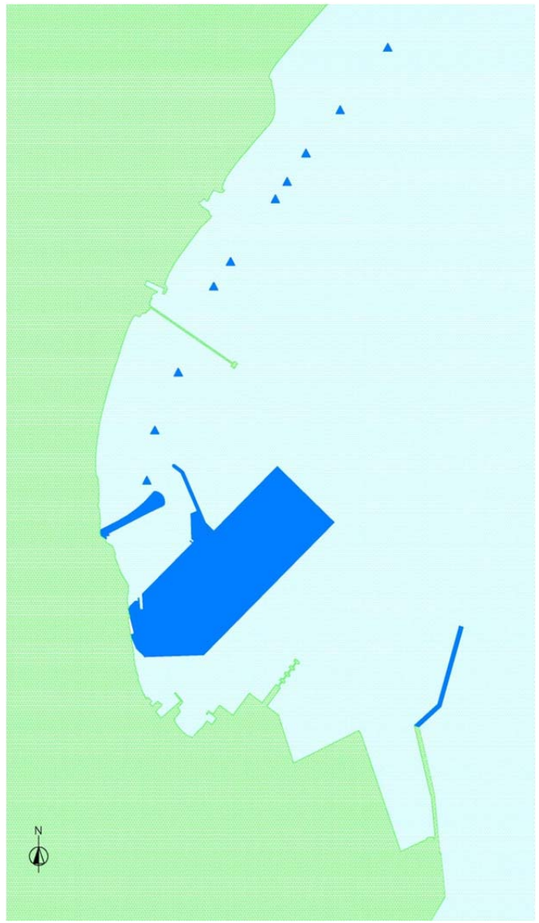


FIGURA 3-48 – CONFIGURAZIONE DI ANALISI – UBICAZIONE DELLE BOE VIRTUALI (STAZIONI) POSTE ALLA PROFONDITÀ DI –4,5 M S.M.M.



FIGURA 3-49 - CONFIGURAZIONE DI ANALISI – SCHEMATIZZAZIONE LINEA DI RIVA E OPERE

Risultati dell'evoluzione morfologica

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di evoluzione morfologica a 10 anni, nella configurazione di analisi.

I risultati sono rappresentati nella successiva Figura 3-50, in termini di trasporto solido e in Figura 3-51 in termini di evoluzione della linea di riva, con riferimento all'intera griglia di calcolo.

Nel tratto di litorale a Nord del campo da calcio (spiaggia di Zinola), il trasporto solido oscilla attorno al valore nullo, indice che la linea di riva è sostanzialmente stabile. In corrispondenza della foce del Torrente Quiliano si osserva un'inversione del trasporto solido (punto di divergenza); da questo punto in poi, il trasporto risulta sempre diretto verso Sud, verso il porto di Vado e si annulla in prossimità della scogliera radente presente poco più a Nord della foce del torrente Segno.

In termini di evoluzione della linea di costa, la linea di riva risulta sostanzialmente stabile nella spiaggia di Zinola, a Nord del terrapieno del campo da calcio.

Per quanto riguarda il tratto di litorale compreso tra il terrapieno del campo da calcio e la foce del Quiliano, si registra una lieve rotazione antioraria della linea di riva, con un arretramento della stessa in prossimità della scogliera radente a protezione del terrapieno ed un avanzamento in corrispondenza della foce del Quiliano.

Dalla foce del Quiliano, procedendo verso Sud, fino al cantiere nautico alla radice del pontile Tirreno Power, la linea di riva subisce una rotazione antioraria con arretramento a ridosso dell'armatura di foce del Quiliano e avanzamento a Sud (in corrispondenza del terrapieno del cantiere).

Nel tratto più a Sud, nella spiaggia compresa tra il cantiere navale e la foce del Segno, si evidenzia una modesta tendenza erosiva della spiaggia antistante l'area camper ed una contestuale tendenza all'accrescimento della spiaggia adiacente al terrapieno del campo da basket. Il trasporto, che rimane sempre orientato verso Sud (verso il porto di Vado), si riduce sensibilmente, fino ad annullarsi in prossimità della scogliera radente a Sud.

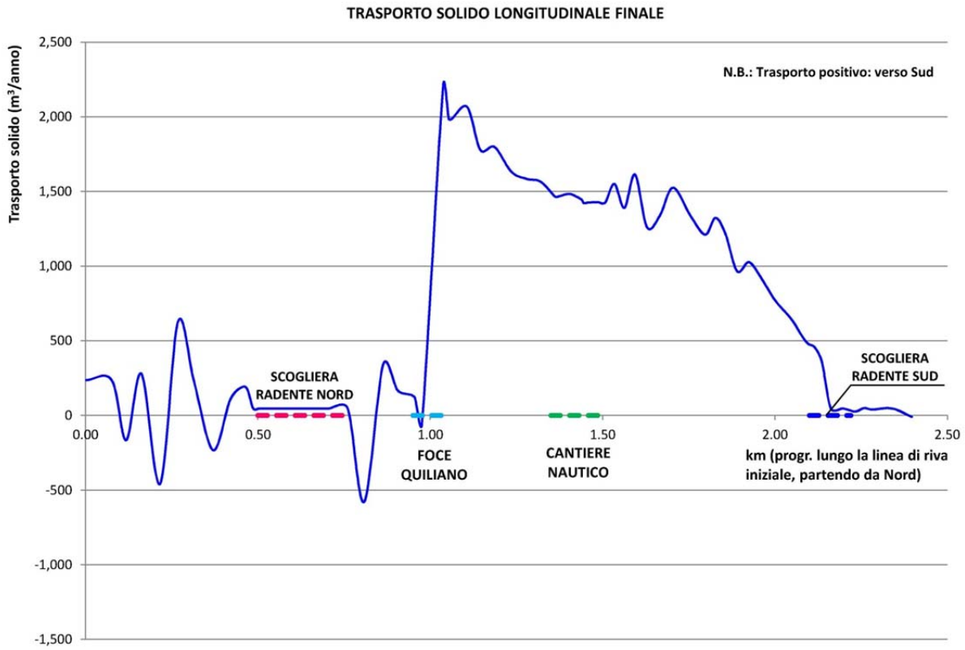


FIGURA 3-50 – CONFIGURAZIONE DI ANALISI - ANDAMENTO TRASPORTO SOLIDO LONGITUDINALE

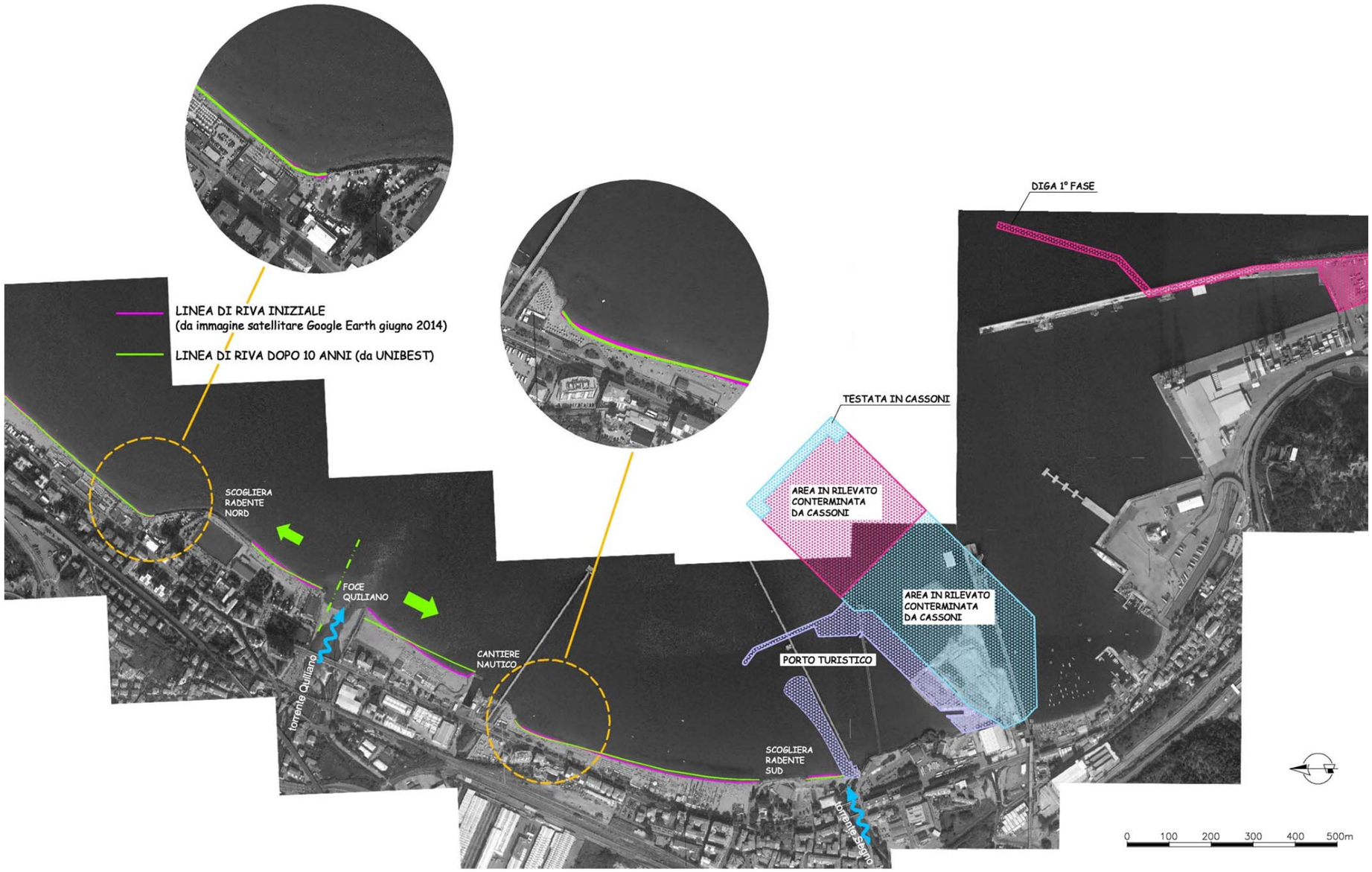


FIGURA 3-51 - CONFIGURAZIONE DI ANALISI - EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA

4. MISURE DI MITIGAZIONE

Le analisi effettuate hanno evidenziato che la realizzazione delle nuove opere, nella configurazione prevista dalla Perizia di variante e con riferimento all'attuazione delle opere dell'Accordo di Programma, non modifica la tendenza evolutiva del litorale riscontrata in riferimento all'ultima configurazione progettuale approvata (Progetto esecutivo Fase 2 e contestuale perizia di variante della Fase 1).

Il litorale di interesse, e in particolare la spiaggia a Nord del Segno, compresa tra il cantiere navale e il terrapieno del campo da basket, presenta una tendenza evolutiva caratterizzata dalla rotazione antioraria della linea di riva, con erosione localizzata a Nord (in prossimità dell'area camper) e accrescimento a Sud (a ridosso del terrapieno del campo da basket). Tale tendenza si è peraltro manifestata nel recente passato, seppur in maniera decisamente più marcata, in seguito alla costruzione della diga foranea del porto di Vado.

Le misure per contrastare gli effetti erosivi localizzati nel tratto di spiaggia immediatamente a Sud del cantiere navale, peraltro già in attuazione da parte dell'Autorità Portuale e da quantificare attraverso il monitoraggio sistematico del litorale, potrebbero prevedere il periodico ripascimento della spiaggia in prossimità dell'area camper, interessata dal modesto fenomeno erosivo.

Il sito di prelievo più opportuno potrebbe essere costituito dall'area di foce del T. Segno o potrebbe essere individuato anche nell'ambito della stessa spiaggia, nelle zone dove è stata evidenziata una tendenza all'accumulo di sedimenti.

5. ATTIVITA' DI MONITORAGGIO

5.1. Monitoraggio dell'evoluzione del litorale

Le analisi svolte hanno consentito di valutare gli effetti delle nuove opere sull'evoluzione morfologica del litorale, nella configurazione oggetto della presente analisi, descritta nel Capitolo 2.

I risultati delle analisi effettuate hanno evidenziato che la tendenza evolutiva del litorale riscontrata in riferimento all'ultima configurazione progettuale approvata (Progetto esecutivo Fase 2 e contestuale perizia di variante della Fase 1) non viene modificata.

Il litorale di interesse, e in particolare la spiaggia a Nord del Segno, compresa tra il cantiere navale e il terrapieno del campo da basket, presenta una tendenza evolutiva caratterizzata dalla rotazione antioraria della linea di riva, con erosione localizzata a Nord (in prossimità dell'area camper) e accrescimento a Sud (a ridosso del terrapieno del campo da basket). Tale tendenza si è peraltro manifestata nel recente passato, seppur in maniera decisamente più marcata, in seguito alla costruzione della diga foranea del porto di Vado. Si tratta comunque 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 caso 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.

<u>Analisi interpretativa dei dati raccolti</u>

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.

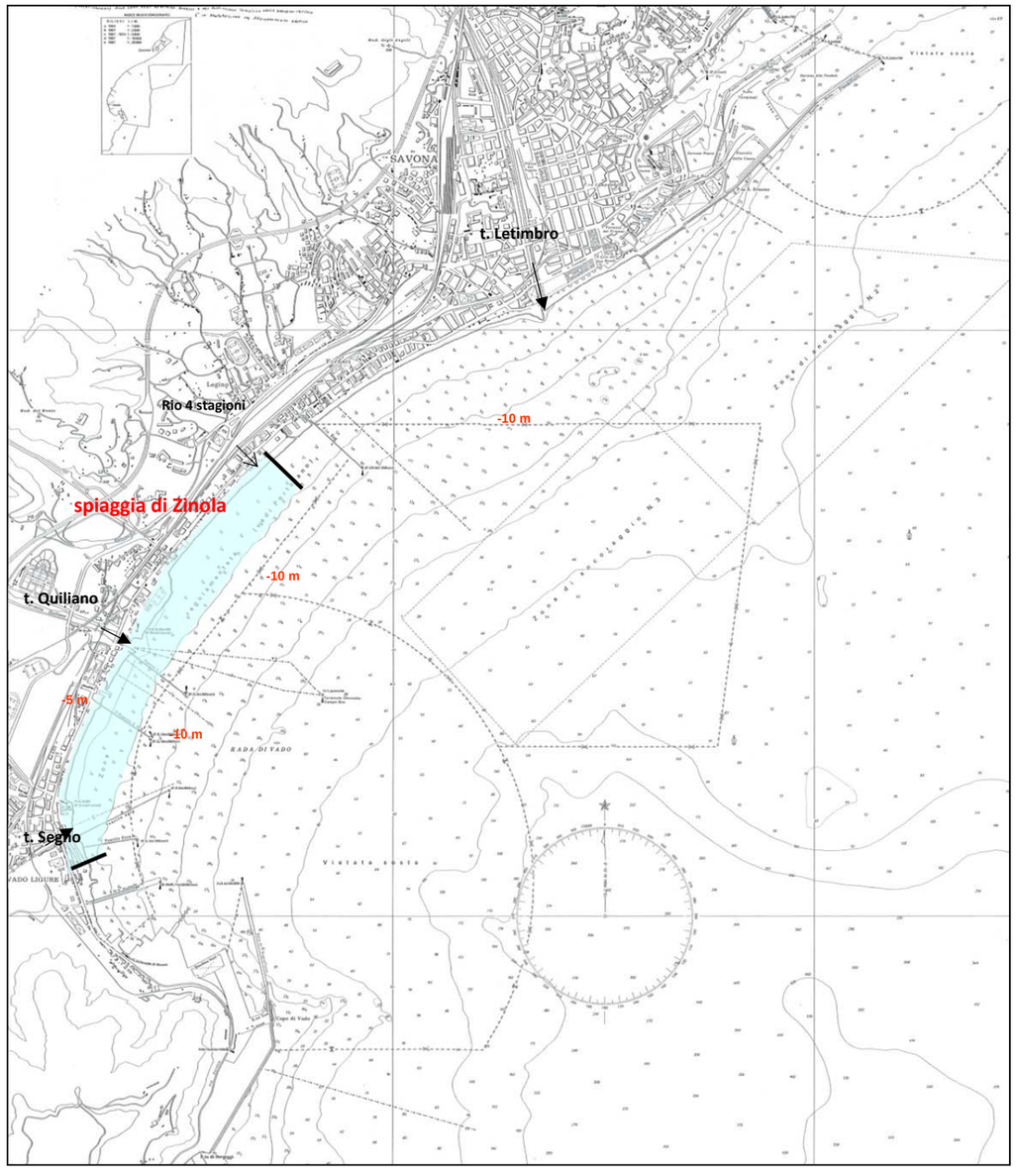


FIGURA 5-1 - ZONA INTERESSATA DAI RILIEVI DI CAMPO

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.

Per quanto riguardo il tempo di ricambio, i valori osservati nelle spiagge a sud della radice della piattaforma sono nell'ordine delle 14÷16 ore; i valori del tempo di ricambio cadono nell'intervallo 18÷20 nell'area litoranea compresa tra la foce del Segno e la radice della piattaforma e diminuiscono rapidamente fino ad annullarsi allontanandosi verso nord. All'interno del porto turistico si osservano valori attorno alle 22÷24 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 presenza delle opere 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 Lusso 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 piattaforma chiusa 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 ore.

In conclusione, la presenza della configurazione di analisi della piattaforma multifunzionale di Vado Ligure (con la piattaforma conterminata da cassoni e la diga di 1° fase) determina, in generale, differenze poco significative sulla circolazione idrodinamica e sulla capacità dispersiva del sistema rispetto a quelle con la configurazione di progetto completa. Per quanto riguardo il tempo di ricambio, si osserva una tendenza alla diminuzione del tempo di ricambio sia nella rada portuale, a sud-est della piattaforma, così come nel bacino del porto turistico.

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.

La presenza della configurazione con la diga di 1° fase non determina differenze significative nella dinamica litoranea rispetto a quella che si verifica con la configurazione di progetto completa (che prevede la presenza della diga completa come da P.R.P.).

Le analisi effettuate hanno evidenziato che la realizzazione delle nuove opere, nella configurazione prevista dalla Perizia di variante e con riferimento al documento attuativo dell'Accordo di Programma, non modifica la tendenza evolutiva del litorale riscontrata in riferimento all'ultima configurazione progettuale approvata (Progetto esecutivo Fase 2 e contestuale perizia di variante della Fase 1).

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.

La spiaggia immediatamente a Nord della foce del torrente Segno presenta una tendenza evolutiva caratterizzata dalla rotazione antioraria della linea di riva, con erosione localizzata a Nord (in prossimità dell'area camper) e accrescimento a Sud (a ridosso del terrapieno del campo da basket). Tale tendenza si è peraltro manifestata nel recente passato, seppur in maniera decisamente più marcata, in seguito alla costruzione della diga foranea del porto di Vado.

Si tratta comunque 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.

Eventuali piccole manutenzioni della spiaggia in prossimità dell'area camper potrebbero essere effettuate con materiale ghiaioso prelevabile dall'area di foce del T. Segno o nell'ambito della stessa spiaggia, nelle zone dove è stata evidenziata una tendenza accrescimento.

APPENDICE

DATI DI RIFERIMENTO PER L'ANALISI DELLA DINAMICA LITORANEA

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).

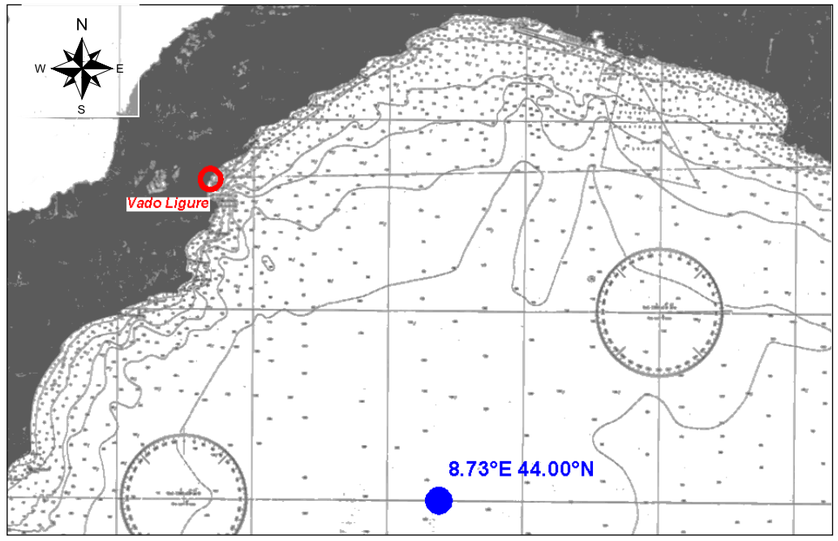


FIGURA 1-1 – PUNTO UKMO 8.73°E - 44.0°N

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.

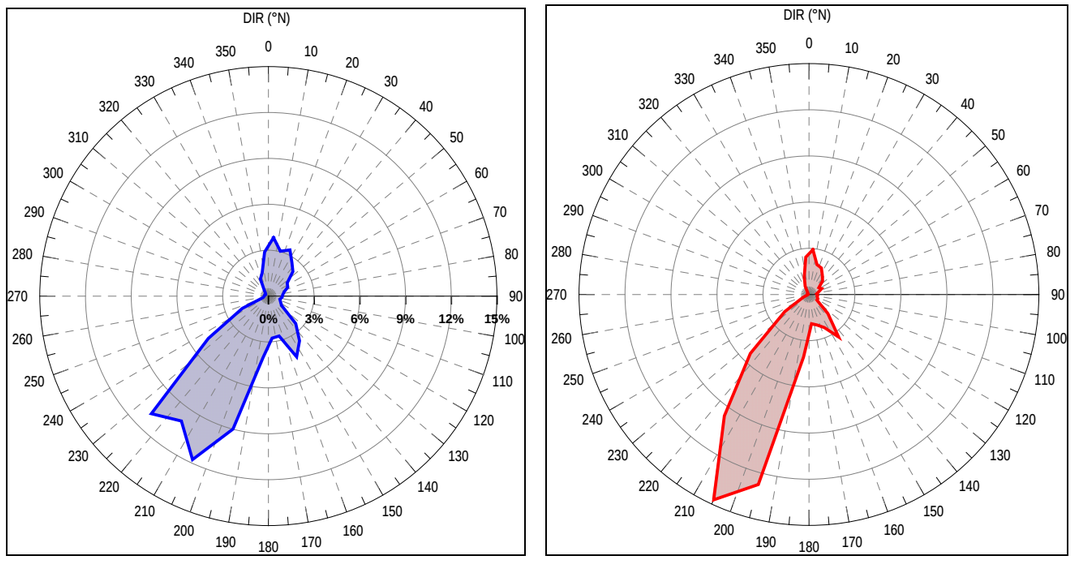


FIGURA 1-2 – ROSE DELLE REGISTRAZIONI (A SINISTRA) E DELLE ENERGIE (A DESTRA) RELATIVE AL PUNTO U.K.M.O.

