

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 1: CONDIZIONI METEOMARINE AL LARGO  
ACQUISIZIONE, VALIDAZIONE E ANALISI DEI DATI

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9 | 0 | 0 | 3 | S | R | 1 | 0 | 1 | 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](http://www.modimar.it)

### Mandante

**TECHNITAL S.p.a.**



Via Carlo Cattaneo, 20 - 37121 VERONA  
[www.technital.it](http://www.technital.it)

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

## Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale

ACCORDO QUADRO 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

# S1

## Studio Meteomarino

**VOLUME 1: CONDIZIONI METEOMARINE AL LARGO  
ACQUISIZIONE, VALIDAZIONE E ANALISI DEI DATI**

|        |                  |                               |
|--------|------------------|-------------------------------|
| 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 101 0

DATA 17/06/2019

STATO Emissione per commenti del Cliente

|                   |                                                                                         |           |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capitolo 1</b> | <b>Premesse.....</b>                                                                    | <b>1</b>  |
| 1.1               | Introduzione .....                                                                      | 1         |
| 1.2               | Obiettivi dello studio .....                                                            | 1         |
| 1.3               | Contenuto del presente rapporto .....                                                   | 2         |
| <b>Capitolo 2</b> | <b>Dati meteomarini utilizzati .....</b>                                                | <b>4</b>  |
| 2.1               | A. Dati di vento .....                                                                  | 4         |
| 2.2               | B. Dati di moto ondoso .....                                                            | 5         |
| 2.3               | C. Dati mareografici .....                                                              | 6         |
| 2.4               | D. Dati batimetrici e topografici .....                                                 | 6         |
| <b>Capitolo 3</b> | <b>Inquadramento geografico .....</b>                                                   | <b>7</b>  |
| 3.1               | Fetch geografico ed efficace .....                                                      | 8         |
| <b>Capitolo 4</b> | <b>Analisi e validazione dei dati di vento .....</b>                                    | <b>13</b> |
| 4.1               | Dati vento al largo ricostruiti dal NOAA .....                                          | 13        |
| 4.2               | Dati di vento ricostruiti dal DICCA .....                                               | 15        |
| 4.3               | Dati di vento della stazione dell'Isola di Palmaria .....                               | 17        |
| 4.4               | Dati di vento misurati dalla stazione meteo ARPAL di Monte Rocchetta .....              | 18        |
| 4.5               | Dati di vento misurati dalla stazione meteo ARPAL di Porto Venere .....                 | 19        |
| 4.6               | Dati di vento misurati dalla stazione mareografica RMN di La Spezia .....               | 19        |
| 4.7               | Dati di vento misurati dalla stazione meteo di Marina di Carrara .....                  | 22        |
| <b>Capitolo 5</b> | <b>Analisi e validazione dei dati ondametrici .....</b>                                 | <b>24</b> |
| 5.1               | Caratteristiche delle serie di dati ondametrici disponibili .....                       | 24        |
| 5.2               | Dati in ricostruzione forniti dal NOAA .....                                            | 25        |
| 5.3               | Registrazioni ondametriche della boa RON di La Spezia .....                             | 26        |
| 5.4               | Dati in ricostruzione forniti dal DICCA al largo di La Spezia .....                     | 29        |
| 5.5               | Registrazioni ondametriche della boa Gorgona .....                                      | 32        |
| 5.6               | Dati in ricostruzione DICCA al largo di Livorno .....                                   | 35        |
| 5.7               | Registrazioni ondametriche all'esterno del porto di Marina di Carrara .....             | 38        |
| 5.8               | Conclusioni .....                                                                       | 40        |
| <b>Capitolo 6</b> | <b>Calibrazione dei dati di moto ondoso del DICCA-WWIII .....</b>                       | <b>41</b> |
| 6.1               | Analisi e calibrazione degli eventi estremi ricostruiti dal DICCA-WWIII .....           | 42        |
| <b>Capitolo 7</b> | <b>Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo .....</b>            | <b>47</b> |
| 7.1               | Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati .....                  | 48        |
| 7.2               | Metodo dei massimi annuali .....                                                        | 49        |
| 7.3               | Metodo POT (Peaks Over Threshold) .....                                                 | 57        |
| 7.4               | Conclusioni .....                                                                       | 63        |
| <b>Capitolo 8</b> | <b>Clima di moto ondoso al largo .....</b>                                              | <b>64</b> |
| 8.1               | Generazione del moto ondoso: correlazione vento/onda .....                              | 64        |
| 8.2               | Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda significativa e direzione ..... | 65        |
| 8.3               | Curva di durata .....                                                                   | 70        |
| 8.4               | Distribuzione degli eventi in relazione al periodo di picco del moto ondoso .....       | 70        |
| 8.5               | Anno climatico medio al largo .....                                                     | 74        |
| <b>Capitolo 9</b> | <b>Analisi e validazione dei dati mareografici .....</b>                                | <b>77</b> |
| 9.1               | Misure di livello mareografo RMN - La Spezia .....                                      | 78        |
| 9.2               | Misure di livello del mareografo Marina di Carrara .....                                | 79        |
| 9.3               | Tavole di marea I.I.M.M. ....                                                           | 81        |

# Capitolo 1 Premesse

## 1.1 Introduzione

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.

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.

## 1.2 Obiettivi dello studio

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.

Lo Studio Meteomarino è strutturato in tre distinti volumi:

### **Volume 1. Condizioni meteomarine al largo. Acquisizione, validazione e analisi dei dati**

- inquadramento geografico al largo e definizione del settore di traversia che lo contraddistingue. Determinazione dell'area di generazione efficace per il moto ondoso;
- caratterizzazione generale dei dati meteomarini utilizzati e loro fonte;
- validazione ed analisi dei dati di vento disponibili;
- validazione ed analisi dei dati di moto ondoso disponibili;
- calibrazione dei dati di moto ondoso al largo;
- analisi delle caratteristiche del moto ondoso al largo;
- analisi dei valori estremi di moto ondoso, su base statistica, per la definizione della legge di distribuzione dei valori estremi al largo;
- validazione ed analisi dei dati mareografici disponibili.

## Volume 2. Condizioni meteomarine per il paraggio di La Spezia

- esposizione del paraggio;
- analisi dei venti caratteristici per il paraggio in termini di direzione e intensità;
- sintesi delle caratteristiche del moto ondoso al largo;
- correlazione statistica tra gli eventi estremi di moto ondoso e tempi di ritorno;
- analisi dell'evento estremo del 29-30 Ottobre 2018;
- applicazione del modello di propagazione SWAN per il trasferimento del moto ondoso dal largo verso riva. Descrizione del modello e definizione delle condizioni al contorno;
- analisi del clima di moto ondoso sotto costa;
- valutazione delle variazioni del livello marino in funzione delle distinte componenti (astronomica e meteorologica).

## Volume 3. Condizioni meteomarine per il paraggio di Marina di Carrara

- esposizione del paraggio;
- analisi dei venti caratteristici per il paraggio in termini di direzione e intensità;
- sintesi delle caratteristiche del moto ondoso al largo;
- correlazione statistica tra gli eventi estremi di moto ondoso e tempi di ritorno;
- applicazione del modello di propagazione SWAN per il trasferimento del moto ondoso dal largo verso riva. Descrizione del modello e definizione delle condizioni al contorno;
- analisi del clima di moto ondoso sottocosta;
- valutazione delle variazioni del livello marino in funzione delle distinte componenti (astronomica e meteorologica).

### 1.3 Contenuto del presente rapporto

Il presente rapporto (**Studio Meteomarino Volume 1**) presenta i risultati delle attività di acquisizione, validazione e analisi dei dati e le analisi che hanno permesso di definire le condizioni meteomarine al largo.

Il paraggio geografico in cui ricadono i porti di La Spezia e Marina di Carrara è localizzato all'estremità orientale del Mar Ligure al confine tra la Regione Toscana e la Regione Liguria.

All'interno dell'area investigata sono state individuate diverse fonti di dati meteomarini. Sono presenti strumenti di misura che operano all'interno degli ambiti portuali (mareografi, anemometri) ed altri strumenti di misura, appartenenti a reti di monitoraggio regionali o nazionali, che consentono di disporre di dati di moto ondoso, al largo e sottocosta, e di misure di vento in diverse località.

Recentemente istituti di ricerca nazionali (Università di Genova) ed internazionali (U.S. NOAA) hanno inoltre operato un'analisi in ricostruzione dei dati di moto ondoso (*hindcasting*) con modelli di generazione e propagazione del moto ondoso a partire da modelli di circolazione

atmosferica. In tal modo è stato possibile ricostruire una serie continua di dati di moto ondoso che coprono un intervallo temporale compreso tra 30 e 40 anni.

Il presente rapporto contiene l'analisi e la validazione di tutti i dati meteomarini acquisiti per lo studio meteomarino.

In particolare per la definizione della serie storica di riferimento per la definizione del clima di moto ondoso al largo del paraggio in esame è stata condotta una procedura di calibrazione dei dati in ricostruzione basandosi sul confronto con le misure dirette di moto ondoso osservate dalla stazione ondometrica RON di La Spezia.

In seguito a questa procedura di calibrazione è stata effettuata l'analisi del clima di moto ondoso al largo e la valutazione, su base statistica, delle correlazioni tra i valori estremi di moto ondoso e i relativi tempi di ritorno.

## Capitolo 2 Dati meteomarini utilizzati

### 2.1 A. Dati di vento

Si riporta nella seguente tabella l'elenco dei dati di vento, costituiti da serie storiche, acquisiti e analizzati specificando se si tratta di dati ricostruiti (in reanalisi) mediante modelli meteorologici o di dati provenienti da misure dirette. Per ogni tipologia di dato si riporta la fonte, la descrizione sintetica del dato, la posizione geografica alla quale il dato si riferisce e il periodo di misura o ricostruzione.

**Tabella 2-1. Fonte e descrizione dei dati di vento**

| Dati in ricostruzione |                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                        |                        |              |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|
| Rif.                  | Fonte dati                                                                                                                                                                 | Descrizione                                                                                                                            | Posizione              | Periodo      |
| A.1                   | Università di Genova<br>Dipartimento di Ingegneria Civile,<br>Chimica e Ambientale (DICCA)<br>MeteOcean<br>WWII 40-Year Wave Hindcast<br><br>www3.dicca.unige.it/meteocean | Dati di vento ricostruiti con il modello di circolazione atmosferico WRF-ARW al largo di La Spezia                                     | 9.88 °E<br>43.95 °N    | 1979<br>2018 |
| A.2                   | United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)<br>www.noaa.gov                                                                                       | Dati di vento ricostruiti con il modello di circolazione atmosferico a scala globale NCEP - CFSR<br>Climate Forecast System Reanalysis | 9.666 °E<br>43.833 °N  | 1979<br>2009 |
| Dati misurati         |                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                        |                        |              |
| Rif.                  | Fonte dati                                                                                                                                                                 | Descrizione                                                                                                                            | Posizione              | Periodo      |
| A.3                   | Aeronautica Militare<br>(I.T.A.V. - C.N.M.C.A)                                                                                                                             | Dati di vento misurati dalla stazione meteo dell'Isola di Palmaria                                                                     | 9.840 °E<br>44.041 °N  | 1951<br>1977 |
| A.4                   | Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure (ARPAL)<br>www.arpal.gov.it                                                                                       | Dati di vento misurati dalla stazione meteorologica di Porto Venere (+40 m s.l.m.)                                                     | 9.835 °E<br>44.052 °N  | 2016<br>2018 |
| A.5                   | Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure (ARPAL)<br>www.arpal.gov.it                                                                                       | Dati di vento misurati dalla stazione meteorologica di Monte Rocchetta (+405 m s.l.m.)                                                 | 9.93 °E<br>44.07 °N    | 2009<br>2018 |
| A.6                   | Rete Mareografica Nazionale (RMN)<br>Stazione di La Spezia<br><br>http://dati.isprambiente.it/                                                                             | Dati di vento misurati dalla stazione mareografica RMN di La Spezia                                                                    | 9.857 °E<br>44.096 °N  | 2010<br>2015 |
| A.7                   | Autorità Portuale Marina di Carrara                                                                                                                                        | Dati di vento misurati dalla stazione meteorologica installata presso il molo sottoflutto del porto di Marina di Carrara (1)           | 10.042 °E<br>44.030 °N | 2006<br>2018 |

(1) posizione da confermare

## 2.2 B. Dati di moto ondoso

Si riporta nella seguente tabella l'elenco dei dati di moto ondoso, costituiti da serie storiche, acquisiti e analizzati specificando se si tratta di dati ricostruiti (in reanalisi) mediante modelli numerici che si basano su dati meteorologici o di dati provenienti da misure dirette. Per ogni tipologia di dato si riporta la fonte, la descrizione sintetica del dato, la posizione geografica alla quale il dato si riferisce e il periodo di misura o ricostruzione.

**Tabella 2-2. Fonte e descrizione dei dati di moto ondoso**

| Dati misurati         |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                            |                        |              |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|
| Rif.                  | Fonte dati                                                                                                                                                                                                            | Descrizione                                                                                                | Posizione              | Periodo      |
| B.1                   | Rete Ondametrica Nazionale (RON)<br>Boa di La Spezia<br><a href="http://dati.isprambiente.it/">http://dati.isprambiente.it/</a>                                                                                       | Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondametrica di La Spezia (RON 1.0-2.0-3.0)                          | 9.827 °E<br>43.929 °N  | 1989<br>2014 |
| B.2                   | Autorità Portuale Marina di Carrara                                                                                                                                                                                   | Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondametrica ubicata all'esterno del porto di Marina di Carrara      | 10.037 °E<br>44.022 °N | 2006<br>2011 |
| B.3                   | Regione Toscana<br>Servizio Idrologico Regionale (SIR)<br><a href="http://www.sir.toscana.it/">http://www.sir.toscana.it/</a>                                                                                         | Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondametrica della Gorgona                                           | 9.957°E<br>43.569 °N   | 2008<br>2019 |
| Dati in ricostruzione |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                            |                        |              |
| Rif.                  | Fonte dati                                                                                                                                                                                                            | Descrizione                                                                                                | Posizione              | Periodo      |
| B.4                   | Università di Genova<br>Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale<br>MeteOcean DICCA<br>WWIII 40-Year Wave Hindcast<br><a href="http://www3.dicca.unige.it/meteocean">www3.dicca.unige.it/meteocean</a> | Dati di moto ondoso ricostruiti con il modello di generazione e propagazione WWIII al largo di La Spezia   | 9.88 °E<br>43.95 °N    | 1979<br>2018 |
| B.5                   | Università di Genova<br>Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale<br>MeteOcean DICCA<br>WWIII 40-Year Wave Hindcast<br><a href="http://www3.dicca.unige.it/meteocean">www3.dicca.unige.it/meteocean</a> | Dati di moto ondoso ricostruiti con il modello di generazione e propagazione WWIII al largo di Livorno     | 43.59 °N<br>10.01 °E   | 1979<br>2018 |
| B.6                   | United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)<br><a href="http://www.noaa.gov">www.noaa.gov</a>                                                                                                | Dati di moto ondoso ricostruiti per il Mar Mediterraneo<br>WAVEWATCH III® Hindcast and Reanalysis Archives | 9.666 °E<br>43.833 °N  | 1979<br>2009 |

## 2.3 C. Dati mareografici

Si riporta nella seguente tabella l'elenco dei dati mareografici, costituiti da serie storiche, acquisiti e analizzati. Per ogni tipologia di dato si riporta la fonte, la descrizione sintetica del dato, la posizione geografica alla quale il dato si riferisce e il periodo di misura.

**Tabella 2-3. Fonte e descrizione dei dati mareografici**

| Rif. | Fonte dati                                                                                                                            | Descrizione                                                                                                    | Posizione              | Periodo      |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|
| C.1  | Rete Mareografica Nazionale (RMN)<br>Stazione di La Spezia<br><a href="http://dati.isprambiente.it/">http://dati.isprambiente.it/</a> | Dati di livello misurati dalla stazione mareografica RMN di La Spezia                                          | 9.857 °E<br>44.096 °N  | 2010<br>2015 |
| C.2  | Autorità Portuale Marina di Carrara                                                                                                   | Dati di livello misurati dalla stazione mareografica installata all'interno del porto di Marina di Carrara (1) | 10.042 °E<br>44.030 °N | 2014<br>2018 |
| C.3  | Istituto Idrografico<br>Marina Militare Italiana                                                                                      | Costanti armoniche di marea per i porti di Genova, La Spezia e Livorno                                         |                        |              |

(1) posizione da confermare

## 2.4 D. Dati batimetrici e topografici

Si riporta nella seguente tabella l'elenco dei dati batimetrici e topografici acquisiti e analizzati ai quali si è fatto riferimento per definire i fondali, la linea di costa e le opere costiere che caratterizzano le zone oggetto di studio e per la successiva implementazione dei modelli numerici di idrodinamica del moto ondoso.

**Tabella 2-4. Fonte e descrizione dei dati batimetrici e topografici utilizzati**

| Rif. | Fonte dati                             | Descrizione                                                                               |
|------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| D.1  | Istituto Idrografico Marina Militare   | Carta Nautica CN-03<br>Carta Nautica CN-04<br>Carta Nautica CN-115<br>Carta Nautica CN-60 |
| D.2  | Autorità Portuale Mar Ligure Orientale | Rilievo batimetrico rada di La Spezia<br>Aprile 2019                                      |
| D.3  | Portale Cartografico Regione Liguria   | Shape file della linea di costa                                                           |
| D.4  | Portale Cartografico Regione Toscana   | Shape file della linea di costa                                                           |

## Capitolo 3 Inquadramento geografico

Il paraggio costiero oggetto del presente studio meteomarino, in cui ricadono i porti di La Spezia e Marina di Carrara, è situato sulla costa occidentale della penisola italiana che si affaccia sul Mar Ligure Orientale (Figura 3.1), quindi geograficamente esposto in prevalenza agli eventi di moto ondoso provenienti dal II° e dal III° quadrante (SudOvest e SudEst).

Dal punto di vista amministrativo il tratto di costa in esame si trova a cavallo del confine tra la Regione Toscana e la Regione Liguria.

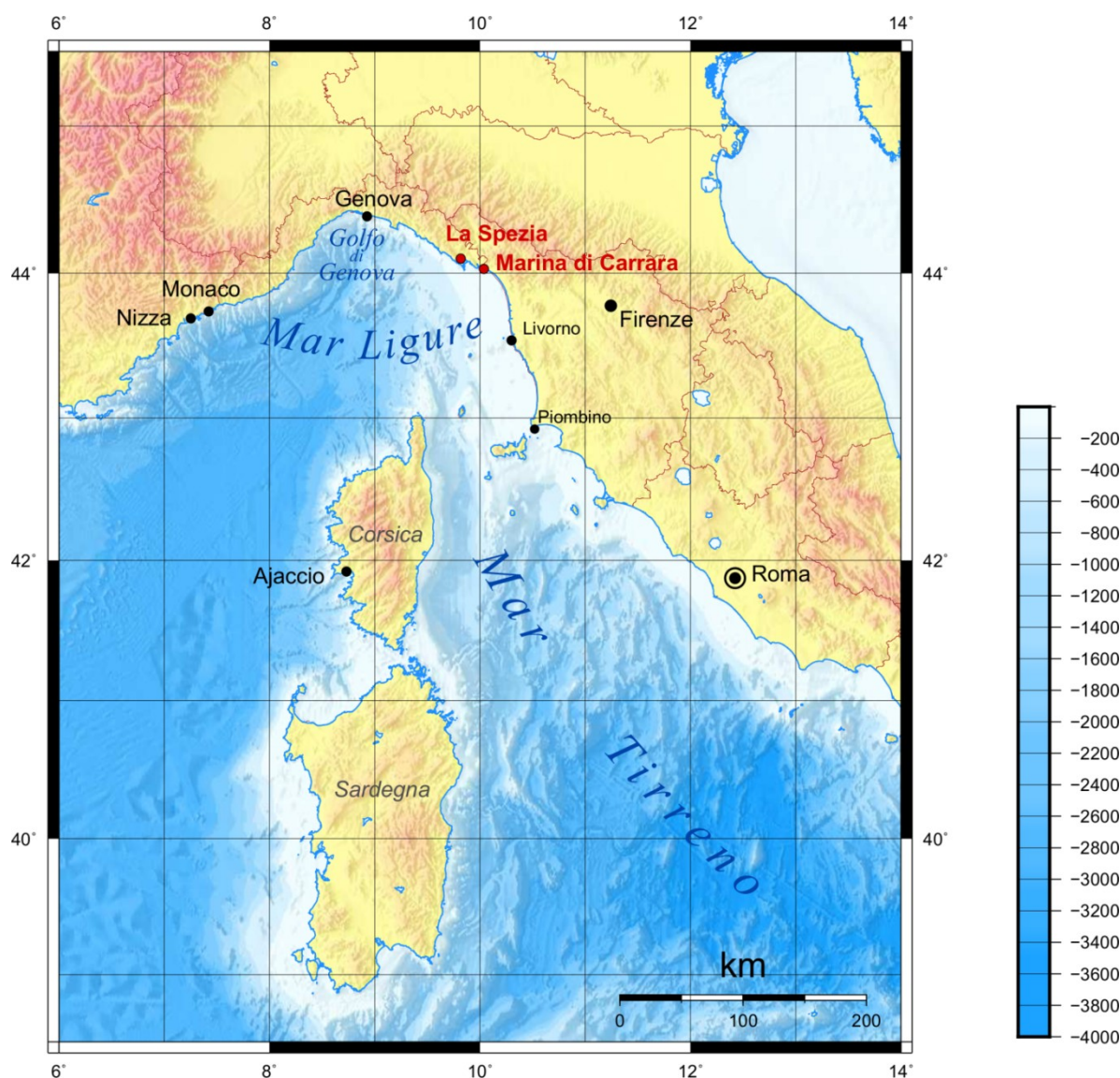


Figura 3.1. Inquadramento geografico del sito in esame.

Il tratto di litorale in cui ricadono i porti di La Spezia e Marina di Carrara presenta una forte variabilità dal punto di vista degli aspetti morfologici della costa e dei fondali marini.

La costa della *Riviera di Levante*, che si estende ad ovest del Golfo di La Spezia, presenta tratti di litorale spesso impervi, con pareti a picco sul mare (ad esempio le famose Cinque Terre), e piccole insenature con spiagge di modesta estensione. I fondali antistanti a questo tratto di costa precipitano velocemente raggiungendo profondità di 30 m già a poche centinaia di metri dalla costa, la quota di -100 m sul l.m.m. si incontra a circa 3 km dalla costa.

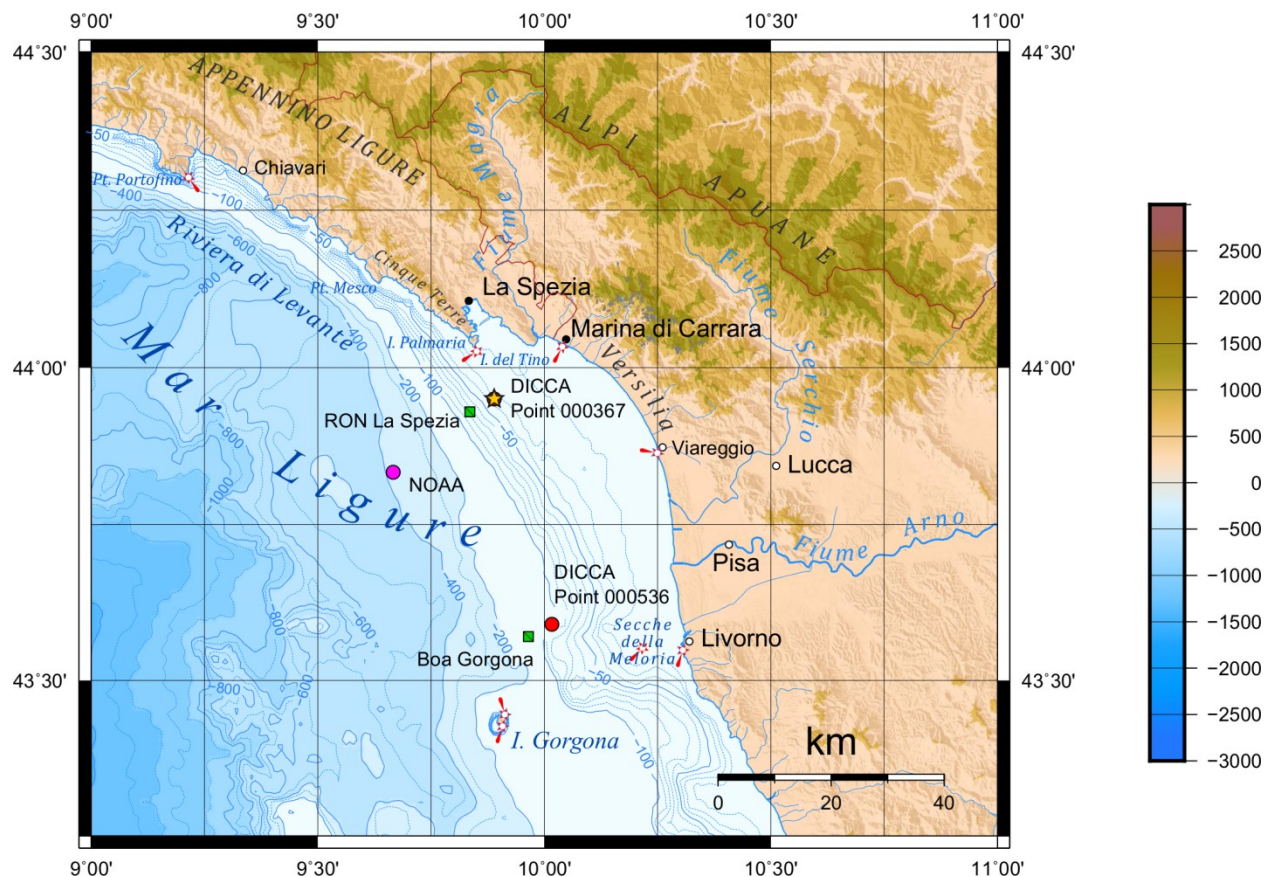


Figura 3.2. Inquadramento geografico del Mar Ligure Orientale con indicazione del punto di ricostruzione del moto ondoso DICCA 000367 (43.95°N-9.88°E) utilizzato per la definizione del clima di moto ondoso al largo, della stazione ondometrica RON di La Spezia, della boa ondometrica appartenente al servizio 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.

Ad ovest del Golfo di La Spezia la geografia subisce un repentino cambiamento. La catena montuosa delle Alpi Apuane risulta più arretrata rispetto alla costa lasciando spazio al territorio pianeggiante della *Versilia*. La costa si sviluppa lungo un'estesa insenatura poco profonda che si estende dalla foce del Fiume Magra fino al porto di Livorno a largo del quale è presente la vasta zona di bassi fondali delle "secche della Meloria". Questo tratto di litorale è contraddistinto da una costa bassa e sabbiosa, fondali presentano una debole pendenza. Lo specchio acqueo all'interno dell'insenatura presenta ovunque profondità inferiori a 20 m. La piattaforma continentale, delimitata dalla batimetria -200 m sul l.m.m. si trova ad una distanza compresa tra 25 e 30 km dalla costa.

Oltre il margine della piattaforma continentale i fondali del Mar Ligure Orientale precipitano rapidamente raggiungendo in poco meno di 40 km profondità di oltre 1000 m.

### 3.1 Fetch geografico ed efficace

Una prima valutazione delle condizioni "potenziali" di esposizione al moto ondoso del sito in esame può essere effettuata sulla base dei settori di traversia geografica, rappresentativi dell'estensione della superficie marina che può contribuire alla generazione del moto ondoso ("fetch").

In Figura 3.3 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 12 km dalla rada di La Spezia e 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.

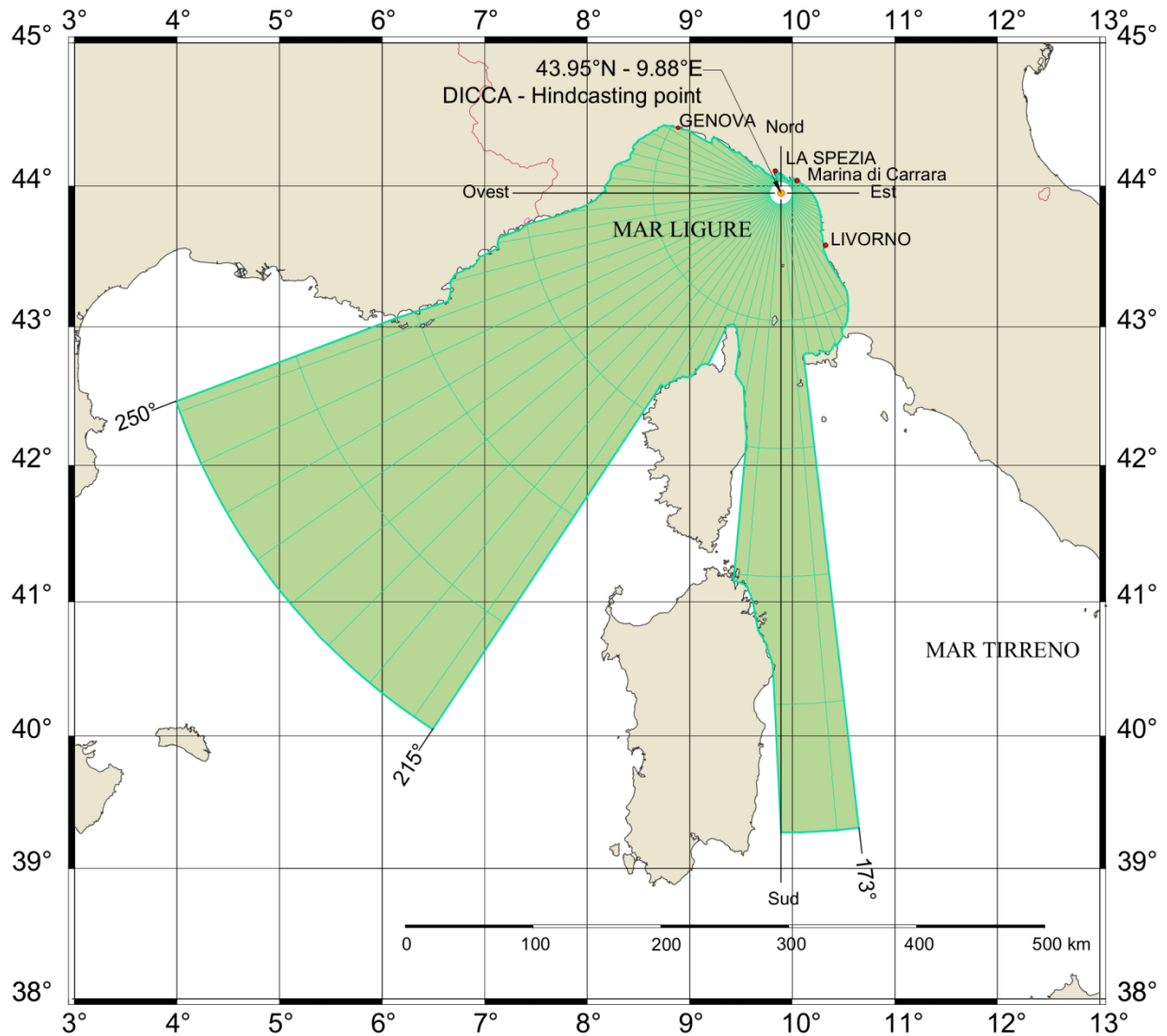


Figura 3.3. Fetch geografico al largo di La Spezia e Marina di Carrara nel punto di coordinate 43.95°N - 9.88°E.

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.

Il *fetch efficace* è la porzione di mare sulla quale si esplica “effettivamente” l’azione del vento responsabile della generazione del moto ondoso. Esso è funzione dei valori dei *fetch* geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata; in questo modo i *fetch efficaci* tengono conto del fatto che alla generazione del moto ondoso oltre alla superficie marina individuata nella direzione media  $\phi_w$  lungo la quale spira il vento contribuiscono anche le porzioni di mare dalle direzioni comprese in un settore di  $\pm\theta$  rispetto alla direzione media di azione del vento. Di conseguenza la lunghezza dei *fetch efficaci* risulta essere diversa da quella dei *fetch geografici*.

Il calcolo dei *fetch efficaci* può essere eseguito in base alla seguente relazione:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

$F_{e,w}$ : lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $\phi_w$ ;

$F_i$ : lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima  $\phi_i$ ;

$\phi_w$ : direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;

$\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$ : direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2 \cdot \theta$  considerato nell'intorno della direzione  $\phi_w$ ;

$\theta$  ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di  $\theta = \pm 45^\circ$  mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di  $\theta = \pm 90^\circ$ );

$n$  termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n = 4$ ).

L'equazione deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, Smith 1991). Il calcolo del fetch efficace è stato eseguito utilizzando l'applicazione ENIF<sup>1</sup>, che risolve la precedente equazione.

I risultati dell'elaborazione sono riportati graficamente nel diagramma polare di Figura 3.4 e in Figura 3.5. In Tabella 3-1 sono riportati i valori dell'estensione dei fetch in funzione della direzione.

I massimi fetch efficaci si hanno tra  $210^\circ\text{N}$  e  $250^\circ\text{N}$ , con un'estensione media di 300 km ed un massimo di circa 315 km in direzione SudOvest ( $230^\circ\text{N}$ ).

L'applicazione del modello numerico ha consentito inoltre di definire la legge di deviazione tra la direzione media del vento e la direzione media del moto ondoso generato (Figura 3.5).

<sup>1</sup> Il software per ambiente windows ENIF per il calcolo automatico dei fetch efficaci è stato sviluppato e commercializzato dalla società MODIMAR s.r.l..

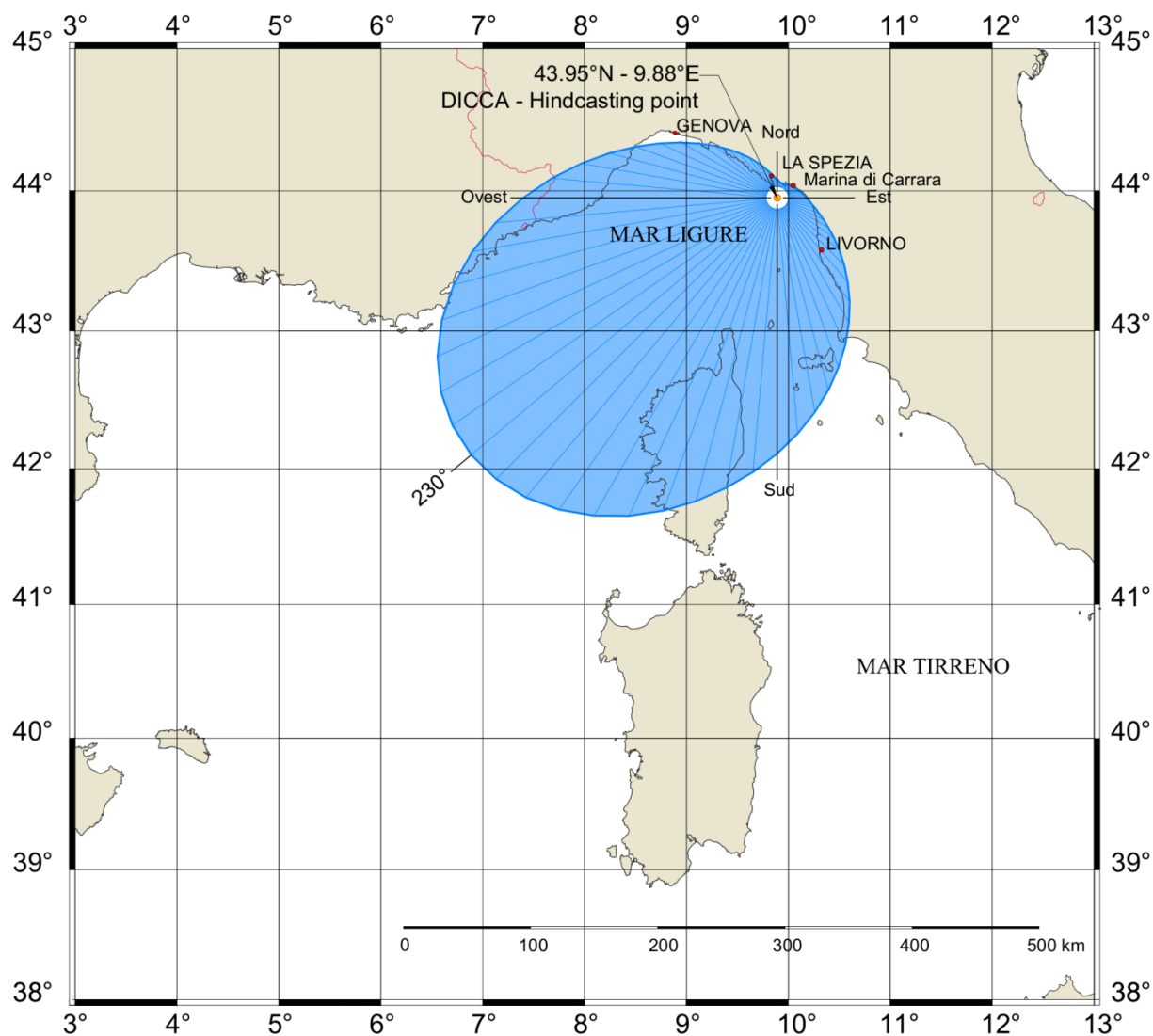
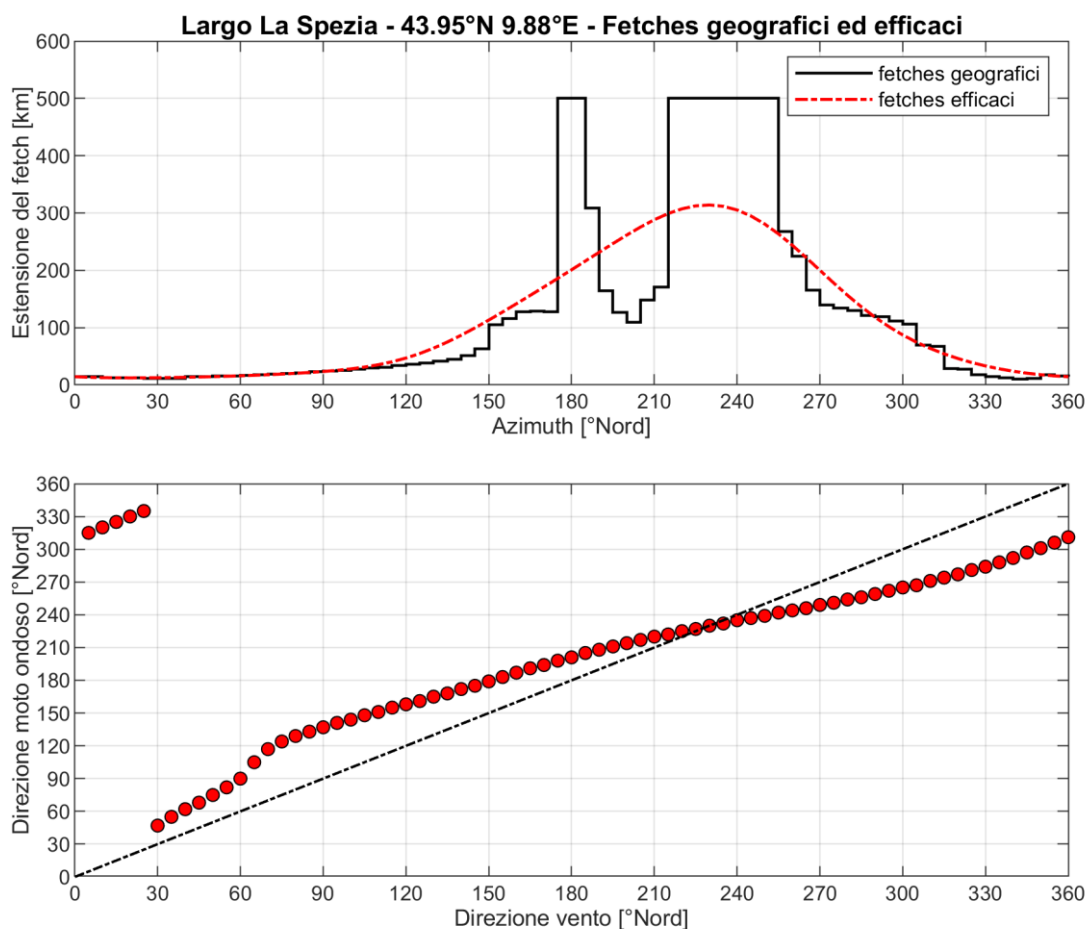


Figura 3.4. Fetch efficace al largo di La Spezia e Marina di Carrara nel punto di coordinate 43.95°N - 9.88°E.

**Tabella 3-1. Fetch geografici, efficaci e deviazione direzione vento/mare  
al largo di La Spezia e 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                 |



**Figura 3.5. Estensione dei fetches e legge di deviazione vento/mare  
al largo di La Spezia e Marina di Carrara nel punto di coordinate 43.95°N - 9.88°E.**

## Capitolo 4 Analisi e validazione dei dati di vento

Per la definizione del regime dei venti che caratterizzano il paraggio geografico in esame sono stati acquisiti diversi dati di vento, sia al largo che in costa, provenienti sia da misure dirette che da modelli numerici di circolazione atmosferica (vedi Figura 4.1).

I dati di vento ricostruiti dal NOAA al largo della costa, non risentendo dell'orografia della costa, permettono di avere un'indicazione del regime dei venti che agisce al largo e che rappresenta la forzante per la generazione del moto ondoso.

In costa il vento risente maggiormente dell'orografia: il regime dei venti localmente risulta condizionato dalla presenza dei rilievi montuosi o delle valli pertanto, come mostrato in seguito, risulta molto variabile da località a località.

