



AM3 SPIN-OFF
ADVANCED MODELS AND METHODS
IN MARITIME ENGINEERING



STUDIO METEOMARINO AL
LARGO DEL MARINA DI
VARAZZE, PROPAGAZIONE
DELLE ONDE A COSTA,
ANALISI DELLA MAREGGIATA
29/30 OTTOBRE 2018

STATO: FINALE

Firenze, 21/09/2023

AM3 SPIN-OFF s.r.l.

GIÀ SPIN-OFF
DELL' UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI FIRENZE

am3.unifi.spinoff@gmail.com
www.am3spinoff.com

Via Madonna del Piano, 6
50019 Sesto Fiorentino (FI)
P. IVA / C.F. 06375900484

AM3 Spin-off s.r.l.

Advanced Models and Methods in Maritime Engineering
Via Madonna del Piano, 6
50019 Sesto Fiorentino (FI)
P.IVA 06375900484 REA FI 623251

INDICE

Indice	1
Indice delle Figure	2
Indice delle Tabelle	4
AM3 Spin-off s.r.l.	5
Premessa al presente lavoro	6
1. modelli numerici utilizzati	7
2. Studio Meteomarinò.....	9
2.1. SETTORI DI TRAVERSIA PER IL PARAGGIO IN ESAME.....	9
2.2. FETCH EFFICACI.....	10
2.3. LIVELLI DEL MARE, PRESSIONE E MOTI ONDOSI AL LARGO.....	12
2.3.1. LIVELLI DEL MARE E PRESSIONE ATMOSFERICA	12
2.3.2. ANALISI STATISTICA DEL MOTO ONDOSO AL LARGO	15
3. Mareggiata del 28-29 ottobre 2018.....	20
3.1. LA MAREGGIATA 28-29 OTTOBRE 2018 NELL'ALTO MEDITERRANEO	20
3.2. LA MAREGGIATA DEL 28-29 OTTOBRE 2018 AL LARGO DEL MARINA DI VARAZZE	29
3.3. LA MAREGGIATA DEL 28-29 OTTOBRE 2018 NEI PRESSI DEL MARINA DI VARAZZE.....	32
4. Analisi statistica delle onde estreme al largo	38
5. Analisi statistica delle onde estreme a costa.....	42
6. Considerazioni Conclusive.....	44
Riferimenti Bibliografici.....	45

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Area di studio ed esposizione del paraggio (sinistra) e fetch dell'area di studio (destra). Fonte: Google Earth.	9
Figura 2: Fetch efficaci dell'area di studio (rielaborazione di una immagine da fonte Google Earth).	12
Figura 3: Livelli idrometrici misurati alla Stazione di Genova dal 2010 al 2020.....	13
Figura 4: Dati di pressione atmosferica misurati alla Stazione di Genova dal 2010 al 2020.....	14
Figura 5: Localizzazione del punto al largo (punto Varazze Offshore) per il Marina di Varazze utilizzato per l'estrazione dei dati di moto ondoso orari dal modello CMEMS-WAV006-012.	16
Figura 6: Rosa delle onde al largo del Marina di Varazze. Settori angolari di apertura pari a 10°.	16
Figura 7: Pressione atmosferica registrata da mareografi dell'Alto Mediterraneo nella giornata del 29/10/2018.....	23
Figura 8: Livello idrometrico registrato dal mareografo di Genova nel periodo 28/10-30/10 2018.....	24
Figura 9: Pressione atmosferica registrata dal mareografo di Genova nel periodo 28/10-30/10 2018.....	24
Figura 10: Componenti di marea, livelli registrati presso il mareografo di Genova e anomalia di marea.	25
Figura 11: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "La Ravellata" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.	27
Figura 12: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "Monaco" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.....	27
Figura 13: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "Capomele" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.....	28
Figura 14: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "Giannutri" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.....	28
Figura 15: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "Gorgona" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.....	29
Figura 16: Ricostruzione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 con il modello WW3-DICEA al largo del Marina di Varazze: altezza significativa (H_{m0}), direzione (Dir), periodo di picco (T_p) e periodo medio ($T_{m-1,0}$).....	30

Figura 17: Mareggiata del 29-30 Ottobre 2018, al largo del Marina di Varazze, come ricostruita dal modello CMEMS-WAV006-012 - Andamento temporale dell'altezza significativa (Hs) e del periodo di Picco (Tp).....	31
Figura 18: Altezza d'onda significativa per la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 al largo del Marina di Varazze e sui fondali con profondità 10 m in prossimità dell'area del Marina di Varazze. Risultati ottenuti applicando la catena modellistica WW3DICEA + MIKE21-SW.	32
Figura 19: Direzione di provenienza del moto ondoso per la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 al largo e sui fondali con profondità 10 m in prossimità dell'area del Marina di Varazze. Risultati ottenuti applicando la catena modellistica WW3DICEA + MIKE21-SW.	33
Figura 20: Localizzazione dei punti di estrazione delle caratteristiche del moto ondoso a costa utilizzati con la catena modellistica CMEMS-WAV006-012 e ONDA-DICEA nel presente studio: P1, sui fondali a profondità -20 m sull'asse di mezzogiorno della diga foranea del Marina di Varazze, e P2, sui fondali con profondità -10 m in prossimità della testata del Marina di Varazze.	34
Figura 21: Altezza d'onda significativa a largo e a costa per la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 nei pressi del Marina di Varazze ottenuta tramite l'utilizzo della catena modellistica basata sui modelli numerici CMEMS-WAV006-012 (condizioni al largo) e ONDA3-DICEA (propagazione a costa): punto P1.....	35
Figura 22: Altezza d'onda significativa a largo e a costa per la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 nei pressi del Marina di Varazze ottenuta tramite la catena modellistica basata sui modelli numerici CMEMS-WAV006-012 (condizioni al largo) e ONDA3-DICEA (propagazione a costa): punto P2 in prossimità della testa della diga foranea.....	36
Figura 23: Mappa vettoriale del moto ondoso al picco della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 (Hs al largo 5.4 m e direzione di provenienza da 180°N circa). La scala di colore rappresenta la profondità del fondale, in metri.	37
Figura 24: Esempio di individuazione dei picchi di altezza d'onda oltre la soglia di 2.5 m.	38
Figura 25 - Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Weibull per il settore 110-220°N.....	40
Figura 26 - Altezze d'onda significative al largo del Marina di Varazze in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con la distribuzione di Weibull per il settore 110-220°N.	41
Figura 27: Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Weibull per le onde propagate a coste e provenienti al largo dal settore 110-220°N.....	43
Figura 28: Altezze d'onda significative a costa del Marina di Varazze in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con la distribuzione di Weibull per i moti ondoso provenienti al largo dal settore 110-220°N...	43

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Fetch geografici, con lunghezza massima limitata a 600 km, relativi al paraggio in esame.	10
Tabella 2: Fetch efficaci per il paraggio in esame.	11
Tabella 3: Minimo e massimo livello idrometrico annuale – Stazione di Genova: periodo 2010 -2023.....	14
Tabella 4: Minimo e massimo barico annuale - Stazione di Genova, periodo 2010 – 2023.	15
Tabella 5: Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Varazze: H_{m0} -Dir. Numero di osservazioni relative a classi di direzione e altezze d’onda.	18
Tabella 6: Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Varazze: H_{m0} - $T_{m-1,0}$. Numero di osservazioni relative a classi di periodo e altezza d’onda.	19
Tabella 7: Gestore, posizione, periodo di registrazione e frequenza di acquisizione dei dati per gli ondometri utilizzati nel presente studio.....	21
Tabella 8: Tempo di ritorno della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 per ondometri situati nell’area dell’Alto Mediterraneo.....	21
Tabella 9: Altezza d’onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) al largo del Marina di Varazze per il settore 110-220°N ottenuta con la distribuzione di Weibull, adottando una soglia per la definizione dei picchi pari a $H_t=2.5$ m.....	40
Tabella 10. Altezza d’onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) al largo del Marina di Varazze per il settore 110-220°N ottenuta con la distribuzione di Weibull, adottando una soglia per la definizione dei picchi pari a $H_t=2.5$ m.....	42



AM3 SPIN-OFF S.R.L.

AM3 Spin-off s.r.l. (www.am3spinoff.com), già Spin-off dell'Università degli Studi di Firenze, è stata fondata nel luglio 2013 grazie all'attività di scouting e al successivo percorso di pre-incubazione dell'Ateneo fiorentino.

Il team di AM3 Spin-off è composto da ricercatori che si sono formati presso il Laboratorio di Ingegneria Marittima LABIMA (www.labima.unifi.it), struttura universitaria con un'esperienza più che trentennale di attività nel campo delle costruzioni marittime, della protezione dei litorali e dei dispositivi per lo sfruttamento delle energie marine. Inoltre, AM3 è partner del laboratorio congiunto a-mare (www.amare.unifi.it) insieme al LABIMA con la missione di continuare insieme le attività di ricerca tecnologica e sviluppo di metodi e modelli a supporto del territorio.

PREMESSA AL PRESENTE LAVORO

La società AM3 Spin-off s.r.l. (di seguito AM3) in raggruppamento con inGEpro Ingegneri Associati (di seguito inGEpro) è stata incaricata dal Marina di Varazze con lettera del 03/07/2023 di eseguire studi specialistici di supporto al progetto di adeguamento del molo di sopraflutto del Marina di Varazze.

Tali studi hanno lo scopo di fornire le stime più attendibili, allo stato dell'arte, per le onde di progetto delle nuove opere.

Le attività sotto la responsabilità di AM3 prevedono la conduzione di uno studio meteomarinario al largo del paraggio in esame e la propagazione del moto ondoso dal largo a costa, e includono le seguenti fasi di lavoro:

- 1) Approvvigionamento dei dati e dei materiali necessari alla costruzione dei modelli per la simulazione numerica (dati di vento, pressioni, marea, circolazioni a grande scala, batimetrici, ondametrici dove disponibili);
- 2) Acquisizione di dati storici orari di moto ondoso relativi ad un periodo sufficientemente esteso per le analisi statistiche degli eventi estremi;
- 3) Costruzione dei modelli numerici, calibrazione e validazione;
- 4) Conduzione delle simulazioni per la ricostruzione a costa, della mareggiata di fine ottobre 2018 e dell'intero data base storico;
- 5) Analisi statistiche degli eventi estremi di moto ondoso al largo e a costa del paraggio in esame;
- 6) Scrittura del rapporto della convenzione.

Il presente rapporto tecnico costituisce l'elaborato finale, inerente alla caratterizzazione meteomarina del paraggio in esame e alla descrizione statistica del moto ondoso al largo e a costa del Marina di Varazze, nonché alla caratterizzazione della mareggiata di ottobre 2018, e come tale sostituisce integralmente le bozze di lavoro già condivise con le parti interessate.

1. MODELLI NUMERICI UTILIZZATI

Si fornisce di seguito una sintetica descrizione dei diversi modelli numerici impiegati per la caratterizzazione del clima meteomarinico al largo e a costa del Marina di Varazze, nonché per la ricostruzione della mareggiata verificatasi in data 29-30 ottobre 2018 nell'Alto Tirreno.

- Modello **CMEMS-WAV006-012**. Distribuito tramite il servizio CMEMS di COPERNICUS, costituisce il database di rianalisi Mediterranean Sea Waves Reanalysis (MEDSEA_MULTYEAR_WAV_006_012) e contiene parametri caratteristici orari del moto ondoso sull'intero Mar Mediterraneo con una risoluzione spaziale di $1/24^\circ$. I dati sono ottenuti tramite il modello d'onda WAM 4.6.2. Il modello discretizza lo spettro in 24 direzioni e 32 frequenze. Il modello d'onda include schemi di assimilazione dei dati di moto ondoso osservati da diverse fonti ed è forzato con valori medi giornalieri del campo di velocità della corrente come ricostruito da altri specifici modelli numerici (database Med-Physics di CMEMS) e dai venti orari forniti da ECMWF.
- Modello **WW3-DICEA**. Modello di simulazione numerica basato sul software WAVEWATCH III [1], un modello open source sviluppato dal NCEP-NOAA (*National Center for Environmental Prediction*). WAVEWATCH III è un modello di generazione e propagazione di onde marine, di terza generazione. Le equazioni che governano il modello simulano le variazioni, nel tempo e nello spazio, dello stato del mare (onde di superficie) come un processo multidirezionale e multifrequenza. Il modello implementato presso il DICEA (in seguito indicato come **WW3-DICEA**) è stato calibrato e verificato specificamente per ottenere la ricostruzione storica e la previsione futura del moto ondoso del Mediterraneo [2]. Il dominio spettrale è stato impostato su 25 frequenze che variano da 0.05Hz a 0.5Hz, corrispondenti rispettivamente ad un periodo massimo e minimo di circa 20 e 2 secondi. Il modello è forzato con i dati di vento del CFSR (*Reanalysis Climate Forecast System*), disponibili dal sito web di NOMADS-NOAA [3]. Il modello WW3-DICEA è stato inizialmente utilizzato a scala dell'intero Mediterraneo (la cosiddetta modellazione di primo livello, in Figura 1), con una risoluzione della griglia è di $1/20^\circ$ di grado in latitudine e longitudine, corrispondente a circa 5 km alle latitudini del Mar Mediterraneo. È stato successivamente realizzato un *downscaling* (modellazione di secondo livello) all'area dell'Alto Mediterraneo (nella zona compresa fra le latitudini 42°N - 45°N e le longitudini 7°E - 11°E). I parametri caratteristici del moto ondoso (altezza significativa, direzione di provenienza delle onde, periodo medio

e di picco) relativi al periodo 2000-2018 sono ottenuti dal modello con frequenza oraria.

