



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi statistica degli spettri bidimensionali delle onde

Adriana Carillo, Gianmaria Sannino

ANALISI STATISTICA DEGLI SPETTRI BIDIMENSIONALI DELLE ONDE

Adriana Carillo, Gianmaria Sannino (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Obiettivo: Analisi climatologica dell'energia nelle diverse componenti del moto ondoso e previsioni operative

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 MODELLO UTILIZZATO	5
2.2 DESCRIZIONE DEL PROCEDIMENTO PER L'IDENTIFICAZIONE DELLE PARTIZIONI	7
2.3 ANALISI DEI RISULTATI	9
2.4 ANALISI DELLA VARIABILITÀ INTERANNUALE	26
3 CONCLUSIONI.....	31
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	31

Sommario

L'attività svolta nel corso di questa annualità è finalizzata al supporto sia nella fase di progettazione che nella messa in esercizio di impianti di conversione di energia dal moto ondoso. Le caratteristiche dell'impianto, oltre che la scelta del sito più idoneo, richiedono una esatta caratterizzazione della risorsa. A questo scopo nella precedente annualità è stata realizzata e validata una climatologia delle onde ad alta risoluzione, relativa a tutto il bacino Mediterraneo. Oltre alla memorizzazione delle variabili integrate, su tutto il dominio di calcolo e per l'intero periodo della simulazione, sono stati memorizzati gli spettri bidimensionali della densità di energia, funzione di frequenza e direzione delle onde, in corrispondenza di 20 siti disposti lungo la costa del bacino.

In questo documento viene presentata una analisi dettagliata degli spettri, effettuata utilizzando una tecnica per scomporre lo spettro nelle diverse componenti d'onda. Questo metodo permette in particolare di separare le componenti di onde generate localmente dal vento da quelle che si propagano a distanza dall'area di generazione (onde di *swell*). Sono state verificate le percentuali di casi in cui si presentano le diverse condizioni di mare, costituite da onde singole o da sovrapposizioni di onde, ed analizzate le caratteristiche medie delle onde per tutti i siti disponibili.

Relativamente ai siti nell'area italiana vengono mostrati, separatamente per i due tipi di onda (onde di vento e di *swell*) grafici che riportano la distribuzione degli eventi in funzione rispettivamente di altezza significativa dell'onda e periodo e altezza significativa e direzione. L'analisi è stata anche effettuata separatamente per le varie stagioni. Viene infine mostrata la variabilità inter-annuale dei risultati per quanto concerne i valori medi.

1 Introduzione

L'attività svolta all'interno dell'Accordo di Programma ha come obiettivo il supporto alla realizzazione e installazione di convertitori di energia dal moto ondoso. A questo fine, nella precedente annualità è stata realizzata una climatologia delle onde ad alta risoluzione su tutto il bacino del Mediterraneo. Sono state memorizzate le principali variabili integrate, rappresentative delle onde e della loro energia, per tutti i punti del grigliato. Sono stati inoltre memorizzati gli spettri bidimensionali in corrispondenza di 20 siti distribuiti lungo le coste del Mediterraneo, con una risoluzione temporale di un'ora. Il modello di onde utilizzato (WAM) calcola infatti l'evoluzione temporale degli spettri di densità di energia, discretizzati in funzione delle direzioni di propagazione e delle frequenze delle onde.

Nell'annualità precedente gli spettri bidimensionali sono stati utilizzati per effettuare calcoli di produttività selezionando l'energia contenuta in intervalli di frequenza e direzione rappresentativi di possibili convertitori. Nel corso della presente annualità l'analisi degli spettri bidimensionali è stata ulteriormente approfondita utilizzando una tecnica per separare le varie componenti che costituiscono lo spettro. Gli spettri, infatti, possono essere relativi alla presenza di una sola onda o, più frequentemente, alla presenza simultanea di onde di diversa ampiezza, direzione e frequenza. La tecnica del *partizionamento*, che è stata applicata ai risultati della simulazione climatologica, viene quindi utilizzata al fine di separare le varie componenti. Le statistiche relative possono essere particolarmente utili alla caratterizzazione dei siti per la definizione delle caratteristiche dei convertitori di energia dal moto ondoso da utilizzare.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Modello utilizzato

Nel corso della precedente annualità è stata effettuata una simulazione con il modello di onde WAM [1], alla risoluzione spaziale di $1/32^\circ$, estesa all'intero bacino Mediterraneo [2]. Il dominio di calcolo della simulazione copre l'area compresa in longitudine tra 5.50°W e 36.125°E e in latitudine tra 30.2°N e 45.825°N . La batimetria del modello utilizzato è mostrata nella Figura 1.

Il forzante superficiale del modello WAM, costituito dal vento a 10 m, è stato ottenuto da una simulazione di *downscaling* effettuata con il modello atmosferico regionale REMO alla risoluzione di $1/12^\circ$. Questa simulazione è stata a sua volta forzata utilizzando i campi di rianalisi forniti dal ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) alla frequenza temporale di 6 ore, estratti dal dataset climatologico denominato ERA40. Questo dataset è stato realizzato appositamente per studi climatologici, non risente quindi della continua evoluzione dei modelli atmosferici per le previsioni meteorologiche e dei metodi di assimilazione dei dati sperimentali applicati, che sono invece associati alle previsioni operative. In questo caso infatti il modello utilizzato è mantenuto costante nella risoluzione e nelle parametrizzazioni dei processi fisici per tutta la durata della simulazione rendendo i dati omogenei nel tempo.

WAM è un modello spettrale di terza generazione in cui viene calcolata l'evoluzione temporale dello spettro bidimensionale di densità di energia. In questa simulazione, lo spettro è stato discretizzato utilizzando 36 direzioni angolari, corrispondenti ad una risoluzione di 10° , e 32 intervalli di frequenza, che aumentano con progressione logaritmica a partire da 0.05 Hz. Sono stati memorizzati per tutto il periodo della simulazione e su tutta la griglia di calcolo, con la frequenza di tre ore i valori dell'energia e quelli delle più importanti variabili integrate, quali altezza significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione di propagazione. Nel corso della precedente annualità i risultati della simulazione sono stati validati tramite il confronto delle altezze e direzioni di propagazione con i dati delle boe della rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dall'Istituto per la Protezione Ambientale (ISPRA) e, per quanto riguarda le altezze, anche con

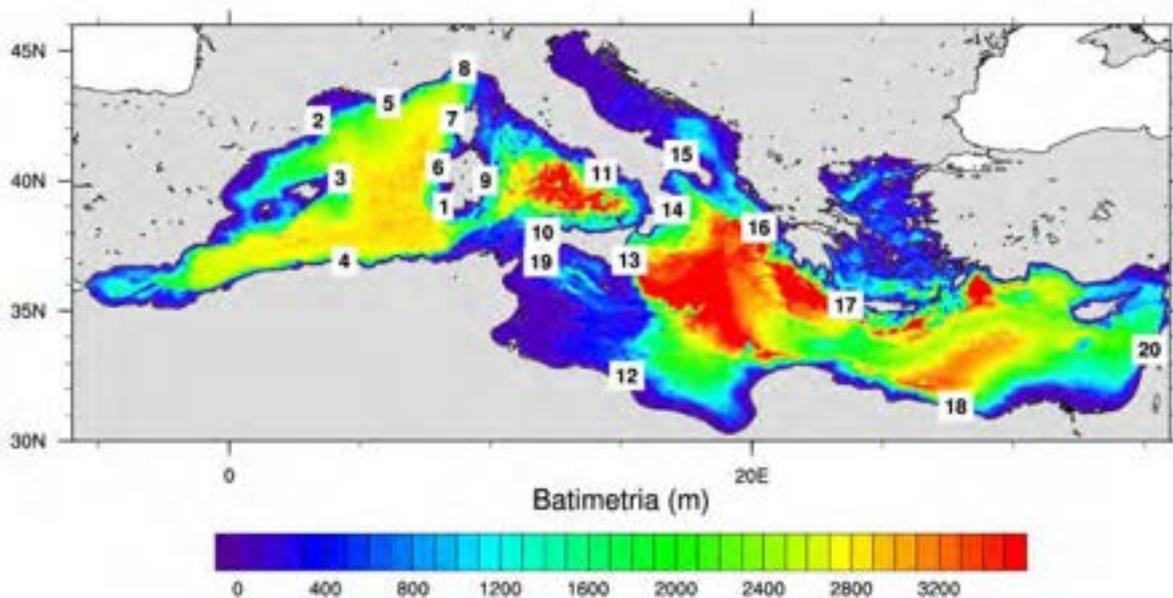


Figura 1. Le posizioni dei siti per i quali è stato memorizzato lo spettro bidimensionale sono mostrate sulla batimetria utilizzata per la simulazione con il modello WAM.

Tabella 1. Coordinate geografiche e profondità dei siti per i quali è stato memorizzato lo spettro bidimensionale.

Numero	longitudine	latitudine	profondità
1	8.187	39.012	115
2	3.406	42.325	350
3	4.250	40.106	135
4	4.406	36.919	181
5	6.094	42.981	148
6	8.000	40.513	119
7	8.531	42.388	185
8	9.000	44.325	123
9	9.812	40.013	305
10	12.000	38.013	229
11	14.219	40.294	416
12	15.219	32.513	190
13	15.312	36.950	102
14	16.969	38.888	87
15	17.312	41.012	306
16	20.281	38.200	480
17	23.594	35.231	99
18	27.812	31.325	337
19	11.938	36.888	495
20	35.219	33.513	197

i dati provenienti da altimetri satellitari [1].