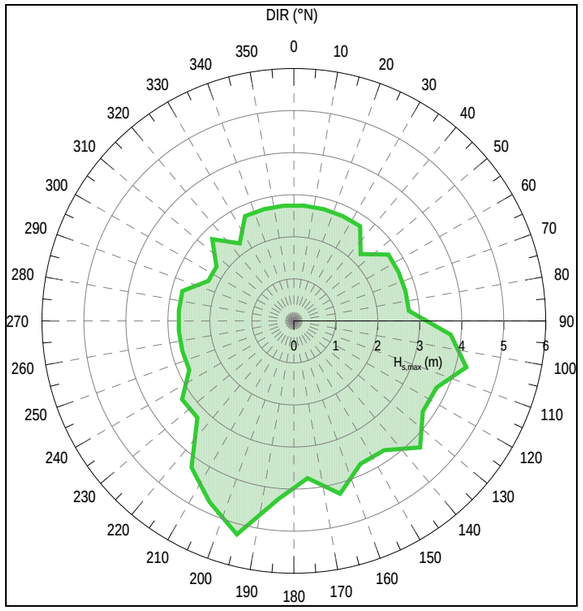


FIGURA 1-3 – ROSA DELLE ALTEZZE MASSIME RELATIVA AL PUNTO U.K.M.O.

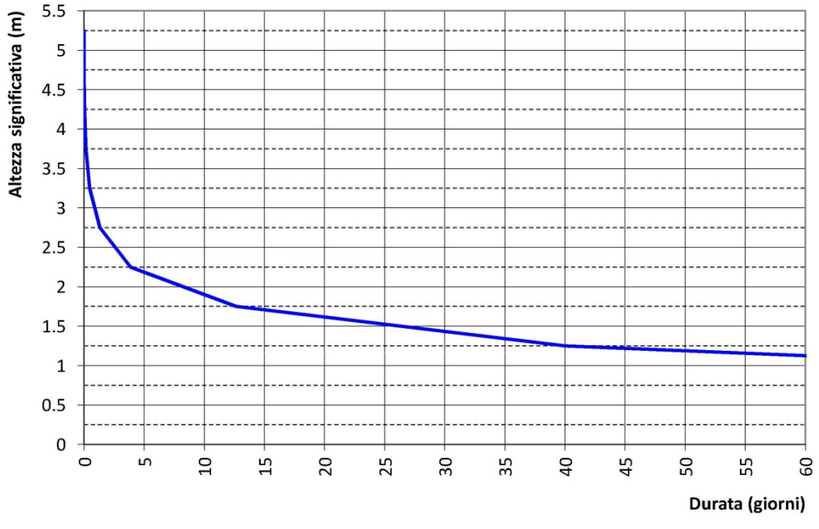


FIGURA 1-4 – CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO U.K.M.O.

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 Delft3D-WAVE, Delft3D-FLOW), con riferimento ad alcune mareggiate ritenute significative.

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.

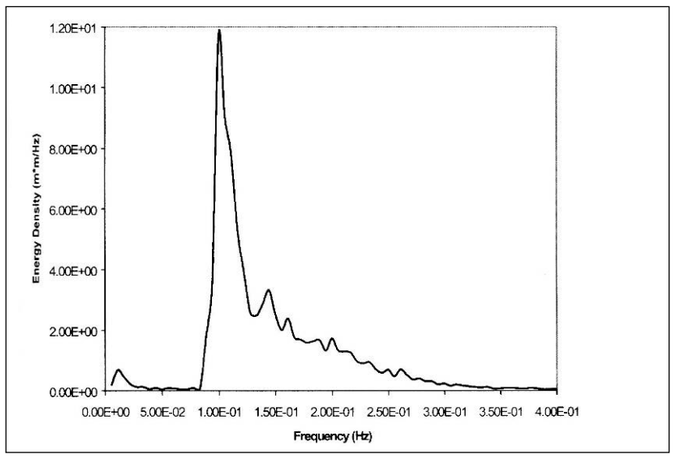


FIGURA 1-5 – SPETTRO MONODIMENSIONALE

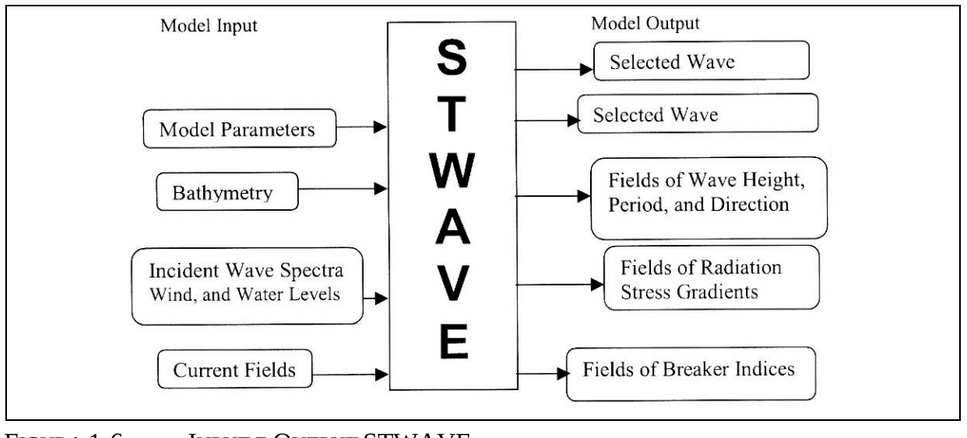


FIGURA 1-6 – INPUT E OUTPUT STWAVE

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.

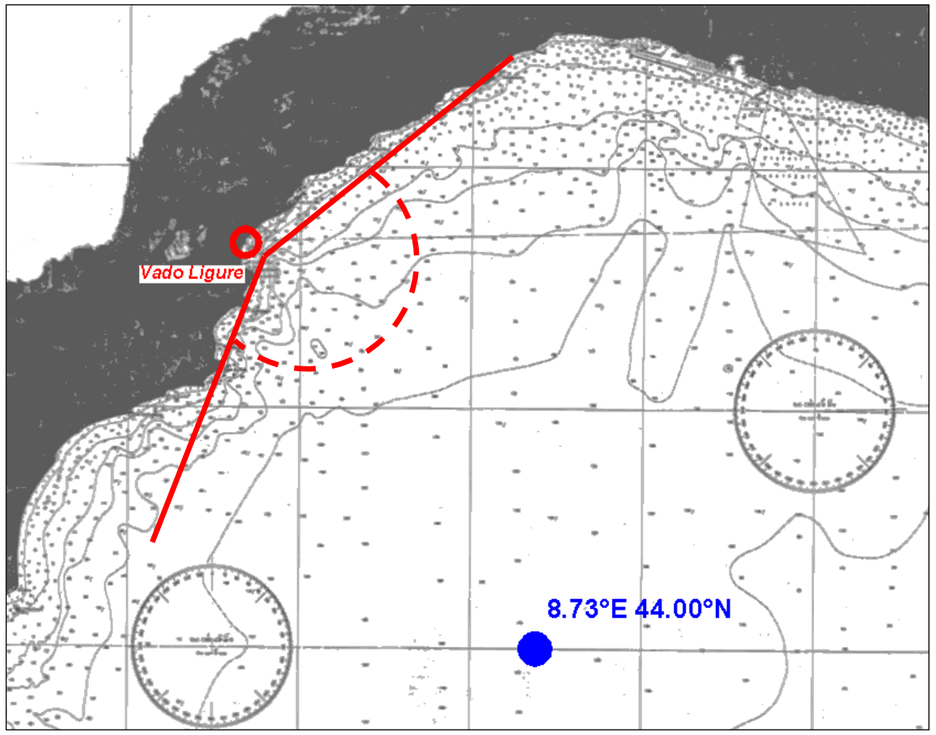


FIGURA 1-7 – SETTORE DI TRAVERSIA

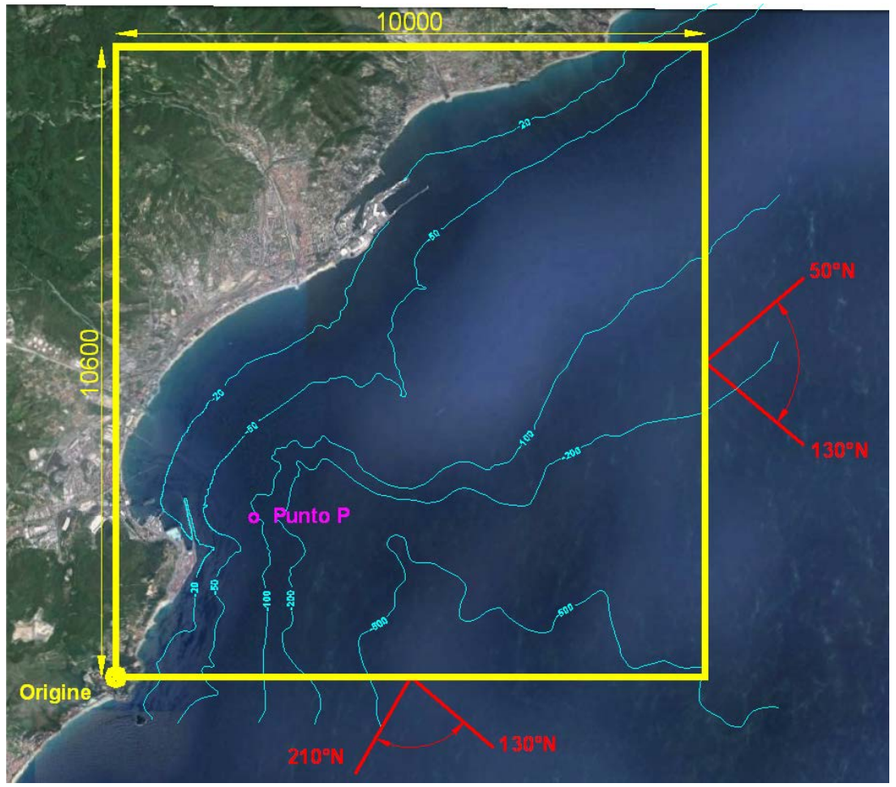


FIGURA 1-8 – GRIGLIA DI CALCOLO E UBICAZIONE DEL PUNTO P

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.

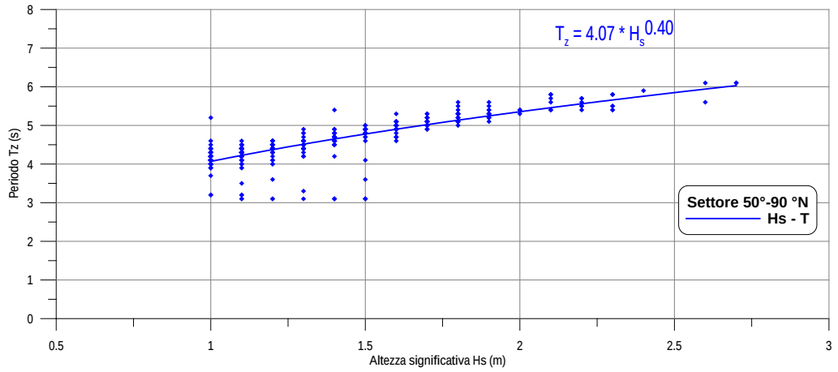


FIGURA 1-9– CORRELAZIONE H_S-T_Z PER IL SETTORE 50°÷90°N

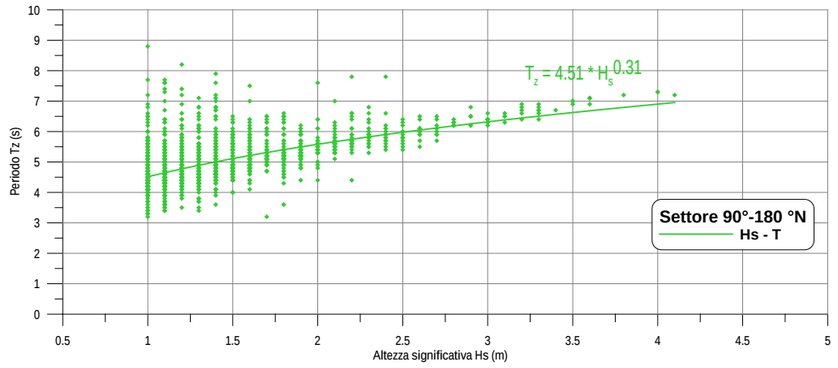


FIGURA 1-10– CORRELAZIONE H_S-T_Z PER IL SETTORE 90°÷180°N

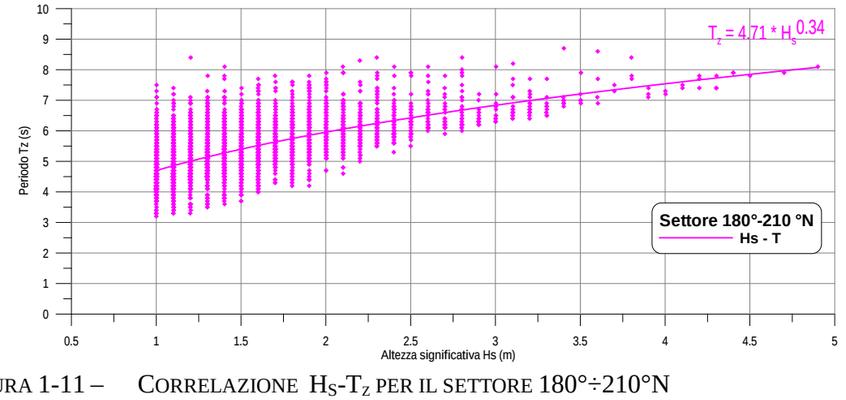


FIGURA 1-11 – CORRELAZIONE H_S-T_Z PER IL SETTORE 180°÷210°N

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.

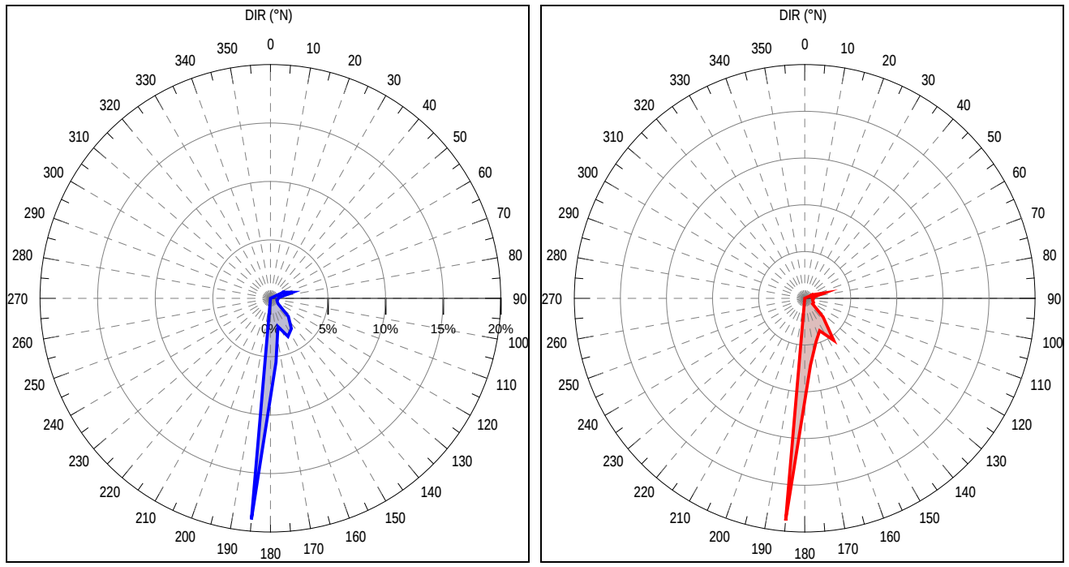


FIGURA 1-12 – ROSE DELLE REGISTRAZIONI (A SINISTRA) E DELLE ENERGIE (A DESTRA) RELATIVE AL PUNTO P

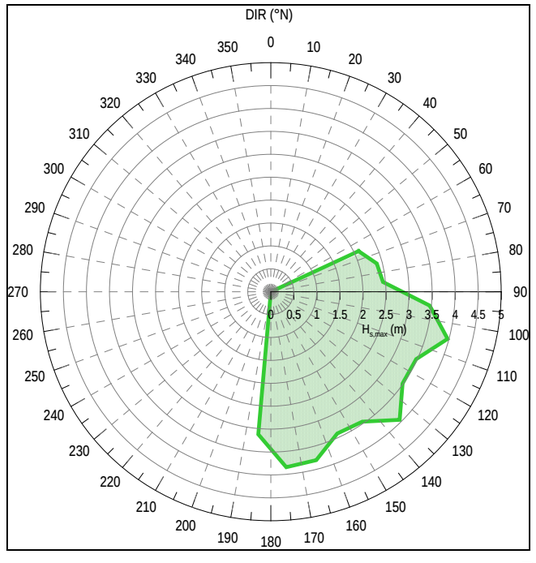


FIGURA 1-13 – ROSA DELLE ALTEZZE MASSIME RELATIVA AL PUNTO P

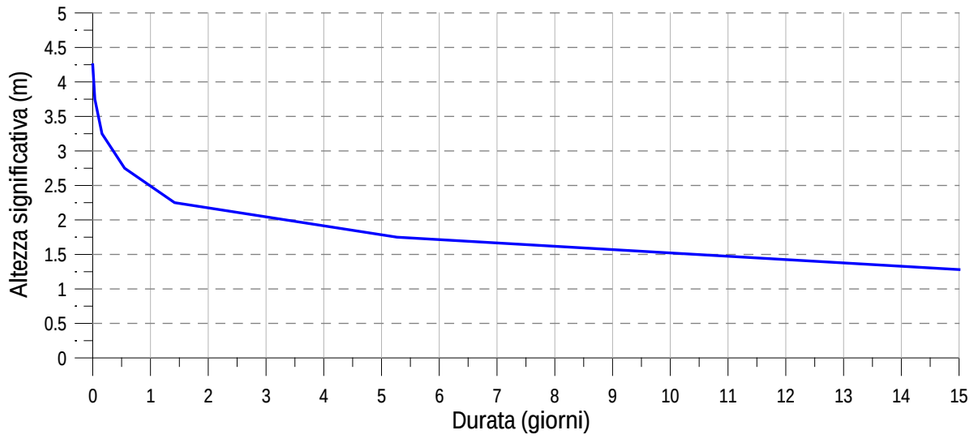


FIGURA 1-14 – CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO P

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).

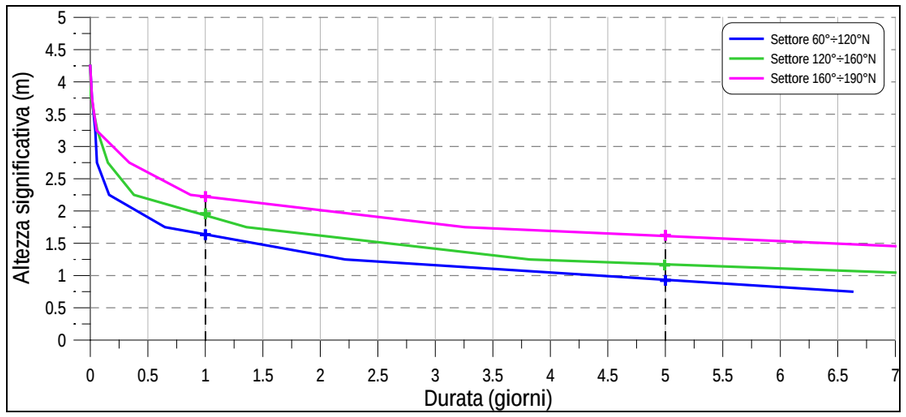


FIGURA 1-15 – CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO P PER I 3 SETTORI INDIVIDUATI

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 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 1973 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 1983 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 1993 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 2003 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 2010 (rilievo della campagna di "bianco");
– linea di riva 2014 (da immagini satellitari).

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 2014), 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.

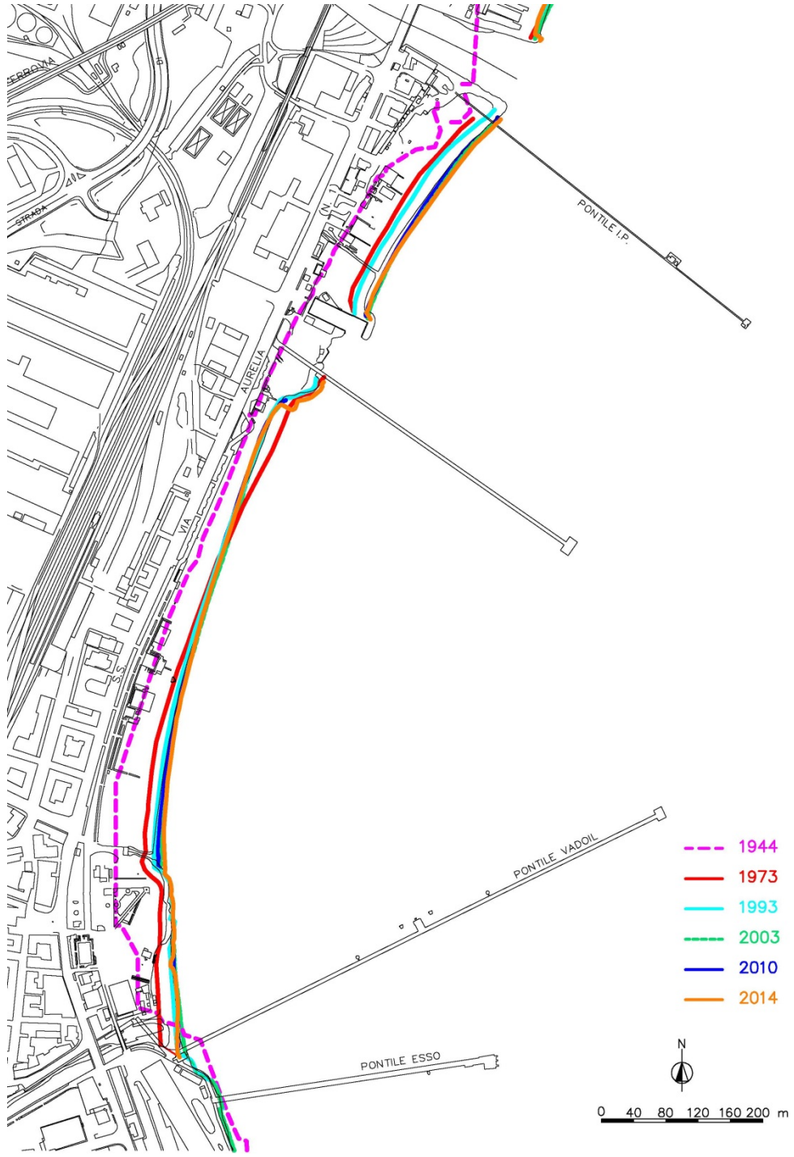


FIGURA 1-16 – RICOSTRUZIONE STORICA DELL'EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA DAL 1944 AL 2014

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).

