



Autorità di Sistema Portuale
del Mar Ligure Orientale
Porti di La Spezia e
Marina di Carrara

AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR LIGURE ORIENTALE

PORTI DI LA SPEZIA E MARINA DI CARRARA

Servizi di modellistica numerica per lo studio dell'idrodinamica,
del trasporto di sedimenti e della morfodinamica delle aree
costiere dei porti del La Spezia e di Marina di Carrara

CIG 7543732494

S1

STUDIO METEOMARINO VOLUME 3. CONDIZIONI METEOMARINE PER IL PARAGGIO DI MARINA DI CARRARA

1 9 0 0 3 S R 1 0 3 0

Committente

AdSP
Mar Ligure Orientale
R.U.P.
ing. Davide VETRALA

Associazione Temporanea di Imprese (A.T.I.)

Capogruppo (Mandataria)
MODIMAR S.r.l.



Via Monte Zebio 40 - 00195 ROMA
06.3269461 - www.modimar.it

Mandante

TECHNITAL S.p.a.



Via Carlo Cattaneo, 20 - 37121 VERONA
www.technital.it

Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:
17.06.2019	0	Emissione per commenti del Cliente	Del Bianco	Milana	Contini
La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo documento con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta. This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission					

S1

Studio Meteomarino

VOLUME 3: CONDIZIONI METEOMARINE PER IL PARAGGIO DI MARINA DI CARRARA

A.T.I.	MODIMAR s.r.l.	Via Monte Zebio 40, Roma
	TECHNITAL s.p.a.	via Carlo Cattaneo, 20 Verona
CODICE DOCUMENTO	19 003 SR 103 0	
DATA	17/06/2019	
STATO	Emissione per commenti del Cliente	

INDICE

Capitolo 1	Premesse.....	1
1.1	Introduzione.....	1
1.2	Obiettivi dello studio.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
1.3	Contenuto del Volume 3.....	1
Capitolo 2	Esposizione del paraggio.....	3
2.1	Fetch geografico ed efficace.....	3
Capitolo 3	Regime dei venti.....	6
3.1	Dati vento al largo ricostruiti dal NOAA.....	6
3.2	Regime dei venti sottocosta.....	7
Capitolo 4	Clima di moto ondoso al largo.....	9
Capitolo 5	Eventi estremi al largo.....	12
Capitolo 6	Propagazione del moto ondoso dal largo verso costa.....	13
6.1	Metodologia seguita.....	13
6.1	Ricostruzione del clima di moto ondoso.....	14
6.2	Il modello numerico per la propagazione del moto ondoso.....	16
6.3	Set-up del modello per la propagazione del moto ondoso.....	16
Capitolo 7	Clima di moto ondoso sottocosta.....	19
7.1	Individuazione dei punti sottocosta.....	19
7.2	Propagazione nel punto sottocosta MC1.....	20
7.3	Propagazione nel punto sottocosta MC2.....	22
7.4	Propagazione nel punto sottocosta MC3.....	23
7.5	Clima di moto ondoso alla boa ondometrica di Marina di Carrara.....	24
Capitolo 8	Variazioni del livello marino (maree e sovralti).....	27
8.1	Premessa e metodologia seguita.....	27
8.2	Serie storica dei livelli misurati dal mareografo di Marina di Carrara.....	27
8.3	Marea astronomica ed analisi armonica dei livelli misurati.....	27
8.4	Marea meteorologica (stima).....	30
8.5	Marea meteorologica (analisi dei livelli residui).....	31
8.6	Variazioni del livello del mare connesse a fenomeni di eustatismo.....	32

Capitolo 1 Premesse

1.1 Introduzione e obiettivi dello studio

A seguito dell'espletamento di una gara con procedura aperta ed offerta economicamente più vantaggiosa l'Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale ha stipulato con l'A.T.I. tra le Società Modimar S.r.l. e Technital S.p.A. il contratto avente per oggetto un accordo quadro quadriennale per il servizio di modellistica numerica per lo studio del clima meteomarino, dell'idrodinamica, del trasporto dei sedimenti e della morfodinamica nelle aree costiere dei porti di La Spezia e Marina di Carrara.

Il presente documento è relativo alla prestazione S1 ed ha per oggetto lo Studio Meteomarino del paraggio dal golfo della Spezia al porto di Marina di Carrara ed è strutturato in tre distinti volumi:

- Volume 1. Condizioni meteomarine al largo. Acquisizione, validazione e analisi dei dati
- Volume 2. Condizioni meteomarine per il paraggio di La Spezia
- Volume 3. Condizioni meteomarine per il paraggio di Marina di Carrara

Lo studio, avviato nell'ambito della Commessa d'ordine n°1 dal Responsabile Unico del Procedimento, è stato redatto secondo le modalità e i contenuti di cui all'offerta tecnica presentata dall'A.T.I. in sede di gara ed alle prescrizioni tecniche del Capitolato Speciale Descrittivo e Prestazionale (art. 4) allegato al Contratto di Accordo Quadro del 03/04/2019, n.32/2019 di Repertorio.

Lo **Studio Meteomarino** ha l'obiettivo di definire le forzanti meteomarine (in termini di vento, moto ondoso e livello del mare) necessarie per la corretta applicazione dei modelli numerici di idrodinamica, di trasporto dei sedimenti e di morfodinamica costiera. I risultati dello studio meteomarino forniscono inoltre i parametri necessari per eventuali verifiche idraulico-strutturali di opere in progetto previste dall'Autorità di Sistema Portuale.

1.2 Contenuto del presente rapporto

Il presente rapporto (**Studio Meteomarino Volume 3**) riporta i risultati delle analisi condotte per la definizione delle **condizioni meteomarine per il paraggio di Marina di Carrara**.

Il documento riporta, in forma sintetica, i risultati esposti nel Volume 1 relativi a:

- l'esposizione del paraggio;
- l'analisi dei venti caratteristici per il paraggio in termini di direzione e intensità;
- le caratteristiche del moto ondoso al largo;
- i valori estremi di moto ondoso associati a determinati tempi di ritorno.

Sono state analizzate le variazioni del livello marino in funzione delle distinte componenti (astronomica e meteorologica) che caratterizzano il paraggio in esame anche sulla base delle registrazioni effettuate dalla stazione mareografica presente nel porto di Marina di Carrara.

Vengono presentati i risultati delle analisi condotte sui dati di moto ondoso registrati dall'ondametro installato all'esterno del porto di Marina di Carrara gestito dall'ex Autorità Portuale Marina di Carrara che ha operato tra il 2006 e il 2011.

Sulla base del quadro conoscitivo definito al largo, relativo ai livelli marini, al clima di moto ondoso ed al regime dei venti, è stato condotto uno studio di propagazione sottocosta del moto ondoso con l'ausilio del modello numerico spettrale SWAN. Lo studio è così suddiviso:

- descrizione del modello, definizione delle condizioni al contorno e analisi di sensibilità;
- ricostruzione del clima di moto ondoso sottocosta.

Capitolo 2 Esposizione del paraggio

Il paraggio costiero in cui ricade il porto di Marina di Carrara, è situato sulla costa occidentale della penisola italiana che si affaccia sul Mar Ligure Orientale quindi geograficamente esposto agli eventi meteomarini (moto ondoso e vento) provenienti dal II° e dal III° quadrante (da SudEst a Sud, e da SudOvest ad Ovest).

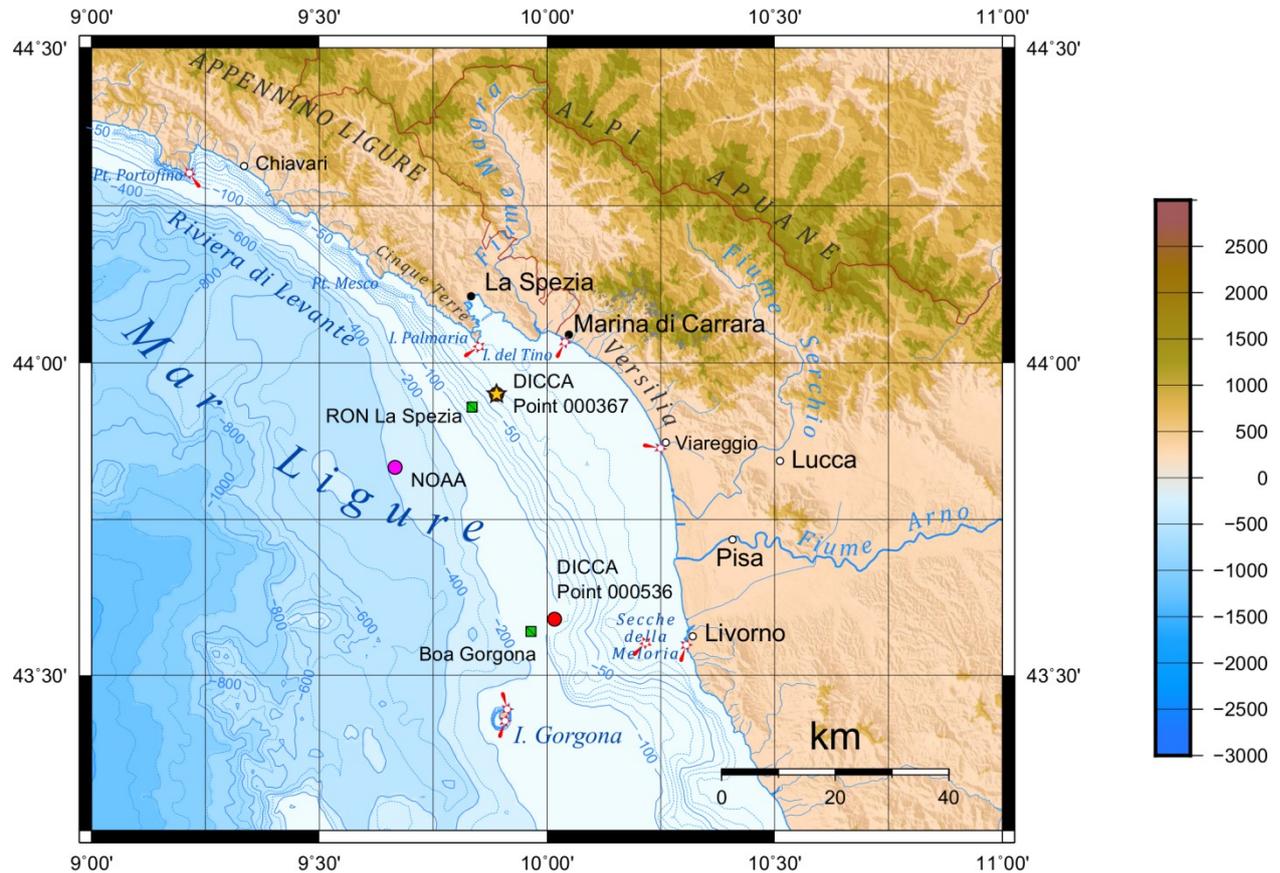


Figura 2-1. Inquadramento geografico del Mar Ligure Orientale con indicazione del punto di ricostruzione del moto ondoso DICCA 000367 (43.95°N-9.88°E) utilizzato per la definizione del clima di moto ondoso al largo, della stazione ondometrica RON di La Spezia, della boa ondometrica appartenente al servizio idrologico della Regione Toscana localizzata a nord dell'Isola della Gorgona e del punto di ricostruzione del moto ondoso DICCA 000536 posto in prossimità della boa ondometrica della Gorgona.

2.1 Fetch geografico ed efficace

In Figura 2-2 è mostrato il fetch geografico (tracciato con passo angolare di 1°) per il punto di coordinate 43.95°N, 9.88°E, posizionato al largo ad una distanza di circa 15 km dal porto di Marina di Carrara su fondali di circa 35 m.

Il paraggio risulta esposto al mare aperto per il settore di traversia compreso tra le direzioni 140°N e 310°N. Il fetch geografico tra SudEst e Sud (all'interno del settore 140°-215° N) risulta limitato dalla costa della Toscana, dall'Isola d'Elba, dalla costa Nord Orientale della Sardegna e dalla Corsica. Nel quadrante Nord Occidentale (tra le direzioni 310° e 250°N) il fetch risulta limitato dalla costa Ligure e dalla costa francese meridionale con estensioni del fetch che variano da circa 68 km a 225 km.

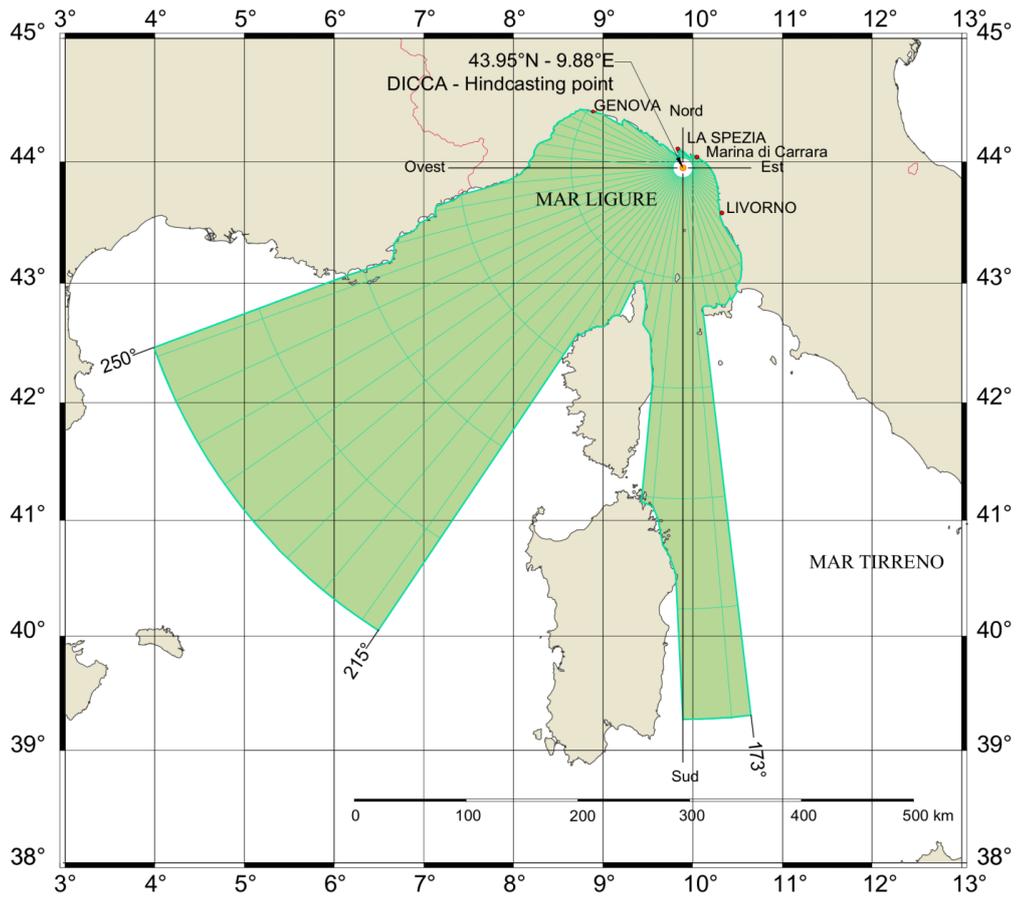


Figura 2-2. Fetch geografico al largo di Marina di Carrara nel punto di coordinate 43.95°N - 9.88°E.