Per effettuare uno studio più dettagliato delle onde, sono stati memorizzati relativamente a 20 punti, i valori degli spettri bidimensionali per tutta la durata della simulazione, con la frequenza di 1 ora. I punti scelti sono distribuiti all'interno dell'area in modo da rappresentare le zone più significative del bacino ed in particolare la costa italiana, le posizioni sono indicate nella mappa in Figura 1, le coordinate dei punti e la profondità corrispondente sono riportati in Tabella 1.

2.2 Descrizione del procedimento per l'identificazione delle partizioni

I campi che vengono generalmente utilizzati per la caratterizzazione dello stato del mare sono costituiti dalle grandezze integrate, che vengono ricavate all'interno del codice di calcolo a partire dagli spettri bidimensionali dell'energia. In particolare l'altezza significativa H_s viene calcolata come integrale della densità di energia sulla direzione angolare θ e sulla frequenza ω

$$H_s = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

Nel caso in cui gli spettri bidimensionali siano determinati dalla somma di onde che si propagano in direzioni diverse, i valori integrati derivati dall'intero spettro possono risultare insufficienti al fine di effettuare valutazioni precise relative all'estrazione di energia dalle onde. In questo caso può rivelarsi utile la scomposizione dell'energia nelle varie componenti, in particolare quelle da attribuirsi a vento locale e quelle derivate dalla propagazione di onde da remoto, che possono essere caratterizzate da frequenze e direzioni diverse.

La tecnica del partizionamento degli spettri bidimensionali viene utilizzata allo scopo di rappresentare lo spettro attraverso un numero ridotto di parametri che mantengano comunque informazioni relativamente alla complessità dello spettro stesso. L'identificazione delle partizioni, originariamente proposta da Gerling [3], può essere effettuata utilizzando schemi diversi [4],[5] per la definizione delle partizioni. Il principio di base su cui si fonda la tecnica del partizionamento degli spettri è analogo a quello utilizzato per il riconoscimento dei bacini idrografici, una volta invertito il segno dello spettro. Un algoritmo identifica tutti i picchi presenti e le pendenze circostanti, una partizione viene quindi definita da tutti i punti dello spettro che conducono allo stesso massimo. Inizialmente viene definita una partizione in corrispondenza di ciascun picco identificato, integrando sulla parte di spettro bidimensionale corrispondente ad ogni partizione viene calcolata l'energia e le grandezze caratteristiche relative: altezza significativa, direzione di propagazione, velocità di fase.

Il criterio per la definizione delle partizioni non è comunque univoco risultando anche fondamentale la fase successiva all'identificazione delle partizioni, in cui esse vengono selezionate e raggruppate, eventualmente eliminando quelle con energia al di sotto di una soglia prefissata.

In questo lavoro si è adottato per la definizione delle partizioni un criterio basato sul lavoro di Aarnes e Krogstad [6]. Nella teoria lineare delle onde il vento produce sulla superficie marina uno spettro di onde che si disperdono, in acque profonde, secondo la relazione di dispersione:

$$\omega^2 = g k$$

che lega la frequenza angolare ω e il numero d'onda k tramite l'accelerazione di gravità g .

La frequenza dell'onda dominante ω_p è legata al periodo dalla relazione:

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}$$

La velocità di fase c_p con cui si propaga un'onda è data da:

$$c_p = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k}$$

Nell'approssimazione di acqua profonda utilizzando la relazione di dispersione si ottiene:

$$c_p = \frac{g}{\omega}$$

Da queste espressioni, si può ricavare, considerando un evento limitato nello spazio e nel tempo, una proporzionalità inversa della frequenza al crescere della distanza dalla sorgente.

Viene definito il parametro adimensionale *inverso dell'età dell'onda* \tilde{U} ottenuto come rapporto delle velocità del vento e dell'onda

$$\tilde{U} = \frac{U}{c_p} = \frac{U}{g/\omega_p}$$

che può essere utilizzato nella selezione dei picchi attribuibili a vento locale.

I passaggi utilizzati per la definizione delle partizioni, basati sulla metodologia descritta in [5], sono costituiti da:

- riconoscimento dei picchi,
- identificazione dei picchi attribuibili a onde di vento e loro combinazione in una unica partizione,
- identificazione dei picchi di swell,
- rimozione delle partizioni con valore di energia inferiore ad una soglia fissata.

L'identificazione dei picchi generati localmente dal vento avviene sulla base del calcolo dell'età dell'onda. Una componente d'onda viene classificata come onda di vento se la sua direzione di propagazione θ è compresa in un angolo di 90° rispetto alla direzione del vento θ_U e la sua velocità di fase c_p è minore della velocità del vento U moltiplicata per un fattore γ :

$$|\theta_U - \theta| < 90^\circ \quad e \quad c < \gamma U \cos(\theta_U - \theta)$$

Nel presente lavoro il fattore γ è stato scelto pari a 1.3. Tutti i picchi che soddisfano le precedenti condizioni vengono considerati picchi di vento e riuniti in una sola partizione. Le restanti partizioni vengono ordinate secondo il loro contenuto di energia. In questo caso è stata fissata la soglia minima per scartare una partizione pari ad un valore di altezza significativa di 0.15 m.

Questa procedura viene eseguita per ciascuno dei tempi per cui sono stati memorizzati gli spettri in uscita dal modello, quindi con una frequenza temporale di un'ora. Vengono prodotte per ciascun sito tabelle che riportano il numero delle partizioni individuate e, per ciascuna partizione, la corrispondente altezza significativa, periodo di picco e direzione di propagazione, insieme alla frazione di energia contenuta nella componente di vento rispetto all'energia totale. Le partizioni relative a onde di swell vengono mantenute separate.

Si possono ottenere i seguenti valori di numero di partizione:

- Il valore -1 indica che l'energia totale è inferiore al valore minimo assunto e quindi non vi sono onde

- Il valore 0 indica che non vi sono onde di vento ma solo onde di swell
- Valori maggiori o uguali a 1 indicano la presenza simultanea di una combinazione di più onde, tra onde di vento e onde di swell.

2.3 Analisi dei risultati

Le analisi degli spettri bidimensionali sono state effettuate per tutti i 20 siti selezionati, utilizzando i dati memorizzati con frequenza oraria, nel corso del periodo di 15 anni compreso tra il 1990 e il 2004.

La prima informazione che può essere ricavata dall'analisi delle partizioni riguarda la percentuale dei diversi casi che si presentano in ciascuno dei 20 siti. Nella Tabella 2 sono riportate i valori calcolati considerando l'intervallo di 15 anni della simulazione. Nella prima colonna è indicato il numero del sito corrispondente (Figura 1 e Tabella 1), nella seconda colonna sono riportati tutti i casi in cui è stata individuata almeno una partizione attribuibile a onde di vento, nella terza e quarta i casi in cui è stata individuata una sola partizione, rispettivamente di onde di vento e di onde di swell, l'ultima colonna corrisponde ai casi misti in cui è presente una combinazione di più onde siano esse di vento, di swell o una combinazione dei due tipi di onde. I casi di calma sono stati definiti in base all'altezza significativa, considerando come calme i tempi in cui l'altezza dell'onda è risultata inferiore al valore di soglia fissato in 0.15 m. Le calme si verificano in percentuali minime in tutti i siti, valori superiori al 5 % dei tempi sono stati ottenuti solo in corrispondenza dei siti 14 e 15, entrambi collocati sul versante est della costa italiana (rispettivamente nel basso Adriatico e sulla costa ionica della Calabria).

Si può osservare una estrema variabilità di risultati tra i vari siti esaminati. Dal confronto della seconda e terza colonna si nota che in generale solo circa la metà dei casi in cui sono presenti onde di vento sono costituiti da onde singole.

Nei siti 4 e 20, entrambi sulla costa settentrionale dell'Africa, è stata riscontrata la percentuale più bassa di casi con presenza di onde di vento, sia sole che in concomitanza con onde di swell. Nel Mediterraneo occidentale, confrontando a partire da nord i tre siti 7,6,1 (costa della Corsica e della Sardegna), interessati dagli intensi venti provenienti dalla zona del Leone, si nota un aumento a partire da nord verso sud dei casi di onde di vento e un aumento dei casi di sovrapposizione di onde diverse. La percentuale maggiore di onde miste si verifica nel sito 10, all'estremità nord-occidentale della Sicilia.

L'attività svolta nell'ambito di questo progetto rappresenta una base per il dimensionamento di convertitori di energia dalle onde da installare nell'area Mediterranea. A questo scopo è di fondamentale importanza conoscere le frequenze e le direzioni delle onde più energetiche.

Le successive figure 2-13 riportano il numero di eventi corrispondenti a coppie di valori di altezza significativa e periodo medio e rispettivamente a coppie di altezza significativa e direzione di propagazione, per i siti circostanti la penisola italiana. Nelle figure sono mostrate separatamente le partizioni di vento e quelle di swell. Le altezze delle onde sono state discretizzate in intervalli di 0.25 m, i periodi in intervalli di 0.5 s e le direzioni di 10°. Per facilitare il confronto tra i siti sono stati utilizzati in tutte le figure gli stessi intervalli di valori.

Si può notare che le distribuzioni relative a onde di vento e onde di swell differiscono significativamente sia per quanto riguarda la dipendenza sia dal periodo che dalla direzione. I periodi massimi relativi alle onde di vento sono in generale intorno a 4 s mentre nel caso delle onde di swell i valori massimi, anche in corrispondenza di analoghi valori di altezza d'onda, si differenziano maggiormente, con un numero significativo di casi caratterizzati da periodi intorno agli 8 s. La propagazione delle onde si concentra, in tutti i siti, solo secondo alcune direzioni preferenziali, in genere diverse per i due tipi di onde.

Tabella 2. Statistiche relative alla percentuale di occorrenza dei possibili casi di separazione dello spettro in onde di vento e onde di swell per ciascuno dei siti.