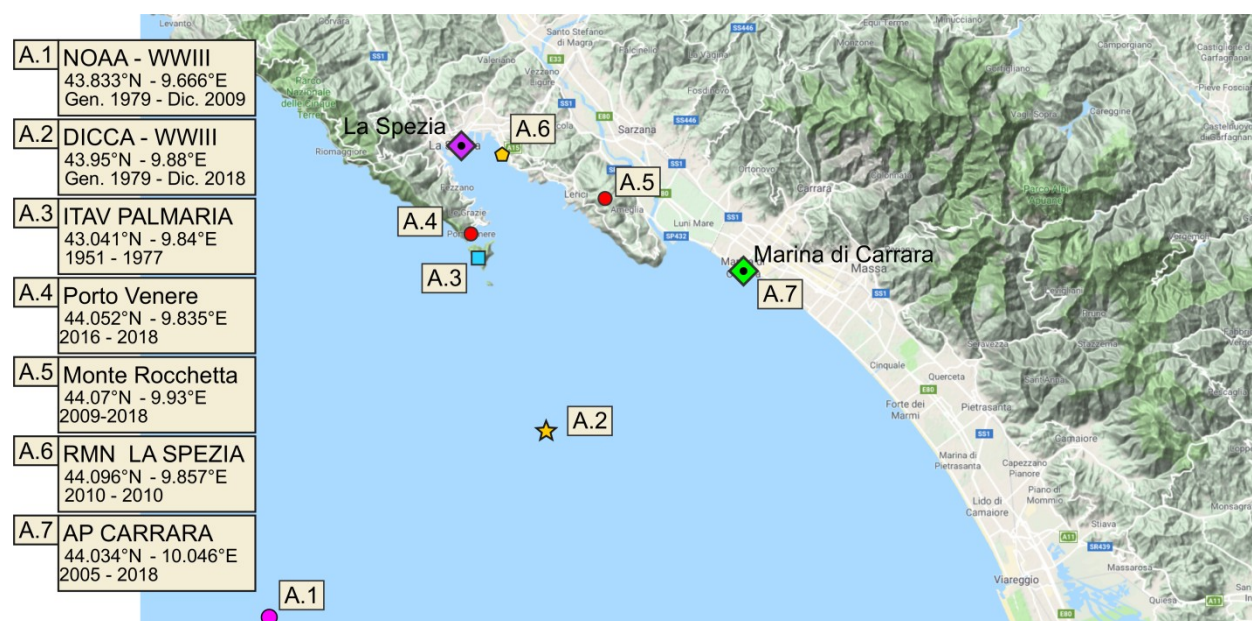


Figura 4.1. Indicazione delle diverse fonti di dati di vento acquisite per lo studio meteomarinario.

### 4.1 Dati vento al largo ricostruiti dal NOAA

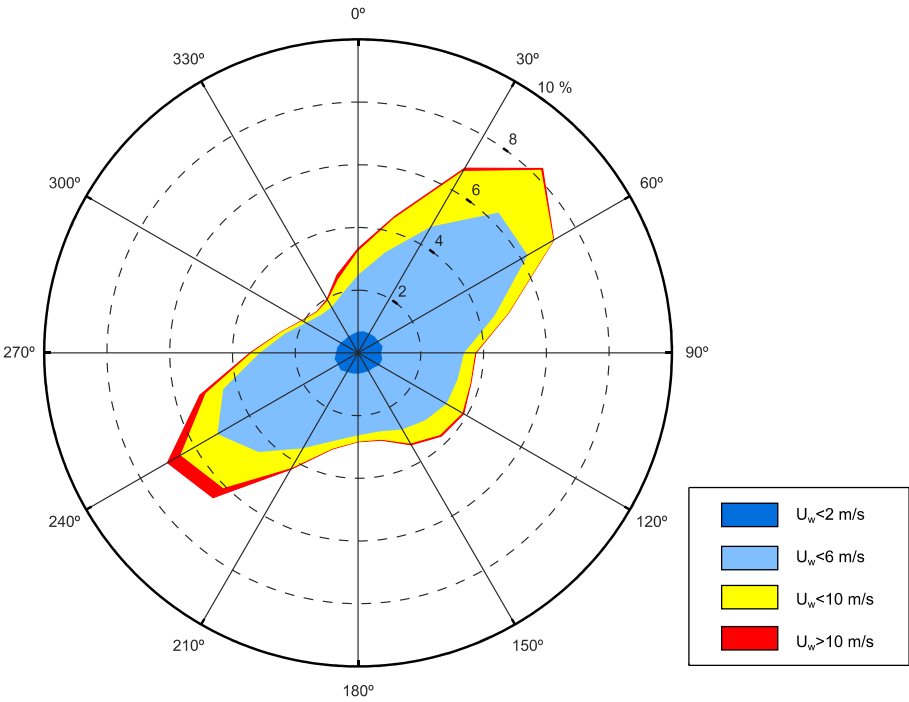
L'agenzia federale National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) degli Stati Uniti d'America nell'ambito del progetto CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) ha ricostruito la circolazione atmosferica per il periodo storico 1979-2009 (31 anni) a scala globale. Tali dati di vento sono stati 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 trioraria 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 4.2 ed in Tabella 4-1, 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.

**Tabella 4-1. Frequenza di accadimento dei venti ricostruiti dal NOAA nel punto di coordinate 43.833°N - 9.666°E (periodo di riferimento 1979-2009)**

| Direzione di provenienza ° N | Classi di velocità del vento [m/s] |              |              |              |              |               |                |                |                |                |                |        | Freq. % | ≥2.00 |
|------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|---------|-------|
|                              | calm                               | 1.00<br>2.00 | 2.00<br>4.00 | 4.00<br>6.00 | 6.00<br>8.00 | 8.00<br>10.00 | 10.00<br>12.00 | 12.00<br>14.00 | 14.00<br>16.00 | 16.00<br>18.00 | 18.00<br>20.00 | >20.00 |         |       |
| 0                            | 0.16                               | 0.52         | 1.09         | 0.72         | 0.50         | 0.24          | 0.07           | 0.02           | 0.01           | 0.00           |                |        | 3.3     | 2.7   |
| 15                           | 0.15                               | 0.56         | 1.44         | 1.17         | 0.83         | 0.29          | 0.06           | 0.01           | 0.00           |                |                |        | 4.5     | 3.8   |
| 30                           | 0.15                               | 0.56         | 1.75         | 2.19         | 1.53         | 0.50          | 0.10           | 0.02           | 0.00           |                |                |        | 6.8     | 6.1   |
| 45                           | 0.15                               | 0.59         | 2.20         | 3.39         | 1.61         | 0.29          | 0.06           | 0.02           | 0.01           |                |                |        | 8.3     | 7.6   |
| 60                           | 0.15                               | 0.60         | 2.50         | 2.99         | 0.82         | 0.11          | 0.02           | 0.00           | 0.00           |                |                |        | 7.2     | 6.5   |
| 75                           | 0.18                               | 0.63         | 2.16         | 1.52         | 0.36         | 0.09          | 0.02           | 0.00           | 0.00           |                |                |        | 5.0     | 4.2   |
| 90                           | 0.18                               | 0.56         | 1.73         | 0.91         | 0.27         | 0.07          | 0.02           | 0.01           | 0.00           |                |                |        | 3.8     | 3.0   |
| 105                          | 0.16                               | 0.63         | 1.58         | 0.91         | 0.32         | 0.09          | 0.02           | 0.00           |                |                |                |        | 3.7     | 2.9   |
| 120                          | 0.18                               | 0.60         | 1.56         | 0.91         | 0.41         | 0.15          | 0.06           | 0.01           |                | 0.00           |                |        | 3.9     | 3.1   |
| 135                          | 0.16                               | 0.51         | 1.49         | 0.88         | 0.43         | 0.21          | 0.05           | 0.02           | 0.00           |                |                |        | 3.8     | 3.1   |
| 150                          | 0.14                               | 0.53         | 1.37         | 0.77         | 0.35         | 0.15          | 0.05           | 0.02           | 0.00           |                |                |        | 3.4     | 2.7   |
| 165                          | 0.13                               | 0.52         | 1.35         | 0.59         | 0.16         | 0.09          | 0.02           | 0.01           | 0.00           | 0.00           |                |        | 2.9     | 2.2   |
| 180                          | 0.14                               | 0.53         | 1.44         | 0.52         | 0.13         | 0.05          | 0.01           | 0.01           |                | 0.00           |                |        | 2.8     | 2.2   |
| 195                          | 0.14                               | 0.54         | 1.55         | 0.67         | 0.19         | 0.06          | 0.02           | 0.00           | 0.00           |                |                |        | 3.2     | 2.5   |
| 210                          | 0.16                               | 0.55         | 1.87         | 0.94         | 0.51         | 0.19          | 0.06           | 0.01           | 0.00           |                |                |        | 4.3     | 3.6   |
| 225                          | 0.19                               | 0.59         | 2.23         | 1.46         | 1.01         | 0.59          | 0.30           | 0.10           | 0.04           | 0.01           |                |        | 6.5     | 5.8   |
| 240                          | 0.15                               | 0.59         | 2.48         | 1.96         | 0.86         | 0.47          | 0.26           | 0.16           | 0.06           | 0.01           | 0.004          |        | 7.0     | 6.3   |
| 255                          | 0.16                               | 0.61         | 2.07         | 1.61         | 0.40         | 0.17          | 0.09           | 0.06           | 0.03           | 0.01           | 0.001          | 0.001  | 5.2     | 4.4   |
| 270                          | 0.14                               | 0.56         | 1.61         | 0.82         | 0.18         | 0.07          | 0.03           | 0.01           | 0.00           | 0.01           |                |        | 3.4     | 2.7   |
| 285                          | 0.12                               | 0.56         | 1.22         | 0.49         | 0.10         | 0.03          | 0.01           | 0.01           | 0.00           | 0.00           |                |        | 2.5     | 1.9   |
| 300                          | 0.15                               | 0.50         | 0.98         | 0.29         | 0.09         | 0.03          | 0.01           | 0.01           | 0.00           |                |                |        | 2.1     | 1.4   |
| 315                          | 0.16                               | 0.44         | 0.82         | 0.28         | 0.09         | 0.05          | 0.02           | 0.01           | 0.00           | 0.00           |                |        | 1.9     | 1.3   |
| 330                          | 0.14                               | 0.47         | 0.77         | 0.30         | 0.16         | 0.07          | 0.03           | 0.02           | 0.01           | 0.00           |                |        | 2.0     | 1.4   |
| 345                          | 0.15                               | 0.47         | 0.91         | 0.42         | 0.29         | 0.18          | 0.11           | 0.03           | 0.01           | 0.00           |                |        | 2.6     | 1.9   |
| Freq. %                      | 3.7                                | 13.24        | 38.17        | 26.73        | 11.60        | 4.25          | 1.52           | 0.58           | 0.19           | 0.06           | 0.006          | 0.001  | 100.0   | 83.1  |
| Freq. Cumulate               |                                    | 16.9         | 55.1         | 81.8         | 93.4         | 97.7          | 99.2           | 99.7           | 99.9           | 99.99          | 100.00         | 100.00 |         |       |



**Figura 4.2. Distribuzione direzionale dei venti ricostruiti dal NOAA al largo (periodo di riferimento 1979 - 2009)**

In termini di frequenza di accadimento (Tabella 4-1) 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).

## 4.2 Dati di vento ricostruiti dal DICCA

La serie storica oraria relativa ai dati di vento ricostruiti in reanalisi dal DICCA dell'Università di Genova avente una durata di 40 anni, è stata acquistata dall'RT per la redazione del presente studio.

In termini di frequenza di accadimento (Tabella 4-2) i venti regnanti (più frequenti) provengono dai settori di Levante (75-105 °N) e da Scirocco (120-150 °N) con una frequenza di accadimento degli stati di vento con velocità superiore a 2.0 m/s rispettivamente pari al 22.4% e al 18.3%.

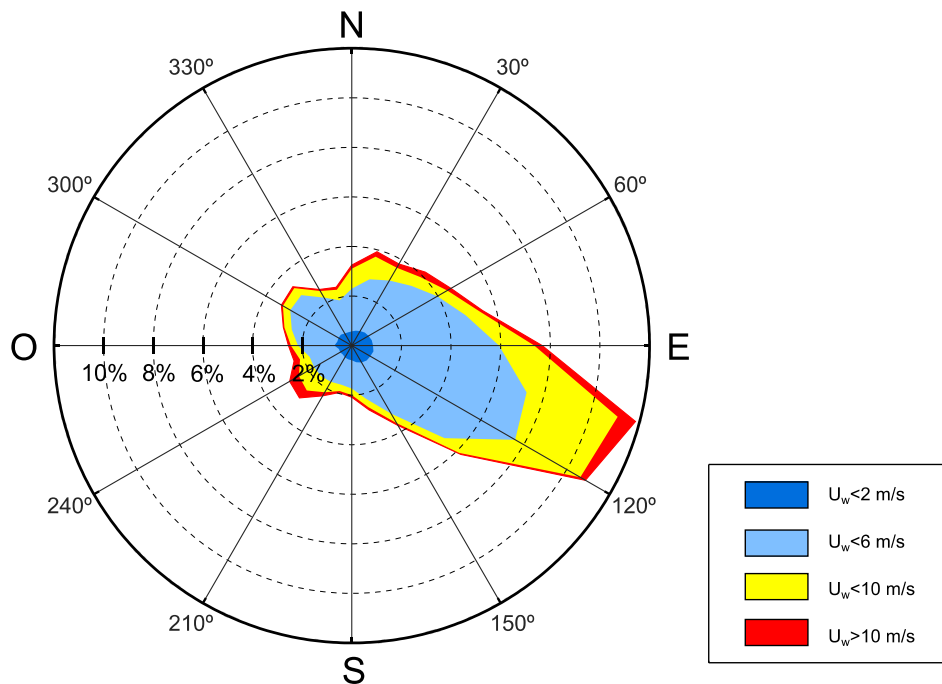
Le calme (stati di vento con velocità inferiore a 2 m/s) di scarso interesse ai fini della generazione del moto ondoso, si verificano con frequenza pari al 16.1%.

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 e provengono prevalentemente dal settore di Grecale (30-60 °N) e dal settore di Libeccio (210-240 °N) e da Levante. In misura minore si possono verificare venti intensi dai settori di Ponente e Tramontana, rari sono gli eventi intensi provenienti dagli altri settori.

Il confronto tra il clima anemometrico ottenuto da questi dati e quelli ricostruiti in reanalisi al largo dalla NOAA, mostra chiaramente l'effetto che l'orografia locale esercitata su questi dati.

**Tabella 4-2. Frequenza di accadimento dei venti ricostruiti dal DICCA al largo di La Spezia e Carrara (periodo 1979-2018)**

| 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                            | 0.14                               | 0.44      | 0.96      | 0.77      | 0.55      | 0.25       | 0.10        | 0.03        | 0.01        | 0.00        | 0.001       | 0.000  | 3.3          | 2.7         |
| 15                           | 0.14                               | 0.48      | 1.18      | 0.98      | 0.65      | 0.29       | 0.14        | 0.04        | 0.02        | 0.01        | 0.001       | 0.001  | 3.9          | 3.3         |
| 30                           | 0.16                               | 0.52      | 1.40      | 0.96      | 0.43      | 0.16       | 0.09        | 0.05        | 0.02        | 0.01        | 0.003       | 0.001  | 3.8          | 3.1         |
| 45                           | 0.15                               | 0.59      | 1.65      | 1.01      | 0.35      | 0.15       | 0.11        | 0.08        | 0.04        | 0.03        | 0.015       | 0.013  | 4.2          | 3.4         |
| 60                           | 0.14                               | 0.64      | 1.99      | 1.21      | 0.33      | 0.13       | 0.08        | 0.04        | 0.03        | 0.01        | 0.006       | 0.001  | 4.6          | 3.8         |
| 75                           | 0.15                               | 0.68      | 2.43      | 1.49      | 0.43      | 0.15       | 0.07        | 0.03        | 0.02        | 0.01        | 0.001       | 0.001  | 5.5          | 4.6         |
| 90                           | 0.17                               | 0.68      | 2.82      | 2.26      | 1.00      | 0.42       | 0.18        | 0.09        | 0.03        | 0.01        | 0.002       | 0.000  | 7.7          | 6.8         |
| 105                          | 0.17                               | 0.73      | 3.15      | 3.24      | 2.50      | 1.31       | 0.52        | 0.16        | 0.04        | 0.01        | 0.002       |        | 11.8         | 10.9        |
| 120                          | 0.16                               | 0.70      | 3.23      | 3.51      | 2.27      | 0.76       | 0.20        | 0.04        | 0.01        | 0.00        | 0.000       | 0.000  | 10.9         | 10.0        |
| 135                          | 0.17                               | 0.68      | 2.59      | 1.84      | 0.63      | 0.21       | 0.07        | 0.02        | 0.00        |             |             |        | 6.2          | 5.4         |
| 150                          | 0.16                               | 0.63      | 1.65      | 0.74      | 0.30      | 0.15       | 0.06        | 0.02        | 0.01        | 0.01        | 0.000       |        | 3.7          | 2.9         |
| 165                          | 0.15                               | 0.55      | 1.05      | 0.47      | 0.24      | 0.12       | 0.06        | 0.04        | 0.01        | 0.00        | 0.001       |        | 2.7          | 2.0         |
| 180                          | 0.13                               | 0.46      | 0.79      | 0.35      | 0.17      | 0.09       | 0.05        | 0.03        | 0.01        | 0.00        | 0.001       |        | 2.1          | 1.5         |
| 195                          | 0.14                               | 0.43      | 0.73      | 0.33      | 0.18      | 0.09       | 0.04        | 0.02        | 0.00        | 0.00        |             |        | 2.0          | 1.4         |
| 210                          | 0.14                               | 0.41      | 0.70      | 0.44      | 0.30      | 0.19       | 0.10        | 0.05        | 0.01        | 0.00        | 0.001       |        | 2.3          | 1.8         |
| 225                          | 0.13                               | 0.38      | 0.73      | 0.51      | 0.45      | 0.37       | 0.24        | 0.13        | 0.04        | 0.02        | 0.002       | 0.001  | 3.0          | 2.5         |
| 240                          | 0.13                               | 0.41      | 0.74      | 0.47      | 0.39      | 0.32       | 0.19        | 0.14        | 0.07        | 0.03        | 0.006       | 0.001  | 2.9          | 2.3         |
| 255                          | 0.13                               | 0.41      | 0.82      | 0.40      | 0.24      | 0.16       | 0.11        | 0.07        | 0.04        | 0.02        | 0.009       | 0.003  | 2.4          | 1.9         |
| 270                          | 0.24                               | 0.46      | 1.04      | 0.43      | 0.19      | 0.10       | 0.05        | 0.03        | 0.01        | 0.01        | 0.001       |        | 2.6          | 1.9         |
| 285                          | 0.14                               | 0.46      | 1.27      | 0.62      | 0.22      | 0.09       | 0.03        | 0.01        | 0.01        | 0.00        |             |        | 2.9          | 2.3         |
| 300                          | 0.13                               | 0.49      | 1.44      | 0.81      | 0.25      | 0.09       | 0.04        | 0.02        | 0.00        | 0.00        |             |        | 3.3          | 2.7         |
| 315                          | 0.14                               | 0.49      | 1.34      | 0.91      | 0.32      | 0.09       | 0.04        | 0.03        | 0.01        | 0.00        | 0.001       |        | 3.4          | 2.7         |
| 330                          | 0.13                               | 0.44      | 1.03      | 0.63      | 0.23      | 0.08       | 0.04        | 0.02        | 0.01        | 0.00        | 0.001       |        | 2.6          | 2.0         |
| 345                          | 0.14                               | 0.41      | 0.83      | 0.50      | 0.29      | 0.15       | 0.06        | 0.03        | 0.01        | 0.00        | 0.001       |        | 2.4          | 1.9         |
| <b>Freq. %</b>               | 3.6                                | 12.57     | 35.56     | 24.89     | 12.92     | 5.90       | 2.67        | 1.19        | 0.47        | 0.17        | 0.056       | 0.022  | <b>100.0</b> | <b>83.9</b> |
| <b>Freq. Cumulate</b>        |                                    | 16.1      | 51.7      | 76.6      | 89.5      | 95.4       | 98.1        | 99.3        | 99.8        | 99.92       | 99.98       | 100.00 |              |             |



**Figura 4.3. Distribuzione direzionale dei venti ricostruiti dal DICCA al largo di La Spezia e Marina di Carrara (periodo di riferimento 1979 - 2018)**

### 4.3 Dati di vento della stazione dell'Isola di Palmaria

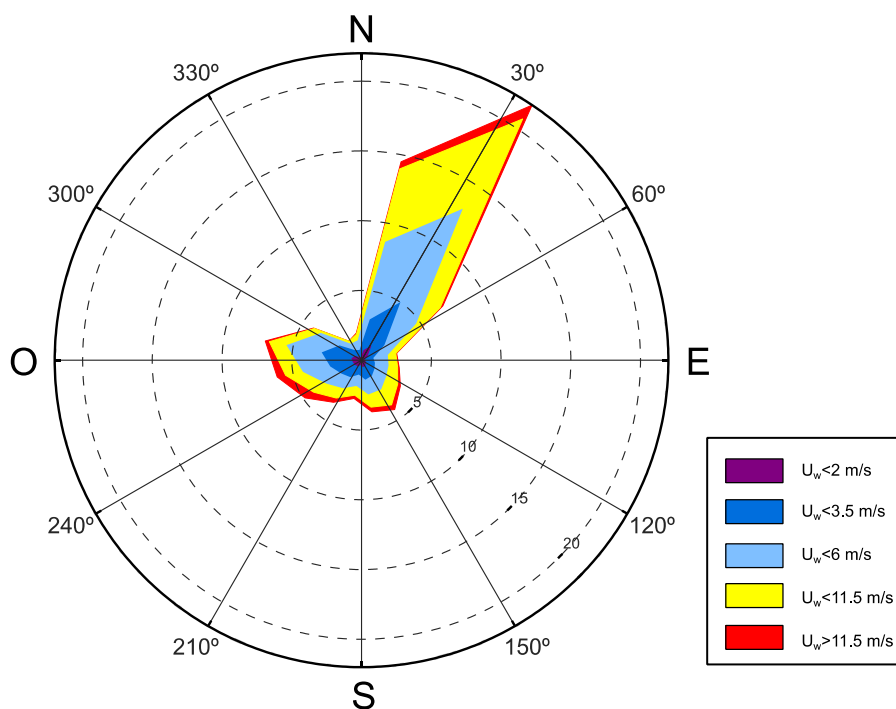
Questa stazione meteo è stata gestita inizialmente dalla Marina Militare che effettuava osservazioni visive. Dal 1963 la stazione è stata rilevata dall'Aeronautica Militare (I.T.A.V.-C.N.M.C.A.) che ha predisposto idonea strumentazione per il rilievo automatico delle condizioni meteo (vento, pressione, temperatura) con cadenza trioraria.

**Tabella 4-3. Stazione A.M. n.129 - Palmaria. Direzione e velocità del vento**  
**Distribuzione delle frequenze annuali (media sul periodo 1951-1977)**

|                              | Classi di velocità del vento [m/s] |          |                      |          |                |            |        |
|------------------------------|------------------------------------|----------|----------------------|----------|----------------|------------|--------|
| Direzione di provenienza ° N | calme                              | 1.0÷ 2.0 | 2.5÷ 3.5             | 4.0÷ 6.0 | 6.5÷ 11.5      | 12.0÷ 44.5 | Tot    |
| 0.0÷22.5                     |                                    | 7.30     | 22.54                | 56.67    | 53.35          | 5.18       | 145.05 |
| 22.5÷45.0                    |                                    | 12.78    | 37.36                | 80.55    | 77.33          | 11.97      | 219.99 |
| 45.0÷67.5                    |                                    | 4.99     | 14.64                | 27.48    | 20.61          | 2.30       | 70.01  |
| 67.5÷90.0                    |                                    | 2.13     | 6.49                 | 10.52    | 5.84           | 0.63       | 25.62  |
| 90.0÷112.5                   |                                    | 2.91     | 6.80                 | 10.02    | 6.66           | 1.13       | 27.52  |
| 112.5÷135.0                  |                                    | 3.61     | 7.49                 | 10.01    | 9.99           | 2.35       | 33.44  |
| 135.0÷157.5                  |                                    | 4.83     | 8.61                 | 11.79    | 13.38          | 3.99       | 42.6   |
| 157.5÷180.0                  |                                    | 5.20     | 8.97                 | 10.96    | 9.17           | 3.48       | 37.79  |
| 180.0÷202.5                  |                                    | 3.70     | 6.82                 | 8.34     | 6.72           | 2.40       | 27.98  |
| 202.5÷225.0                  |                                    | 5.12     | 9.56                 | 9.51     | 8.50           | 3.68       | 36.38  |
| 225.0÷247.5                  |                                    | 5.90     | 11.38                | 13.02    | 11.01          | 7.45       | 48.76  |
| 247.5÷270.0                  |                                    | 6.46     | 16.49                | 19.99    | 12.70          | 6.05       | 61.69  |
| 270.0÷292.5                  |                                    | 7.41     | 21.73                | 25.82    | 12.42          | 3.11       | 70.48  |
| 292.5÷315.0                  |                                    | 5.59     | 13.51                | 16.04    | 5.77           | 0.52       | 41.43  |
| 315.0÷337.5                  |                                    | 2.67     | 5.97                 | 5.68     | 1.99           | 0.16       | 16.46  |
| 337.5÷360.0                  |                                    | 2.25     | 5.20                 | 7.14     | 4.27           | 0.80       | 19.66  |
| variabili                    |                                    | 0.04     | 0.04                 | 0.07     | 0.06           | 0.16       | 0.38   |
| calme                        | 74.76                              |          |                      |          |                |            | 74.76  |
| Freq. %                      | 74.76                              | 82.9     | 203.62               | 323.61   | 259.77         | 55.35      | 1000   |
| Freq. Cumulate               |                                    | 157.7    | 361.3                | 684.9    | 944.7          | 1000       |        |
| Numero totale eventi:        |                                    | 68090.0  | Rendimento (%): 83.2 |          | Quota (m): 190 |            |        |

I valori delle frequenze di accadimento annuali ripartite per classi di velocità e direzione sono riassunti in Tabella 4-3. I dati mostrano una netta prevalenza, anche per gli stati di vento più intensi, da nord-est; complessivamente oltre il 40% degli stati di vento provengono da un settore compreso tra 0° e 67.5° Nord; anche per intensità superiori a 12 m/s (oltre i 25 nodi) si ha un contributo percentuale dal quel settore pari al 20%.

Limitando l'analisi al settore di traversia (compreso tra scirocco 135° N e maestrale 315 ° N) è evidente la prevalenza degli stati di vento da libeccio e ponente in termini sia di venti regnanti (associati a maggiori frequenze di accadimento) sia dominanti (più intensi con classi di velocità superiori a 12 m/s).

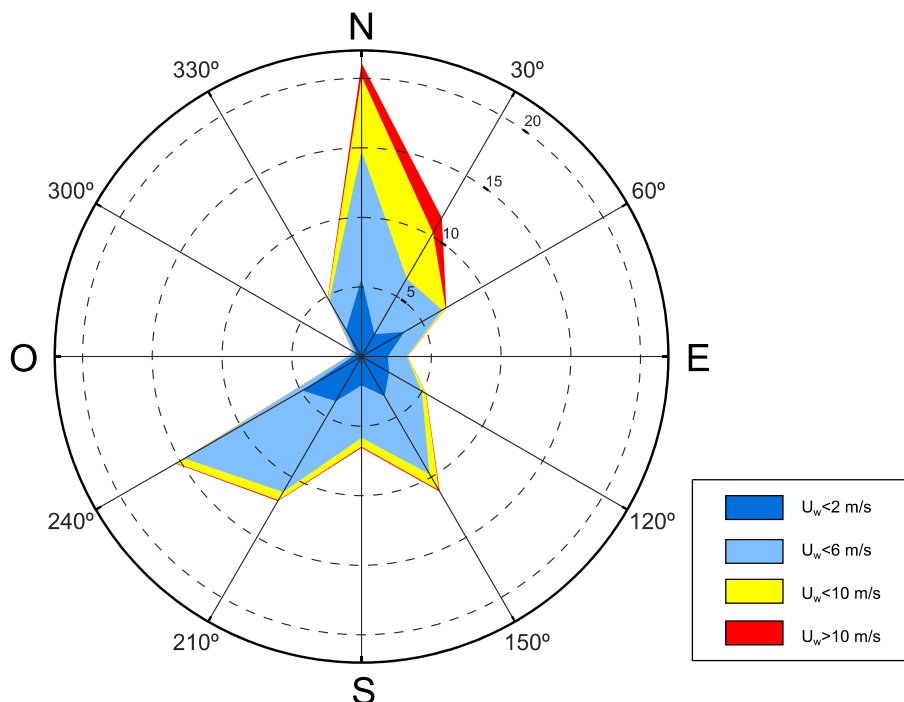


**Figura 4.4. Distribuzione direzionale dei venti registrati dalla stazione Isola di Palmaria (+190 m) (periodo di riferimento 1951-1977).**

#### 4.4 Dati di vento misurati dalla stazione meteo ARPAL di Monte Rocchetta

Sono state acquisite le misurazioni orarie del vento effettuate dal 2009 al 2018 dalla stazione meteo ARPAL di Monte Rocchetta (+405 m sul l.m.m.).

Le misure del vento forniscono la velocità del vento media ( $U_{mean}$ ) su base oraria, la velocità della raffica ( $U_{gust}$ ) e la rispettiva direzione osservata ( $\theta_{mean}$ ). Il clima annuale del vento a Monte Rocchetta derivato dalle misurazioni è presentato Figura 4.5.



**Figura 4.5. Distribuzione direzionale dei venti registrati dalla stazione Monte Rocchetta (+405 m) (periodo di riferimento 2009-2018).**

#### 4.5 Dati di vento misurati dalla stazione meteo ARPAL di Porto Venere

Sono state acquisite le misurazioni orarie del vento effettuate dal 2016 al 2018 dalla stazione meteo ARPAL di Porto Venere (+40 m sul l.m.m.). Le misure del vento forniscono la velocità del vento media ( $U_{mean}$ ) e la rispettiva direzione osservata ( $\theta_{mean}$ ). Il clima annuale del vento a Porto Venere derivato dalle misurazioni è presentato in Figura 4.6.

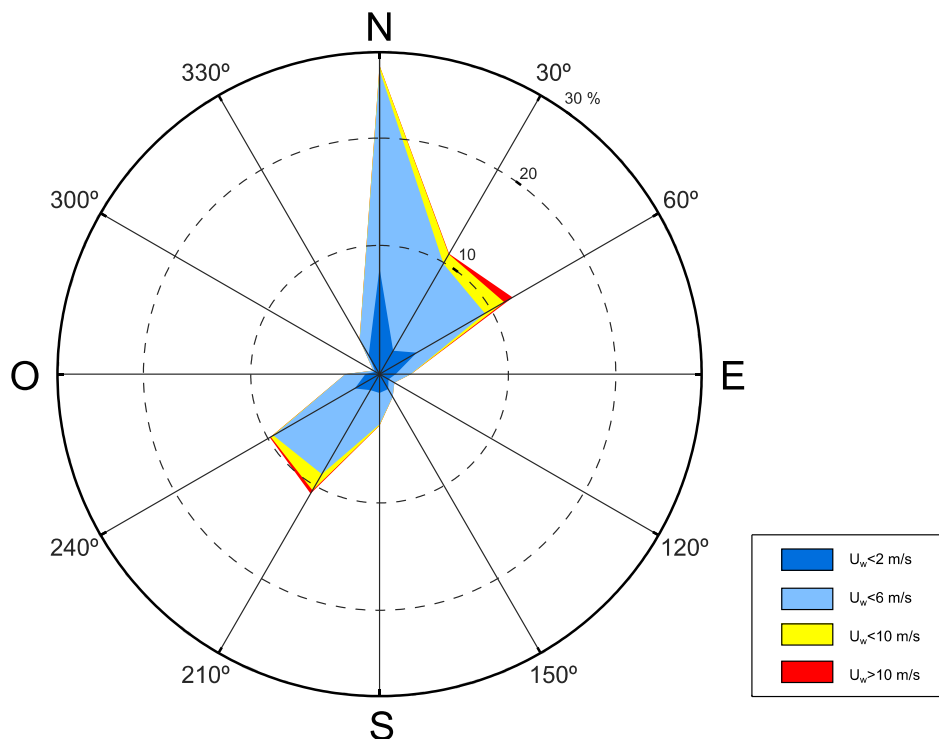


Figura 4.6. Distribuzione direzionale dei venti registrati dalla stazione meteo di Porto Venere (+40 m) (periodo di riferimento 2009-2018).

#### 4.6 Dati di vento misurati dalla stazione mareografica RMN di La Spezia

Sono stati acquisiti i dati di vento (velocità e direzione registrati ogni 10 min) misurati dall'anemometro della stazione RMN (Rete Mareografica Nazionale) di La Spezia per gli anni dal 2010 al 2015 da cui è stata estratta una serie temporale con cadenza oraria delle misure effettuate.

Il rendimento dell'anemometro tra il 2010 e il 2015 è mostrato in Figura 4.7. Limitando l'analisi dei dati al periodo compreso tra luglio 2010 e dicembre 2014 si ha a disposizione un intervallo temporale di 4.5 anni con un buon rendimento (circa il 94%).

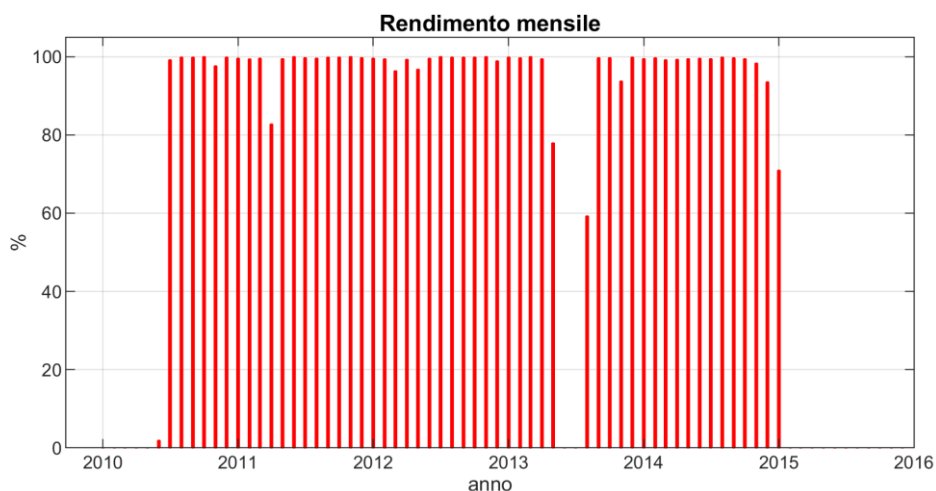


Figura 4.7. Rendimento dell'anemometro installato presso la stazione mareografica RMN di La Spezia 2010-2015

|                      | Lug 2010-Dic 2014 |
|----------------------|-------------------|
| Totale misure orarie | 37147             |
| Misure mancanti      | 2333              |
| Rendimento effettivo | 94.09             |
| Rendimento medio     | 93.19             |

La distribuzione direzionale della frequenza di accadimento su base annuale riportata in Figura 4.8 mostra una prevalenza di stati di vento provenienti dal settore N-NE, di cui una significativa percentuale ha una velocità inferiore a 2.0 m/s, e, conformemente ottenuto analizzando i venti al largo, dal settore di SudOvest con una maggiore presenza di stati di vento aventi velocità superiori a 2.0 m/s.

Il regime dei venti osservato dalla stazione anemometrica RMN di La Spezia è certamente condizionato dalla conformazione orografica del Golfo di La Spezia 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 4.9.

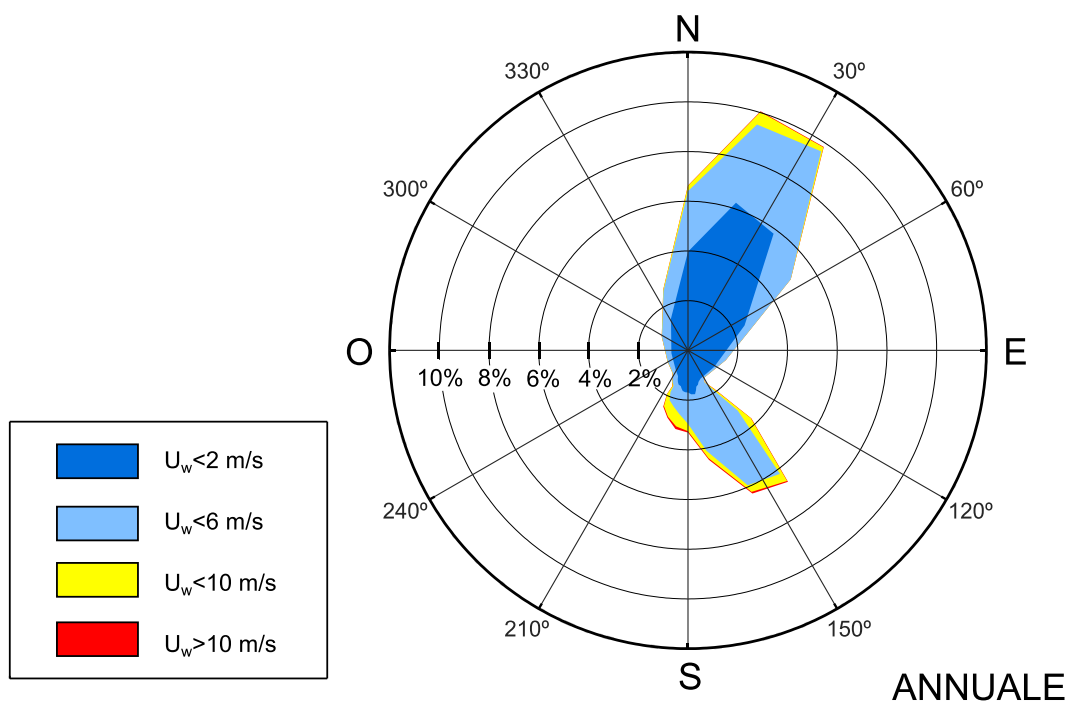


Figura 4.8. Distribuzione direzionale dei venti registrati dalla stazione RMN di La Spezia (periodo di riferimento 2010-2014).

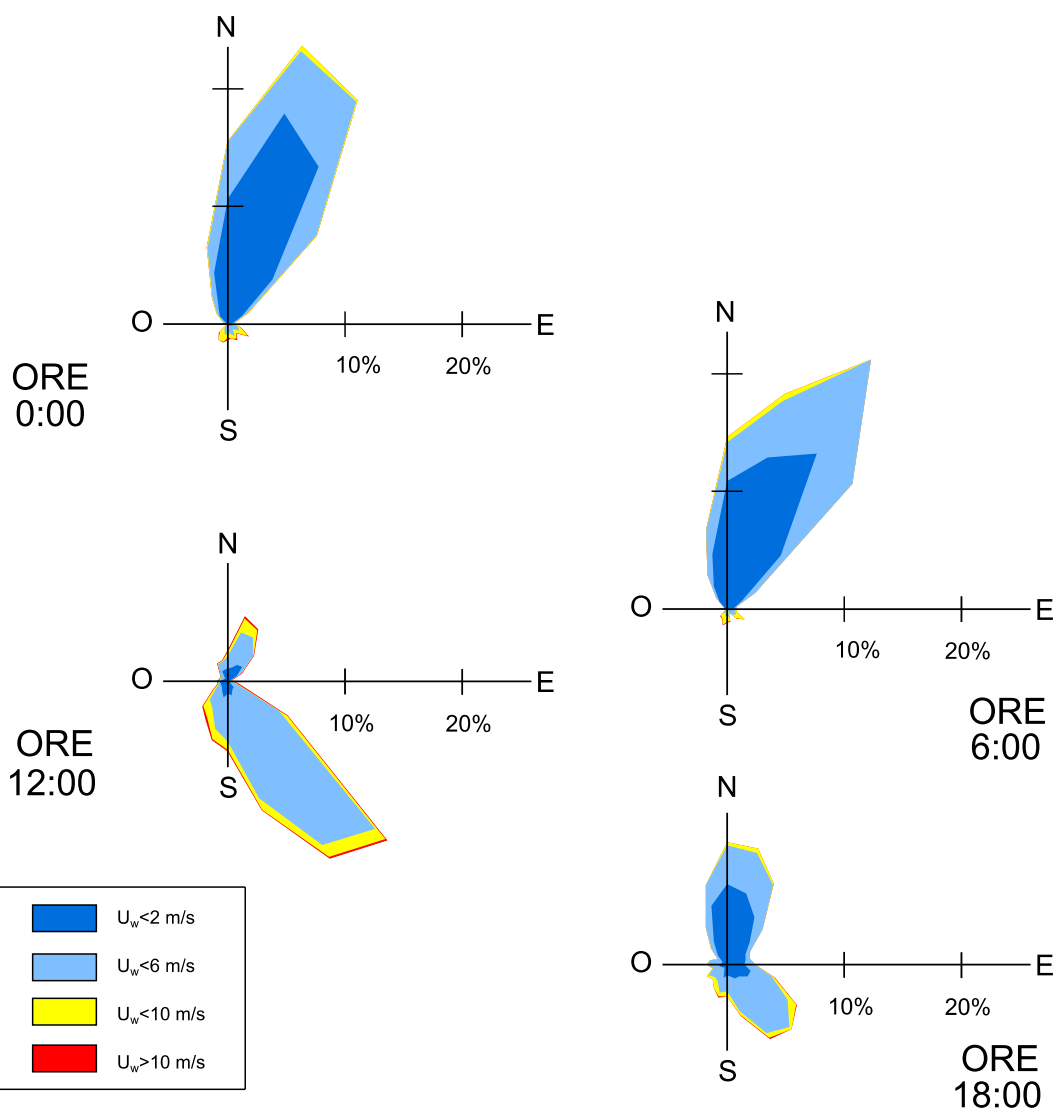


Figura 4.9. Distribuzione direzionale dei venti registrati dalla stazione RMN di La Spezia su base oraria 0:00, 6:00, 12:00, 18:00 (UTC) (periodo di riferimento 2010-2014).

## 4.7 Dati di vento misurati dalla stazione meteo di Marina di Carrara

Sono stati forniti dall'AdSP i dati di vento, di temperatura dell'aria, di pressione e di intensità di pioggia rilevati dalla stazione meteo installata presso il porto di Marina di Carrara a partire dal 2006.