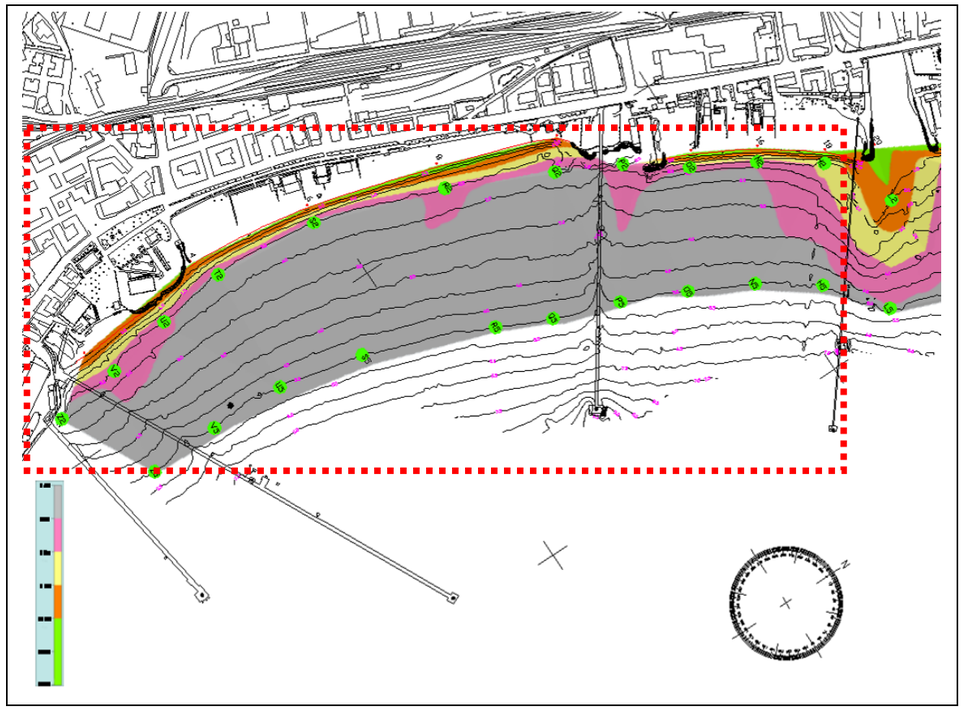


FIGURA 1-17 – UBICAZIONE DEI PUNTI DI PRELIEVO (CAMPAGNA DI INDAGINI DI FEBBRAIO-MAGGIO 2010)

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 Delft3D-WAVE, Delft3D-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 (analizzati mediante il modello UNIBEST), si è scelto di fornire in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sia sulla battigia che sulla spiaggia sommersa, alla profondità di -2 m s.m.m. Il codice di calcolo UNIBEST, 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. Nella modellazione è stato pertanto considerato un valore medio del D_{50} pari a 2 mm.

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).

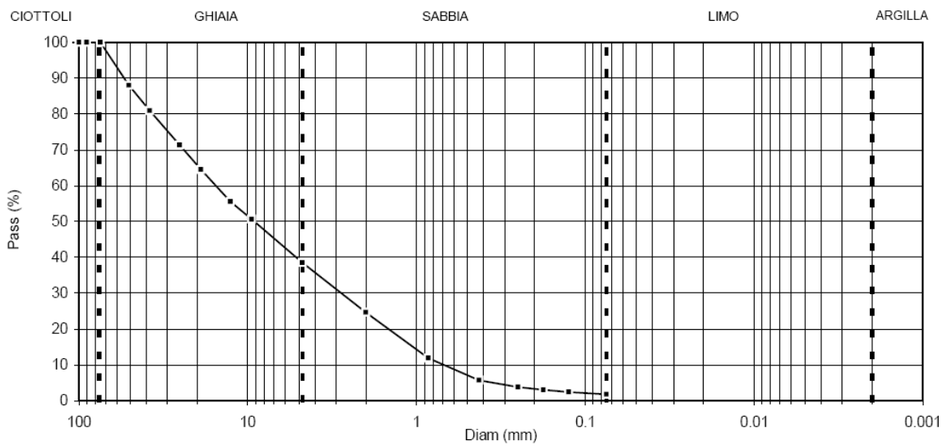


FIGURA 1-18 – CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE DI MATERIALE PRELEVATO ALLA FOCE DEL TORRENTE SEGNO

2. IL MODELLO PER LO STUDIO DELLA CIRCOLAZIONE LITORANEA E DEL TRASPORTO SOLIDO

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 ante operam prima dell'inizio dei lavori per la costruzione della piastra multifunzionale.

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 DELFT3D-FLOW, accoppiato al codice di calcolo DELFT3D-WAVE. Una descrizione dettagliata dei codici di calcolo viene riportata nel successivo paragrafo 2.1.

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 modello DELFT3D-WAVE. Quest'ultimo si interfaccia con il modello DELFT3D-FLOW, fornendogli i valori dei radiation stress che generano le correnti litoranee.

In modo analogo, è stato condotto lo studio del trasporto solido litoraneo. I modelli accoppiati consentono di simulare 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.

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.

2.1. Il codice di calcolo Delft3D

Il modello Delft3D è costituito da una "suite" di moduli tra loro interconnessi che consentono la simulazione di processi complessi quali flussi e fenomeni di trasporto, indotti dall'azione simultanea delle forzanti di marea, del vento (modulo FLOW) e del moto ondoso (modulo WAVE) in regime di moto vario, di trasporto solido sia con batimetria fissa che variabile. È inoltre disponibile ed ampiamente utilizzato nel presente studio, un modulo morfologico in grado di riprodurre le dinamiche dei fondali sia a breve che su lunga scala temporale.

I modelli possono utilizzare schematizzazioni bi- o tri-dimensionali, ed è in grado di descrivere i processi idrodinamici, dispersivi, chimici, ecologici e morfologici che hanno luogo in un ambiente fluviale o costiero per effetto dell'applicazione delle forzanti meteo-marine quali le maree, le onde, il vento, ecc. e di forzanti di natura antropica.

La suite DELFT3D utilizza come riferimento di calcolo una griglia curvilinea a maglie rettangolari non uniformi che permette, per questa sua caratteristica, di adottare elementi di dimensioni ridotte nelle zone di maggiore interesse, ed elementi di maggiori dimensioni nelle aree in cui non esistano apprezzabili variazioni geometriche. Questa peculiarità del modello, consente, in ultima analisi, una riproduzione molto accurata dell'ambiente fisico oggetto di simulazione in relazione al tipo di indagine e di informazione che si vuole ottenere.

Il modello idrodinamico a maglia curvilinea, morfologico e di propagazione del moto ondoso utilizzati in questo studio fanno parte della suite DELFT3D, sviluppata dal laboratorio idraulico WL|Delft Hydraulics, ora Deltares, e testato e continuamente aggiornato per rispondere alle diverse esigenze.

Questa suite di modelli è stata utilizzata in numerosi studi in Olanda, in Germania, per studi della Comunità Europea, in Russia, in Medio Oriente, ad Hong Kong ed in India, oltre a numerose applicazioni in molte aree lagunari e lungo litorali in Italia.

Di seguito sono illustrate le caratteristiche principali del modello numerico, una trattazione più completa e dettagliata di tutti gli aspetti numerici e concettuali è riportata nel manuale d'uso del modello disponibile sul web all'indirizzo (http://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals).

2.1.1. Il modulo idrodinamico e morfologico Delft3D-FLOW

Il modulo FLOW della suite costituisce l'elemento di base della suite modellistica ed è preposto alla simulazione dei 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 ξ e η 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]
Pξ ,Pη = gradiente pressione orizzontale nelle direzioni ξ e η
Fξ , Fη = corrispondono alle "tensioni tangenziali" di Reynolds

L'effetto della variazione di densità è considerato solo nel termine del gradiente di pressione orizzontale, Pξ ε Pη (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 λd 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 [m2/s]

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 D_H.

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.

2.1.2. Il modulo per la propagazione del moto ondoso Delft3D-WAVE

Il modulo utilizzato per la propagazione del moto ondoso in ambito costiero DELFT3D-WAVE fa riferimento al codice di calcolo SWAN (Simulating WAves Nearshore).

Questo modello è basato sull'equazione di bilancio energetico dell'energia dello spettro ondoso (in direzioni e frequenze) ed è in grado di simulare la propagazione di onde di piccolo periodo (wind waves e swell waves) dalle acque profonde verso le regioni costiere, caratterizzate da batimetrie irregolari e acque superficiali.

Nel modello sono implementati algoritmi di calcolo per tenere in considerazione i seguenti fenomeni fisici:

- Effetti della trasformazione delle onde dovuti allo shoaling
- Rotazione del fronte d'onda dovuti alla rifrazione
- Generazione delle onde per effetto del vento
- Fenomeni di dissipazione dovuti al white-capping, attrito con il fondale e frangimento
- Interferenze dovute alla presenza di correnti
- Set-up da moto ondoso
- Fenomeni di trasmissione e riflessione dovuti alla presenza di ostacoli quali frangiflutti e berme sommerse
- Iterazioni non lineari del moto ondoso

<u>Equazione di conservazione dell'azione con diffrazione</u>

Il modello DELFT3D-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 (Whitham 1974):

$$\frac{\partial(N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

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_x, c_y sono le velocità di propagazione lungo le direzioni spaziali x e y;

c_σ è la velocità di propagazione nel dominio delle frequenze e nello spazio direzionale;

S è il termine che esprime eventuali sorgenti o perdite addizionali di energia (forzante da vento, attrito al fondo, interazione non lineare delle onde).

2.1.3. Il trasporto solido ed evoluzione dei fondali

Il modulo idrodinamico Delft3D-FLOW implementa al suo interno anche delle routine per il calcolo trasporto solido e l'evoluzione morfologica dei fondali.

Il modello matematico tiene in considerazione due diverse modalità di trasporto solido; (il trasporto di fondo ed il trasporto di sedimenti in sospensione) e distingue due diverse tipologie di sedimenti, i sedimenti fini (fanghi, limi e argille) e le sabbie caratterizzate da una pezzatura più grossolana.

Per ciascuna delle due tipologie di sedimenti considerate sono implementate delle specifiche routine numeriche che schematizzano i processi fisici di erosione, deposizione e trasporto e le eventuali iterazioni tra le diverse frazioni che compongono il fuso granulometrico.

Nel modello è possibile considerare una composizione variabile del sedimenti sul fondo, distinguendo fino a 50 diverse frazioni di sedimenti di tipo coesivo e non censivo.

Il trasporto di solidi in sospensione

Il trasporto tri dimensionale di solidi in sospensione è calcolato sulla base della equazione di avvezione-diffusione (bilancio di massa) riportata di seguito:

$$\frac{\partial c^{(l)}}{\partial t}+\frac{\partial uc^{(l)}}{\partial x}+\frac{\partial vc^{(l)}}{\partial y}+\frac{\partial\left(w+w_s^{(wl)}\right)c^{(l)}}{\partial z}-\frac{\partial\left(\varepsilon_{s,x}^{(l)}\frac{\partial c^{(l)}}{\partial x}\right)}{\partial x}-\frac{\partial\left(\varepsilon_{s,y}^{(l)}\frac{\partial c^{(l)}}{\partial y}\right)}{\partial y}-\frac{\partial\left(\varepsilon_{s,z}^{(l)}\frac{\partial c^{(l)}}{\partial z}\right)}{\partial z}=0$$

In cui:

$c^{(l)}$	concentrazione in [kg/m³] della frazione di sedimento (l)
u,v,w	componenti della velocità nelle tre direzioni spaziali [m/s]
$\varepsilon_{s,x}^{(l)}$	eddy diffusivity della frazione di sedimento (l) [m²/s]
$w_s^{(wl)}$	velocità di sedimentazione della frazione di sedimento (l) [m/s]

Le velocità delle correnti e di valori dei coefficienti di dispersione idrodinamica (“eddy diffusivity”) sono ricavati direttamente dai risultati idrodinamici.

Da un punto di vista puramente numerico il trasporto di massa è trattato esattamente nello stesso modo in cui sono trattate le altre sostanze conservative come i traccianti e la salinità. Vi sono comunque delle importanti differenze tra i sedimenti e le altre sostanze sopra menzionate che rivestono un’importanza fondamentale quali, ad esempio lo scambio di sedimenti tra il fondo e la colonna d’acqua e la definizione della velocità di sedimentazione per effetto della forza di gravità, le turbolenze idrodinamiche e le iterazioni tra sedimenti in sospensione.

Inoltre, il calcolo del flusso di sedimenti da e verso i fondali determina anche una variazione delle quote batimetriche che a sua volta induce un cambiamento nell’idrodinamica.

Le formulazioni dei processi di sedimentazione, erosione, sollevamento e deposizione sono specifiche in funzione del tipo di sedimento considerato (sedimenti fini o sabbie).

Infine la presenza di differenti frazioni sedimenti nella colonna d’acqua risulta di fondamentale importanza in questi processi; ad esempio le iterazioni tra sedimenti di diversa natura e tipologia hanno delle implicazioni dirette nel calcolo della velocità di sedimentazione (“hindered settling velocity”) di ciascuna singola frazione e quindi della miscela complessiva.

Il trasporto dispersivo

La dispersione dei sedimenti in sospensione nella colonna d’acqua è direttamente legato alla definizione dei coefficienti di dispersione idrodinamica turbolenta (“eddy diffusivities”) $\varepsilon_s^{(l)}$ nelle tre direzioni spaziali.

Questi coefficienti sono legati alle caratteristiche locali delle correnti, alla presenza dei sedimenti in sospensione ed alla intensità moto ondoso. Il calcolo dei coefficienti di dispersione è effettuato sulla base di quattro schemi numerici per il calcolo della turbolenza (“turbulence closure models") con diverso grado di complessità.

I modelli di chiusura della turbolenza differiscono nel modo di trattare le grandezze relative all’energia cinetica turbolenta κ, i termini dissipativi ε e la lunghezza di mescolamento L.

L'output di ciascun modello di turbolenza è il calcolo dei coefficienti di viscosità alle interfacce di ogni layer. Sulla base di questi valori viene ,infine, effettuato anche il calcolo del coefficiente i dispersione verticale.

Gli effetti del moto ondoso

La presenza di un moto ondoso lungo un litorale caratterizzato da bassi fondali risulta di particolare rilevanza sia in riferimento all'idrodinamica che ai processi di trasporto ed erosine dei fondali.
I principali effetti indotti al moto ondoso sono:

– L'incremento dei processi di rimescolamento lungo la verticale causati dalle turbolenze idrodinamiche in superficie, dal frangimento delle onde e dalla dissipazione di energia nello strato adiacente il fondo;
– La generazione di trasporto di massa netto in direzione ortogonale alla spiaggia nella fase di frangimento;
– Lo sviluppo di correnti litoranee in direzione parallela alla spiaggia per effetto della variazione del flusso di quantità di moto ("radiation stress") in funzione dell'angolo di attacco del fronte d'onda;
– Aumento degli sforzi tangenziali al fondo con un conseguente incremento dell'erosione dei fondali.

Gli sforzi generati dalle onde sono quindi calcolati sulla base gradienti dello radiation stress secondo la formula:

$$F_i = \frac{\partial S_{i,j}}{\partial x_j}$$

In cui:

$S_{i,j}$ è il tensore del radiation stress calcolato sulla base dell'energia del moto ondoso, delle velocità di fase e di gruppo, la lunghezza d'onda ed il periodo

Gli sforzi trasmessi lungo le due componenti spaziali x e y risultano quindi:

$$F_x = -\frac{\partial S_{x,x}}{\partial x_j} - \frac{\partial S_{y,x}}{\partial y} = D\frac{k_x}{\omega}$$

$$F_y = -\frac{\partial S_{x,y}}{\partial x} - \frac{\partial S_{y,y}}{\partial y} = D\frac{k_y}{\omega}$$

In cui:

F_x e F_y sono gli sforzi indotti dal moto ondoso mediato sulla colonna d'acqua
S il tensore dello radiation stress
D il coefficiente di dissipazione

Evoluzione morfologica del fondale

Nel modello DELFT3D-FLOW è anche implementate delle routine di calcolo per l'aggiornamento continuo ed automatico delle quote dei fondali ad ogni istante temporale di calcolo. Le variazioni delle quote dei fondali è calcolata sulla base dell'equazione di bilancio di massa per ciascun elemento del dominio di calcolo in cui sono considerati i termini relativi alla deposizione, sedimentazione e trasporto di sedimenti. L'entità della variazione batimetrica è calcolata utilizzando come riferimento la densità del materiale di ciascuna frazione di sedimento (dry bulk density).

Nel codice di calcolo sono anche implementate una serie di funzionalità utili per il controllo dei processi morfologici di lunga durata. Tra questi i più importanti sono il "morphological delay", ovvero, un parametro che definisce la durata di un periodo di transizione in cui non sono attivati morfologici (solitamente necessario per l'avviamento del sistema), ed il "morphological factor", ovvero, un fattore di accelerazione dei processi morfologici, di fondamentale importanza nella valutazione dei processi di lunga durata.

L'aggiornamento delle quote batimetriche è calcolato utilizzando la seguente formulazione matematica:

$$\Delta_{SED}^{(m,n)} = \frac{\Delta t \cdot f_{MORFAC}}{A^{(m,n)}}\left(S_{b,uu}^{(m-1,n)} \cdot \Delta y^{(m-1,n)} - S_{b,uu}^{(m,n)} \cdot \Delta y^{(m,n)} + S_{b,vv}^{(m,n-1)} \cdot \Delta x^{(m,n-1)} - S_{b,vv}^{(m,n)} \cdot \Delta x^{(m,n)}\right)$$

in cui:

$\Delta_{SED}^{(m,n)}$	la variazione della quantità di sedimenti disponibili sul fondo nella cella di calcolo *(m,n)* [kg/m²]
Δt	tempo di calcolo [s]
f_{MORFAC}	fattore di accelerazione morfologica
$A^{(m,n)}$	area della cella di calcolo (m,n) [m²]
$S_{b,uu}^{(m,n)}$	trasporto di massa sul fondo nella direzione u nella cella di calcolo *(m,n)* [kg/ms]
$\Delta x^{(m,n)}$	larghezza della cella di calcolo *(m,n)* nella direzione *x*
$\Delta y^{(m,n)}$	larghezza della cella di calcolo *(m,n)* nella direzione *y*

Il calcolo viene ripetuto per ciascuna frazione di sedimento sabbiosa e per il trasporto di fondo. La valutazione della variazione complessiva del fondale è infine ottenuta dalla sommatoria dei singoli contributi di ogni componente.

2.2. Definizione del dominio di calcolo

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.

Nella Figura 2-1 viene 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 litoranea posta a nord della piattaforma del porto (Figura 3 2), dove le informazioni devono essere maggiormente dettagliate al fine di poter rappresentare in modo adeguato i fenomeni di trasporto, 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 dimensione delle maglie di calcolo varia da circa 10 m nelle aree di maggiore dettaglio fino ad oltre 100m nelle aree di mare aperto.

La batimetria associata a tale maglia in riferimento alla configurazione approvata di Progetto Esecutivo è riportata in Figura 2-2.

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, ad Agosto 2008 ed ad aprile 2010. Ulteriori informazioni per la schematizzazione delle opere portuali nelle diverse configurazioni di progetto e nelle fasi di costruzione sono state derivate dai disegni di progetto.

In particolare, la schematizzazione utilizzata per la modellazione idrodinamica e per la propagazione del moto ondoso nell'ambito di questo studio è stata predisposta e verificata sulla base dei risultati dello studio eseguito con il modello fisico sviluppato presso l'Istituto HR Wallingford, al fine di riprodurre in modo realistico gli effetti dissipativi e di frangimento delle onde che avvengono sotto la piattaforma per la presenza dei pali di sostegno e dei cassoni di imbasamento e conterminazione.