Numero sito	Casi con presenza di onde di vento	Solo Onde di vento	Solo onde di swell	Calma	Casi con più onde simultanee
1	46.14	24.41	29.07	0.09	46.43
2	59.74	39.73	26.66	0.18	33.43
3	44.83	21.62	31.96	0.16	46.26
4	25.89	9.88	42.47	0.08	47.57
5	50.89	35.23	36.11	0.89	27.77
6	36.00	18.08	39.40	0.49	42.02
7	20.97	12.13	54.78	1.55	31.54
8	28.26	14.82	51.72	2.55	30.91
9	39.75	22.61	43.70	1.79	31.90
10	56.82	24.13	15.39	0.15	60.33
11	49.39	26.15	27.60	1.63	44.61
12	45.87	20.34	25.27	0.03	54.36
13	34.10	18.50	48.22	1.33	31.96
14	49.20	30.56	37.90	6.06	25.48
15	58.50	45.54	30.87	5.72	17.87
16	38.72	22.37	41.50	0.40	35.72
17	50.86	28.48	38.87	0.47	32.17
18	47.84	18.60	24.41	0.00	56.99
19	64.84	31.66	15.80	0.19	52.36
20	18.01	7.16	63.73	0.01	29.09

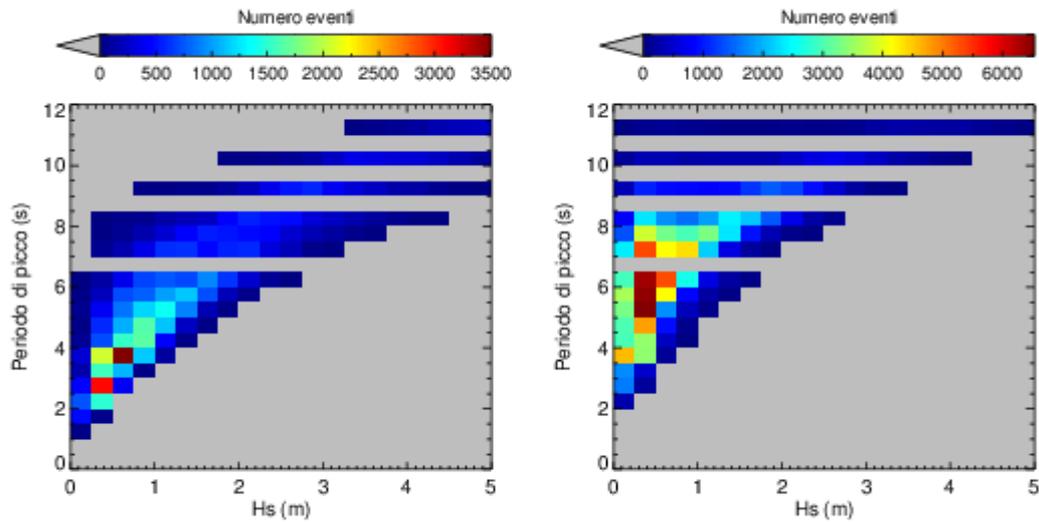


Figura 2. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di *swell*. Figura relativa al sito 1.

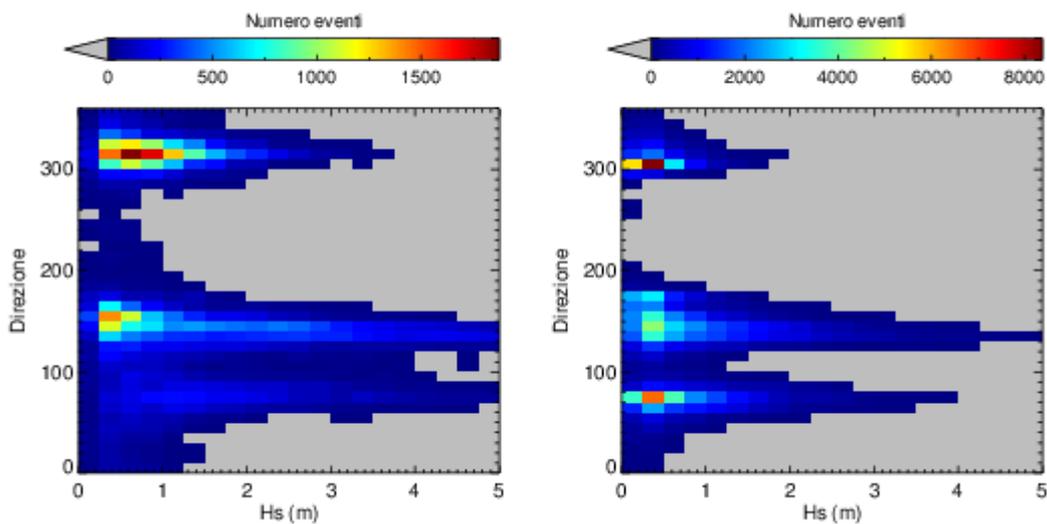


Figura 3. Numero di eventi per intervallo di altezza e di direzione di propagazione. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di direzione a 10°, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di *swell*. Figura relativa al sito 1.

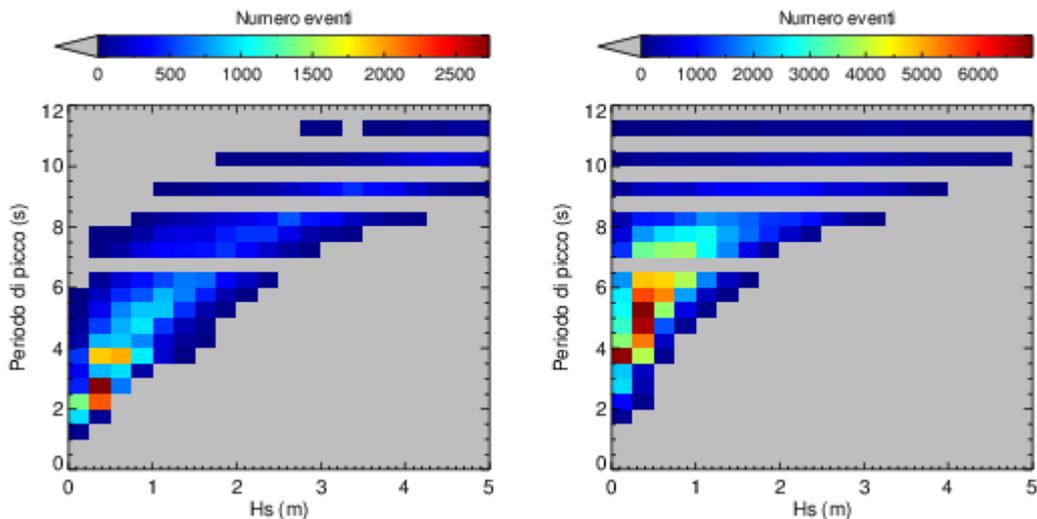


Figura 4. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di swell. Figura relativa al sito 6.

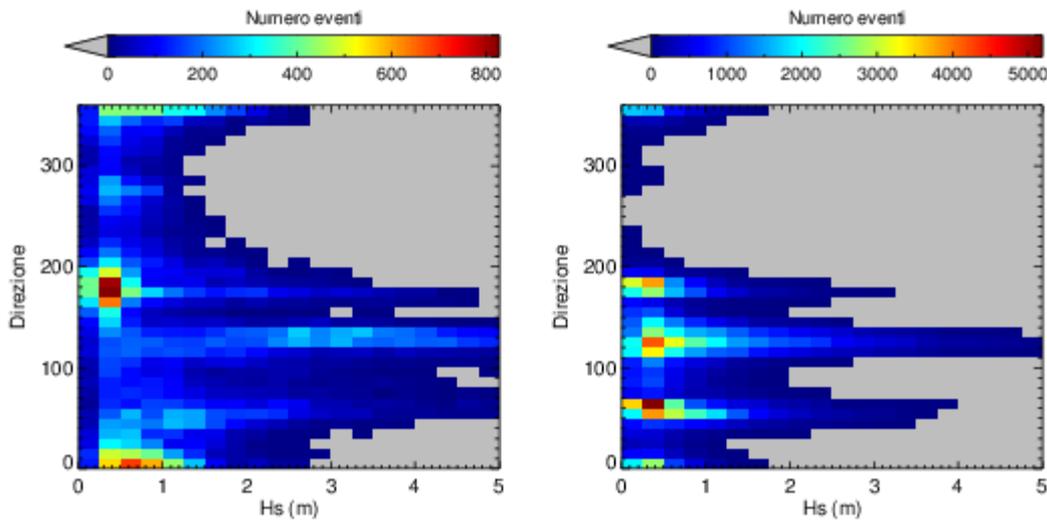


Figura 5. Numero di eventi per intervallo di altezza e di direzione di propagazione. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di direzione a 10°, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di swell. Figura relativa al sito 6.