L'analisi dei dati di vento (velocità e direzione a +10 m) mostra che lo strumento non ha operato in modo continuo e il suo rendimento non è stato sempre ottimale.

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). Questo può essere dovuto al riposizionamento dello strumento che è avvenuto tra il 2010 e il 2014.

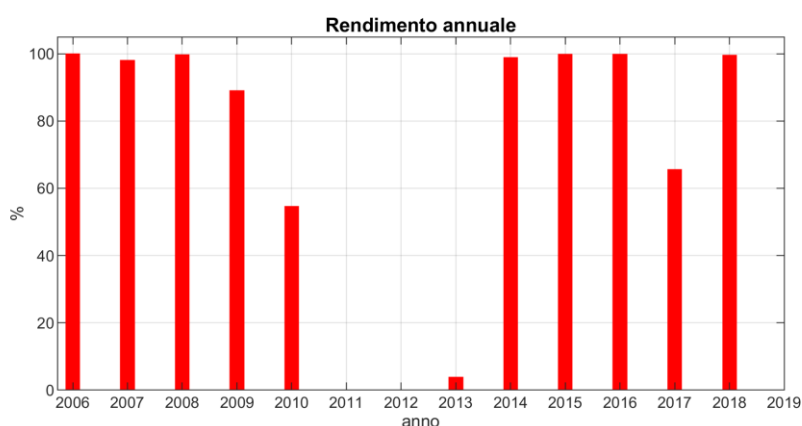


Figura 4.10. Rendimento annuale dell'anemometro installato presso il porto di Marina di Carrara (periodo di riferimento 2006-2018)

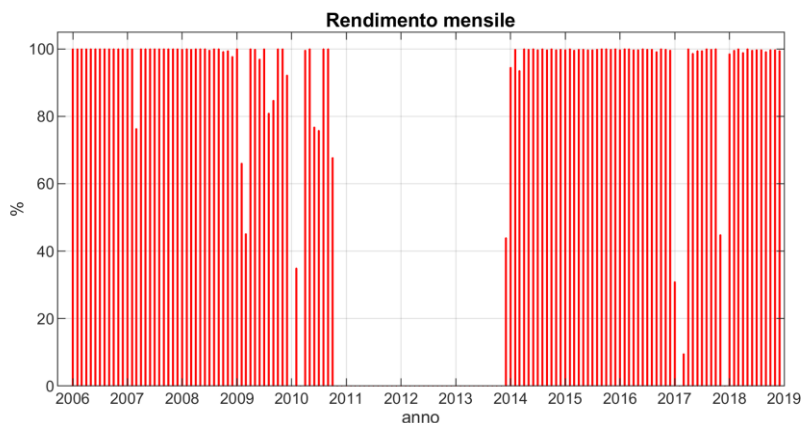
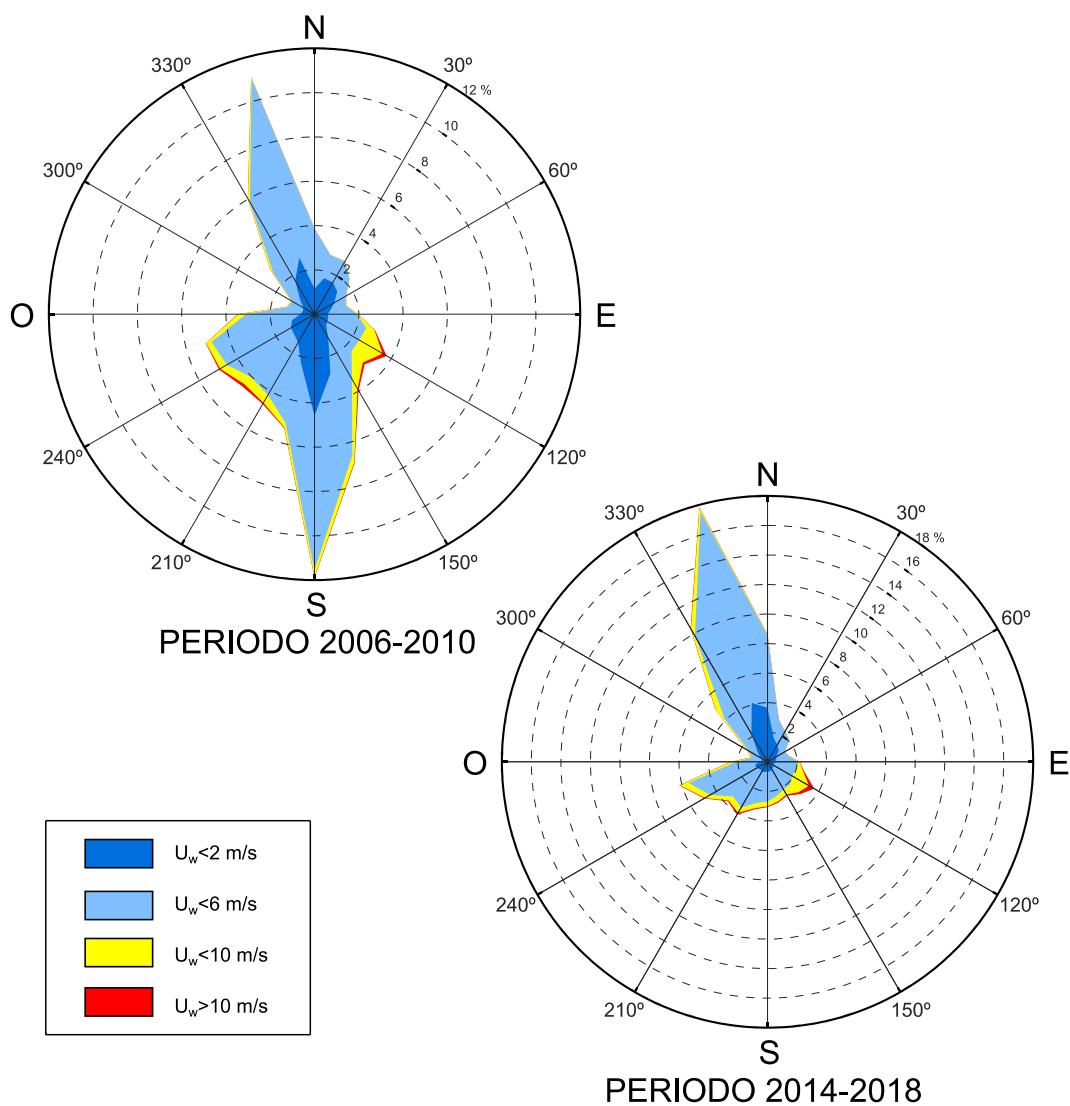


Figura 4.11. Rendimento mensile dell'anemometro installato presso il porto di Marina di Carrara (periodo di riferimento 2006-2018)



**Figura 4.12. 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.**

## Capitolo 5 Analisi e validazione dei dati ondametrici

### 5.1 Caratteristiche delle serie di dati ondametrici disponibili

Per la definizione delle caratteristiche del moto ondoso al largo del paraggio in esame si è fatto riferimento ai dati di moto ondoso di seguito descritti (per la localizzazione delle stazioni di misura o ricostruzione si veda la Figura 5.1):

- dati di moto ondoso ricostruiti in re-analisi dall'istituto americano NOAA con il modello di generazione propagazione WWIII per l'intero bacino del Mar Mediterraneo con cadenza temporale trioraria. Dal database del NOAA è stata estratta la serie storica di dati nel punto di coordinate 43.833°N, 9.666°E rappresentativo delle condizioni di moto ondoso in mare aperto;
- dati di moto ondoso ricostruiti in re-analisi tra il 1979 ed il 2018 per l'intero bacino del mediterraneo dal DICCA di Genova con il modello di generazione e propagazione del moto ondoso WaveWatch III (WWIII) con cadenza temporale oraria. Dal database generato dal DICCA sono state acquisite le serie temporali per i due punti P\_000367 e P\_000536 ubicati rispettivamente al largo di La Spezia e al largo di Livorno;
- registrazioni ondametriche direzionali (effettuate tra il 1989 ed il 2014) effettuate dalla boa posta al largo La Spezia appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale acquisite dall'ISPRA sul portale web <http://dati.isprambiente.it>;
- registrazioni ondametriche direzionali (da ottobre 2008 a febbraio 2019) effettuate dalla boa ondametrica posta al largo dell'Isola della Gorgona appartenente alla rete di misura della Regione Toscana.

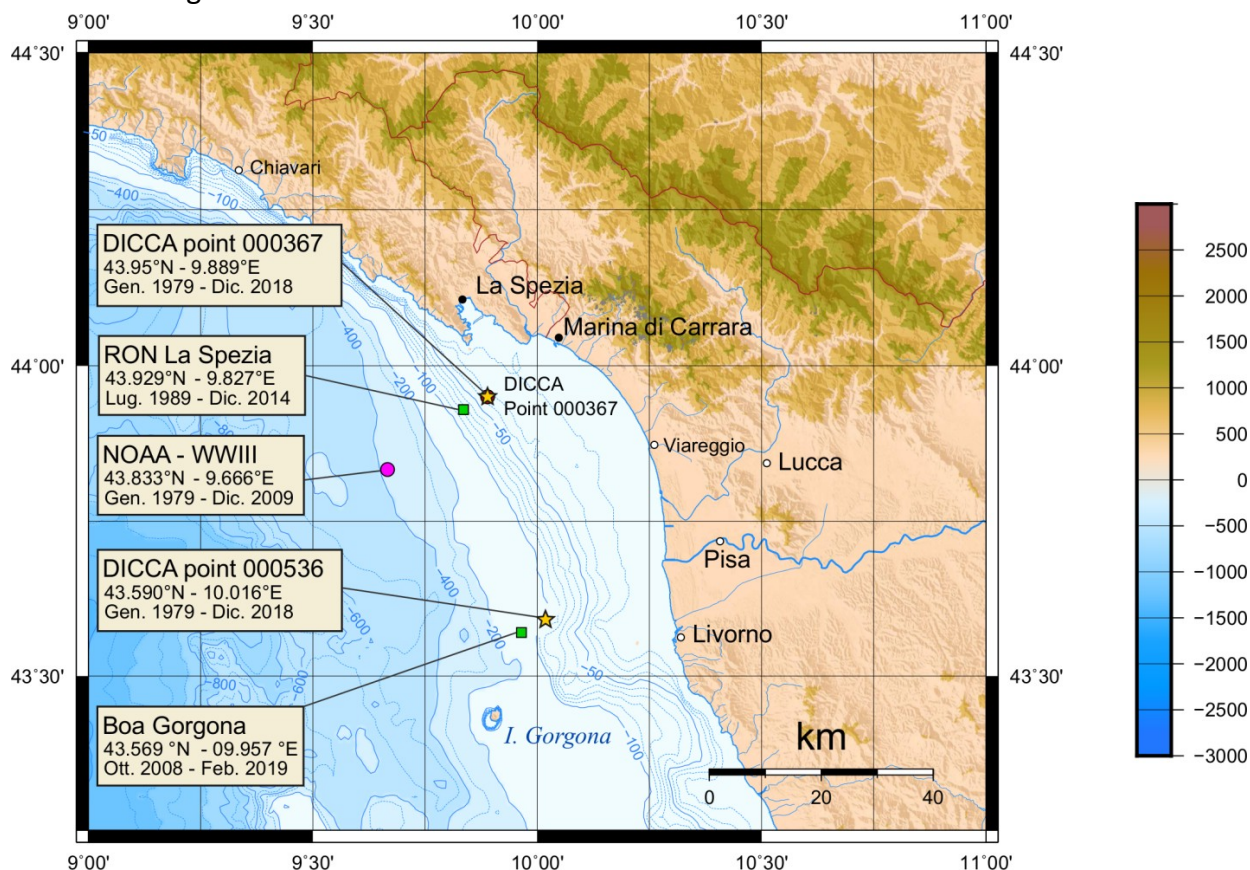


Figura 5.1. Localizzazione delle diverse fonti di dati di moto ondoso.

L'Autorità di Sistema Portuale ha inoltre fornito le misure direzionali di moto ondoso acquisite con una boa ondometrica tra il 2006 e il 2011 all'esterno del porto di Marina di Carrara in un punto posto a circa 500 m a sud della testa del molo di sopraflutto su fondali di circa -13 m sul l.m.m..

## 5.2 Dati in ricostruzione forniti dal NOAA

L'agenzia federale National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) degli Stati Uniti d'America nell'ambito del progetto "*WaveWatchIII hindcast and reanalysis archive*" ha ricostruito con il modello WWIII i dati di moto ondoso ( $H_s$ ,  $T_p$ , Dir) per il periodo storico 1979-2009 (31 anni) a scala globale, con cadenza trioraria. Per il Mar Mediterraneo è stata utilizzata una griglia di calcolo con passo 1/6 di grado.

Dall'archivio NOAA-WWIII sono stati estratti i dati relativi al nodo di calcolo di coordinate 43.833°N, 9.666°E posto a circa 40 km dalla costa su fondali di 400 m.

In Figura 5.2 è rappresentata la distribuzione direzionale degli stati di moto ondoso ricostruiti dal NOAA al largo della costa. Il moto ondoso presenta una spiccata prevalenza di eventi provenienti da Libeccio [210 - 240°N] che presentano sia un'elevata frequenza di apparizione sia una maggiore frequenza di stati di mare caratterizzati da altezza d'onda superiore ad  $H_s = 2.0$  m. Tale risultato è dovuto al regime dei venti, in prevalenza proveniente da SO e NE, e dall'estensione dei fetch efficaci che presentano un massimo in direzione 230°N.

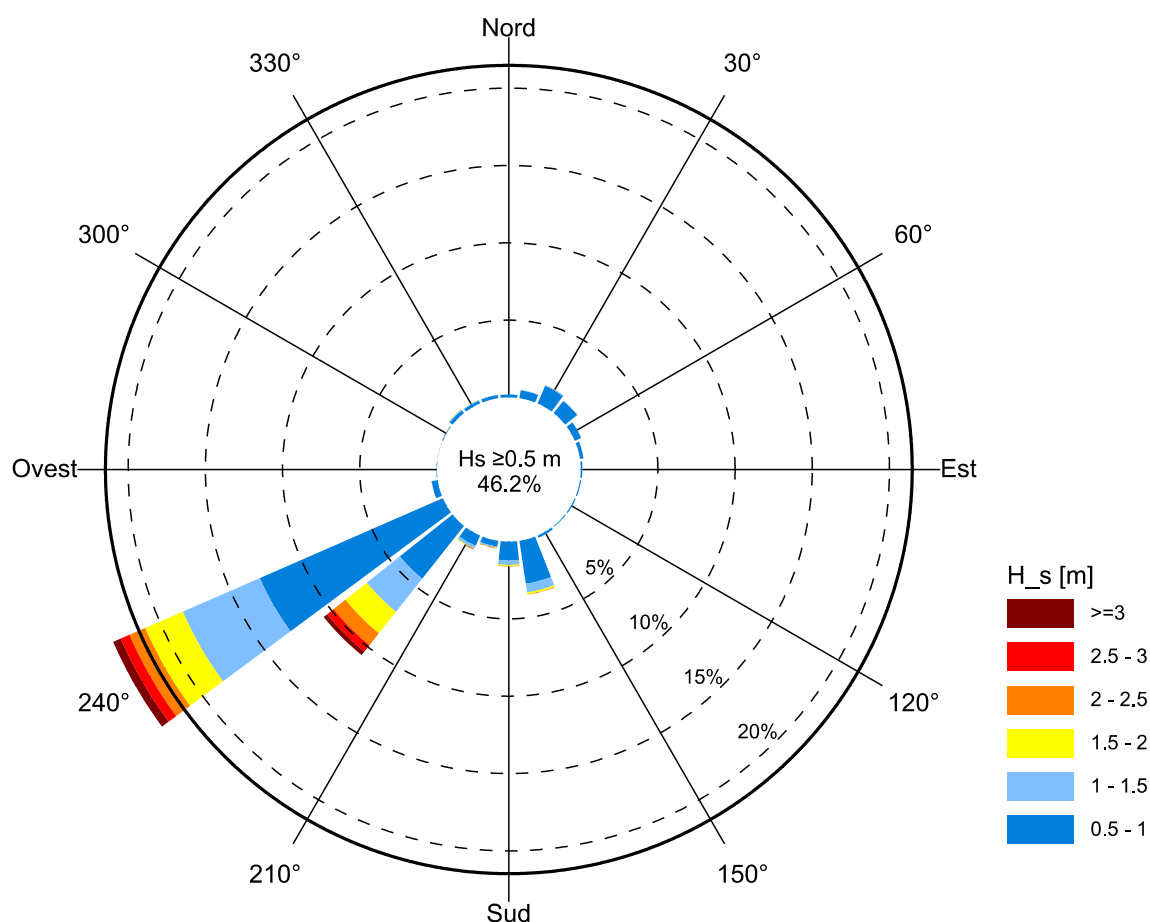


Figura 5.2. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  ricostruita dal NOAA nel punto di coordinate 43.833°N - 9.666°E - periodo di riferimento 1979-2009.

### 5.3 Registrazioni ondametriche della boa RON di La Spezia

La stazione ondametrica di La Spezia appartenente alla RON (Rete Ondametrica Nazionale gestita dall'ISPRA ex APAT) ha iniziato ad operare a Luglio 1989. Tra il 1989 ed il 2002 (RON 1.0) ha operato una boa a disco del tipo WAVEC della società olandese Datawell, con frequenza di acquisizione trioraria, posizionata in corrispondenza delle coordinate 43.929 °N, 9.828 °E, 10 km a Sud dell'Isola di Palmaria su fondali di circa 65m.

I parametri di moto forniti dalla serie storica sono:

- Altezza d'onda significativa spettrale ( $H_s$ )
- Periodo medio dell'onda ( $T_m$ )
- Periodo di picco dell'onda ( $T_p$ )
- Direzione media di provenienza del moto ondoso (Dir)

Dal 2002, a seguito di un importante rinnovamento della rete di misura (RON 2.0), è stata adottata una boa ondametrica del tipo TRIAXYS, prodotta dalla società canadese AXYS, che ha operato fino a luglio del 2007. In questo periodo la frequenza di acquisizione è stata semioraria.

A fine 2009, dopo un periodo di inattività di circa 3 anni, la rete ondametrica è stata rinnovata (RON 3.0) con l'adozione di boe meteo-ondametriche del tipo WatchKeeper, prodotte dalla società canadese AXYS. La boa di La Spezia è rientrata in servizio a fine dicembre 2009 ed ha operato fino a dicembre 2014 con frequenza di acquisizione semioraria.

In Tabella 5-1 e nel grafico di Figura 5.3 è riportata l'analisi del rendimento dell'ondametro RON di La Spezia su base annuale tra il 1989 e il 2014, mentre in Figura 5.4 è riportato il rendimento mensile.

L'analisi del rendimento dell'ondametro porta a concludere che non è possibile analizzare la serie storica nella sua totalità perché nel periodo 2001-2009 si sono verificate due lunghe interruzioni ed inoltre il rendimento dello strumento nel periodo 2002-2006 è stato molto basso (55%).

|                 | TOTALE                | RON 1.0              | RON 2.0                | RON 3.0              |
|-----------------|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
|                 | Lug.1989<br>Dic. 2014 | Lug.1989<br>Dic.2000 | Lug.2002<br>Sett. 2006 | Gen.2010<br>Dic.2014 |
| Totale misure   | 52316                 | 31143                | 7731                   | 13407                |
| Misure mancanti | 22204                 | 2473                 | 7731                   | 1201                 |
| Rendimento      | 70.2%                 | 92.6%                | 55.7%                  | 91.8%                |

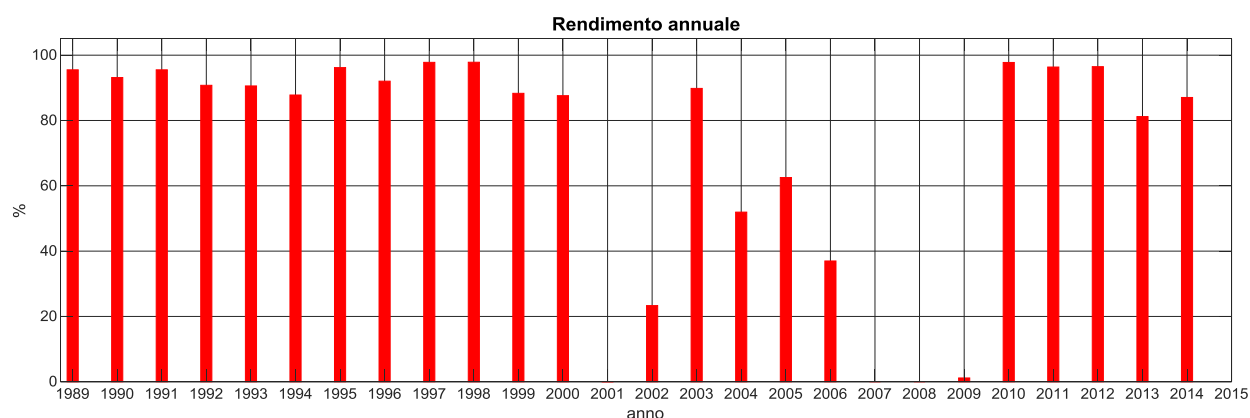
Dal punto di vista del clima di moto ondoso si è quindi proceduto ad analizzare separatamente due periodi di osservazione: RON 1.0 1989-2000 e RON 3.0 2010-2014.

In Figura 5.5 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  per le serie storiche di La Spezia RON 1.0 e RON 3.0 da cui si può osservare una forte prevalenza degli eventi di moto ondoso provenienti da Libeccio [210 - 240°N] che rappresentano circa il 30% degli stati di mare.

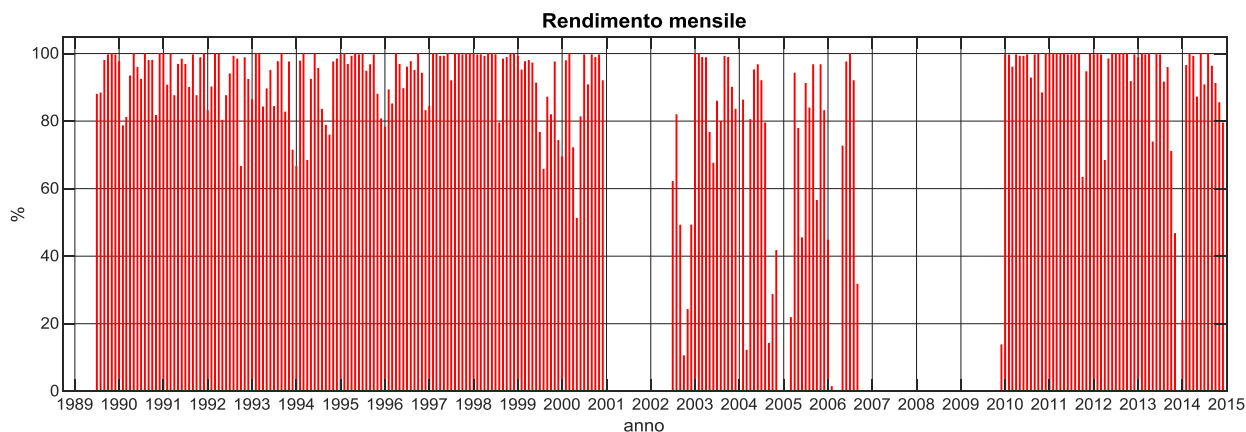
I risultati mostrati in Figura 5.5 mostrano che il clima di moto ondoso ottenuto per il periodo 1989-2000 non si discosta di molto rispetto al clima ottenuto per il periodo 2010-2014.

**Tabella 5-1. Analisi del rendimento della boa RON di La Spezia tra il 1989 e il 2014.**

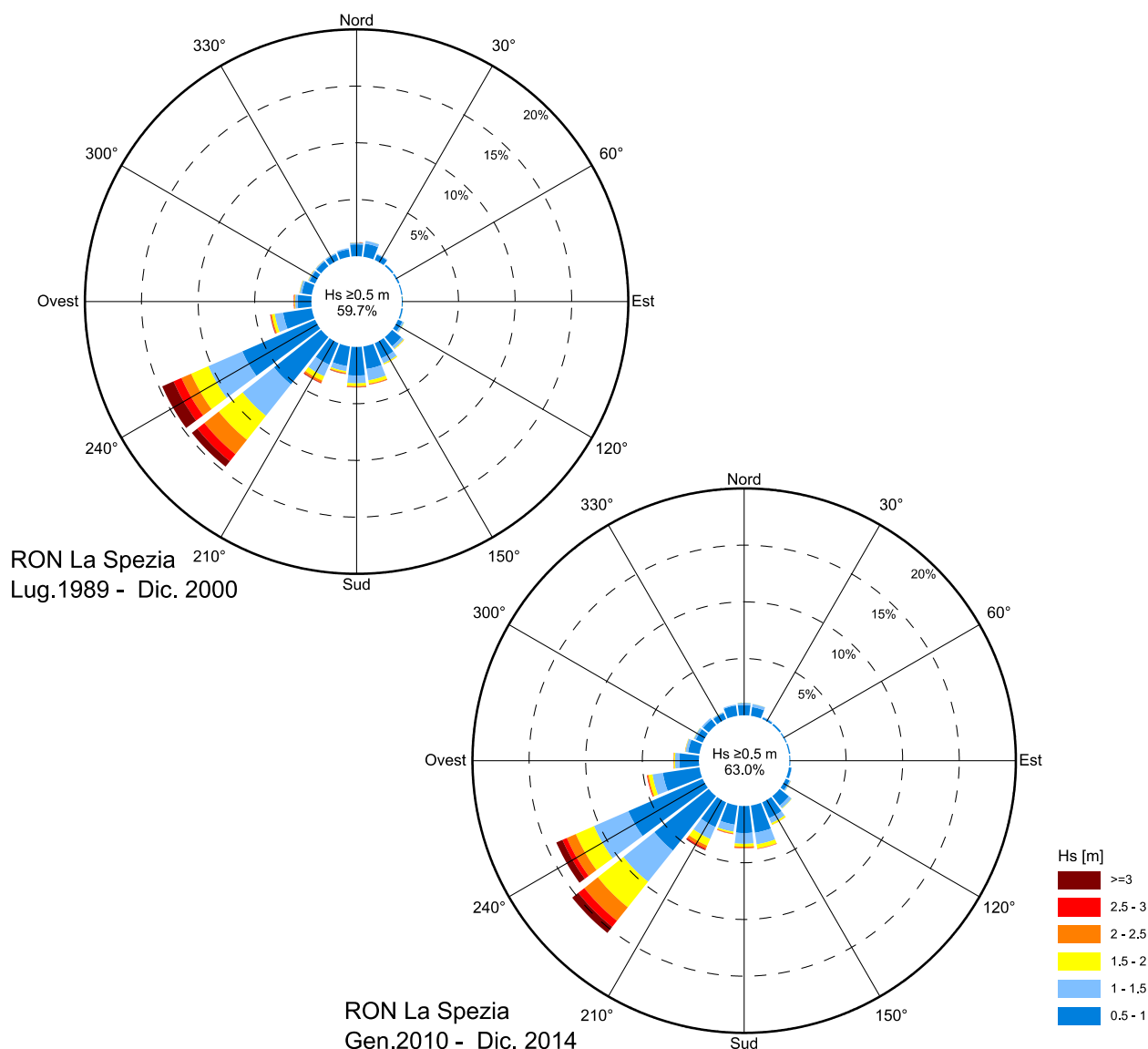
| RON La Spezia         |      |                   |                            |          |             |
|-----------------------|------|-------------------|----------------------------|----------|-------------|
|                       | Anno | Misure Potenziali | Misure sensore ondametrico |          |             |
|                       |      |                   | Presenti                   | Mancanti | Rendimento% |
| RON 1.0               | 1989 | 1472              | 1406                       | 66       | 95.5        |
|                       | 1990 | 2920              | 2720                       | 200      | 93.2        |
|                       | 1991 | 2920              | 2789                       | 131      | 95.5        |
|                       | 1992 | 2928              | 2658                       | 270      | 90.8        |
|                       | 1993 | 2920              | 2645                       | 275      | 90.6        |
|                       | 1994 | 2920              | 2564                       | 356      | 87.8        |
|                       | 1995 | 2920              | 2809                       | 111      | 96.2        |
|                       | 1996 | 2928              | 2695                       | 233      | 92.0        |
|                       | 1997 | 2920              | 2856                       | 64       | 97.8        |
|                       | 1998 | 2920              | 2857                       | 63       | 97.8        |
|                       | 1999 | 2920              | 2579                       | 341      | 88.3        |
|                       | 2000 | 2928              | 2565                       | 363      | 87.6        |
| RON 2.0               | 2001 | 2920              | 1                          | 2919     | 0.0         |
|                       | 2002 | 2920              | 681                        | 2239     | 23.3        |
|                       | 2003 | 2920              | 2623                       | 297      | 89.8        |
|                       | 2004 | 2928              | 1521                       | 1407     | 51.9        |
|                       | 2005 | 2920              | 1826                       | 1094     | 62.5        |
| periodo di inattività | 2006 | 2920              | 1080                       | 1840     | 37.0        |
|                       | 2007 | 2920              | 0                          | 2920     | 0.0         |
| RON 3.0               | 2008 | 2928              | 0                          | 2928     | 0.0         |
|                       | 2009 | 2920              | 34                         | 2886     | 1.2         |
|                       | 2010 | 2920              | 2855                       | 65       | 97.8        |
|                       | 2011 | 2920              | 2814                       | 106      | 96.4        |
|                       | 2012 | 2928              | 2825                       | 103      | 96.5        |
|                       | 2013 | 2920              | 2371                       | 549      | 81.2        |
|                       | 2014 | 2920              | 2542                       | 378      | 87.1        |



**Figura 5.3. Rendimento annuale della boa ondametrica RON di La Spezia - luglio 1989 - dicembre 2014.**



**Figura 5.4. Rendimento mensile della boa ondametrica RON di La Spezia - luglio 1989 - dicembre 2014.**



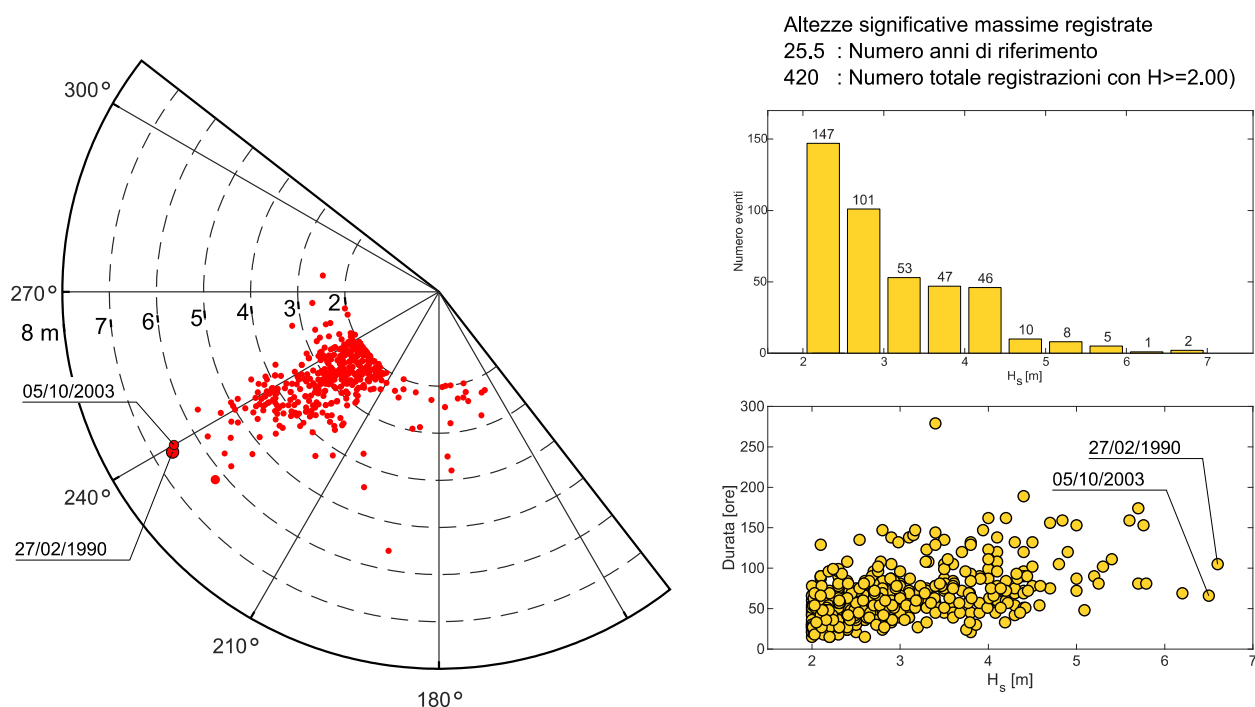
**Figura 5.5. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  registrata dalla boa RON di La Spezia nel periodo 1989-2000 e nel periodo 2010-2014.**

In Figura 5.6 è presentata la distribuzione polare dei valori di  $H_s$  registrati al culmine degli eventi di moto ondoso (mareggiate caratterizzate da valori di  $H_s \geq 2,0$  m) registrate dalla boa ondometrica RON di La Spezia relativa a tutto il suo periodo di funzionamento 1989-2014. Complessivamente in 25 anni di osservazioni (seppur discontinue) sono state isolate 420 mareggiate. Le altezze d'onda al colmo sono in maggior misura comprese tra 2 e 3 m e solo pochi eventi hanno avuto valori di  $H_s$  superiori a 5 m (16/420). La distribuzione direzionale dei colmi delle mareggiate individuate presenta una prevalenza di stati di mare compresi tra 210 e 250 °N che risulta pertanto il settore di traversia dominante. Il grafico mostra inoltre la corrispondenza tra la durata degli eventi di moto ondoso (durata sopra la soglia di  $H_s = 2,0$  m) e il valore di  $H_s$  al colmo delle mareggiate, che generalmente mostrano una durata compresa tra 50 e 100 ore.

In Tabella 5-2 sono riportati in ordine cronologico gli eventi di mareggiata registrati dalla boa di La Spezia contraddistinti da un valore di altezza d'onda al colmo  $H_s \geq 5,0$  m.

**Tabella 5-2. Eventi di mareggiata con altezza d'onda al colmo  $H_s \geq 5.0$  m osservati dalla Boa RON di La Spezia nel periodo 1989-2000 e nel periodo 2010-2014.**

| Data colmo | ora   | Hs [m] | Tp [s] | Dir | Data inizio | ora   | Data fine  | ora   | Durata [ore] |
|------------|-------|--------|--------|-----|-------------|-------|------------|-------|--------------|
| 27/02/1990 | 15:00 | 6.6    | 11.1   | 239 | 26/02/1990  | 6:00  | 02/03/1990 | 12:00 | 105          |
| 30/10/1990 | 03:00 | 5.4    | 10     | 235 | 26/10/1990  | 18:00 | 31/10/1990 | 6:00  | 111          |
| 18/10/1991 | 21:00 | 5.0    | 10     | 240 | 17/10/1991  | 9:00  | 20/10/1991 | 6:00  | 72           |
| 26/10/1992 | 03:00 | 5.3    | 10     | 241 | 24/10/1992  | 21:00 | 29/10/1992 | 0:00  | 102          |
| 16/12/1993 | 09:00 | 5.0    | 10     | 241 | 15/12/1993  | 6:00  | 18/12/1993 | 18:00 | 87           |
| 20/11/1996 | 21:00 | 5.7    | 11.1   | 233 | 16/11/1996  | 15:00 | 23/11/1996 | 18:00 | 174          |
| 09/02/1999 | 09:00 | 5.0    | 10     | 242 | 05/02/1999  | 3:00  | 11/02/1999 | 9:00  | 153          |
| 18/11/1999 | 21:00 | 5.2    | 10     | 238 | 17/11/1999  | 6:00  | 20/11/1999 | 21:00 | 90           |
| 26/12/1999 | 15:00 | 6.2    | 10     | 230 | 25/12/1999  | 6:00  | 28/12/1999 | 0:00  | 69           |
| 06/11/2000 | 15:00 | 5.6    | 9.1    | 191 | 03/11/2000  | 0:00  | 09/11/2000 | 12:00 | 159          |
| 04/02/2003 | 03:00 | 5.7    | 10.5   | 244 | 03/02/2003  | 6:00  | 06/02/2003 | 12:00 | 81           |
| 05/10/2003 | 06:00 | 6.5    | 10.5   | 240 | 03/10/2003  | 21:00 | 06/10/2003 | 12:00 | 66           |
| 23/02/2004 | 12:00 | 5.1    | 10     | 237 | 23/02/2004  | 3:00  | 25/02/2004 | 0:00  | 48           |
| 17/12/2011 | 06:00 | 5.8    | 11.8   | 230 | 12/12/2011  | 18:00 | 19/12/2011 | 0:00  | 153          |
| 28/10/2012 | 09:00 | 5.3    | 10.5   | 229 | 26/10/2012  | 18:00 | 30/10/2012 | 0:00  | 81           |
| 19/03/2013 | 00:00 | 5.8    | 9.5    | 238 | 17/03/2013  | 9:00  | 20/03/2013 | 15:00 | 81           |



**Figura 5.6. Distribuzione delle altezze d'onda massime associate agli eventi di mareggiata osservati dalla Boa RON di La Spezia nel periodo 1989-2014.**

## 5.4 Dati in ricostruzione forniti dal DICCA al largo di La Spezia

Per lo studio meteomarinario è stata acquisita dal servizio MeteOcean del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università di Genova (DICCA), la serie storica dei dati di vento e moto ondoso, che si estende dal 1979 al 2018, ottenuti utilizzando una procedura di ricostruzione del moto ondoso (hindcasting) a partire dai dati di vento ricostruiti in reanalisi.

Il punto in analisi selezionato al largo di La Spezia (P\_000367, Lon: 9.88°, Lat: 43.95°), è posto su su fondali di 35 m poco distante dal luogo dove ha operato tra il 1989 e il 2014 l'ondametro RON di La Spezia e pertanto ha un'analogia esposizione al moto ondoso.

MeteOcean utilizza il modello di generazione del moto ondoso di terza generazione WAVEWATCH III utilizzando una griglia di calcolo con passo di 10 km. La forzante è rappresentata dal campo di vento ricostruito in re-analisi mediante il modello di circolazione atmosferica WRF utilizzando come condizioni al contorno i dati in re-analisi forniti dal centro meteorologico americano NOAA-CFSR.

La serie storica conta complessivamente di **350635 eventi**, e fornisce, con cadenza oraria, i parametri spettrali di moto ondoso ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $T_{m-1,0}$ ,  $Dir$ ).

La serie storica sintetica risulta molto robusta, dispone infatti di un elevatissimo numero di dati (dal 1979 al 2018) con un efficienza prossima al 100%.

In Figura 5.5 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  ricavata dall'analisi dei dati forniti dal DICCA da cui si può osservare, al pari di quanto osservato per i dati registrati dalla boa di La Spezia, una forte prevalenza degli eventi di moto ondoso provenienti da Libeccio [210-240°N] che rappresentano complessivamente il 30.9% degli stati di mare.

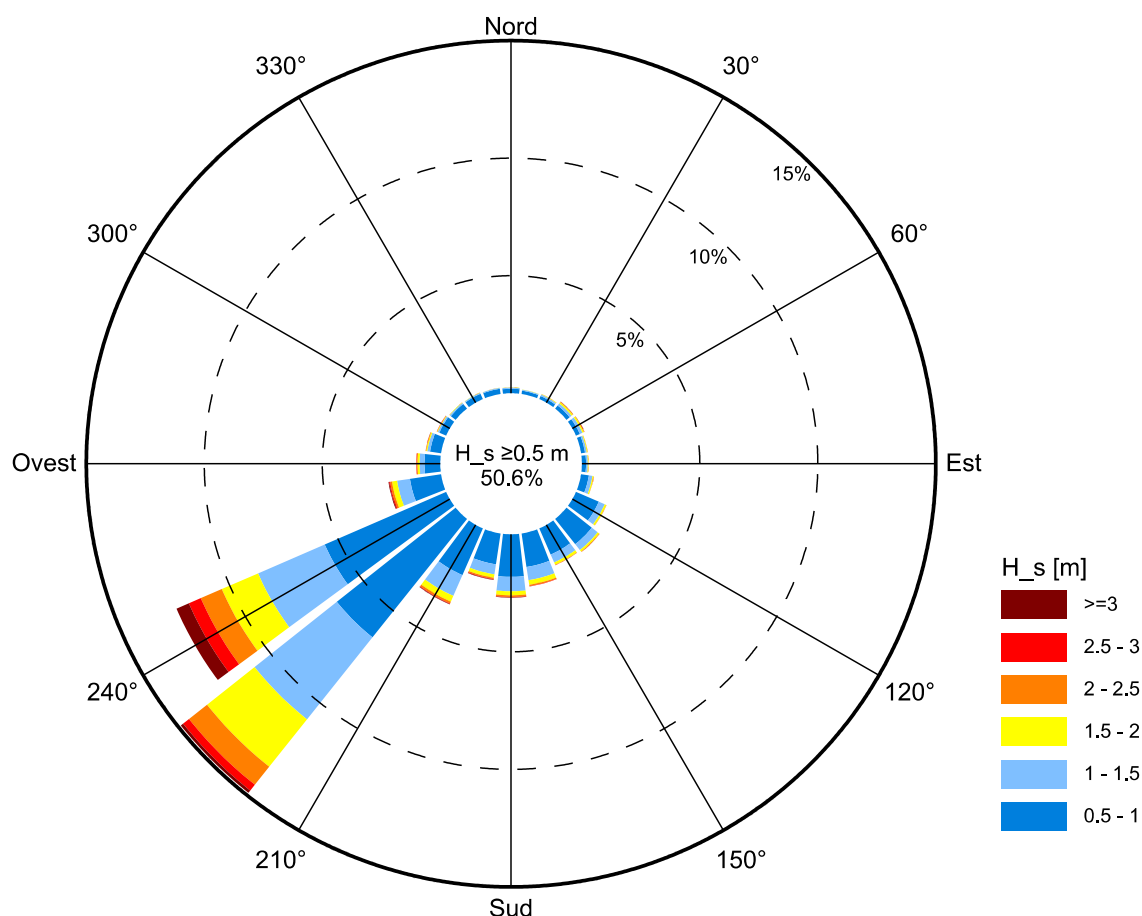


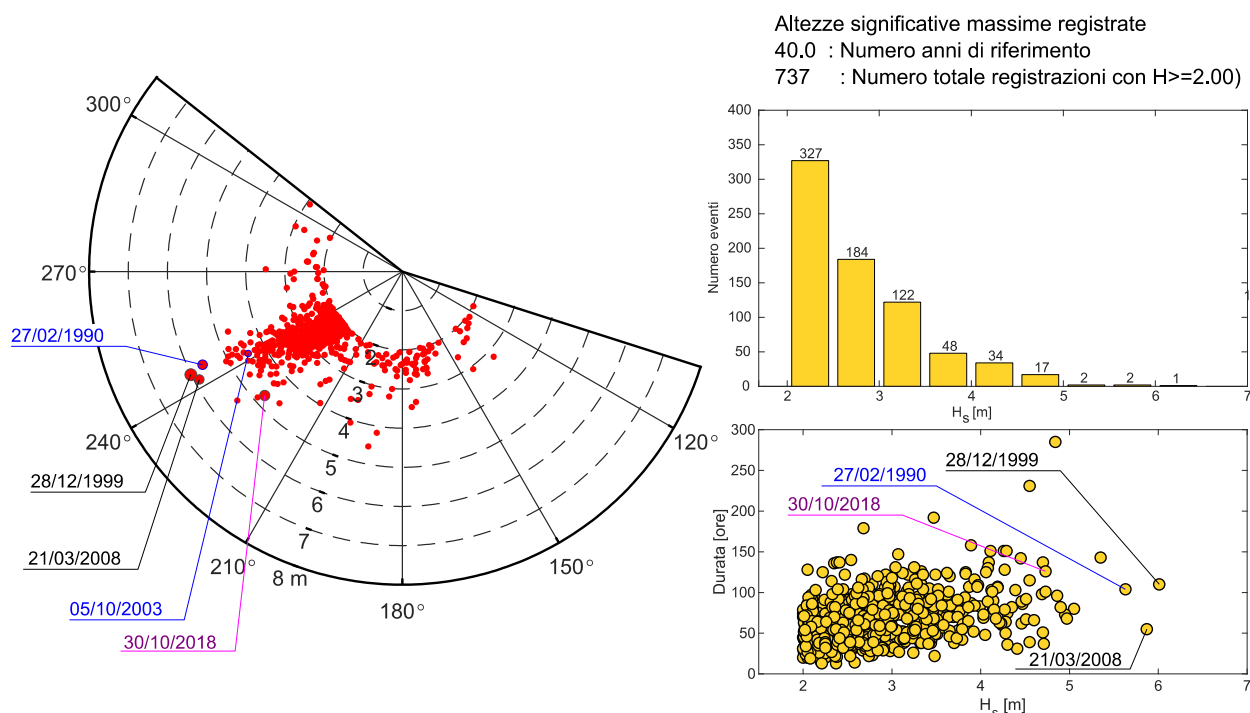
Figura 5.7. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  ricostruita dal DICCA nel punto P\_000367 al largo di La Spezia - periodo di riferimento 1979-2018.