- Modello **MIKE21-SW**¹. Modello spettrale utilizzato per la propagazione del moto ondoso dal largo a costa, sviluppato dal Danish Hydraulics Institute [4], che permette di ricostruire le altezze d'onda considerando i principali processi di interazione onda-fondale (rifrazione, abbattimento dell'altezza d'onda per effetto del frangimento e attrito al fondo). Il modello MIKE21-SW è stato utilizzato su una maglia strutturata con risoluzione di 10 m su un dominio di circa 10x10 km nell'area intorno al Marina di Varazze.
- Modello **ONDA-DICEA**. Modello utilizzato per la propagazione del moto ondoso dal largo a costa, sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile Dell'Università di Firenze [5]. Date le caratteristiche del moto ondoso al largo (in termini di altezza, direzione e periodo) e la batimetria dell'area oggetto di studio, il modello ONDA-DICEA permette di ricostruire le altezze d'onda considerando i principali processi di interazione onda-fondale (rifrazione-diffrazione, abbattimento dell'altezza d'onda per effetto del frangimento e attrito al fondo). Il modello si basa sull'integrazione numerica dell'equazione proposta da Kirby nel 1986 [6], che deriva da un'approssimazione parabolica della Mild Slope Equation. Il frangimento è valutato con il criterio di Battjes & Janssen [7], mentre l'attrito al fondo con la relazione di Putnam & Jonsson [8]. La risoluzione numerica avviene con metodo alle differenze finite (Crank-Nicolson [9]). Il modello ONDA-DICEA è stato utilizzato su una maglia strutturata con risoluzione di 5 m su un dominio di circa 10x10 km nell'area intorno al Marina di Varazze.

Per la ricostruzione dei modelli digitali dei fondali necessari per le simulazioni numeriche della propagazione del moto ondoso dal largo a costa sono stati utilizzati i dati forniti dal catalogo cartografico del Geoportale della Regione Liguria [10], integrati mediante i dati del rilievo batimetrico fornito da inGepro e la digitalizzazione delle carte nautiche per quanto riguarda i fondali a profondità maggiore.

¹ Si osserva che le simulazioni numeriche effettuate con tale modello sono state inizialmente condotte per uno studio specifico riguardante la ricostruzione del clima ondoso e della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 nei pressi dell'area di Cala Cravieu (SV), e si ritengono sufficientemente rappresentative anche delle condizioni a costa per il Marina di Varazze in considerazione della limitata distanza fra le due località (2.5 km) e della esposizione simile dei due paraggi. Inoltre, la conduzione di nuove simulazioni con nuovi modelli appositamente sviluppati per questo studio ha permesso di ottenere più ricostruzioni dei dati di eventi estremi e quindi di valutare anche la sensibilità del risultato dall'impiego di differenti modelli numerici.

2. STUDIO METEOMARINO

2.1. SETTORI DI TRAVERSIA PER IL PARAGGIO IN ESAME

Il Marina di Varazze è situato all'inizio della Riviera ligure di ponente, tra Genova e Savona, ed è esposto ad un settore di traversia da 110°N a 220°N . Il settore principale è compreso fra le direzioni di 190°N e 220°N , e due settori di traversia secondari compresi fra i 190°N e 160°N (primo settore secondario) e 160°N e 110°N (secondo settore secondario), come riportato in Figura 1.

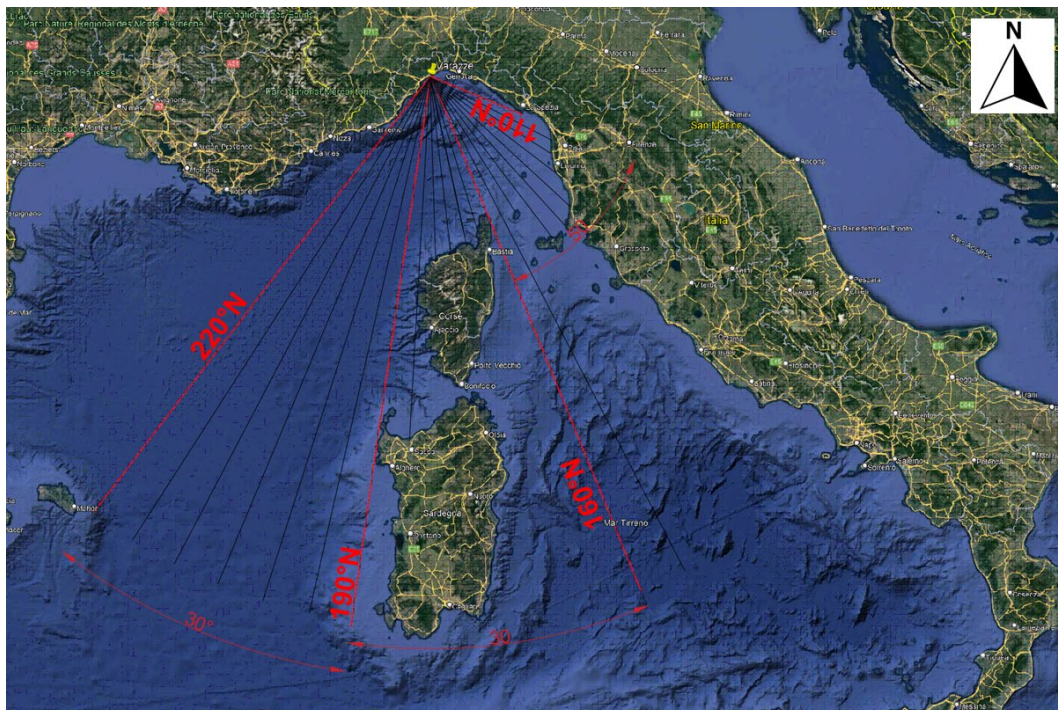


Figura 1: Area di studio ed esposizione del paraggio (sinistra) e fetch dell'area di studio (destra). Fonte: Google Earth.

Il settore di traversia principale è limitato dal Capo dell'Argentiera, in Sardegna (190°N) e il promontorio di Capo Mele (220°N), in Liguria, con i fetch geografici che raggiungono le coste della Tunisia, con lunghezze comprese fra gli 830 km e 1030 km. Per il calcolo dei fetch efficaci, tali fetch geografici sono stati limitati a 600 km, limite superiore delle perturbazioni atmosferiche responsabili del processo di generazione del moto ondoso che si è soliti considerare per il Mediterraneo (Tabella 1).

Il primo settore di traversia secondario è compreso fra il promontorio nord-est della Corsica (160°N) Capo dell'Argentiera (190°N), con fetch geografici che variano fra 150 e 190 km circa (Figura 1).

Il secondo settore di traversia secondario, compreso fra i 110°N (direzione dalla quale la limitazione geografica è fornita dal Promontorio di Porto Venere, in

Liguria) e i 160°N (con limitazione dalla Corsica) vede fetch geografici di lunghezza limitata delle isole dell'arcipelago toscano.

Tabella 1: Fetch geografici, con lunghezza massima limitata a 600 km, relativi al paraggio in esame.

Direzione [°N]	Fetch geografico [km]
110	108
115	150
120	155
125	172
130	208
135	218
140	220
145	172
150	600
155	600
160	172
165	184
170	195
175	201
180	398
185	600
190	600
195	600
205	600
210	600
215	600
220	600

2.2. FETCH EFFICACI

Il fetch efficace lungo una determinata direzione rende conto delle variazioni dei fetch geografici in direzioni adiacenti, nonché della variabilità nella direzione del vento, al fine di fornire una migliore rappresentazione dell'area complessiva di generazione delle onde. Per la determinazione dei fetch efficaci è stata utilizzata la procedura proposta da Saville (*Shore Protection Manual*, 1984).

Il metodo di Saville si basa sulle seguenti ipotesi:

- (i) il vento trasferisce energia alla superficie del mare nella propria direzione di provenienza e in tutte quelle appartenenti ad un settore con ampiezza di circa $\pm 45^\circ$ rispetto a tale direzione di provenienza;
- (ii) l'energia trasmessa dal vento lungo le varie direzioni è proporzionale al coseno dell'angolo formato da ogni direzione rispetto a quella di provenienza del vento, elevato ad una data potenza n ;
- (iii) le onde sono completamente assorbite nell'impatto con le linee di costa.

Il fetch efficace per un'assegnata direzione i , $F_{eff,i}$, è dato da una media pesata dei fetch geografici (equidistanziati di 5° in un intorno di 45° a destra ed a sinistra della direzione in esame) ai quali si attribuisce un peso pari al $\cos^n(\Theta)$ (Eq. 1).

$$F_{eff,i} = \frac{\sum F_\Theta \cdot \cos^n(\Theta)}{\sum \cos^{n-1}(\Theta)} \quad (1)$$

dove F_Θ è la lunghezza del fetch geografico corrispondente alla direzione Θ per la quale si calcola il fetch efficace. Nel calcolo dei fetch efficaci, qualora i fetch geografici siano maggiori di 600 km, questi sono stati limitati a tale valore massimo, inteso come il limite superiore della dimensione delle perturbazioni atmosferiche responsabili del processo di generazione del moto ondoso nel Mediterraneo.

I fetch efficaci così calcolati sono riportati in Tabella 2 e Figura 2. Si evidenzia che il maggior fetch efficace si ha per 185° N e per questo è da attendersi i moti ondosi più intensi provengano da tale direzione.

Tabella 2: Fetch efficaci per il paraggio in esame.

Direzione [$^\circ$N]	Fetch efficaci [km]
110	106
115	123
120	141
125	158
130	174
135	193
140	216
145	240
150	264
155	288
160	310
165	332
170	354
175	362
180	366
185	365
190	360
195	351
205	329
210	306
215	287
220	264



Figura 2: Fetch efficaci dell'area di studio (rielaborazione di una immagine da fonte Google Earth).

2.3. LIVELLI DEL MARE, PRESSIONE E MOTI ONDOSI AL LARGO

Parametri di importanza primaria per la caratterizzazione del clima meteomarinario relativo ad un determinato paraggio, in quanto fondamentali nella determinazione dell'effettiva azione sollecitante indotta dalla dal moto ondoso sulle strutture a costa, sono i moti ondosi e il livello del mare in prossimità del paraggio in esame. Ai fini del presente studio, le principali cause di variazione del livello del mare possono essere ricondotte alle seguenti: variazioni della pressione atmosferica, effetto dei venti foranei, soprizzo dovuto a moti ondosi frangenti (il cosiddetto "wave set-up") ed escursioni mareali. I suddetti fattori sono analizzati, singolarmente, nella presente sezione.

2.3.1. Livelli del mare e pressione atmosferica

Per la realizzazione del presente studio sono stati analizzati i dati disponibili presso www.mareografico.it gestito da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). I livelli sono riferiti al livello medio del mare misurato a Genova dall'antico mareografo Thompson in un intorno di qualche anno a cavallo del 1940. La distanza tra la stazione di Genova e il paraggio in esame è relativamente piccola (circa 30 km) in rapporto alle distanze caratteristiche delle variazioni di pressione atmosferica o di marea astronomica. Le misure acquisite

presso tale stazione, quindi, possono ritenersi sufficientemente rappresentative anche per la zona in esame. I livelli registrati dal mareografo tengono conto direttamente del contributo dovuto alla marea astronomica, della variazione di pressione atmosferica e del sopralzo indotto dai venti foranei.

In Figura 3 è riportata la serie storica del livello idrometrico registrato dalla stazione di Genova nel periodo 2010-2020. Il valore medio del livello del mare registrato presso la stazione per il periodo di riferimento risulta $h_{med}=0.11m$, ovvero risulta 11 cm più alto rispetto a quello che si aveva nel 1940 (i.e. circa 1.47 mm di incremento all'anno durante i 75 anni dal 1940-2015).

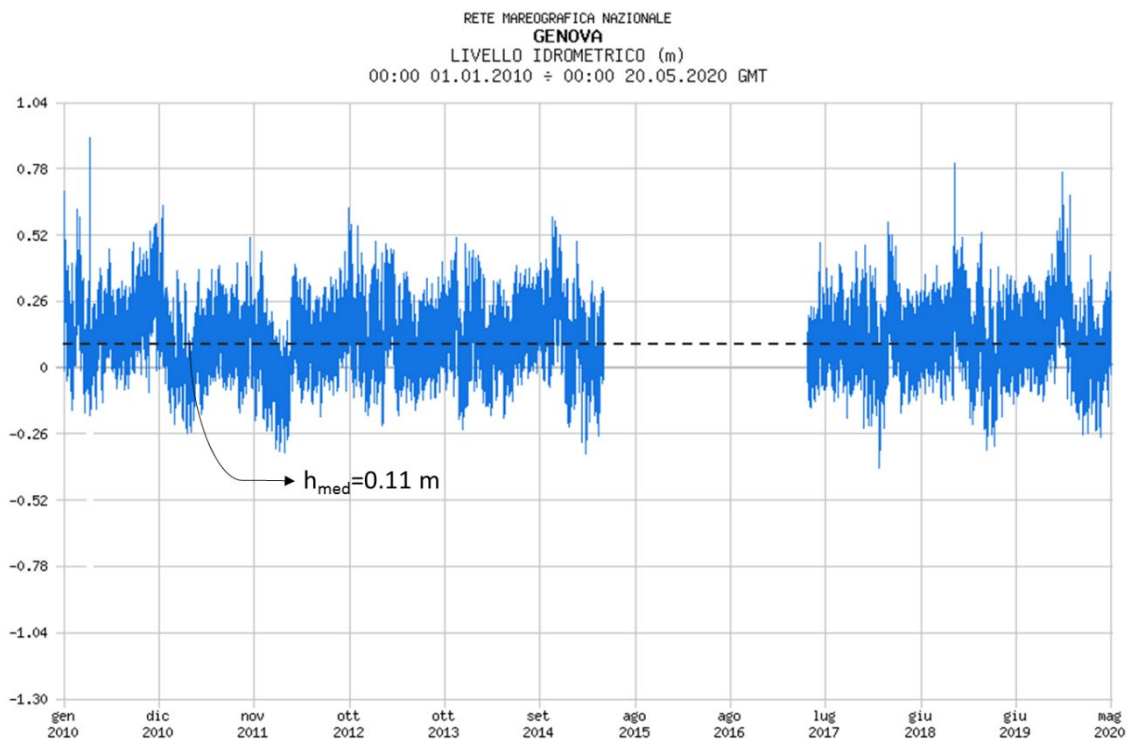


Figura 3: Livelli idrometrici misurati alla Stazione di Genova dal 2010 al 2020.

In Tabella 3 sono riportati i valori di livello massimi e minimi annuali per il periodo 2010-2023, riferiti al medio mare locale. Il più alto livello del mare durante il periodo analizzato è pari a +0.68 m rispetto al valore medio del periodo 2010-2023, e si è verificato nell'evento eccezionale del 29-30 ottobre 2018.

Si nota che negli ultimi 5 anni si sono verificati valori massimi annui di livello sempre superiori a +0.5 m rispetto al medio mare locale.

Tabella 3: Minimo e massimo livello idrometrico annuale – Stazione di Genova: periodo 2010 -2023.