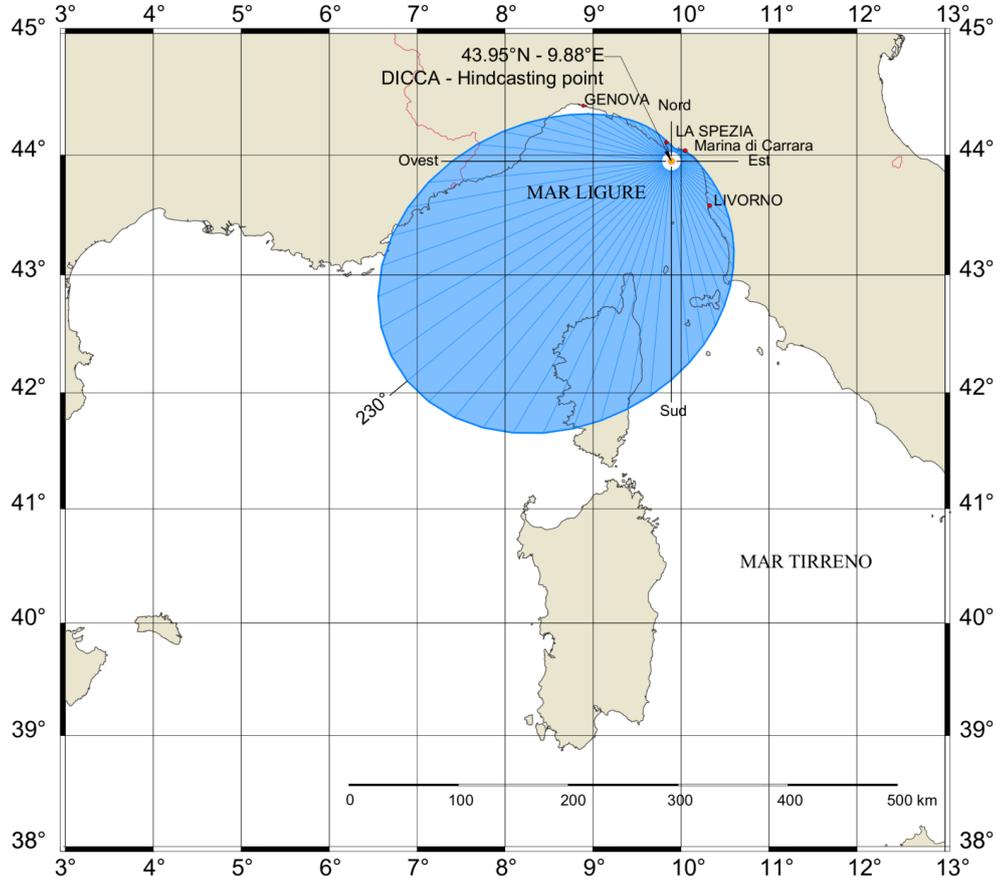


Figura 2-3. Fetch efficace al largo di Marina di Carrara nel punto di coordinate 43.95°N - 9.88°E.

All'interno del settore compreso tra 215° e 250°N e nel limitato settore compreso tra 173° e 180°N il fetch risulta non limitato geograficamente e la sua estensione è stata limitata a 500 km, considerando la massima estensione che hanno le perturbazioni cicloniche che usualmente si generano nel bacino del Mar Mediterraneo.

I *fetch efficaci* al largo definiscono la porzione di mare sulla quale si esplica “effettivamente” l’azione del vento responsabile della generazione del moto ondoso. I fetch efficaci, riportati graficamente nel diagramma polare di Figura 2-3 in Tabella 2-1, presentano un'estensione massima tra 210°N e 250°N, con un'estensione media di 300 km ed un massimo di circa 315 km in direzione SudOvest (230°N).

Per approfondimenti sulla metodologia di calcolo si rimanda al Volume 1 dello Studio Meteomarino.

Tabella 2-1. Fetch geografici, efficaci e deviazione direzione vento/mare al largo di Marina di Carrara nel punto di coordinate 43.95°N - 9.88°E.

Azimuth	Fetch geografico	Fetch efficace	Deviazione vento/mare	Azimuth	Fetch geografico	Fetch efficace	Deviazione vento/mare
[°Nord]	[km]	[km]	[gradi]	[°Nord]	[km]	[km]	[gradi]
0	14.4	14.3	-49.0	180	500.0	200.9	21.0
10	12.9	12.7	-50.0	190	164.5	231.5	18.0
20	12.0	12.3	-50.0	200	109.1	261.5	14.0
30	11.3	12.6	17.0	210	170.5	288.2	10.0
40	14.6	13.3	22.0	220	500.0	307.3	5.0
50	15.5	14.4	25.0	230	500.0	314.0	0.0
60	17.0	15.9	30.0	240	500.0	305.2	-5.0
70	18.7	17.8	47.0	250	500.0	280.7	-11.0
80	21.5	20.2	49.0	260	224.7	243.7	-16.0
90	24.2	23.4	47.0	270	139.8	200.0	-21.0
100	27.4	28.0	44.0	280	129.8	156.4	-26.0
110	31.1	35.2	41.0	290	119.3	118.0	-31.0
120	35.8	46.9	38.0	300	106.0	87.2	-35.0
130	41.9	64.2	35.0	310	67.5	63.6	-39.0
140	51.6	86.7	32.0	320	27.6	46.1	-43.0
150	105.3	113.1	29.0	330	14.5	33.1	-46.0
160	127.4	141.6	27.0	340	9.9	23.9	-48.0
170	127.3	171.0	24.0	350	17.5	17.8	-49.0

Capitolo 3 Regime dei venti

3.1 Dati vento al largo ricostruiti dal NOAA

Il regime dei venti al largo del paraggio è stato definito sulla base dei dati di vento in ricostruzione forniti dall'agenzia federale National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) degli Stati Uniti d'America nell'ambito del progetto CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) che ha ricostruito la circolazione atmosferica per il periodo storico 1979-2009 (31 anni) a scala globale. Tali dati di vento sono stati successivamente integrati nel progetto di ricostruzione del moto ondoso a scala globale con il modello WWIII.

Dal database del NOAA è stata estratta la serie storica trionaria dei dati vento definiti alla quota di +10 m sul l.m.m., per il punto di coordinate 43.833°N - 9.666°E posto circa 40 km al largo della costa e pertanto non condizionato dall'orografia.

Il regime dei venti al largo del paraggio, rappresentato nel diagramma polare di Figura 3-1 mostra un'alternanza di stati di vento provenienti da NordEst, che presentano una frequenza di apparizione più elevata, a stati di vento provenienti da SudOvest, che presentano un maggiore percentuale di stati di vento di velocità $U_w > 10$ m/s.

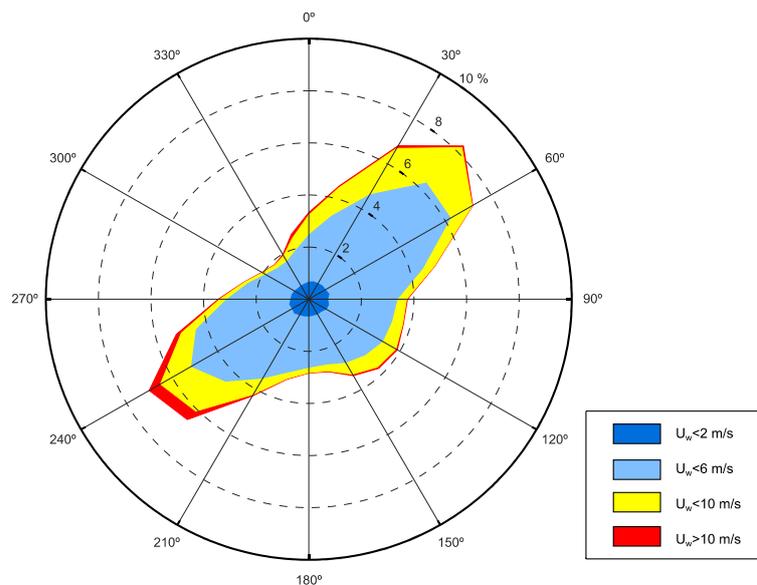


Figura 3-1. Distribuzione direzionale dei venti ricostruiti dal NOAA al largo (periodo di riferimento 1979 - 2009)

In termini di frequenza di accadimento i venti regnanti (più frequenti) provengono dai settori di Grecale (30-60 °N) e da Libeccio (210-240 °N) con una frequenza di accadimento degli stati di vento con velocità superiore a 2.0 m/s rispettivamente pari al 22.3% e al 17.8%.

Le calme (stati di vento con velocità inferiore a 2 m/s) di scarso interesse ai fini della generazione del moto ondoso, si verificano con frequenza pari al 16.9%.

I venti dominanti (più intensi), con velocità del vento superiori a 14 m/s (vento forza 7 superiore a 30 nodi), si verificano in media poche ore anno (22 ore/anno) e provengono prevalentemente dai settori di Libeccio (210-240 °N) e in misura minore da Ponente (255-285°N) e da Tramontana (345-15 °N). Per ulteriori informazioni sui venti al largo si rimanda al Volume 1.

3.2 Regime dei venti sottocosta

Per la valutazione del regime dei venti sottocosta si è fatto riferimento ai dati di vento forniti dall'AdSP rilevati dalla stazione meteo installata presso il porto di Marina di Carrara a partire dal 2006.

La distribuzione direzionale dei dati di vento forniti mostrata in Figura 4.12 evidenzia che nel primo periodo di funzionamento (2006-2010) lo strumento ha rilevato una significativa percentuale di stati di vento provenienti da Sud, che sono del tutto assenti nel successivo periodo di rilevamento (2014-2018).

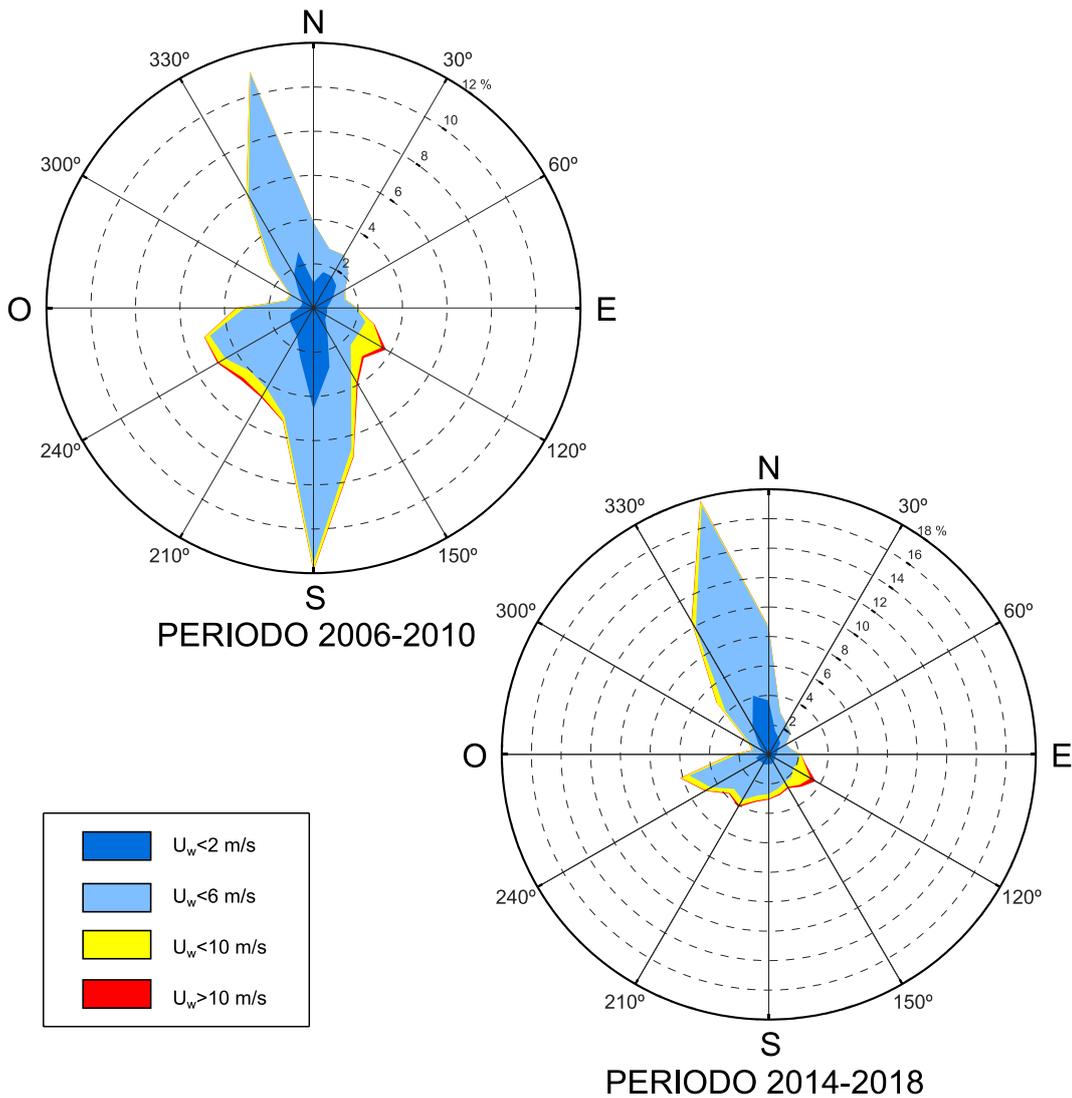


Figura 3-2. Distribuzione direzionale dei venti registrati dalla stazione meteo installata presso il porto di Marina di Carrara per i due distinti periodi di funzionamento individuati. In alto a sinistra periodo 2006-2010, in basso a destra periodo 2014-2018.