In Figura 5.8 è presentata la distribuzione delle mareggiate estratte dalla serie DICCA al largo di La Spezia. Complessivamente in 40 anni di osservazioni sono state isolate 737 mareggiate. Le altezze d'onda al colmo sono in maggior misura comprese tra 2 e 3 m e solo pochi eventi hanno avuto valori di  $H_s$  superiori a 5 m (5/737). La distribuzione direzionale dei colmi delle mareggiate conferma una prevalenza di stati di mare compresi tra 210 e 250 °N, tuttavia, confrontando i risultati ottenuti con quelli relativi alla boa ondometrica di La Spezia, si osservano valori di altezza d'onda al colmo delle mareggiate inferiori.

Nel grafico sono indicati in nero gli eventi più elevati in termini di altezza d'onda  $H_s$ , in blu sono indicati i valori di  $H_s$  ricostruiti al colmo delle mareggiate più intense osservate dall'ondametro. Infine in viola è indicato l'evento estremo che si è abbattuto sulla riviera di levante della Liguria nell'ottobre del 2018.

**Tabella 5-3. Eventi di mareggiata più significativi ricostruiti dal DICCA al largo di La Spezia nel periodo 1979-2018.**

| Data colmo | ora   | $H_s$ [m] | $T_p$ [s] | Dir | Data inizio | ora   | Data fine  | ora   | Durata [ore] |
|------------|-------|-----------|-----------|-----|-------------|-------|------------|-------|--------------|
| 01/01/1979 | 8:00  | 4.7       | 9.6       | 251 | 01/01/1979  | 5:00  | 02/01/1979 | 17:00 | 37           |
| 16/12/1981 | 14:00 | 4.9       | 10.6      | 246 | 14/12/1981  | 5:00  | 18/12/1981 | 4:00  | 96           |
| 24/01/1986 | 7:00  | 5.1       | 10.3      | 243 | 22/01/1986  | 23:00 | 26/01/1986 | 6:00  | 80           |
| 26/02/1989 | 21:00 | 4.7       | 11.3      | 236 | 24/02/1989  | 4:00  | 01/03/1989 | 20:00 | 137          |
| 27/02/1990 | 15:00 | 5.6       | 10.6      | 245 | 26/02/1990  | 7:00  | 02/03/1990 | 14:00 | 104          |
| 26/10/1992 | 2:00  | 4.7       | 10.1      | 245 | 23/10/1992  | 14:00 | 27/10/1992 | 15:00 | 98           |
| 09/02/1999 | 7:00  | 4.7       | 10.1      | 243 | 07/02/1999  | 3:00  | 11/02/1999 | 7:00  | 101          |
| 28/12/1999 | 5:00  | 6.0       | 10.9      | 244 | 25/12/1999  | 9:00  | 29/12/1999 | 22:00 | 110          |
| 06/11/2000 | 13:00 | 4.6       | 9.2       | 191 | 30/10/2000  | 22:00 | 09/11/2000 | 12:00 | 231          |
| 08/11/2001 | 22:00 | 5.0       | 10.2      | 244 | 08/11/2001  | 1:00  | 11/11/2001 | 1:00  | 73           |
| 20/02/2002 | 23:00 | 4.6       | 10.8      | 240 | 20/02/2002  | 11:00 | 22/02/2002 | 1:00  | 39           |
| 04/02/2003 | 1:00  | 5.0       | 10        | 242 | 03/02/2003  | 9:00  | 06/02/2003 | 4:00  | 68           |
| 21/03/2008 | 19:00 | 5.9       | 11.5      | 242 | 21/03/2008  | 7:00  | 23/03/2008 | 13:00 | 55           |
| 30/10/2008 | 6:00  | 4.9       | 10.5      | 229 | 29/10/2008  | 3:00  | 01/11/2008 | 12:00 | 82           |
| 05/12/2011 | 7:00  | 4.6       | 9.8       | 243 | 03/12/2011  | 12:00 | 08/12/2011 | 6:00  | 115          |
| 16/12/2011 | 18:00 | 5.4       | 10.5      | 232 | 12/12/2011  | 19:00 | 18/12/2011 | 17:00 | 143          |
| 28/10/2012 | 8:00  | 4.6       | 11.5      | 223 | 26/10/2012  | 16:00 | 29/10/2012 | 9:00  | 66           |
| 21/11/2015 | 1:00  | 4.7       | 10.8      | 242 | 20/11/2015  | 16:00 | 22/11/2015 | 18:00 | 51           |
| 12/01/2016 | 5:00  | 4.8       | 10.4      | 244 | 03/01/2016  | 8:00  | 15/01/2016 | 4:00  | 285          |
| 30/10/2018 | 0:00  | 4.7       | 10.2      | 228 | 26/10/2018  | 22:00 | 01/11/2018 | 3:00  | 126          |



**Figura 5.8. Distribuzione delle altezze d'onda massime associate agli eventi di mareggiata ricostruiti dal DICCA al largo di La Spezia nel periodo 1979-2018**

## 5.5 Registrazioni ondametriche della boa Gorgona

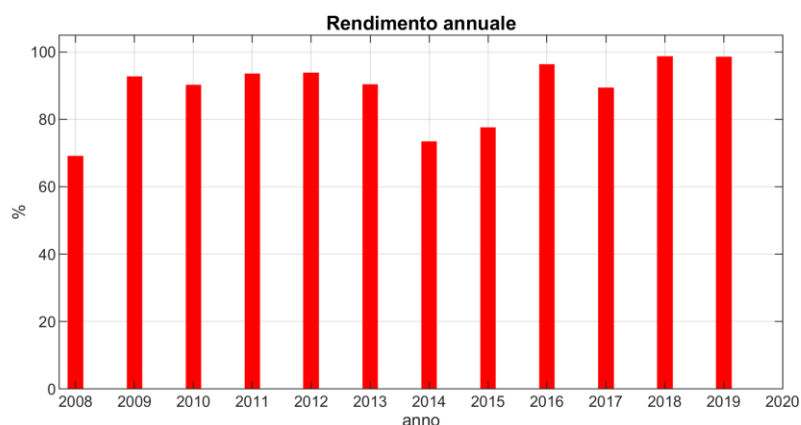
Il Servizio Idrologico Regionale (SIR) della Regione Toscana si è dotato di una boa ondametrica posizionata nel punto di coordinate 43.569°N 9.957°E al largo di Livorno, circa 20 km a Nord dell'Isola della Gorgona, su fondali compresi tra -100 e -200 m.

Lo strumento di misura ha iniziato ad operare nel 2008 ed ha acquisito dati direzionali di moto ondoso con cadenza oraria con un rendimento prossimo al 90%. In Tabella 5-4 e nei grafici riportati in Figura 5.9 e Figura 5.10 viene riportato il rendimento della boa ondametrica della Gorgona su base annuale e mensile.

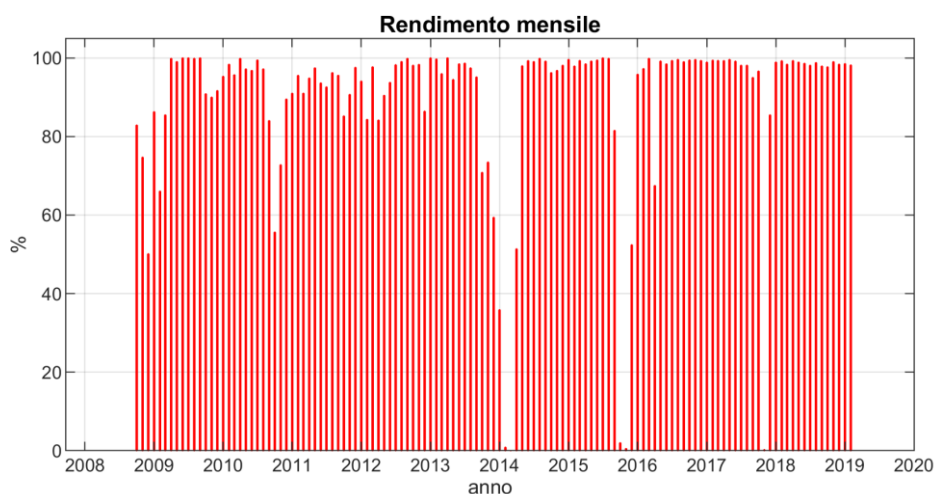
Nel diagramma polare di Figura 5.11 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  osservata dalla boa ondametrica della Gorgona. Si conferma anche da queste osservazioni una forte prevalenza di stati di moto ondoso provenienti da Libeccio [210 - 240°N] che rappresentano circa il 28.5% degli stati di mare. Dalle misure dell'ondametro si rileva inoltre una maggiore frequenza di apparizione degli stati di mare provenienti da ponente [255°N] pari al 13.7% del totale.

**Tabella 5-4. Analisi del rendimento della boa ondametrica della Gorgona tra il 2008 e il 2019.**

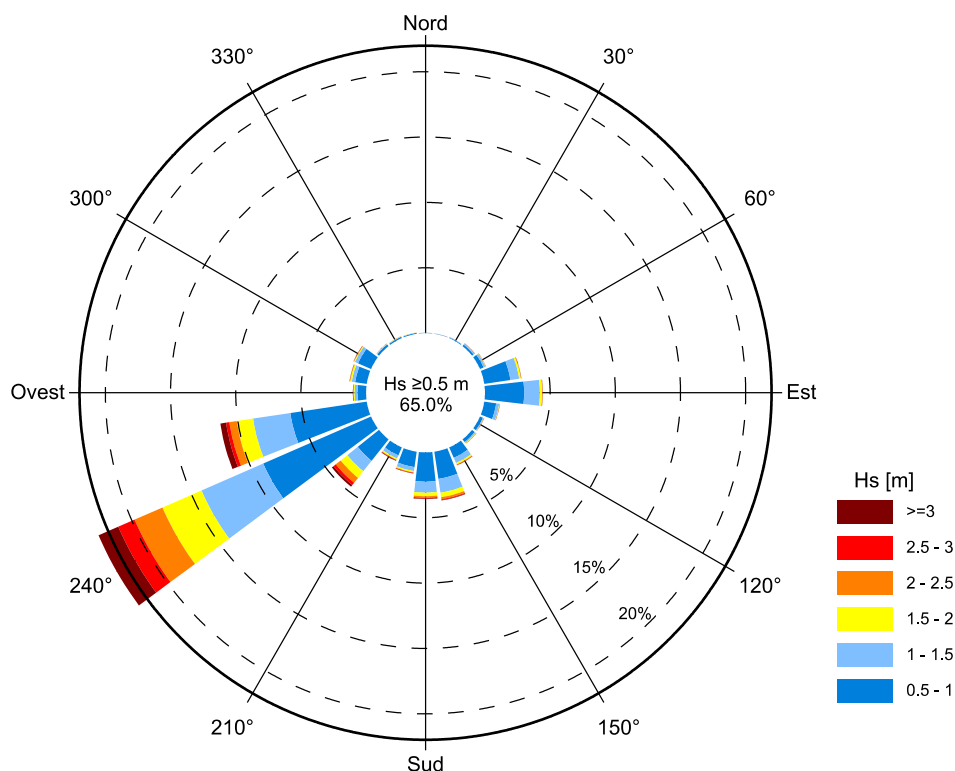
| Boa Ondametrica della Gorgona |            |                            |             |              |
|-------------------------------|------------|----------------------------|-------------|--------------|
| Anno                          | Misure     | Misure sensore ondametrico |             |              |
|                               | Potenziali | Presenti                   | Mancanti    | Rendimento%  |
| 2008                          | 2183       | 1507                       | 676         | 69.03        |
| 2009                          | 8760       | 8111                       | 649         | 92.6         |
| 2010                          | 8760       | 7893                       | 867         | 90.1         |
| 2011                          | 8760       | 8184                       | 576         | 93.4         |
| 2012                          | 8784       | 8236                       | 548         | 93.8         |
| 2013                          | 8760       | 7902                       | 858         | 90.2         |
| 2014                          | 8760       | 6424                       | 2336        | 73.3         |
| 2015                          | 8760       | 6784                       | 1976        | 77.4         |
| 2016                          | 8784       | 8455                       | 329         | 96.3         |
| 2017                          | 8760       | 7814                       | 946         | 89.2         |
| 2018                          | 8760       | 8638                       | 122         | 98.6         |
| 2019                          | 1129       | 1111                       | 18          | 98.4         |
| <b>TOTALE</b>                 |            | <b>81059</b>               | <b>9901</b> | <b>89.11</b> |



**Figura 5.9. Rendimento annuale della boa ondametrica Gorgona - Ottobre 2008 - Febbraio 2019.**

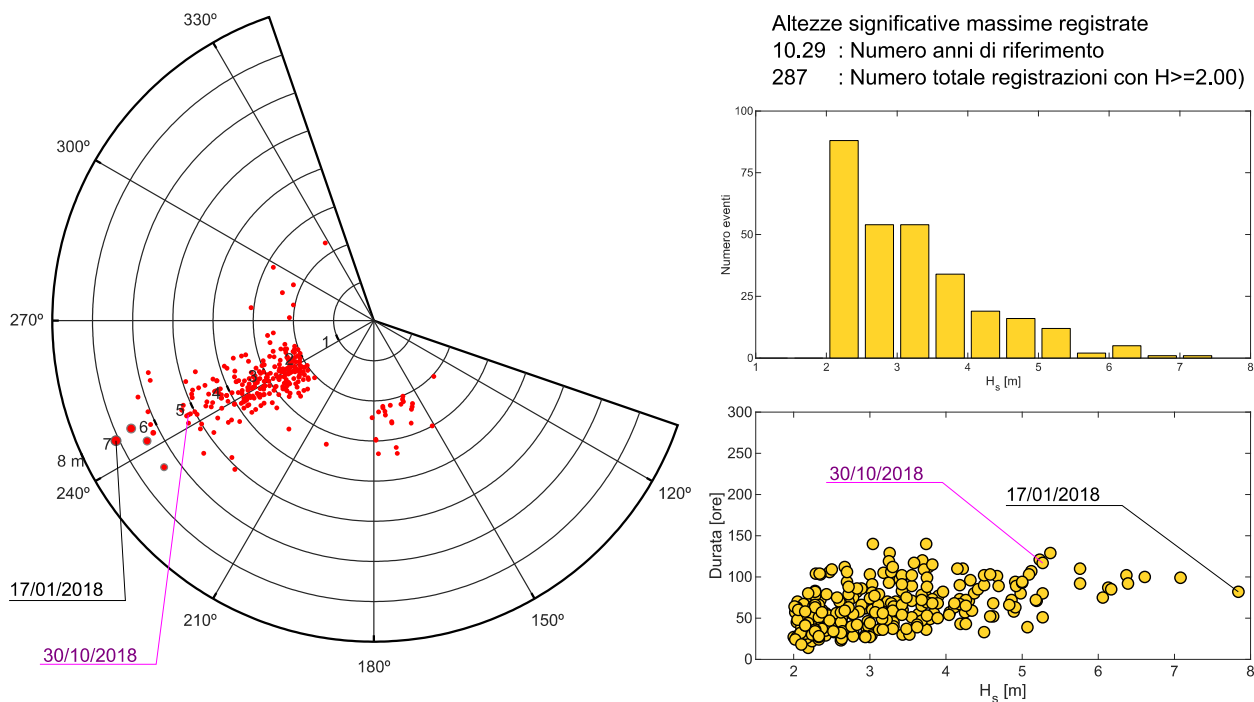


**Figura 5.10. Rendimento mensile della boa ondametrica Gorgona - Ottobre 2008 - Febbraio 2019.**



**Figura 5.11. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  registrata dalla boa ondometrica della Gorgona nel periodo Ottobre 2008 - Febbraio 2019**

Dai grafici riportati in Figura 5.12 è possibile osservare che in termini di altezza d'onda al colmo delle mareggiate, la boa della Gorgona ha registrato eventi più elevati rispetto ai dati osservati al largo di La Spezia. Complessivamente in poco più di 10 anni di funzionamento sono state registrate 287 mareggiate di cui ben 22 con  $H_s > 5.0$  m ( $22/287 = 7.6\%$ ). Gli eventi dominanti (più intensi) provengono dal settore 225-255 °N.



**Figura 5.12. Distribuzione delle altezze d'onda massime associate agli eventi di mareggiata registrati alla stazione ondometrica della Gorgona nel periodo Ottobre 2008 - Febbraio 2019.**

**Tabella 5-5. Eventi di mareggiata con altezza d'onda al colmo  $H_s \geq 5.0$  m osservati dalla boa ondometrica della Gorgona nel periodo 2008-2019.**

| Data colmo | ora   | Hs [m] | Tp [s] | Dir | Data inizio | ora   | Data fine  | ora   | Durata [ore] |
|------------|-------|--------|--------|-----|-------------|-------|------------|-------|--------------|
| 06/12/2008 | 10:00 | 5.2    | 10     | 246 | 04/12/2008  | 18:00 | 07/12/2008 | 16:00 | 71           |
| 18/07/2009 | 5:00  | 5.1    | 18.3   | 223 | 17/07/2009  | 23:00 | 19/07/2009 | 13:00 | 39           |
| 02/01/2010 | 16:00 | 5.4    | 10     | 232 | 30/12/2009  | 14:00 | 04/01/2010 | 22:00 | 129          |
| 08/11/2010 | 18:00 | 5.8    | 10     | 257 | 07/11/2010  | 4:00  | 11/11/2010 | 17:00 | 110          |
| 05/12/2011 | 18:00 | 5.2    | 10.25  | 243 | 03/12/2011  | 17:00 | 08/12/2011 | 17:00 | 121          |
| 17/12/2011 | 6:00  | 6.4    | 11.1   | 235 | 14/12/2011  | 11:00 | 18/12/2011 | 16:00 | 102          |
| 28/10/2012 | 10:00 | 6.4    | 10.31  | 242 | 26/10/2012  | 16:00 | 30/10/2012 | 11:00 | 92           |
| 04/12/2012 | 17:00 | 5.1    | 10     | 243 | 02/12/2012  | 23:00 | 07/12/2012 | 9:00  | 107          |
| 19/03/2013 | 3:00  | 6.1    | 10.25  | 245 | 17/03/2013  | 7:00  | 20/03/2013 | 21:00 | 87           |
| 12/01/2016 | 1:00  | 6.6    | 9.97   | 246 | 10/01/2016  | 21:00 | 15/01/2016 | 0:00  | 100          |
| 10/02/2016 | 7:00  | 6.2    | 10.57  | 243 | 09/02/2016  | 21:00 | 13/02/2016 | 6:00  | 82           |
| 23/05/2016 | 16:00 | 5.3    | 9.97   | 245 | 23/05/2016  | 10:00 | 25/05/2016 | 12:00 | 51           |
| 07/11/2016 | 4:00  | 6.1    | 9.97   | 248 | 05/11/2016  | 16:00 | 08/11/2016 | 18:00 | 75           |
| 13/01/2017 | 11:00 | 5.3    | 9.97   | 241 | 12/01/2017  | 9:00  | 15/01/2017 | 16:00 | 80           |
| 07/03/2017 | 4:00  | 5.1    | 11.07  | 238 | 04/03/2017  | 3:00  | 08/03/2017 | 9:00  | 103          |
| 09/12/2017 | 0:00  | 5.2    | 9.97   | 243 | 07/12/2017  | 16:00 | 10/12/2017 | 15:00 | 72           |
| 01/01/2018 | 23:00 | 6.2    | 11.07  | 252 | 01/01/2018  | 10:00 | 04/01/2018 | 22:00 | 85           |
| 17/01/2018 | 3:00  | 7.1    | 10.57  | 245 | 16/01/2018  | 0:00  | 20/01/2018 | 2:00  | 99           |
| 30/10/2018 | 4:00  | 5.3    | 11.72  | 245 | 27/10/2018  | 6:00  | 01/11/2018 | 2:00  | 117          |
| 09/12/2018 | 14:00 | 5.8    | 9.97   | 255 | 07/12/2018  | 21:00 | 11/12/2018 | 16:00 | 92           |

## 5.6 Dati in ricostruzione DICCA al largo di Livorno

Il punto DICCA selezionato al largo di Livorno, posto su fondali di 85 m (P\_000536, Lon: 10.01°, Lat: 43.59°), è posizionato a circa 20 km a NordEst dell'Isola della Gorgona e si trova ad una distanza di meno di 6 km dal luogo dove è posizionato l'ondametro della Gorgona gestito dalla Regione Toscana. Di conseguenza si può ritenere che l'area di generazione sia equivalente per i due punti in esame.

La serie storica analizzata si estende dal 1979 al 2018 e conta complessivamente di 350635 eventi, e fornisce, con cadenza oraria, i parametri spettrali di moto ondoso ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $T_{m-1,0}$ ,  $Dir$ ).

In Figura 5.13 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  da cui si può osservare una forte prevalenza degli eventi di moto ondoso provenienti da Libeccio [210-240°N] e da Ponente [255 °N] che complessivamente rappresentano circa il 38% degli stati di mare più significativi ( $H_s > 0.5$  m).

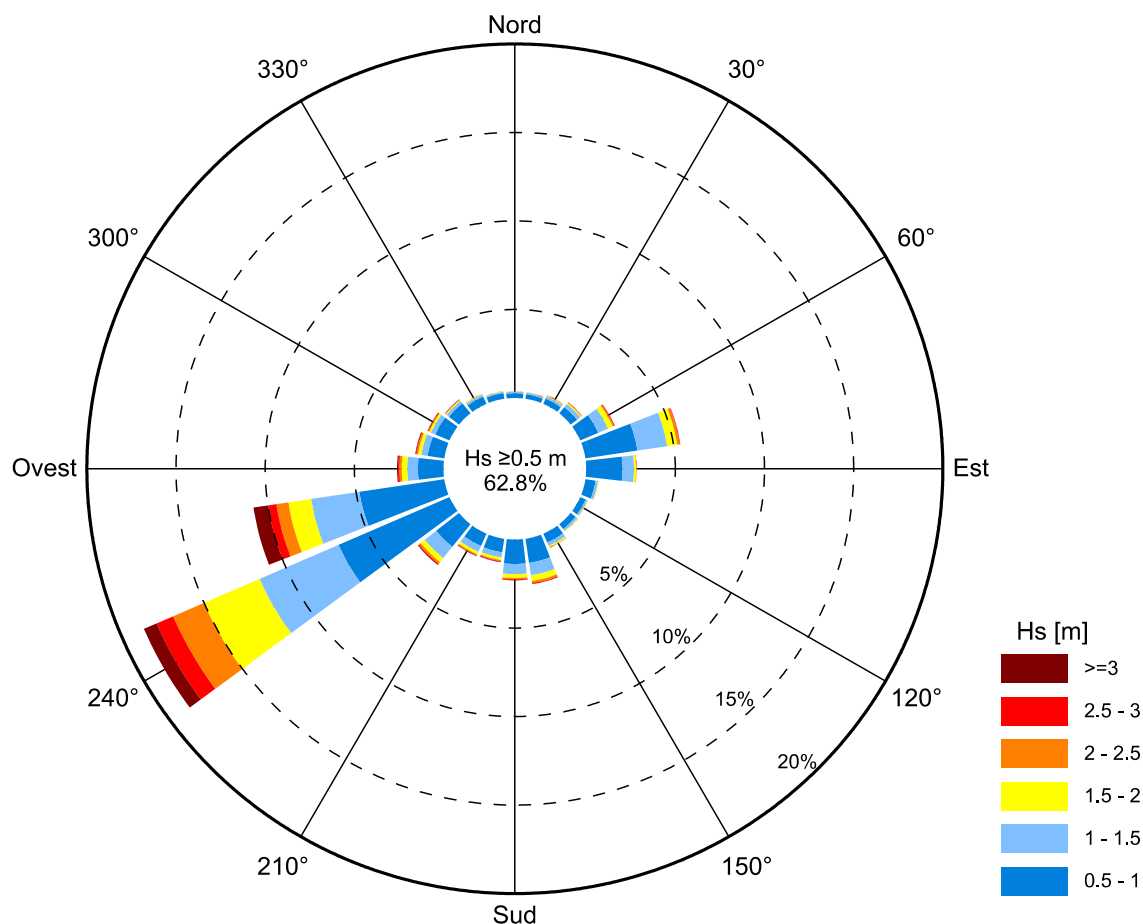


Figura 5.13. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  ricostruita dal DICCA nel punto P\_000536 al largo di Livorno - periodo di riferimento 1979-2018.

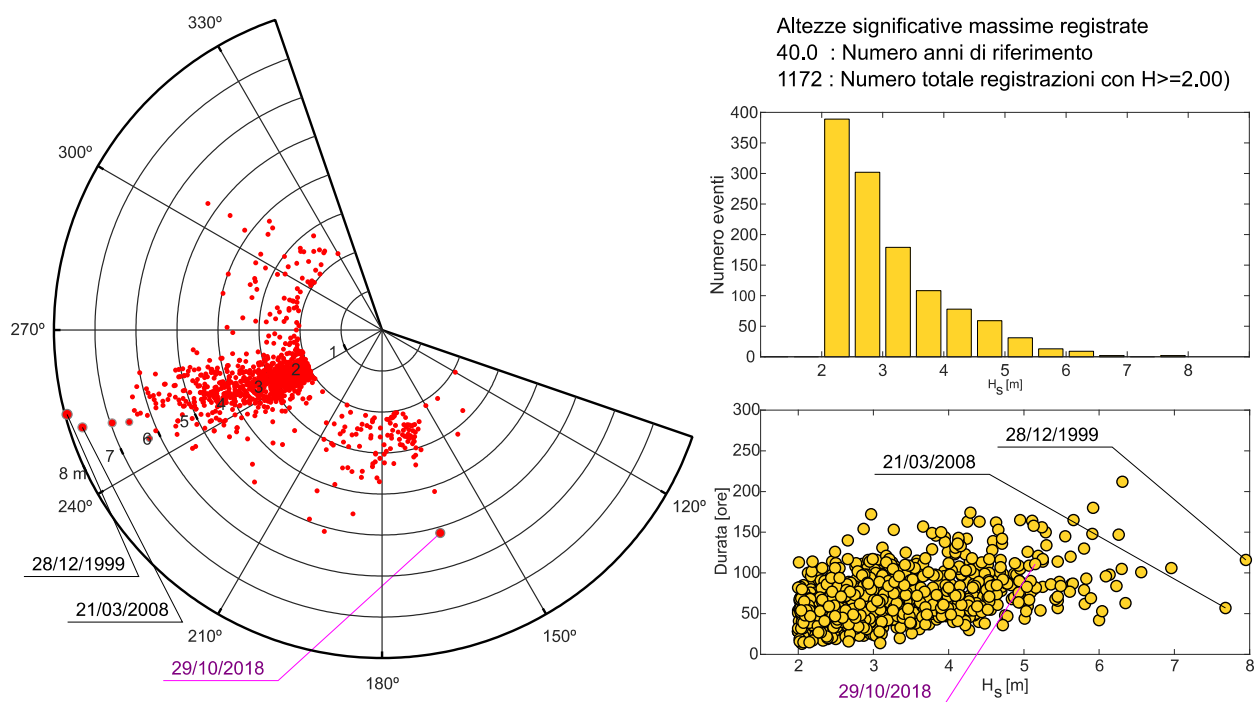


Figura 5.14. Distribuzione delle altezze d'onda massime associate agli eventi di mareggiata ricostruiti dal DICCA al largo di Livorno nel periodo 1979-2018.

In Figura 5.14 è presentata la distribuzione delle mareggiate estratte dalla serie DICCA al largo di Livorno. Complessivamente in 40 anni di osservazioni sono state isolate 1172 mareggiate. Le altezze d'onda al colmo sono in maggior misura comprese tra 2 e 3 m ma diversi eventi hanno superato la soglia di 5 m di altezza d'onda significativa (57/1172 meno del 5%).

Gli eventi estremi ricostruiti dal DICCA al largo di Livorno, al pari di quanto osservato dalla boa della Gorgona, si concentrano in prevalenza nel settore 225-255°N. Rispetto ai dati osservati dalla boa si rileva la presenza di stati di mare estremi provenienti dal settore di mezzogiorno. Tra questi è evidenziato l'evento di fine ottobre 2018 che ha colpito la riviera di levante della Liguria.

La serie storica al largo di Livorno ricostruita dal DICCA include mareggiate caratterizzate da altezze d'onda molto elevate che superano diverse volte la soglia  $H_s \geq 6.0$  m e che hanno raggiunto quasi 8 m (vedi Tabella 5-6). Purtroppo non è possibile confrontare direttamente questi dati estremi con i dati osservati dalla boa in quanto quest'ultima ha iniziato ad operare solo ottobre del 2008. Tuttavia confrontando i valori massimi di  $H_s$  riportati Tabella 5-6 con i valori massimi osservati dalla boa della Gorgona riportati in Tabella 5-5 si trovano valori di altezza d'onda al colmo leggermente inferiori.

**Tabella 5-6. Eventi di mareggiata con altezza d'onda al colmo  $H_s \geq 5.5$  m ricostruiti dal DICCA al largo di Livorno. Periodo 1979-2018**

| Data colmo | ora   | $H_s$ [m] | $T_p$ [s] | Dir | Data Inizio | ora   | Data fine  | ora   | Durata [ore] |
|------------|-------|-----------|-----------|-----|-------------|-------|------------|-------|--------------|
| 01/01/1979 | 9:00  | 6.00      | 10.5      | 260 | 01/01/1979  | 5:00  | 02/01/1979 | 22:00 | 42           |
| 16/03/1979 | 15:00 | 5.62      | 10.2      | 252 | 14/03/1979  | 15:00 | 19/03/1979 | 14:00 | 120          |
| 06/12/1980 | 10:00 | 5.80      | 11.1      | 254 | 04/12/1980  | 23:00 | 08/12/1980 | 5:00  | 79           |
| 16/12/1981 | 14:00 | 6.14      | 10.8      | 257 | 14/12/1981  | 3:00  | 18/12/1981 | 4:00  | 98           |
| 24/01/1986 | 5:00  | 5.83      | 10.1      | 251 | 22/01/1986  | 16:00 | 26/01/1986 | 12:00 | 93           |
| 19/12/1986 | 8:00  | 6.09      | 10.5      | 250 | 18/12/1986  | 8:00  | 22/12/1986 | 7:00  | 96           |
| 08/02/1988 | 19:00 | 5.91      | 10.7      | 255 | 05/02/1988  | 15:00 | 11/02/1988 | 18:00 | 148          |
| 06/12/1988 | 3:00  | 6.31      | 10.3      | 251 | 29/11/1988  | 10:00 | 08/12/1988 | 5:00  | 212          |
| 27/02/1989 | 3:00  | 5.55      | 10.6      | 245 | 24/02/1989  | 2:00  | 02/03/1989 | 2:00  | 145          |
| 27/02/1990 | 17:00 | 6.96      | 11        | 251 | 26/02/1990  | 7:00  | 02/03/1990 | 16:00 | 106          |
| 26/10/1992 | 2:00  | 5.92      | 10.2      | 256 | 21/10/1992  | 14:00 | 29/10/1992 | 1:00  | 180          |
| 27/03/1995 | 21:00 | 5.63      | 10.2      | 259 | 27/03/1995  | 13:00 | 31/03/1995 | 2:00  | 86           |
| 09/02/1999 | 7:00  | 5.66      | 10.3      | 254 | 04/02/1999  | 20:00 | 11/02/1999 | 16:00 | 165          |
| 19/11/1999 | 1:00  | 6.23      | 10.8      | 251 | 17/11/1999  | 5:00  | 20/11/1999 | 16:00 | 84           |
| 28/12/1999 | 7:00  | 7.95      | 12.2      | 255 | 25/12/1999  | 8:00  | 30/12/1999 | 3:00  | 116          |
| 08/11/2001 | 21:00 | 5.81      | 10.2      | 253 | 07/11/2001  | 13:00 | 10/11/2001 | 2:00  | 62           |
| 20/02/2002 | 20:00 | 6.04      | 10.6      | 246 | 20/02/2002  | 7:00  | 22/02/2002 | 11:00 | 53           |
| 04/02/2003 | 1:00  | 5.65      | 10.2      | 251 | 03/02/2003  | 7:00  | 06/02/2003 | 21:00 | 87           |
| 05/10/2003 | 7:00  | 5.89      | 10.2      | 254 | 03/10/2003  | 19:00 | 06/10/2003 | 15:00 | 69           |
| 13/01/2004 | 23:00 | 5.80      | 10.1      | 252 | 11/01/2004  | 13:00 | 16/01/2004 | 22:00 | 130          |
| 24/01/2007 | 7:00  | 5.61      | 11        | 243 | 22/01/2007  | 20:00 | 26/01/2007 | 0:00  | 77           |
| 21/03/2008 | 18:00 | 7.68      | 12        | 252 | 21/03/2008  | 6:00  | 23/03/2008 | 14:00 | 57           |
| 16/12/2011 | 20:00 | 6.26      | 10.9      | 245 | 12/12/2011  | 16:00 | 18/12/2011 | 18:00 | 147          |
| 21/11/2015 | 1:00  | 6.35      | 11        | 252 | 20/11/2015  | 13:00 | 23/11/2015 | 3:00  | 63           |
| 12/01/2016 | 5:00  | 6.30      | 10.4      | 255 | 10/01/2016  | 20:00 | 15/01/2016 | 4:00  | 105          |
| 17/01/2018 | 4:00  | 6.56      | 10.4      | 250 | 15/01/2018  | 23:00 | 20/01/2018 | 3:00  | 101          |

## 5.7 Registrazioni ondametriche all'esterno del porto di Marina di Carrara

L'Autorità Portuale Marina di Carrara (oggi facente parte dell'ADSP Mar Ligure Orientale) si era dotata di una boa ondametrica posizionata all'esterno del porto nel punto di coordinate 44.0022°N, 10.037°E su fondali di circa 13 m sul l.m.m..

Lo strumento di misura ha iniziato ad operare a Settembre del 2006 ed è stato dismesso ad ottobre del 2011. I dati forniti relativi al periodo giugno - ottobre 2011 sono dati grezzi estratti dalla memoria dell'ondametro e in questa fase di validazione non sono stati presi in considerazione perché richiedono ulteriori elaborazioni.

Complessivamente tra Settembre 2006 e Maggio 2011 lo strumento ha effettuato 32371 misure con cadenza oraria con un rendimento medio prossimo all'80%.

In Tabella 5-7 e nei grafici riportati in Figura 5.15 e in Figura 5.16 è riportato il rendimento della boa ondametrica di Marina di Carrara su base annuale e mensile (misure orarie).

Il clima di moto ondoso sottocosta osservato dalla boa ondametrica di Marina di Carrara, rappresentato nel diagramma polare di Figura 5.11, conferma anche sottocosta una prevalenza di stati di moto ondoso provenienti da Libeccio [210 - 240°N], che si presentano con un frequenza di accadimento pari al 30.5%. Rispetto alle condizioni di moto ondoso al largo le onde sottocosta, a causa dei fenomeni di rifrazione e di schermo delle componenti direzionali, si presenta ruotato verso sud con una maggior presenza di stati di mare da 210° N.

La serie storica registrata dalla boa di Marina di Carrara presenta nel suo complesso una breve durata ed ha un rendimento piuttosto discontinuo non può pertanto essere presa come riferimento per il clima di moto ondoso su base annuale e stagionale.

Ciò nonostante la disponibilità di questi dati consente di effettuare un confronto con i dati di moto ondoso ricostruiti sottocosta con la modellistica numerica, uno degli obiettivi principali dello studio meteomarino.

Ulteriori analisi sul moto ondoso osservato dall'ondametro sottocosta sono illustrate in seguito nel Volume 3 dello studio meteomarino dedicato al paraggio di Marina di Carrara.

**Tabella 5-7. Analisi del rendimento della boa ondametrica di Marina di Carrara tra il 2006 e il 2011.**

| <b>Boa Ondametrica Marina di Carrara</b> |            |                            |             |              |
|------------------------------------------|------------|----------------------------|-------------|--------------|
| Anno                                     | Misure     | Misure sensore ondametrico |             |              |
|                                          | Potenziali | Presenti                   | Mancanti    | Rendimento%  |
| 2006                                     | 2928       | 2629                       | 299         | 89.6         |
| 2007                                     | 8760       | 6637                       | 2123        | 75.9         |
| 2008                                     | 8784       | 8242                       | 542         | 93.9         |
| 2009                                     | 8760       | 6259                       | 2501        | 71.0         |
| 2010                                     | 8760       | 6084                       | 2676        | 69.4         |
| 2011                                     | 3624       | 2880                       | 744         | 80.0         |
| <b>TOTALE</b>                            |            | <b>32731</b>               | <b>8885</b> | <b>78.65</b> |

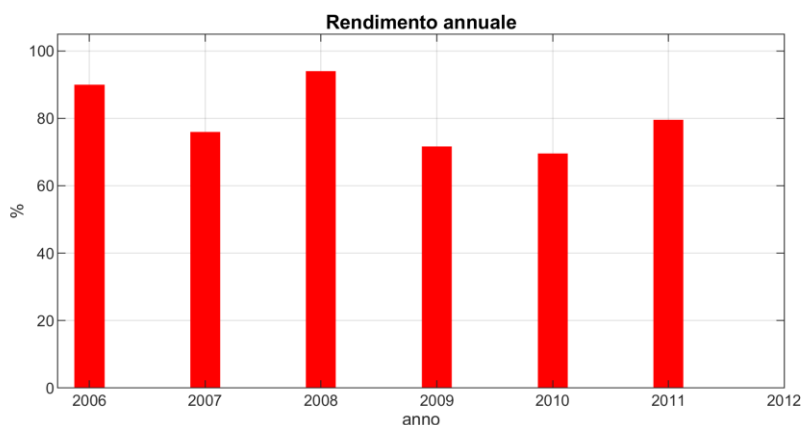


Figura 5.15. Rendimento annuale della boa ondometrica di Marina di Carrara - Settembre 2006 - Maggio 2011.

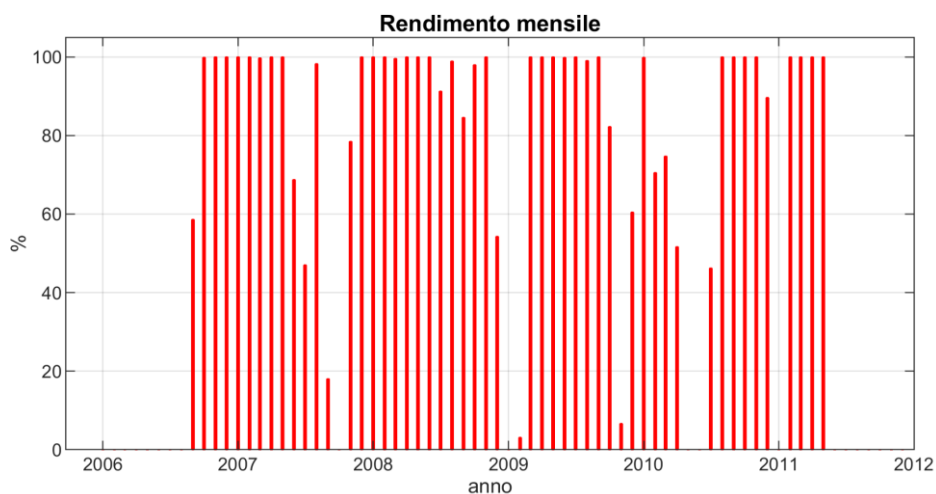


Figura 5.16. Rendimento mensile della boa ondometrica di Marina di Carrara - Settembre 2006 - Maggio 2011.