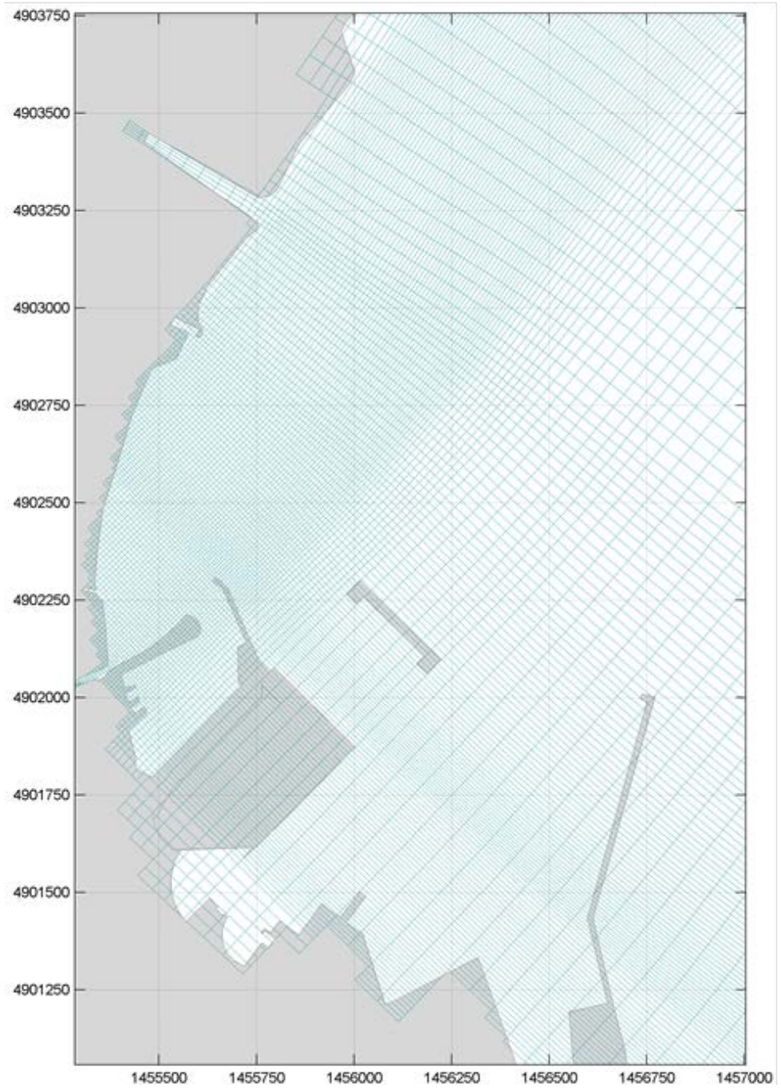


FIGURA 2-1 – GRIGLIA DI CALCOLO IMPIEGATA PER LO STUDIO DELLA CIRCOLAZIONE COSTIERA E DEL TRASPORTO SOLIDO

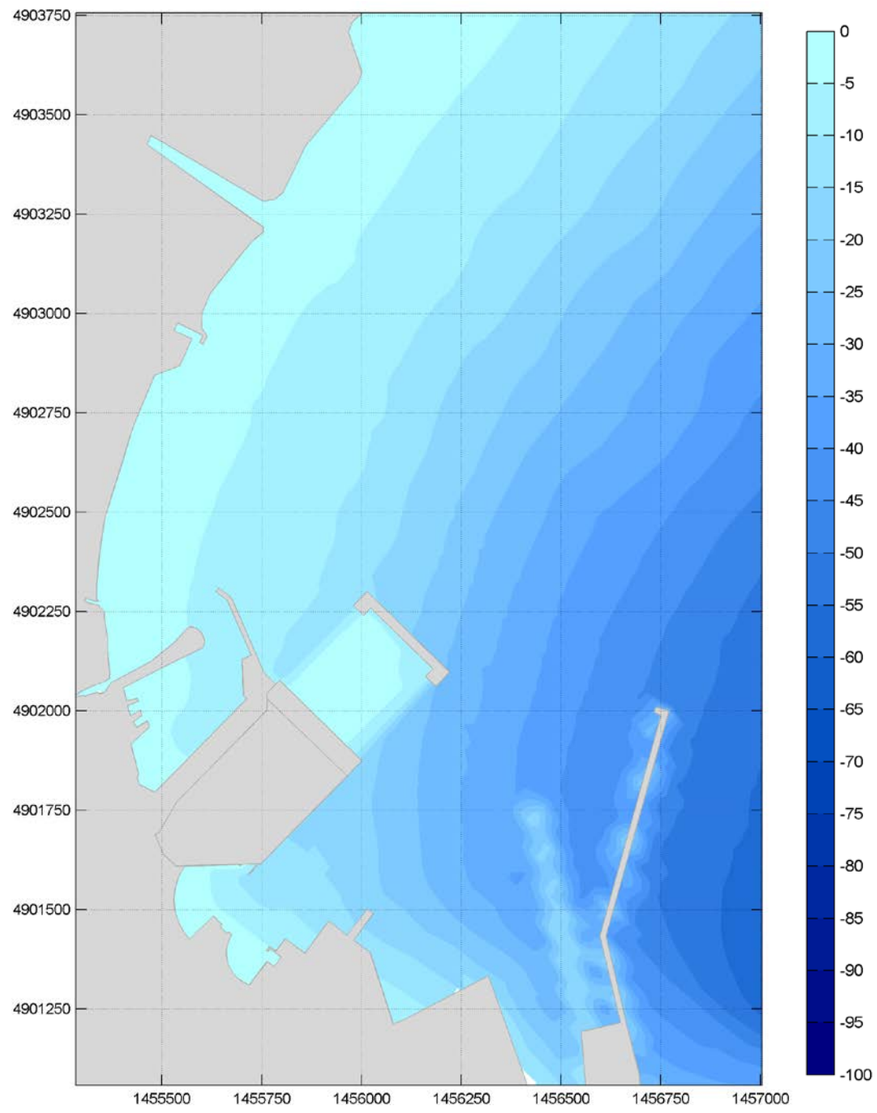


FIGURA 2-2 – SCHEMATIZZAZIONE BATIMETRICA(M SMM) DELLA BAIA DI VADO LIGURE NELLA CONFIGURAZIONE DI RIFERIMENTO DI PROGETTO ESECUTIVO

2.3. Dati di input e condizioni al contorno

Le condizioni assegnate in input al modello matematico vengono di seguito esplicitate e successivamente sintetizzate nella Tabella 2-1.

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 2-3). Tale portata (cfr. portata "indice", Relazione idraulica del T. Segno, Giugno 2014) è, con buona approssimazione, la portata 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.

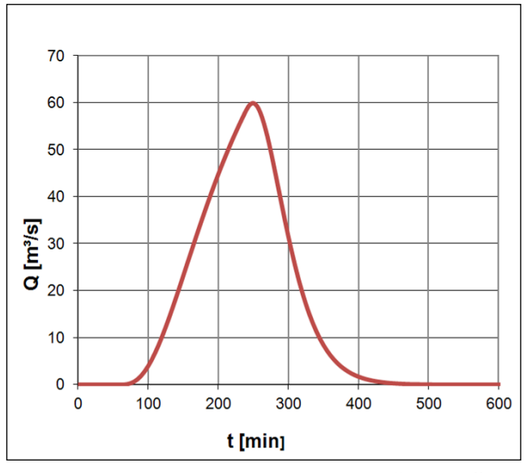


FIGURA 2-3 – IDROGRAMMA DI PIENA DELLA PORTATA "INDICE"

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 D50 (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 2-1 si riportano sinteticamente le caratteristiche dei 6 test individuati.

TABELLA 2-1 – 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

3. MODELLO DI EVOLUZIONE MORFOLOGICA

Lo studio morfologico dell'evoluzione della Spiaggia di Vado Ligure (SV) è stato condotto mediante l'utilizzo dei codici di calcolo DELFT3D-WAVE (descritto al par. 2.1.2) e UNIBEST-CL+ (sviluppato da Deltares). 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.).

3.1. Taratura del modello di evoluzione morfologica

Inizialmente si è proceduto con una fase di taratura del modello e successivamente sono state eseguite le simulazioni previsionali dell'evoluzione della linea di riva a 10 anni (2014-2024), in relazione alle diverse configurazioni esaminate (quella di riferimento e quella della perizia di variante del progetto esecutivo) e ai diversi stati di riferimento.

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.

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 Delft3D-Wave impiegato per la propagazione del moto ondoso da un punto al largo (punto U.K.M.O.) sottocosta, al limite esterno della fascia attiva, è descritto nel paragrafo 2.1.2 mentre il codice di calcolo UNIBEST-CL+ è descritto nel successivo paragrafo 3.1.1.

3.1.1. Descrizione del codice di calcolo UNIBEST

Il modello matematico "UNIBEST" (***Uni***form ***Be***ach ***S***ediment ***T***ransport), sviluppato da Deltares, consente la simulazione e lo studio dei processi costieri longitudinali e trasversali e delle annesse variazioni morfologiche dei profili trasversali e della configurazione planimetrica della spiaggia.

In particolare, il modulo UNIBEST-CL+, impiegato per lo studio dell'evoluzione morfologica del litorale in oggetto, permette di calcolare le modificazioni subite dalla linea di riva in conseguenza a variazioni nello spazio o nel tempo del trasporto solido litoraneo indotto dall'azione del moto ondoso in direzione parallela alla linea di riva.

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 3-1).

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). Questi ultimi valori sono determinabili in funzione delle caratteristiche del moto ondoso incidente.

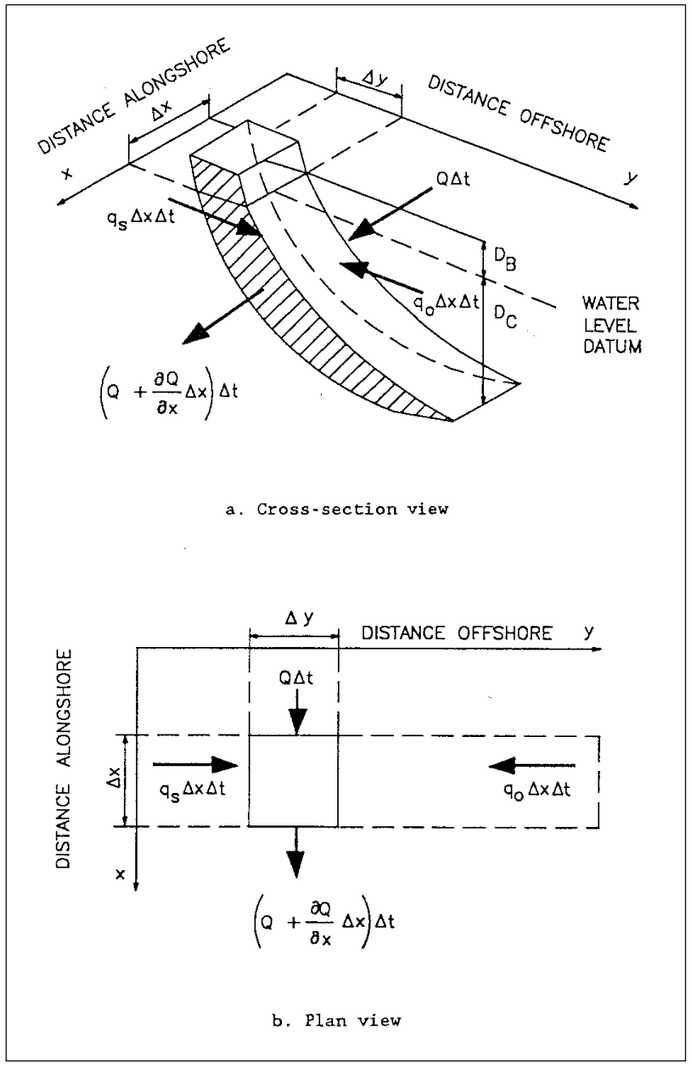


FIGURA 3-1 – SCHEMATIZZAZIONE DEL LITORALE

L'equazione di continuità dei sedimenti in una generica sezione, con riferimento al significato dei simboli indicato in Figura 3-1, può essere scritta nella forma seguente:

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

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 modulo UNIBEST-CL+ si compone dei seguenti sottomoduli:

– modulo LT (Longshore Transport);
– modulo CL (CoastLine).

Il modulo LT consente di calcolare il trasporto solido longitudinale lungo una serie di profili trasversali distribuiti lungo il tratto di costa in esame. Il trasporto così calcolato viene successivamente fornito come input al modulo CL, impiegato per l'analisi dell'evoluzione della linea di costa, il quale consente di schematizzare anche eventuali opere rigide presenti lungo il litorale, quali pennelli, barriere parallele alla costa e protezioni di sponda oppure interventi morbidi quali by-pass o ripascimenti.
Nei paragrafi seguenti si riporta una breve descrizione dei due moduli sopra citati.

3.1.1.1.1 Modulo LT

Il modulo LT di UNIBEST-CL+ consente di calcolare le correnti longitudinali indotte dalla marea e dal moto ondoso ed il conseguente trasporto solido generato, in riferimento a diversi profili trasversali della spiaggia, assumendo che questa sia caratterizzata da una configurazione pressoché uniforme lungo la costa.

Il clima ondoso, schematizzato in modo probabilistico e fornito come condizione al contorno all'estremità lato mare di ciascun profilo, viene propagato verso costa mediante il modello ENDEC 1D (incluso nel modulo LT), che tiene conto dei principali processi di rifrazione lineare e della dissipazione non lineare indotta dal frangimento e dall'attrito sul fondo. Il modello consente di applicare qualunque clima di moto ondoso e regime di marea; ciascuna condizione ondosa fornita come input viene combinata con ciascuna delle condizioni di marea definite.

Il trasporto solido longitudinale e la distribuzione trasversale dello stesso possono essere valutati nel modulo LT in accordo a diverse formule di trasporto, che consentono quindi di operare un'analisi di sensibilità in riferimento alle specifiche condizioni locali.

Nel caso specifico, il trasporto solido longitudinale è stato computato mediante la seguente formulazione proposta da Van Rijn (2014):

$$Q_{t,mass} = 0.0006\, K_{swell}\, \rho_s\, (\tan\beta)^{0.4}\, (d_{50})^{-0.6} \left(H_{s,br}\right)^{2.6} V_{wave}$$

in cui

g	accelerazione di gravità [m/s^2]
$H_{s,br}$	altezza d'onda al frangimento [m]
Θ_{br}	angolo di incidenza del moto ondoso al frangimento rispetto alla normale alla linea di riva [°]
d_{50}	diametro medio dei sedimenti [m]
tanβ	pendenza del fondale [-]
V_{wave}	velocità della corrente longitudinale [m/s]
ρ_s	densità dei sedimenti [kg/m^3]
K_{swell}	fattore di swell [-]

La velocità della corrente longitudinale viene computata mediante la seguente relazione:

$$V_{wave} = 0.3\left(gH_{s,br}\right)^{0.5} \sin(2\theta_{br})$$

Il fattore di swell, dipendente dalla frequenza di occorrenza delle onde da swell all'interno del clima d'onda, è così definito:

$$K_{swell} = 1.5(p_{swell}/100) + 1(1-p_{swell}/100) = 0.015\,p_{swell} + (1-0.01\,p_{swell})$$

dove

p_{swell} percentuale di tempo caratterizzata dalla presenza di condizioni di swell [-]

L'effetto indotto dalla marea può essere incluso nel modello sostituendo V_{wave} con V_{total}. La velocità longitudinale della corrente risulta quindi espressa dalla seguente formulazione:

$$V_{total} = V_{wave} + 0.01\,p_1 V_1 + 0.01\,p_2 V_2$$

dove

V_i velocità media della marea in una determinata finestra temporale [m/s];

P_i percentuale di tempo caratterizzata da velocità Vi [-]

3.1.1.1.2 Modulo CL

Il modulo CL di UNIBEST-CL+ permette di calcolare le modificazioni subite dalla linea di riva per effetto dei gradienti di trasporto solido longitudinale lungo una costa che presenta una conformazione pressoché uniforme ed è basato sulla teoria dei modelli ad una linea. Come già descritto precedentemente, 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. 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.

Il modello consente di imporre differenti condizioni iniziali e al contorno, permettendo quindi di rappresentare una varietà di situazioni costiere. Lungo il tratto di litorale oggetto di analisi è possibile schematizzare anche apporti o perdite di sedimenti, al fine di considerare l'eventuale apporto di sedimenti dai fiumi, la perdita di sedimenti verso il largo, il prelievo di materiale dalla spiaggia,…

E' inoltre possibile schematizzare e considerare l'effetto indotto da eventuali opere rigide presenti lungo il litorale, quali pennelli, barriere parallele alla costa e protezioni di sponda oppure interventi morbidi quali by-pass o ripascimenti.

3.1.2. 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 nel 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 Birkemeier (1985):

$$h_c = 1.75 \cdot H_{0,12} - 57.9 \cdot \frac{(H_{0,12})^2}{gT_s^2}$$

dove $H_{0,12}$ rappresenta il valore dell'altezza d'onda significativa superata in media per 12 ore all'anno e T_s è il periodo dell'onda $H_{0,12}$. Con riferimento al clima ondoso al largo riportato in Tabella 1-1, è stato possibile ricostruire la curva di durata e determinare il valore di $H_{0,12}$. In Figura 3-2 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 circa 3,2 m e la profondità di chiusura h_c è risultata di conseguenza pari a 4,5 m. La massima altezza di risalita dell'onda D_B è stata stimata mediante la seguente relazione proposta da Nielsen and Hanslow (1991):

$$R_{2\%} = 1.98 \cdot L_{zwm}$$

dove

$$L_{zwm} = 0.6(H_{0rms} L_0)^{0.5} \tan\beta_F \qquad \text{per } \tan\beta_F \geq 0.10$$

$L_{zwm} = 0.05(H_{0rms} L_0)^{0.5}$ per $\tan\beta_F < 0.10$

e H_{0rms} = 0.706·Hs è il valore quadratico medio delle altezze d'onda al largo.

La massima altezza di risalita dell'onda DB è stata stimata in 1,5 m pertanto l'altezza complessiva della fascia attiva risulta di 6,0 m.

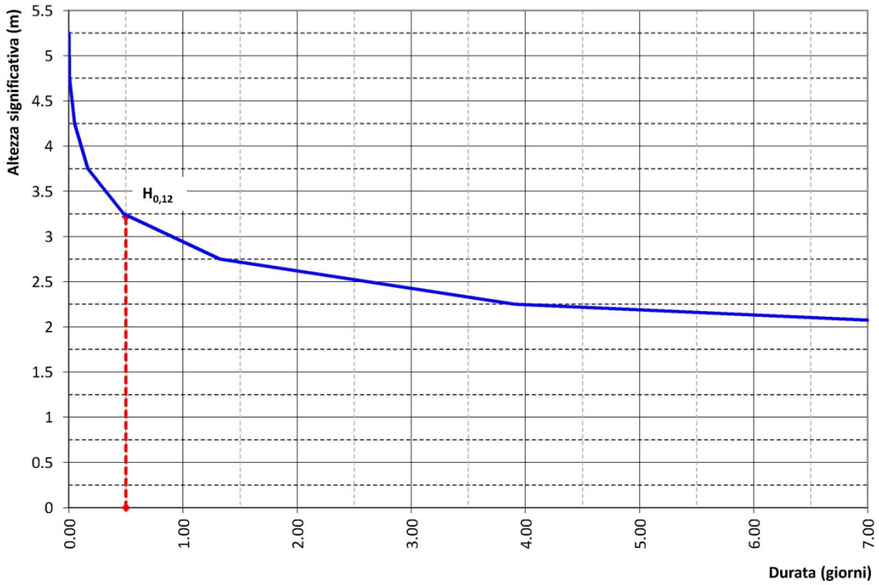


FIGURA 3-2 – INDIVIDUAZIONE DI $H_{0,12}$ – CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO U.K.M.O.

3.1.3. 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 note in un punto al largo (punto U.K.M.O.).

La propagazione del moto ondoso sottocosta è stata eseguita mediante il codice di calcolo DELFT3D-WAVE.

E' stata individuata una serie di stazioni (in pratica una serie di boe virtuali) poste lungo la costa in corrispondenza della batimetrica –4,5 m s.m.m.; tali stazioni sono state ritenute significative per rappresentare le differenti condizioni di moto ondoso lungo il litorale (Figura 3-3).

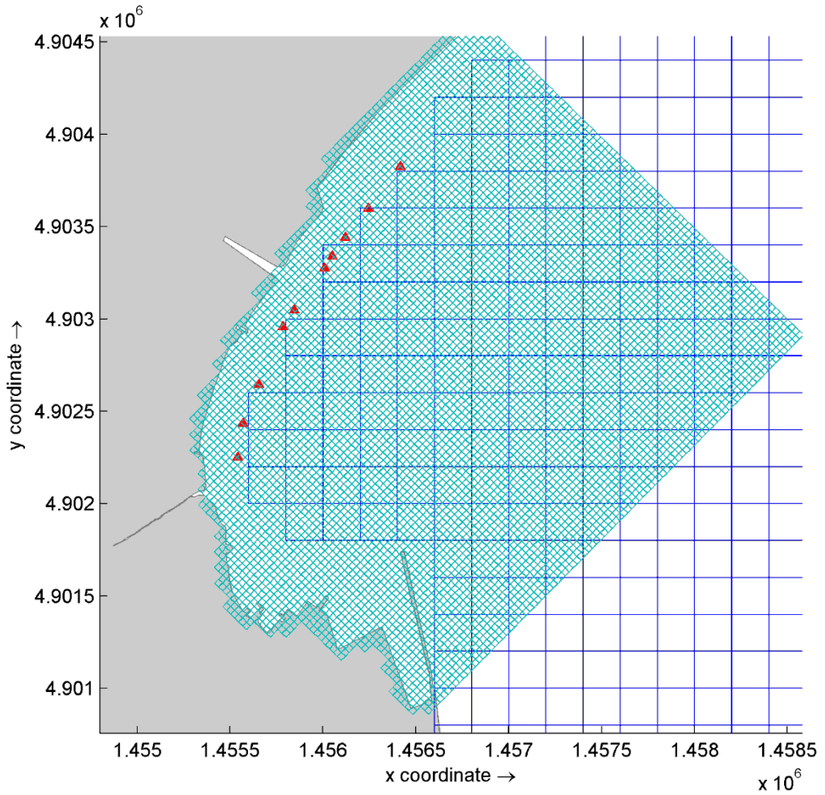


FIGURA 3-3 – SIMULAZIONE DI TARATURA – UBICAZIONE DELLE BOE VIRTUALI (STAZIONI) POSTE ALLA PROFONDITÀ DI –4,5 M S.M.M.

Per procedere ad un'analisi modellistica del moto ondoso è stato dapprima individuato il cosiddetto "Dominio di Calcolo", cioè l'area in cui si intende studiare la propagazione del moto ondoso. Il suddetto dominio di calcolo è stato quindi schematizzato da due diverse griglie di calcolo a maglia quadrata: una

griglia regionale avente lato di 200 m che copre l'intero dominio di calcolo (Figura 3-4) e una griglia di dettaglio che si innesta sulla griglia regionale, con lato di 30 m (Figura 3-5), che copre un'area limitata alla zona di interesse dello studio.