Tabella 3-1. Frequenza di accadimento dei venti registrati dalla stazione meteo del porto di Marina di Carrara (periodo 2014-2018)

Direzione di provenienza ° N	Classi di velocità del vento [m/s]													Freq. %	≥2.00
	calm	1.00 2.00	2.00 4.00	4.00 6.00	6.00 8.00	8.00 10.00	10.00 12.00	12.00 14.00	14.00 16.00	16.00 18.00	18.00 20.00	>20.00			
0	0.24	3.41	4.32	0.57	0.06	0.02	0.01							8.6	5.0
15	0.22	1.43	1.21	0.09	0.02									3.0	1.3
30	0.15	1.17	0.97	0.07	0.01	0.00								2.4	1.1
45	0.12	0.96	0.93	0.07	0.00	0.00								2.1	1.0
60	0.10	0.58	0.62	0.04	0.00									1.3	0.7
75	0.09	0.52	0.72	0.16	0.02	0.00		0.00						1.5	0.9
90	0.10	0.41	1.14	0.44	0.08	0.01	0.01							2.2	1.7
105	0.11	0.36	0.93	0.63	0.28	0.18	0.07	0.01	0.00	0.00				2.6	2.1
120	0.13	0.35	0.71	0.72	0.81	0.52	0.26	0.08	0.03	0.01	0.005	0.010		3.6	3.2
135	0.14	0.39	0.84	0.79	0.53	0.23	0.10	0.03	0.03	0.00	0.005	0.007		3.1	2.6
150	0.13	0.47	0.90	0.67	0.28	0.10	0.06	0.02	0.00	0.00		0.002		2.6	2.0
165	0.16	0.52	1.14	0.59	0.26	0.13	0.06	0.01	0.00	0.00				2.9	2.2
180	0.15	0.52	1.41	0.63	0.21	0.11	0.05	0.00	0.00		0.002			3.1	2.4
195	0.16	0.56	1.63	0.54	0.23	0.14	0.07	0.01	0.00					3.3	2.6
210	0.15	0.61	2.18	0.63	0.29	0.13	0.07	0.05	0.01			0.005		4.1	3.4
225	0.12	0.59	2.03	0.58	0.28	0.13	0.04	0.02			0.002			3.8	3.1
240	0.12	0.71	2.70	0.96	0.29	0.13	0.03	0.01	0.00	0.00	0.002			5.0	4.1
255	0.14	0.75	2.78	1.88	0.49	0.11	0.02	0.01	0.01	0.00				6.2	5.3
270	0.14	0.43	0.92	0.65	0.25	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00				2.5	1.9
285	0.09	0.31	0.50	0.17	0.05	0.01	0.03	0.00						1.2	0.8
300	0.11	0.40	0.65	0.27	0.13	0.03	0.02	0.00						1.6	1.1
315	0.13	0.82	1.93	1.23	0.65	0.18	0.04	0.01	0.00		0.002			5.0	4.1
330	0.17	2.03	5.65	2.00	0.45	0.10	0.03	0.01		0.00				10.4	8.2
345	0.25	3.88	10.72	2.67	0.26	0.04	0.02	0.01	0.01					17.9	13.7
Freq. %	3.4	22.17	47.52	17.06	5.93	2.38	1.02	0.32	0.12	0.04	0.020	0.025		100.0	74.4
Freq. Cumulate		25.6	73.1	90.1	96.1	98.5	99.5	99.8	99.9	99.96	99.98	100.00			

Prendendo a riferimento l'ultimo periodo di misure, di cui in Tabella 3-1 è riportata la frequenza percentuale di accadimento per classi di velocità e direzione di provenienza del vento i venti regnanti (più frequenti) risultano provenire dal settore di Tramontana e dai settori di Maestrale (300-330 °N) e da Libeccio (210-240 °N) con una frequenza di accadimento degli stati di vento con velocità superiore a 2.0 m/s rispettivamente pari al 20%, 13.4% e al 10.6%.

Le calme (stati di vento con velocità inferiore a 2 m/s) di scarso interesse ai fini della generazione del moto ondoso, si verificano con frequenza pari al 25.6%.

I venti dominanti (più intensi), con velocità del vento superiori a 14 m/s (vento forza 7 superiore a 30 nodi), si verificano in media poche ore anno (18 ore/anno) e provengono prevalentemente dai settori di Scirocco (120-150 °N) e in misura minore da Mezzogiorno (120-150 °N) e da Libeccio (165-195 °N).

Il regime dei venti osservato dalla stazione anemometrica di Marina di Carrara è certamente condizionato dalla conformazione orografica delle Alpi Apuane e della valle del Magra e dal regime di brezze di terra/brezze di mare. Ciò è ben rappresentato dalla distribuzione direzionale degli stati di vento ottenuta a prefissati orari: 0:00, 6:00, 12:00 e 18:00 (UTC) rappresentata nei grafici di Figura 3-3.

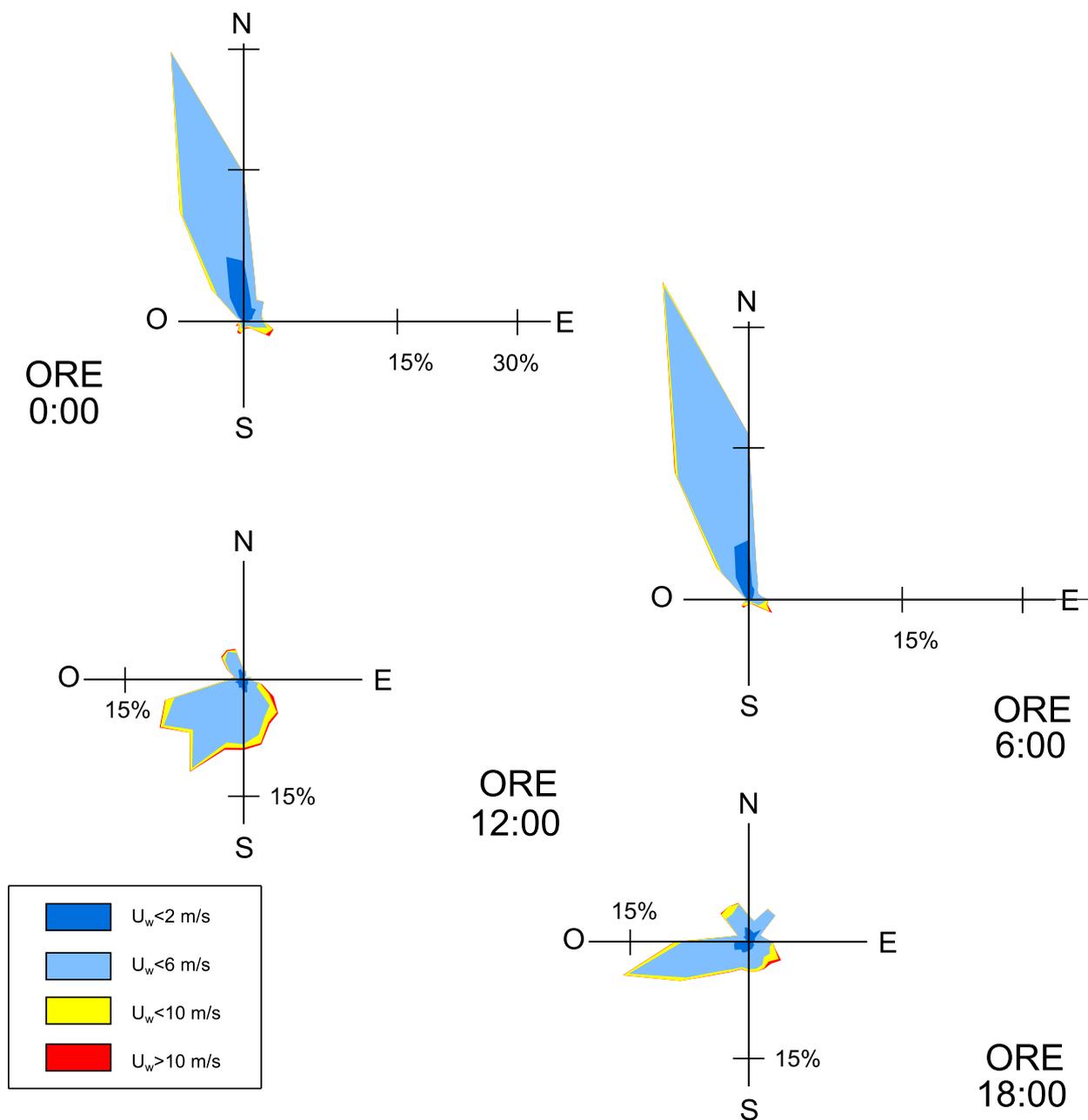


Figura 3-3. Distribuzione direzionale dei venti registrati dalla stazione meteo del porto di Marina di Carrara su base oraria 0:00, 6:00, 12:00, 18:00 (UTC) (periodo di riferimento 2014-2018).

Capitolo 4 Clima di moto ondoso al largo

Il clima di moto ondoso al largo di Marina di Carrara è stato definito sulla base dei dati di moto ondoso ricostruiti dal DICCA con il modello WWIII nel punto di coordinate 43.95°N, 9.88°E per il periodo 1979-2018, opportunamente calibrati sulla base dei dati misurati dalla stazione ondometrica RON di La Spezia.

La serie storica calibrata contiene 350635 eventi, e fornisce, con cadenza oraria, i parametri spettrali di moto ondoso (H_s , T_p , Dir).

La Tabella 4-1 riporta la frequenza di apparizione degli eventi di moto ondoso suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione. Gli stati di moto ondoso più significativi ($H_s > 0.5$ m) si presentano da Libeccio (32.8%) e da Mezzogiorno (7.8%), con una frequenza di accadimento complessiva pari al 40.6%. Da questo settore si presentano inoltre gli eventi con altezza d'onda più elevata. Meno frequenti risultano gli stati di mare da Scirocco (5.7%) e da Ponente (4.5%), con valori di H_s generalmente inferiori a 3.0 m.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda al Volume 1 dello Studio Meteomarino.

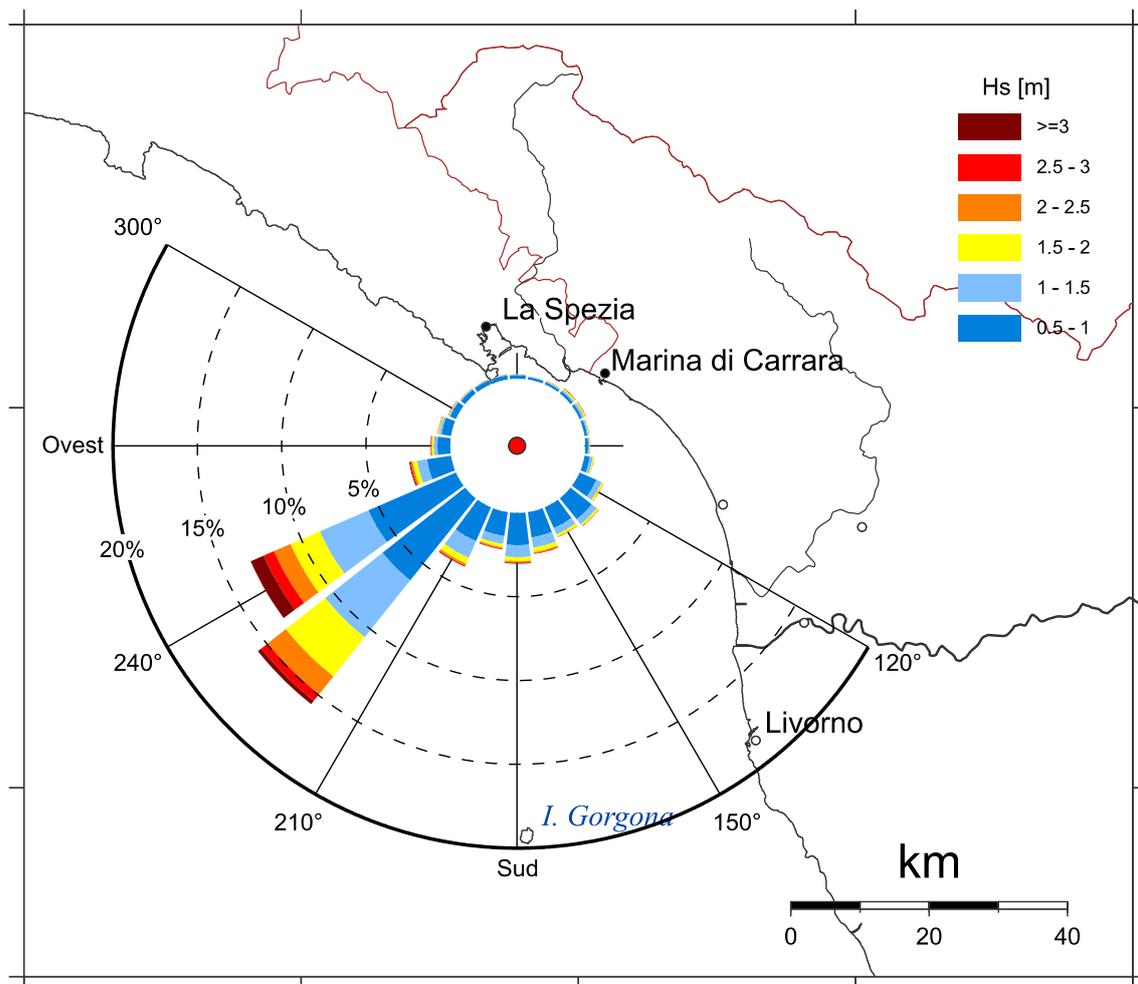


Figura 4-1. Clima di moto ondoso al largo di Marina di Carrara nel punto di coordinate 43.95°N, 9.88°E. Periodo di riferimento 1979-2018.

Tabella 4-1. Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso, al largo di Marina di Carrara ricostruiti dal DICCA e calibrati, suddivisi per classi di altezza significativa e direzione. Periodo di riferimento 1979-2018.