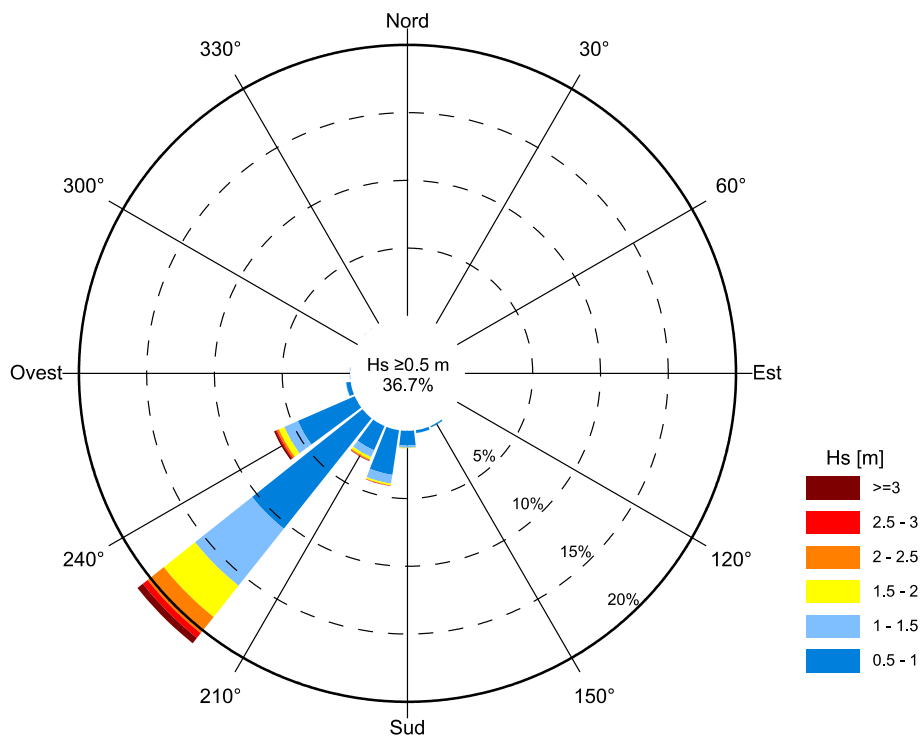


Figura 5.17. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa Hs osservata dall'ondametro di Marina di Carrara (periodo di riferimento 2006-2011)

## 5.8 Conclusioni

Per quanto riguarda il vento e il moto ondoso e in relazione all'area geografica in esame, in generale si può affermare che sono state individuate tutte le principali fonti di dati di interesse costituite da misure dirette o da ricostruzioni eseguite in re-analisi mediante i più affermati modelli meteorologici e di generazione di moto ondoso che operano a scala globale o regionale oggi esistenti. Individuate le fonti si è quindi proceduto ad acquisire i dati anche mediante il loro acquisto diretto come ad esempio i dati del DICCA (vento e onde) e le misure dirette di moto ondoso eseguite dall'ARPAT.

I dati di vento raccolti possono essere suddivisi in due categorie: dati ricostruiti in mare e dati misurati a terra. Per quanto riguarda i primi, di interesse per varie applicazioni tra le quali quelle relative allo studio della generazione del moto ondoso ad opera del vento che può risultare di interesse sia per propagare le onde da largo a riva sia, nel caso di La Spezia, per studiare la rigenerazione del moto ondoso all'interno della rada, si è visto che i dati della NOAA non risentono dell'orografia locale mentre quelli del DICCA ne sono fortemente influenzati. Globalmente comunque i dati di vento mostrano tra di loro una omogeneità e congruità con la meteorologia e l'orografia locale. L'importanza di aver acquisito e analizzato numerose fonti di dati è pienamente giustificata dal fatto che all'interno della rada di La Spezia dovranno essere condotti numerosi studi tra i quali si cita lo studio del campo idrodinamico per il quale il vento costituisce, insieme alla marea astronomica, la forzante principale. Si evidenzia inoltre che, come indicato nel presente documento in relazione alle misure mareografiche, le registrazioni di marea all'interno della Rada di La Spezia risultano molto brevi e pertanto i valori massimi dei livelli del mare indotti da eventi meteorologici estremi (sovrizzo di tempesta) probabilmente dovranno essere ottenuti mediante simulazioni dirette di venti estremi che agiscono sull'area in esame.

Per quanto riguarda il moto ondoso, le serie storiche del DICCA, che coprono 40 anni spingendosi fino a tutto il 2018, sono indiscutibilmente quelle più robuste dal punto di vista statistico. Si evidenzia peraltro che coprendo il 2018 forniscono informazioni molto importanti sull'evento meteomarino che a fine ottobre del 2018 ha colpito il Tirreno e il Mar Ligure provocando danni anche all'interno della Rada di La Spezia. Tuttavia il loro confronto con le misure dirette di moto ondoso disponibili ha evidenziato una tendenza del dato ricostruito a sottostimare leggermente il dato misurato. Per tale ragione utilizzando un approccio conservativo si è deciso di operare la calibrazione dei dati ricostruiti in reanalisi dal DICCA mediante confronto con i dati misurati di cui si tratta nel prossimo capitolo.

## Capitolo 6

### Calibrazione dei dati di moto ondoso del DICCA-WWIII

Come di seguito illustrato, si sono utilizzati due approcci differenti per calibrare i dati di moto ondoso: ciascuno di essi è stato orientato ad una delle due analisi che vengono condotte sugli stessi dati. La prima calibrazione, di seguito indicata come “*calibrazione sincrona*”, è rivolta alla calibrazione della serie storica di interesse per la definizione del clima ondometrico del paraggio. La seconda calibrazione, di seguito indicata “*calibrazione asincrona*”, è di interesse per calibrare i valori di  $H_s$  raggiunti al culmine delle singole mareggiate necessari per analizzare gli stati di mare estremi e quindi per definire la correlazione  $H_s$  – tempo di ritorno.

Queste due calibrazioni, sviluppate teoricamente da De Girolamo et al. (2017) [vedi De Girolamo, P., Di Risio, M., Beltrami, G.M., Bellotti, G., Pasquali, D., (2017) *The use of wave forecasts for maritime activities safety assessment*. Applied Ocean Research, 62, pp. 18-26, 2017.] si basano sul concetto che gli errori, tra le misure e i dati ricostruiti, valutati nello stesso istante, errori sincroni, risentono spesso di un errore legato alla tempistica (timing) con cui avviene l'evento meteomarinario. Tale errore è del tutto influente per la statistica degli eventi estremi, per cui in questo caso si deve applicare il metodo asincrono.

Per quanto riguarda la prima calibrazione (calibrazione sincrona), i dati ricostruiti dal DICCA con il modello di WWIII al largo di La Spezia e Marina di Carrara sono stati posti a confronto con i dati sincroni estratti dalla serie storica di misure effettuate dalla boa ondometrica di RON di La Spezia (1989-2014).

L'analisi condotta è basata sul calcolo della frequenza relativa dell'errore  $\Delta H = H_M - H_P$ , definito come la differenza tra la misura alla boa di La Spezia ( $H_M$ ) e il dato in reanalisi DICCA-WWIII ( $H_P$ ), e della frequenza del rapporto  $HR$  tra le misure  $HR = H_M / H_P$ .

La procedura di calibrazione è stata applicata selezionando i dati sincroni estratti dalle due serie storiche, per i periodi di tempo in comune, provenienti dal III° quadrante [180 - 270 °N] e caratterizzati da un'altezza d'onda significativa  $H_s \geq 0.5$  m.

In Figura 6.1 sono rappresentati i risultati della procedura di calibrazione che ha fornito una frequenza relativa dell'errore ( $P[\Delta H > 0]$ ) pari al 66.6% ed ha permesso di definire un **coefficiente di calibrazione statico pari ad 1.10** (corrispondente al quantile  $q_{50\%}$  della frequenza relativa cumulata di  $HR$ ) da applicare a tutte le altezze d'onda della serie DICCA-WWIII.

Con lo stesso approccio metodologico è stato ottenuto **un coefficiente di calibrazione pari a 1.20 da applicare al periodo di picco  $T_p$** . L'analisi è stata condotta selezionando i dati sincroni di moto ondoso contraddistinti da un periodo di picco  $T_p < 10.0$  s. Ai dati non compresi in questo insieme non è stato applicato alcun coefficiente di calibrazione.

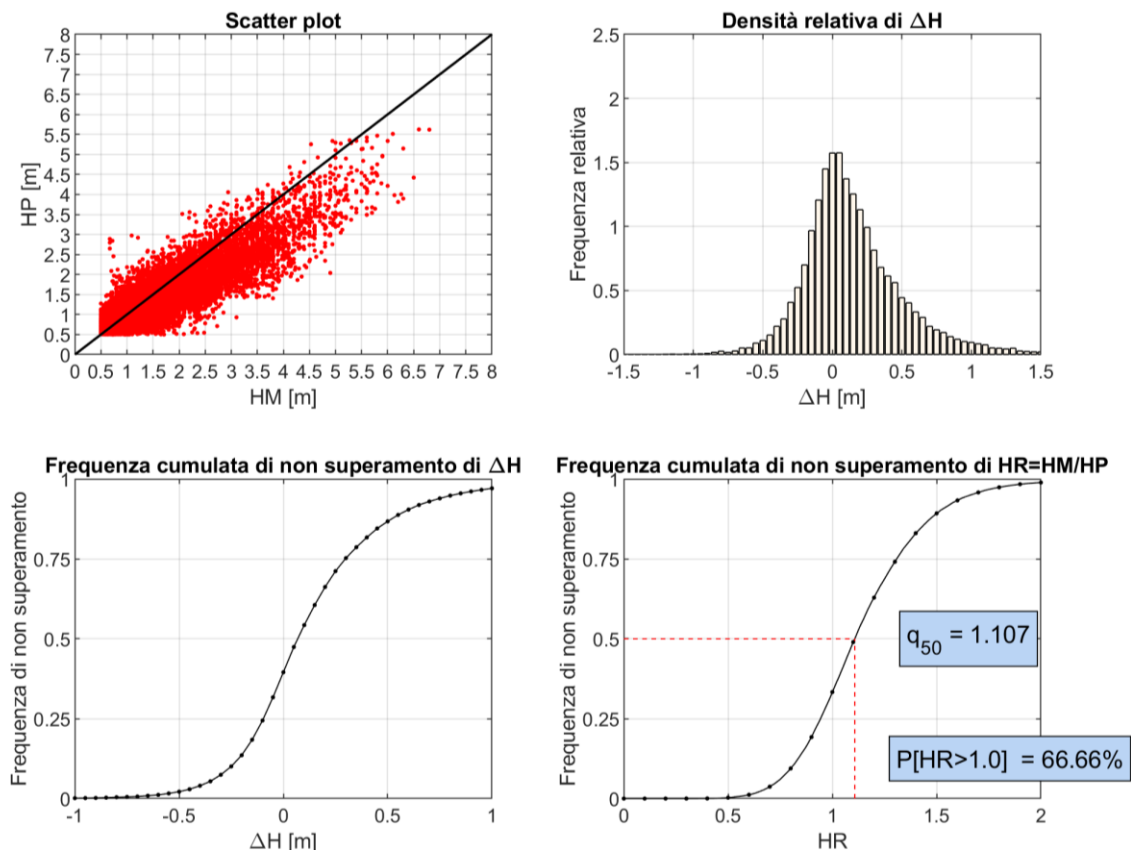


Figura 6.1. Calibrazione dei dati di moto ondoso ricostruiti dal DICCA (HP) utilizzando i dati sincroni registrati dalla boa ondometrica RON di La Spezia (HM) nel periodo 1989-2014.

## 6.1 Analisi e calibrazione degli eventi estremi ricostruiti dal DICCA-WWIII

Nei grafici di Figura 6.1 sono riportati i valori di  $H_s$  e direzione di provenienza al colmo delle mareggiate, definite secondo quanto specificato nel seguito, compresenti nella serie storica di misure effettuate dalla boa RON di La Spezia e nella serie ricostruita dal DICCA al largo di La Spezia con il modello WWIII. I dati fanno riferimento alle stesse mareggiate ma non sono sincroni, ovvero si accetta che i colmi delle singole mareggiate possano avvenire in istanti diversi pur appartenendo allo stesso evento meteorologico.

Le mareggiate individuate rispondono ai seguenti requisiti:

- altezza d'onda  $H_s$  sopra la soglia di  $H_s \geq 1.0$  m per più di 12 ore;
- altezza d'onda  $H_s$  al colmo superiore alla soglia  $H_s \geq 2.0$  m;
- distanza tra due mareggiate pari ad almeno 48 ore.

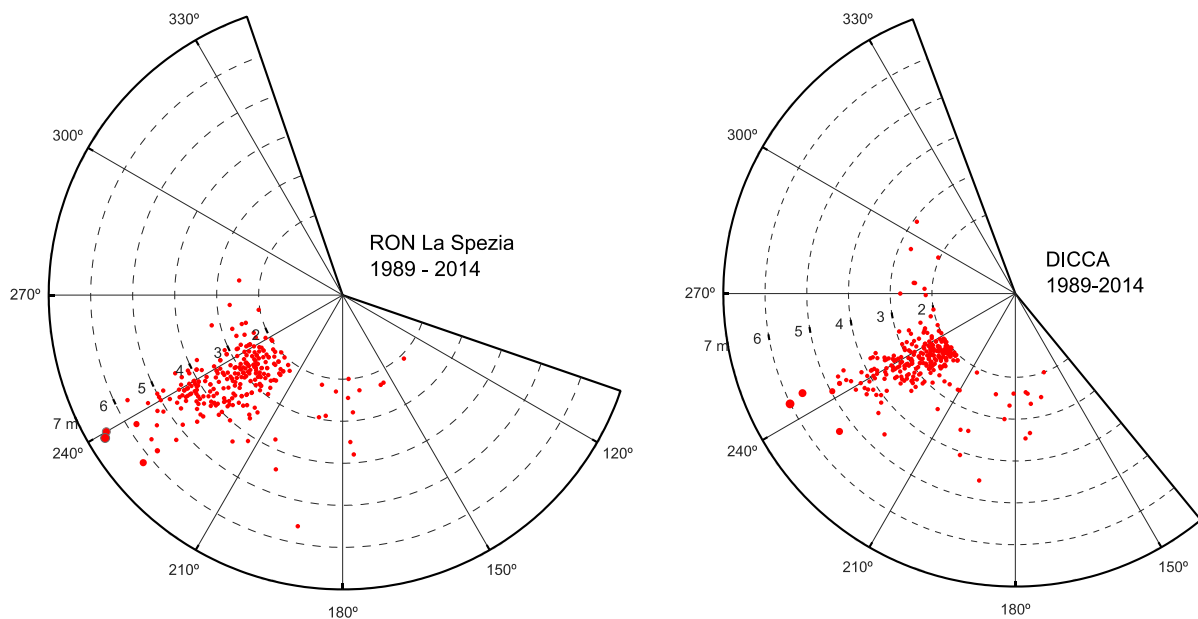


Figura 6.2. Distribuzione dei valori di altezza d'onda  $H_s$  al colmo delle mareggiate registrate dalla boa RON di La Spezia (sx) e ricostruite dal DICCA (dx) nel periodo 1989 - 2014.

Complessivamente nel periodo 1989 - 2014 l'ondametro RON-La Spezia ha misurato **420 eventi di mareggiata**. Di queste 72 hanno avuto valori al colmo con  $H_s \geq 4.0$  m. La massima altezza d'onda significativa è stata misurata durante la mareggiata di fine febbraio dell'anno 1990 in occasione della quale si è registrato  $H_s = 6.60$  m.

Analizzando la serie degli stati di mare ricostruiti con il modello WWIII dal DICCA, all'interno dello stesso intervallo temporale sono state individuate 446 mareggiate di cui solo 36 con  $H_s \geq 4.0$  m.

Sulla base della sequenza dei valori al colmo delle mareggiate estratte dalle due serie è stato possibile verificare che la maggior parte delle mareggiate misurate dalla boa RON di La Spezia con  $H_s \geq 3.0$  m sono presenti anche nel database DICCA-WWIII ma generalmente con valori inferiori di  $H_s$  al colmo.

Il confronto tra le mareggiate registrate dalla boa RON di La Spezia e quelle ricostruite dal DICCA-WWIII ha portato alla selezione di **267 mareggiate registrate e coesistenti con quelle ricostruite**, seppure con valori al colmo diversi, così distinte:

- 72 eventi con  $H_s \geq 4.0$  m (tutti gli eventi osservati dalla boa con  $H_s \geq 4.0$  m sono presenti nel database DICCA-WWIII);
- 85 eventi con  $3.0 \leq H_s < 4.0$  m (su un totale di 100 eventi registrati dalla boa tra i dati ricostruiti dal DICCA 15 eventi non sono classificabili come mareggiate);
- 69 eventi con  $2.5 \leq H_s < 3.0$  m (su un totale di 101 eventi registrati dalla boa 32 non trovano corrispondenza nel database DICCA-WWIII);
- 43 eventi con  $2.0 \leq H_s < 2.5$  m (su un totale di 145 eventi registrati dalla boa 102 eventi per il modello DICCA-WWIII non sono classificabili come mareggiate e sono stati scartati).

La serie degli stati di mare ricostruiti con il modello DICCA-WWIII presenta nel periodo preso in esame un totale di 448 mareggiate. Nei periodi di mancato funzionamento della boa ondometrica posta al largo di La Spezia si sono verificate 179 mareggiate così distinte:

- 11 eventi con  $H_s \geq 4.0$  m;
- 29 eventi con  $3.0 \leq H_s < 4.0$  m;
- 48 eventi con  $2.5 \leq H_s < 3.0$  m;
- 90 eventi con  $2.0 \leq H_s < 2.5$  m.

Ad ogni modo il numero di dati compresenti a disposizione evidenzia che il confronto è ben rappresentativo per le mareggiate più intense ( $H_s > 4.0$  m), mentre intorno alla soglia inferiore ( $H_s = 2.0$  m) aumenta il numero di eventi non presenti nella serie di dati ricostruiti dal modello DICCA che non superano il valore  $H_s > 2.0$  m.

Le analisi condotte, rappresentate in forma grafica nella Figura 6.1, indicano una buona correlazione tra le direzioni del moto ondoso (grafico a) mentre per l'altezza significativa  $H_s$  al colmo (grafico b) i dati DICCA-WWIII risultano inferiori a quelli registrati dalla boa di La Spezia (differenza media -0.5 m e deviazione standard 0.52 m).

La retta di interpolazione  $HP = A+B \cdot HM$  (in rosso) è stata determinata con il metodo dei minimi quadrati imponendo il passaggio per l'origine ( $A=0$ ) ed ottenendo  $B = 0.8389$ .

A seguito di tale analisi è stato quindi individuato **un coefficiente di calibrazione statico pari a 1.19** ( $HC = HP \cdot B^{-1}$ ) da applicare ai valori di altezza d'onda significativa  $H_s$  al colmo delle mareggiate estratte dalla serie DICCA al largo di La Spezia.

**Tabella 6-1. Parametri statistici relativi all'errore tra i valori estremi di  $H_s$  registrati dalla boa RON di La Spezia (HM), quelli ricostruiti dal DICCA (HP) e quelli ottenuti con la procedura di calibrazione (HC).**

| Fonte dato                | ID | Numero Mareggiate | Media $H_s$ [m] | dev.std $H_s$ [m] | BIAS [m] | MSE [m] | RMS [m] |
|---------------------------|----|-------------------|-----------------|-------------------|----------|---------|---------|
| RON La Spezia             | HM | 267               | 3.37            | 0.91              |          |         |         |
| DICCA La Spezia           | HP | 267               | 2.87            | 0.74              | 0.5      | 0.52    | 0.72    |
| DICCA La Spezia Calibrata | HC | 267               | 3.37            | 0.87              | 0.1      | 0.28    | 0.53    |

Questo incremento dei valori di  $H_s$  ricostruiti (Tabella 6-1) presenta BIAS = 0.1, errore quadratico medio MSE 0.28 m e scarto quadratico medio RMS 0.53 m.

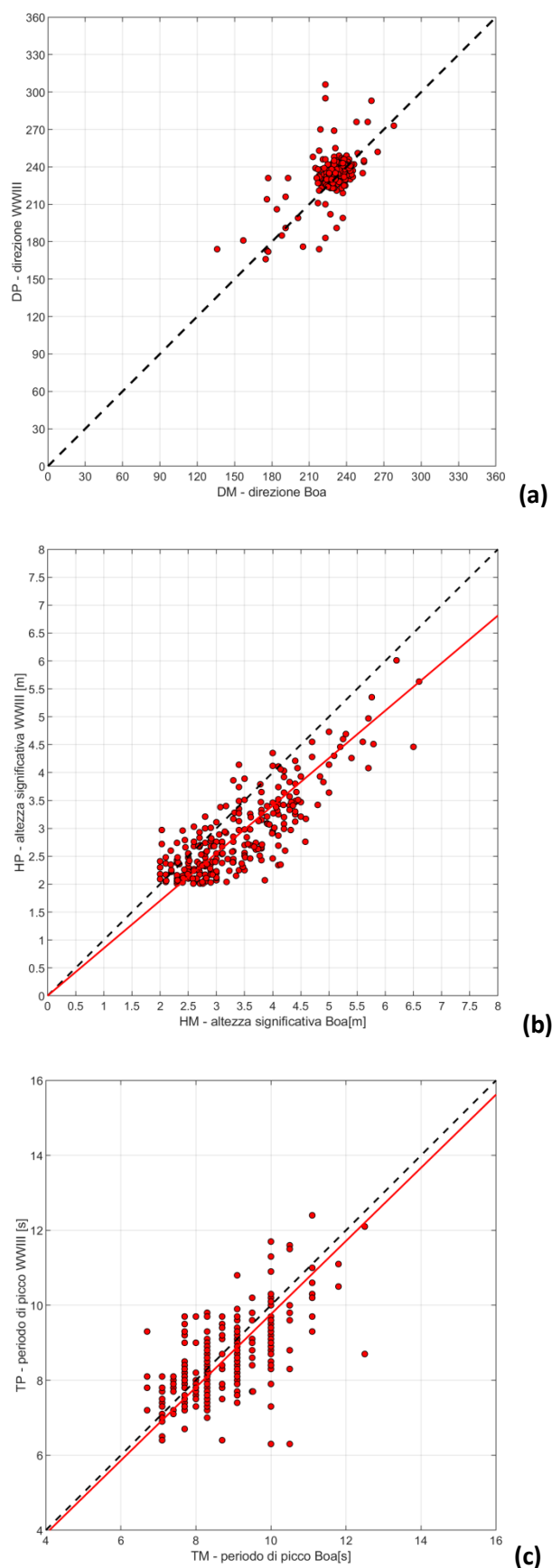
Lo stesso procedimento è stato applicato **per il periodo di picco  $T_p$** . (Figura 6.1 grafico c). La retta di interpolazione  $TP = A+B \cdot TM$  è stata determinata con il metodo dei minimi quadrati imponendo il passaggio per l'origine ( $A=0$ ) ottenendo  $B = 0.981$ . **Il coefficiente di calibrazione** risulta essere **1.02** ( $TC = TP \cdot B^{-1}$ ). In Tabella 6-2 sono riportati i parametri statistici ottenuti.

**Tabella 6-2. Parametri statistici relativi all'errore tra i valori  $T_p$  associati alle mareggiate registrate dalla boa RON di La Spezia (TM) e quelli ricostruiti dal DICCA (TP) e quelli ottenuti con la procedura di calibrazione (TC).**

|                                  | ID | Numero Mareggiate | Media $T_p$ [s] | dev.std $T_p$ [s] | BIAS [s] | MSE [s] | RMS [s] |
|----------------------------------|----|-------------------|-----------------|-------------------|----------|---------|---------|
| <b>RON La Spezia</b>             | TM | 267               | 8.79            | 1.09              |          |         |         |
| <b>DICCA La Spezia</b>           | TP | 267               | 8.58            | 1.05              | 0.2      | 0.86    | 0.93    |
| <b>DICCA La Spezia Calibrata</b> | TC | 267               | 8.79            | 1.07              | 0.0      | 0.16    | 0.40    |

A seguito di questa analisi di validazione e calibrazione dei valori estremi si è proceduto a definire una **serie di dati di moto ondoso calibrata** in cui i parametri di altezza d'onda significativa  $H_s$  e periodo di picco  $T_p$  sono stati incrementati utilizzando i parametri di calibrazione ottenuti in precedenza.

Utilizzando questa serie calibrata come verrà illustrato in seguito sono state condotte le analisi statistiche dei valori estremi di moto ondoso.



**Figura 6.3. Confronto asincrono tra i valori al colmo delle mareggiate (con  $H_s > 2.0$  m) registrati dalla boa ondometrica RON di La Spezia tra il 1989 ed il 2014 con cadenza trioraria e quelli ricostruiti dal DICCA in prossimità della boa.**  
**(a) correlazione direzione mareggiata registrata boa/direzione ricostruita dal DICCA**  
**(b) correlazione altezza d'onda significativa  $H_s$  registrata/ricostruita dal DICCA**  
**(c) correlazione periodo di picco  $T_p$  registrato/ricostruito dal DICCA**

## Capitolo 7 Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo

Per eseguire l'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso, relativi alla serie storica calibrata (vedi cap.7), è necessario selezionare preliminarmente i dati in modo tale che rispondano al doppio requisito di risultare tra loro **omogenei** e **statisticamente indipendenti**.

L'*indipendenza statistica* si garantisce in generale accertando che gli eventi selezionati siano tra di loro indipendenti, ovvero, nel caso delle mareggiate, che ciascun evento sia attribuibile ad un fenomeno meteorologico diverso.

Dal punto di vista pratico, l'*indipendenza statistica* si garantisce in primo luogo prendendo in esame per ogni singolo evento di mareggiata il valore di  $H_s$  raggiunto al culmine dell'evento stesso. Essa può essere assicurata sia utilizzando il metodo dei "massimi annuali", sia il metodo **POT (Peaks Over Threshold)** detto anche "della serie di durata parziale sopra soglia". Nel primo caso il campione di riferimento è costituito dalla massima altezza d'onda significativa registrata o ricostruita ogni anno solare che viene poi associata al settore di provenienza considerato.

Applicando il metodo POT occorre preliminarmente definire la singola mareggiata, la quale viene poi caratterizzata dal valore di altezza d'onda significativa raggiunta al culmine dell'evento stesso insieme ai corrispondenti valori del periodo e della direzione delle onde.

Una prima selezione delle mareggiate di solito in Mediterraneo viene effettuata individuando nella serie storica gli eventi che superano la soglia di circa  $H_s = 1.0$  m. In tal modo il singolo evento (mareggiata) ha inizio quando l'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) supera per la prima volta il valore della soglia prestabilito e termina quando  $H_s$  assume per la prima volta un valore inferiore a quello di soglia oppure quando si verifica un rilevante rotazione della direzione di propagazione del moto ondoso (circa  $60^\circ$ ).

Sempre con il metodo POT per garantire l'indipendenza statistica tra le mareggiate individuate, si impongono dei parametri più stringenti, ovvero di solito si impone che per ogni mareggiata debba risultare:

1. il colmo in termini di altezza d'onda significativa superiore a 2.0 m;
2. la durata dell'evento sia superiore ad almeno 12 h.

Inoltre il tempo minimo intercorrente tra i colmi di due eventi estremi consecutivi deve risultare superiore a circa 48 ore (Mathiesen).

In definitiva per il metodo POT, il campione è costituito dalle altezze d'onda significative relative al massimo valore registrato (o ricostruito) per ogni singola mareggiata e per il settore di provenienza considerato.

L'omogeneità dei dati viene invece assicurata:

1. considerando i dati registrati con la medesima cadenza temporale: eventi solo orari;
2. raggruppando gli stessi dati in eventi caratterizzati da una simile genesi meteorologica. Ciò normalmente si traduce nel separare i valori massimi delle altezze d'onda registrati in distinti settori di provenienza degli stati di mare.

La scelta dei settori di provenienza degli stati di mare richiede di analizzare le condizioni meteorologiche che si possono verificare nel sito di interesse in relazione alla sua esposizione geografica.

## 7.1 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati

Gli stati di mare estremi individuati come sopra esposto, sono oggetto di una elaborazione statistica al fine di determinare, mediante una regolarizzazione degli eventi estremi secondo note funzioni probabilistiche, le caratteristiche del moto ondoso da associare ad assegnati tempi di ritorno  $T_R$  (o a probabilità di occorrenza).

Le leggi adottate di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) sono:

1. Distribuzione di Weibull:

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

2. Distribuzione di Gumbel:

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

dove  $X_{\max}$  è la variabile aleatoria,  $x$  il valore di non superamento mentre  $A$ ,  $B$  e  $k$  sono le costanti delle distribuzioni, che rappresentano rispettivamente il parametro di scala, di posizione e di forma. Il parametro  $k$  per la distribuzione di Weibull è assunto pari a 0.75, 1.0, 1.4 e 2.0

La valutazione dei parametri della distribuzione richiede la preliminare stima della frequenza campionaria dei dati. Il campione dei dati viene ordinato in senso decrescente e per ogni  $m$ -esimo evento viene calcolata la frequenza campionaria di non superamento utilizzando la seguente formula di generale (plotting position)<sup>2</sup>:

$$\hat{F}_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, m = 1, 2, K, N$$

Introducendo la variabile ridotta:

$$y_{(m)} = \left[-\ln(1 - \hat{F}_m)\right]^{1/k}$$

viene applicato il metodo dei minimi quadrati per determinare i parametri  $A$  e  $B$  della retta:

$$x_{(m)} = B + A \cdot y_{(m)}$$

<sup>2</sup> I valori dei parametri  $\alpha$  e  $\beta$  sono forniti da Goda (1988): per la distribuzione Weibull sono  $\alpha = 0.20 + 0.27/\sqrt{k}$ ,  $\beta = 0.20 + 0.23/\sqrt{k}$ ; per quella di Gumbel è utilizzata la formulazione di Gringorten con  $\alpha = 0.44$  e  $\beta = 0.12$

Definita la funzione di probabilità di non superamento e tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell'evento dalla relazione:

$$Tr(X \leq x) = \frac{I}{(1 - P(X \leq x))}$$

è possibile valutare il valore massimo dell'altezza d'onda significativa, corrispondente ad un tempo di ritorno assegnato.

Una volta eseguite le elaborazioni di regolarizzazione statistica (Gumbel e Weibull), occorre verificare la bontà dei risultati ottenuti; a tale scopo Goda definisce due diversi criteri da seguire per scartare le distribuzioni statistiche non adatte:

1. Deviation of OutLier (DOL) - dove si controlla che l'evento con il maggiore valore di  $H_s$  ricada all'interno di un determinato campo di validità;
2. REsidue of Correlation coefficient (REC) - il coefficiente di correlazione residuo ( $\Delta r = 1 - r$ ) deve essere inferiore ad una determinata soglia definita come  $\Delta r_{95\%}$ .

Il criterio MIR (Minimum ratio of Residual correlation coefficient), proposto sempre da Goda, consente infine di selezionare, tra le distribuzioni rimaste valide, quella che meglio si adatta al campione esaminato; tale criterio si basa sul rapporto tra il coefficiente di correlazione residuo ( $\Delta r$ ) e quello medio, che può essere stimato attraverso una relazione empirica (funzione della numerosità del campione e della distribuzione); la distribuzione di migliore adattamento è quella che presenta il minimo valore di tale rapporto.

## 7.2 Metodo dei massimi annuali

Il metodo dei massimi annuali è applicato considerando il campione costituito dalle massime altezze d'onda significativa su base annua appartenenti alla serie storica calibrata MeteOcean DICCA relative a:

- periodo 1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018;
- ogni singolo settore di provenienza e al campione non suddiviso per settori (overall).

Per individuare i settori di provenienza degli stati di mare si è fatto riferimento all'esposizione geografica del sito analizzata in precedenza (vedi Figura 3.3) la quale mostra chiaramente l'esistenza di tre settori, ovvero: un **settore Meridionale** dove le onde vengono generate da venti che spirano da Sud nel Tirreno; un **settore di Libeccio** dove le onde vengono generate da venti che provengono dal Mar di Corsica e dal Golfo del Leone; un **settore di Maestrale** dove le onde vengono generate da venti che spirano nel Mar Ligure.

Sono stati individuati così tre settori di traversia che caratterizzano il paraggio in esame:

- Settore A: settore tra 150 °N e 210 °N (settore meridionale);
- Settore B: settore tra 210 °N e 270 °N (settore di libeccio);
- Settore C: settore tra 270 °N e 330 °N (settore di maestrale).

Tali eventi suddivisi per settore di appartenenza sono rappresentati nel diagramma polare riportato in Figura 7.1. La stessa suddivisione in settori è stata utilizzata anche per applicare il metodo POT.

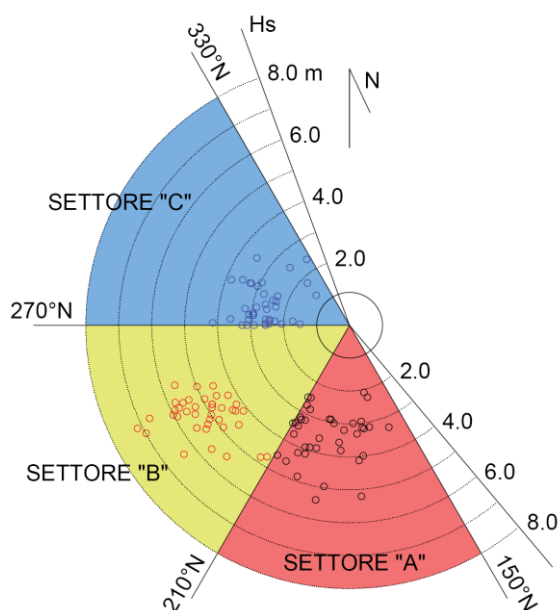


Figura 7.1 - Distribuzione per settori degli eventi massimi annuali

Nelle tabelle seguenti sono riportati gli eventi massimi annuali (40 anni) associati a ciascun settore di provenienza; in rosso viene indicato l'evento con la massima altezza d'onda significativa. Nelle Figura 7.2, Figura 7.3, Figura 7.4 e Figura 7.5 sono sintetizzati in forma grafica e tabellare i risultati delle analisi statistiche per i settori considerati e per le diverse distribuzioni di probabilità adottate.

**tabella 7-1- settore: overall - Elenco dei 40 stati di mare massimi annuali**  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)

| Data       | Ora | H <sub>s</sub> | T <sub>p</sub> | Dir  | Data       | Ora | H <sub>s</sub> | T <sub>p</sub> | Dir  |
|------------|-----|----------------|----------------|------|------------|-----|----------------|----------------|------|
| aaaa/mm/gg | hh  | (m)            | (s)            | (°N) | aaaa/mm/gg | hh  | (m)            | (s)            | (°N) |
| 1979/01/01 | 8   | 5.60           | 9.8            | 251  | 1999/12/28 | 5   | 7.15           | 11.1           | 244  |
| 1980/12/06 | 13  | 4.82           | 11.1           | 240  | 2000/11/06 | 13  | 5.41           | 9.4            | 191  |
| 1981/12/16 | 14  | 5.78           | 10.8           | 246  | 2001/11/08 | 22  | 5.89           | 10.4           | 244  |
| 1982/10/14 | 19  | 4.99           | 9.1            | 248  | 2002/02/20 | 23  | 5.41           | 11.0           | 240  |
| 1983/11/27 | 15  | 4.52           | 8.6            | 228  | 2003/02/04 | 1   | 5.91           | 10.2           | 242  |
| 1984/01/24 | 1   | 4.63           | 9.9            | 237  | 2004/02/23 | 14  | 5.12           | 9.8            | 236  |
| 1985/11/13 | 16  | 5.25           | 9.8            | 235  | 2005/12/03 | 2   | 4.86           | 9.6            | 199  |
| 1986/01/24 | 7   | 6.01           | 10.5           | 243  | 2006/12/09 | 10  | 4.34           | 8.9            | 233  |
| 1987/06/15 | 22  | 4.80           | 9.0            | 240  | 2007/01/24 | 8   | 5.37           | 10.9           | 234  |
| 1988/02/08 | 18  | 5.30           | 10.6           | 242  | 2008/03/21 | 19  | 6.99           | 11.7           | 242  |
| 1989/02/26 | 21  | 5.59           | 11.5           | 236  | 2009/04/29 | 13  | 4.13           | 9.2            | 231  |
| 1990/02/27 | 15  | 6.70           | 10.8           | 245  | 2010/03/31 | 18  | 5.01           | 9.5            | 237  |
| 1991/11/14 | 19  | 4.56           | 9.3            | 242  | 2011/12/16 | 18  | 6.37           | 10.7           | 232  |
| 1992/10/26 | 2   | 5.58           | 10.3           | 245  | 2012/10/28 | 8   | 5.47           | 11.7           | 223  |
| 1993/12/16 | 8   | 4.93           | 8.9            | 243  | 2013/03/18 | 23  | 5.37           | 9.8            | 245  |
| 1994/09/15 | 18  | 4.90           | 9.3            | 234  | 2014/11/16 | 2   | 4.19           | 8.6            | 235  |
| 1995/03/27 | 20  | 4.52           | 9.9            | 246  | 2015/11/21 | 1   | 5.59           | 11.0           | 242  |
| 1996/11/20 | 18  | 4.86           | 10.5           | 239  | 2016/01/12 | 5   | 5.76           | 10.6           | 244  |
| 1997/05/06 | 22  | 4.25           | 9.0            | 240  | 2017/12/11 | 15  | 4.71           | 10.2           | 212  |
| 1998/10/29 | 14  | 4.93           | 9.2            | 231  | 2018/10/30 | 0   | 5.63           | 10.4           | 228  |

**tabella 7-2 - settore A: 150-210°N - Elenco delle 40 mareggiate massime annuali  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)**

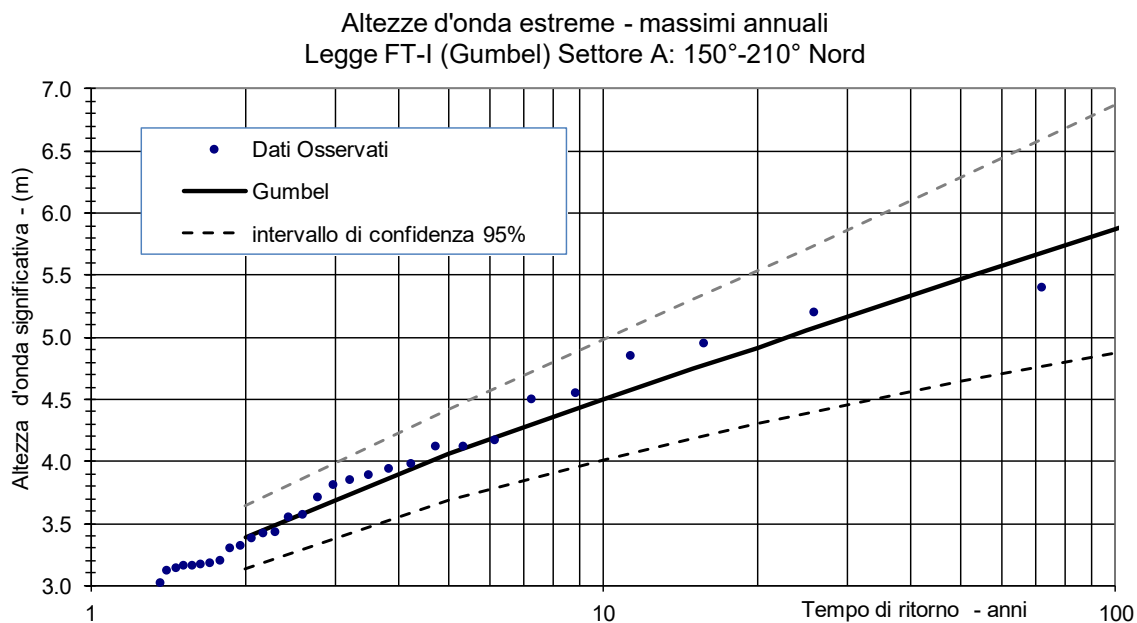
| Data       | Ora | Hs   | Tp  | Dir  | Data       | Ora | Hs   | Tp   | Dir  |
|------------|-----|------|-----|------|------------|-----|------|------|------|
| aaaa/mm/gg | hh  | (m)  | (s) | (°N) | aaaa/mm/gg | hh  | (m)  | (s)  | (°N) |
| 1979/12/22 | 19  | 3.90 | 7.7 | 198  | 1999/03/04 | 13  | 3.18 | 8.0  | 205  |
| 1980/10/18 | 1   | 3.72 | 8.6 | 207  | 2000/11/06 | 13  | 5.41 | 9.4  | 191  |
| 1981/12/29 | 10  | 3.21 | 8.6 | 207  | 2001/10/20 | 20  | 3.13 | 7.2  | 173  |
| 1982/11/08 | 20  | 3.82 | 9.0 | 184  | 2002/11/16 | 8   | 3.99 | 8.0  | 174  |
| 1983/12/19 | 11  | 2.82 | 8.4 | 205  | 2003/10/31 | 23  | 4.13 | 9.0  | 199  |
| 1984/10/04 | 22  | 2.99 | 7.3 | 178  | 2004/02/21 | 15  | 2.09 | 6.6  | 168  |
| 1985/01/26 | 19  | 2.52 | 7.5 | 210  | 2005/12/03 | 2   | 4.86 | 9.6  | 199  |
| 1986/01/31 | 7   | 3.33 | 9.0 | 159  | 2006/02/19 | 22  | 3.17 | 8.2  | 208  |
| 1987/08/24 | 16  | 3.15 | 7.3 | 169  | 2007/11/23 | 10  | 2.26 | 6.5  | 166  |
| 1988/02/12 | 4   | 3.43 | 7.8 | 207  | 2008/10/30 | 1   | 4.56 | 8.6  | 205  |
| 1989/02/25 | 8   | 2.75 | 8.1 | 208  | 2009/01/20 | 9   | 3.86 | 8.1  | 195  |
| 1990/11/25 | 13  | 4.18 | 8.9 | 202  | 2010/11/01 | 2   | 2.92 | 8.1  | 192  |
| 1991/11/13 | 22  | 2.49 | 7.3 | 208  | 2011/11/05 | 14  | 3.17 | 8.1  | 172  |
| 1992/03/31 | 17  | 3.95 | 9.1 | 200  | 2012/10/28 | 17  | 3.39 | 11.8 | 209  |
| 1993/10/22 | 18  | 3.19 | 7.9 | 183  | 2013/12/26 | 4   | 4.96 | 9.6  | 189  |
| 1994/01/06 | 14  | 3.44 | 9.2 | 210  | 2014/11/04 | 21  | 4.13 | 8.0  | 176  |
| 1995/01/19 | 3   | 2.92 | 7.9 | 191  | 2015/01/16 | 20  | 2.94 | 6.9  | 173  |
| 1996/11/12 | 8   | 3.58 | 8.0 | 185  | 2016/03/05 | 12  | 3.56 | 8.0  | 195  |
| 1997/11/06 | 17  | 3.31 | 7.5 | 176  | 2017/12/11 | 12  | 4.51 | 9.4  | 209  |
| 1998/04/10 | 14  | 3.03 | 7.5 | 189  | 2018/10/29 | 18  | 5.21 | 9.7  | 176  |