Anno	Livello min. [cm]	Livello max. [cm]
2010	-29	58
2011	-36	40
2012	-44	51
2013	-34	40
2014	-31	48
2015*	-44	38
2016	--	-
2017**	-34	37
2018	-49	68
2019	-43	65
2020	-38	52
2021	-45	50
2022	-48	54
2023***	-47	36

* dati dal 01/01/2015 al 07/05/2015
 ** dati dal 16/05/2017 al 31/12/2017
 *** dati dal 01/01/2023 al 01/08/2023

In Figura 4, sono riportate le serie storiche di pressione orarie per l'intervallo temporale 2010-2020. Il valore medio della pressione atmosferica durante tutto il periodo in esame è pari a circa 1014 mbar.

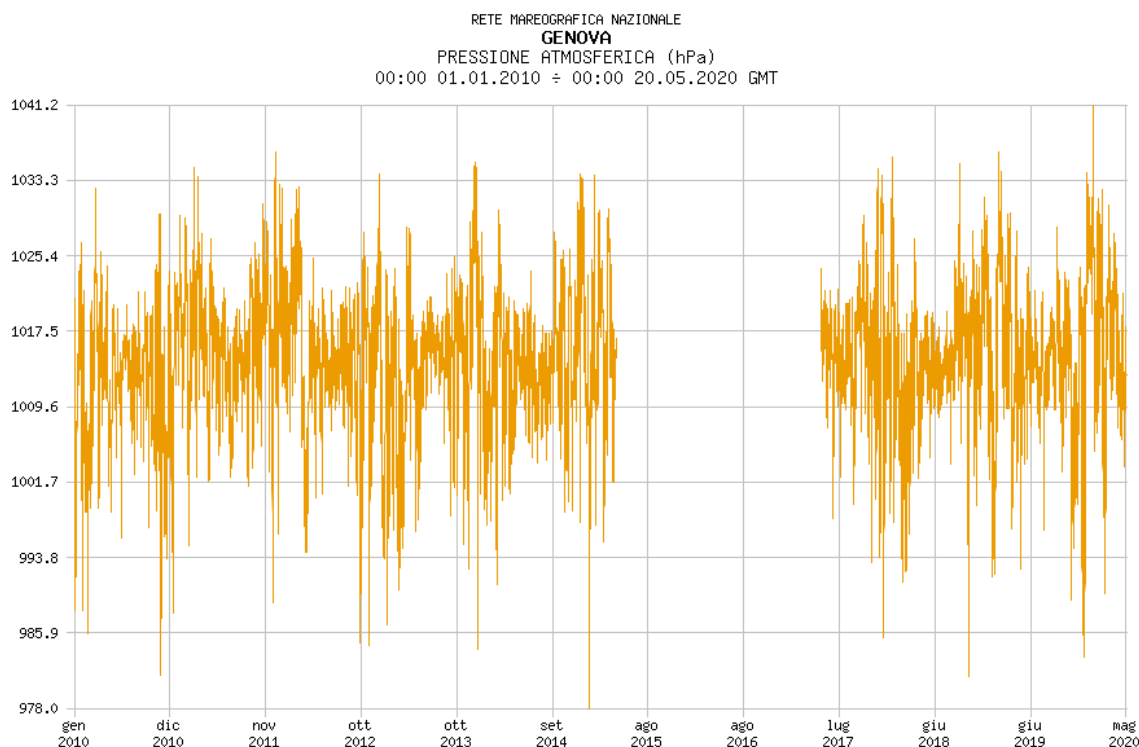


Figura 4: Dati di pressione atmosferica misurati alla Stazione di Genova dal 2010 al 2020.

In Tabella 4, si riportano i valori minimi e massimi annuali. Il minimo valore barico nel paraggio in esame è pari a circa 978 mbar, risultando così inferiore di 36 mbar rispetto al valore medio del periodo. Poiché, in prima approssimazione, è possibile assumere un sopralzo del mare pari a 1 cm per ogni mbar di bassa pressione, è possibile affermare che il contributo delle basse pressioni all'innalzamento del mare nel paraggio sia arrivato fino a 36 cm nel periodo di riferimento (2010-2023).

Tabella 4: Minimo e massimo barico annuale - Stazione di Genova, periodo 2010 – 2023.

Anno	Pressione min. [mbar-hPa]	Pressione max. [mbar-hPa]
2010	981	1032
2011	989	1036
2012	985	1033
2013	984	1035
2014	990	1034
2015*	978	1034
2016	--	--
2017**	985	1035
2018	981	1036
2019	983	1036
2020	986	1041
2021	989	1039
2022	989	1036
2023***	990	1031

* dati dal 01/01/2015 al 07/05/2015

** dati dal 16/05/2017 al 31/12/2017

*** dati dal 01/01/2023 al 01/08/2023

2.3.2. Analisi statistica del Moto Ondoso al largo

Per le analisi documentate nella presente sezione, sono stati utilizzati dati estratti dal modello CMEMS-WAV006-012, le cui caratteristiche sono state introdotte in *Sezione 1*.

I parametri caratteristici del moto ondoso (altezza significativa, H_{m0} ; direzione di provenienza delle onde, Dir; periodo medio, T e periodo di picco T_p) sono forniti con frequenza oraria del 1° gennaio 1993 al 30 giugno 2021, per un totale di 27.5 anni e circa 240.000 dati di moto ondoso. I dati sono stati successivamente estratti nel punto di coordinate geografiche 44.14°N (Lat.) 8.8°E (Long.), indicato in Figura 5.

L'analisi dei dati, in forma di rosa delle onde, è riportata in Figura 6 e nelle tabelle bi-variate H_{m0} -Dir, H_{m0} - $T_{m-1,0}$ e $T_{m-1,0}$ -Dir (Tabella 5, Tabella 6).

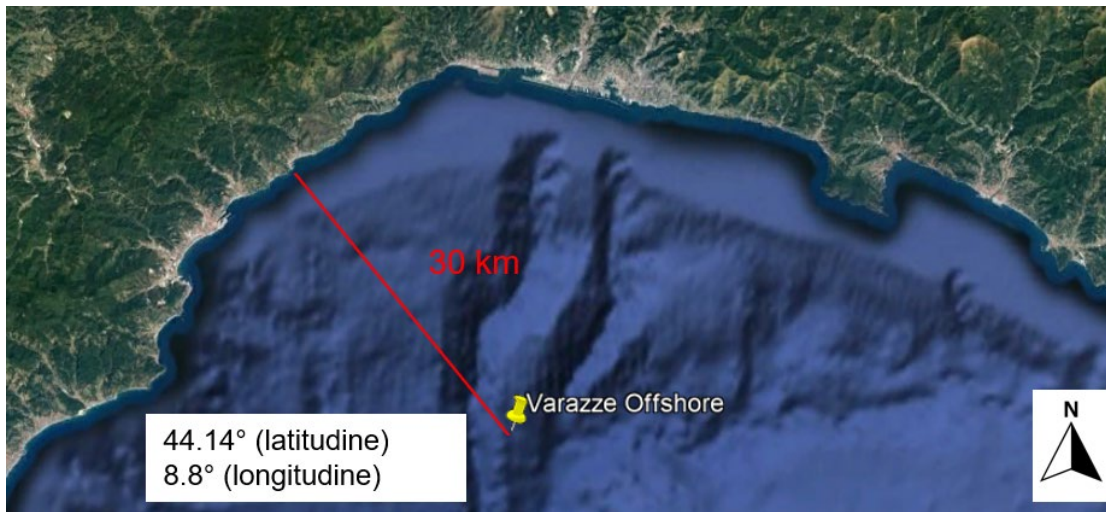


Figura 5: Localizzazione del punto al largo (punto Varazze Offshore) per il Marina di Varazze utilizzato per l'estrazione dei dati di moto ondoso orari dal modello CMEMS-WAV006-012.

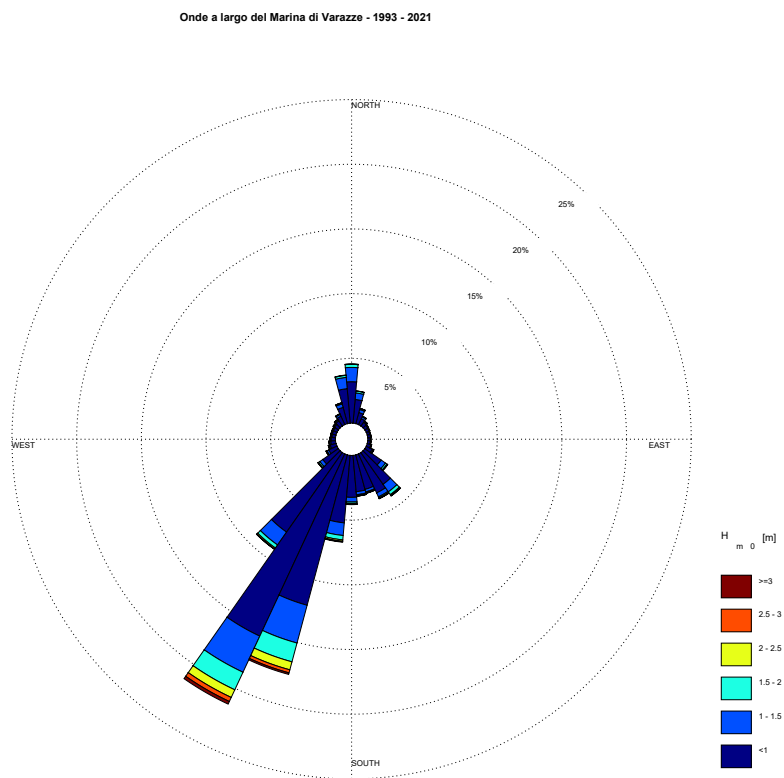


Figura 6: Rosa delle onde al largo del Marina di Varazze. Settori angolari di apertura pari a 10°.

Il moto ondoso più intenso e più frequente proviene principalmente dal settore 190-210°N centrato sui 200°N (45% del tempo circa), come in Figura 5.

Da tale settore provengono moti ondosi che raggiungono altezze significative di 5.5 m e ciò implica, in acque profonde, la presenza di singole onde con altezze fino a 11 m, con periodi medi fino a 12 s. Moti ondosi con periodi così lunghi possono determinare condizioni particolarmente critiche nei confronti della tracimazione delle opere marittime.

Tabella 5: Clima ondoso meteomarinò al largo del Marina di Varazze: H_{m0} -Dir. Numero di osservazioni relative a classi di direzione e altezze d'onda.

Hs																																																		
5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	12	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
4.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	3	2	6	8	13	28	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
3.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	9	3	2	4	12	37	144	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	19	14	2	10	24	73	439	86	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.75	0	1	0	1	0	0	0	0	2	1	8	1	12	75	54	28	29	38	80	239	1076	239	18	11	6	3	2	3	2	0	2	1	2	4	3	2														
2.25	40	18	21	13	10	8	9	7	4	2	6	20	48	195	132	67	70	92	169	659	2314	602	143	68	50	30	21	17	7	13	19	17	12	24	54	54														
1.75	507	271	165	103	44	36	25	19	41	21	38	64	161	595	422	190	188	195	437	1825	4930	1846	388	208	119	100	86	65	63	54	54	87	101	139	275	537														
1.25	1994	805	465	272	165	119	107	81	85	73	94	135	506	1594	1297	623	538	636	1485	4306	9217	5363	1325	457	288	233	200	197	178	177	202	210	312	474	1227	2952														
0.75	4023	1833	827	530	358	294	249	236	236	203	241	337	1114	3183	3715	2532	1972	2418	3821	9411	15151	12018	3803	1050	698	519	454	393	356	412	412	544	667	1138	2782	5304														
Direzione ->	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	175	185	195	205	215	225	235	245	255	265	275	285	295	305	315	325	335	345	355														

Tabella 6: Clima ondoso meteomarinò al largo del Marina di Varazze: H_{m0} - $T_{m-1,0}$. Numero di osservazioni relative a classi di periodo e altezza d'onda.

Hs												
5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	9	7	0	0
4.75	0	0	0	0	0	0	0	1	13	12	1	0
4.25	0	0	0	0	0	0	0	34	30	7	6	0
3.75	0	0	0	0	0	0	8	115	107	26	6	1
3.25	0	0	0	0	0	0	96	247	219	115	11	2
2.75	0	0	0	0	0	35	529	662	488	176	50	3
2.25	0	0	0	0	56	633	1426	1670	1006	194	48	2
1.75	0	0	0	0	1873	3380	3661	3629	1581	253	22	0
1.25	0	0	0	3439	9462	9106	8224	6312	1660	186	3	0
0.75	0	0	2289	20623	23232	19080	12231	5042	682	49	6	0
$T_{m-1,0} \rightarrow$	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5

3. MAREGGIATA DEL 29-30 OTTOBRE 2018

La mareggiata avvenuta a fine ottobre 2018 nell'alto Mediterraneo, generatasi nel contesto meteorologico della cosiddetta tempesta "Vaia", ha causato danni rilevanti su vari paraggi della costa ligure (ad esempio, Porto di Rapallo, Porto di Santa Margherita, litorale in prossimità di Portofino, Cala Cravieu etc.), con danni documentati dal Ponente fino al Levante ligure. Per tale ragione, la ricostruzione delle caratteristiche della mareggiata in prossimità del Marina di Varazze si configura come attività di particolare utilità nella definizione delle nuove opere in via di progettazione.

Nella presente sezione si fornisce, quindi, una descrizione analitica dell'evento del 29-30 ottobre 2018, inquadrato in un primo tempo in un contesto più generale, sia dal punto di vista della relazione con le registrazioni storiche di diversi ondometri nell'Alto Mediterraneo sia relativamente l'evoluzione di livelli e pressioni per come registrati di mareografi (*Sezione 3.1*). L'approccio adottato consente di documentare lo sviluppo e le caratteristiche dinamiche dell'evento, nonché dei fenomeni meteomarini ad esso associati.

È successivamente presentata la ricostruzione della mareggiata per mezzo di modellistica numerica, sia al largo sia a costa (*Sezione 3.2* e *Sezione 3.3*), mirata aopperire alla mancanza di misurazioni dirette nella specifica area di interesse.

Nella ricostruzione numerica della mareggiata, si è fatto ricorso a diversi modelli numerici (sia per quanto riguarda la ricostruzione dei dai di moto ondosso a largo, sia per quanto riguarda la successiva propagazione a costa) al fine di ottenere una quantificazione della possibile incertezza sulle caratteristiche della mareggiata associata all'uso di differenti approcci modellistici.