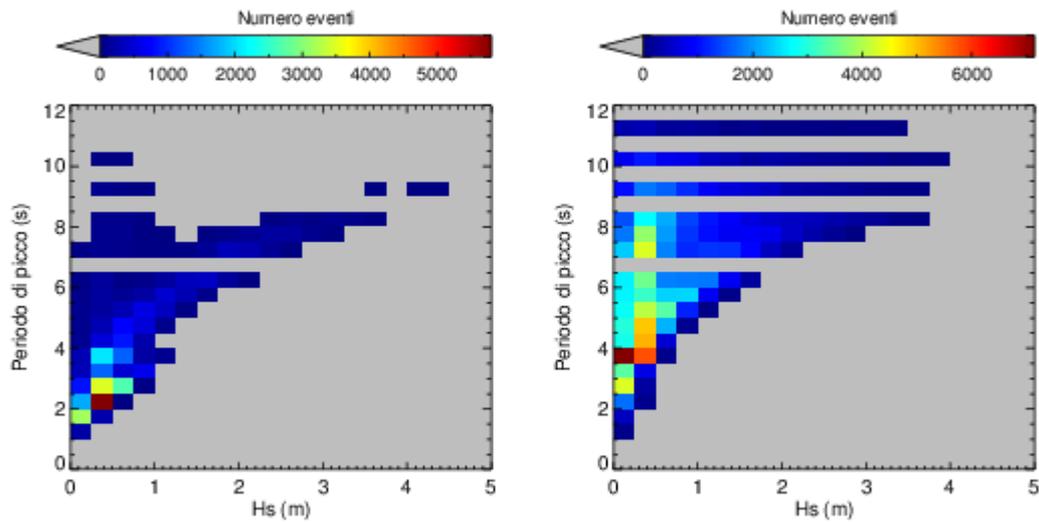


Figura 6. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di *swell*. Figura relativa al sito 8.

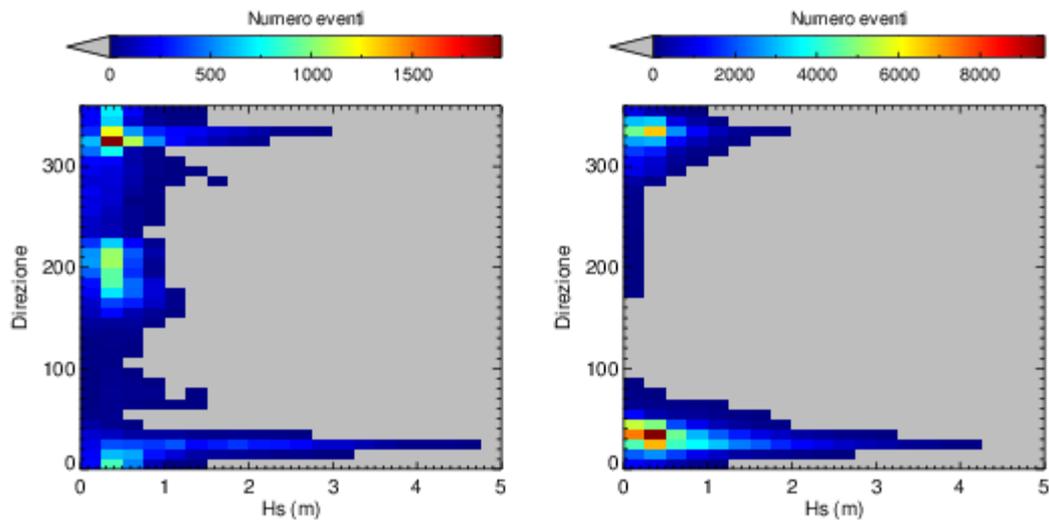


Figura 7. Numero di eventi per intervallo di altezza e di direzione di propagazione. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di direzione a 10°, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di *swell*. Figura relativa al sito 8.

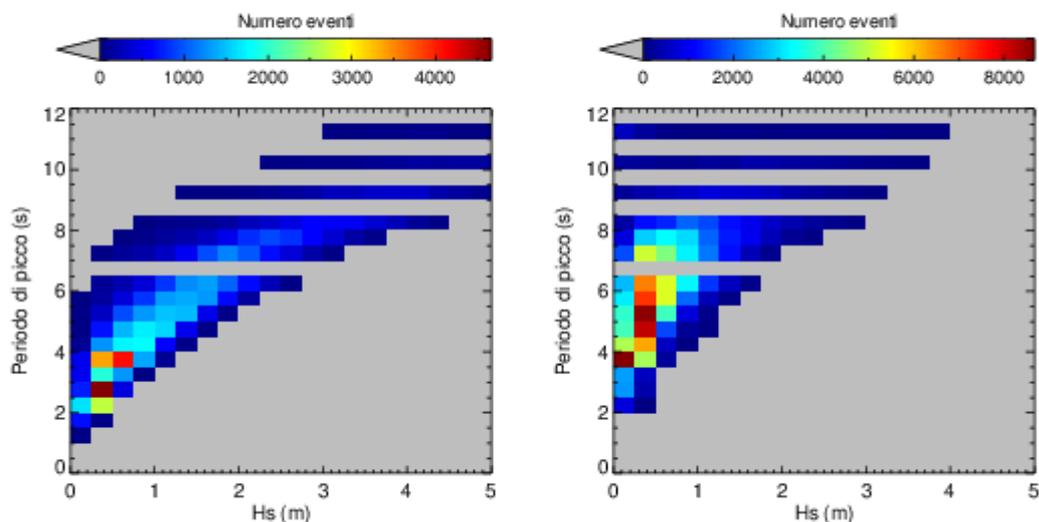


Figura 8. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di swell. Figura relativa al sito 10.

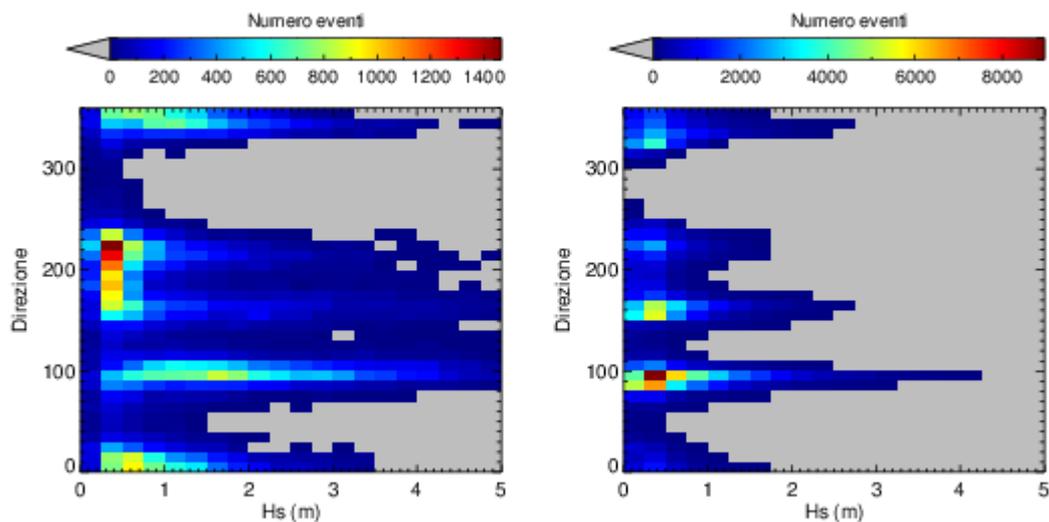


Figura 9. Numero di eventi per intervallo di altezza e di direzione di propagazione. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di direzione a 10°, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di swell. Figura relativa al sito 10.

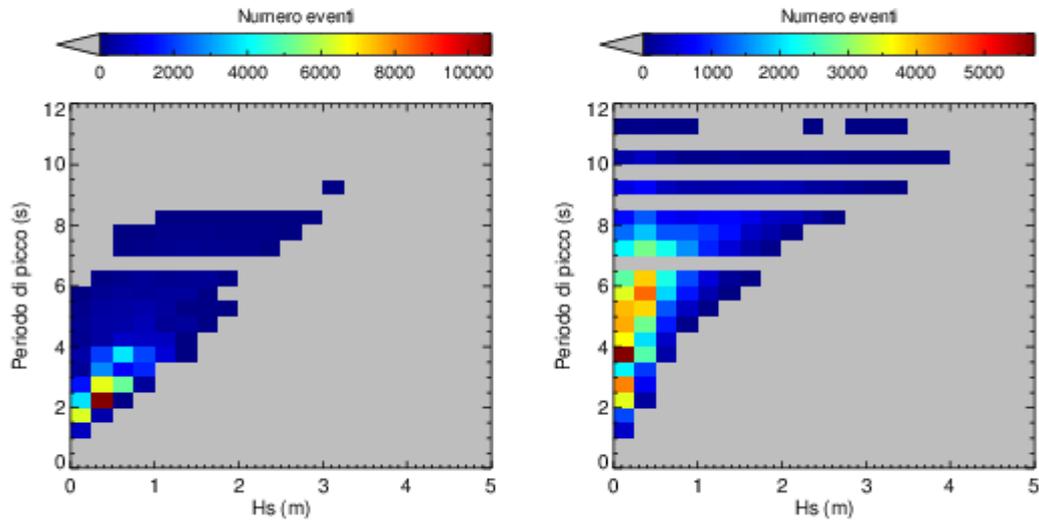


Figura 10. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di *swell*. Figura relativa al sito 14.

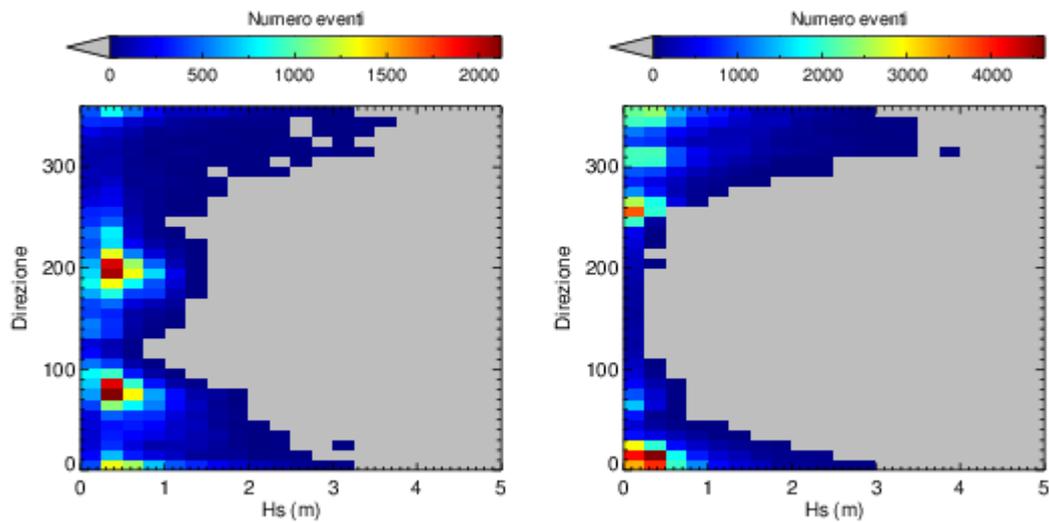


Figura 11. Numero di eventi per intervallo di altezza e di direzione di propagazione. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di direzione a 10°, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di *swell*. Figura relativa al sito 14.