**tabella 7-3 - settore B: 210-270°N - Elenco delle 40 mareggiate massime annuali  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)**

| Data       | Ora | Hs   | Tp   | Dir  | Data       | Ora | Hs   | Tp   | Dir  |
|------------|-----|------|------|------|------------|-----|------|------|------|
| aaaa/mm/gg | hh  | (m)  | (s)  | (°N) | aaaa/mm/gg | hh  | (m)  | (s)  | (°N) |
| 1979/01/01 | 8   | 5.60 | 9.8  | 251  | 1999/12/28 | 5   | 7.15 | 11.1 | 244  |
| 1980/12/06 | 13  | 4.82 | 11.1 | 240  | 2000/11/06 | 17  | 4.84 | 10.5 | 214  |
| 1981/12/16 | 14  | 5.78 | 10.8 | 246  | 2001/11/08 | 22  | 5.89 | 10.4 | 244  |
| 1982/10/14 | 19  | 4.99 | 9.1  | 248  | 2002/02/20 | 23  | 5.41 | 11.0 | 240  |
| 1983/11/27 | 15  | 4.52 | 8.6  | 228  | 2003/02/04 | 1   | 5.91 | 10.2 | 242  |
| 1984/01/24 | 1   | 4.63 | 9.9  | 237  | 2004/02/23 | 14  | 5.12 | 9.8  | 236  |
| 1985/11/13 | 16  | 5.25 | 9.8  | 235  | 2005/03/12 | 18  | 4.38 | 9.5  | 234  |
| 1986/01/24 | 7   | 6.01 | 10.5 | 243  | 2006/12/09 | 10  | 4.34 | 8.9  | 233  |
| 1987/06/15 | 22  | 4.80 | 9.0  | 240  | 2007/01/24 | 8   | 5.37 | 10.9 | 234  |
| 1988/02/08 | 18  | 5.30 | 10.6 | 242  | 2008/03/21 | 19  | 6.99 | 11.7 | 242  |
| 1989/02/26 | 21  | 5.59 | 11.5 | 236  | 2009/04/29 | 13  | 4.13 | 9.2  | 231  |
| 1990/02/27 | 15  | 6.70 | 10.8 | 245  | 2010/03/31 | 18  | 5.01 | 9.5  | 237  |
| 1991/11/14 | 19  | 4.56 | 9.3  | 242  | 2011/12/16 | 18  | 6.37 | 10.7 | 232  |
| 1992/10/26 | 2   | 5.58 | 10.3 | 245  | 2012/10/28 | 8   | 5.47 | 11.7 | 223  |
| 1993/12/16 | 8   | 4.93 | 8.9  | 243  | 2013/03/18 | 23  | 5.37 | 9.8  | 245  |
| 1994/09/15 | 18  | 4.90 | 9.3  | 234  | 2014/11/16 | 2   | 4.19 | 8.6  | 235  |
| 1995/03/27 | 20  | 4.52 | 9.9  | 246  | 2015/11/21 | 1   | 5.59 | 11.0 | 242  |
| 1996/11/20 | 18  | 4.86 | 10.5 | 239  | 2016/01/12 | 5   | 5.76 | 10.6 | 244  |
| 1997/05/06 | 22  | 4.25 | 9.0  | 240  | 2017/12/11 | 15  | 4.71 | 10.2 | 212  |
| 1998/10/29 | 14  | 4.93 | 9.2  | 231  | 2018/10/30 | 0   | 5.63 | 10.4 | 228  |

**tabella 7-4 - settore C: 270-330°N - Elenco delle 40 mareggiate massime annuali  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)**

| Data       | Ora | Hs   | Tp   | Dir  | Data       | Ora | Hs   | Tp   | Dir  |
|------------|-----|------|------|------|------------|-----|------|------|------|
| aaaa/mm/gg | hh  | (m)  | (s)  | (°N) | aaaa/mm/gg | hh  | (m)  | (s)  | (°N) |
| 1979/12/31 | 11  | 2.95 | 8.0  | 296  | 1999/02/08 | 3   | 2.89 | 9.6  | 270  |
| 1980/12/07 | 14  | 2.31 | 7.8  | 284  | 2000/02/17 | 5   | 2.56 | 8.7  | 274  |
| 1981/12/01 | 18  | 2.55 | 9.9  | 281  | 2001/11/09 | 13  | 2.06 | 7.9  | 271  |
| 1982/03/02 | 20  | 3.06 | 9.3  | 273  | 2002/02/21 | 17  | 2.44 | 8.6  | 273  |
| 1983/01/31 | 4   | 4.15 | 9.3  | 271  | 2003/02/04 | 22  | 3.06 | 9.8  | 276  |
| 1984/02/09 | 8   | 3.03 | 7.5  | 293  | 2004/12/18 | 10  | 3.52 | 7.5  | 293  |
| 1985/04/28 | 15  | 2.27 | 8.2  | 273  | 2005/12/17 | 13  | 3.47 | 9.9  | 306  |
| 1986/01/06 | 19  | 2.63 | 8.1  | 284  | 2006/03/12 | 12  | 2.39 | 5.2  | 327  |
| 1987/11/20 | 16  | 2.33 | 8.0  | 288  | 2007/11/09 | 16  | 2.76 | 6.4  | 290  |
| 1988/11/21 | 19  | 2.45 | 9.5  | 288  | 2008/11/22 | 9   | 2.96 | 10.6 | 277  |
| 1989/07/02 | 23  | 1.36 | 4.1  | 312  | 2009/02/11 | 9   | 2.43 | 9.3  | 271  |
| 1990/12/13 | 6   | 1.73 | 10.1 | 274  | 2010/11/26 | 15  | 2.88 | 6.5  | 281  |
| 1991/11/10 | 6   | 1.49 | 8.1  | 271  | 2011/09/19 | 10  | 2.55 | 8.5  | 270  |
| 1992/02/17 | 12  | 2.36 | 6.1  | 292  | 2012/01/06 | 5   | 3.63 | 10.3 | 273  |
| 1993/02/21 | 20  | 2.55 | 10.1 | 271  | 2013/05/24 | 8   | 3.20 | 9.5  | 279  |
| 1994/01/01 | 15  | 3.27 | 9.1  | 270  | 2014/10/22 | 10  | 3.24 | 6.4  | 293  |
| 1995/03/29 | 19  | 3.83 | 8.1  | 291  | 2015/04/01 | 8   | 2.43 | 10.1 | 274  |
| 1996/07/08 | 22  | 3.11 | 11.0 | 270  | 2016/03/03 | 3   | 2.95 | 9.3  | 277  |
| 1997/02/27 | 9   | 2.92 | 8.6  | 276  | 2017/11/13 | 4   | 3.27 | 9.6  | 293  |
| 1998/01/20 | 12  | 2.52 | 5.8  | 314  | 2018/03/18 | 23  | 1.81 | 10.5 | 315  |



| Tr   | GUMBEL |         | WEI(.75) |         |
|------|--------|---------|----------|---------|
| Anni | Hs(m)  | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 3.4    | 0.3     | 3.3      | 0.3     |
| 10   | 4.5    | 0.5     | 4.3      | 0.8     |
| 20   | 4.9    | 0.6     | 4.9      | 1.1     |
| 50   | 5.5    | 0.8     | 5.6      | 1.5     |
| 100  | 5.9    | 1.0     | 6.2      | 1.9     |

A 0.62

B 3.178

r 0.991

MIR OK

0.47

2.971

0.913

NO

| Tr   | WEI(1.0) |         | WEI(1.4) |         | WEI(2.0) |         |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| anni | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 3.3      | 0.3     | 3.4      | 0.3     | 3.5      | 0.3     |
| 10   | 4.6      | 0.8     | 4.7      | 0.7     | 4.7      | 0.5     |
| 20   | 5.2      | 1.1     | 5.2      | 1.0     | 5.2      | 0.7     |
| 50   | 5.9      | 1.7     | 5.8      | 1.4     | 5.7      | 1.0     |
| 100  | 6.5      | 2.1     | 6.3      | 1.8     | 6.1      | 1.2     |

A 0.778

B 2.753

r 0.96

MIR NO

1.195

2.441

0.986

NO

1.703

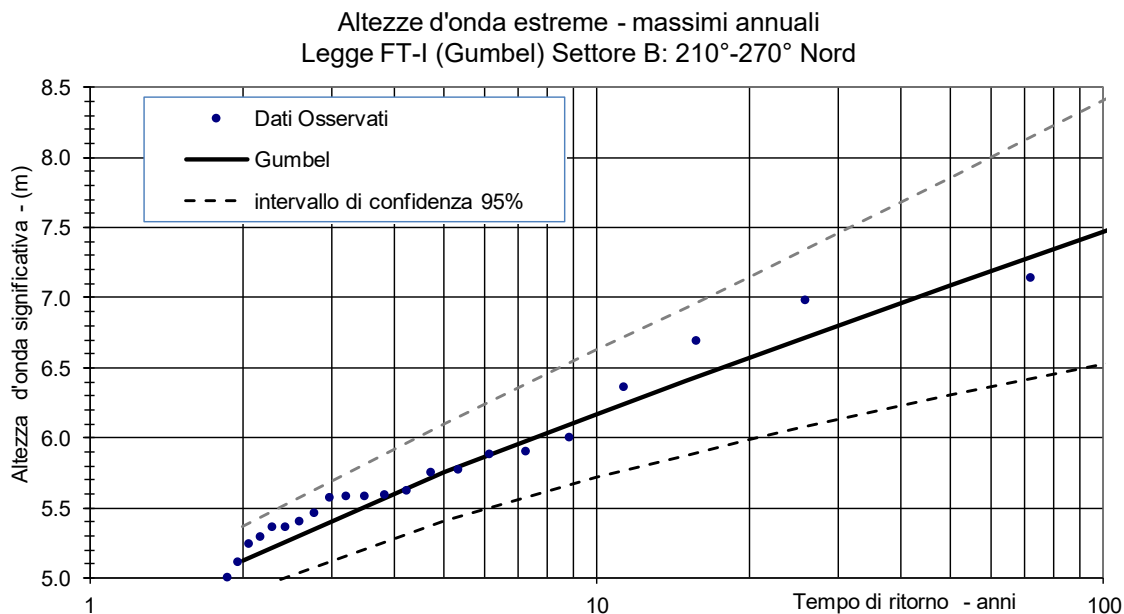
2.02

0.993

NO

\* in rosso sono riportate le distribuzioni che non rispettano le condizioni di validità prevista da GODA e che quindi vanno scartate

**Figura 7.2- La Spezia largo – Settore A:150°- 210°Nord**  
**valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno secondo la distribuzione di Gumbel**  
**(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)**



| Tr   | GUMBEL |         | WEI(.75) |         |
|------|--------|---------|----------|---------|
| Anni | Hs(m)  | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 5.1    | 0.2     | 5.0      | 0.3     |
| 10   | 6.2    | 0.5     | 6.0      | 0.7     |
| 20   | 6.6    | 0.6     | 6.5      | 1.0     |
| 50   | 7.1    | 0.8     | 7.3      | 1.4     |
| 100  | 7.5    | 0.9     | 7.8      | 1.8     |

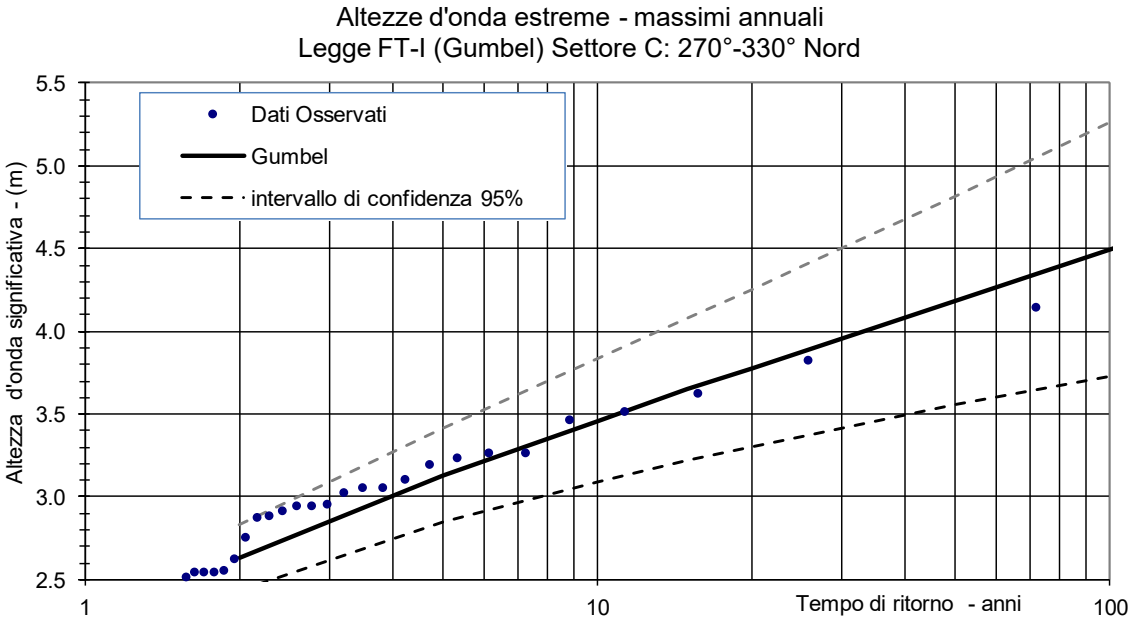
A 0.586 0.449  
B 4.922 4.721  
r 0.992 0.925  
MIR OK NO

| Tr   | WEI(1.0) |         | WEI(1.4) |         | WEI(2.0) |         |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| anni | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 5.0      | 0.3     | 5.1      | 0.3     | 5.2      | 0.3     |
| 10   | 6.3      | 0.8     | 6.4      | 0.7     | 6.4      | 0.5     |
| 20   | 6.8      | 1.1     | 6.8      | 1.0     | 6.8      | 0.7     |
| 50   | 7.6      | 1.6     | 7.4      | 1.4     | 7.3      | 0.9     |
| 100  | 8.1      | 2.0     | 7.9      | 1.7     | 7.7      | 1.1     |

A 0.739 1.131 1.606  
B 4.517 4.224 3.831  
r 0.967 0.99 0.993  
MIR NO NO NO

\* in rosso sono riportate le distribuzioni che non rispettano le condizioni di validità prevista da GODA e che quindi vanno scartate

**Figura 7.3- La Spezia largo -Settore B:210°- 270°Nord**  
**valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno secondo la distribuzione di Gumbel**  
**(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)**

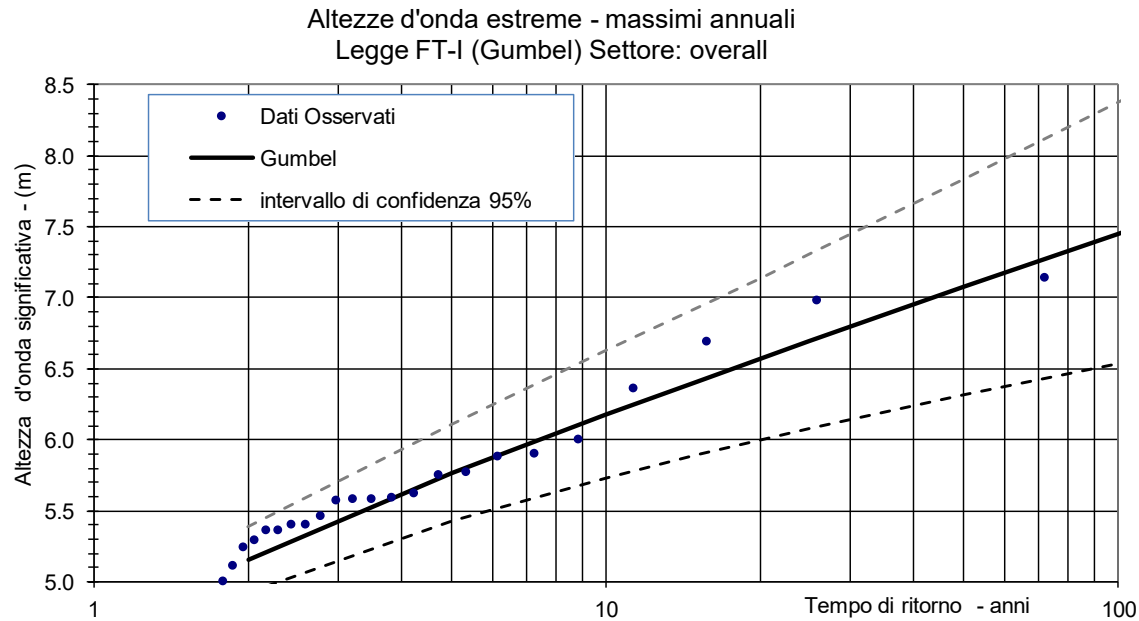


| Tr   | GUMBEL |         | WEI(.75) |         |
|------|--------|---------|----------|---------|
| Anni | Hs(m)  | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 2.6    | 0.2     | 2.5      | 0.2     |
| 10   | 3.5    | 0.4     | 3.3      | 0.6     |
| 20   | 3.8    | 0.5     | 3.7      | 0.8     |
| 50   | 4.2    | 0.6     | 4.2      | 1.2     |
| 100  | 4.5    | 0.8     | 4.7      | 1.4     |
| A    | 0.466  |         | 0.337    |         |
| B    | 2.47   |         | 2.334    |         |
| r    | 0.968  |         | 0.851    |         |
| MIR  | SI     |         | NO       |         |

| Tr   | WEI(1.0) |         | WEI(1.4) |         | WEI(2.0) |         |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| anni | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 2.6      | 0.2     | 2.6      | 0.2     | 2.7      | 0.2     |
| 10   | 3.5      | 0.6     | 3.6      | 0.6     | 3.6      | 0.4     |
| 20   | 3.9      | 0.9     | 4.0      | 0.8     | 4.0      | 0.5     |
| 50   | 4.5      | 1.3     | 4.5      | 1.1     | 4.4      | 0.7     |
| 100  | 4.9      | 1.6     | 4.8      | 1.4     | 4.7      | 0.9     |
| A    | 0.566    |         | 0.887    |         | 1.289    |         |
| B    | 2.17     |         | 1.926    |         | 1.593    |         |
| r    | 0.908    |         | 0.952    |         | 0.976    |         |
| MIR  | NO       |         | NO       |         | NO       |         |

\* in rosso sono riportate le distribuzioni che non rispettano le condizioni di validità prevista da GODA e che quindi vanno scartate

Figura 7.4 – La Spezia largo –Settore: Settore C:270°- 330°Nord  
valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno secondo la distribuzione di Gumbel  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)



| Tr   | GUMBEL |         | WEI(.75) |         |
|------|--------|---------|----------|---------|
| Anni | Hs(m)  | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 5.2    | 0.2     | 5.0      | 0.3     |
| 10   | 6.2    | 0.4     | 6.0      | 0.7     |
| 20   | 6.6    | 0.6     | 6.5      | 1.0     |
| 50   | 7.1    | 0.8     | 7.2      | 1.4     |
| 100  | 7.5    | 0.9     | 7.8      | 1.7     |

A 0.575 0.439  
B 4.955 4.759  
r 0.992 0.922  
MIR SI NO

| Tr   | WEI(1.0) |         | WEI(1.4) |         | WEI(2.0) |         |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| anni | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 5.1      | 0.3     | 5.1      | 0.3     | 5.2      | 0.3     |
| 10   | 6.3      | 0.8     | 6.4      | 0.7     | 6.4      | 0.5     |
| 20   | 6.8      | 1.1     | 6.8      | 0.9     | 6.8      | 0.7     |
| 50   | 7.5      | 1.5     | 7.4      | 1.3     | 7.3      | 0.9     |
| 100  | 8.1      | 2.0     | 7.9      | 1.7     | 7.6      | 1.1     |

A 0.723 1.107 1.574  
B 4.559 4.272 3.885  
r 0.964 0.988 0.992  
MIR NO NO NO

\* in rosso sono riportate le distribuzioni che non rispettano le condizioni di validità prevista da GODA e che quindi vanno scartate

Figura 7.5 - La Spezia largo –Settore: overall  
valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno secondo la distribuzione di Gumbel  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)

### 7.3 Metodo POT (Peaks Over Threshold)

Nel diagramma polare di Figura 7.6 sono riportati gli eventi di picco relativi alle singole mareggiate in termini di altezza d'onda significativa, ricostruiti la largo di La Spezia e relativi ai settori di mezzogiorno (settore A), libeccio (settore B) e maestrale (settore C).

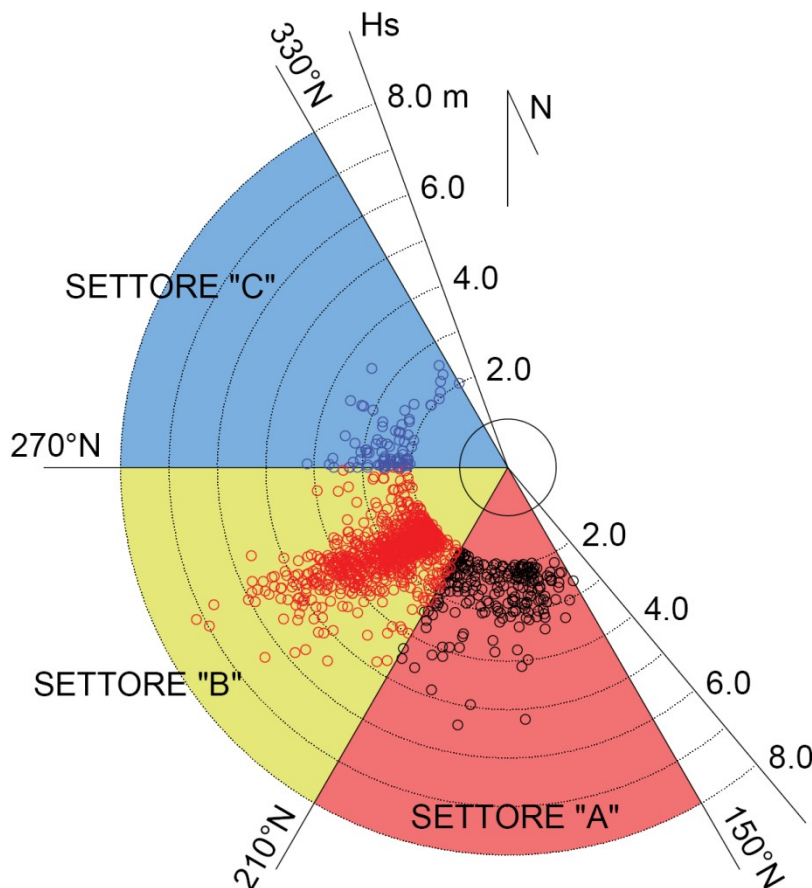


Figura 7.6 - La Spezia largo - distribuzione direzionale degli eventi estremi (metodo POT) per settori di provenienza

Il metodo POT prevede che le sole mareggiate, che hanno all'interno del settore di competenza un'altezza significativa massima superiore ad una certa soglia, vengano utilizzate per la successiva analisi statistica degli eventi estremi; viene quindi definito il parametro di taglio (censoring parameter):

$$\nu = \frac{N}{N_{tot}} \quad \text{con } N - \text{numero degli eventi sopra la soglia; } N_{tot} - \text{numero totale delle mareggiate.}$$

La scelta del valore di soglia rappresenta uno dei limiti nell'uso del metodo POT, infatti considerare una soglia eccessivamente piccola comporta di dare maggiore peso agli eventi di modesta entità (mareggiate ordinarie), mentre con una soglia eccessivamente elevata viene selezionato un numero di eventi che può risultare piccolo a discapito della bontà della regolarizzazione statistica.

Per la definizione della soglia sono stati utilizzati 2 criteri: il primo (Goda) criterio prevedere di scegliere un valore di soglia tale poter includere nel campione un numero di eventi pari a 2 o 3 per anno.

Il secondo criterio permette di stimare graficamente il valore di soglia attraverso il metodo "Mean residual life plot" (MRL) (Coles 2001). Indicata con  $x_{(1)} \dots x_{(n_u)}$ , la sequenza del campione selezionato, i cui valori sono maggiori del valore di soglia "u", il MRL è definito come:

$$MRL = \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^{n_u} (x_i - u) \text{ con } n_u \text{ il numero degli eventi sopra la soglia } u$$

La soglia è individuata nel punto in cui la curva tende a discostarsi dall'andamento lineare.

Nella Figura 7.7 a Figura 7.9 sono riportati gli andamenti grafici del MRL per i diversi settori considerati incluso quello "overall", ovvero riferito ad un solo settore complessivo, dove sono evidenziati i valori di soglia da utilizzare nel metodo POT, prevedendo comunque almeno 2 eventi/anno. Nei campioni individuati all'interno di ciascun settore, è evidente l'andamento pressoché lineare del primo tratto della curva (con coefficienti di correlazione del 98%). Nel campione costituito da tutti i colmi della mareggiata non suddivisi per settore, non è evidente il tratto lineare a dimostrazione che tale campione contiene dati non completamente omogenei.

Nelle Figura 7.11 a Figura 7.14 si riportano le elaborazioni statistiche per i settori considerati e per l'elaborazione con un unico settore (overall).

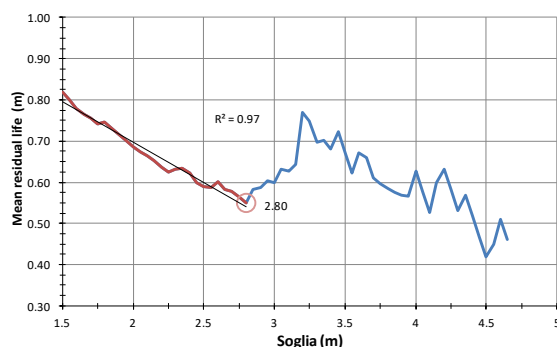


Figura 7.7 - MRL - settore A: 150 - 210°N

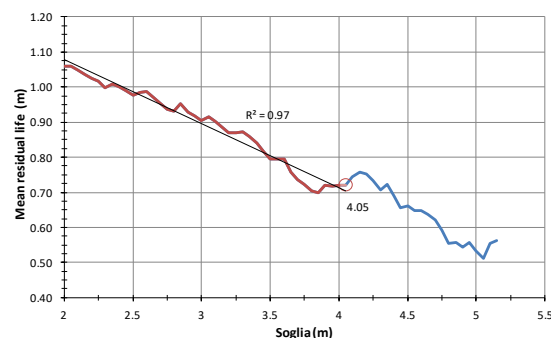


Figura 7.8 - MRL - settore B: 210 - 270°N

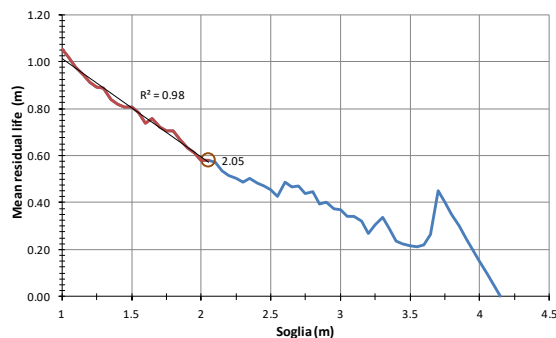


Figura 7.9 - MRL - settore C: 270 - 330°N

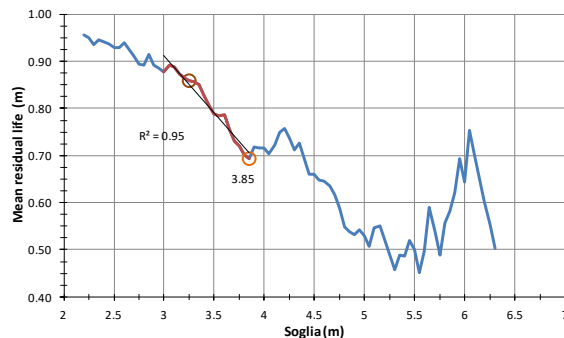
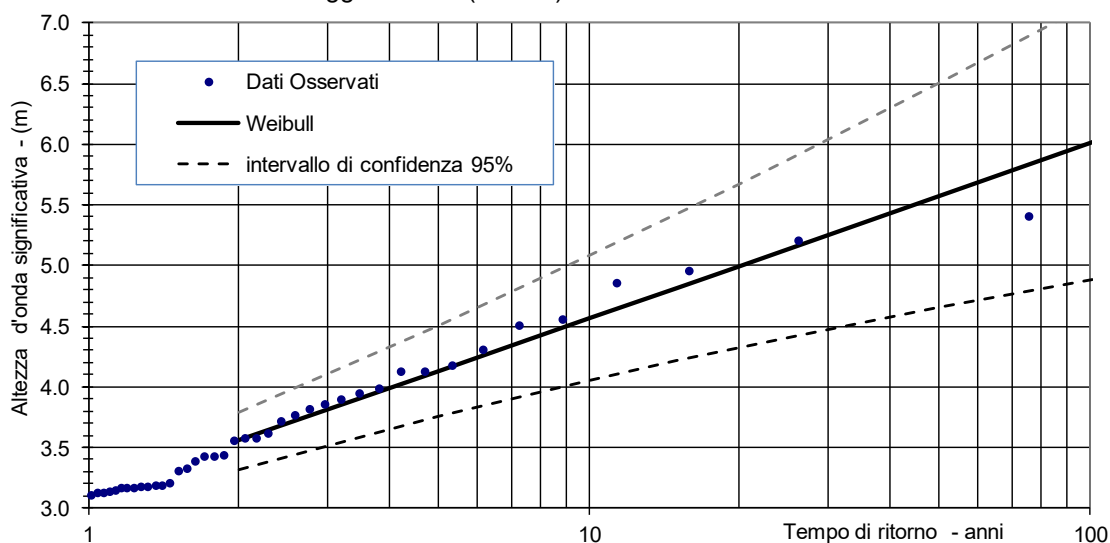


Figura 7.10 - MRL - settore overall

Altezze d'onda estreme - metodo POT  
Legge Weibull ( $k=1.00$ ) Settore A:  $150^{\circ}$ - $210^{\circ}$  Nord



Altezza di soglia: 2.80 m

Numero di eventi sopra la soglia: 80

n.eventi/anno: 2

*Elenco delle n.4 mareggiate più intense*

| Data       | Ora   | H <sub>s</sub> | T <sub>p</sub> | Dir     |
|------------|-------|----------------|----------------|---------|
|            | hh    | (m)            | (s)            | (°N)    |
| 06/11/2000 | 13    | 5.41           | 9.4            | 191     |
| 29/10/2018 | 18-19 | 5.21           | 9.7            | 175-180 |
| 26/12/2013 | 04    | 4.96           | 9.6            | 189     |
| 03/12/2005 | 02    | 4.86           | 9.6            | 200     |

| Tr   | GUMBEL |         | WEI(.75) |         |
|------|--------|---------|----------|---------|
| Anni | Hs(m)  | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 3.6    | 0.3     | 3.5      | 1.8     |
| 10   | 4.5    | 0.5     | 4.5      | 0.4     |
| 20   | 5.0    | 0.7     | 4.9      | 0.6     |
| 50   | 5.5    | 0.9     | 5.4      | 0.8     |
| 100  | 5.9    | 1.1     | 5.8      | 1.0     |

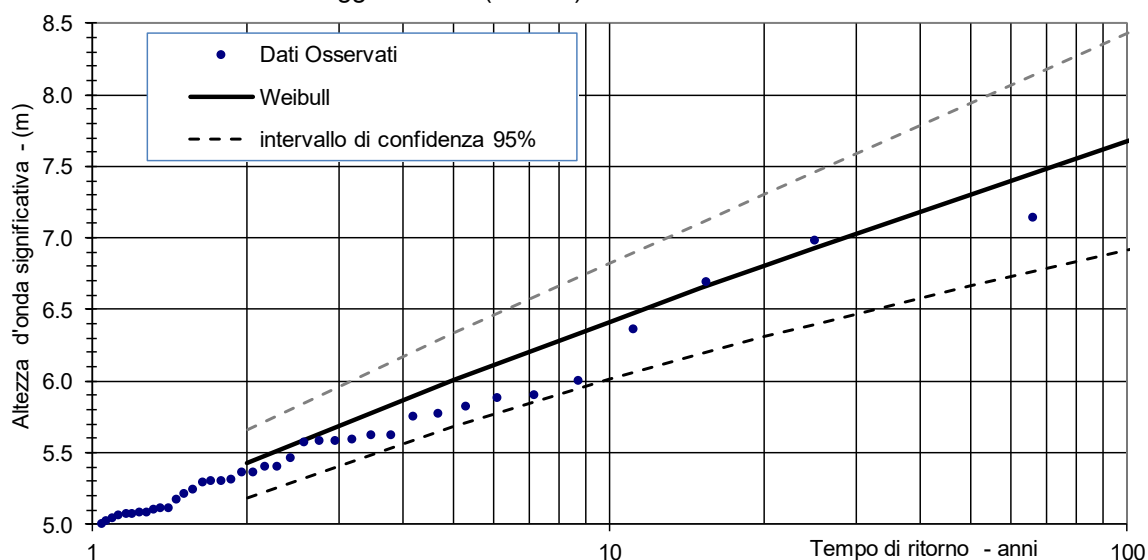
A 0.607 0.297  
B 1.583 2.06  
r 0.992 0.988  
MIR NO NO

| Tr   | WEI(1.0) |         | WEI(1.4) |         | WEI(2.0) |         |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| anni | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 3.6      | 0.2     | 3.6      | 0.3     | 3.7      | 0.3     |
| 10   | 4.6      | 0.5     | 4.6      | 0.5     | 4.7      | 0.4     |
| 20   | 5.0      | 0.7     | 5.1      | 0.7     | 5.1      | 0.5     |
| 50   | 5.6      | 0.9     | 5.6      | 0.9     | 5.6      | 0.7     |
| 100  | 6.0      | 1.1     | 6.0      | 1.0     | 5.9      | 0.8     |

A 0.617 1.241 2.302  
B 1.529 0.693 -0.55  
r 0.992 0.991 0.988  
MIR SI NO NO

Figura 7.11 - La Spezia largo – Settore A:  $150^{\circ}$  -  $210^{\circ}$ N  
valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno  
secondo le diverse distribuzioni statistiche - metodo POT  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)

Altezze d'onda estreme - metodo POT  
Legge Weibull ( $k=2.00$ ) Settore B:  $210^{\circ}$ - $270^{\circ}$  Nord



Altezza di soglia: 4.05 m      Numero di eventi sopra la soglia: 113      n.eventi/anno: 2.85

*Elenco delle n.4 mareggiate più intense*

| Data       | Ora | Hs   | Tp   | Dir  |
|------------|-----|------|------|------|
|            | hh  | (m)  | (s)  | (°N) |
| 28/12/1999 | 05  | 7.15 | 11.1 | 241  |
| 21/03/2008 | 19  | 6.99 | 11.7 | 242  |
| 27/02/1990 | 15  | 6.70 | 10.8 | 245  |
| 16/12/2011 | 18  | 6.37 | 10.7 | 232  |

| Tr   | GUMBEL |         | WEI(.75) |         |
|------|--------|---------|----------|---------|
| Anni | Hs(m)  | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 5.3    | 0.3     | 5.3      | 0.1     |
| 10   | 6.3    | 0.5     | 6.2      | 0.4     |
| 20   | 6.7    | 0.7     | 6.7      | 0.6     |
| 50   | 7.3    | 0.9     | 7.2      | 0.8     |
| 100  | 7.7    | 1.0     | 7.7      | 1.1     |

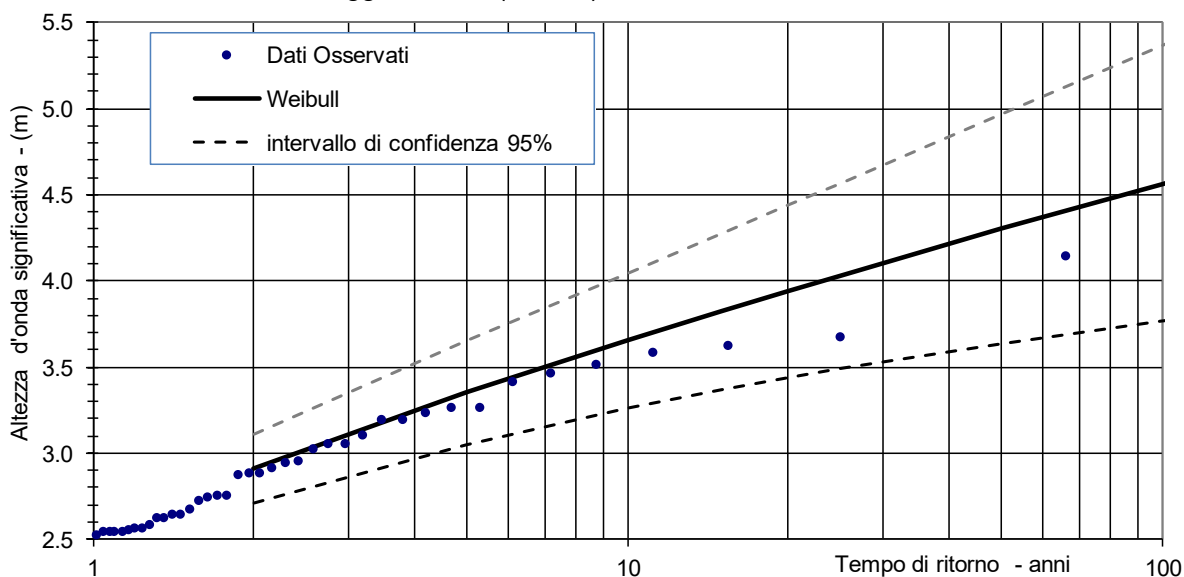
A 0.623 0.296  
B 2.94 3.484  
r 0.99 0.978  
MIR NO NO

| Tr   | WEI(1.0) |         | WEI(1.4) |         | WEI(2.0) |         |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| anni | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 5.3      | 0.3     | 5.4      | 0.3     | 5.4      | 0.2     |
| 10   | 6.3      | 0.5     | 6.4      | 0.5     | 6.4      | 0.4     |
| 20   | 6.8      | 0.7     | 6.8      | 0.6     | 6.8      | 0.5     |
| 50   | 7.4      | 0.9     | 7.4      | 0.8     | 7.3      | 0.6     |
| 100  | 7.8      | 1.2     | 7.8      | 1.0     | 7.7      | 0.8     |

A 0.63 1.297 2.451  
B 2.897 1.967 0.582  
r 0.988 0.993 0.995  
MIR NO NO SI

Figura 7.12 - La Spezia largo – Settore B:  $210^{\circ}$  -  $270^{\circ}$ N  
valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno  
secondo le diverse distribuzioni statistiche - metodo POT  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)

Altezze d'onda estreme - metodo POT  
Legge Weibull ( $k=2.00$ ) Settore C: 270°-330° Nord



Altezza di soglia: 2.05 m      Numero di eventi sopra la soglia: 80      n.eventi/anno: 2.00

Elenco delle n.4 mareggiate più intense

| Data       | Ora | Hs   | Tp   | Dir  |
|------------|-----|------|------|------|
|            | hh  | (m)  | (s)  | (°N) |
| 31/01/1983 | 04  | 4.15 | 9.3  | 271  |
| 27/01/1995 | 06  | 3.68 | 9.2  | 271  |
| 06/01/2012 | 05  | 3.63 | 10.3 | 273  |
| 29/03/1995 | 17  | 3.59 | 9.4  | 282  |

| Tr   | GUMBEL |         | WEI(.75) |         |
|------|--------|---------|----------|---------|
| Anni | Hs(m)  | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 2.8    | 0.2     | 2.7      | 0.1     |
| 10   | 3.5    | 0.4     | 3.4      | 0.3     |
| 20   | 3.8    | 0.5     | 3.8      | 0.5     |
| 50   | 4.2    | 0.7     | 4.2      | 0.6     |
| 100  | 4.5    | 0.8     | 4.5      | 0.8     |

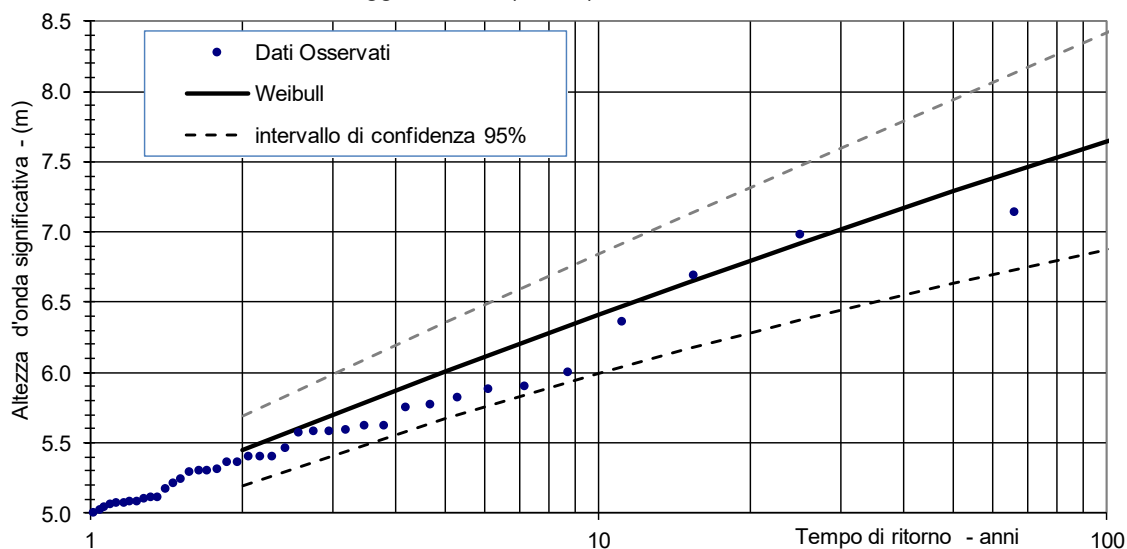
A 0.432 0.248  
B 1.925 2.065  
r 0.99 0.963  
MIR NO NO

| Tr   | WEI(1.0) |         | WEI(1.4) |         | WEI(2.0) |         |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| anni | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 2.8      | 0.2     | 2.9      | 0.2     | 2.9      | 0.2     |
| 10   | 3.6      | 0.4     | 3.6      | 0.4     | 3.7      | 0.4     |
| 20   | 3.9      | 0.5     | 3.9      | 0.5     | 3.9      | 0.5     |
| 50   | 4.3      | 0.7     | 4.3      | 0.7     | 4.3      | 0.7     |
| 100  | 4.6      | 0.9     | 4.6      | 0.8     | 4.6      | 0.8     |

A 0.461 0.826 1.389  
B 1.815 1.423 0.844  
r 0.985 0.995 0.997  
MIR NO NO SI

Figura 7.13 - La Spezia largo – Settore C: 270 - 330°N  
valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno  
secondo le diverse distribuzioni statistiche - metodo POT  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)

Altezze d'onda estreme - metodo POT  
Legge Weibull (K=2.0) Settore: overall



Altezza di soglia: 3.85 m      Numero di eventi sopra la soglia: 177      n.eventi/anno: 4.40

Elenco delle n.4 mareggiate più intense

| Data       | Ora | Hs   | Tp   | Dir  |
|------------|-----|------|------|------|
|            | hh  | (m)  | (s)  | (°N) |
| 28/12/1999 | 05  | 7.15 | 11.1 | 241  |
| 21/03/2008 | 19  | 6.99 | 11.7 | 242  |
| 27/02/1990 | 15  | 6.70 | 10.8 | 245  |
| 16/12/2011 | 18  | 6.37 | 10.7 | 232  |

| Tr   | GUMBEL |         | WEI(.75) |         |
|------|--------|---------|----------|---------|
| Anni | Hs(m)  | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 5.3    | 0.3     | 5.2      | 0.2     |
| 10   | 6.4    | 0.5     | 6.3      | 0.5     |
| 20   | 6.8    | 0.7     | 6.8      | 0.7     |
| 50   | 7.4    | 0.9     | 7.4      | 0.9     |
| 100  | 7.8    | 1.0     | 7.9      | 1.1     |

A 0.646 0.318  
B 2.791 3.28  
r 0.992 0.978  
MIR NO NO

| Tr   | WEI(1.0) |         | WEI(1.4) |         | WEI(2.0) |         |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| anni | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) | Hs(m)    | c.i.(m) |
| 2    | 5.3      | 0.3     | 5.4      | 0.3     | 5.4      | 0.2     |
| 10   | 6.4      | 0.6     | 6.4      | 0.5     | 6.4      | 0.4     |
| 20   | 6.9      | 0.8     | 6.9      | 0.7     | 6.8      | 0.5     |
| 50   | 7.5      | 1.0     | 7.4      | 0.9     | 7.3      | 0.7     |
| 100  | 8.0      | 1.2     | 7.8      | 1.0     | 7.6      | 0.8     |

A 0.658 1.318 2.434  
B 2.727 1.854 0.556  
r 0.99 0.995 0.996  
MIR NO NO SI

Figura 7.14 - La Spezia largo - Settore:overall  
valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno  
secondo le diverse distribuzioni statistiche - metodo POT  
(periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)

## 7.4 Conclusioni

L'analisi degli eventi estremi, effettuata sia con il metodo dei massimi annuali e sia con il metodo POT, ha permesso di definire, per eventi ricostruiti con cadenza oraria, il valore dell'altezza d'onda significativa associata a diversi tempi di ritorno e per i diversi settori di provenienza.