3.1.LA MAREGGIATA 29-30 OTTOBRE 2018 NELL'ALTO MEDITERRANEO

In questa sezione si analizzano, nello specifico, le caratteristiche del risultante moto ondosso, per come registrato dalle stazioni ondometriche localizzate nell'Alto Mediterraneo e operative durante la mareggiata in esame (Tabella 7, Tabella 8). Per ciascuna stazione è stato determinato il tempo di ritorno associato alla massima altezza significativa registrata durante la mareggiata, in relazione all'analisi statistica condotta sulla serie storica registrata della stessa stazione (Tabella 8).

Tabella 7: Gestore, posizione, periodo di registrazione e frequenza di acquisizione dei dati per gli ondometri utilizzati nel presente studio

Ondametro	Gestore	Lat	Long	Periodo di disponibilità dei dati		Frequenza
La Revellata	CANDHIS	42° 34' 9"N	08° 39' 0"E	02/05/2013	10/07/2018	30 minuti
Monaco	CANDHIS	43° 42' 48.9"N	07° 25' 34.2"E	29/10/2014	09/07/2018	30 minuti
Capo Mele	ARPAL	43° 55' 18"N	08° 10' 50"E	23/02/2012	ad oggi	30 minuti
Giannutri	CFR Toscana	42° 14' 00.74"N	11° 02' 41.11" E	26/05/2009	7/12/2018	30 minuti
Gorgona	CFR Toscana	43° 34' 05.6" N	09° 57' 21.37" E	01/10/2008	7/12/2018	30 minuti

Tabella 8: Tempo di ritorno della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 per ondometri situati nell'area dell'Alto Mediterraneo².

Ondametro	Massima altezza significativa [m]	Tempo di ritorno dell'evento	Osservazioni
Capo Mele	6.5	50-100 anni	Valore massimo raggiunto alle ore 22.30 circa del 29/10/2018
Giannutri	6.6	~ 100 anni	Valore massimo raggiunto alle ore 20 circa del 29/10/2018
Gorgona	5.3	< 50 anni	Valore massimo raggiunto alle ore 20 circa del 29/10/2018
La Ravellata	5.5	< 50 anni	Valore massimo raggiunto alle ore 23.30 circa del 29/10/2018

Si osserva come la mareggiata sia stata caratterizzata da un valore massimo dell'altezza significativa associabile ad un tempo di ritorno superiore ai 50 anni per le stazioni di Capo Mele (situata di fronte all'omonimo capo della costa ligure) e di Giannutri

² I dati della stazione ondometrica di Monaco non sono stati inseriti nella presente analisi poiché, nonostante la stazione abbia registrato la mareggiata, la serie storica di dati disponibili per questo ondometro è troppo limitata (2014-2018) per poter eseguire una statistica degli eventi estremi in grado di fornire informazioni significative.

(situata a sud dell'arcipelago toscano). Per le altre stazioni (Gorgona e la Ravellata) i tempi di ritorno associabili all'evento sono stati, invece, inferiori ai 50 anni. L'entità della mareggiata di ottobre 2018, e la sua eventuale connotazione di eccezionalità, appare fortemente sito specifica. Si conferma, quindi, come essenziale valutare le caratteristiche locali del moto ondoso durante la mareggiata per lo specifico paragone in esame nel presente studio.

Le registrazioni della Rete Mareografica Nazionale mostrano una vasta depressione con entità variabile fra i 987 hPa raggiunti a Porto Torres intorno alle 13 del 29/10, e i 977 hPa (registrati dal mareografo di Imperia, intorno alle 19.30 dello stesso giorno), come riportato in Figura 7.

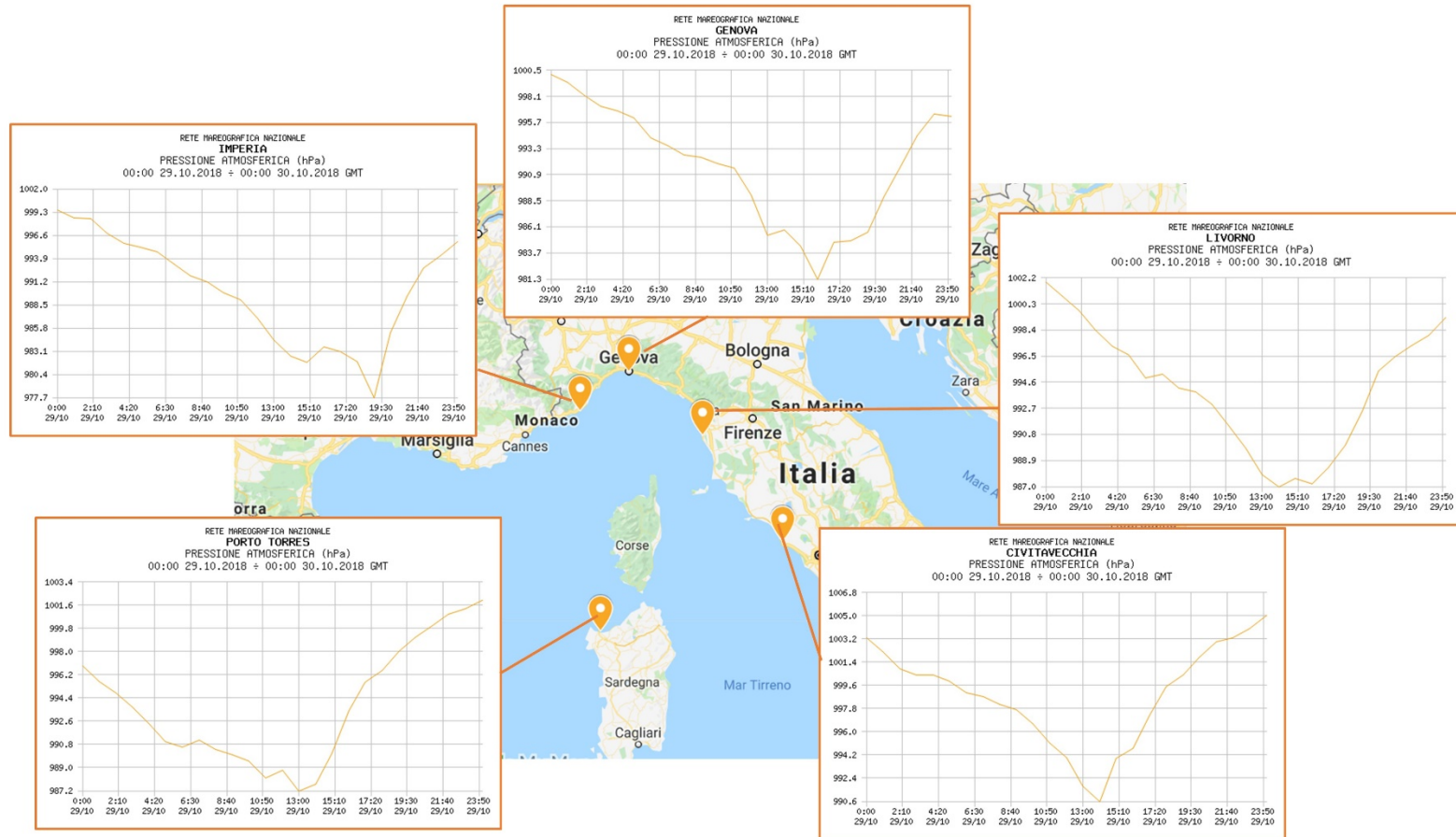


Figura 7: Pressione atmosferica registrata da mareografi dell'Alto Mediterraneo nella giornata del 29/10/2018.

Si riportano di seguito i livelli del mare e le pressioni atmosferiche registrate dal mareografo di Genova, ritenuto in prima approssimazione rappresentativo della zona del Marina di Varazze in virtù della moderata distanza da questa, come osservato nella *Sezione 4.5*.

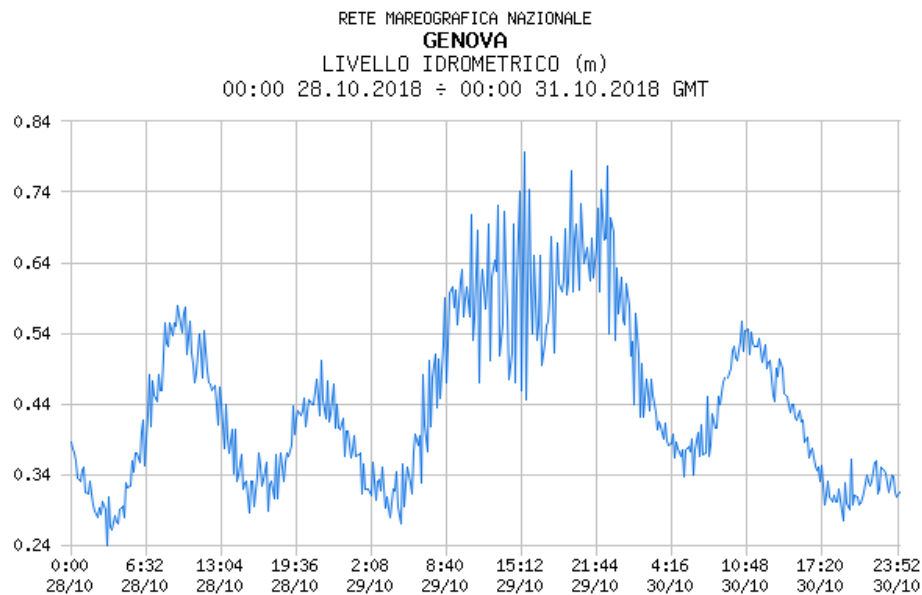


Figura 8: Livello idrometrico registrato dal mareografo di Genova nel periodo 28/10-30/10 2018.

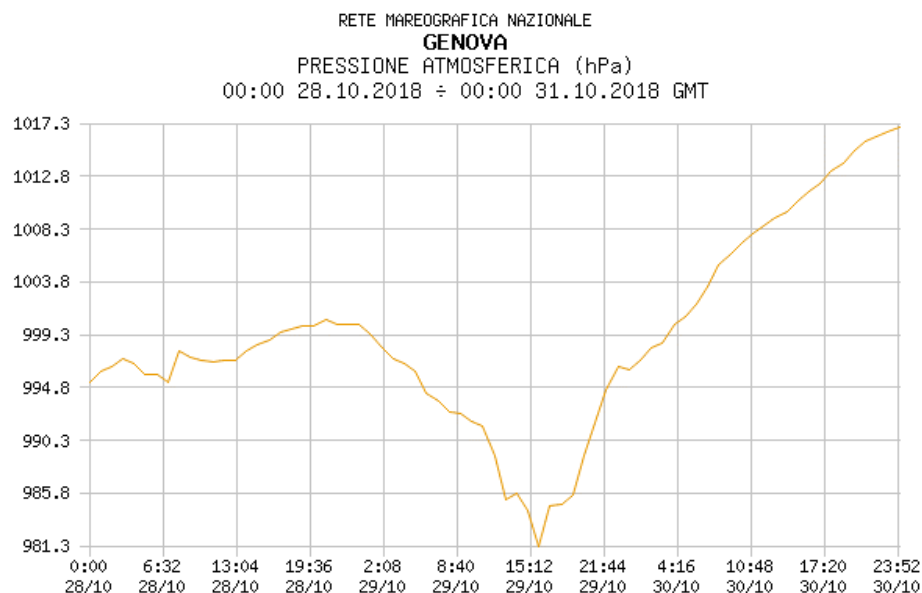


Figura 9: Pressione atmosferica registrata dal mareografo di Genova nel periodo 28/10-30/10 2018.

Il livello idrometrico misurato presso il mareografo di Genova (Figura 8) mostra un valore massimo di 0.79 m (corrispondente ad una variazione di 0.68 m rispetto al livello medio del mare per la stessa stazione).

Il minimo barico registrato dal mareografo è stato di 981.3 mBar circa (Figura 8), con picco poco dopo le 15.00 (GMT) del 29/10/2018. Tale valore risulta inferiore di 32.7 mbar rispetto al valore medio per la stessa stazione. Tale minimo barico ha contribuito al sopralzo per una quota pari a circa 33 cm circa.

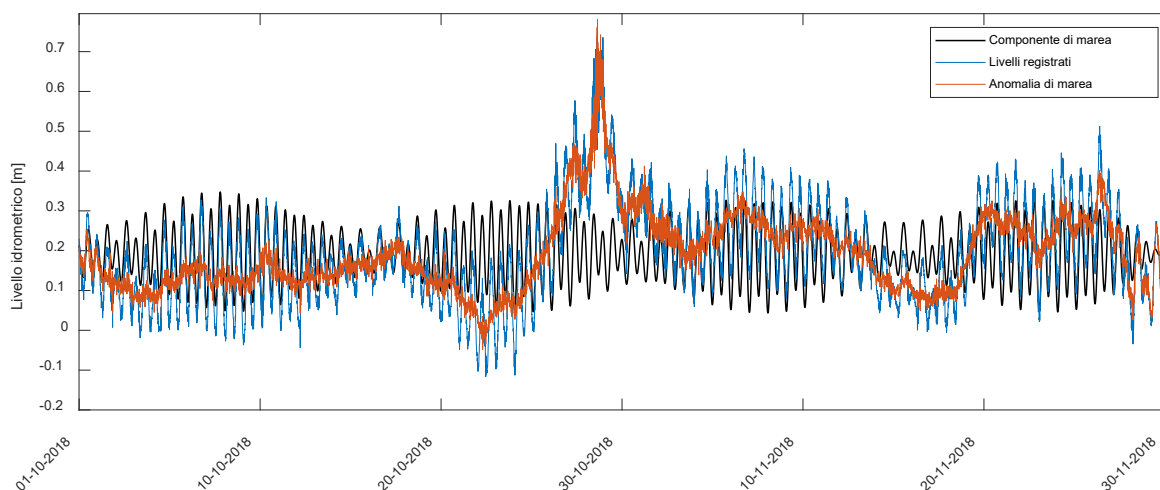


Figura 10: Componenti di marea, livelli registrati presso il mareografo di Genova e anomalia di marea.