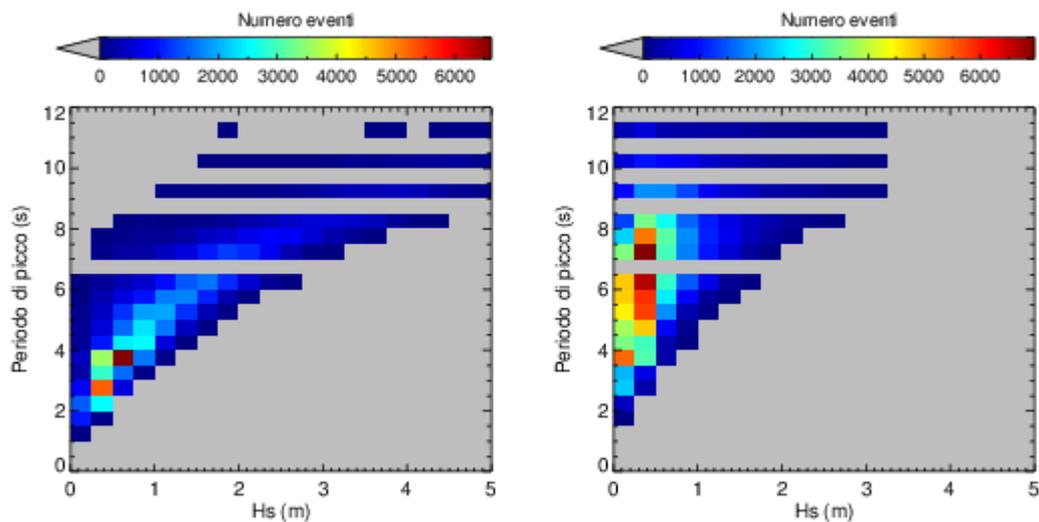


Figura 12. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di swell. Figura relativa al sito 19.

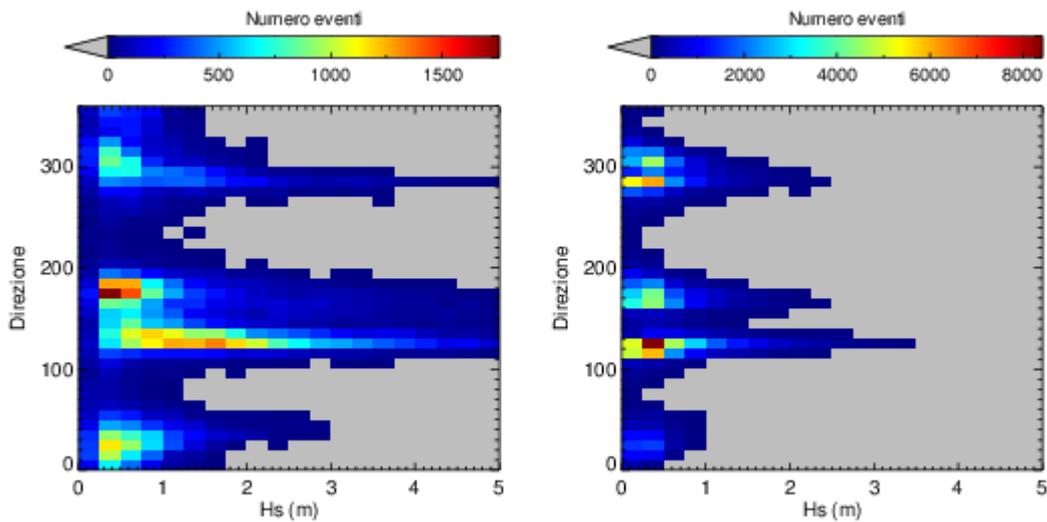


Figura 13. Numero di eventi per intervallo di altezza e di direzione di propagazione. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di direzione a 10°, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di swell. Figura relativa al sito 19.

Nelle successive Tabelle 3-6 sono riportati, separatamente per le due componenti delle onde, i valori mediati per stagione relativi ad altezza significativa, periodo di picco e direzione di propagazione.

L'intensificarsi dei fenomeni atmosferici nel periodo invernale è accompagnato ovunque dai più alti valori medi di altezza significativa e dai valori più alti dei periodi delle onde. Le onde di vento nella stagione estiva si mantengono in tutti i siti sotto la soglia del metro e largamente al di sotto di un valore medio del periodo di 5 s. Primavera ed autunno hanno caratteristiche intermedie. I valori massimi vengono raggiunti nei due siti lungo la costa della Sardegna nel periodo invernale. Solo in un sito lungo la costa nord-africana (18) il valore di altezza medio sulle onde di vento si mantiene superiore ad 1 metro in tutte le stagioni.

Le altezze significative medie delle onde di *swell*, sono generalmente inferiori a quelle delle onde di vento, i periodi associati risultano più alti e più uniformi sul bacino, la variabilità tra le stagioni risulta più limitata. Valori comparabili o leggermente superiori delle altezze delle onde di *swell* rispetto a quelli delle onde di vento, si presentano esclusivamente nel corso del periodo estivo. Solo in un sito (15), nel periodo estivo il periodo delle onde di *swell* scende al di sotto dei 4 s.

Come si era già notato dall'osservazione delle figure precedenti, la propagazione delle onde di vento e di *swell* avviene in generale in direzioni diverse.

Considerando la maggiore energia corrispondente alle onde di vento, nelle figure 14-19 è stata riportata, solo per questi casi, la distribuzione del numero di eventi in funzione di altezza significativa e periodo di picco, separatamente per le diverse stagioni. Le figure mostrate si riferiscono agli stessi siti, lungo la costa italiana, delle figure precedenti. Nella maggior parte delle distribuzioni si può notare chiaramente l'aumento del periodo delle onde al crescere dell'altezza significativa, nelle stagioni caratterizzate da fenomeni più intensi. Fanno eccezione le distribuzioni relative al sito 8 (costa ligure) e al 14 (costa orientale della Calabria) per i quali si hanno alte concentrazioni di casi in corrispondenza di valori inferiori al metro di altezza e a periodi molto bassi, sotto i 4 s. Questi due siti sono caratterizzati da valori medi delle ampiezze tra i più bassi ottenuti sul bacino e per entrambi le ampiezze calcolate sui due tipi di onde presentano valori medi simili.

E' interessante osservare che la variazione stagionale non è uniforme tra i siti, ad esempio si nota che nel sito 6 (nord-ovest della Sardegna) i valori più alti vengono raggiunti nel corso dell'inverno, con numerosi casi di onde di ampiezza superiore a 2. e periodo intorno a 8 s, mentre più a sud lungo la costa sarda (sito 1) non si evidenzia una particolare differenza tra la stagione invernale e quella primaverile.

Tabella 3. Valori medi calcolati per ciascun sito separatamente per la partizione di vento e per la partizione di swell. Dati relativi al trimestre invernale.

INVERNO						
Numero sito	Onde di vento			Onde di swell		
	Hs	Tp	Direzione	Hs	Tp	Direzione
1	1.89	6.58	179.70	0.92	7.33	152.40
2	1.72	5.50	186.40	0.69	6.35	211.90
3	1.77	6.17	169.10	0.87	6.68	208.60
4	1.21	5.36	112.30	0.95	7.51	187.30
5	1.25	5.87	159.40	0.69	6.72	136.70
6	1.81	6.34	146.10	0.97	7.01	121.60
7	1.47	6.09	112.70	0.99	6.88	95.90
8	0.66	3.70	190.50	0.74	6.82	136.20
9	1.00	4.60	174.60	0.59	6.02	253.20
10	1.81	6.32	154.00	0.74	6.88	166.60
11	1.27	4.93	179.90	0.68	6.70	108.80
12	1.77	6.34	183.80	0.86	7.31	201.40
13	0.84	4.36	122.50	0.69	6.89	225.90
14	0.73	3.80	149.00	0.60	6.65	203.50
15	0.96	4.50	176.60	0.47	4.94	204.00
16	1.48	5.76	149.90	0.79	6.51	114.50
17	1.14	5.09	159.20	0.92	7.24	135.80
18	1.63	6.36	150.10	0.88	7.43	165.60
19	1.76	6.29	146.60	0.64	7.28	184.00
20	1.17	4.87	168.80	0.97	7.23	112.10

Tabella 4. Valori medi calcolati per ciascun sito separatamente per la partizione di vento e per la partizione di swell. Dati relativi al trimestre primaverile.