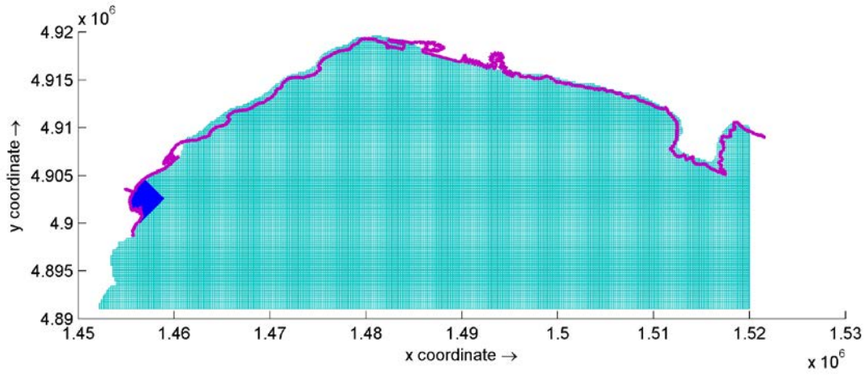


FIGURA 3-4 – GRIGLIA REGIONALE E GRIGLIA DI DETTAGLIO USATE NEL MODELLO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE

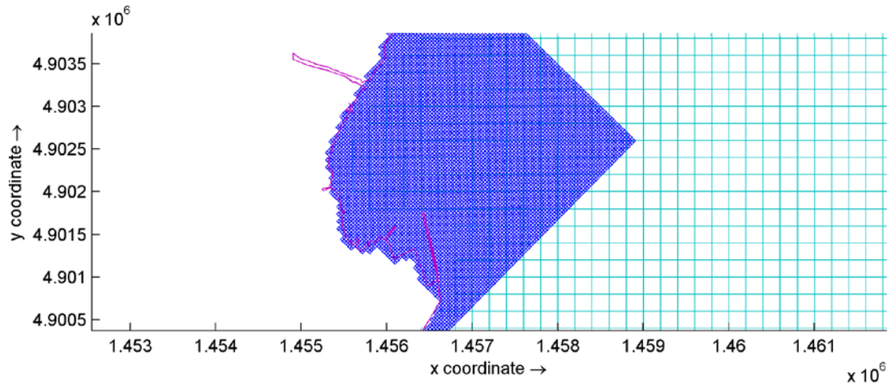


FIGURA 3-5 – GRIGLIA DI DETTAGLIO USATA NEL MODELLO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE

La batimetria del modello è stata definita con riferimento alle stesse griglie utilizzate per la definizione del dominio fisico. I dati batimetrici, interpolati sulle due griglie di calcolo, sono stati desunti da 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, nell'Agosto 2008 e nell'Aprile 2010.

Le batimetrie utilizzate per il modello regionale e per il modello di dettaglio sono presentate rispettivamente in Figura 3-6 e Figura 3-7. Si fa notare come nel modello SWAN le celle sommerse presentino valori di quota del fondale positivi mentre le celle emerse presentino quote negative.

Per distinguere la parte sommersa dalla parte emersa del dominio è stato introdotto un "landboundary" (linea viola in Figura 3-6 e Figura 3-7) che rappresenta il limite della terraferma come indicato nelle carte nautiche e, localmente, estratto dal recente sondaggio del 2010. Come livello per la definizione delle terre emerse si è scelto di prendere il l.m.m..

Come si osserva dalle Figura 3-6 e Figura 3-7, i fondali sul boundary sud del modello hanno profondità estremamente elevate (fino a -1.000 m s.l.m.m.) che vanno riducendosi da sud verso nord fino a raggiungere valori attorno ai -30 - -40 m.s.l.m.m in prossimità della diga foranea esistente.

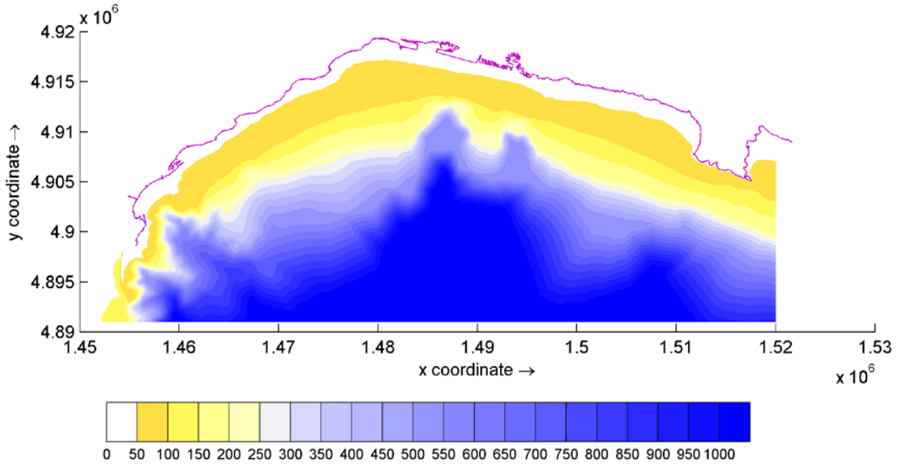


FIGURA 3-6 – BATIMETRIA RICOSTRUITA SULLA GRIGLIA DI CALCOLO REGIONALE

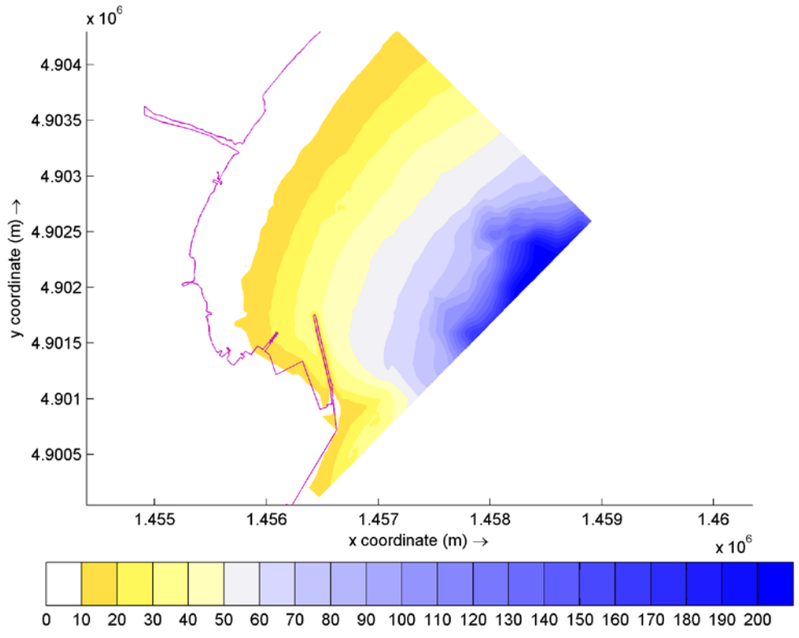
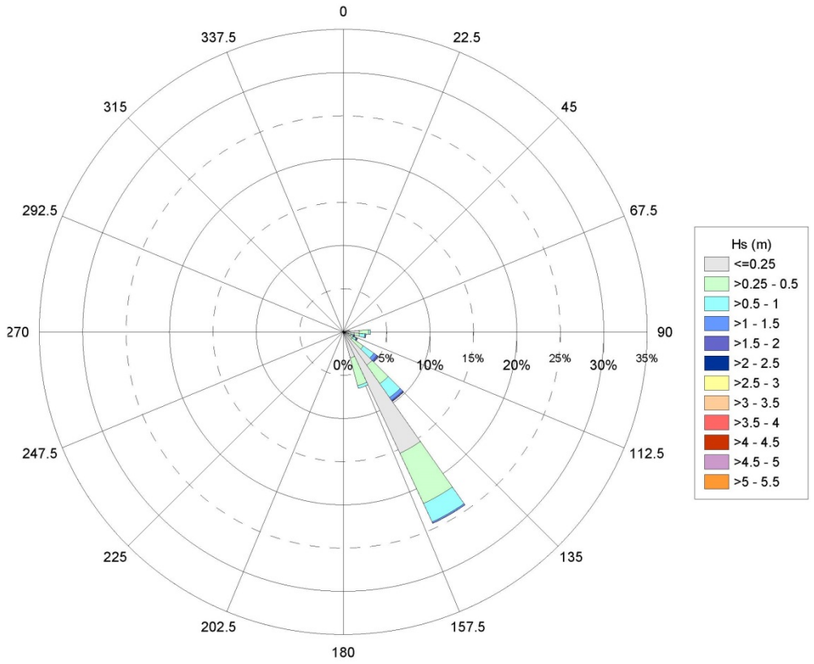


FIGURA 3-7 – BATIMETRIA RICOSTRUITA SULLA GRIGLIA DI CALCOLO DI DETTAGLIO

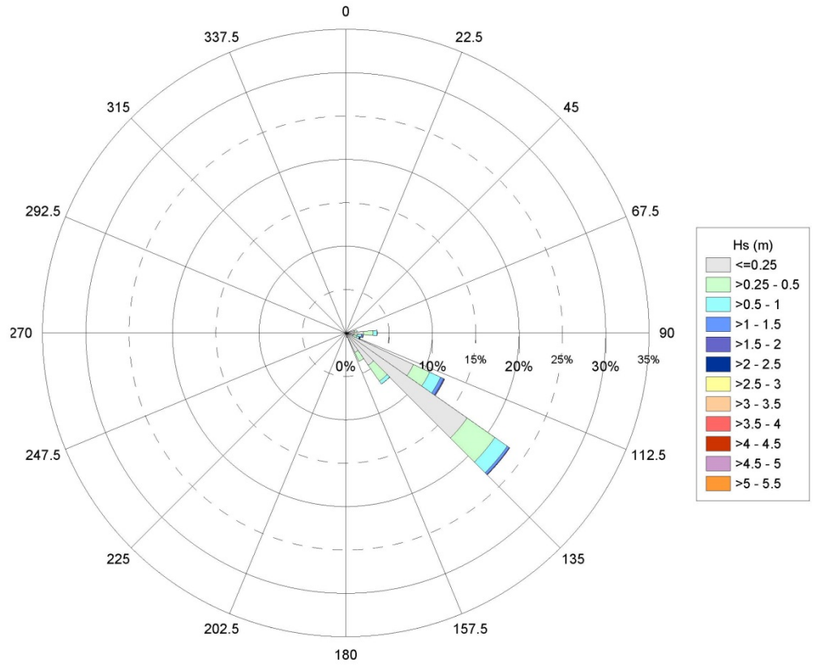
Il clima ondoso ricavato in corrispondenza delle boe virtuali ubicate alla –4,5 m s.m.m. (a titolo esemplificativo si riportano nelle Figura 3-8÷Figura 3-10 i climi ondosi ottenuti nei punti sottocosta 2, 7 e 10, collocati rispettivamente nel tratto Nord, centrale e Sud del litorale) è stato schematizzato in modo probabilistico e fornito come input nel modulo LT di UNIBEST-CL+, all'estremità lato mare di ciascun profilo.

Sostanzialmente, a partire da ciascun clima ondoso ricavato in corrispondenza delle boe virtuali, è stata selezionata una sequenza di eventi di moto ondoso, ciascuno caratterizzato da altezza d'onda significativa, periodo, direzione media di provenienza e durata, tale per cui l'andamento globale del clima ottenibile dalla sequenza ricostruita rappresenta efficacemente il clima vero. Tali sequenze di moto ondoso sono state successivamente propagate verso costa dal modello ENDEC 1D (incluso nel modulo LT), che tiene conto dei principali processi di rifrazione lineare e della dissipazione non lineare indotta dal frangimento e dall'attrito sul fondo.



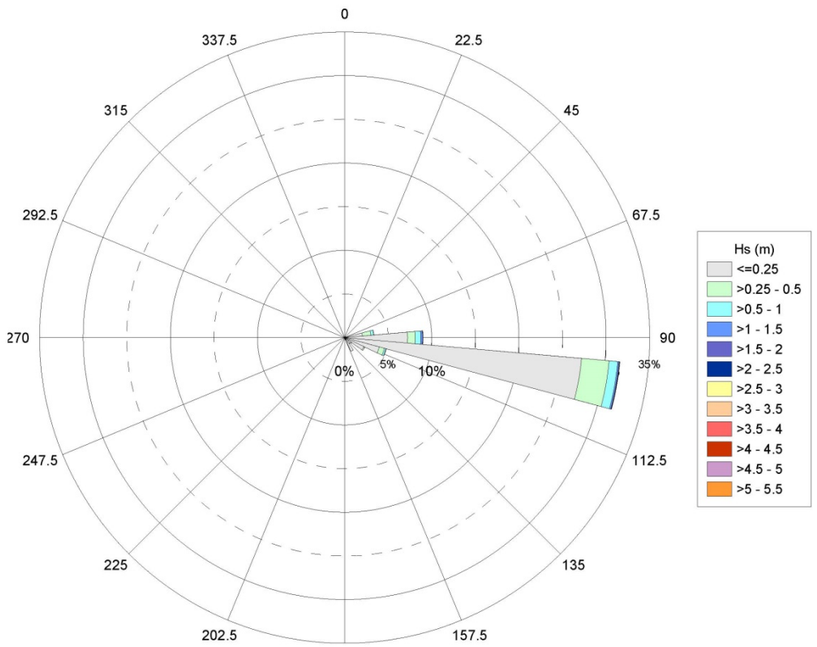
Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.5	≥ 1.0	≥ 1.5	≥ 2.0	≥ 2.5	≥ 3.0	≥ 3.5	≥ 4.0	≥ 4.5	≥ 5.0	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.5	< 1.0	< 1.5	< 2.0	< 2.5	< 3.0	< 3.5	< 4.0	< 4.5	< 5.0	< 5.5	
50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
80	0.6616	0.0811	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.74
90	1.8567	1.0654	0.1875	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.11
100	1.2637	0.6165	0.6129	0.1280	0.0126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.63
110	0.6165	0.3389	0.2271	0.1190	0.0577	0.0126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.37
120	0.8454	0.4272	0.3389	0.1046	0.0667	0.0144	0.0090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.81
130	1.2258	1.5773	1.4800	0.4182	0.1749	0.0451	0.0036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.92
140	4.6652	2.6301	1.9523	0.3984	0.1190	0.0451	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.81
150	15.4631	6.4156	2.3543	0.1713	0.0162	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.42
160	3.1006	3.3115	0.3353	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.75
170	0.0000	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.06
180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
210	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
Tot.	29.70	16.53	7.49	1.34	0.45	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.64

FIGURA 3-8 – CLIMA ONDOSO NELLA BOA VIRTUALE 2



Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.5	≥ 1.0	≥ 1.5	≥ 2.0	≥ 2.5	≥ 3.0	≥ 3.5	≥ 4.0	≥ 4.5	≥ 5.0	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.5	< 1.0	< 1.5	< 2.0	< 2.5	< 3.0	< 3.5	< 4.0	< 4.5	< 5.0	< 5.5	
50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
80	1.0257	0.2614	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.29
90	1.9811	1.1140	0.4777	0.0234	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.60
100	0.9482	0.3912	0.4380	0.1947	0.0433	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.02
110	0.8418	0.4344	0.2506	0.0739	0.0487	0.0234	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.68
120	7.7604	1.8099	1.2763	0.3605	0.1226	0.0162	0.0036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.35
130	17.2405	4.0830	1.8513	0.2938	0.0685	0.0108	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	23.55
140	5.2024	2.1451	0.4435	0.0162	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.81
150	2.4877	1.3051	0.0036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.80
160	0.4975	0.0613	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.56
170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
210	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
Tot.	37.99	11.61	4.74	0.96	0.28	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.64

FIGURA 3-9 – CLIMA ONDOSO NELLA BOA VIRTUALE 7



Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.5	≥ 1.0	≥ 1.5	≥ 2.0	≥ 2.5	≥ 3.0	≥ 3.5	≥ 4.0	≥ 4.5	≥ 5.0	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.5	< 1.0	< 1.5	< 2.0	< 2.5	< 3.0	< 3.5	< 4.0	< 4.5	< 5.0	< 5.5	
50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
70	0.1857	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.19
80	2.0298	0.9879	0.3064	0.0306	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.35
90	7.1439	0.8725	0.6183	0.2235	0.0415	0.0126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.91
100	26.8144	3.0357	0.9302	0.1658	0.0433	0.0180	0.0108	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	31.02
110	4.6310	0.7571	0.2542	0.0379	0.0036	0.0000	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.69
120	2.1415	0.1262	0.0072	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.27
130	1.1537	0.0991	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.25
140	0.8508	0.0324	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.88
150	1.7197	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.72
160	0.2488	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.25
170	0.0991	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.10
180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
210	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
Tot.	47.02	5.91	2.12	0.46	0.09	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.64

FIGURA 3-10 – CLIMA ONDOSO NELLA BOA VIRTUALE 10

3.1.4. 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 semi-empirici 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.

3.1.5. Considerazioni preliminari e settaggio del modello UNIBEST-CL+

Il modello UNIBEST-CL+ è stato tarato con riferimento all'evoluzione del litorale avvenuta nel periodo compreso tra il 1993 e il 2014; la linea di riva relativa al 1993 è stata fornita dal Committente mentre quella del 2014 è stata desunte da immagini satellitari (cfr. paragrafo 1.3.1).

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 1993-2014.

Il tratto di costa oggetto di studio, compreso tra la spiaggia di Zinola (circa 500 m a Nord-Est del terrapieno del campo da calcio) e il pontile Esso, è stato schematizzato mediante 10 profili trasversali estesi fino alla profondità di -4,50 m s.m.m. (profondità di chiusura della spiaggia sommersa), la cui ubicazione è illustrata in Figura 3-11.

A titolo esemplificativo, in Figura 3-12 è riportata la schematizzazione adottata nel modulo LT di UNIBEST-CL+ per alcuni dei profili trasversali della costa.



FIGURA 3-11 – UBICAZIONE DEI PROFILI TRASVERSALI SCHEMATIZZATI NEL MODELLO UNIBEST

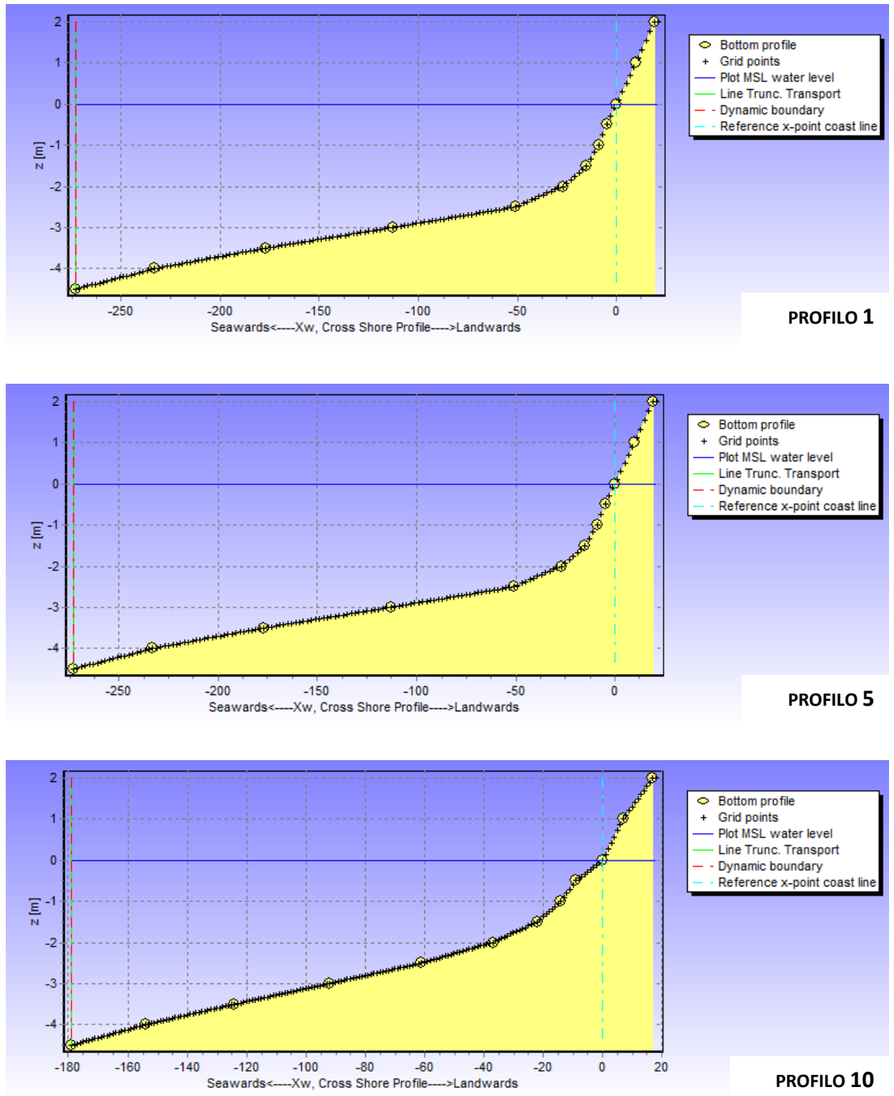


FIGURA 3-12 – ESEMPIO DI SCHEMATIZZAZIONE DI TRE PROFILI TRASVERSALI NEL MODELLO UNIBEST (PROFILI 1, 5 E 10)

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 e la piattaforma sono stati inseriti solamente nel modello di propagazione DELFT3D-WAVE. Per quanto riguarda il porto turistico, questo è stato inserito interamente nel modello DELFT3D-WAVE mentre nel modulo CL di UNIBEST-CL+ è stato rappresentato solamente il molo di sottoflutto. Il pennello in prossimità della foce del Segno, nelle configurazioni ove previsto, è stato schematizzato sia nel modello di propagazione DELFT3D-WAVE che nel modulo CL di UNIBEST-CL+.

Pertanto, nella simulazione di taratura si è provveduto ad inserire nel dominio DELFT3D-WAVE il porto di Vado nella configurazione attuale mentre nella griglia UNIBEST sono state opportunamente schematizzate le altre opere presenti nel periodo di taratura (1993-2014).

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 2 mm (valore rappresentativo dei campioni prelevati sia sulla battigia che sulla spiaggia sommersa, alla profondità di -2 m s.m.m.- cfr. precedente paragrafo 1.3.2).