Il valore del livello del mare osservato presso il mareografo di Genova, epurato dal livello di marea atteso³ (la cosiddetta "anomalia di marea", Figura 10), ha raggiunto un massimo di circa 0.78 m (equivalenti ad una variazione di livello di +0.67 m circa rispetto al medio mare per la località in esame). Confrontando tale valore con il sopralzo imputabile alla sola componente barica (i.e. 33 cm circa), è evidente come altri fattori (e.g. l'intensità del vento) debbano aver avuto un ruolo fondamentale nella formazione del sopralzo totale durante la mareggiata. Si nota come la massima anomalia di marea abbia avuto luogo in coincidenza con una fase di bassa marea astronomica, avvenuta poco prima delle 17 del 29/10/2018 (Figura 10). L'alta marea astronomica successiva, verificatasi intorno alle 23.30 del 29/10/2018, ha contribuito a mantenere il livello marino ad una quota elevata anche dopo il passaggio del nucleo di bassa pressione.

³ La variazione di livello idrometrico imputabile ad effetti di marea è stata separata dal segnale registrato dal mareografo di Genova applicando un filtro passa banda per isolare le sole componenti con periodo di 12 ore (frequenza compresa fra $2.1 \cdot 10^{-5}$ e $2.4 \cdot 10^{-5}$ Hz) e 24 ore (fra $1.07 \cdot 10^{-5}$ e $1.18 \cdot 10^{-5}$ Hz). L'anomalia di marea è individuata come differenza fra il segnale di livello e la componente di oscillazione imputabile agli effetti di marea.

Nelle Figure 11-15 è riportato il confronto fra le registrazioni della mareggiata effettuate dagli ondometri in Tabella 7 e diversi modelli numerici dai quali sono stati estratti i dati nel punto più prossimo alla posizione degli ondometri⁴.

Si evidenzia una forte variabilità nelle prestazioni dei diversi modelli numerici nella ricostruzione dell'andamento temporale e dei valori di picco di altezza significativa registrati dagli ondometri.

Il modello WW3-DICEA è generalmente in grado di approssimare meglio i valori massimi di altezza significativa rispetto agli altri modelli comparativamente analizzati. Cioè è particolarmente evidente con riferimento agli ondometri di Monaco e Capomele (i più prossimi al paraggio di interesse per il presente studio), in Figura 12 e Figura 13, mentre per l'ondometro di Giannutri (Figura 14) il modello CMEMS-WAV006-012 fornisce le stime maggiori dei valori di Hs al picco della mareggiata. È da notare inoltre come il modello WW3-DICEA sembri sovrastimare il massimo valore di altezza significativa raggiunto nella prima metà del 28 ottobre nei pressi di Capomele di circa 1 m, mentre il modello CMEMS-WAV006-012 fornisce, in tale circostanza, una stima delle caratteristiche del moto ondoso molto vicina a quelle registrate dal relativo ondometro (Figura 13).

La variabilità osservata nelle performance dei diversi modelli giustifica la necessità di riportare, nelle sezioni successive del presente elaborato, dati con diversi modelli numerici sia per quanto riguarda la ricostruzione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 sia per quanto riguarda la propagazione del moto ondoso dal largo a costa del Marina di Varazze, al fine di permettere una valutazione cautelativa circa l'entità del moto ondoso atteso.

⁴ si veda la *Sezione 1* per un inquadramento delle caratteristiche dei WW3-DICEA e CMEMS-WAC006-012. In aggiunta, a titolo comparativo, sono riportati nelle figure della presente sezione i dati estratti dei modelli MED6MIN e MED2MIN di IFREMER. Il progetto MARC-IFREMER (<http://marc.ifremer.fr/>) è costituito da un insieme di modelli implementati con il codice numerico WaveWatchIII e gestiti dall'agenzia francese IFREMER, operativi in modalità previsionale in diverse aree oceaniche e mediterranee. Il database MED6MIN, in questo ambito, raccoglie dati relativi all'intero mediterraneo, con una griglia di calcolo regolare con risoluzione spaziale di 6 minuti e risoluzione temporale di 3 ore. Sono disponibili dati dal 2012 ad oggi. Il database MED2MIN ha invece una griglia di calcolo con risoluzione di 2 minuti.

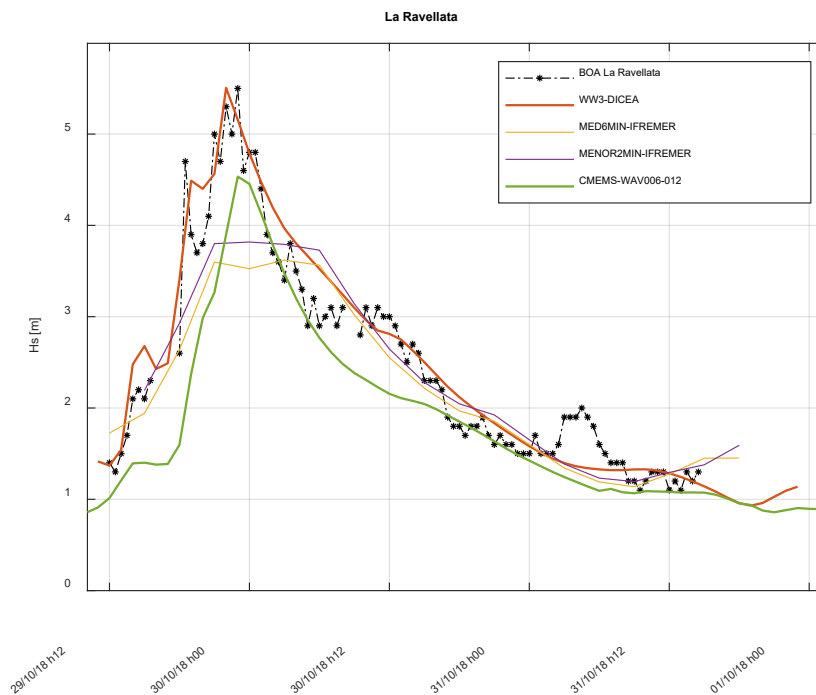


Figura 11: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "La Ravellata" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.

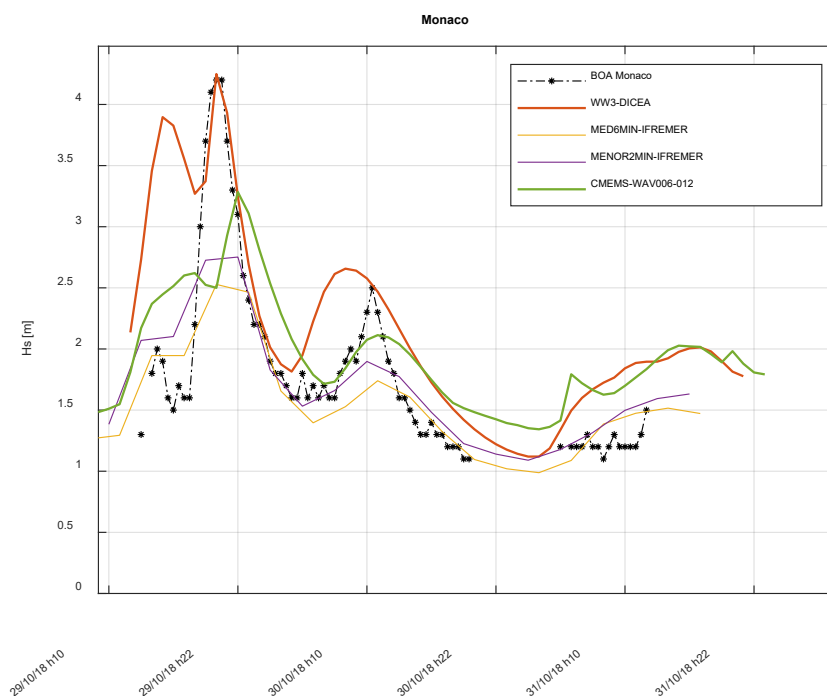


Figura 12: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "Monaco" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.

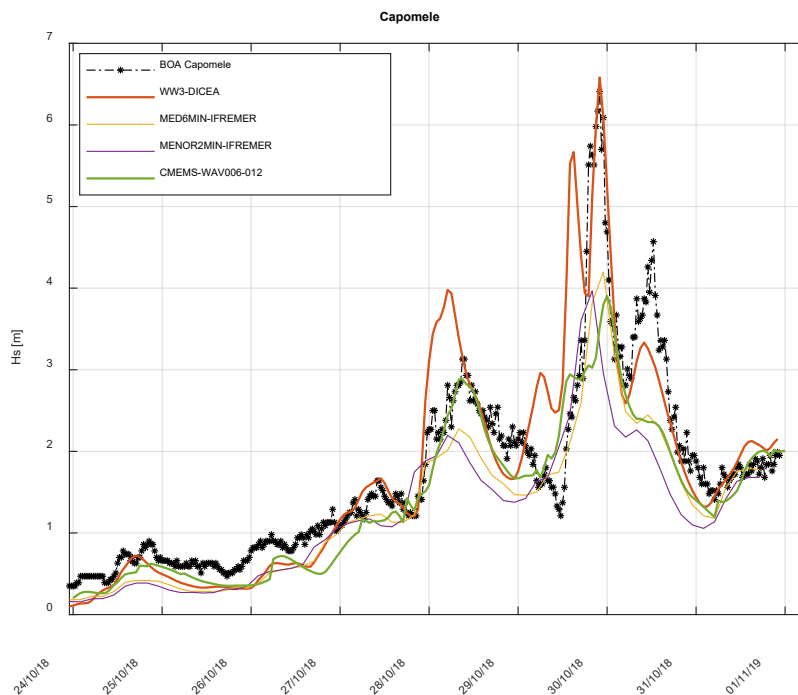


Figura 13: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "Capomele" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.

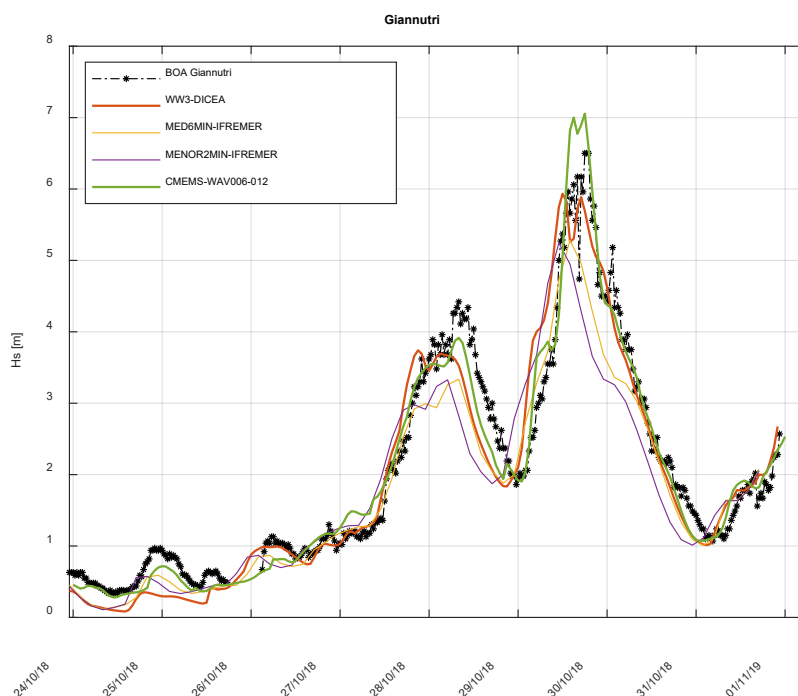


Figura 14: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "Giannutri" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.

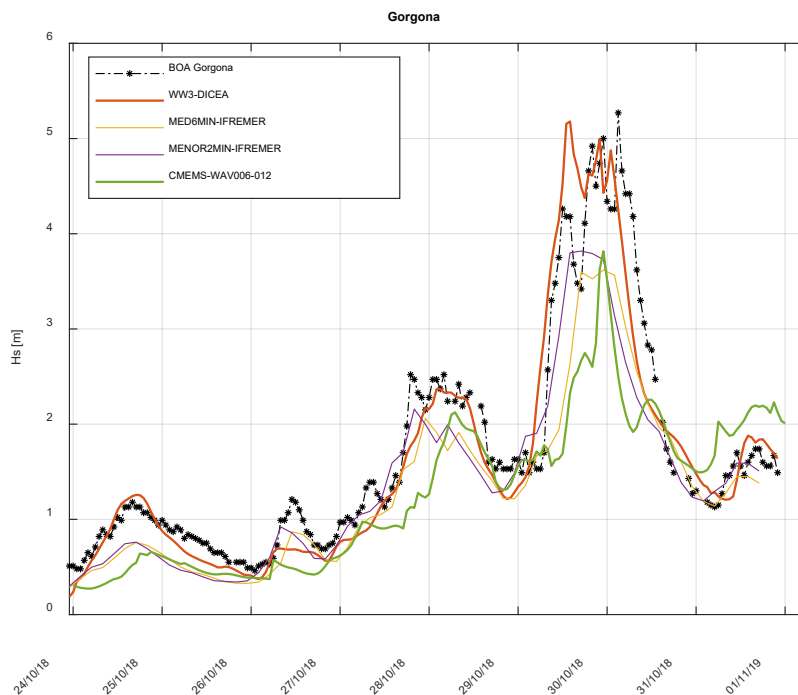


Figura 15: Registrazione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 presso l'ondametro di "Gorgona" e previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN e CMEMS-WAV006-012.

3.2. LA MAREGGIATA DEL 29-30 OTTOBRE 2018 AL LARGO DEL MARINA DI VARAZZE

La ricostruzione della mareggiata al largo del Marina di Varazze, così come estratta dal modello WW3-DICEA, è riportata in Figura 16.

La mareggiata, al largo, vede una direzione di provenienza variabile fra 135°N e 190°N . È possibile individuare un primo picco di altezza significativa, con valore $H_s=5.6$ m circa, corrispondente ad onde provenienti dalla direzione $135-140^{\circ}\text{N}$, verificatosi alle ore 15 circa del 29 ottobre 2018. Un secondo picco, verificatosi alle ore 23 circa del giorno 29 ottobre 2018, ha altezza significativa $H_s=5.4$ m e corrisponde ad onde provenienti dalla direzione 180°N circa. Il primo picco è associato ad onde con un periodo $T_{m-1,0}$ di circa 9 s (con periodo di picco T_p pari a circa 10-11 s). Il secondo picco è associato ad onde con un periodo medio $T_{m-1,0}$ di circa 10 s, con un periodo di picco T_p di circa 11.2 s.