PRIMAVERA						
Numero sito	Onde di vento			Onde di swell		
	Hs	Tp	Direzione	Hs	Tp	Direzione
1	1.50	6.08	204.80	0.79	6.96	159.60
3	1.32	5.41	187.20	0.71	6.31	216.80
4	1.03	5.20	138.70	0.74	6.90	185.90
5	1.04	5.17	148.10	0.58	6.30	134.50
6	1.40	5.62	149.10	0.83	6.56	114.80
7	1.02	5.16	105.60	0.82	6.44	86.60
8	0.60	3.80	208.40	0.61	6.49	125.90
9	0.69	3.89	176.80	0.54	5.79	272.40
10	1.44	5.71	176.40	0.64	6.49	173.60
11	0.95	4.42	180.80	0.57	5.95	104.70
12	1.22	5.28	229.00	0.67	6.67	209.80
13	0.65	3.83	119.50	0.62	6.23	248.70
14	0.54	3.36	142.10	0.54	6.03	206.20
15	0.78	4.06	180.40	0.37	4.42	208.50
16	1.13	5.09	155.10	0.60	5.75	116.50
17	0.81	4.47	179.60	0.66	6.23	137.20
18	1.10	5.32	171.40	0.66	6.60	165.80
19	1.35	5.57	172.90	0.54	6.79	190.50
20	0.73	3.99	169.50	0.70	6.21	110.10

Tabella 5. Valori medi calcolati per ciascun sito separatamente per la partizione di vento e per la partizione di swell. Dati relativi al trimestre estivo.

ESTATE						
Numero sito	Onde di vento			Onde di swell		
	Hs	Tp	Direzione	Hs	Tp	Direzione
1	0.85	4.78	206.50	0.55	5.80	161.70
2	0.89	4.08	198.30	0.37	4.65	238.10
3	0.77	4.26	214.30	0.55	5.26	221.10
4	0.58	4.19	202.40	0.51	5.73	194.60
5	0.80	4.39	114.00	0.44	5.11	126.60
6	0.73	4.18	143.50	0.65	5.67	116.80
7	0.63	4.25	86.50	0.68	5.50	88.90
8	0.44	3.45	222.00	0.49	5.45	97.40
9	0.39	3.20	230.70	0.32	4.35	276.40
10	0.64	3.96	163.50	0.43	5.30	155.40
11	0.49	3.44	146.60	0.40	4.86	101.10
12	0.66	4.27	222.50	0.46	5.79	207.60
13	0.34	2.96	105.20	0.33	4.74	218.90
14	0.33	2.59	154.40	0.27	4.11	162.70
15	0.52	3.52	165.90	0.29	3.63	193.60
16	0.67	4.03	154.90	0.42	4.61	114.50
17	0.47	3.34	161.70	0.44	5.30	114.50
18	1.01	5.94	137.20	0.65	6.40	162.00
19	0.75	4.25	155.50	0.34	5.38	171.20
20	0.58	4.36	113.50	0.63	6.15	100.90

Tabella 6. Valori medi calcolati per ciascun sito separatamente per la partizione di vento e per la partizione di swell. Dati relativi al trimestre autunnale.

AUTUNNO						
Numero sito	Onde di vento			Onde di swell		
	Hs	Tp	Direzione	Hs	Tp	Direzione
1	1.48	6.00	201.50	0.80	6.83	161.80
2	1.33	4.95	190.50	0.54	5.88	219.90
3	1.36	5.52	175.40	0.69	6.18	217.70
4	0.91	4.87	140.20	0.75	6.83	184.60
5	1.06	5.22	154.00	0.64	6.31	130.10
6	1.45	5.74	141.40	0.88	6.55	115.80
7	1.27	5.60	99.00	0.90	6.44	89.40
8	0.75	4.14	198.30	0.67	6.44	134.20
9	0.70	4.05	188.50	0.52	5.60	272.50
10	1.31	5.42	167.70	0.62	6.37	168.00
11	1.03	4.62	173.30	0.58	5.96	105.10
12	1.03	4.93	235.80	0.63	6.43	210.60
13	0.61	3.76	123.90	0.58	5.98	245.70
14	0.60	3.55	151.50	0.53	5.73	195.20
15	0.69	3.86	190.60	0.38	4.45	206.90
16	1.06	4.91	149.80	0.59	5.65	107.90
17	0.67	3.92	167.80	0.58	6.18	131.10
18	1.03	5.55	162.40	0.65	6.68	165.30
19	1.17	5.31	159.80	0.52	6.68	187.50
20	0.67	3.87	173.00	0.62	6.11	116.50

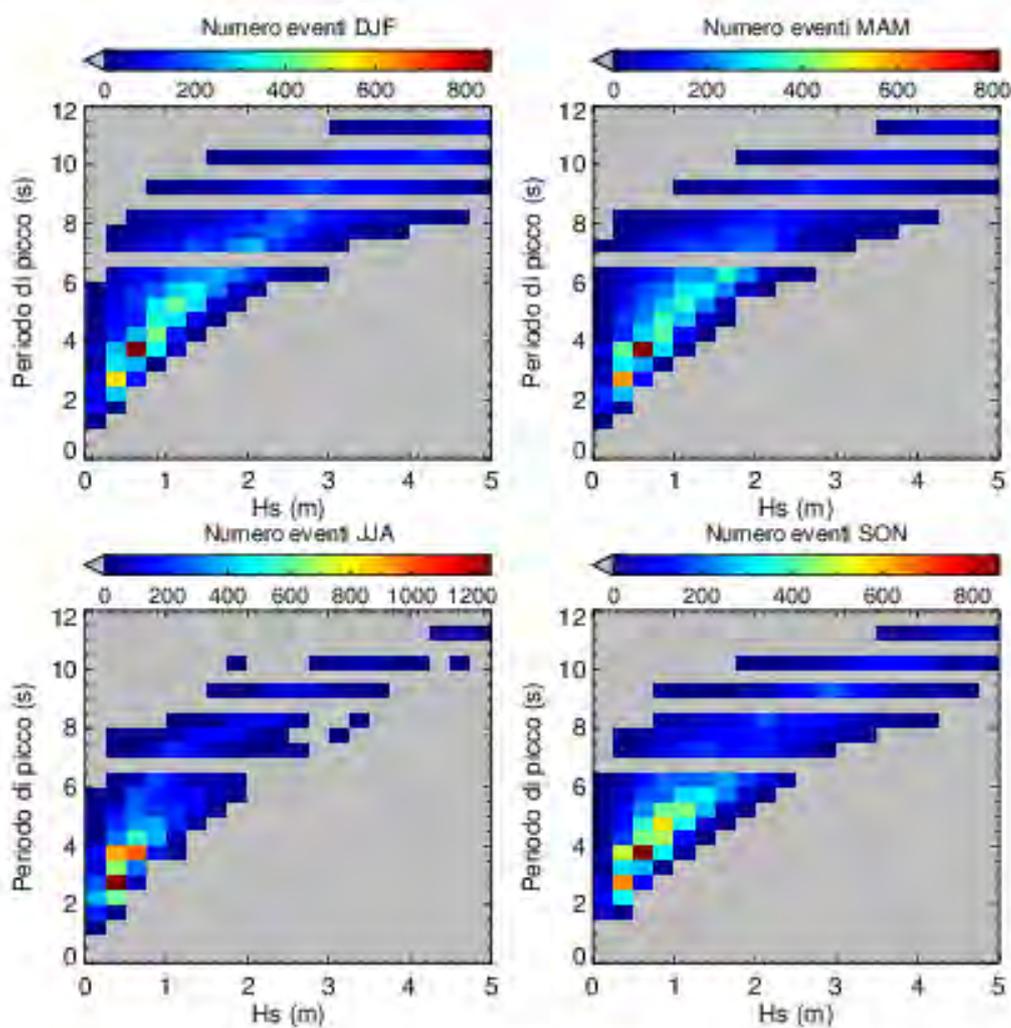


Figura 14. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s. Sono stati utilizzati i dati delle partizioni di vento separati per stagione. Figura relativa al sito 1.

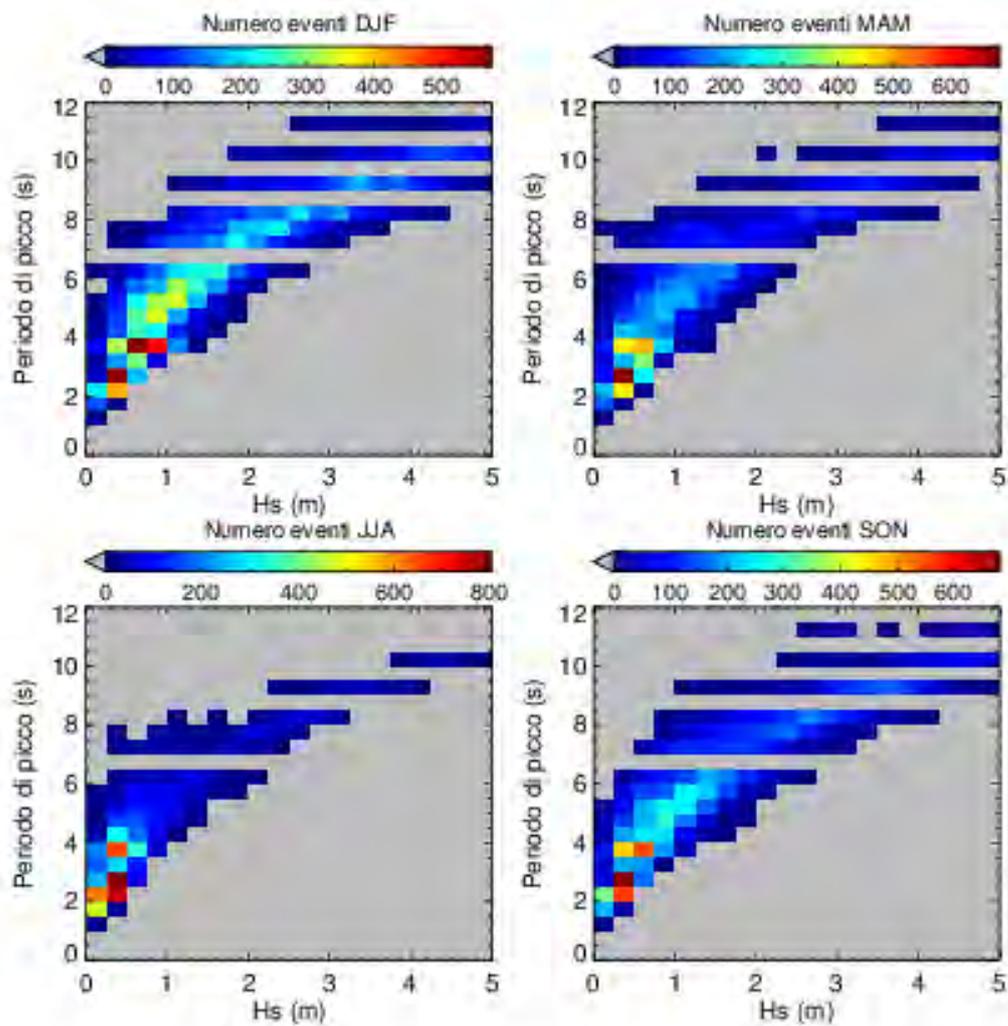


Figura 15. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s. Sono stati utilizzati i dati delle partizioni di vento separate per stagione. Figura relativa al sito 6.