In particolare si nota che i valori ottenuti con le due metodologie risultano simili con differenze massime dell'ordine dei 20 cm dell'altezza d'onda significativa, per la distribuzione consigliata da Goda.

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.

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 7-5.

**Tabella 7-5. 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 8 Clima di moto ondoso al largo

Nel presente capitolo viene descritto il clima di moto ondoso al largo di La Spezia e Marina di Carrara 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** secondo la procedura sincrona illustrata nel §Capitolo 5.

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

La suddivisione degli eventi per classi di altezza significativa e direzione (Tabella 8-1) e la conseguente frequenza di accadimento (Tabella 8-2) mostra che 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.

Durante il corso dell'anno il regime di moto ondoso presenta poca variabilità: primavera e autunno si equivalgono, in inverno la distribuzione direzionale non varia molto ma gli eventi con  $H_s > 2.0$  m si presentano con una frequenza di accadimento più elevata. In estate si osserva un clima di moto ondoso nettamente più mite con valori di  $H_s$  raramente superiori a 2.0 m (Figura 8.5).

Gli stati di mare caratterizzati da altezza d'onda superiore a 2 m si verificano in media 518 ore l'anno. La persistenza degli stati di mare con  $H_s > 3.0$  m si riduce a 110 ore/anno e solamente 22 ore anno si hanno altezze d'onda superiori a  $H_s > 4.0$  m (vedi paragrafo 8.3).

I dati analizzati mostrano una prevalenza di "stati di mare vivo" e presentano, per stati di mare con  $H_s > 0.5$ , valori del periodo di picco  $T_p$  compresi in media tra 6.0 s e 9.0 s.

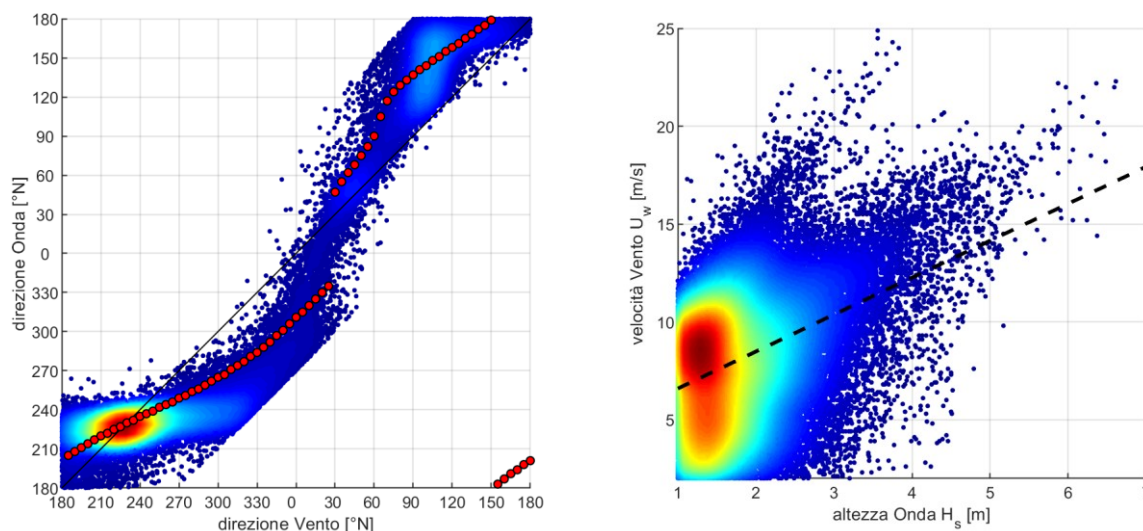
Gli eventi provenienti da Libeccio sono caratterizzati da periodi di picco  $T_p$  generalmente più elevati ( $6.6 < T_p < 7.6$  s) mentre gli stati di mare provenienti da Mezzogiorno presentano valori del periodo di picco in prevalenza inferiori ( $5.2 < T_p < 6.1$  s).

Analizzando le coppie di valori ( $H_s$ ,  $T_p$ ) appartenenti alla serie storica è stata valutata la legge di correlazione tra il periodo di picco e l'altezza d'onda significativa (paragrafo 8.4).

### 8.1 Generazione del moto ondoso: correlazione vento/onda

I grafici di Figura 8.1 mostrano la correlazione tra direzione del vento e la direzione del moto ondoso generato dal modello DICCA-WWIII e la correlazione tra l'altezza d'onda e la velocità del vento in generazione. L'analisi è stata condotta per stati di mare con  $H_s > 1.0$  m abbinati ad un vento di velocità minima di 2.0 m/s. Non sono stati presi inoltre in considerazione eventi di moto ondoso per i quali la direzione del vento risulta deviata rispetto a quella del moto ondoso di oltre 90 gradi.

La retta di regressione lineare ottenuta per le coppie ( $U_w$ ,  $H_s$ ) ha equazione:  $U_w = 1.9 \cdot H_s + 4.7$ . I grafici mostrano anche una buona corrispondenza dei dati in ricostruzione alla legge di deviazione vento/mare definita sulla base dell'elaborazione dei fetch efficaci (§3.1).

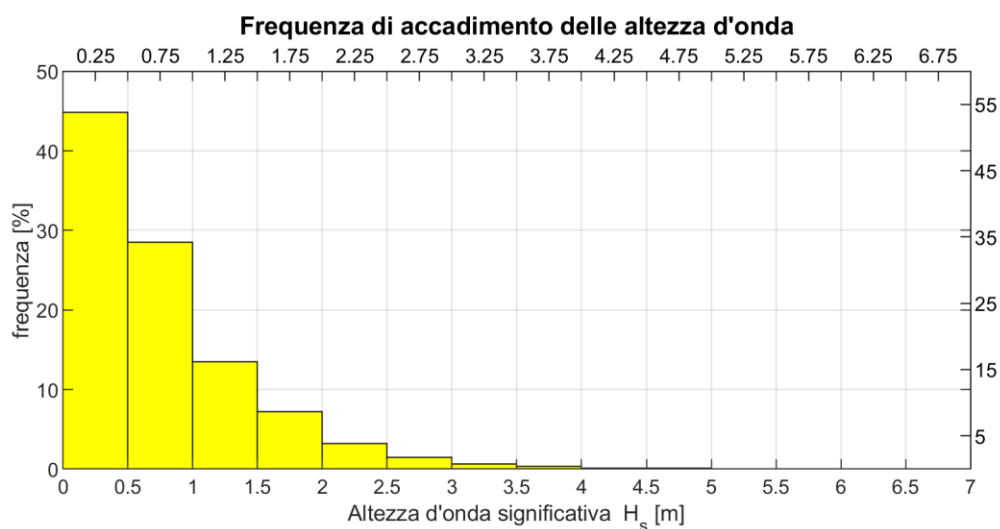


**Figura 8.1. Stati di moto ondoso con  $H_s > 1.0$  m e  $U_w > 2.0$  m/s appartenenti alla serie storica DICCA calibrata dei dati di moto ondoso in ricostruzione al largo di La Spezia (1979-2018).**  
[Sinistra] Diagramma di correlazione fra la direzione del vento e la direzione del moto ondoso. I punti in rosso indicano la legge di deviazione vento/mare ottenuta dall'elaborazione del fetch efficace.  
[Destra] Correlazione fra l'altezza d'onda  $H_s$  e la velocità del vento  $U_w$ .

## 8.2 Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda significativa e direzione

In Figura 8.2 è riportata la frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso della serie storica suddivisi per classi di altezza d'onda significativa.

In Tabella 8-1 e in Tabella 8-2 sono riportati il numero di eventi di moto ondoso e la frequenza di accadimento percentuale degli eventi di moto ondoso ricostruiti e calibrati al largo del sito in esame, suddivisi secondo classi di direzione e di altezza significativa suddivisi per settori di provenienza di  $10^\circ$  e per classi di altezza d'onda significativa  $H_s$ .



**Figura 8.2. Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso suddivisi per classi di altezza d'onda significativa.**

**Tabella 8-1. Numero di eventi di moto ondoso al largo di La Spezia suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, ricostruiti dal DICCA e calibrati. Periodo di riferimento 1979-2018.**

| Dir<br>° Nord | Altezza d'onda significativa [m] |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |    | Tot    |
|---------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----|--------|
|               | 0.00<br>0.25                     | 0.25<br>0.50 | 0.50<br>1.00 | 1.00<br>1.50 | 1.50<br>2.00 | 2.00<br>2.50 | 2.50<br>3.00 | 3.00<br>3.50 | 3.50<br>4.00 | 4.00<br>5.00 | 5.00<br>6.00 | >6 |        |
| 0             | 235                              | 600          | 715          | 205          | 45           | 10           | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0  | 1810   |
| 15            | 156                              | 396          | 521          | 179          | 46           | 9            | 3            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0  | 1310   |
| 30            | 109                              | 278          | 507          | 242          | 105          | 31           | 12           | 2            | 1            | 0            | 0            | 0  | 1287   |
| 45            | 134                              | 221          | 589          | 389          | 257          | 108          | 37           | 8            | 8            | 0            | 0            | 0  | 1751   |
| 60            | 150                              | 264          | 566          | 462          | 277          | 102          | 30           | 15           | 2            | 0            | 0            | 0  | 1868   |
| 75            | 261                              | 298          | 563          | 297          | 128          | 53           | 13           | 2            | 0            | 0            | 0            | 0  | 1615   |
| 90            | 384                              | 456          | 607          | 309          | 120          | 43           | 1            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0  | 1920   |
| 105           | 509                              | 946          | 1139         | 629          | 248          | 50           | 10           | 0            | 0            | 0            | 0            | 0  | 3531   |
| 120           | 852                              | 2219         | 3810         | 1183         | 376          | 71           | 14           | 0            | 0            | 0            | 0            | 0  | 8525   |
| 135           | 3245                             | 6544         | 5649         | 1317         | 412          | 104          | 32           | 5            | 1            | 0            | 0            | 0  | 17309  |
| 150           | 3685                             | 5961         | 4731         | 1458         | 517          | 130          | 21           | 2            | 0            | 0            | 0            | 0  | 16505  |
| 165           | 3293                             | 5072         | 5358         | 2166         | 923          | 288          | 109          | 12           | 0            | 2            | 0            | 0  | 17223  |
| 180           | 5704                             | 6711         | 6777         | 2493         | 869          | 273          | 154          | 46           | 20           | 8            | 0            | 0  | 23055  |
| 195           | 5267                             | 5455         | 5060         | 1691         | 669          | 265          | 123          | 34           | 22           | 19           | 1            | 0  | 18606  |
| 210           | 5438                             | 6099         | 7728         | 3794         | 1355         | 412          | 157          | 40           | 35           | 16           | 0            | 0  | 25074  |
| 225           | 10325                            | 13501        | 21924        | 15205        | 10476        | 4758         | 1772         | 575          | 188          | 91           | 15           | 0  | 78830  |
| 240           | 14100                            | 15632        | 19835        | 11011        | 6663         | 3716         | 2374         | 1444         | 812          | 581          | 81           | 16 | 76265  |
| 255           | 4731                             | 5345         | 5066         | 2053         | 932          | 388          | 193          | 88           | 51           | 18           | 7            | 0  | 18872  |
| 270           | 3226                             | 3993         | 2684         | 779          | 395          | 200          | 66           | 26           | 5            | 0            | 0            | 0  | 11374  |
| 285           | 3072                             | 3862         | 2012         | 454          | 200          | 94           | 43           | 9            | 3            | 0            | 0            | 0  | 9749   |
| 300           | 1442                             | 2453         | 1320         | 302          | 123          | 49           | 27           | 13           | 0            | 0            | 0            | 0  | 5729   |
| 315           | 635                              | 1520         | 1027         | 266          | 76           | 28           | 4            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0  | 3556   |
| 330           | 249                              | 1131         | 977          | 207          | 46           | 13           | 2            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0  | 2625   |
| 345           | 281                              | 842          | 881          | 200          | 32           | 9            | 1            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0  | 2246   |
| <b>Tot</b>    | 67483                            | 89799        | 100046       | 47291        | 25290        | 11204        | 5198         | 2321         | 1148         | 735          | 104          | 16 | 350635 |

**Tabella 8-2. Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso, al largo di La Spezia ricostruiti dal DICCA e calibrati, suddivisi per classi di altezza significativa e direzione. Periodo di riferimento 1979-2018.**

| Dir<br>° Nord        | Altezza d'onda significativa [m] |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |        | Tot   | Hs>0.5 |
|----------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|-------|--------|
|                      | 0.00<br>0.25                     | 0.25<br>0.50 | 0.50<br>1.00 | 1.00<br>1.50 | 1.50<br>2.00 | 2.00<br>2.50 | 2.50<br>3.00 | 3.00<br>3.50 | 3.50<br>4.00 | 4.00<br>5.00 | 5.00<br>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   |
| <b>Tot</b>           | 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  |
| <b>Tot. Cumulate</b> |                                  | 44.86        | 73.39        | 86.88        | 94.09        | 97.28        | 98.77        | 99.43        | 99.76        | 99.97        | 100.00       | 100.00 |       |        |

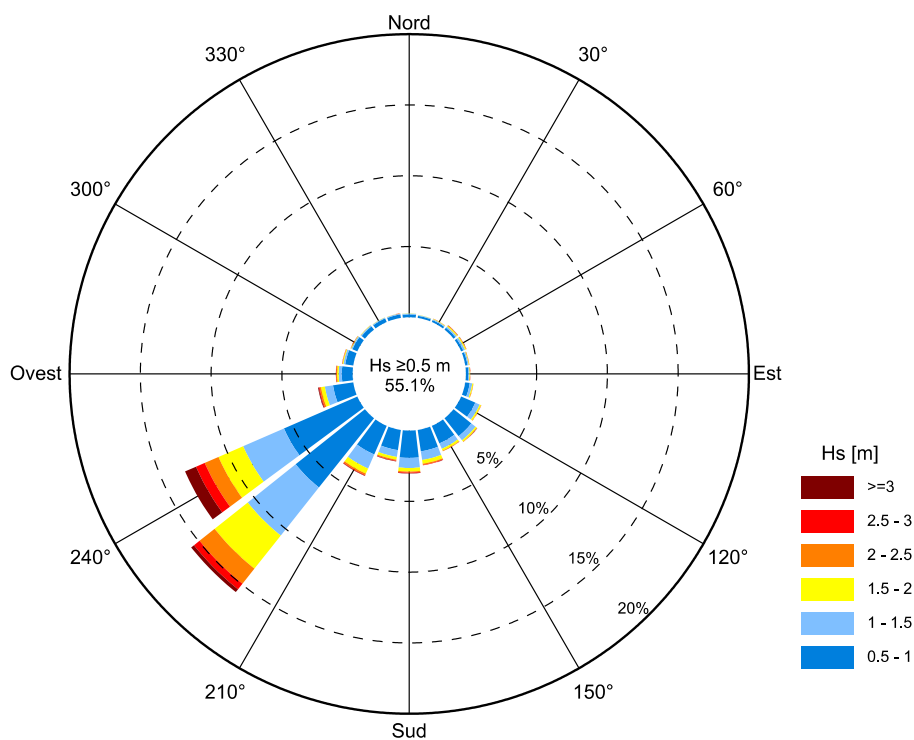


Figura 8.3. Rosa di distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso con  $H_s \geq 0.5$  m ricostruiti e calibrati al largo di La Spezia. DICCA-WWIII calibrata - Periodo di riferimento 1979-2018.

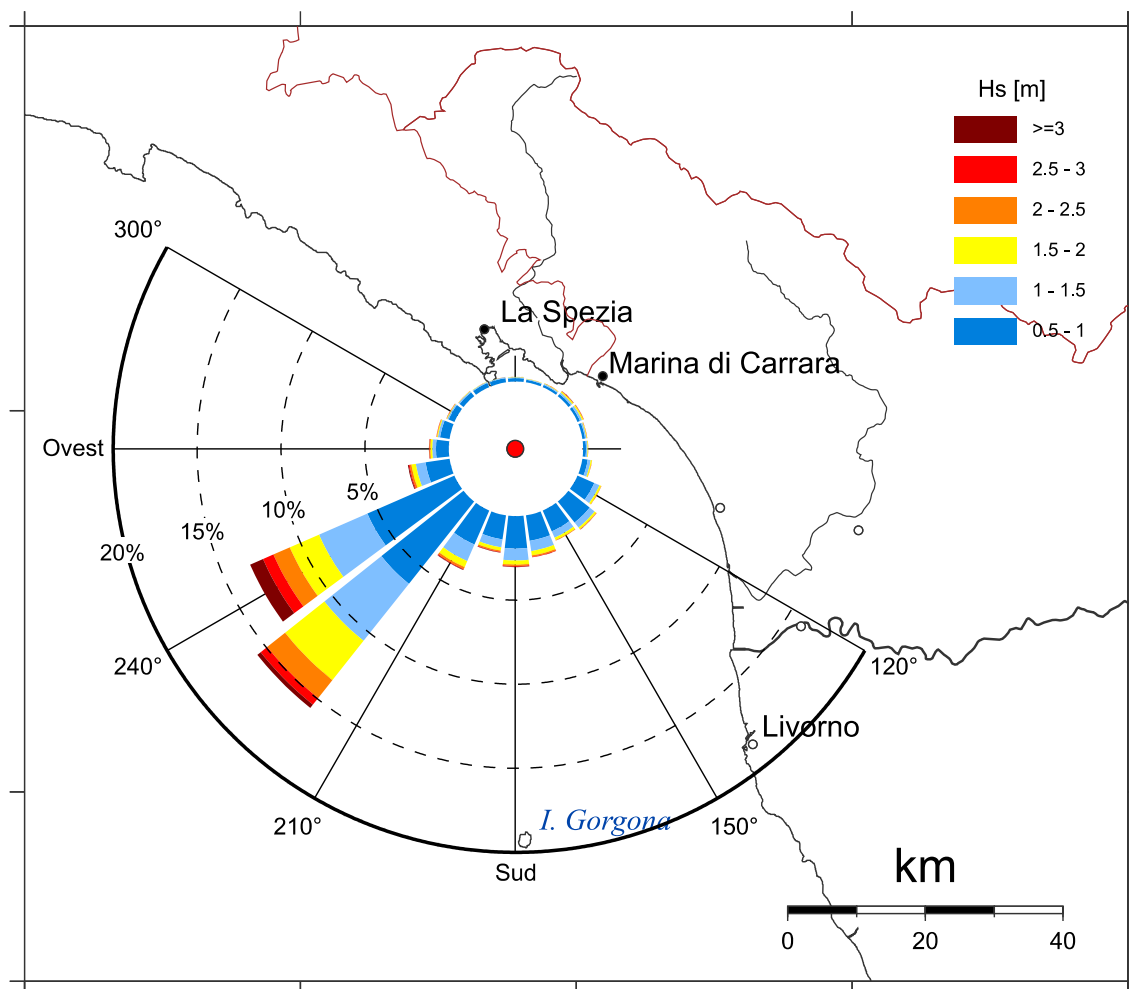
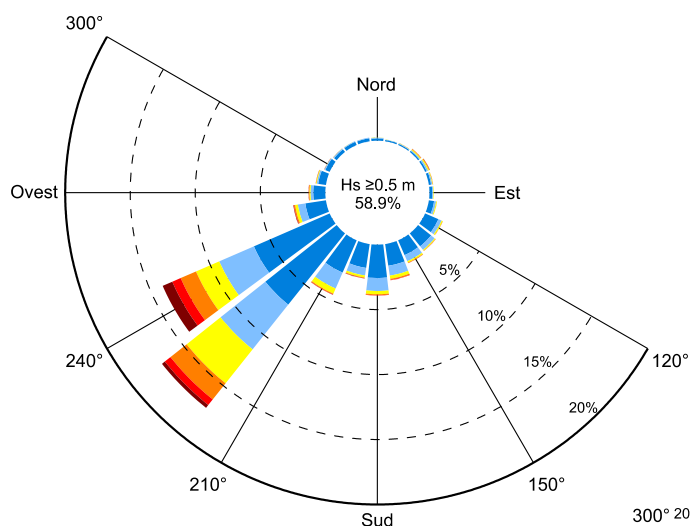
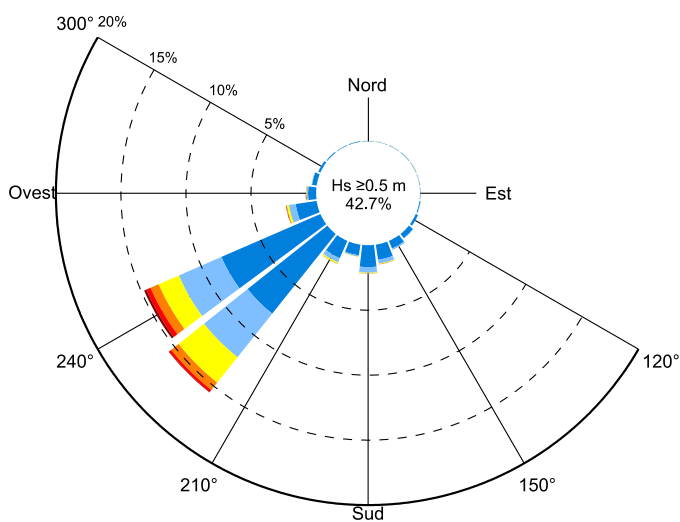


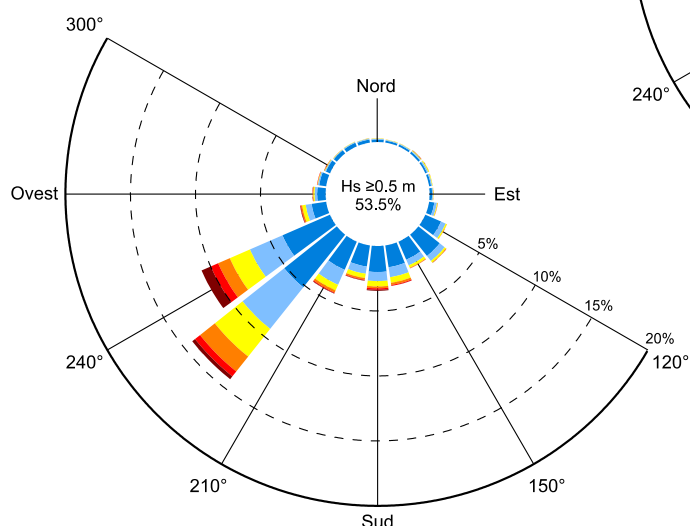
Figura 8.4. Clima di moto ondoso al largo di La Spezia nel punto di coordinate 43.95°N, 9.88°E. Periodo di riferimento 1979-2018.



**PRIMAVERA**

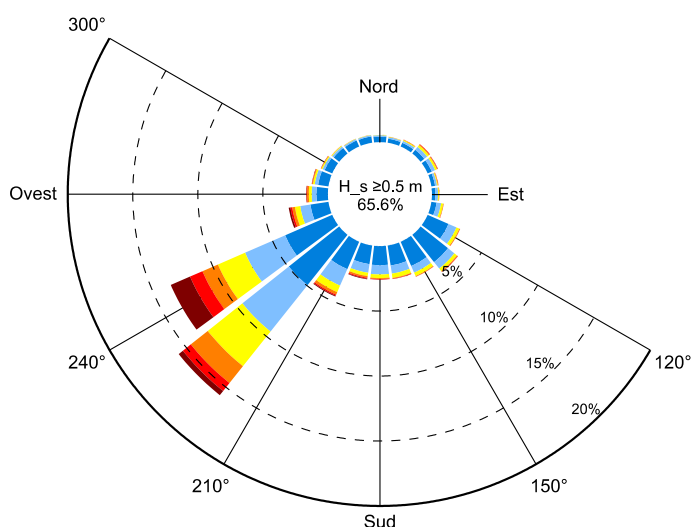


**ESTATE**



**AUTUNNO**

**Hs [m]**



**INVERNO**

**Figura 8.5. Regime di moto ondoso stagionale al largo di La Spezia  
DICCA-WWIII - dati calibrati - Periodo di riferimento 1979-2018**

### 8.3 Curva di durata

In merito alla persistenza degli eventi di moto ondoso si può far riferimento alla curva di durata rappresentata in Figura 8.6. Dall'analisi della serie storica è stato possibile determinare la durata media annuale associata a diverse soglie di altezza d'onda significativa.

durata media degli eventi con  $H_s \geq 1.0$  m    circa 2331 ore/anno

durata media degli eventi con  $H_s \geq 2.0$  m    circa 518 ore/anno

durata media degli eventi con  $H_s \geq 3.0$  m    circa 110 ore/anno

durata media degli eventi con  $H_s \geq 4.0$  m    circa 22 ore/anno



Figura 8.6. Curva di durata degli eventi di moto ondoso al largo.

### 8.4 Distribuzione degli eventi in relazione al periodo di picco del moto ondoso

L'istogramma di Figura 8.7 riporta la frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso appartenenti alla serie storica DICCA al largo di La Spezia suddivisi in base a classi di periodo di picco  $T_p$  di ampiezza di un secondo tra 0 e 16 secondi.

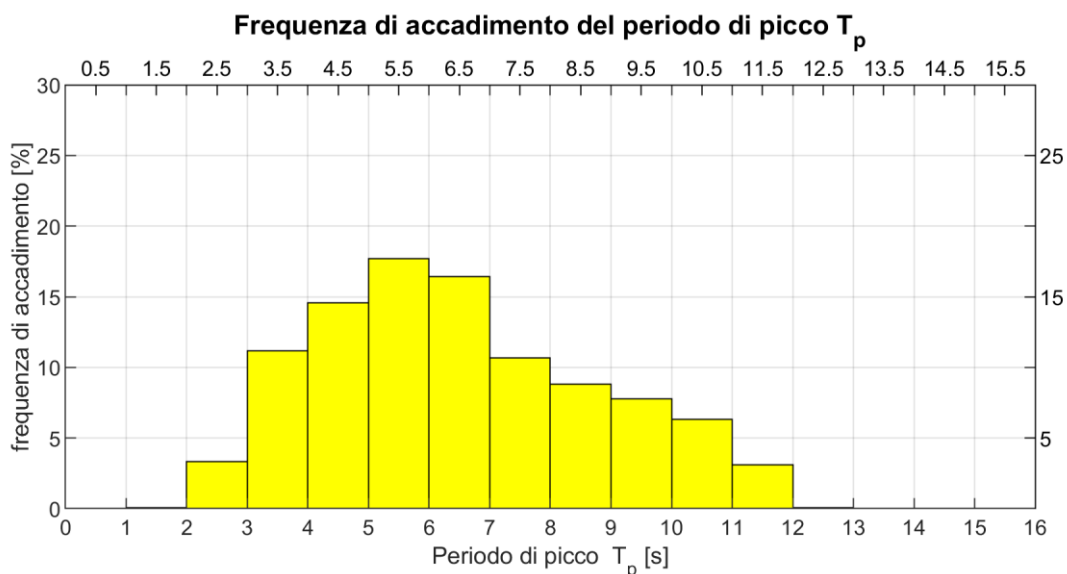


Figura 8.7. Frequenza di accadimento del periodo di picco  $T_p$ .

In Tabella 8-3 è riportato il valore medio del periodo di picco  $T_p$  ottenuto suddividendo gli eventi della serie storica per classi di  $H_s$  e direzione di provenienza. I valori riportati tra parentesi indicano il valore della deviazione standard rispetto alla media calcolata. La tabella fornisce per ogni classe di direzione o per ogni classe di altezza d'onda il valore della moda (valore medio di  $T_p$  più frequente) ottenuto come media pesata in base al numero di eventi appartenenti ad ogni classe.

Al fine di individuare la legge di dipendenza tra il periodo di picco delle onde  $T_p$  e l'altezza d'onda significativa  $H_s$  si è fatto riferimento alla seguente relazione (Mathiesen et al., 1994) utilizzata anche nell'Atlante delle Onde Italiane edito da ISPRA:

$$T_p = a \cdot (H_s)^b$$

ove i parametri  $a$  e  $b$  possono essere ricavati dall'analisi di correlazione tra i valori della serie.

Per trovare la legge di dipendenza si è fatto riferimento a tutti gli eventi di moto ondoso con altezza d'onda significativa  $H_s \geq 1.0$  m ma anche a quelli distinti nei due settori di traversia:

- 210 - 270 °N settore di traversia di Libeccio e Ponente (settore di traversia principale)
- 165 - 195 °N settore di traversia di Mezzogiorno (settore di traversia secondario)

In Figura 8.8 sono riportate le funzioni di correlazione tra  $T_p$  e  $H_s$  trovate con il metodo dei minimi quadrati per i dati della serie storica al largo di La Spezia per i due settori di traversia individuati.

L'analisi condotta ha permesso di determinare i seguenti parametri della legge di adattamento:

| $T_p = a \cdot (H_s)^b$                              | Parametro (a) | Parametro (b) |
|------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| <b>omnidirezionale</b>                               | 7.28          | 0.30          |
| settore di traversia principale<br><b>210-270 °N</b> | 8.11          | 0.21          |
| settore di traversia secondario<br><b>165-195 °N</b> | 6.56          | 0.30          |

**Tabella 8-3. Valore medio del periodo di picco  $T_p$  associato a classi di direzione e altezza d'onda significativa  $H_s$ .**

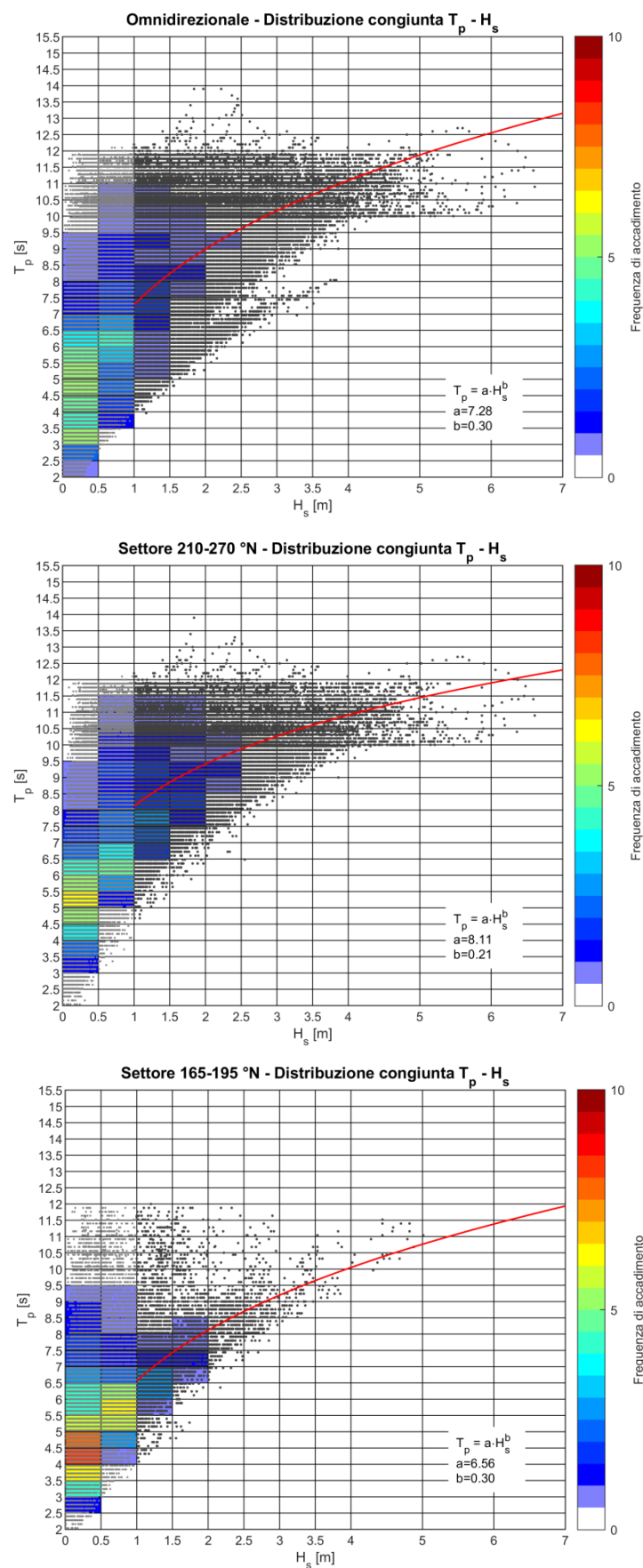
|               | VALORE MEDIO DEL PERIODO DI PICCO PER CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA E DIREZIONE |              |              |              |               |               |               |               |               |               |               |               |      |  |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------|--|
| Dir<br>° Nord | ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs [m]                                                      |              |              |              |               |               |               |               |               |               |               |               |      |  |
|               | 0.00<br>0.25                                                                             | 0.25<br>0.50 | 0.50<br>1.00 | 1.00<br>1.50 | 1.50<br>2.00  | 2.00<br>2.50  | 2.50<br>3.00  | 3.00<br>3.50  | 3.50<br>4.00  | 4.00<br>5.00  | 5.00<br>6.00  | >6.00         | Moda |  |
| 0             | 2.9<br>(1.1)                                                                             | 3.6<br>(1.1) | 4.4<br>(1)   | 5.2<br>(0.9) | 5.9<br>(1.1)  | 6.2<br>(0.4)  |               |               |               |               |               |               | 4.0  |  |
| 15            | 2.9<br>(0.9)                                                                             | 3.4<br>(0.9) | 4.3<br>(0.9) | 5.2<br>(0.7) | 5.8<br>(0.4)  | 6.4<br>(0.2)  | 7<br>(0.1)    |               |               |               |               |               | 4.0  |  |
| 30            | 2.8<br>(0.9)                                                                             | 3.6<br>(1.1) | 4.4<br>(0.8) | 5.3<br>(0.6) | 5.9<br>(0.4)  | 6.5<br>(0.6)  | 7<br>(0.2)    | 7.4<br>(0.2)  | 7.8<br>(0)    |               |               |               | 4.5  |  |
| 45            | 2.7<br>(0.9)                                                                             | 3.6<br>(1)   | 4.4<br>(0.7) | 5.3<br>(0.4) | 6<br>(0.3)    | 6.6<br>(0.2)  | 7<br>(0.1)    | 7.6<br>(0.1)  | 7.9<br>(0.1)  |               |               |               | 4.8  |  |
| 60            | 2.7<br>(0.7)                                                                             | 3.6<br>(1.1) | 4.5<br>(0.7) | 5.3<br>(0.3) | 6<br>(0.3)    | 6.5<br>(0.3)  | 7<br>(0.2)    | 7.5<br>(0.2)  | 7.9<br>(0.2)  |               |               |               | 4.8  |  |
| 75            | 2.7<br>(0.6)                                                                             | 3.7<br>(1.2) | 4.6<br>(0.7) | 5.3<br>(0.5) | 6<br>(0.2)    | 6.5<br>(0.6)  | 7.1<br>(0.2)  | 7.5<br>(0.1)  |               |               |               |               | 4.4  |  |
| 90            | 2.7<br>(0.7)                                                                             | 3.7<br>(1)   | 4.7<br>(0.9) | 5.4<br>(0.6) | 6<br>(0.4)    | 6.7<br>(0.7)  | 6.7<br>(0)    |               |               |               |               |               | 4.3  |  |
| 105           | 2.9<br>(1)                                                                               | 3.7<br>(1.1) | 4.7<br>(1)   | 5.4<br>(0.6) | 6<br>(0.5)    | 6.4<br>(0.2)  | 6.9<br>(0.1)  |               |               |               |               |               | 4.4  |  |
| 120           | 3.1<br>(1)                                                                               | 3.8<br>(0.9) | 4.6<br>(0.8) | 5.3<br>(0.5) | 5.9<br>(0.3)  | 6.4<br>(0.2)  | 7.1<br>(0.3)  |               |               |               |               |               | 4.4  |  |
| 135           | 3.1<br>(0.8)                                                                             | 3.8<br>(0.8) | 4.6<br>(0.9) | 5.5<br>(0.9) | 6.2<br>(0.8)  | 7<br>(0.8)    | 7.2<br>(0.7)  | 7.2<br>(0.2)  | 7.3<br>(0)    |               |               |               | 4.1  |  |
| 150           | 3.5<br>(1.1)                                                                             | 4.2<br>(1.2) | 5.1<br>(1.2) | 6.2<br>(1.2) | 7.2<br>(1)    | 8.2<br>(1.1)  | 8.8<br>(0.8)  | 8.6<br>(1.6)  |               |               |               |               | 4.6  |  |
| 165           | 4.2<br>(1.6)                                                                             | 4.9<br>(1.5) | 5.7<br>(1.3) | 6.7<br>(1.1) | 7.6<br>(0.9)  | 8.3<br>(0.8)  | 8.9<br>(0.8)  | 9.2<br>(0.6)  |               | 11.5<br>(0.1) |               |               | 5.5  |  |
| 180           | 5<br>(1.7)                                                                               | 5.6<br>(1.6) | 6.1<br>(1.3) | 7<br>(1.1)   | 7.7<br>(1)    | 8.4<br>(0.8)  | 8.8<br>(0.7)  | 9.4<br>(0.6)  | 9.9<br>(0.7)  | 10.6<br>(0.5) |               |               | 5.9  |  |
| 195           | 5.2<br>(1.5)                                                                             | 6<br>(1.6)   | 6.8<br>(1.6) | 7.6<br>(1.3) | 8.3<br>(1.2)  | 8.7<br>(0.9)  | 9.5<br>(1)    | 9.5<br>(0.6)  | 10.1<br>(0.7) | 10.9<br>(0.5) | 11<br>(0)     |               | 6.3  |  |
| 210           | 5.2<br>(1.5)                                                                             | 6.2<br>(1.5) | 7.1<br>(1.5) | 7.9<br>(1.2) | 8.7<br>(1.1)  | 9.2<br>(1)    | 9.8<br>(0.9)  | 10.5<br>(0.7) | 10.7<br>(0.5) | 10.7<br>(0.6) |               |               | 6.7  |  |
| 225           | 5.1<br>(1.3)                                                                             | 6.1<br>(1.4) | 7.1<br>(1.4) | 8.1<br>(1.2) | 8.8<br>(1)    | 9.4<br>(0.9)  | 9.9<br>(0.8)  | 10.3<br>(0.8) | 10.6<br>(0.6) | 10.9<br>(0.6) | 10.9<br>(0.6) |               | 7.3  |  |
| 240           | 5.1<br>(1.2)                                                                             | 6.5<br>(1.7) | 7.9<br>(1.7) | 9.2<br>(1.4) | 9.7<br>(1.2)  | 9.9<br>(1)    | 10.2<br>(0.8) | 10.4<br>(0.7) | 10.7<br>(0.6) | 10.9<br>(0.6) | 10.7<br>(0.7) | 11.3<br>(0.6) | 7.7  |  |
| 255           | 4.8<br>(1.6)                                                                             | 6.6<br>(2)   | 8.2<br>(2.1) | 9.7<br>(1.5) | 10.4<br>(1)   | 10.5<br>(0.9) | 10.9<br>(0.7) | 11<br>(0.7)   | 10.9<br>(0.5) | 11.2<br>(0.7) | 11.8<br>(0.8) |               | 7.3  |  |
| 270           | 4.3<br>(1.3)                                                                             | 6<br>(1.7)   | 7.5<br>(2.1) | 9.2<br>(1.8) | 10.2<br>(1.2) | 10.3<br>(1.1) | 10.6<br>(0.9) | 11<br>(0.5)   | 10.8<br>(0.1) |               |               |               | 6.4  |  |
| 285           | 4<br>(1.1)                                                                               | 5.3<br>(1.5) | 7<br>(1.9)   | 8.8<br>(1.9) | 9.5<br>(1.5)  | 9.6<br>(1.3)  | 9.8<br>(1.4)  | 10.1<br>(1.2) | 10.4<br>(0.8) |               |               |               | 5.6  |  |
| 300           | 3.4<br>(1.3)                                                                             | 4.8<br>(1.7) | 6.8<br>(1.8) | 8.2<br>(1.9) | 8.6<br>(1.9)  | 8.7<br>(1.3)  | 8.4<br>(1.1)  | 9.6<br>(1.3)  |               |               |               |               | 5.2  |  |
| 315           | 3.1<br>(1.2)                                                                             | 4.8<br>(1.7) | 6.2<br>(1.7) | 7.1<br>(1.9) | 8.1<br>(1.8)  | 7.6<br>(1.4)  | 8.3<br>(1.1)  |               |               |               |               |               | 5.2  |  |
| 330           | 3.4<br>(1.1)                                                                             | 4.5<br>(1.4) | 5.2<br>(1.4) | 5.9<br>(1.5) | 6.6<br>(1.6)  | 6.7<br>(1)    | 7.4<br>(1.2)  |               |               |               |               |               | 4.8  |  |
| 345           | 3<br>(0.9)                                                                               | 3.8<br>(1.2) | 4.5<br>(1.1) | 5.3<br>(1.3) | 6<br>(1.3)    | 6.3<br>(0.3)  | 6.8<br>(0)    |               |               |               |               |               | 4.1  |  |
| Moda          | 4.6                                                                                      | 5.5          | 6.7          | 7.9          | 8.7           | 9.4           | 9.9           | 10.3          | 10.6          | 10.9          | 10.8          | 11.3          |      |  |

Note:

1. Periodo di picco  $T_p$  espresso in secondi

2. Tra parentesi valore della deviazione standard

3. Il moda (valore medio più frequente) è stata calcolata come la media pesata del valore medio ottenuto per ogni classe di altezza d'onda e direzione in base alla frequenza di accadimento



**Figura 8.8. Correlazione altezza  $H_s$  – periodo  $T_p$  per i dati di moto ondoso appartenenti alla serie storica DICCA calibrata al largo di La Spezia e Marina di Carrara. In alto analisi omnidirezionale, al centro settore di traversia principale 210-270°N, in basso settore di traversia secondario 165-195°N.**

## 8.5 Anno climatico medio al largo

La definizione dell'anno climatico medio al largo risulta di fondamentale importanza per ciascuna applicazione rivolta a valutare gli effetti medi annuali prodotti dal moto ondoso in costa, come ad esempio quelli relativi al trasporto solido costiero.