Dir ° Nord	Altezza d'onda significativa [m]												Tot	Hs>0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	>6		
0	0.07	0.2	0.2	0.06	0.01	0.003							0.52	0.28
15	0.04	0.1	0.1	0.05	0.01	0.003	0.001						0.37	0.22
30	0.03	0.08	0.1	0.07	0.03	0.009	0.003	0.001	0.000				0.37	0.26
45	0.04	0.06	0.2	0.1	0.07	0.03	0.01	0.002	0.002				0.50	0.40
60	0.04	0.08	0.2	0.1	0.08	0.03	0.009	0.004	0.001				0.53	0.41
75	0.07	0.08	0.2	0.08	0.04	0.02	0.004	0.001					0.46	0.30
90	0.1	0.1	0.2	0.09	0.03	0.01	0.000						0.55	0.31
105	0.1	0.3	0.3	0.2	0.07	0.01	0.003						1.01	0.59
120	0.2	0.6	1.1	0.3	0.1	0.02	0.004						2.43	1.56
135	0.9	1.9	1.6	0.4	0.1	0.03	0.009	0.001	0.000				4.94	2.14
150	1.1	1.7	1.3	0.4	0.1	0.04	0.006	0.001					4.71	1.96
165	0.9	1.4	1.5	0.6	0.3	0.08	0.03	0.003		0.001			4.91	2.53
180	1.6	1.9	1.9	0.7	0.2	0.08	0.04	0.01	0.006	0.002			6.58	3.03
195	1.5	1.6	1.4	0.5	0.2	0.08	0.04	0.010	0.006	0.005	0.000		5.31	2.25
210	1.6	1.7	2.2	1.1	0.4	0.1	0.04	0.01	0.010	0.005			7.15	3.86
225	2.9	3.9	6.3	4.3	3.0	1.4	0.5	0.2	0.05	0.03	0.004		22.48	15.69
240	4.0	4.5	5.7	3.1	1.9	1.1	0.7	0.4	0.2	0.2	0.02	0.005	21.75	13.27
255	1.3	1.5	1.4	0.6	0.3	0.1	0.06	0.03	0.01	0.005	0.002		5.38	2.51
270	0.9	1.1	0.8	0.2	0.1	0.06	0.02	0.007	0.001				3.24	1.18
285	0.9	1.1	0.6	0.1	0.06	0.03	0.01	0.003	0.001				2.78	0.80
300	0.4	0.7	0.4	0.09	0.04	0.01	0.008	0.004					1.63	0.52
315	0.2	0.4	0.3	0.08	0.02	0.008	0.001						1.01	0.40
330	0.07	0.3	0.3	0.06	0.01	0.004	0.001						0.75	0.36
345	0.08	0.2	0.3	0.06	0.009	0.003	0.000						0.64	0.32
Tot	19.25	25.61	28.53	13.49	7.21	3.20	1.48	0.66	0.33	0.21	0.03	0.005	100	55.14
Tot. Cumulate		44.86	73.39	86.88	94.09	97.28	98.77	99.43	99.76	99.97	100.00	100.00		

Capitolo 5 Eventi estremi al largo

L'analisi degli eventi estremi di moto ondoso, estratti dalla serie storica in ricostruzione di durata pari a 40 anni ('79-'18) fornita dal DICCA e opportunamente calibrata sulla base del confronto con i dati osservati dalla boa RON di La Spezia, ha permesso di definire il valore dell'altezza d'onda significativa associata a diversi tempi di ritorno e per i diversi settori di provenienza.

L'analisi è stata effettuata sia con il metodo dei massimi annuali e sia con il metodo POT (Peak Over Threshold) su eventi ricostruiti con cadenza oraria. Il metodo POT, utilizzando un campione nettamente più ampio, risulta essere di maggiore affidabilità rispetto al metodo dei massimi annuali: le differenze in termini di altezza d'onda significativa tra le varie distribuzioni statistiche a parità di tempi di ritorno sono minime pari al massimo a 10 cm. Per ulteriori approfondimenti sull'analisi statistica dei valori estremi si rimanda al Volume 1.

I valori dell'altezza significativa, determinati con il metodo POT, ed associati al tempo ritorno di 2, 10, 50 e 100 anno, suddivisi per settori di provenienza sono riportati nella seguente Tabella 5-1.

Tabella 5-1. Valori estremi di moto ondoso al largo di La Spezia e Marina di Carrara in funzione del tempo di ritorno.

Tempo di ritorno	Settore 150 - 210 °N		Settore 210 - 270 °N		Settore 270 - 330 °N	
	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
[anni]	[m]	[s]	[m]	[m]	[m]	[m]
2	3.6	9.6	5.4	11.6	2.9	10.0
10	4.6	10.4	6.4	12.0	3.6	10.7
50	5.6	11.0	7.3	12.3	4.3	11.3
100	5.9	11.2	7.7	12.5	4.6	11.5

Capitolo 6

Propagazione del moto ondoso dal largo verso costa

6.1 Metodologia seguita

Una volta definite le condizioni di clima ondoso in un punto al largo del litorale e rappresentativo del paraggio di interesse, è stato predisposto un modello numerico per la propagazione ondosa da largo verso costa al fine di identificare le condizioni di moto ondoso nel tratto di litorale in prossimità del porto di Marina di Carrara.

Per la propagazione delle onde dal largo fino alla diga foranea ed alla linea di costa è stato utilizzato il modello matematico SWAN (Simulating WAVes Nearshore) già disponibile nel modulo WAVE della suite di calcolo di Delft3D, in grado di simulare i fenomeni di rifrazione e shoaling, generazione dell'onda da vento, dissipazione dovuta al white-capping, attrito sul fondo, frangimento indotto dai bassi fondali e interazione non lineare tra le onde.

Nella definizione delle forzanti del modello è stato fatto riferimento al clima ondoso calcolato nel punto di coordinate 43.95°N - 9.88°E per il periodo 1979-2018 al largo (vedi Figura 4-1 per la rosa delle onde e Tabella 4-1 per la tabella delle frequenze). Per la definizione delle condizioni di vento (intensità e direzione del vento) è stata eseguita un'analisi statistica al fine di stabilire una correlazione tra il vento e l'onda sia in riferimento alla direzione di propagazione che all'intensità (vedi Studio Meteomarin Volume 1).

Le attività svolte per valutare le condizioni ondose in prossimità della linea di costa sono state:

- Set-up del modello di calcolo, con la definizione delle schematizzazioni del tratto di litorale oggetto di studio e dei parametri fisico-numeriche per la discretizzazione dello spettro e dei fenomeni di dissipazione energetica.
- la definizione delle forzanti al contorno (livelli, correnti, onde al largo, vento)
- esecuzione delle simulazioni ed estrazione delle distribuzioni di moto ondoso nei punti di interesse sotto costa;
- ricalcolo del clima ondoso nei punti sopra definiti, considerando il peso statistico di ogni singolo evento (o stato di mare) simulato.

Nei seguenti paragrafi sono riportati la descrizione del codice di calcolo SWAN e del set-up del modello per il paraggio di interesse. I risultati delle analisi della propagazione del moto ondoso sono presentati nel successivo Capitolo 7.

6.1 Ricostruzione del clima di moto ondoso

Per la ricostruzione delle condizioni di moto ondoso sottocosta si è fatto riferimento al clima annuale di moto ondoso al largo, definito sulla base dei dati di moto ondoso in re-analisi al largo di Marina di Carrara.

Nel Volume 1 dello Studio Meteomarino è riportata l'analisi della serie quarantennale di dati di vento e moto ondoso, costituita complessivamente da 350635 stati di mare con cadenza oraria, che ha portato alla definizione di un insieme di 207 stati di mare rappresentativi del clima di moto ondoso largo. Ad ogni evento, rappresentativo di una classe di altezza d'onda significativa H_s , di periodo di picco T_p e direzione di provenienza, è associata una frequenza di accadimento (N° di apparizioni su 350635). Ad ogni stato di mare è stata associata inoltre una direzione ed una intensità del vento al fine di tenere in conto nelle simulazioni di propagazione del moto ondoso da largo verso costa anche del contributo del vento. Si rimanda al Volume 1 per ulteriori approfondimenti sul clima di moto ondoso al largo.

Tra questi eventi, solo gli stati di mare determinati da onde che si propagano verso la costa sono stati presi in considerazione per le simulazioni, mentre quelli che si propagano verso il largo non sono stati considerati in quanto non rilevanti per lo studio in esame.

Complessivamente sono stati individuati 105 stati di mare rappresentativi del paraggio, ovvero quelli caratterizzati da un settore di provenienza compreso tra 135°N e 330°N e da un'altezza d'onda significativa $H_s > 0.375$ m. Gli stati di mare con onde provenienti dai settori 330°N 135°N non sono stati invece considerati in quanto non influenti per la definizione del moto ondoso sotto costa e pertanto identificati come stati di calma.

6.2 Il modello numerico per la propagazione del moto ondoso

Il modello numerico utilizzato per la propagazione del moto ondoso in ambito costiero è il modulo 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 ad acque poco profonde.

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

- Effetto 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
- Set-up da moto ondoso (Wave set-up)
- Fenomeni di trasmissione e riflessione dovuti alla presenza di ostacoli (ad esempio barriere frangiflutti)
- Interferenza e sovrapposizione di moto ondoso (interazioni non lineari onda-onda)

Il modello può utilizzare come base di calcolo sia una griglia di calcolo strutturata a maglia quadrangolare non uniforme o una griglia non strutturata a maglie triangolari. La risoluzione spaziale della maglia di calcolo può essere variabile in funzione del grado di dettaglio richiesto, al fine di consentire un'adeguata schematizzazione dei fondali del sito di interesse e la riproduzione dei fenomeni di trasformazione dell'onda.

6.3 Set-up del modello per la propagazione del moto ondoso

Il set-up del modello per la propagazione del moto ondoso è consistito nella definizione dei seguenti dati di input :

- il dominio spaziale di calcolo necessario per la schematizzazione del tratto di litorale e delle batimetrie
- la definizione dei parametri fisici e numerici per i fenomeni di dissipazione, discretizzazione del dominio delle frequenze, generazione di onde da vento
- la definizione delle forzanti al contorno in termini di onde e vento.

Per l'applicazione del modello di propagazione ondosa è stata utilizzata una griglia di calcolo ad ampia scala che si estende lungo il tratto di litorale compreso tra Rio Maggiore, nelle Cinque Terre, e Viareggio; verso il largo fino ad una distanza di circa 12 km fino ad includere il punto DICCA di ricostruzione del moto ondoso al largo. La mesh di calcolo è caratterizzata da maglie rettangolari non uniformi con risoluzione spaziale variabile tra 200 m in mare aperto fino ad 80 m in prossimità della costa per un totale di circa 37000 celle.

Per la definizione delle batimetrie del modello sono stati utilizzati i dati ottenuti da diversi fonti tra cui:

- la Carta Nautica CN-03
- la Carta Nautica CN-04
- la Carta Nautica 115 "Litorale di La Spezia" in scala 1:30000
- la Carta Nautica CN-60
- i rilievi batimetrici effettuati nel 2019 dall'Autorità di Sistema Portuale Mar Ligure Orientale all'interno del Golfo di La Spezia
- la linea di costa (Shape file) fornita dal Portale Cartografico Regione Liguria
- la linea di costa (Shape file) fornita dal Portale Cartografico Regione Toscana

La schematizzazione della griglia di calcolo nel paraggio di interesse è riportata in

Figura 6-1 mentre in Figura 6-2 è riportata la schematizzazione batimetrica dei fondali.

Le condizioni al contorno sono state definite applicando uno spettro secondo la formulazione di JONSWAP caratterizzato da un'altezza d'onda significativa H_s , un periodo di picco T_p ed una direzione di propagazione.

Nelle simulazioni sono stati considerati anche gli effetti dissipativi legati al frangimento, all'attrito dei fondali, la trasformazione dello spettro ondoso ed i fenomeni di generazione di moto ondoso dovuti alla presenza del vento. In via cautelativa ed in favore della sicurezza in tutte le simulazioni eseguite è stato applicato un vento costante ed uniforme su tutto il dominio di calcolo.

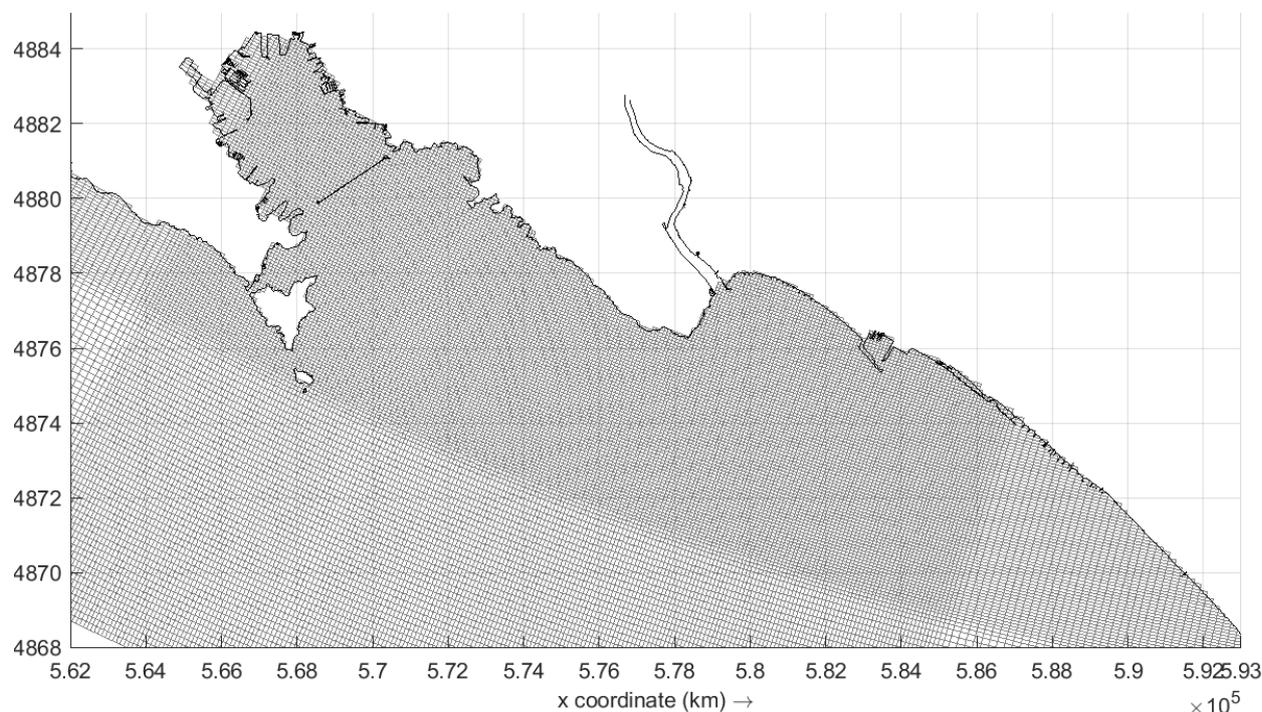


Figura 6-1. Griglia di calcolo del modello per la propagazione del moto ondoso.