Di seguito, procedendo da Nord verso Sud, si riporta una breve descrizione delle opere presenti lungo il litorale e rappresentate nel modello UNIBEST.
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 un pennello di 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 e con un pennello che presenta permeabilità nulla.
Anche la scogliera a protezione del terrapieno dove è ubicato il campo da basket, poco più a Nord della foce del torrente Segno, è stata schematizzata avanzando la linea inerodibile.
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 permeabili 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 2014) 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 UNIBEST solamente due interventi:

– Ripascimento del 2005: versamento di 19'000 m^3 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 m^3 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 3-13, si riporta la schematizzazione adottata nella simulazione di taratura per la linea di riva del 1993, le opere presenti lungo il litorale, i ripascimenti e gli apporti solidi dei torrenti.
Tutte le simulazioni condotte con UNIBEST, 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 2.000 m^3/anno.

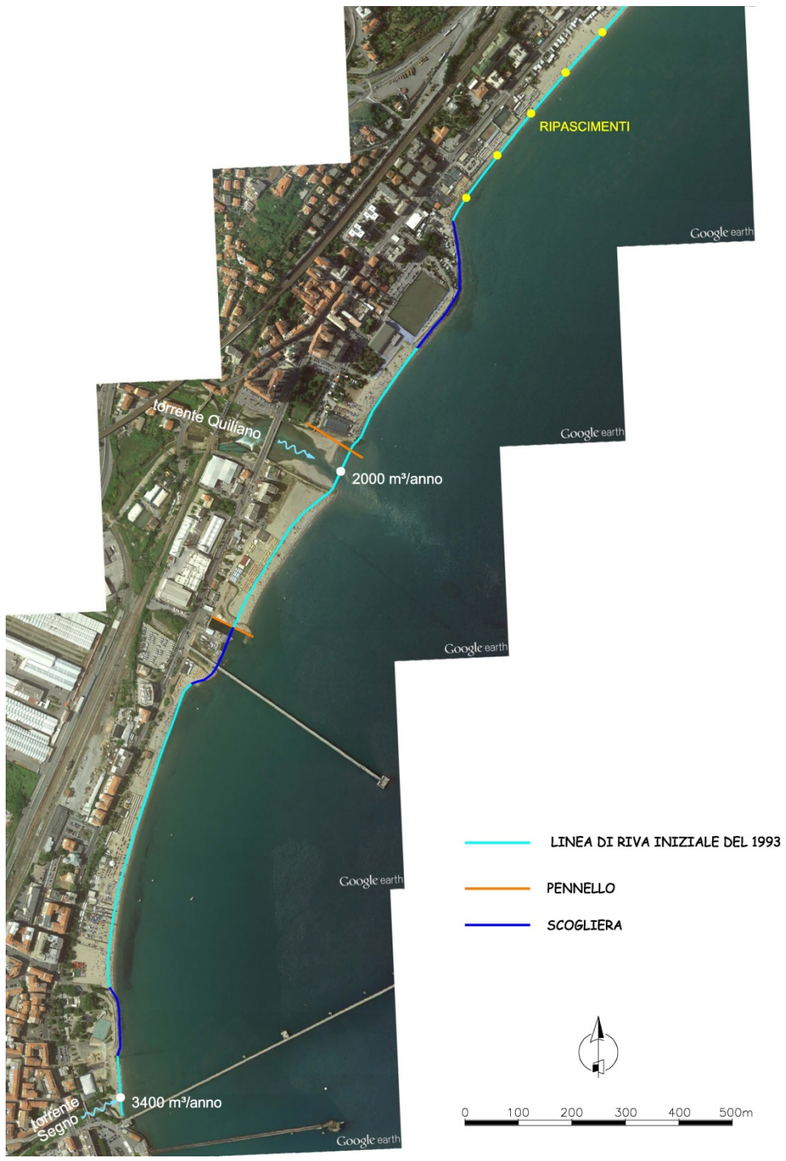


FIGURA 3-13 – SIMULAZIONE DI TARATURA 1993-2014 - SCHEMATIZZAZIONE LINEA DI RIVA E OPERE PRESENTI LUNGO IL LITORALE

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. Il valore di portata solida del torrente è stato 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 UNIBEST 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 UNIBEST sono state condotte facendo riferimento alle caratteristiche sedimentologiche del materiale della spiaggia emersa (costituito da ghiaia medio-fine) e della spiaggia sommersa, alla profondità di -2 m s.m.m., sulla base della curva granulometrica del materiale prelevato alla foce del Segno è stata individuata la percentuale di sedimenti corrispondente alla granulometria considerata (Figura 3-14). 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.

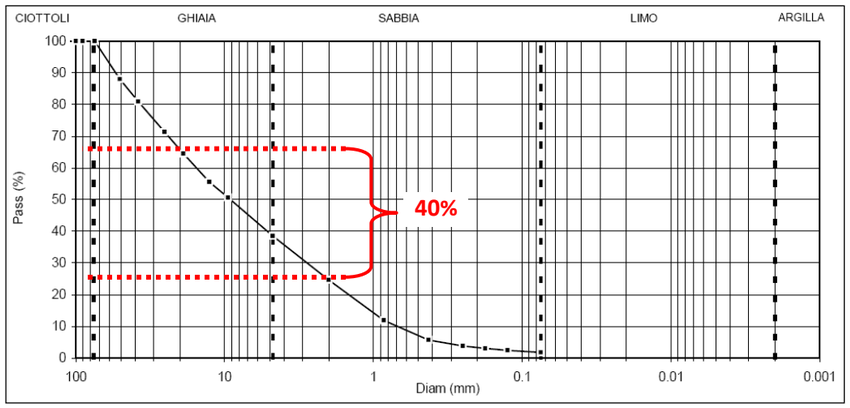


FIGURA 3-14 – INDIVIDUAZIONE DELLA CLASSE DI SEDIMENTI CORRISPONDENTI ALLE GHIAIE MEDIO-FINI SULLA BASE DELLA CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE DI MATERIALE PRELEVATO ALLA FOCE DEL TORRENTE SEGNO

3.1.6. Risultati taratura

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di taratura relativa al periodo 1993-2014, condotta per mezzo del codice di calcolo UNIBEST.
I risultati sono rappresentati nella successiva
Figura 3-15 in termini di evoluzione della linea di riva e in Figura 3-16 in termini di trasporto solido, con riferimento all'intera griglia di calcolo.

Il modello, opportunamente tarato, è in grado di riprodurre con buona 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 relativa a giugno 2014 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 riproduce con discreta approssimazione l'evoluzione avvenuta nel periodo 1993-2014; 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, che si manifesta con una sensibile rotazione subita dalla linea di riva nel periodo 1993-2014 ed un conseguente arretramento a Nord (in corrispondenza del cantiere nautico) e avanzamento a Sud (a ridosso della difesa radente).

Per quanto riguarda l'apporto solido del Torrente Segno, le analisi eseguite hanno evidenziato che la sua influenza è limitata alla sola zona di foce; 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, condotti con il modello Delft 3D.

In linea generale, il trasporto solido longitudinale è diretto verso Nord-Est (ovvero verso il porto di Savona) nel tratto di litorale a Nord del terrapieno del campo da calcio (spiaggia di Zinola). Procedendo verso la foce del Torrente Quiliano, il trasporto si riduce di entità e in corrispondenza della foce si osserva un'inversione nel verso del trasporto che viene quindi ad essere diretto verso Sud (verso il Porto di Vado), per annullarsi in prossimità della foce del torrente Segno.

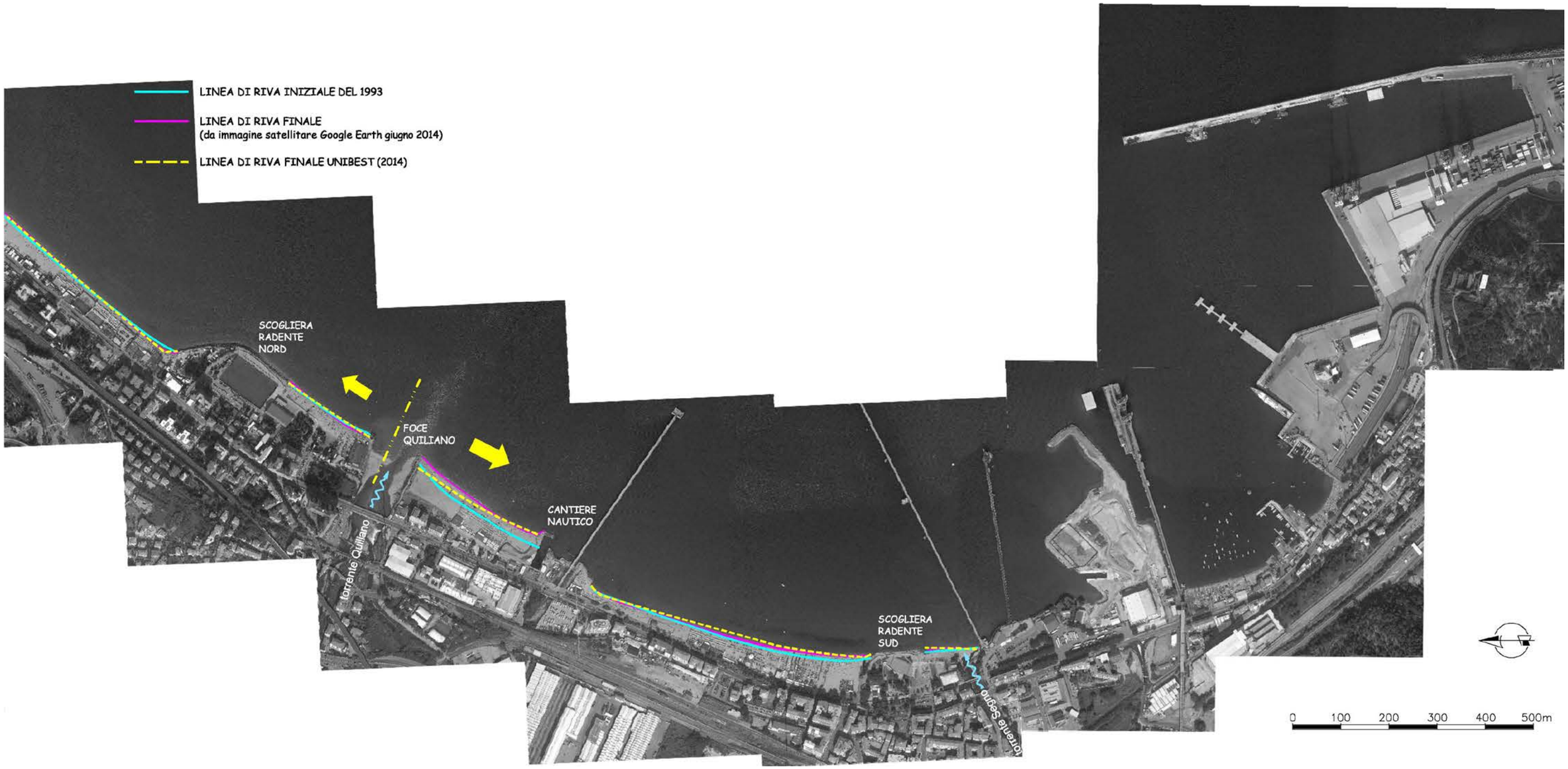


FIGURA 3-15 – TARATURA DEL MODELLO UNIBEST (1993-2014) - EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA

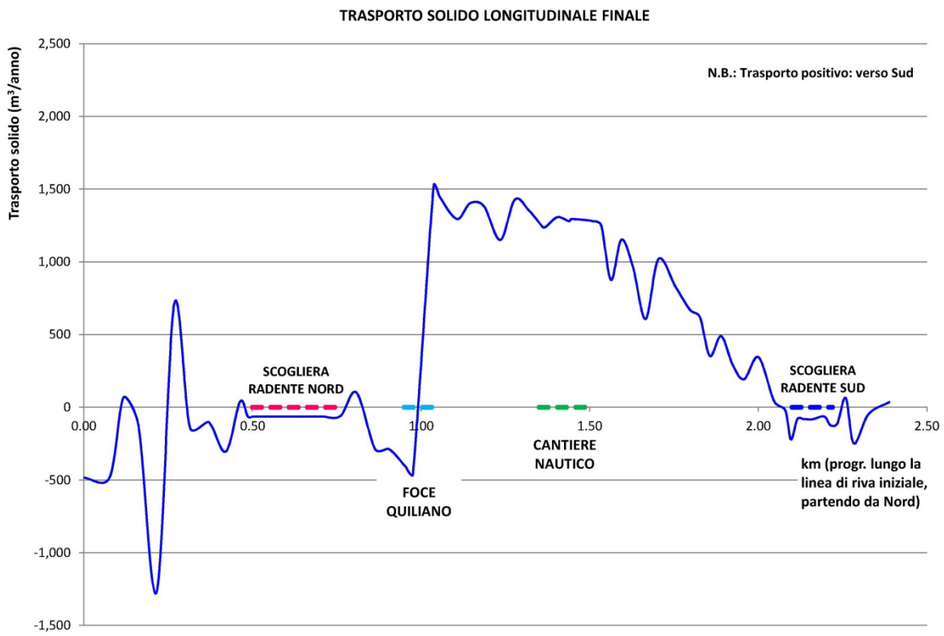


FIGURA 3-16 – SIMULAZIONE DI TARATURA - ANDAMENTO TRASPORTO SOLIDO LONGITUDINALE

3.2. Evoluzione morfologica in configurazione attuale

Il modello di evoluzione morfologica, una volta tarato, 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 nella configurazione attuale, è stata condotta una simulazione dell'evoluzione della linea di riva a 10 anni, con riferimento al medesimo periodo temporale utilizzato per le simulazioni nelle diverse configurazioni di progetto (dal 2014 al 2024).

Di seguito si riportano i parametri utilizzati nel modello e i risultati della simulazione eseguita in riferimento alla situazione attuale.

3.2.1. 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 UNIBEST. Si tratta sostanzialmente delle stesse opere presenti nella simulazione di taratura e descritte nel precedente paragrafo 3.1.5.

La linea di riva iniziale è quella del 2014; i sedimenti presenti all'interno della fascia attiva sono stati rappresentati con un valore del diametro mediano dei grani pari a 2 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, sulla base di quanto osservato nell'ambito della simulazione di taratura.

Di seguito, in Figura 3-17, si riporta la schematizzazione della linea di riva e delle opere presenti lungo il litorale nella configurazione attuale, di riferimento per la simulazione eseguita con il modello UNIBEST.

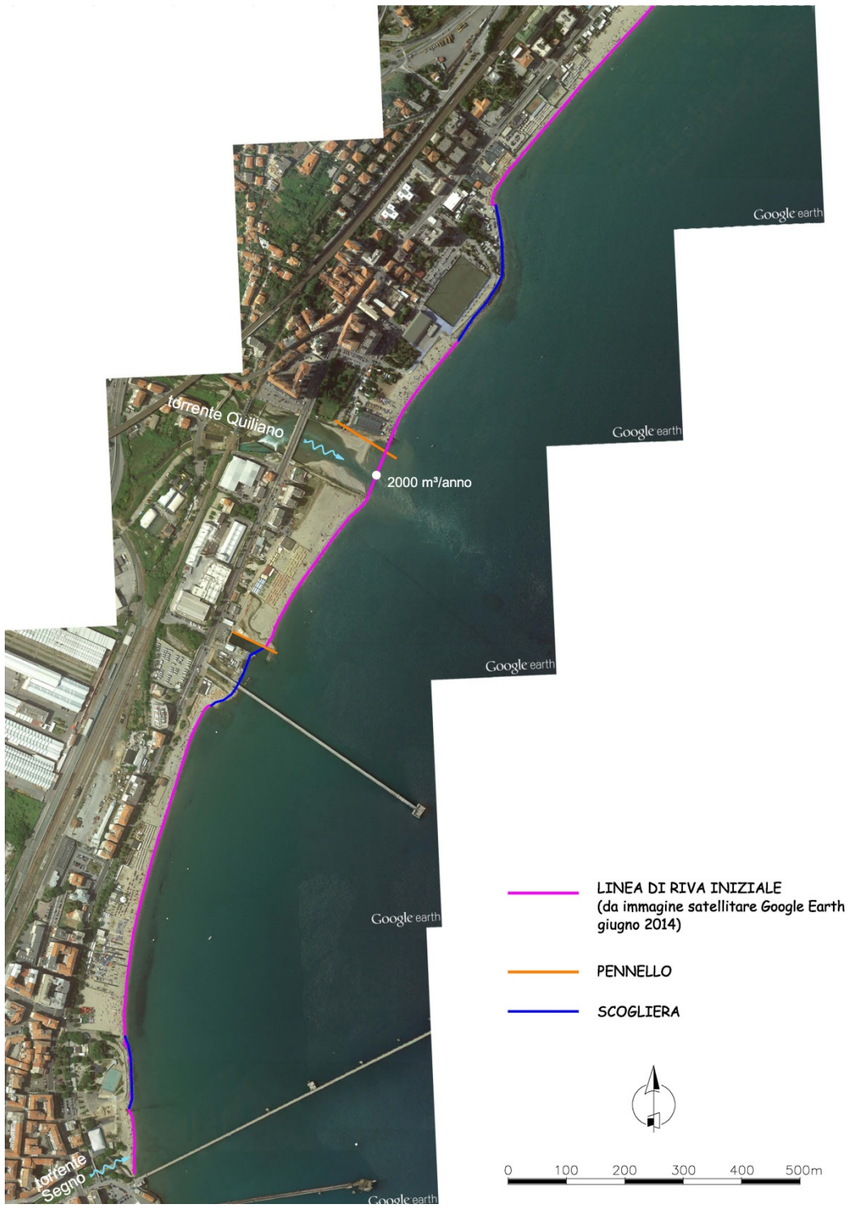


FIGURA 3-17 – CONFIGURAZIONE ATTUALE – SCHEMATIZZAZIONE LINEA DI RIVA E OPERE PRESENTI LUNGO IL LITORALE

3.2.2. Risultati evoluzione morfologica in configurazione attuale

I risultati della simulazione di evoluzione morfologica a 10 anni in configurazione attuale sono rappresentati nella successiva Figura 3-18 in termini 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.
In linea generale, il trasporto solido longitudinale è diretto verso Nord-Est (ovvero verso il porto di Savona) nel tratto di litorale a Nord del terrapieno del campo da calcio (spiaggia di Zinola). Procedendo verso la foce del Torrente Quiliano, il trasporto si riduce di entità e in corrispondenza della foce si osserva un'inversione nel verso del trasporto che viene quindi ad essere diretto verso Sud (verso il Porto di Vado), per annullarsi in prossimità della foce del torrente Segno.

In termini di evoluzione della linea di costa, si riscontra una tendenza alla stabilità nella spiaggia di Zinola, a ridosso del terrapieno del campo da calcio. Dalla foce del Quiliano, procedendo verso Sud fino al cantiere nautico alla radice del pontile Tirreno Power, il trasporto solido risulta diretto verso Sud e si registra una rotazione antioraria della linea di riva, con un arretramento della stessa in corrispondenza della foce del Quiliano ed un avanzamento nei pressi del cantiere nautico. Anche nel tratto più a Sud (tra il pontile Tirreno Power e la difesa radente a Nord del Segno) si osserva un riorientamento della linea di riva, con una tendenza ad un modesto avanzamento in corrispondenza della difesa radente situata a Nord della foce del Torrente Segno.



FIGURA 3-18 – CONFIGURAZIONE ATTUALE - EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA NEL PERIODO 2014-2024

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

4.1. Marea

4.1.1. 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 4-1 (Imperia) e in Figura 4-2 (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.

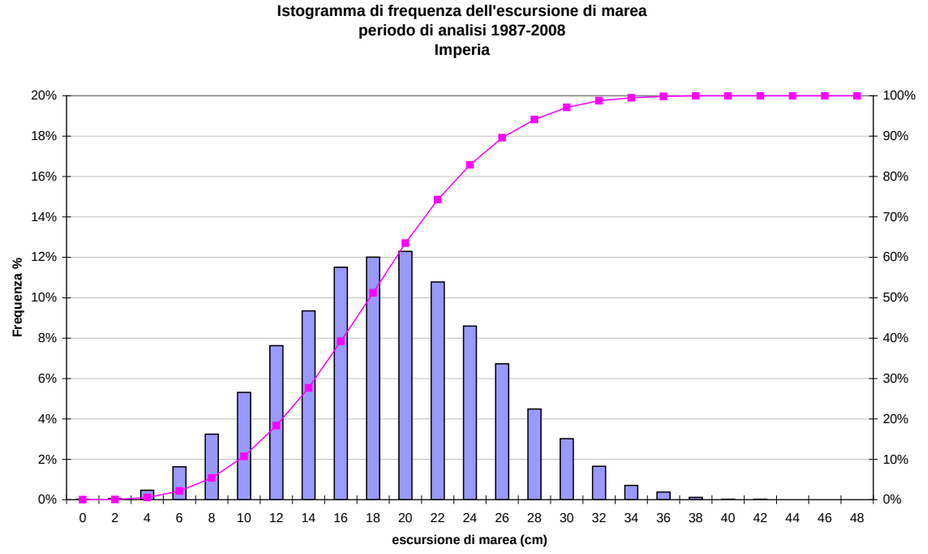


FIGURA 4-1 - STATISTICA DELL'AMPIEZZA DI MAREA AD IMPERIA (1997-2008)

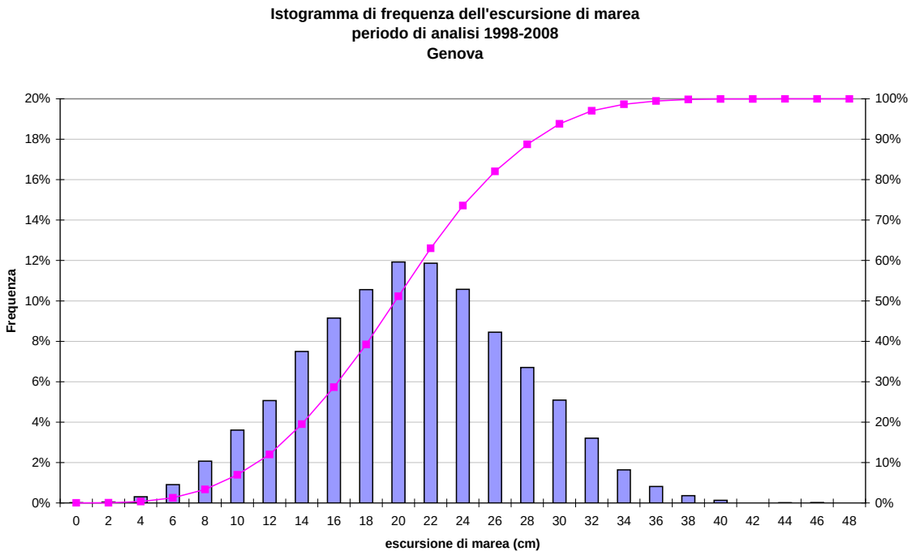


FIGURA 4-2 - STATISTICA DELL'AMPIEZZA DI MAREA A GENOVA (1998-2008)

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:

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo.