La mareggiata è stata caratterizzata, complessivamente, da valori di altezza d'onda significativa superiori a 3 m per una durata consecutiva di circa 16 ore (dalle ore 12 circa del giorno 29 ottobre, fino alle ore 04 circa del giorno 30 ottobre 2018). Valori di altezza d'onda significativa superiori alla soglia dei 2 m si sono osservati per 37 ore consecutive circa. È da sottolinearsi come la durata della mareggiata sia un parametro di primaria importanza nella determinazione dell'effetto sollecitante della stessa su una struttura marittima: a parità di altezza

significativa, una mareggiata con durata superiore ad un'altra si caratterizza per avere una probabilità maggiore che si presentino singole onde con altezza massima fino al doppio della significativa.

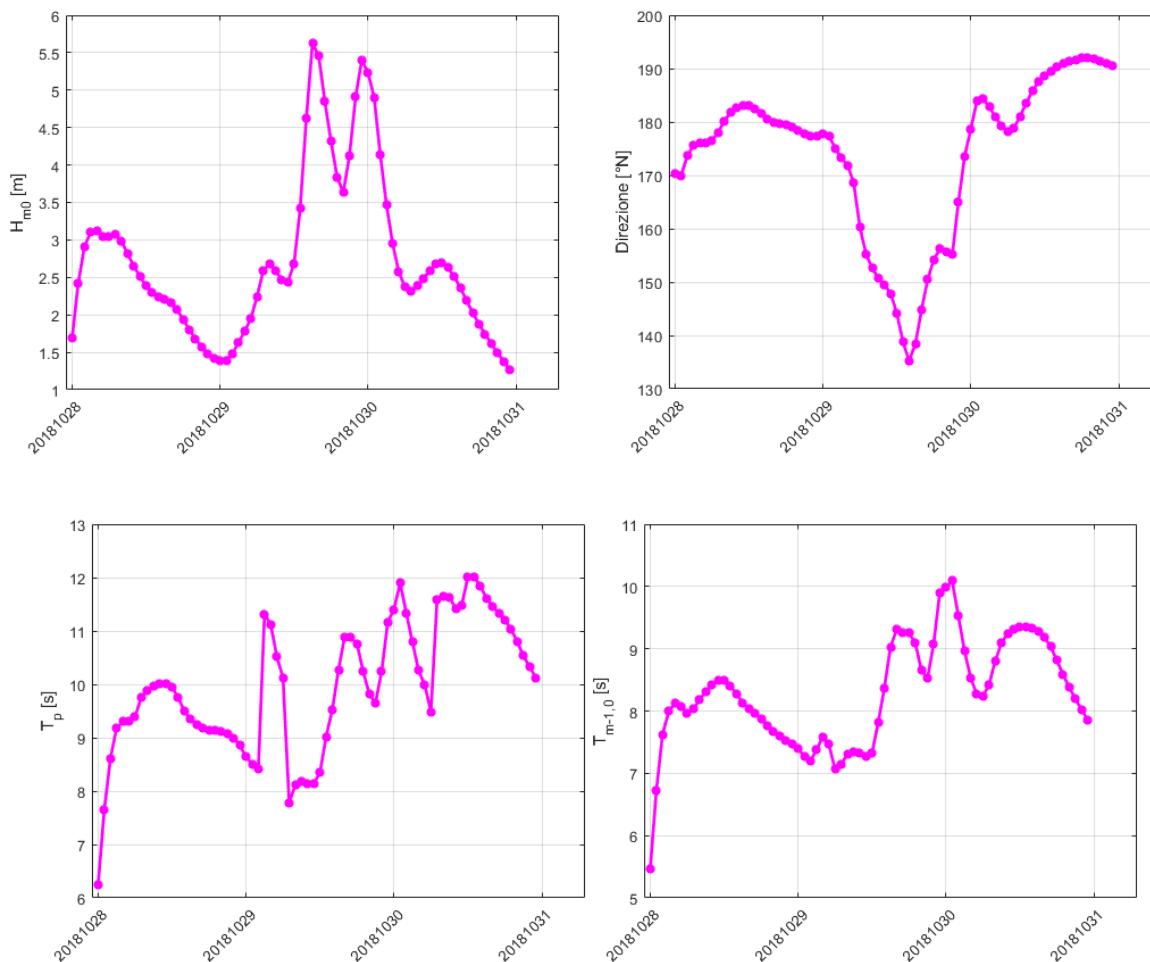


Figura 16: Ricostruzione della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 con il modello WW3-DICEA al largo del Marina di Varazze: altezza significativa (H_{m0}), direzione (Dir), periodo di picco (T_p) e periodo medio ($T_{m-1,0}$).

In Figura 17 è riportata la serie temporale dell'altezza significativa e del periodo di picco durante i giorni del 29, 30 ottobre 2018 così come estratta dal modello CMEMS-WAV006-012. In questo caso, il picco di altezza significativa ha raggiunto i 5.4 m con periodo di picco di circa 9.2 s e direzione di provenienza $185^\circ N$, i.e. la direzione lungo la quale si ha il maggior fetch efficace per il paraggio in esame.

Il modello CMEMS-WAV006-012, quindi, sostanzialmente conferma il valore dell'altezza significativa al picco della mareggiata raggiunto da direzioni prossime ai $180^\circ N$ stimato dal modello WW3-DICEA (i.e., $H_s=5.4$ m), seppur mostrando

valori sensibilmente inferiori del primo picco, avente direzione di provenienza compresa fra 135-140°N.

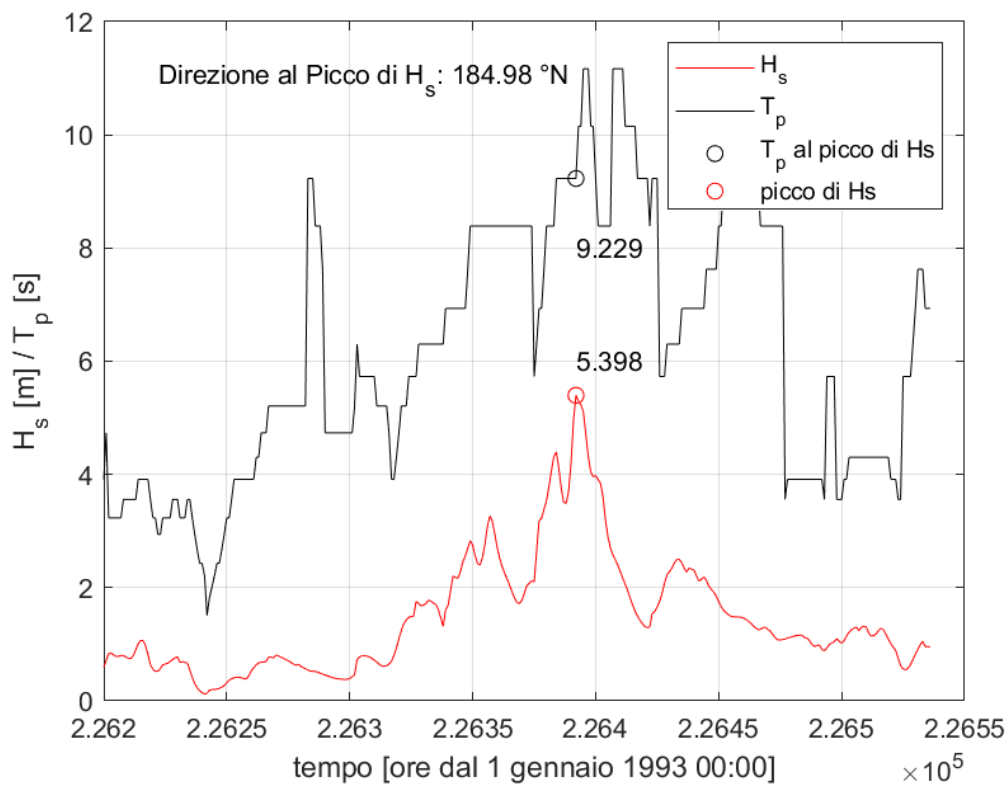


Figura 17: Mareggiata del 29-30 Ottobre 2018, al largo del Marina di Varazze, come ricostruita dal modello CMEMS-WAV006-012: Andamento temporale dell'altezza significativa (H_s) e del periodo di Picco (T_p).

3.3. LA MAREGGIATA DEL 29-30 OTTOBRE 2018 A COSTA IN FONDALI ANTISTANTI IL MARINA DI VARAZZE

Si riportano in questa sezione i risultati ottenuti propagando a costa la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 utilizzando le seguenti combinazioni di modelli (per le caratteristiche dei modelli si rimanda alla *Sezione 1*):

- 1) Dati al largo forniti modello WW3-DICEA e propagazione a costa con il modello spettale MIKE21-SW⁵;
- 2) Dati al largo forniti dal modello CMEMS-WAV006-012 e propagazione a costa tramite il modello ONDA-DICEA.

Secondo la ricostruzione con la catena modellistica 1) WW3DICEA + MIKE21-SW (Figura 18 e Figura 19), la mareggiata, nella propagazione a costa, subisce l'azione di marcati fenomeni di rifrazione che avvengono prima che le onde raggiungano i fondali di 10 metri, che portano i fronti d'onda ruotare progressivamente. Durante la mareggiata, il moto ondoso a costa ha avuto direzioni comprese fra circa 130 e 150°N (Figura 19).

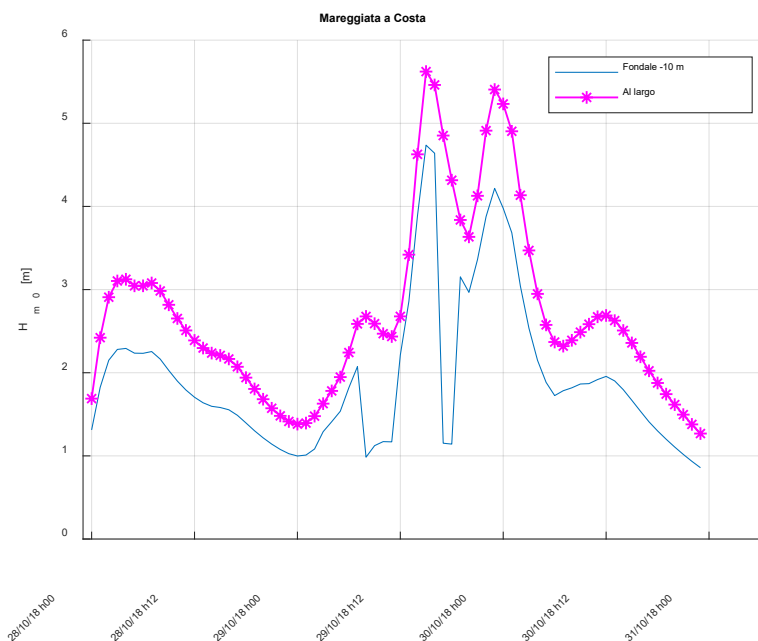


Figura 18: Altezza d'onda significativa per la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 al largo del Marina di Varazze e sui fondali con profondità 10 m in prossimità dell'area del Marina di Varazze. Risultati ottenuti applicando la catena modellistica WW3DICEA + MIKE21-SW.

⁵ Si ricorda che, come specificato in *Sezione 1*, tali simulazioni sono state inizialmente condotte per uno studio specifico riguardante la ricostruzione del clima ondoso e della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 nei pressi dell'area di Cala Cravieu (SV), e si ritengono sufficientemente rappresentative anche delle condizioni a costa per il Marina di Varazze in considerazione della limitata distanza fra le due località (2.5 km), della esposizione simile dei due paraggi e della profondità dei fondali nelle zone in esame.

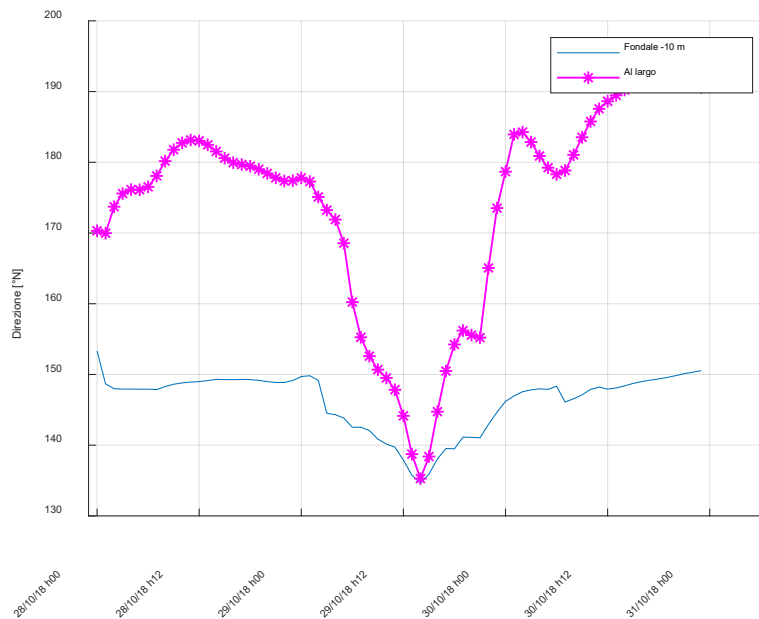


Figura 19: Direzione di provenienza del moto ondoso per la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 al largo e sui fondali con profondità 10 m in prossimità dell'area del Marina di Varazze. Risultati ottenuti applicando la catena modellistica WW3DICEA + MIKE21-SW.

I fenomeni di rifrazione e di frangimento che si verificano nella propagazione a costa hanno determinato una riduzione della massima altezza d'onda significativa rispetto ai valori al largo, in particolare:

- Il primo picco di altezza significativa al largo ($H_s=5.6$ m circa, con onde provenienti da $135-140^\circ N$), verificatosi intorno alle 15 del 29 ottobre 2018, giunge sui fondali a profondità 10 m con un valore di H_s di circa 4.7 m, subendo quindi una considerevole riduzione in altezza per fenomeni di interazione con il fondale (Figura 18).
- Il secondo picco di altezza significativa al largo ($H_s=5.4$ m, con provenienza da $180^\circ N$ circa), verificatosi alle 23 del 29 ottobre, giunge sui fondali a profondità 10 m antistanti la diga con $H_s=4.2$ m circa e direzione di provenienza $145^\circ N$ (Figura 18).
- La mareggiata, sui fondali di 10 m, ha presentato altezza significativa superiore ai 3 m per circa 10 ore, non continuative (Figura 18).