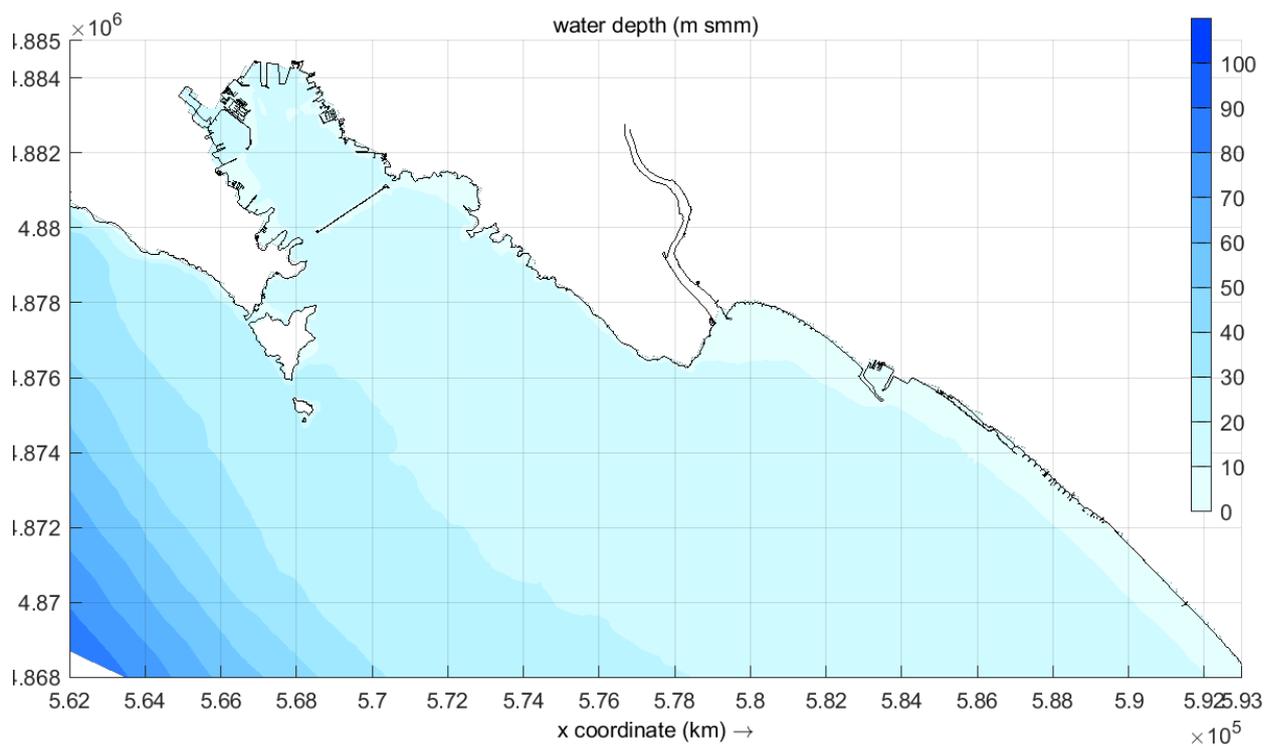


Figura 6-2. Schematizzazione batimetrica [m smm] del modello per la propagazione del moto ondoso nel paraggio di interesse

Capitolo 7

Clima di moto ondoso sottocosta

7.1 Individuazione dei punti sottocosta

I risultati delle simulazioni condotte con il modello numerico SWAN sono stati estratti in corrispondenza di 3 punti prossimi alla costa ritenuti significativi per la comprensione del clima di moto ondoso sottocosta.

In riferimento al litorale adiacente il porto di Marina di Carrara sono stati identificati i seguenti punti:

- il punto MC1 (lat 44.0328750 °N – lon 4.0098593 °E) ad una profondità di circa 11.5 m e posizionato tra la foce del Magra e il porto di Marina di Carrara
- il punto MC2 (lat 44.0148048 °N – lon 4.0449217 °E) ad una profondità di circa 14m posizionato a circa 1300 m in direzione SSE dall'entrata del porto
- il punto MC3 (lat 44.0019644 °N – lon 4.0703536 °E) ad una profondità di circa 14 m e posto più a sud rispetto alle strutture portuali di Marina di Carrara

In Figura 7-1 sono riportate le posizioni dei punti di controllo sottocosta per l'estrazione del clima ondoso e la posizione della boa ondometrica sita di fronte al canale d'accesso del Porto di Carrara.

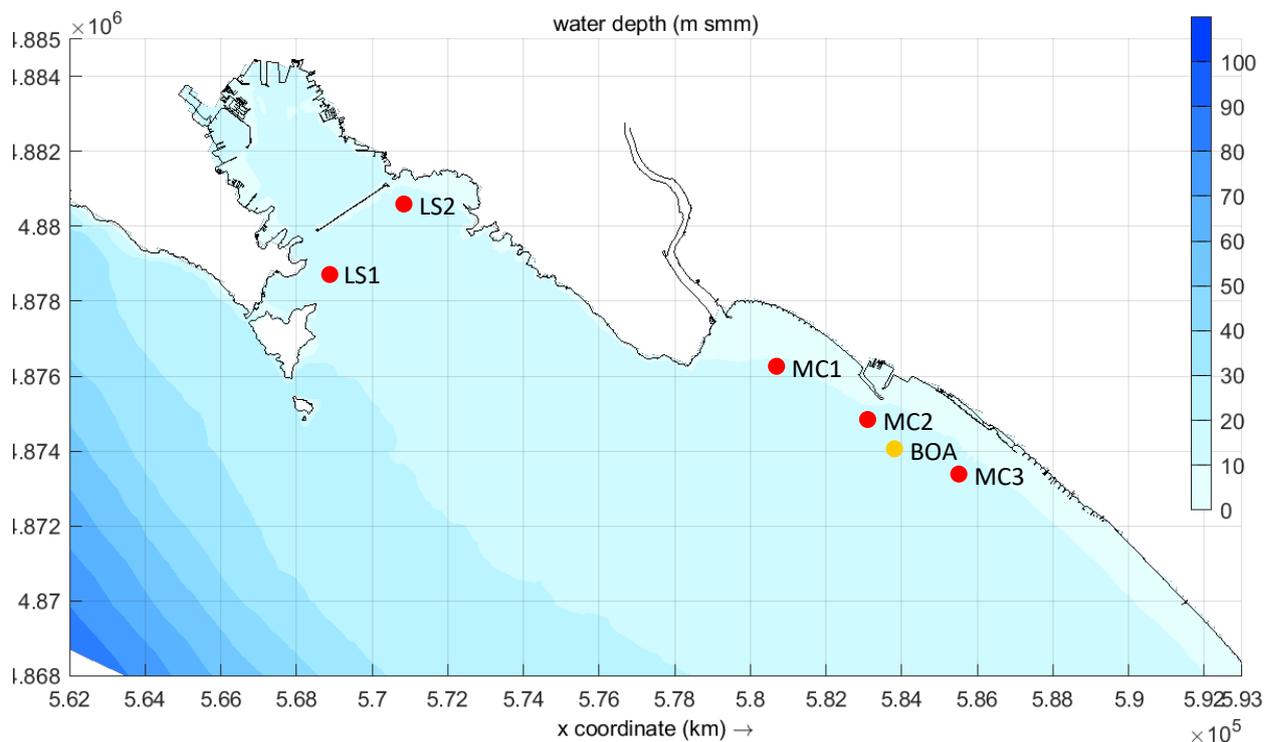


Figura 7-1. Ubicazione dei punti sottocosta MC1, MC2 ed MC3 e della boa ondometrica posti in prossimità del Porto di Carrara.

È importante ricordare che nella metodologia applicata non si è tenuto conto degli effetti sul moto ondoso dovuti alla diffrazione, che si verifica in corrispondenza di strutture marittime e elementi morfologici come capi, isole etc. Inoltre in tutte le simulazioni è stato considerato un campo di vento uniforme su tutto il dominio di calcolo.

Ne consegue che, sotto queste ipotesi, il clima costiero risultante dalle elaborazioni potrebbe risultare sovrastimato rispetto alle condizioni reali.

I risultati delle simulazione e la ricostruzione del clima ondoso sono riportati nei paragrafi seguenti. I risultati includono le tabelle climatiche con la frequenza di accadimento delle classi di altezza d'onda per direzione di provenienza ed il rispettivo grafico polare con la distribuzione delle onde.

7.2 Propagazione nel punto sottocosta MC1

7.2.1 Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda e direzione

I dati riportati in Tabella 7-1 forniscono la frequenza di accadimento delle classi di altezza d'onda per direzione di provenienza ottenuta nel punto sottocosta MC1.

Il regime di moto ondoso sottocosta presenta stati di calma, contraddistinti da altezze significative inferiori a 0.5 m, nell'ordine del 33% degli eventi totali (circa 120 giorni per anno).

Il regime di moto ondoso è contraddistinto da un prevalenza di stati di moto ondoso compresi tra 0.5 m e 1.0 m che rappresentano circa il 43% del totale degli stati di mare propagati.

Dal punto di vista direzionale si può osservare una prevalenza di stati di mare provenienti dal settore di Sud-Ovest. Gli stati di moto ondoso più frequenti si presentano da libeccio [210 - 240°N], con una frequenza di accadimento complessiva del 44% circa. I rimanenti stati di mare provengono dal settore di mezzogiorno e Scirocco [150-195 °N] con una frequenza pari al 22 %.

Gli stati di mare più intensi, con altezze d'onda superiori a 3.0 m, si presentano occasionalmente da Libeccio, circa 4 giorni/anno, raramente da Mezzogiorno e Scirocco (circa 6 ora /anno).

Tabella 7-1. Punto sottocosta MC1. Tabella climatica annuale.

Dir ° Nord	Altezza d'onda significativa [m]												Tot	Hs>0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	>6		
0													0.00	0.00
15													0.00	0.00
30													0.00	0.00
45													0.00	0.00
60													0.00	0.00
75													0.00	0.00
90													0.00	0.00
105													0.00	0.00
120													0.00	0.00
135		1.87	1.61										3.48	1.61
150			6.40	0.53	0.22	0.01							7.16	7.16
165			3.85	0.62	0.26	0.08	0.03	0.003		0.000			4.84	4.84
180			3.00	1.19	0.25	0.08	0.04	0.01	0.01	0.002			4.58	4.58
195			3.94	1.08	0.58	0.19	0.08	0.02	0.02	0.01	0.0003		5.92	5.92
210			10.10	4.34	2.99	1.36	0.51	0.16	0.05	0.03	0.004		19.54	19.54
225			10.12	3.14	1.90	1.17	0.76	0.43	0.23	0.20	0.004		17.94	17.94
240		1.14	4.01	0.74	0.33	0.03	0.001						6.24	5.10
255		1.67	0.19	0.004									1.86	0.19
270		1.16											1.16	0.00
285													0.00	0.00
300													0.00	0.00
315													0.00	0.00
330													0.00	0.00
345													0.00	0.00
Tot	0.00	5.84	43.22	11.64	6.52	2.91	1.42	0.63	0.31	0.23	0.009	0.00	72.73	66.89
Stati di mare non rappresentativi del clima sottocosta													27.27	

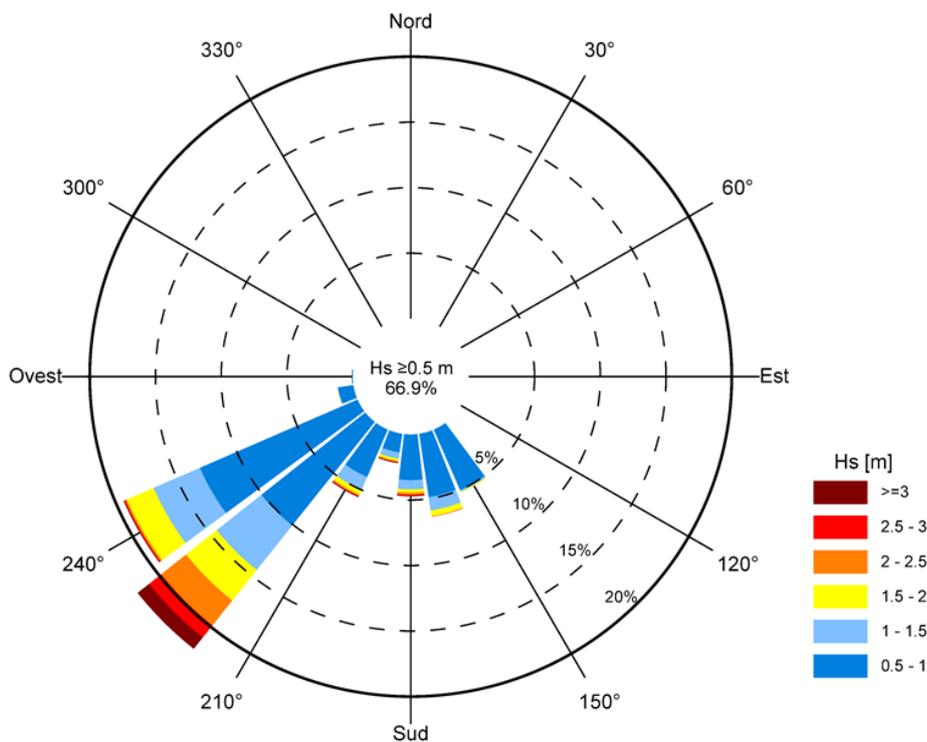


Figura 7-2. S Punto sotto costa MC1 – Rosa del clima ondoso

7.3 Propagazione nel punto sottocosta MC2

Riguardo il clima d'onda nel punto MC2 valgono considerazioni simili a quelle svolte per il punto MC1; entrambi i punti si trovano infatti nello stesso paraggio del litorale di Marina di Carrara ad una distanza dalla linea di costa di circa 1.5 km ed ad una profondità di circa 11-14 m.

Rispetto al caso precedente (punto MC1) si osserva che le onde provenienti dal settore Sud occidentale (venti di Libeccio) si distribuiscono in modo più omogeneo tra i settori 225-240° anche se la frequenza complessiva degli eventi per il settore 210-240 °N permane nell'ordine del 40 %. La distribuzione dell'altezza d'onda per i settori compresi tra 135°N e 210 °N invece presenta una distribuzione molto simile al caso precedente.

Gli stati di mare più intensi, con altezze d'onda superiori a 3.0 m, si presentano occasionalmente da Libeccio, circa 5 giorni/anno, e più raramente da Mezzogiorno e Scirocco (circa 1-2 giorni /anno).

Tabella 7-2. Punto sottocosta MC2. Tabella climatica annuale.