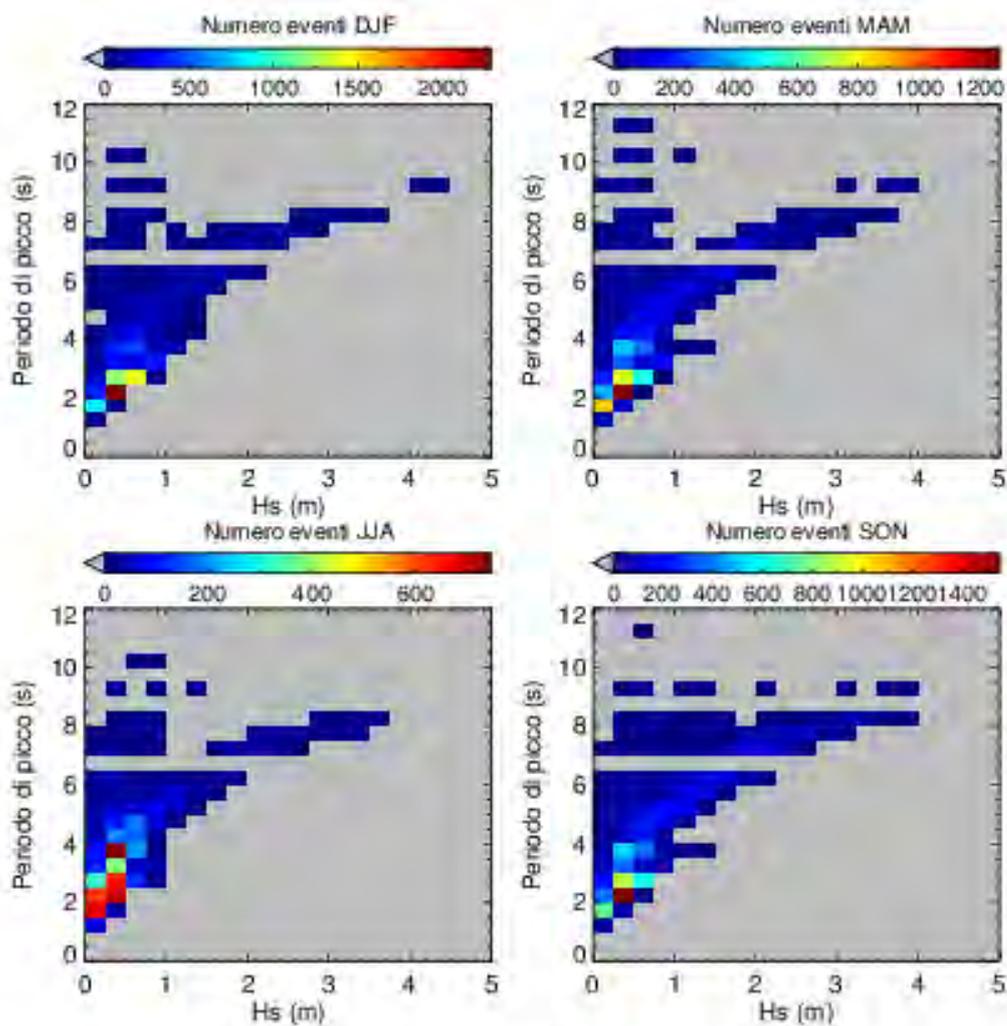


Figura 16. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s. Sono stati utilizzati i dati delle partizioni di vento separati per stagione. Figura relativa al sito 8.

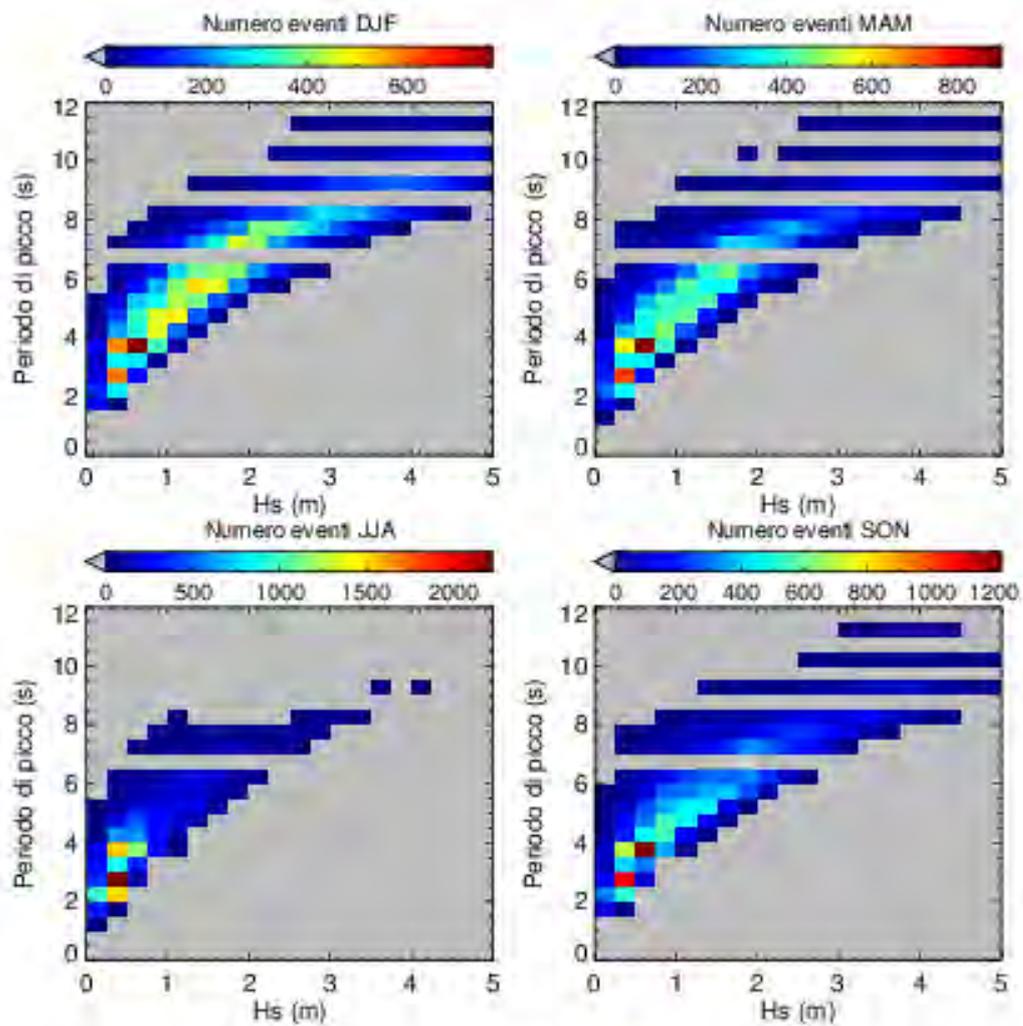


Figura 17. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s. Sono stati utilizzati i dati delle partizioni di vento separate per stagione. Figura relativa al sito 10.