In precedenza il clima annuale di moto ondoso al largo è stato rappresentato da una serie di eventi definiti sulla base della loro frequenza di accadimento e suddivisi per classi di altezza significativa  $H_s$  e direzione di provenienza (Tabella 8-2). Dal punto di vista operativo tale tabella deve essere completata associando a ciascun evento di moto ondoso anche i valori dei corrispondenti periodi di picco  $T_p$  e velocità e direzione del vento. Si descrive di seguito la procedura seguita per definire in modo completo l'anno climatico medio.

Il periodo di picco assegnato ad ogni stato del mare corrisponde al valore medio dei valori ricadenti all'interno della classe di altezza e direzione (Tabella 8-3). La velocità e la direzione di provenienza del vento associato ad ogni stato di mare è stata definita sulla base della correlazione vento/onda dei dati appartenenti alla serie storica. Per la corrispondenza direzione mare/direzione vento si è fatto riferimento alla legge di deviazione ottenuta a seguito dell'elaborazione dei fetch efficaci che è risultata congruente con gli "stati di mare vivo" appartenenti alla serie di dati di moto ondoso in ricostruzione.

In conclusione, la Tabella 8-4 riporta gli stati di mare al largo che definiscono il clima di moto ondoso. La tabella presenta i parametri di altezza significativa  $H_s$ , periodo di picco  $T_p$  direzione di provenienza, velocità e direzione del vento, e numero di eventi riferiti ad un numero complessivo di 350635 stati di mare.

Tabella 8-4. Stati di mare rappresentativi del clima di moto ondoso al largo

| ID | Hs       | Tp       | Dir | U <sub>10</sub> | DirU <sub>10</sub> | n° eventi | ID  | Hs       | Tp       | Dir | U <sub>10</sub> | DirU <sub>10</sub> | n° eventi |
|----|----------|----------|-----|-----------------|--------------------|-----------|-----|----------|----------|-----|-----------------|--------------------|-----------|
|    | <i>m</i> | <i>s</i> | °N  | <i>m/s</i>      | °N                 |           |     | <i>m</i> | <i>s</i> | °N  | <i>m/s</i>      | °N                 |           |
| 1  | 0.125    | 2.9      | 0   | 4.9             | 6                  | 234       | 51  | 0.75     | 4.7      | 90  | 6.1             | 56                 | 606       |
| 2  | 0.375    | 3.6      | 0   | 5.4             | 6                  | 600       | 52  | 1.25     | 5.4      | 90  | 7.1             | 56                 | 309       |
| 3  | 0.75     | 4.4      | 0   | 6.1             | 6                  | 715       | 53  | 1.75     | 6        | 90  | 8.0             | 56                 | 119       |
| 4  | 1.25     | 5.2      | 0   | 7.1             | 6                  | 205       | 54  | 2.25     | 6.7      | 90  | 9.0             | 56                 | 42        |
| 5  | 1.75     | 5.9      | 0   | 8.0             | 6                  | 44        | 55  | 2.75     | 6.7      | 90  | 9.9             | 56                 | 1         |
| 6  | 2.25     | 6.2      | 0   | 9.0             | 6                  | 9         | 56  | 0.125    | 2.9      | 105 | 4.9             | 66                 | 509       |
| 7  | 0.125    | 2.9      | 15  | 4.9             | 14                 | 155       | 57  | 0.375    | 3.7      | 105 | 5.4             | 66                 | 946       |
| 8  | 0.375    | 3.4      | 15  | 5.4             | 14                 | 396       | 58  | 0.75     | 4.7      | 105 | 6.1             | 66                 | 1139      |
| 9  | 0.75     | 4.3      | 15  | 6.1             | 14                 | 521       | 59  | 1.25     | 5.4      | 105 | 7.1             | 66                 | 629       |
| 10 | 1.25     | 5.2      | 15  | 7.1             | 14                 | 178       | 60  | 1.75     | 6        | 105 | 8.0             | 66                 | 248       |
| 11 | 1.75     | 5.8      | 15  | 8.0             | 14                 | 46        | 61  | 2.25     | 6.4      | 105 | 9.0             | 66                 | 50        |
| 12 | 2.25     | 6.4      | 15  | 9.0             | 14                 | 9         | 62  | 2.75     | 6.9      | 105 | 9.9             | 66                 | 9         |
| 13 | 2.75     | 7        | 15  | 9.9             | 14                 | 3         | 63  | 0.125    | 3.1      | 120 | 4.9             | 78                 | 852       |
| 14 | 0.125    | 2.8      | 30  | 4.9             | 22                 | 109       | 64  | 0.375    | 3.8      | 120 | 5.4             | 78                 | 2218      |
| 15 | 0.375    | 3.6      | 30  | 5.4             | 22                 | 277       | 65  | 0.75     | 4.6      | 120 | 6.1             | 78                 | 3809      |
| 16 | 0.75     | 4.4      | 30  | 6.1             | 22                 | 506       | 66  | 1.25     | 5.3      | 120 | 7.1             | 78                 | 1183      |
| 17 | 1.25     | 5.3      | 30  | 7.1             | 22                 | 242       | 67  | 1.75     | 5.9      | 120 | 8.0             | 78                 | 375       |
| 18 | 1.75     | 5.9      | 30  | 8.0             | 22                 | 105       | 68  | 2.25     | 6.4      | 120 | 9.0             | 78                 | 71        |
| 19 | 2.25     | 6.5      | 30  | 9.0             | 22                 | 30        | 69  | 2.75     | 7.1      | 120 | 9.9             | 78                 | 13        |
| 20 | 2.75     | 7        | 30  | 9.9             | 22                 | 11        | 70  | 0.125    | 3.1      | 135 | 4.9             | 91                 | 3244      |
| 21 | 3.25     | 7.4      | 30  | 10.9            | 22                 | 1         | 71  | 0.375    | 3.8      | 135 | 5.4             | 91                 | 6544      |
| 22 | 3.75     | 7.8      | 30  | 11.8            | 22                 | 1         | 72  | 0.75     | 4.6      | 135 | 6.1             | 91                 | 5649      |
| 23 | 0.125    | 2.7      | 45  | 4.9             | 31                 | 134       | 73  | 1.25     | 5.5      | 135 | 7.1             | 91                 | 1316      |
| 24 | 0.375    | 3.6      | 45  | 5.4             | 31                 | 221       | 74  | 1.75     | 6.2      | 135 | 8.0             | 91                 | 411       |
| 25 | 0.75     | 4.4      | 45  | 6.1             | 31                 | 588       | 75  | 2.25     | 7        | 135 | 9.0             | 91                 | 103       |
| 26 | 1.25     | 5.3      | 45  | 7.1             | 31                 | 388       | 76  | 2.75     | 7.2      | 135 | 9.9             | 91                 | 32        |
| 27 | 1.75     | 6        | 45  | 8.0             | 31                 | 257       | 77  | 3.25     | 7.2      | 135 | 10.9            | 91                 | 5         |
| 28 | 2.25     | 6.6      | 45  | 9.0             | 31                 | 107       | 78  | 3.75     | 7.3      | 135 | 11.8            | 91                 | 1         |
| 29 | 2.75     | 7        | 45  | 9.9             | 31                 | 36        | 79  | 0.125    | 3.5      | 150 | 4.9             | 107                | 3684      |
| 30 | 3.25     | 7.6      | 45  | 10.9            | 31                 | 7         | 80  | 0.375    | 4.2      | 150 | 5.4             | 107                | 5961      |
| 31 | 3.75     | 7.9      | 45  | 11.8            | 31                 | 7         | 81  | 0.75     | 5.1      | 150 | 6.1             | 107                | 4731      |
| 32 | 0.125    | 2.7      | 60  | 4.9             | 39                 | 150       | 82  | 1.25     | 6.2      | 150 | 7.1             | 107                | 1458      |
| 33 | 0.375    | 3.6      | 60  | 5.4             | 39                 | 263       | 83  | 1.75     | 7.2      | 150 | 8.0             | 107                | 517       |
| 34 | 0.75     | 4.5      | 60  | 6.1             | 39                 | 565       | 84  | 2.25     | 8.2      | 150 | 9.0             | 107                | 130       |
| 35 | 1.25     | 5.3      | 60  | 7.1             | 39                 | 461       | 85  | 2.75     | 8.8      | 150 | 9.9             | 107                | 21        |
| 36 | 1.75     | 6        | 60  | 8.0             | 39                 | 277       | 86  | 3.25     | 8.6      | 150 | 10.9            | 107                | 1         |
| 37 | 2.25     | 6.5      | 60  | 9.0             | 39                 | 101       | 87  | 0.125    | 4.2      | 165 | 4.9             | 126                | 3292      |
| 38 | 2.75     | 7        | 60  | 9.9             | 39                 | 30        | 88  | 0.375    | 4.9      | 165 | 5.4             | 126                | 5072      |
| 39 | 3.25     | 7.5      | 60  | 10.9            | 39                 | 15        | 89  | 0.75     | 5.7      | 165 | 6.1             | 126                | 5357      |
| 40 | 3.75     | 7.9      | 60  | 11.8            | 39                 | 1         | 90  | 1.25     | 6.7      | 165 | 7.1             | 126                | 2166      |
| 41 | 0.125    | 2.7      | 75  | 4.9             | 47                 | 261       | 91  | 1.75     | 7.6      | 165 | 8.0             | 126                | 923       |
| 42 | 0.375    | 3.7      | 75  | 5.4             | 47                 | 298       | 92  | 2.25     | 8.3      | 165 | 9.0             | 126                | 288       |
| 43 | 0.75     | 4.6      | 75  | 6.1             | 47                 | 563       | 93  | 2.75     | 8.9      | 165 | 9.9             | 126                | 109       |
| 44 | 1.25     | 5.3      | 75  | 7.1             | 47                 | 296       | 94  | 3.25     | 9.2      | 165 | 10.9            | 126                | 11        |
| 45 | 1.75     | 6        | 75  | 8.0             | 47                 | 128       | 95  | 4.5      | 11.5     | 165 | 13.3            | 126                | 1         |
| 46 | 2.25     | 6.5      | 75  | 9.0             | 47                 | 53        | 96  | 0.125    | 5        | 180 | 4.9             | 147                | 5703      |
| 47 | 2.75     | 7.1      | 75  | 9.9             | 47                 | 13        | 97  | 0.375    | 5.6      | 180 | 5.4             | 147                | 6711      |
| 48 | 3.25     | 7.5      | 75  | 10.9            | 47                 | 1         | 98  | 0.75     | 6.1      | 180 | 6.1             | 147                | 6777      |
| 49 | 0.125    | 2.7      | 90  | 4.9             | 56                 | 384       | 99  | 1.25     | 7        | 180 | 7.1             | 147                | 2493      |
| 50 | 0.375    | 3.7      | 90  | 5.4             | 56                 | 456       | 100 | 1.75     | 7.7      | 180 | 8.0             | 147                | 869       |

prosegue a pagina successiva

*segue da pagina precedente*

| ID  | Hs    | Tp   | Dir | U <sub>10</sub> | DirU <sub>10</sub> | n° eventi | ID                      | Hs    | Tp   | Dir | U <sub>10</sub> | DirU <sub>10</sub> | n° eventi |
|-----|-------|------|-----|-----------------|--------------------|-----------|-------------------------|-------|------|-----|-----------------|--------------------|-----------|
|     | m     | s    | °N  | m/s             | °N                 |           |                         | m     | s    | °N  | m/s             | °N                 |           |
| 101 | 2.25  | 8.4  | 180 | 9.0             | 147                | 273       | 156                     | 2.75  | 10.9 | 255 | 9.9             | 280                | 192       |
| 102 | 2.75  | 8.8  | 180 | 9.9             | 147                | 153       | 157                     | 3.25  | 11   | 255 | 10.9            | 280                | 88        |
| 103 | 3.25  | 9.4  | 180 | 10.9            | 147                | 46        | 158                     | 3.75  | 10.9 | 255 | 11.8            | 280                | 51        |
| 104 | 3.75  | 9.9  | 180 | 11.8            | 147                | 19        | 159                     | 4.5   | 11.2 | 255 | 13.3            | 280                | 17        |
| 105 | 4.5   | 10.6 | 180 | 13.3            | 147                | 7         | 160                     | 5.5   | 11.8 | 255 | 15.2            | 280                | 7         |
| 106 | 0.125 | 5.2  | 195 | 4.9             | 171                | 5266      | 161                     | 0.125 | 4.3  | 270 | 4.9             | 306                | 3226      |
| 107 | 0.375 | 6    | 195 | 5.4             | 171                | 5455      | 162                     | 0.375 | 6    | 270 | 5.4             | 306                | 3992      |
| 108 | 0.75  | 6.8  | 195 | 6.1             | 171                | 5060      | 163                     | 0.75  | 7.5  | 270 | 6.1             | 306                | 2684      |
| 109 | 1.25  | 7.6  | 195 | 7.1             | 171                | 1691      | 164                     | 1.25  | 9.2  | 270 | 7.1             | 306                | 779       |
| 110 | 1.75  | 8.3  | 195 | 8.0             | 171                | 669       | 165                     | 1.75  | 10.2 | 270 | 8.0             | 306                | 394       |
| 111 | 2.25  | 8.7  | 195 | 9.0             | 171                | 265       | 166                     | 2.25  | 10.3 | 270 | 9.0             | 306                | 200       |
| 112 | 2.75  | 9.5  | 195 | 9.9             | 171                | 123       | 167                     | 2.75  | 10.6 | 270 | 9.9             | 306                | 65        |
| 113 | 3.25  | 9.5  | 195 | 10.9            | 171                | 34        | 168                     | 3.25  | 11   | 270 | 10.9            | 306                | 26        |
| 114 | 3.75  | 10.1 | 195 | 11.8            | 171                | 21        | 169                     | 3.75  | 10.8 | 270 | 11.8            | 306                | 5         |
| 115 | 4.5   | 10.9 | 195 | 13.3            | 171                | 19        | 170                     | 0.125 | 4    | 285 | 4.9             | 330                | 3071      |
| 116 | 5.5   | 11   | 195 | 15.2            | 171                | 1         | 171                     | 0.375 | 5.3  | 285 | 5.4             | 330                | 3861      |
| 117 | 0.125 | 5.2  | 210 | 4.9             | 197                | 5437      | 172                     | 0.75  | 7    | 285 | 6.1             | 330                | 2012      |
| 118 | 0.375 | 6.2  | 210 | 5.4             | 197                | 6099      | 173                     | 1.25  | 8.8  | 285 | 7.1             | 330                | 454       |
| 119 | 0.75  | 7.1  | 210 | 6.1             | 197                | 7727      | 174                     | 1.75  | 9.5  | 285 | 8.0             | 330                | 200       |
| 120 | 1.25  | 7.9  | 210 | 7.1             | 197                | 3794      | 175                     | 2.25  | 9.6  | 285 | 9.0             | 330                | 94        |
| 121 | 1.75  | 8.7  | 210 | 8.0             | 197                | 1354      | 176                     | 2.75  | 9.8  | 285 | 9.9             | 330                | 42        |
| 122 | 2.25  | 9.2  | 210 | 9.0             | 197                | 411       | 177                     | 3.25  | 10.1 | 285 | 10.9            | 330                | 9         |
| 123 | 2.75  | 9.8  | 210 | 9.9             | 197                | 157       | 178                     | 3.75  | 10.4 | 285 | 11.8            | 330                | 3         |
| 124 | 3.25  | 10.5 | 210 | 10.9            | 197                | 40        | 179                     | 0.125 | 3.4  | 300 | 4.9             | 351                | 1441      |
| 125 | 3.75  | 10.7 | 210 | 11.8            | 197                | 34        | 180                     | 0.375 | 4.8  | 300 | 5.4             | 351                | 2453      |
| 126 | 4.5   | 10.7 | 210 | 13.3            | 197                | 15        | 181                     | 0.75  | 6.8  | 300 | 6.1             | 351                | 1320      |
| 127 | 0.125 | 5.1  | 225 | 4.9             | 224                | 10325     | 182                     | 1.25  | 8.2  | 300 | 7.1             | 351                | 302       |
| 128 | 0.375 | 6.1  | 225 | 5.4             | 224                | 13500     | 183                     | 1.75  | 8.6  | 300 | 8.0             | 351                | 123       |
| 129 | 0.75  | 7.1  | 225 | 6.1             | 224                | 21924     | 184                     | 2.25  | 8.7  | 300 | 9.0             | 351                | 48        |
| 130 | 1.25  | 8.1  | 225 | 7.1             | 224                | 15205     | 185                     | 2.75  | 8.4  | 300 | 9.9             | 351                | 26        |
| 131 | 1.75  | 8.8  | 225 | 8.0             | 224                | 10475     | 186                     | 3.25  | 9.6  | 300 | 10.9            | 351                | 13        |
| 132 | 2.25  | 9.4  | 225 | 9.0             | 224                | 4758      | 187                     | 0.125 | 3.1  | 315 | 4.9             | 7                  | 634       |
| 133 | 2.75  | 9.9  | 225 | 9.9             | 224                | 1772      | 188                     | 0.375 | 4.8  | 315 | 5.4             | 7                  | 1520      |
| 134 | 3.25  | 10.3 | 225 | 10.9            | 224                | 575       | 189                     | 0.75  | 6.2  | 315 | 6.1             | 7                  | 1027      |
| 135 | 3.75  | 10.6 | 225 | 11.8            | 224                | 188       | 190                     | 1.25  | 7.1  | 315 | 7.1             | 7                  | 265       |
| 136 | 4.5   | 10.9 | 225 | 13.3            | 224                | 90        | 191                     | 1.75  | 8.1  | 315 | 8.0             | 7                  | 75        |
| 137 | 5.5   | 10.9 | 225 | 15.2            | 224                | 15        | 192                     | 2.25  | 7.6  | 315 | 9.0             | 7                  | 28        |
| 138 | 0.125 | 5.1  | 240 | 4.9             | 252                | 14100     | 193                     | 2.75  | 8.3  | 315 | 9.9             | 7                  | 3         |
| 139 | 0.375 | 6.5  | 240 | 5.4             | 252                | 15632     | 194                     | 0.125 | 3.4  | 330 | 4.9             | 19                 | 248       |
| 140 | 0.75  | 7.9  | 240 | 6.1             | 252                | 19835     | 195                     | 0.375 | 4.5  | 330 | 5.4             | 19                 | 1131      |
| 141 | 1.25  | 9.2  | 240 | 7.1             | 252                | 11010     | 196                     | 0.75  | 5.2  | 330 | 6.1             | 19                 | 977       |
| 142 | 1.75  | 9.7  | 240 | 8.0             | 252                | 6663      | 197                     | 1.25  | 5.9  | 330 | 7.1             | 19                 | 207       |
| 143 | 2.25  | 9.9  | 240 | 9.0             | 252                | 3715      | 198                     | 1.75  | 6.6  | 330 | 8.0             | 19                 | 46        |
| 144 | 2.75  | 10.2 | 240 | 9.9             | 252                | 2374      | 199                     | 2.25  | 6.7  | 330 | 9.0             | 19                 | 13        |
| 145 | 3.25  | 10.4 | 240 | 10.9            | 252                | 1443      | 200                     | 2.75  | 7.4  | 330 | 9.9             | 19                 | 1         |
| 146 | 3.75  | 10.7 | 240 | 11.8            | 252                | 812       | 201                     | 0.125 | 3    | 345 | 4.9             | 26                 | 280       |
| 147 | 4.5   | 10.9 | 240 | 13.3            | 252                | 581       | 202                     | 0.375 | 3.8  | 345 | 5.4             | 26                 | 842       |
| 148 | 5.5   | 10.7 | 240 | 15.2            | 252                | 80        | 203                     | 0.75  | 4.5  | 345 | 6.1             | 26                 | 881       |
| 149 | 6.5   | 11.3 | 240 | 17.1            | 252                | 15        | 204                     | 1.25  | 5.3  | 345 | 7.1             | 26                 | 200       |
| 150 | 0.125 | 4.8  | 255 | 4.9             | 280                | 4731      | 205                     | 1.75  | 6    | 345 | 8.0             | 26                 | 32        |
| 151 | 0.375 | 6.6  | 255 | 5.4             | 280                | 5345      | 206                     | 2.25  | 6.3  | 345 | 9.0             | 26                 | 9         |
| 152 | 0.75  | 8.2  | 255 | 6.1             | 280                | 5066      | 207                     | 2.75  | 6.8  | 345 | 9.9             | 26                 | 1         |
| 153 | 1.25  | 9.7  | 255 | 7.1             | 280                | 2053      | CALME                   |       |      |     |                 |                    | 80        |
| 154 | 1.75  | 10.4 | 255 | 8.0             | 280                | 931       | NUMERO TOTALE DI EVENTI |       |      |     |                 |                    | 350635    |

## Capitolo 9 Analisi e validazione dei dati mareografici

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

- **maree astronomiche:** variazioni del livello del mare dovute all'interazione tra le masse oceaniche e il campo gravitazionale degli astri posti in prossimità della terra tra i quali quelli della luna e del sole risultano i più importanti. Poiché si può assumere che i moti relativi degli astri e della terra e le loro periodicità siano note con ottima approssimazione, si può assumere che le maree astronomiche siano ricostruibili e prevedibili in senso deterministico;
- **maree meteorologiche:** variazioni del livello del mare dovute a perturbazioni atmosferiche. Poiché le variazioni atmosferiche non sono prevedibili in modo deterministico, queste variazioni si trattano in senso stocastico e quindi possono essere previste soli utilizzando approcci di tipo probabilistico. La componente meteorologica della marea è indotta essenzialmente da due fenomeni che si esplicano contemporaneamente: (i) l'effetto barometrico inverso e (ii) l'azione esercitata dal vento sulle masse oceaniche ("wind set-up"). In presenza di alte pressioni atmosferiche (aree anticicloniche) generalmente la velocità del vento è contenuta e prevale l'effetto barometrico inverso che dà luogo ad un abbassamento del livello del mare. Abbassamenti del livello del mare si possono verificare anche in presenza di venti sostenuti che spirano dalla terra verso il mare aperto. Invece, in presenza di aree cicloniche (perturbazioni atmosferiche), con vento che spirano verso la costa, la componente meteorologica della marea dà luogo ad un aumento (sovrizzo) del livello del mare. Tale aumento è comunemente indicato con il termine sovrizzo di tempesta ("storm surge").

In generale il sovrizzo di tempesta che si verifica come detto per venti che spirano verso la costa, è fortemente influenzato dal quadrato della velocità del vento, dall'estensione della piattaforma continentale e dalla presenza di golfi e rade, come ad esempio la rada di La Spezia. Questo sovrizzo inoltre aumenta al diminuire della profondità.

All'interno della zona dei frangenti ai due fenomeni sopra descritti si aggiunge un terzo fenomeno che incrementa ulteriormente il sovrizzo di tempesta: il sovrizzo indotto dal moto ondoso frangente, denominato "wave set-up", che tende ad aumentare all'aumentare dell'altezza dell'onda frangente e al diminuire del fondale. Inoltre esso è fortemente influenzato dalla batimetria locale e dall'angolo formato tra la direzione delle onde e la costa, tendendo ad aumentare per attacchi di moto ondoso ortogonali alla linea di riva.

Il metodo migliore per valutare in una data località le maree (sia la componente astronomica che quella meteorologica) consiste nell'eseguire misure dirette del livello del mare, mediante opportune stazioni mareografiche le quali registrano le variazioni nel tempo del livello operando, di solito, un primo filtro sulle componenti in alta frequenza di variazione del livello indotte dal moto ondoso e/o dai natanti in transito mediante sistemi meccanici.

Acquisita la misura di livello sotto forma di serie storica, le maree astronomiche possono essere facilmente calcolate in quanto di esse sono note a priori i periodi e le fasi delle componenti

armoniche nelle quali il segnale misurato può essere scomposto. Mediante opportune tecniche numeriche che operano sul segnale registrato, che include ambedue le componenti di marea, si ricostruisce dal segnale registrato l'ampiezza delle costanti armoniche determinando quindi per ogni componente armonica tutte le relative costanti, ovvero periodi, fasi e ampiezze, che vengono denominate costanti armoniche. Determinata la marea astronomica è quindi possibile ottenere per sottrazione dal segnale di livello registrato il residuo dovuto alla marea meteorologica. Se la misura del livello di marea viene eseguita in una località dove le onde non frangono, il residuo determinato dalla misura risulta privo della componente dovuta alle onde frangenti.

Per quanto riguarda il paraggio in questione, è stata in primo luogo condotta una indagine approfondita circa l'esistenza di stazioni mareografiche di cui fosse possibile disporre la serie storica dei livelli registrati.

Questa indagine ha evidenziato che per la rada di La Spezia l'unica serie storica di misure di marea disponibile è costituita da quella registrata dalla stazione di La Spezia facente parte della RMN (Rete Mareografica Nazionale) gestita dall'ISPRA. Purtroppo questa stazione non ha misurato l'evento meteomarinico che si è verificato alla fine del mese di ottobre del 2018 che ha causato un rilevante sovrizzo di tempesta e ingenti danni in numerose località della costa ligure inclusa la rada di La Spezia. Per quanto riguarda il Porto di Marina di Carrara la ex Autorità Portuale, come di seguito esposto, ha gestito per alcuni anni una stazione mareografica.

Si è inoltre accertato presso l'Istituto Idrografico della Marina Militare che la stazione di La Spezia, della quale vengono fornite annualmente le previsioni di marea nella pubblicazione edita dallo stesso Istituto dal titolo "Tavole di Marea" non è da tempo più operativa.

### 9.1 Misure di livello mareografo RMN - La Spezia

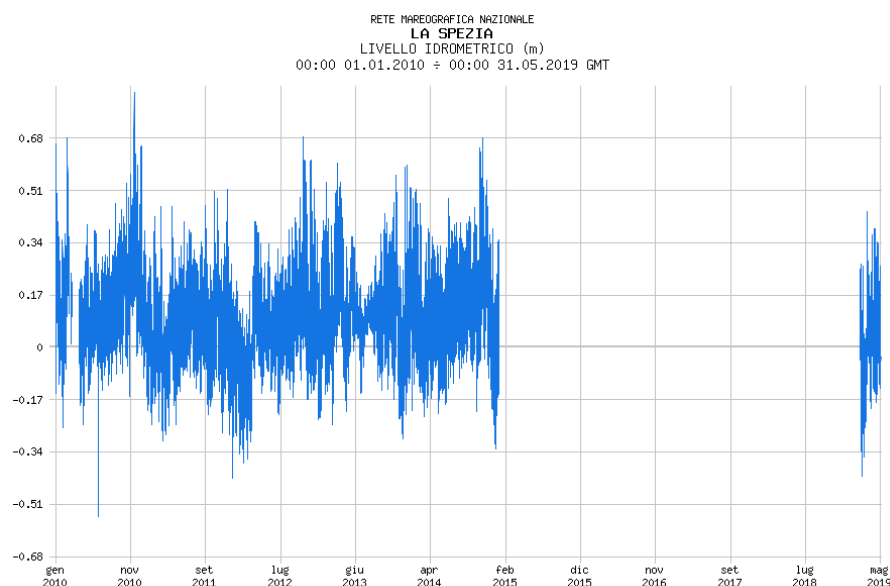
All'interno della rada di La Spezia, più precisamente sul molo principale di Porto Lotti, è in funzione dal 2010 la stazione mareografica di La Spezia, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale gestita da ISPRA.

La stazione mareografica ha funzionato con continuità solamente nel periodo compreso tra Gennaio 2010 e Febbraio 2015. Solo recentemente (Maggio 2019) ha ripreso il suo funzionamento (vedi Figura 9.1). Nel periodo indicato la stazione di misura ha registrato il livello idrometrico con una frequenza di acquisizione di 10 min (60 min per l'anno 2010) presentando un rendimento molto elevato (prossimo al 100%).

Per la valutazione della componente astronomica della marea (deterministica) le misure effettuate sono più che sufficienti per valutare le componenti armoniche e di conseguenza le variazioni di livello attese che caratterizzano il paraggio.

La valutazione su base probabilistica dei massimi livelli attesi dovuti alla componente meteorologica è invece condizionata dalla ridotta durata della serie temporale (solo 5 anni). La stima dei massimi livelli attesi in funzione del tempo di ritorno non è pertanto priva di incertezza.

Ulteriori analisi sulle variazioni di livello attese per il porto di La Spezia sono riportate nel Volume 2.



**Figura 9.1. Livello idrometrico misurato dalla stazione mareografica RMN di La Spezia periodo Gennaio 2010 - Maggio 2019.**

## 9.2 Misure di livello del mareografo Marina di Carrara

L'Autorità Portuale Marina di Carrara (oggi facente parte dell'ADSP Mar Ligure Orientale) si è dotata di una mareografo posizionata all'interno del porto in prossimità della testata del Molo di Sottoflutto.

La serie storica dei dati mareografici fornita ha avuto inizio a Gennaio 2006 ma ha subito un interruzione tra il 2010 e il 2014. La serie contiene i dati di livello acquisiti con frequenza di campionamento variabile tra 30 min e 15 min.

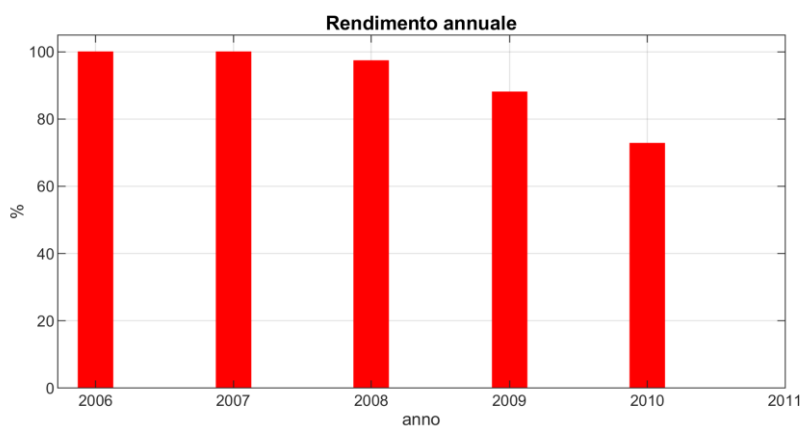
In Tabella 9-1 e nei grafici di Figura 9.4 e Figura 9.5 è riportato il rendimento ottenuto per il mareografo di Marina di Carrara.

Al fini di determinare le componenti astronomiche ed i conseguenti livelli di marea attesi la serie misurata risulta adeguata. La discontinuità della serie di misure (interrotta per circa 3 anni) non consente di effettuare una previsione molto affidabile per i livelli estremi, tuttavia si ritiene comunque indicativo per il paraglio l'analisi dei valori estremi registrati accorpare le due serie di misure.

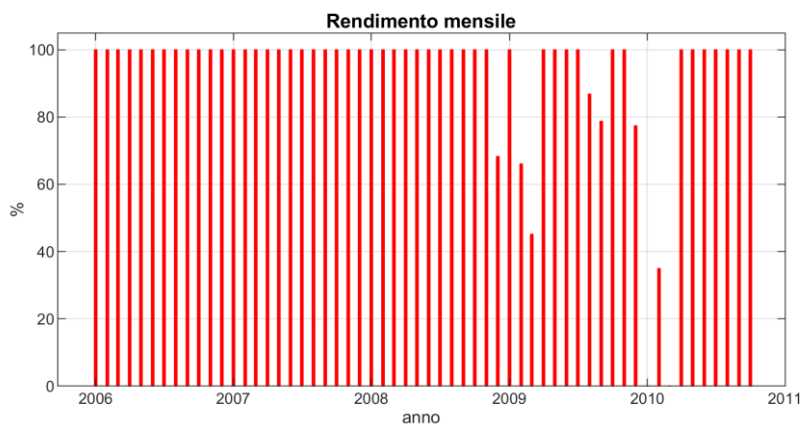
Ulteriori analisi sulle variazioni di livello attese per il porto di Marina di Carrara sono riportate nel Volume 2.

**Tabella 9-1. Analisi del rendimento della mareografo di Marina di Carrara tra il 2006 e il 2018.**

| Mareografo Marina di Carrara |               |                        |             |              |
|------------------------------|---------------|------------------------|-------------|--------------|
| Anno                         | Misure        | Misure sensore livello |             |              |
|                              | Potenziati    | Presenti               | Mancanti    | Rendimento   |
| 2006                         | 8760          | 8760                   | 0           | 100.0        |
| 2007                         | 8760          | 8760                   | 0           | 100.0        |
| 2008                         | 8784          | 8548                   | 236         | 97.3         |
| 2009                         | 8760          | 7705                   | 1055        | 88.0         |
| 2010                         | 7056          | 5131                   | 1925        | 72.7         |
|                              | <b>TOTALE</b> | <b>38904</b>           | <b>3216</b> | <b>91.6</b>  |
| 2014                         | 2928          | 2908                   | 20          | 99.3         |
| 2015                         | 8760          | 8759                   | 1           | 100.0        |
| 2016                         | 8784          | 8783                   | 1           | 100.0        |
| 2017                         | 8760          | 5757                   | 3003        | 65.4         |
| 2018                         | 8760          | 8745                   | 15          | 99.8         |
|                              | <b>TOTALE</b> | <b>36234</b>           | <b>3246</b> | <b>91.78</b> |



**Figura 9.2. Rendimento annuale della stazione mareografica installata presso il porto di Marina di Carrara periodo di riferimento Gennaio 2006 - Ottobre 2010.**



**Figura 9.3. Rendimento mensile della stazione mareografica installata presso il porto di Marina di Carrara periodo di riferimento Gennaio 2006 - Ottobre 2010.**

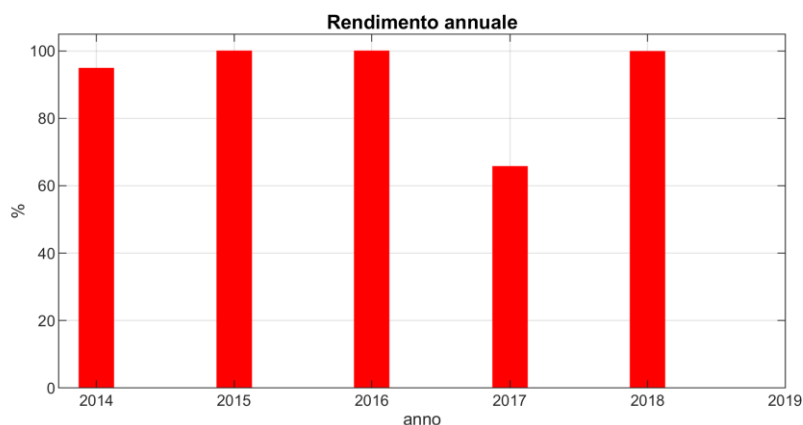


Figura 9.4. Rendimento annuale della stazione mareografica installata presso il porto di Marina di Carrara periodo di riferimento Luglio 2014 Dicembre 2018.

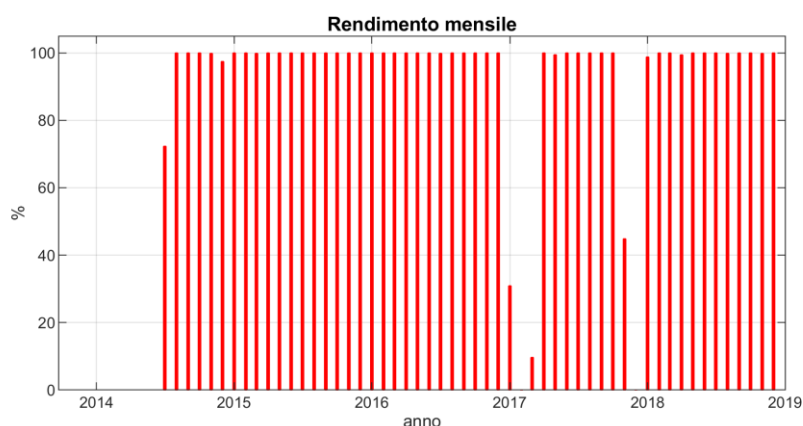


Figura 9.5. Rendimento mensile della stazione mareografica installata presso il porto di Marina di Carrara periodo di riferimento Luglio 2014 Dicembre 2018.

### 9.3 Tavole di marea I.I.M.M.

Si riportano di seguito le costanti armoniche, ampiezza  $H$  e fase  $g$ , riportate dall'Istituto Idrografico della Marina per i principali porti posti nell'area in esame. La tabella riporta inoltre il valore del parametro  $Z_0$  che indica la differenza tra il livello medio mare e il livello di riferimento degli scandagli (Chart Datum).

| PORTO     | Coordinate Geografiche |         | Costanti armoniche<br>H in centimetri - g in gradi |       |       |       |       |       |       |       |       |          | $Z_0$<br>(m) |
|-----------|------------------------|---------|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------------|
|           | Lat. °N                | Lon. °E |                                                    | $M_2$ | $S_2$ | $N_2$ | $K_2$ | $K_1$ | $O_1$ | $P_1$ | $M_4$ | $M_{s4}$ |              |
| GENOVA    | 44° 24'                | 8° 54'  | H                                                  | 8.5   | 3.3   | 1.7   | 0.9   | 3.6   | 1.6   | 1.2   | 0.6   | 0.4      | 0.15         |
|           |                        |         | $g^\circ$                                          | 251   | 268   | 235   | 268   | 201   | 118   | 201   | 038   | 100      |              |
| LA SPEZIA | 44° 04'                | 9° 51'  | H                                                  | 9.4   | 3.4   | 2.0   | 0.9   | 3.7   | 1.4   | 1.2   | 0.5   | 0.3      | 0.20         |
|           |                        |         | $g^\circ$                                          | 244   | 267   | 232   | 267   | 198   | 116   | 232   | 117   | 094      |              |
| LIVORNO   | 43° 33'                | 10° 18' | H                                                  | 8.5   | 3.3   | 1.9   | 0.9   | 3.6   | 1.6   | 1.2   | 0.4   | 0.2      | 0.17         |
|           |                        |         | $g^\circ$                                          | 261   | 278   | 247   | 278   | 193   | 111   | 193   | 040   | 100      |              |