Dir ° Nord	Altezza d'onda significativa [m]												Tot	Hs>0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	>6		
0													0.00	0.00
15													0.00	0.00
30													0.00	0.00
45													0.00	0.00
60													0.00	0.00
75													0.00	0.00
90													0.00	0.00
105													0.00	0.00
120													0.00	0.00
135		1.87	3.69										5.55	3.69
150			4.32	0.53	0.19	0.04	0.00						5.09	5.09
165			3.85	1.33	0.26	0.08	0.03	0.00		0.00			5.56	5.56
180			3.00	0.48	0.25	0.08	0.04	0.01	0.01	0.00			3.87	3.87
195			3.94	1.08	0.19	0.08	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00		5.35	5.35
210					3.37	1.47	0.55	0.18	0.06	0.03	0.00		5.67	5.67
225			10.10	7.48	1.90	1.06	0.68	0.41	0.23	0.17	0.03		22.05	22.05
240			11.56	0.59	0.32	0.13	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00		12.71	12.71
255			3.56	0.31	0.12	0.00							4.00	4.00
270		1.48	0.71	0.01									2.19	0.72
285		0.70											0.70	0.00
300													0.00	0.00
315													0.00	0.00
330													0.00	0.00
345													0.00	0.00
Tot	0.00	4.04	44.73	11.81	6.61	2.95	1.40	0.64	0.32	0.21	0.03	0.000	72.73	68.69
Stati di mare non rappresentativi del clima sottocosta													27.27	

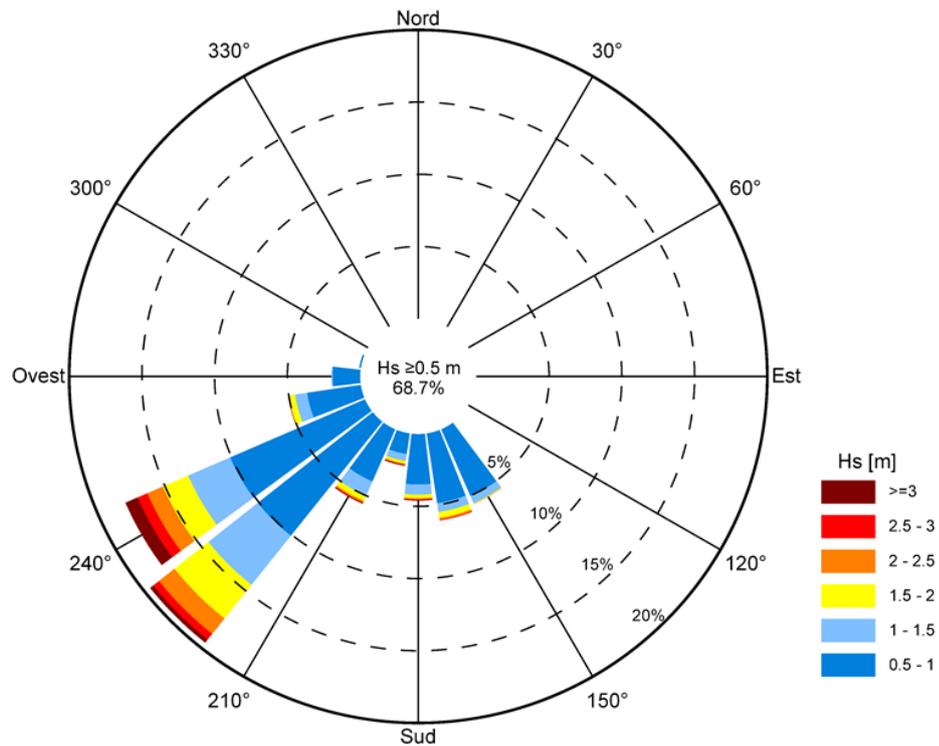


Figura 7-3. S Punto sotto costa MC2 – Rosa del clima ondoso

7.4 Propagazione nel punto sottocosta MC3

Per il punto MC3 valgono considerazioni analoghe a quelle svolte per il punto MC2 in relazione sia alla distribuzione direzionale che delle intensità degli eventi ondosi. Entrambi i punti sono infatti caratterizzati dalla stessa esposizione geografica, giacciono su fondali di circa 14 m e sono distanti l'uno dall'altro circa 2 km.

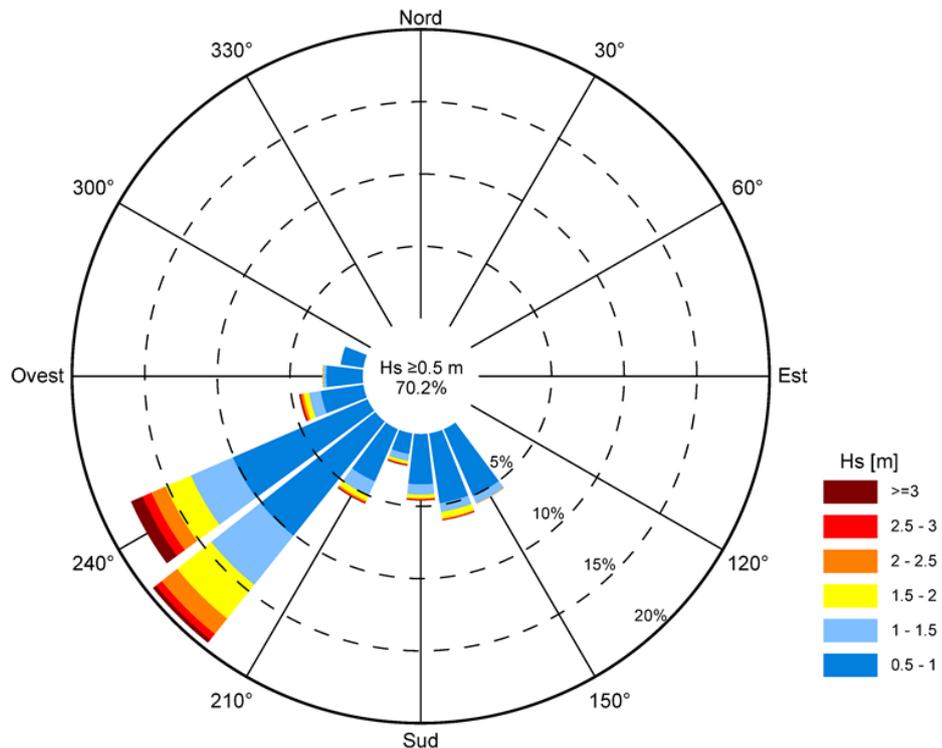


Figura 7-4. Punto sotto costa MC3 – Rosa del clima ondoso

Tabella 7-3. Punto sottocosta MC3. Tabella climatica annuale.

Dir ° Nord	Altezza d'onda significativa [m]													Tot	Hs>0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	>6			
0														0.00	0.00
15														0.00	0.00
30														0.00	0.00
45														0.00	0.00
60														0.00	0.00
75														0.00	0.00
90														0.00	0.00
105														0.00	0.00
120														0.00	0.00
135		1.87	1.99											3.85	1.99
150			6.02	0.56	0.20	0.01	0.00							6.79	6.79
165			3.85	1.33	0.26	0.08	0.03	0.00		0.00				5.56	5.56
180			3.00	0.48	0.25	0.08	0.04	0.01	0.01	0.00				3.87	3.87
195			3.94		0.19	0.08	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00			4.27	4.27
210				1.08	3.37	1.47	0.55	0.18	0.06	0.03	0.00			6.75	6.75
225			10.10	4.34	1.90	1.06	0.68	0.41	0.23	0.17	0.03			18.91	18.91
240			10.12	3.73	0.27	0.11	0.05	0.04		0.00	0.00			14.32	14.32
255			4.87	0.41	0.14	0.07	0.03	0.00						5.52	5.52
270			1.80	0.02										1.82	1.82
285		0.70	0.38											1.08	0.38
300														0.00	0.00
315														0.00	0.00
330														0.00	0.00
345														0.00	0.00
Tot	0.00	2.57	46.06	11.95	6.58	2.96	1.42	0.65	0.31	0.21	0.03	0.000		72.73	70.17
Stati di mare non rappresentativi del clima sottocosta														27.27	

7.5 Clima di moto ondoso alla boa ondometrica di Marina di Carrara

A completamento delle analisi del moto ondoso è stato analizzato anche il clima di moto ondoso in corrispondenza della boa ondometrica direzionale che ha operato nel periodo 2006 - 2011 all'esterno del porto di Marina di Carrara. La boa ha presentato un rendimento molto variabile con numerosi mesi di inoperatività e con un rendimento globale annuo compreso tra il 70 ed il 90%, ed un rendimento medio mensile variabile tra 60 e 95% (vedi Tabella 7-4)

Tabella 7-4. BOA CARRARA – Rendimento mensile ed annuale della a boa ondometrica di Marina di Carrara.

Anno	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
2006									59	100	100	100
2007	100	100	100	100	100	69	47	98	18	0	78	100
2008	100	100	100	100	100	100	91	99	85	98	100	54
2009	0	3	100	100	100	100	100	99	100	82	7	60
2010	100	71	75	52	0	0	46	100	100	100	100	90
2011	0	100	100	100	100							
TOTALE	60	75	95	90	80	67	71	99	72	76	77	81

Il clima di moto ondoso, definito sulla base delle misure effettuate dalla boa con cadenza oraria, è riportato in Tabella 7-5 e nel diagramma polare di Figura 7-5.

Tabella 7-5. BOA CARRARA. Tabella climatica annuale.

Dir ° Nord	Altezza d'onda significativa [m]												Tot	Hs>0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	>6		
0	0.01	0.08	0.05	0.01									0.14	0.05
15	0.46	1.19	1.28	0.9	0.57	0.28	0.1	0.05	0.02	0.01			4.86	3.22
30	0.03												0.03	0
45	0.06												0.06	0
60	0.14												0.14	0
75	0.15	0.01											0.16	0
90	0.23												0.23	0
105	0.29	0.01											0.3	0
120	0.35	0.01											0.36	0
135	0.44	0.01											0.45	0
150	0.6	0.19	0.1	0.01									0.9	0.11
165	0.76	0.82	0.21	0.01									1.8	0.23
180	1.68	1.91	1.08	0.17	0.03								4.88	1.29
195	3.79	4.83	3.33	0.66	0.13	0.03	0.02						12.79	4.17
210	5.16	3.21	1.94	0.55	0.2	0.09	0.02	0.01	0.01				11.19	2.83
225	6.61	10.91	10.41	5.37	2.95	1.53	0.45	0.24	0.18	0.08			38.74	21.22
240	4.25	6.83	4.57	1.1	0.43	0.16	0.09	0.07	0.05	0.02			17.57	6.5
255	1.36	1.63	0.33	0.03									3.35	0.37
270	0.45	0.32	0.01										0.78	0.01
285	0.21												0.21	0
300	0.5	0.06											0.56	0
315	0.27	0.03	0.01										0.3	0.01
330	0.15												0.15	0
345	0.05												0.05	0
Tot	27.99	32.03	23.33	8.81	4.31	2.1	0.68	0.36	0.27	0.11	0.01	0	100	39.98

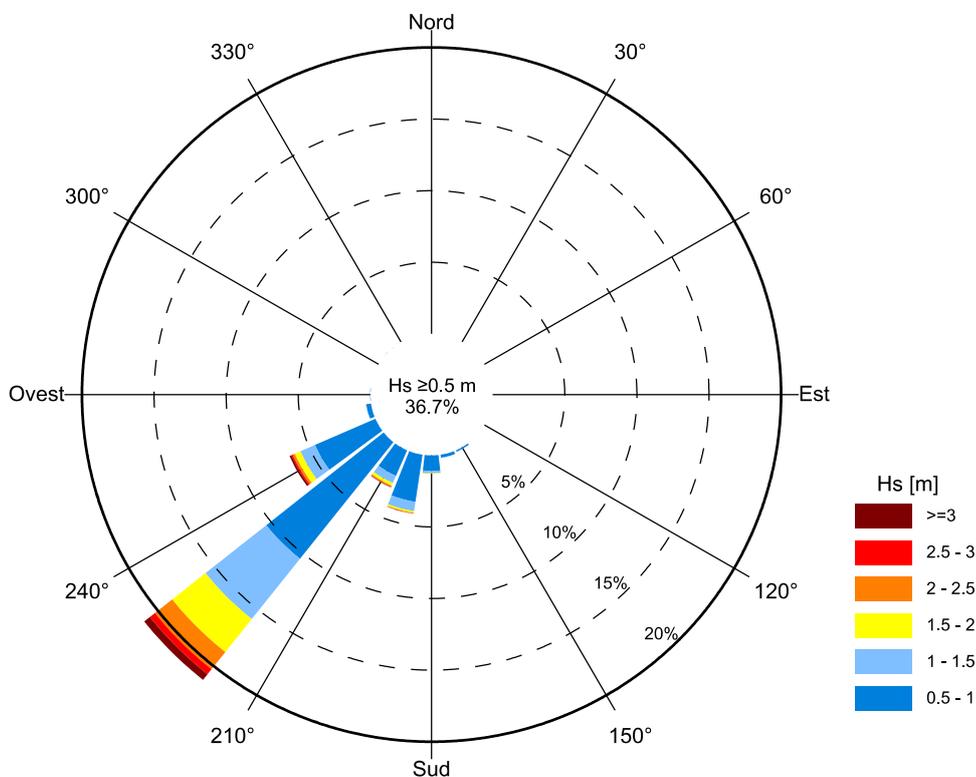


Figura 7-5. BOA DI CARRARA – Rosa del clima ondoso

Dal confronto risultati ottenuti nei tre punti sottocosta MC1, MC2 e MC3, mediante la propagazione del clima d'onda da largo con il modello numerico, e quelli ottenuti analizzando i dati della Boa ondometrica di Marina di Carrara, si osserva che il clima d'onda nella boa è caratterizzato da un'elevata frequenza di stati di calma ($H_s < 0.5$ m) nell'ordine del 63.3% significativamente maggiore rispetto a quella dei punti di propagazione, dove è risultata dell'ordine del 30 %.

Confrontando invece la distribuzione delle onde più elevate si osserva come le differenze tendano a diminuire. Per il punto MC2, il più vicino alla boa di Marina di Carrara, per $H_s > 1.0$ m le frequenza di accadimento è pari al 23% rispetto al 16.7% osservato dalla Boa. Per altezze d'onda superiori ad $H_s = 2$ m, la frequenza di apparizione ottenuta nel punto MC2 è di circa il 5% mentre alla boa è di circa il 3.5%.

Questo fatto è probabilmente imputabile ad una eccessiva amplificazione dei fenomeni di moto ondoso particolarmente evidente per le onde con minore intensità ($H_s < 0.5$ m) che sono state amplificate per effetto della presenza di un campo di vento costante ed uniforme su tutto il dominio di calcolo.

Riguardo alla distribuzione direzionale del clima ondoso, si osserva una buona corrispondenza tra i punti di controllo e la boa. Nei punti modellati si osserva inoltre la presenza anche di onde per i settori di Mezzogiorno\Scirocco, fatto verosimilmente attribuibile alla scelta di includere come forzanti al contorno del modello anche le onde provenienti da questi settori.