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.

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 4-1 - 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 4-2 - 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

4.2. 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 del-la 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 ma-reggiate 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 ri-viera 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 circola-zione antioraria, variabile come intensità a livello stagionale ed interannuale, ma comunque persistente in quanto alimentata sia dalla corrente del Mediterraneo Occi-dentale che dalla corrente tirrenica (Figura 4-3).

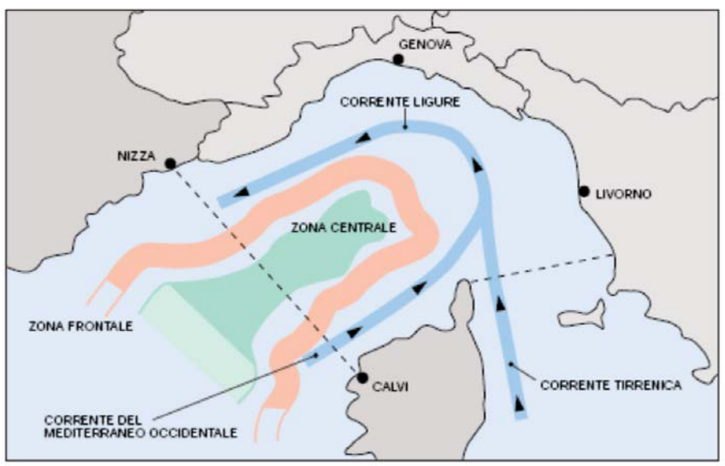


FIGURA 4-3 - MARE LIGURE: LE PRINCIPALI STRUTTURE DINAMICHE E LE CORRENTI

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

4.3. 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 4-4 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 m3/s
- Torrente Quiliano = 14 m3/s
- Torrente Letimbro = 15 m3/s

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.

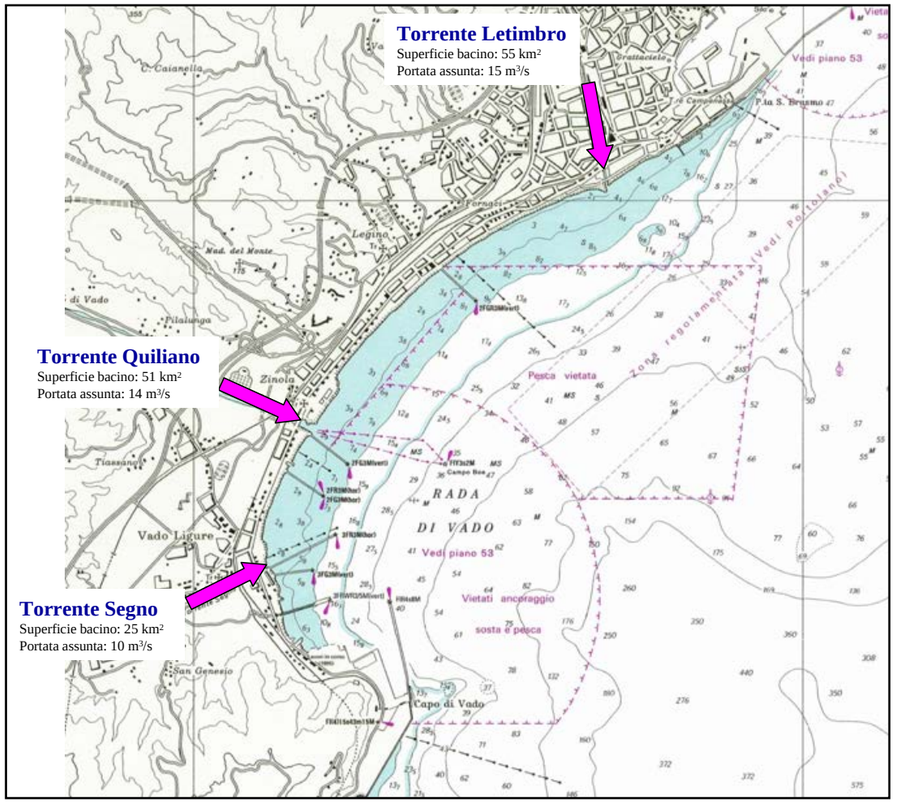


FIGURA 4-4 - CORSI D'ACQUA CHE SFOCIANO NELLA BAIA DI VADO LIGURE

4.4. 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:

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo.

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:

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo.

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo.

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]

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. = 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:

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo.

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]

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. = 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.

4.4.1. 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 4-5 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 4-6.

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.

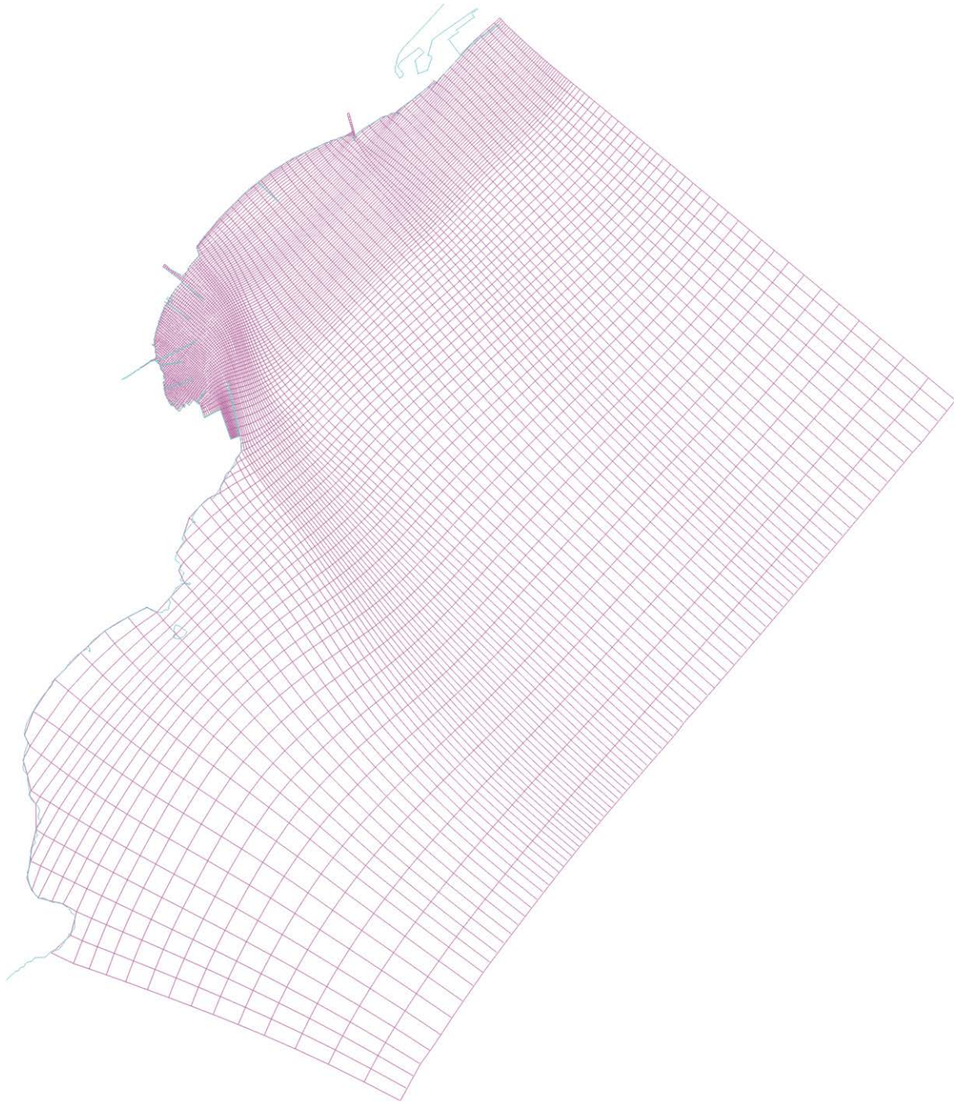


FIGURA 4-5 – SCHEMATIZZAZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO DEL MODELLO IDRODINAMICO CON UNA GRIGLIA A MAGLIA CURVI-LINEA

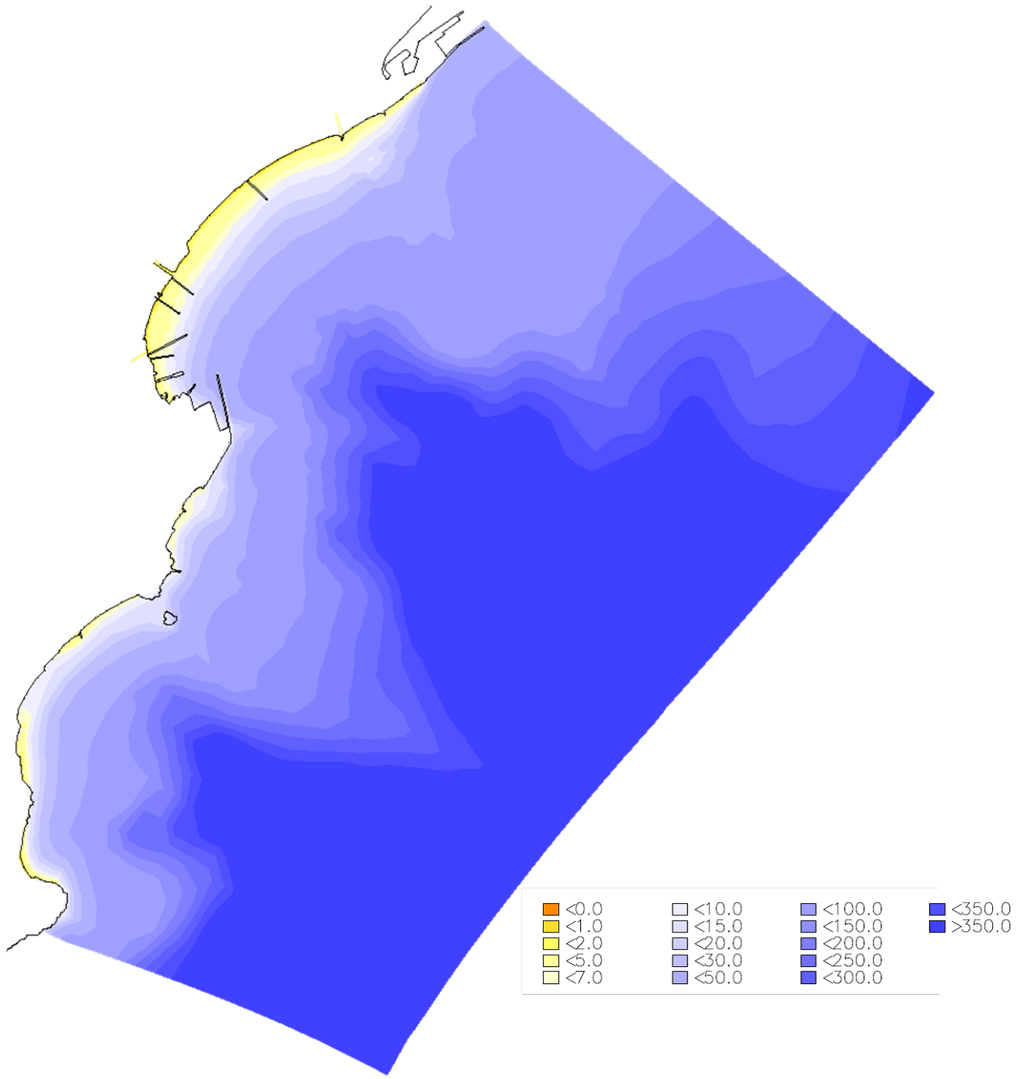


FIGURA 4-6 – BATIMETRIA APPLICATA ALLA MAGLIA DI CALCOLO DELLA FIGURA 4-5.

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.

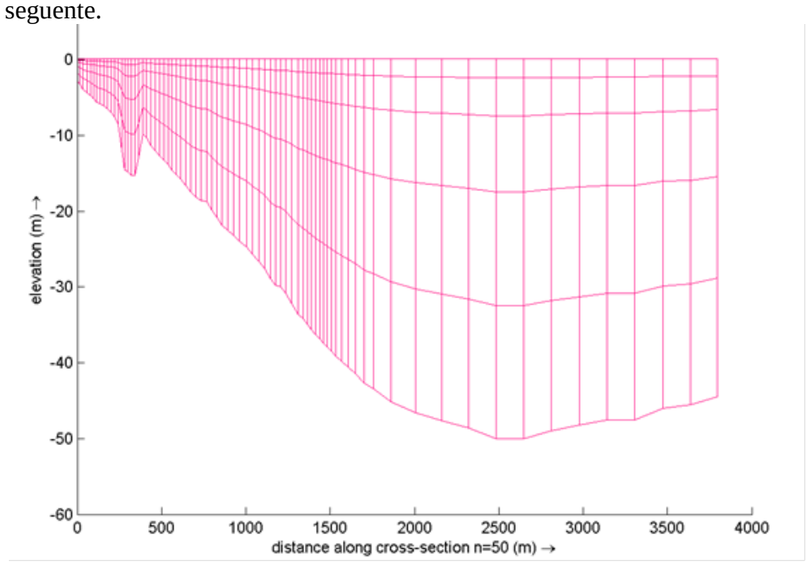


FIGURA 4-7 - ESEMPIO DI SCHEMATIZZAZIONE TRIDIMENSIONALE A "σ-LAYERS"

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 m3/s, 14 m3/s e 15 m3/s.

5. 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

5.1. 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 5-1.

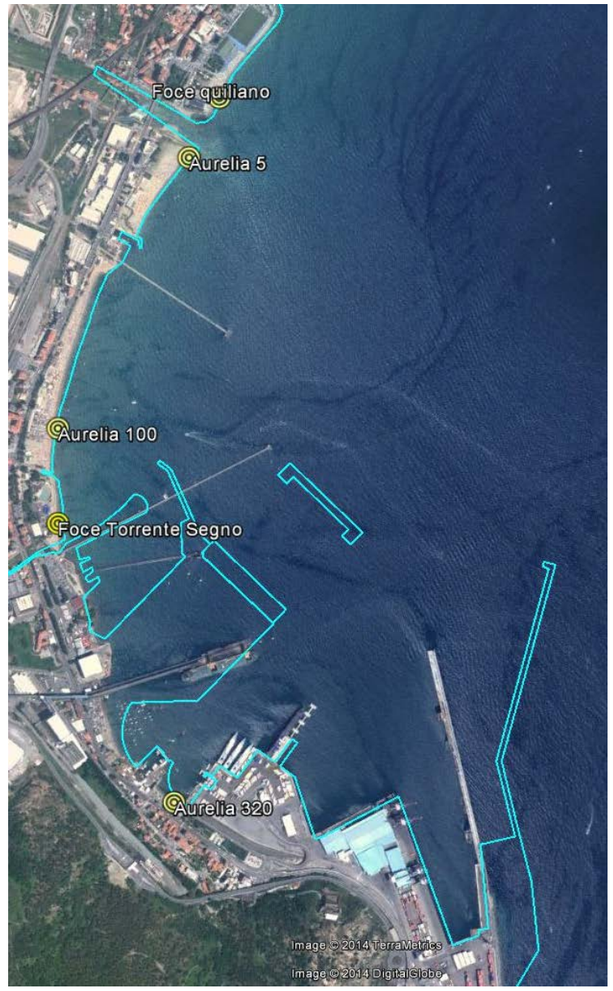


FIGURA 5-1 – UBICAZIONE DELLE STAZIONI ARPAL PER LA MISURA DEI PARAMETRI DI QUALITÀ DELLE ACQUE DI BALNEAZIONE

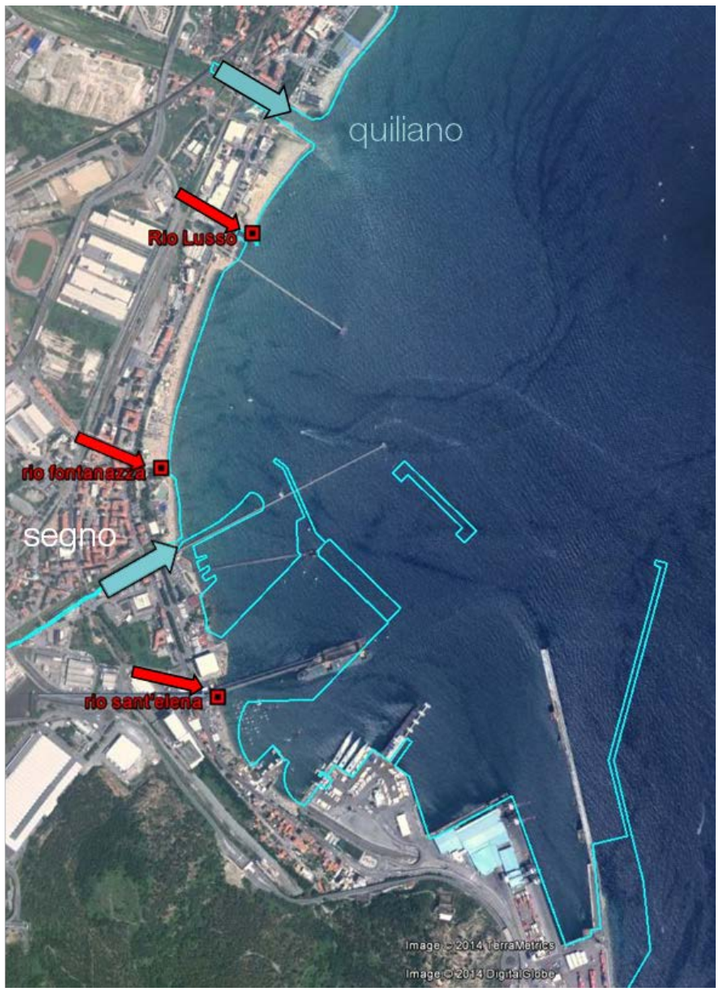


FIGURA 5-2 – POSIZIONE DEI RILASCI DEI CARICHI BATTERICI IN CORRISPONDENZA DEI CORSI D'ACQUA E RII SFOCIANTI NELLA RADA DI VADO

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 (Salmo-nella 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 para-metri 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.

5.2. 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.

<u>Le analisi statistiche</u>

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.

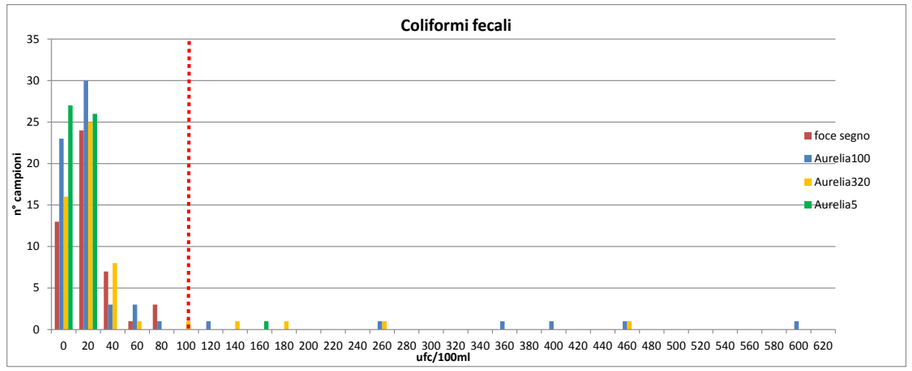
Nei grafici sottostanti sono riportati per ciascuna parametro microbiologico considerato gli istogrammi di frequenza dei valori campionati. In rosso tratteggiato è riportato anche il valore limite di legge per un singolo campione così come previsto dalla normativa.

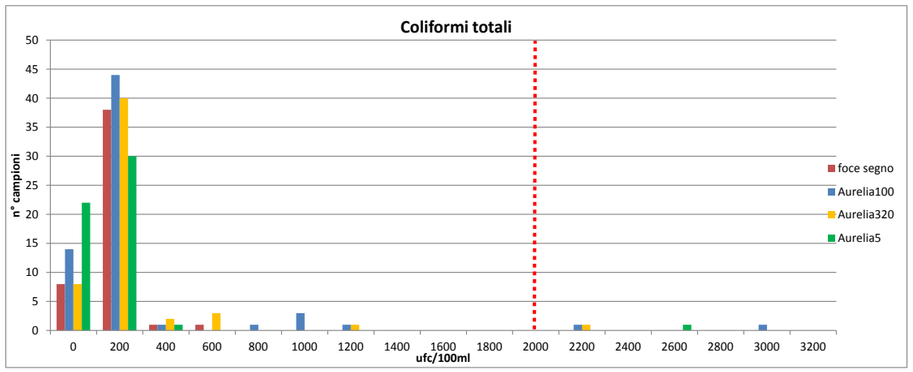
Dall'analisi dei dati si osserva che lo stato generale delle acque di balneazione lungo il litorale di vado si presenta in uno stato di qualità "eccellente" e tutto il tratto costiero ha ricevuto la certificazione di bandiera blu nel corso degli ultimi anni.

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.