La catena modellistica 2) CMEMS-WAV006-012 + ONDA-DICEA è stata utilizzata per propagare i moti ondosi fino ai fondali antistanti la diga foranea del Marina di Varazze, utilizzando una griglia di calcolo strutturata con maglia di dimensione 5 m per 5 m. Il moto ondoso è stato estratto nei punti P1 e P2, rispettivamente sulle profondità di -20 m (in mezzera della diga) e -10 m (in prossimità della testata della foranea), come illustrato in Figura 20.

La ricostruzione della propagazione della mareggiata a costa, così come riprodotta con la catena modellistica 2) nei punti P1 e P2 è riportata in Figura 21 e in Figura 22, rispettivamente.



Figura 20: Localizzazione dei punti di estrazione delle caratteristiche del moto ondoso a costa utilizzati con la catena modellistica CMEMS-WAV006-012 e ONDA-DICEA nel presente studio: P1, sui fondali a profondità -20 m sull'asse di mezzeria della diga foranea del Marina di Varazze, e P2, sui fondali con profondità -10 m in prossimità della testata del Marina di Varazze.

Nel punto P1, la massima altezza d'onda significativa raggiunta durante la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 è di 4.5 m circa, con direzione di provenienza da 177°N. Tale valore risulta quindi di entità confrontabile con la massima altezza d'onda stimata, durante la mareggiata, applicando la catena modellistica 1) WW3DICEA + MIKE21-SW (che risulta pari a circa 4.7 m).

È opportuno notare come nel punto P2, in prossimità della testa della diga foranea, fenomeni di interazione fra il campo d'onda diffratto al di fuori della zona

d'ombra della diga foranea e quello incidente possano portare ad avere altezze d'onda anche superiori a quelle verificatesi al largo (in questo caso, la massima altezza significativa durante la mareggiata è pari a 5.9 m, Figura 22). Un tale fenomeno non potrebbe essere identificabile con modelli numerici differenti dal modello ONDA-DICEA, i.e.: modelli che non utilizzano equazioni fisicamente basate per simulare anche il processo della diffrazione, quale ad esempio i modelli spettrali tra i quali anche il modello MIKE21-SW.

La Figura 23 riporta la Mappa vettoriale del moto ondoso al picco della mareggiata di ottobre 2018 dalla quale si notano gli importanti fenomeni di rifrazione dei fronti d'onda che avvengono nel percorso di avvicinamento a costa.

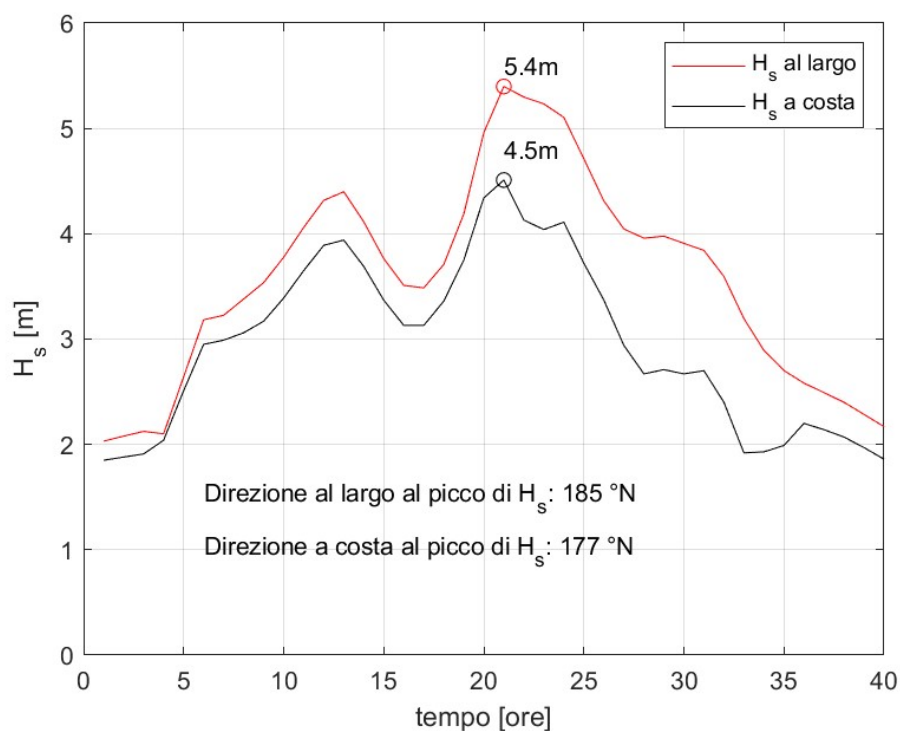


Figura 21: Altezza d'onda significativa al largo e a costa per la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 nei pressi del Marina di Varazze ottenuta tramite l'utilizzo della catena modellistica basata sui modelli numerici CMEMS-WAV006-012 (condizioni al largo) e ONDA3-DICEA (propagazione a costa): punto P1.

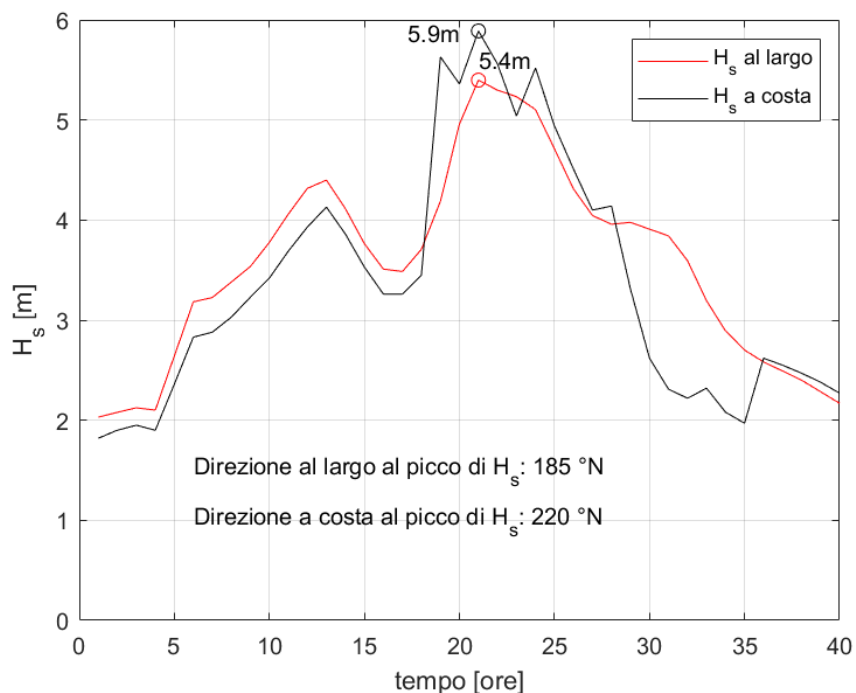


Figura 22: Altezza d'onda significativa al largo e a costa per la mareggiata del 29-30 ottobre 2018 nei pressi del Marina di Varazze ottenuta tramite la catena modellistica basata sui modelli numerici CMEMS-WAV006-012 (condizioni al largo) e ONDA3-DICEA (propagazione a costa): punto P2 in prossimità della testa della diga foranea.

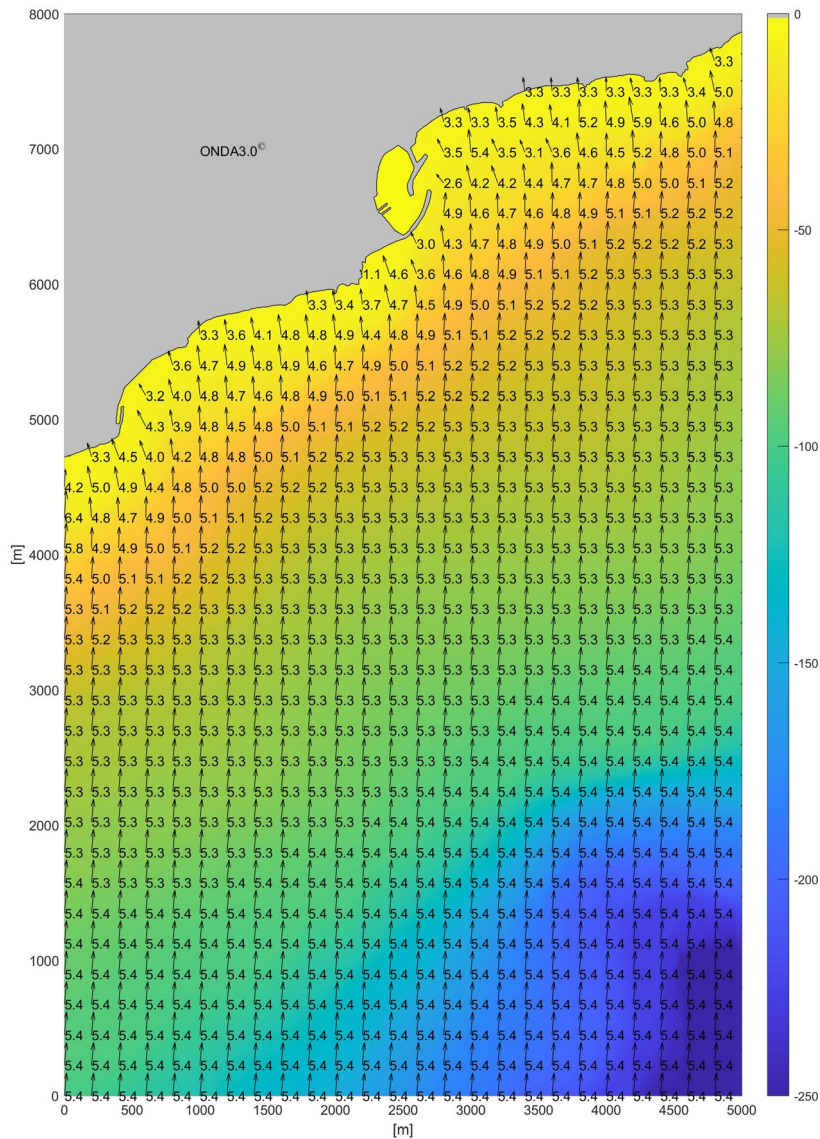


Figura 23: Mappa vettoriale del moto ondoso al picco della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 (Hs al largo 5.4 m e direzione di provenienza da 180°N circa). La scala di colore rappresenta la profondità del fondale, in metri.

4. ANALISI STATISTICA DELLE ONDE ESTREME AL LARGO

L'analisi statistica delle onde estreme è stata effettuata con il metodo detto POT (*Peak Over Threshold*). Con questo metodo, gli eventi estremi utilizzati nell'analisi vengono individuati come picchi al di sopra di un valore soglia (un esempio in Figura 24).

Nelle analisi documentate nel presente rapporto tecnico, il valore della soglia è stato adottato in seguito ad una preliminare analisi di sensitività che ha mostrato la sostanziale ininfluenza, sui risultati finali, della scelta della soglia nell'intorno del valore scelto. Per ciascuno dei picchi così ottenuti è calcolata la probabilità campionaria (P^*) che la relativa altezza d'onda (H) non venga superata. A questo fine come stimatore di probabilità si usa il rapporto tra numero d'ordine del picco di altezza d'onda in esame all'interno della serie dei picchi riordinata dal maggiore al minore e il numero totale dei picchi meno uno.

Come funzione interpolante degli eventi estremi è stata utilizzata la distribuzione di Weibull (Eq. 2).

$$P=1-\exp\left[-\left(\frac{H-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2)$$

dove i coefficienti β , γ e μ sono i parametri di scala e di posizione della funzione di Weibull.

Individuazione dei primi 9 picchi di H_s oltre la soglia di 2.5 m Settore: 280-300

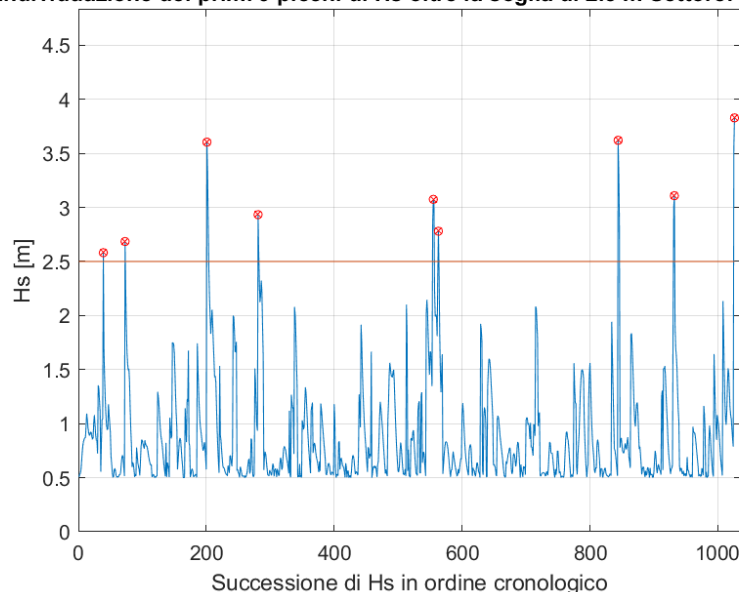


Figura 24: Esempio di individuazione dei picchi di altezza d'onda oltre la soglia di 2.5 m.

I coefficienti β e γ sono stati determinati mediante regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P^* , H) posto $\mu=1$. Nota la distribuzione di Weibull, sono state calcolate le altezze d'onda per fissati tempi di ritorno nonché per fissati livelli di rischio e orizzonti temporali del progetto.

Il tempo di ritorno T_R è il valor medio dell'intervallo di tempo che intercorre fra due superamenti successivi di un valore di altezza d'onda fissato ed è legato alla probabilità P dalla relazione:

$$P = 1 - \frac{1}{\lambda T_R} \quad (3)$$

dove il coefficiente λ è il numero medio di eventi estremi in un anno (i.e. il numero di mareggiate, con picco di altezza maggiore del valore soglia, che mediamente si sono presentate in un anno) su cui si basa l'analisi statistica.