Nel confronto tra il clima d'onda nei punti di controllo ed alla boa di Marina di Carrara è importante sottolineare che mentre per la statistica del punto al largo ed il successivo trasferimento verso costa tramite modello numerico, si è fatto riferimento ad una serie storica di 40 anni (hindcasting modello DICCA), la serie ondometrica a disposizione ha una durata di soli 5 anni (da Settembre 2006 a Maggio 2011).

Inoltre, come riportato in Tabella 7-4, la boa ha presentato dei livelli di rendimento molto variabili con lunghi periodi di assenza di inoperatività anche durante i mesi invernali, solitamente quelli caratterizzati da un clima ondoso più intenso.

Ne consegue quindi che data la limitatezza dei dati disponibili alla boa di Marina di Carrara ed alla disomogeneità tra i dataset di riferimento, la statistica delle onde alla boa non può essere considerata completamente rappresentativa del paraggio ed il confronto tra dati simulati e misurati non completamente paragonabile.

Capitolo 8

Variazioni del livello marino (maree e sovralti)

8.1 Premessa e metodologia seguita

Le variazioni del livello del mare in prossimità della costa sono dovute a varie cause inquadrabili nei seguenti fenomeni:

- variazioni dovute alla componente astronomica della marea (assimilabili a deterministiche);
- variazioni dovute alla componente meteorologica della marea (tipo probabilistico) indotte essenzialmente da due fenomeni: (i) effetto barometrico inverso e (ii) azione esercitata dal vento sulle masse d'acqua ("wind set-up"); in presenza di aree cicloniche (perturbazioni atmosferiche), la componente meteorologica della marea dà luogo ad un aumento del livello del mare; tale aumento è comunemente indicato con il termine sovralti di tempesta ("storm surge");
- aumento del livello del mare indotto dal moto ondoso dal moto ondoso frangente ("wave set-up").

8.2 Serie storica dei livelli misurati dal mareografo di Marina di Carrara

La stazione mareografica più vicina al sito in esame è quella situata presso il porto Marina di Carrara installata dall'Autorità Portuale Marina di Carrara (oggi facente parte dell'AdSP Mar Ligure Orientale) all'interno del porto nella parte terminale della banchina del molo sud denominata "banchina Fiorillo" zona servizi.

Il mareografo ha iniziato ad operare a Gennaio 2006. La serie storica acquisita, che si estende fino al 2018, presenta però un periodo di interruzione tra Ottobre 2010 e Luglio 2014. Nei periodi di funzionamento lo strumento ha operato con un rendimento molto elevato. I dati di livello forniti presentano una frequenza di acquisizione variabile tra 15 min e 30 min, da questa serie di dati è stata estratta ed analizzata una serie temporale con cadenza oraria. Sommando i dati registrati nei periodi 2006-2010 e 2014-2018 la serie è costituita da **75138 misure di livello su un totale di 80112 misure potenziali, con un rendimento prossimo al 92%**.

8.3 Marea astronomica ed analisi armonica dei livelli misurati

Nei grafici di Figura 8-1 e Figura 8-2 sono riportate le misure di livello registrate dal Gennaio 2006 all'Ottobre 2010 e da luglio 2014 e Dicembre 2018. I livelli rappresentati sono riferiti allo zero dello strumento (che in generale non è detto che coincida con il livello medio del mare).

Le misure relative ai due periodi di funzionamento del mareografo sono state processate mediante l'algoritmo Matlab T-TIDE (Pawlowicz et al., 2002), comunemente utilizzato a livello mondiale per l'analisi armonica delle misure di livello. I grafici mostrati in Figura 8-3 ed in Figura 8-4 mostrano i risultati dell'analisi condotta sui livelli. Nei grafici sono rappresentate: le misure di livello (in nero), la componente armonica (in rosso) e la componente residua dovuta prevalentemente alla marea meteorologica (in blu).

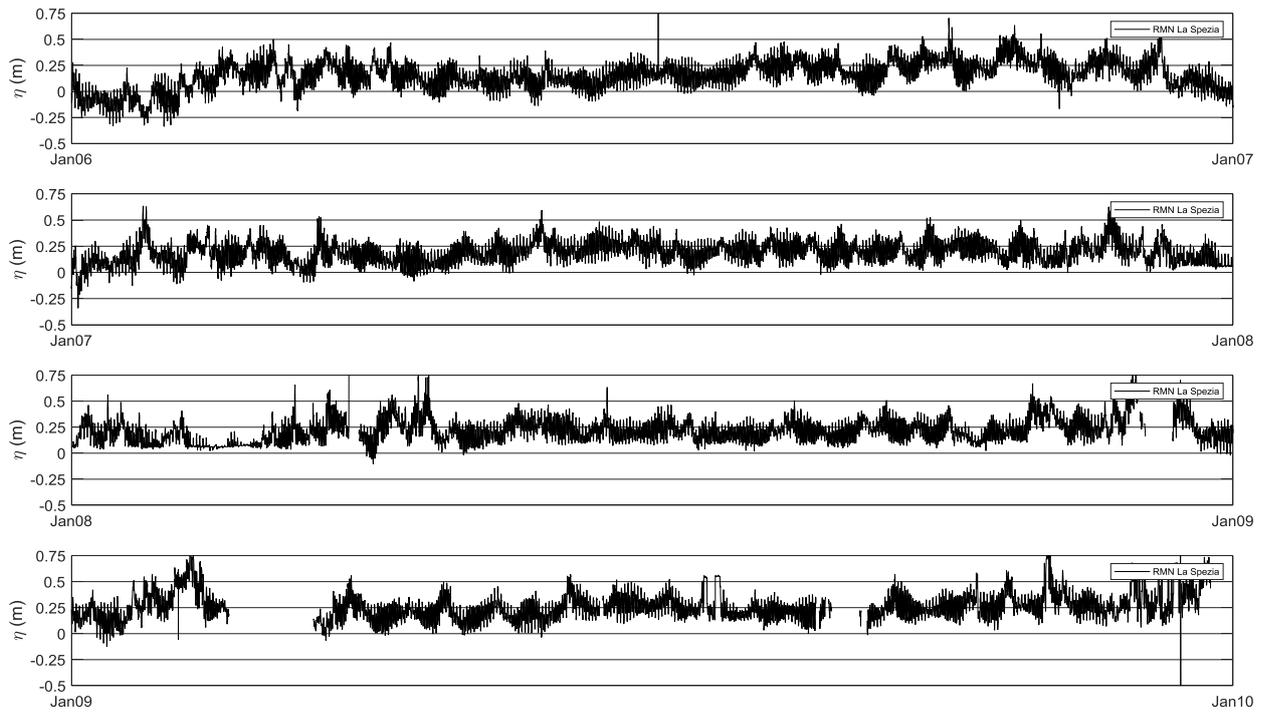


Figura 8-1 – Livelli registrati dalla stazione di Carrara relativi al periodo di misura 2006-2010

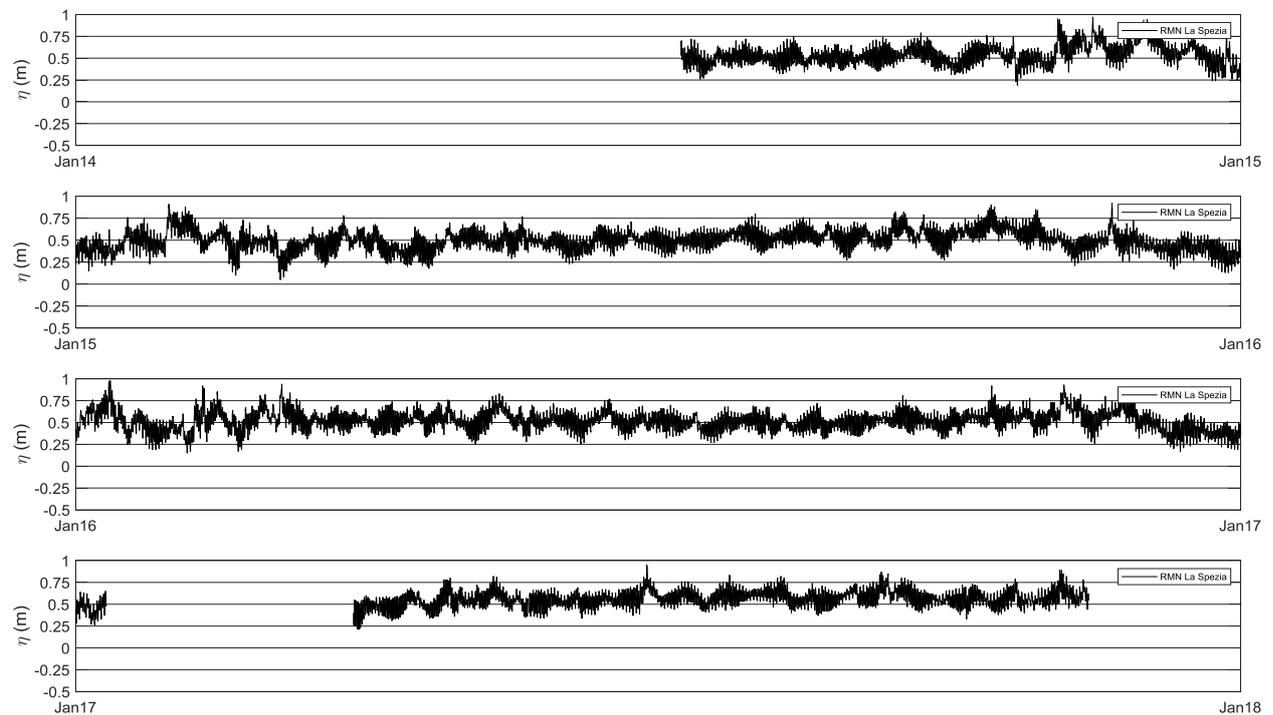


Figura 8-2 – Livelli registrati dalla stazione di Carrara relativi al periodo di misura 2014-2018

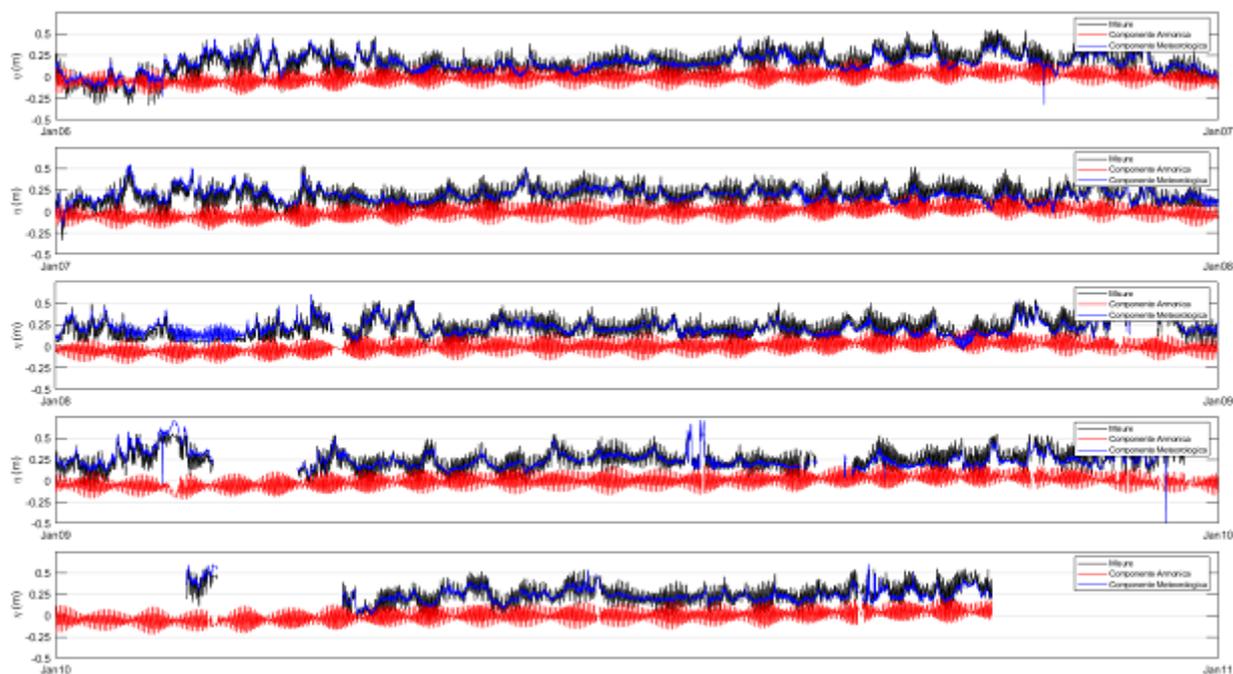


Figura 8-3 – Analisi della serie storica delle misure di livello misurate presso la stazione di Marina di Carrara nel periodo 2006-2010: identificazione delle componenti armonica e meteorologica.

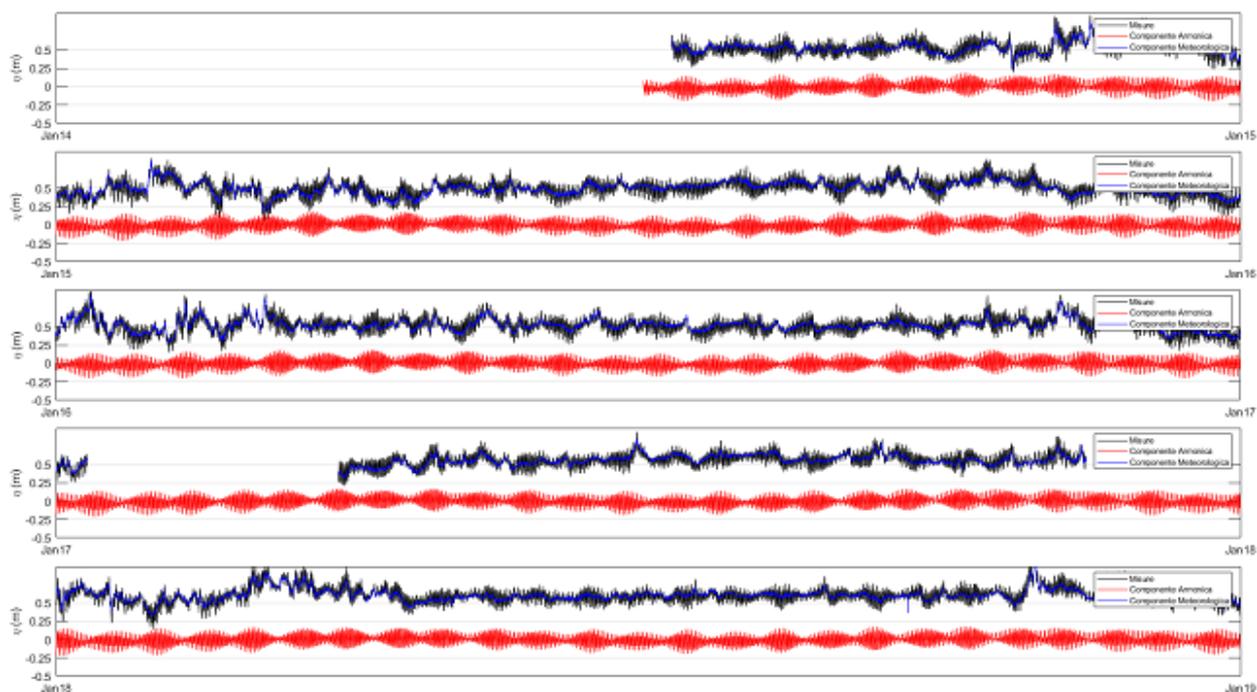


Figura 8-4 – Analisi della serie storica delle misure di livello misurate presso la stazione di Marina di Carrara nel periodo 2014-2018: identificazione delle componenti armonica e meteorologica.