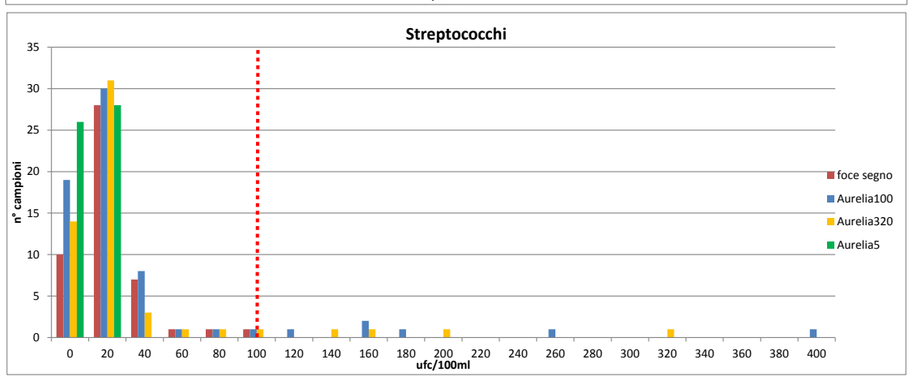
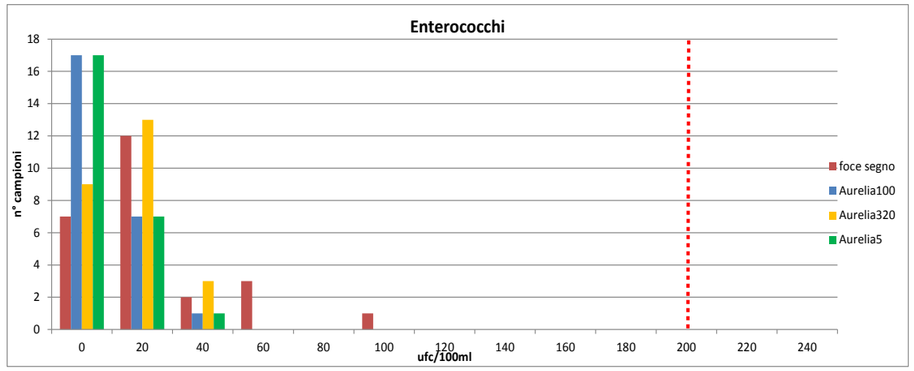


FIGURA 5-3 - ISTOGRAMMA DI FREQUENZA DELLE MISURE DI CONTAMINAZIONE MICROBIOLOGICA TRA IL 2006 E IL 2009 (RIF. DPR 470/82) PER IL LITORALE DI VADO LIGURE



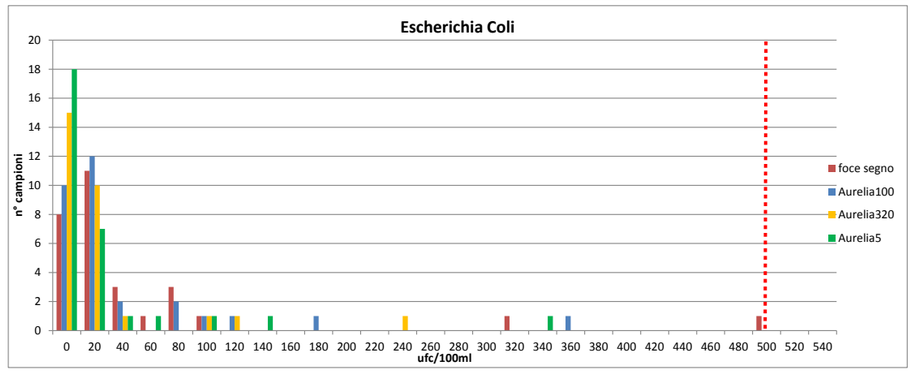


FIGURA 5-4 – ISTOGRAMMA DI FREQUENZA DELLE MISURE DI CONTAMINAZIONE MICROBIOLOGICA TRA IL 2010 E IL 2014 (RIF. D.LGS 116/08) PER IL LITORALE DI VADO LIGURE

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.

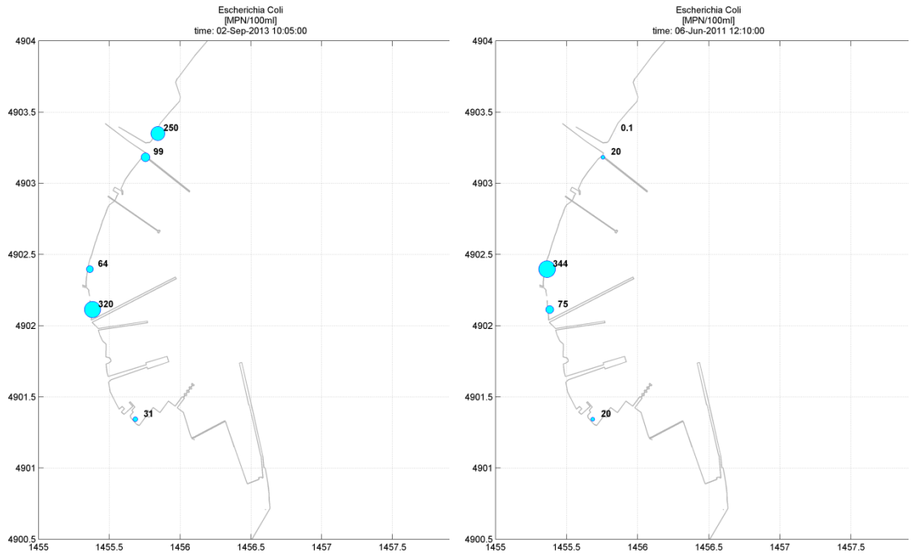


FIGURA 5-5 - DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'ANDAMENTO DELL'ESCHERICHIA COLI IN TRE EPISODI SIGNIFICATIVI

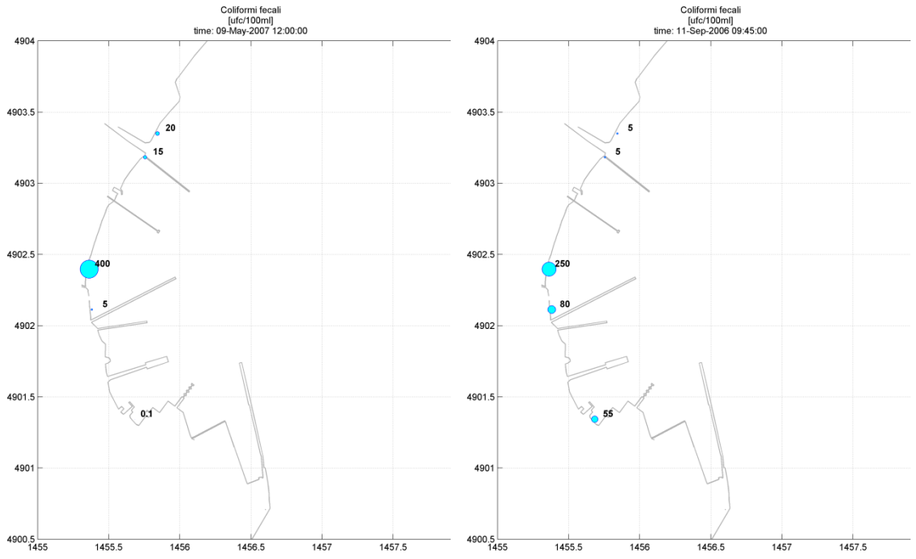


FIGURA 5-6 - DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'ANDAMENTO DEI COLIFORMI FECALI IN TRE EPISODI SIGNIFICATIVI

FIGURA 5-7 - 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 5-8 a Figura 5-10.

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 5-2.

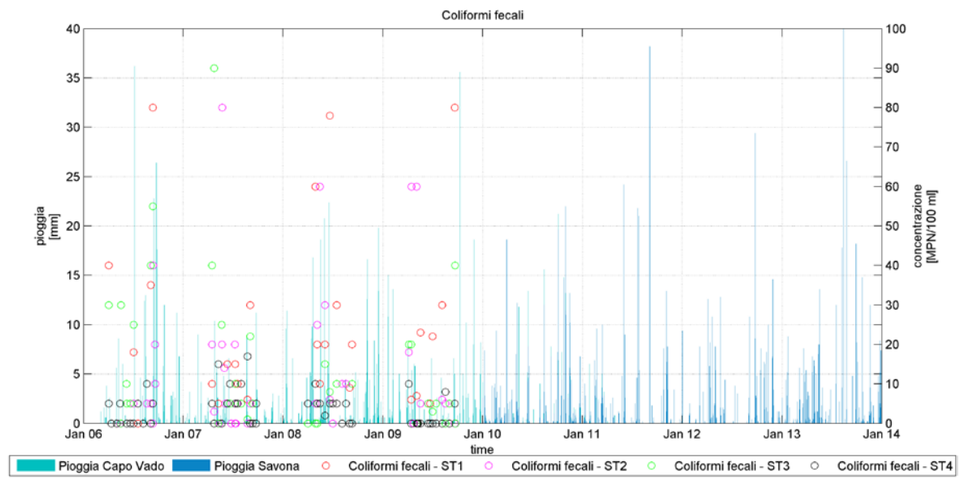
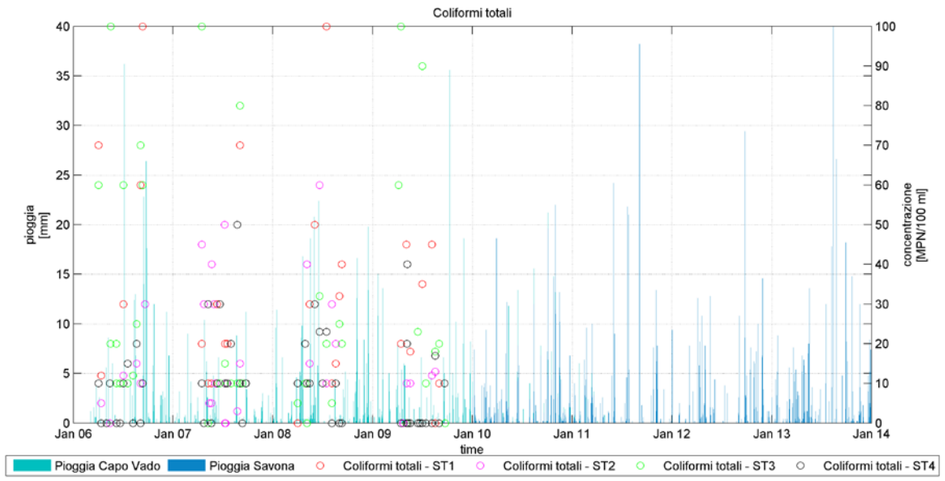
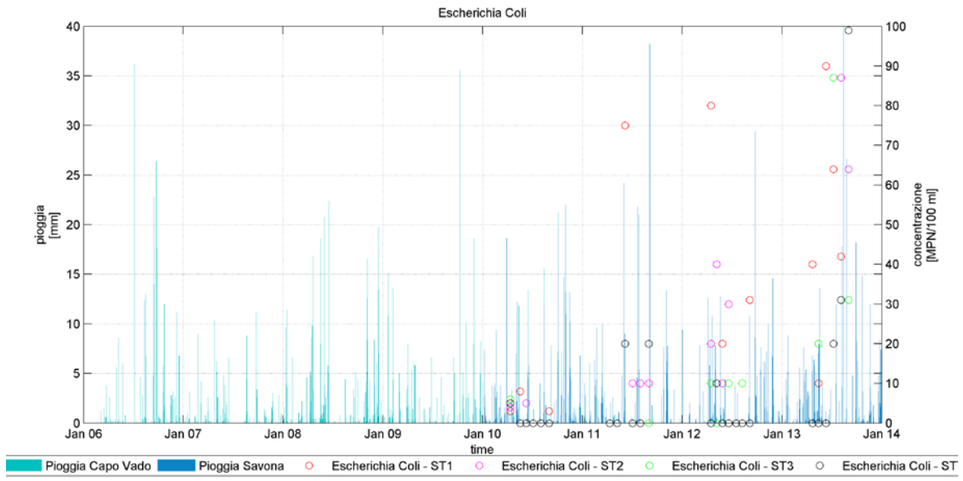


FIGURA 5-8 - ANALISI DI CORRELAZIONE TRA LA PRECIPITAZIONE CUMULATA E LE CONCENTRAZIONI DI COLIFORMI TOTALI





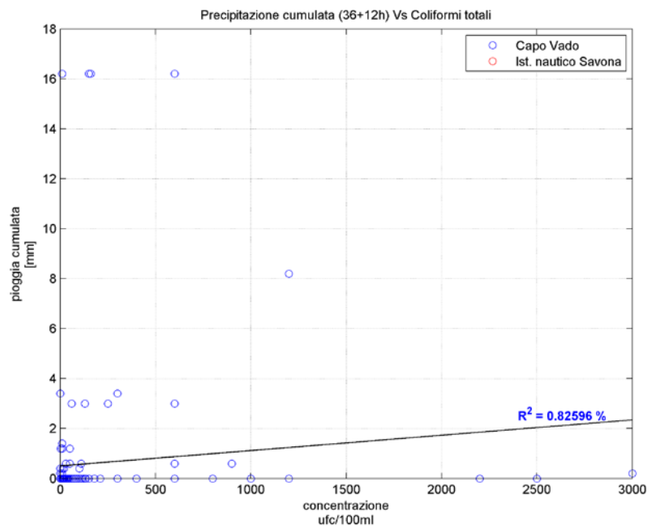


FIGURA 5-9 – ANALISI DI CORRELAZIONE TRA LA PRECIPITAZIONE CUMULATA E LE CONCENTRAZIONI DI COLIFORMI FECALI

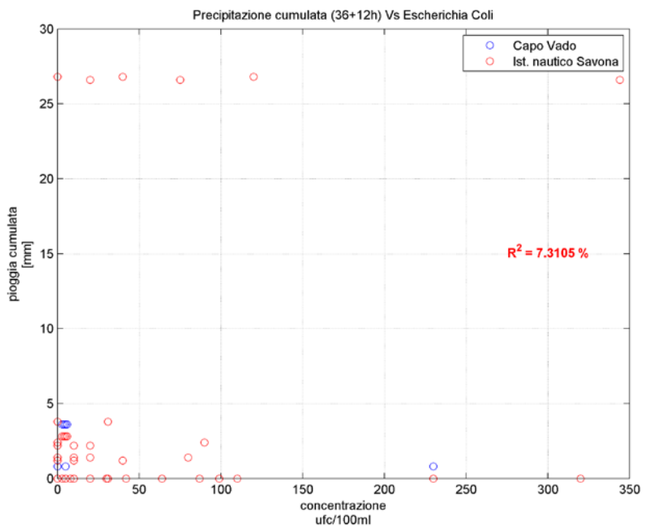


FIGURA 5-10 – ANALISI DI CORRELAZIONE TRA LA PRECIPITAZIONE CUMULATA E LE CONCENTRAZIONI DI ESCHERICHIA COLI

5.3. 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 del-la più ampia suite di software Delft3D, un sistema integrato di modelli numerici sviluppato presso i laboratori dell'istituto di ricerca olandese "Deltares" per la simula-zione 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 mari-no/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 tempera-tura, 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 riferimento alle formulazioni empiriche sviluppate da Mancini (1978) per la valuta-zione 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

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo.

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 ultra-violetta, 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 schematizza-zione 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.

5.3.1. 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 caratterizzati 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 5-11 e Figura 5-12 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.

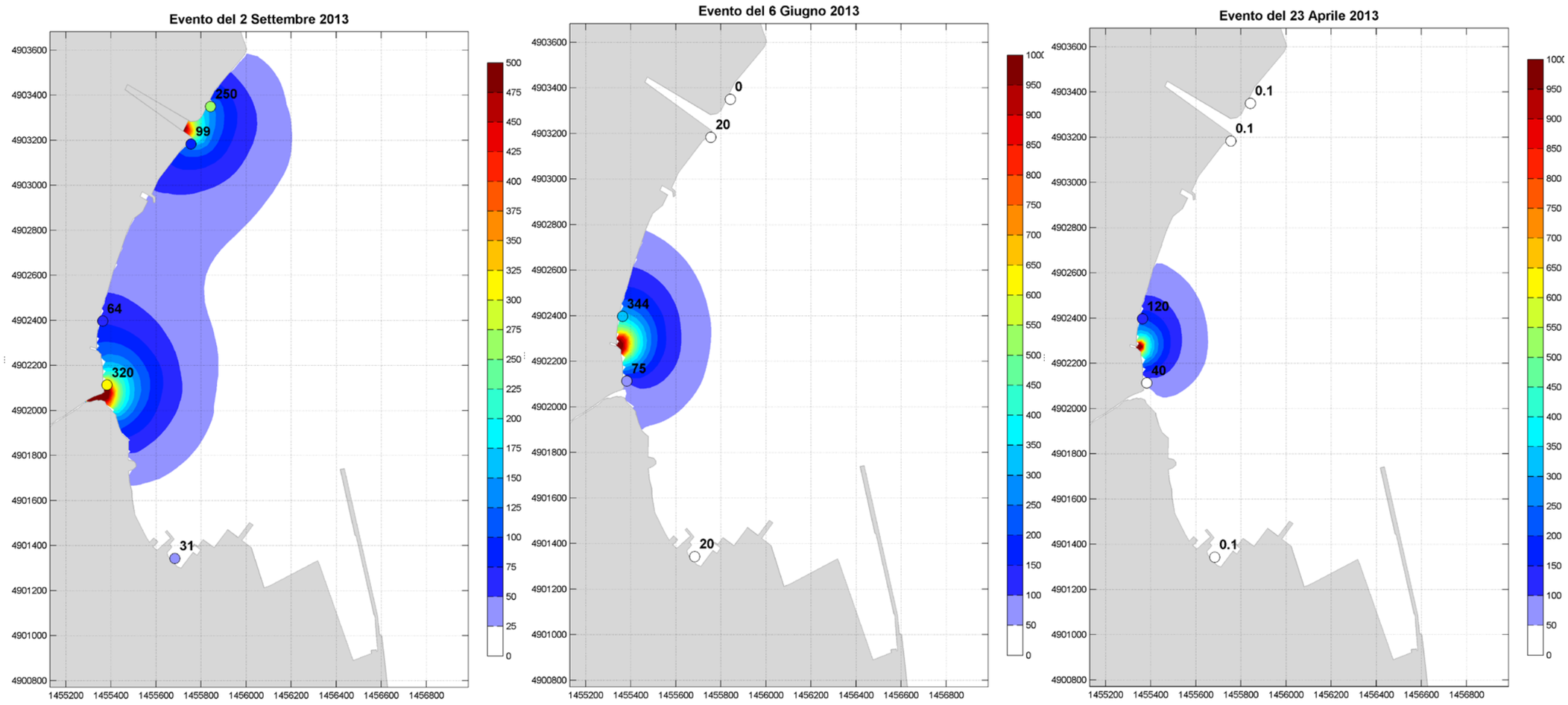


FIGURA 5-11 – CONCENTRAZIONE DELL'ESCHERICHIA COLI (UFC/100ML) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN TRE EVENTI SIGNIFICATIVI

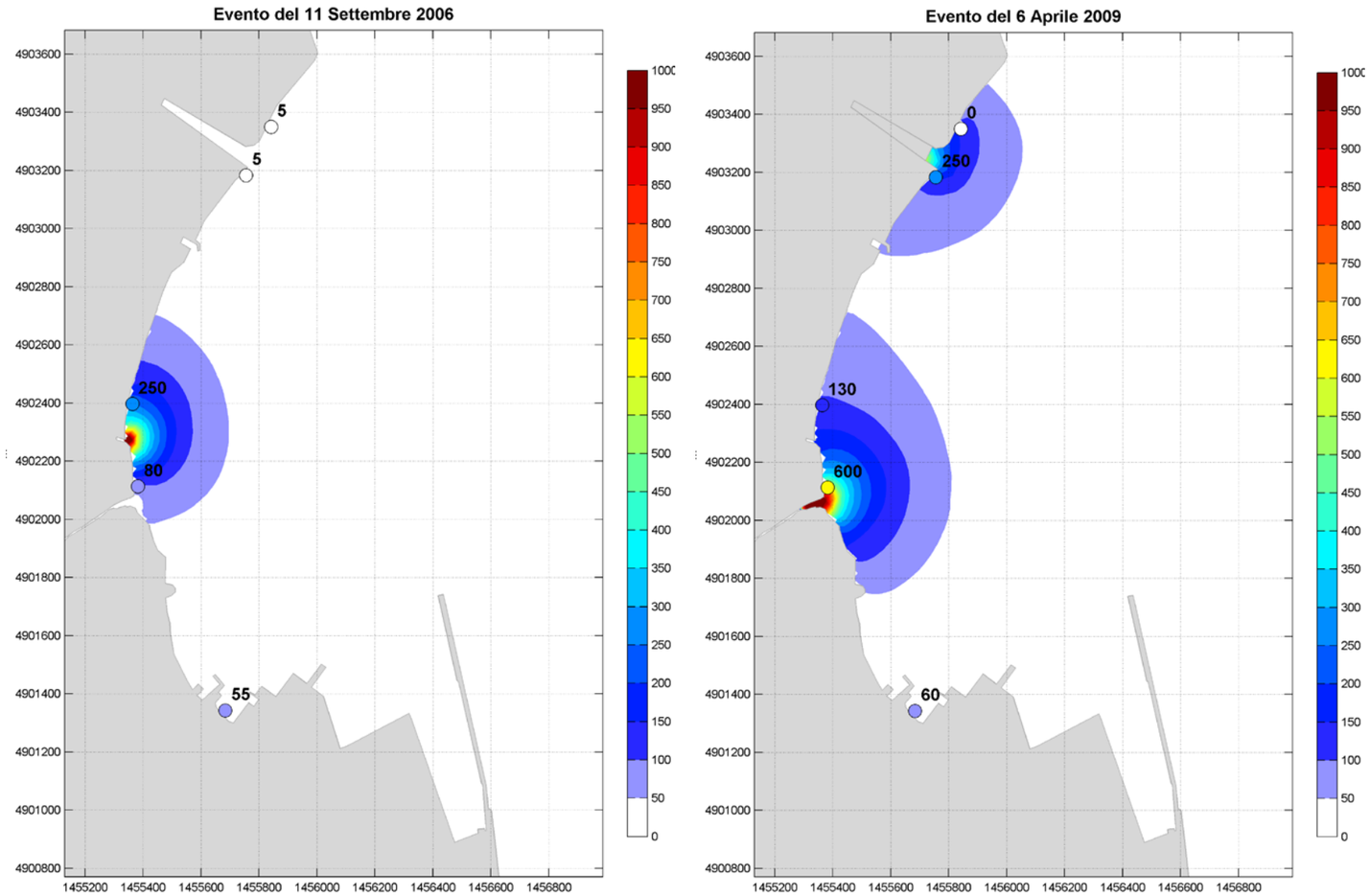


FIGURA 5-12 – CONCENTRAZIONE DEI COLIFORMI FECALI (A SINISTRA) E DEI COLIFORMI TOTALI (A DESTRA) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN DUE EVENTI SIGNIFICATIVI

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