Dato i legami fra P e H forniti dalla distribuzione di Weibull, vengono determinate le relazioni che forniscono il valore di altezza d'onda associato ad un assegnato tempo di ritorno T_R :

$$H_{T_R Weibull} = \gamma_{Weibull} + \beta_{Weibull} \left(-\ln(1-P) \right)^{\frac{1}{\alpha}} = \gamma_{Weibull} + \beta_{Weibull} \left(-\ln \left(\frac{1}{\lambda T_R} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right) \quad (4)$$

Nel progetto di un'opera, l'altezza d'onda di progetto viene comunemente scelta sulla base di un tempo di ritorno ritenuto accettabile. È tuttavia necessario fornire anche una misura del rischio che negli anni a seguire il valore dell'altezza d'onda di progetto possa essere superato, con conseguenti danneggiamenti dell'opera. È quindi possibile dare una quantificazione statistica del rischio, inteso come probabilità che una certa altezza d'onda venga superata entro un prefissato orizzonte temporale n , esprimendo il legame fra la probabilità (P) ed il rischio (R) come:

$$R = 1 - P^{\lambda \cdot n} \quad (5)$$

Dalla definizione della probabilità secondo la distribuzione adottata si ottiene l'altezza d'onda in funzione dell'orizzonte di progetto e del rischio di superamento come descritto in Eq. 6

$$H_{R Weibull} = \gamma_W + \beta_W \left(-\ln(1-P) \right)^{\frac{1}{\alpha}} = \gamma_W + \beta_W \left(-\ln \left(1 - \sqrt[n]{1-R} \right) \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

L'analisi statistica delle onde estreme è stata applicata alla serie storica di dati di *hindcasting* relativa al periodo 1993 - 2021 è stata eseguita per il settore di traversia, di apertura 110°, compreso fra 110°N e 220°N.

L'analisi degli eventi estremi è stata condotta individuando, quali estremi, i picchi di altezza d'onda significativa superiori alla soglia $H_{threshold}$ assunta pari a 2.5 m. La regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P^*, H) , è riportata in Figura 25. Le altezze d'onda significative in acque alte relative a tempi di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 anni, ottenute con la distribuzione di Weibull sono riportate in Tabella 9.

L'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 50 anni è pari a $H_{m0}=6.1$ m e quella con tempo di ritorno pari a 100 anni è pari a $H_{m0}=6.5$ m. Le curve di isorischio ottenute con la distribuzione di Weibull sono riportate in Figura 26.

Tabella 9: Altezza d'onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) al largo del Marina di Varazze per il settore 110-220°N ottenuta con la distribuzione di Weibull, adottando una soglia per la definizione dei picchi pari a $H_t=2.5$ m.

	Tempo di ritorno TR [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
Settore 110-220°N H_{m0} [m]	3.8	4.2	4.8	5.2	5.5	6.1	6.5



Figura 25 - Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Weibull per il settore 110-220°N.

Curve di Isorischio Distribuzione di Weibull Settore: 110-220 Parametro: 1

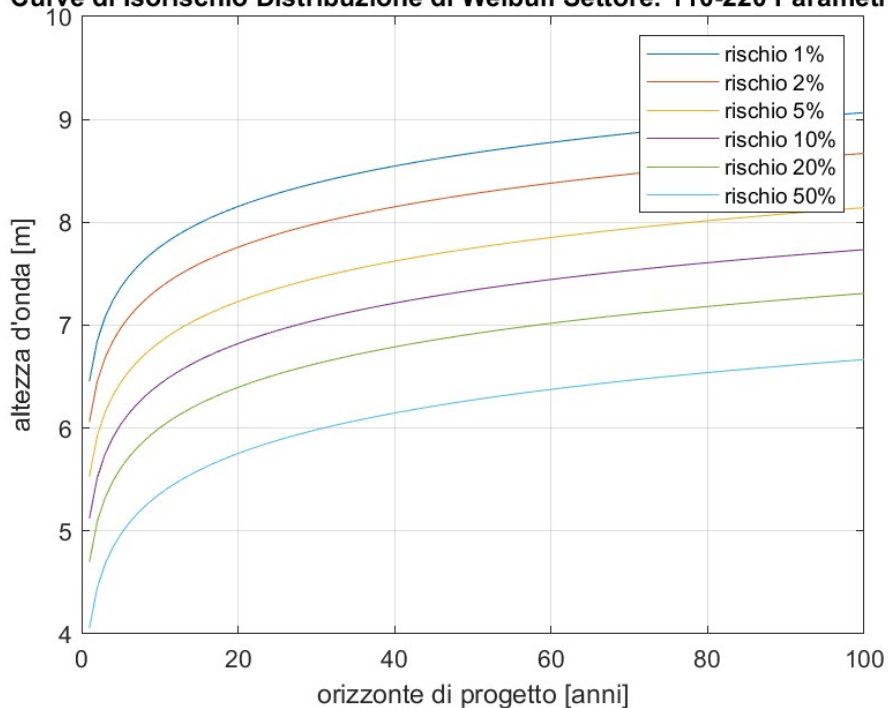


Figura 26: Altezze d'onda significative al largo del Marina di Varazze in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con la distribuzione di Weibull per il settore 110-220°N.

5. ANALISI STATISTICA DELLE ONDE ESTREME A COSTA

L'analisi statistica delle onde estreme a costa è stata condotta con riferimento ai dati di moto ondoso propagati con la catena modellistica 2) CMEMS-WAV006-012 e ONDA-DICEA (si rimanda alla *Sezione 1* per ulteriori dettagli circa i numerici utilizzati).

In particolare, con riferimento al periodo 1° gennaio 1993 – 30 giugno 2021, sono stati propagati a costa tutti i dati di moto ondoso aventi, al largo, altezza significativa superiore a 1.9 m. Successivamente, i moto ondosi sui fondali a profondità -20 m del punto P1 (Figura 20) sono stata analizzati con il metodo POT presentato in Sezione 4, individuando, quali estremi, i picchi di altezza d'onda significativa superiori alla soglia H_t assunta pari a 2.5 m.

Le altezze d'onda significative in acque alte relative a tempi di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 anni, ottenute con la distribuzione di Weibull sono riportare in Tabella 10. La regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P^*, H) , è riportata in Figura 27.

L'altezza d'onda significativa a costa, sui fondali con profondità pari a -20 m in prossimità dell'asse di mezzera della diga Varazze (Figura 20), con tempo di ritorno 50 anni è pari a $H_{m0}=4.6$ m e quella con tempo di ritorno pari a 100 anni è pari a $H_{m0}=5.0$ m.

Le curve di isorischio ottenute con la distribuzione di Weibull sono riportate in Figura 28.

Tabella 10. Altezza d'onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) al largo del Marina di Varazze per il settore 110-220°N ottenuta con la distribuzione di Weibull, adottando una soglia per la definizione dei picchi pari a $H_t=2.5$ m.

	Tempo di ritorno TR [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
Settore 110-220°N H_{m0} [m]	2.8	3.2	3.6	3.9	4.2	4.6	5.0

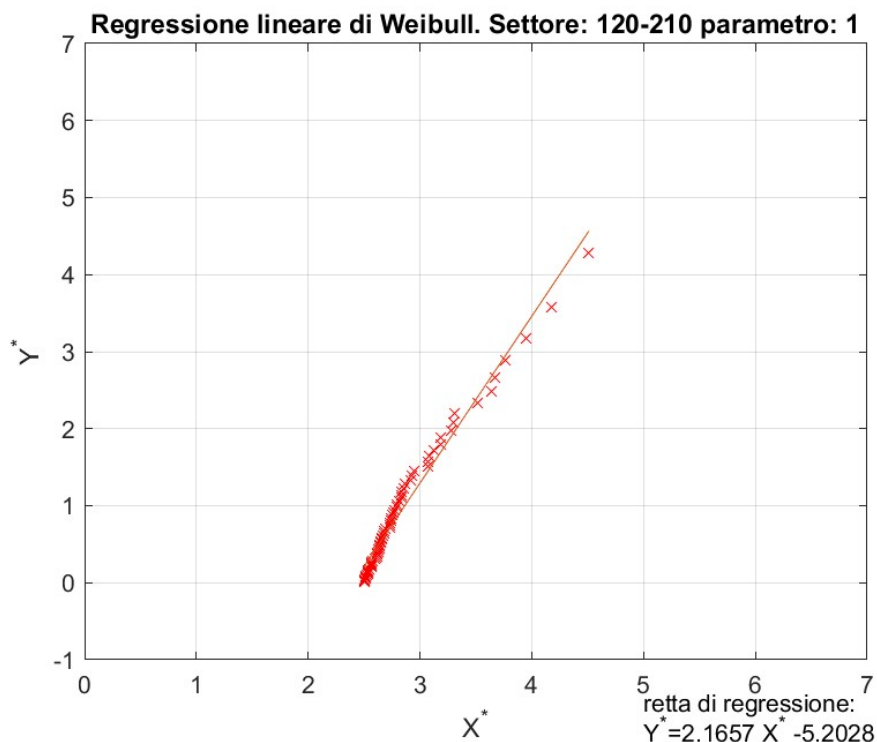


Figura 27: Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Weibull per le onde propagate a coste e provenienti al largo dal settore 110-220°N.

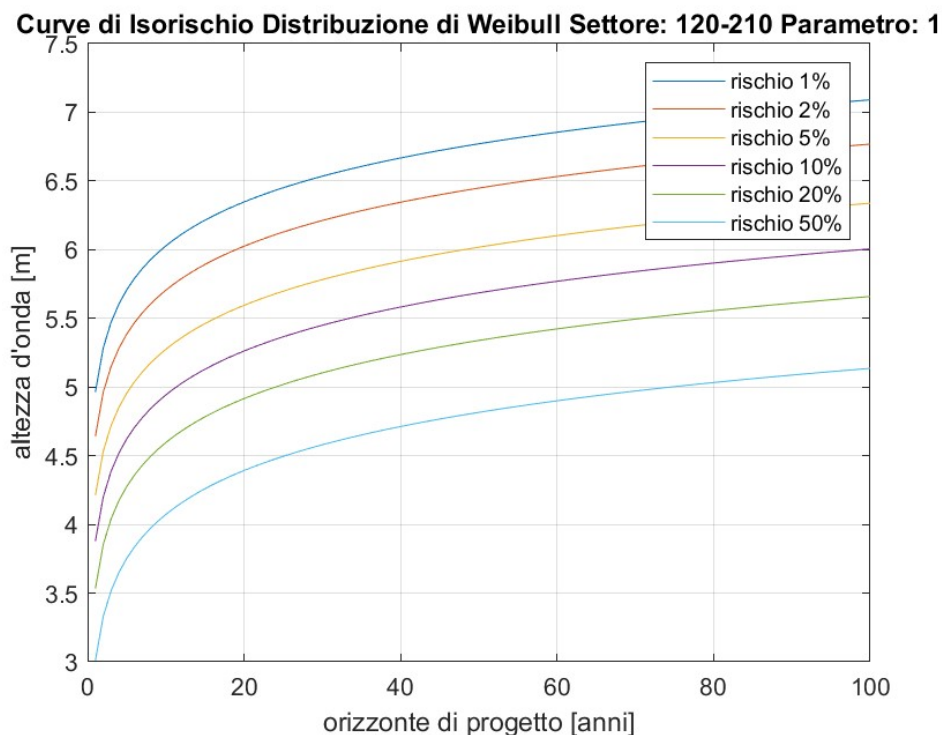


Figura 28: Altezze d'onda significative a costa del Marina di Varazze in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con la distribuzione di Weibull per i moti ondoso provenienti al largo dal settore 110-220°N.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente studio ha avuto lo scopo di analizzare nel dettaglio il clima meteomarinario del paraggio costiero del Marina di Varazze (SV), includendo l'analisi degli estremi al largo e a costa e una ricostruzione e caratterizzazione della mareggiata che ha colpito la costa ligure in data 29-30 ottobre 2018.

Il verificarsi dell'evento dell'ottobre 2018, mai eguagliato nella zona in termini di altezza significativa almeno in relazione al periodo per il quale sono disponibili i dati ondometrici, determina la necessità di un aggiornamento dell'analisi statistica dei moti ondosi estremi rispetto agli studi condotti ante mareggiata del 2018.

Nel presente studio sono stati utilizzati e confrontati dati provenienti da differenti catene di modellistica numerica, con lo specifico obiettivo di mettere in luce le differenze relative, indice della possibile incertezza del dato assunto come base per la progettazione delle nuove opere e della conseguente necessità di adottarne stime opportunamente cautelative.

Per quanto riguarda la ricostruzione della mareggiata di ottobre 2018 a costa sui fondali antistanti il Marina di Varazze, la modellistica numerica permette di stimare massime altezze d'onda significative comprese fra i 4.5 m di fronte al tronco della diga e 5.9 m in testata, con persistenza di oltre 10 ore di altezze significative superiori ai 3 m. In particolare, il valore massimo di 5.9 m è addirittura superiore al valore massimo al largo e avviene in una ristretta area in prossimità della testata della diga foranea come risultato dell'interazione tra il campo d'onda diffratto dalla testata e quello incidente.

Sui fondali a profondità di -20 m di fronte al tronco della diga foranea l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 50 anni è pari a $H_s=4.6$ m (considerando la funzione estremante di Weibull), associabile ad un periodo di picco T_p fino a circa 12 s. L'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno di 100 anni è pari a $H_s=5.0$ m circa.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] The WAVEWATCH III® Development Group (WW3DG), 2016: User manual and system documentation of WAVEWATCH III, R version 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. Available at

<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf> (accessed 23/01/2019).

[2] Pelli, D., 2018, Nested Modelling of wave processes from deep to shallow water: Building of an operational wave model system. PhD Thesis. University of Florence and University of Braunschweig.

[3] NOAA - <https://governmentshutdown.noaa.gov/>

[4] MIKE21, Spectral Wave Module, Scientific Documentation, http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf

[5] Cappiotti, L., 2003, *Interazione onda-corrente*. PhD thesis, Università degli Studi di Firenze, pp. 140.

[6] Kirby J.T., 1986, *Rational approximations in the parabolic equation method for water waves*. Coastal Eng., 10: 355-378.

[7] Battjes J. A. e Janssen J.P.F.M., 1978, *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng., Hamburg, ASCE ed., 1, pp. 569-587.

[8] Putnam J.A. e Johnson J.W., 1949, *The dissipation of wave energy by bottom friction*. Trans. Am. Geoph. Union, 30: 67-74.

[9] Hirsch C., 1991, *Numerical Computation of Internal and External Flows*. John Wiley and Sons, New York.

[10] <https://geoportal.regione.liguria.it/>