Sulla base risultati ottenuti è possibile riscontrare che la marea astronomica osservata al Porto di Marina di Carrara è di tipo misto semidiurno con due alte e due basse maree, di ampiezza diversa. L'ampiezza di marea risulta molto contenuta con escursioni di livello comprese mediamente tra +/-8 cm. Durante le fasi sigiziali si ha un aumento dell'ampiezza della marea che può raggiungere occasionalmente +/-14 cm.

I valori riportati in Tabella 8-1 presentano i livelli di marea sintetici di riferimento.

Tabella 8-1 – Livelli di marea presso la stazione di Carrara. Ricostruzione livelli di marea su 5 anni sulla base delle costanti armoniche di marea determinate analizzando le misure di livello.

Higest Astronomical Tide	HAT	0.21	m
Mean High Water Spring	MHWS	0.14	m
Mean Higher High Water	MHHW	0.09	m
Mean Sea Level	MSL	0.00	m
Mean Lower Low Water	MLLW	-0.08	m
Mean Low Water Spring	MLWS	-0.14	m
Lowest Astronomical Tide	LAT	-0.21	m

8.4 Marea meteorologica (stima)

8.4.1 Effetto barometrico inverso

Al variare della pressione atmosferica si ha una variazione del livello medio della superficie del mare. In generale ad una diminuzione della pressione atmosferica di 1 mb si verifica un innalzamento del livello medio mare di 1 cm.

Considerata una condizione estrema di minimo barico (legata al passaggio dei centri di bassa pressione) pari a 975 mb ed una condizione estrema di massimo barico (legata al passaggio dei centri di alta pressione caratterizzanti gli anticicloni) pari a 1044 mb, rispetto ad una condizione media di 1013 mb è possibile stimare un effetto di sovrizzo marino massimo pari a +0.38 m ed un abbassamento massimo del livello marino pari a -0.31 m.

8.4.2 Sovralzo di vento

L'effetto di innalzamento dei livelli sottocosta indotto dall'azione di venti foranei spiranti verso terra è definito in funzione dell'estensione della piattaforma continentale; nel caso in esame per i venti estremi di Mezzogiorno e Scirocco si può considerare un'estensione della piattaforma continentale di circa 60 km delimitata all'incirca dall'isobata -100 m s.l.m. (Figura 8-5)

Il calcolo del sovrizzo di vento può essere effettuato con la nota relazione implicita:

$$S = \frac{K_p \cdot L_p \cdot U^2}{g(D - d - S)} \ln\left(\frac{D}{d + S}\right)$$

dove:

D=100 m - è la profondità limite assunta per la piattaforma continentale;

L_p=60000 m - è l'estensione della piattaforma continentale;

d=5.0 m - è la profondità ove si calcola il sovrizzo;

$g=9.81 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità;

$K_p=3 \times 10^{-6}$ è un coefficiente costante;

$U = 16 \text{ m/s}$ la velocità del vento persistente in condizioni estreme (frequenza di accadimento annuale). La relazione implicita fornisce un valore del sovrizzo del livello marino sotto costa (alla profondità di -5.0 m s.l.m.) dovuto all'azione del vento pari a circa 15 cm .

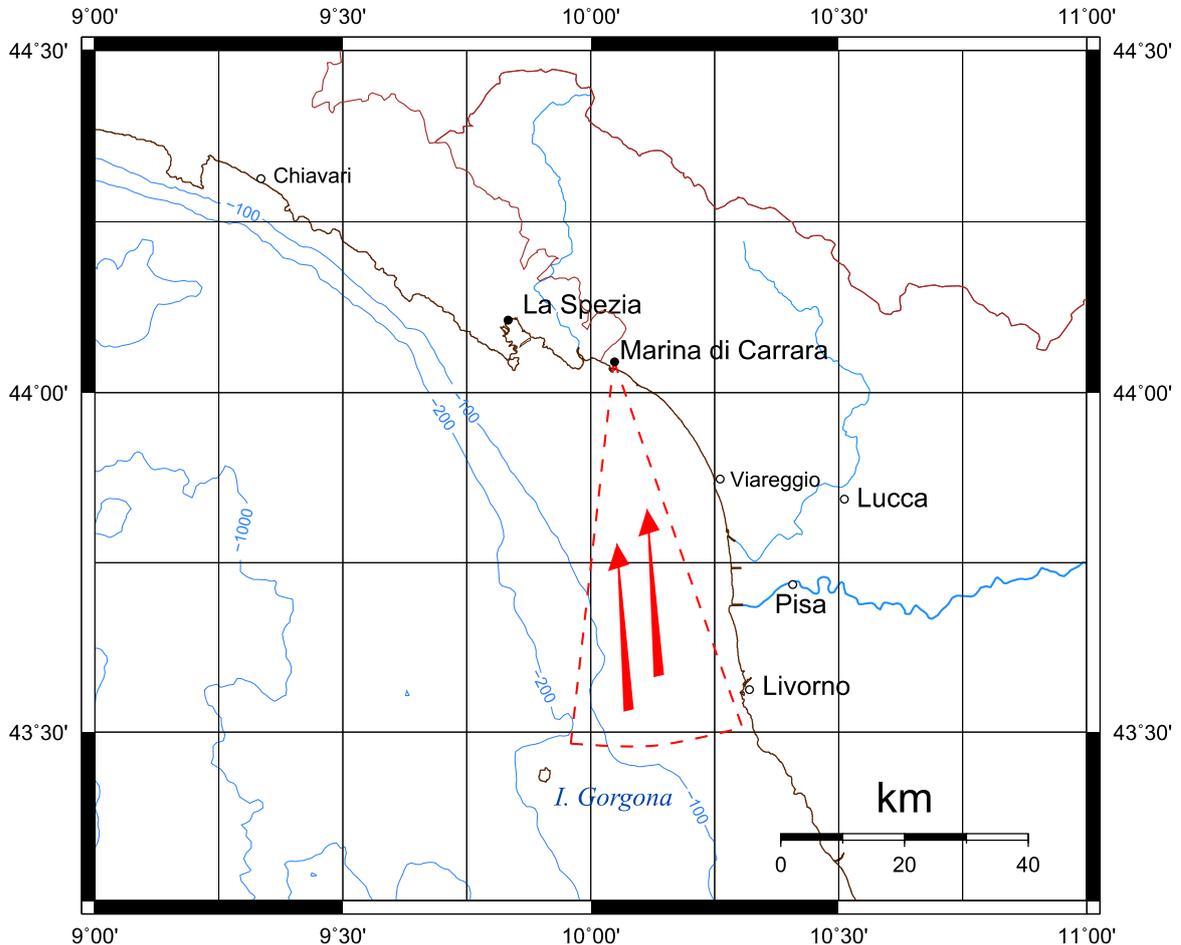


Figura 8-5. Estensione della piattaforma continentale per il calcolo del sovrizzo di vento in presenza di venti estremi di Mezzogiorno.

8.5 Marea meteorologica (analisi dei livelli residui)

Per l'analisi dei livelli estremi osservati si è fatto riferimento ad un'unica serie storica accorpando i periodi di osservazione 2006-2010 e 2014-2018 operando così con una serie storica di durata di circa 10 anni. L'analisi degli eventi estremi è stata effettuata utilizzando il metodo dei picchi sopra soglia (POT) con valore di soglia del sovrizzo meteorologico pari a $+0.2 \text{ m}$ sul l.m.m. Anche in questo caso la distribuzione di probabilità che meglio approssima i dati è risultata essere la distribuzione di Weibull ($k = 1$).

$$P_{X_{\min}}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right]$$

In Figura 8-6 viene riportato l'andamento del sovrizzo meteorologico in funzione del tempo di ritorno, mentre i valori significativi per tempi di valori dei tempi di ritorno di riferimento sono riportati in Tabella 8-2.

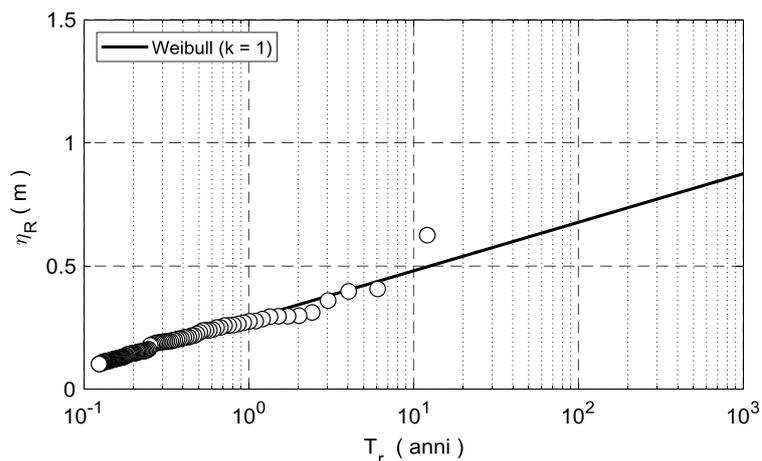


Figura 8-6 – Adattamento dei massimi residui di marea nel Porto di Marina di Carrara selezionati con il metodo P.O.T. con la legge tipo Weibull (soglia a 0.20 m). Periodo di riferimento 2006-2010 e 2014-2018.

Tabella 8-2 – Valori relativi ai valori di sovranzo in relazione al tempo di ritorno per il porto Marina di Carrara.

T_r (anni)	Sovralzo (m)
2	0.34
5	0.42
10	0.48
15	0.51
20	0.53
25	0.55
30	0.57
50	0.61
100	0.67

8.6 Variazioni del livello del mare connesse a fenomeni di eustatismo

Il fenomeno di innalzamento o abbassamento relativo del livello medio del mare rispetto alle terre emerse valutato a lungo termine, ovvero su scale temporali dell'ordine delle decine, centinaia e migliaia di anni, è indicato nella letteratura scientifica con il termine eustatismo.

Le cause di questo fenomeno possono essere diverse e sono tuttora oggetto di ricerca da parte della comunità scientifica. L'unica accertata è connessa alle glaciazioni e ai disgeli che hanno interessato la terra nel passato diverse volte.

Negli ultimi tempi la comunità internazionale ha riconosciuto che il fenomeno del riscaldamento della terra può avere avuto una accelerazione a causa dell'intervento umano.

Per quanto riguarda l'eustatismo, l'unica previsione disponibile è quella effettuata dall' "International Panel on Climate Change (IPCC)" riportata in Figura 8-7. Si evidenzia a tal riguardo che le misure mareografiche disponibili sono caratterizzate da serie storiche relativamente troppo brevi per poter essere utilizzate per valutare una eventuale tendenza (trend) di innalzamento del livello del mare (sea level rise).

La Figura 8-7 mostra la previsione di innalzamento del livello del mare per il nostro secolo. Le tre linee colorate presenti nella figura mostrano gli scenari in termini di innalzamento di livello forniti da diversi modelli climatologici.

La previsione di variazione del livello che potrebbe registrarsi entro la fine di questo secolo (2100) è molto ampia essendo compresa tra un minimo di circa 25 cm in un secolo (2,5 mm/anno) ad un massimo di circa 98 cm (9.8 mm/anno).

Considerando per il rateo di innalzamento il valore medio pari a 5,0 mm/anno ed assumendo un tempo di vita dell'opera in progetto al massimo di 25 anni, si ottiene una previsione di innalzamento del livello da assumere per la progettazione di circa 12,5 cm.

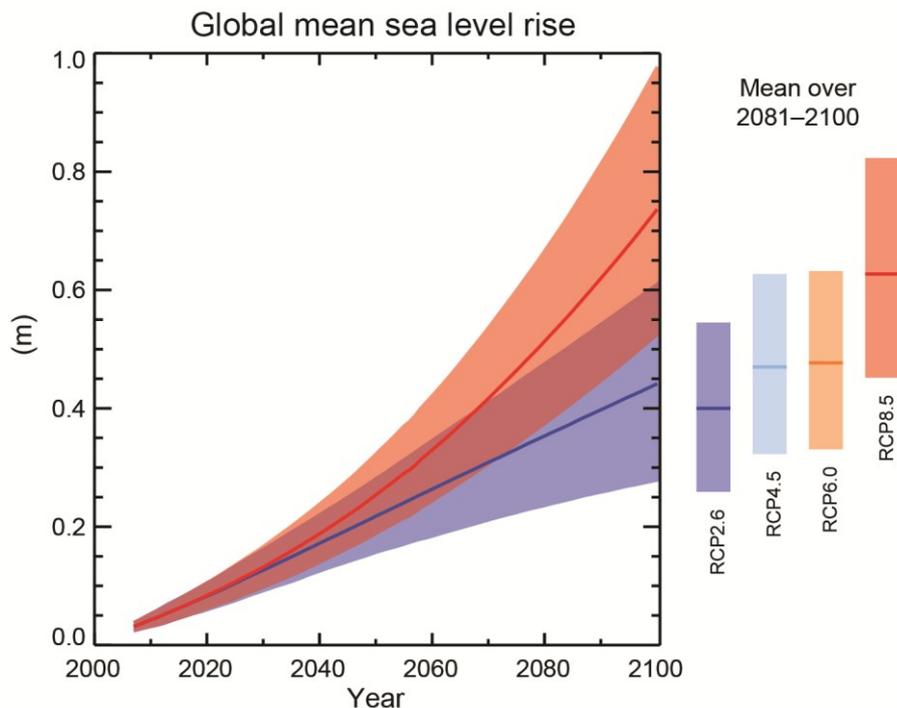


Figura 8-7. Previsione per il global sea level rise fornita dall'IPCC.