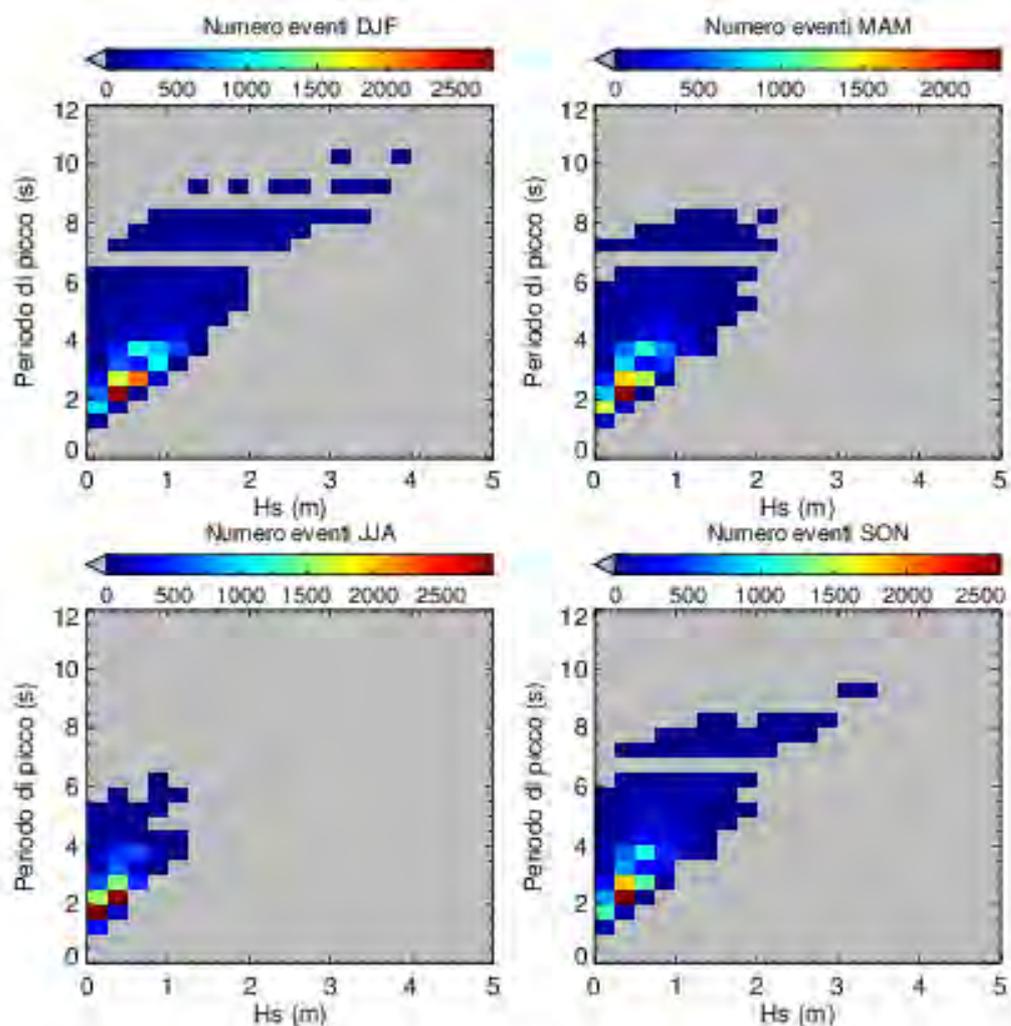


Figura 18. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s. Sono stati utilizzati i dati delle partizioni di vento separati per stagione. Figura relativa al sito 14.

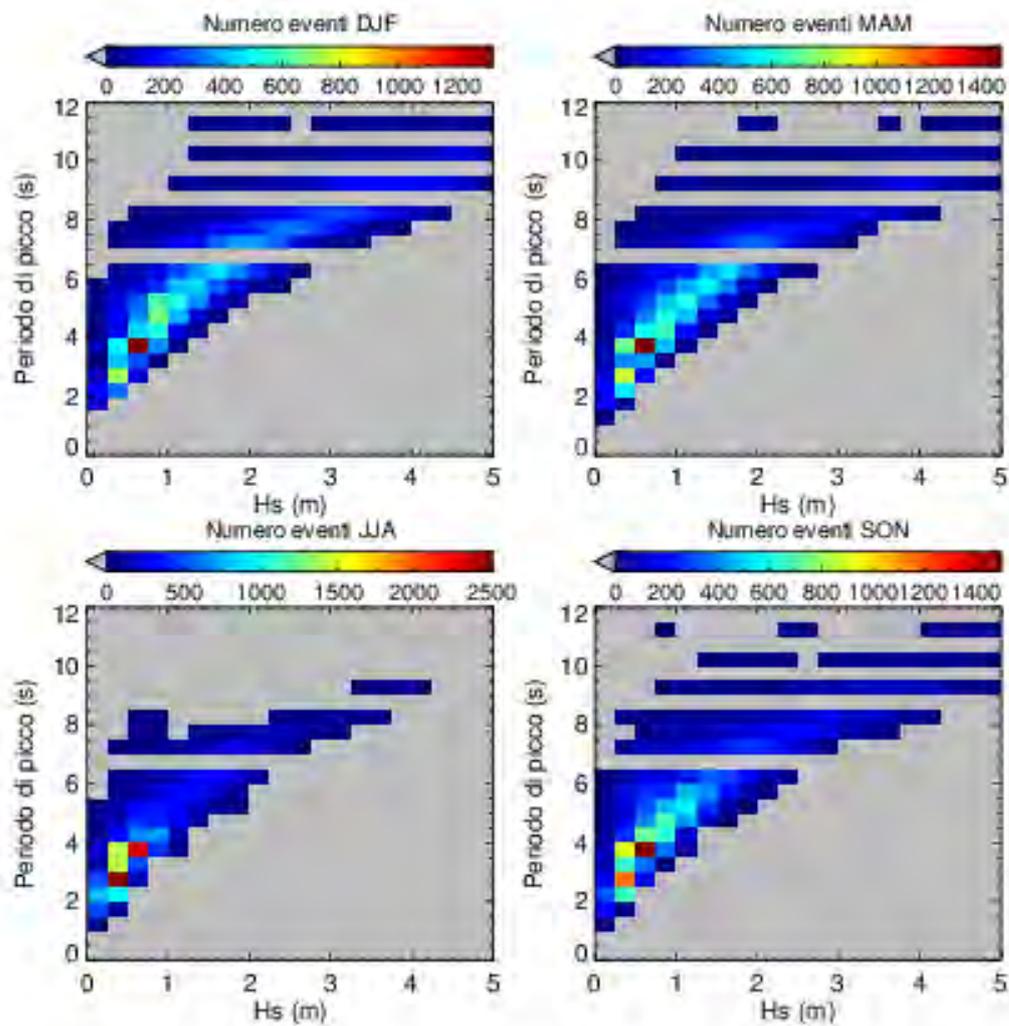


Figura 19. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0.25 m, quelli di periodo a 0.5 s. Sono stati utilizzati i dati delle partizioni di vento separate per stagione. Figura relativa al sito 19.

2.4 Analisi della variabilità interannuale

Al fine di verificare la variabilità dei risultati nell'arco dei 15 anni presi in esame, vengono mostrati per tutti i 20 siti gli andamenti stagionali, separati per le due componenti di onde di vento e di *swell*. In particolare nelle figure 20-27 viene mostrato anno per anno il valore medio dell'ampiezza, calcolato per ogni trimestre. Da notare che, per un confronto più immediato sono state utilizzate le stesse scale dei colori per le diverse stagioni.

Per rappresentare al meglio i valori relativi alle onde di *swell*, sono però state utilizzate scale di colore diverse da quelle usate per le onde di vento, adottando un valore massimo quasi dimezzato.

Si è preferito mostrare nella stessa figura tutti i siti per evidenziare la presenza di variabilità sull'intero bacino; le figure mostrano in maniera immediata le differenze esistenti tra le varie stagioni e le caratteristiche proprie dei vari siti.

Appare evidente la maggiore ampiezza delle onde di vento nel settore occidentale del bacino (siti 1,2,3,6) in tutte le stagioni; un'altra area interessante per le onde di vento risulta essere quella del canale di Scilia (siti 10,12,19). Il sito 6, risulta tra i più significativi anche per quanto riguarda le onde di *swell* essendo caratterizzato dai valori di altezza d'onda più elevati, all'interno del bacino, in tutti i periodi dell'anno.

Non sembra presente una forte variabilità interannuale, nel periodo invernale si può solo osservare che i valori più elevati sono stati riscontrati nel 1999 e nel 2003, sia nel bacino occidentale che nella zona del canale di Sicilia. Queste due annate sono caratterizzate da massimi anche nei valori medi di altezza delle onde di *swell*, ancora una volta nel bacino occidentale, anche nella costa nord africana, e nella zona orientale del bacino, in prossimità dell'isola di Creta e sulla sponda orientale del Mediterraneo (siti 17 e 20).

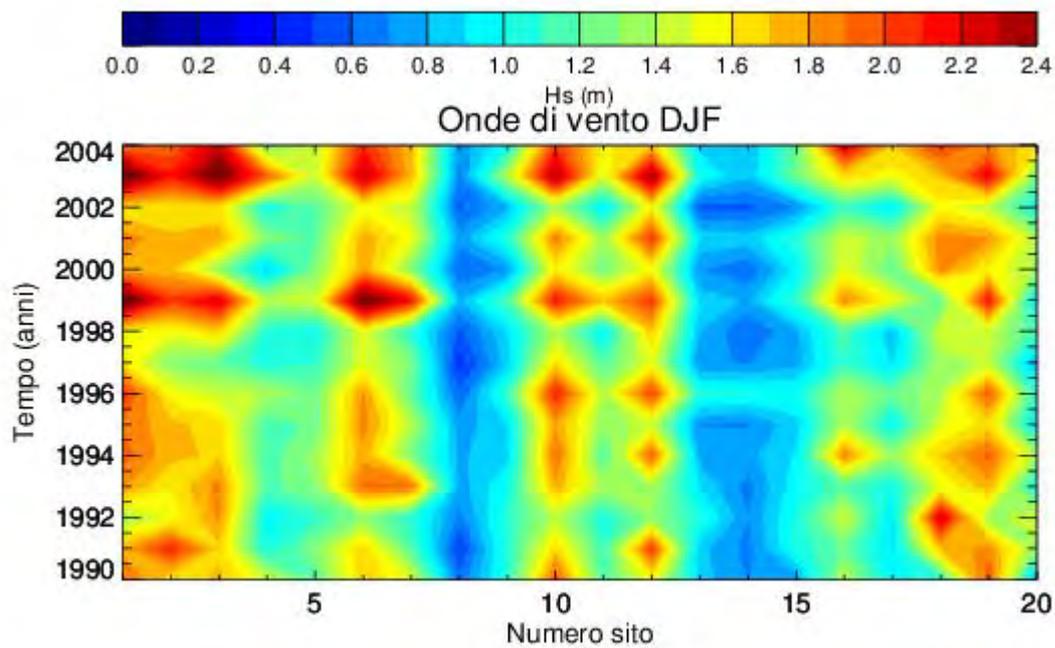


Figura 20. Valori medi dell'altezza significativa calcolata per ogni anno sul trimestre invernale per le onde di vento.

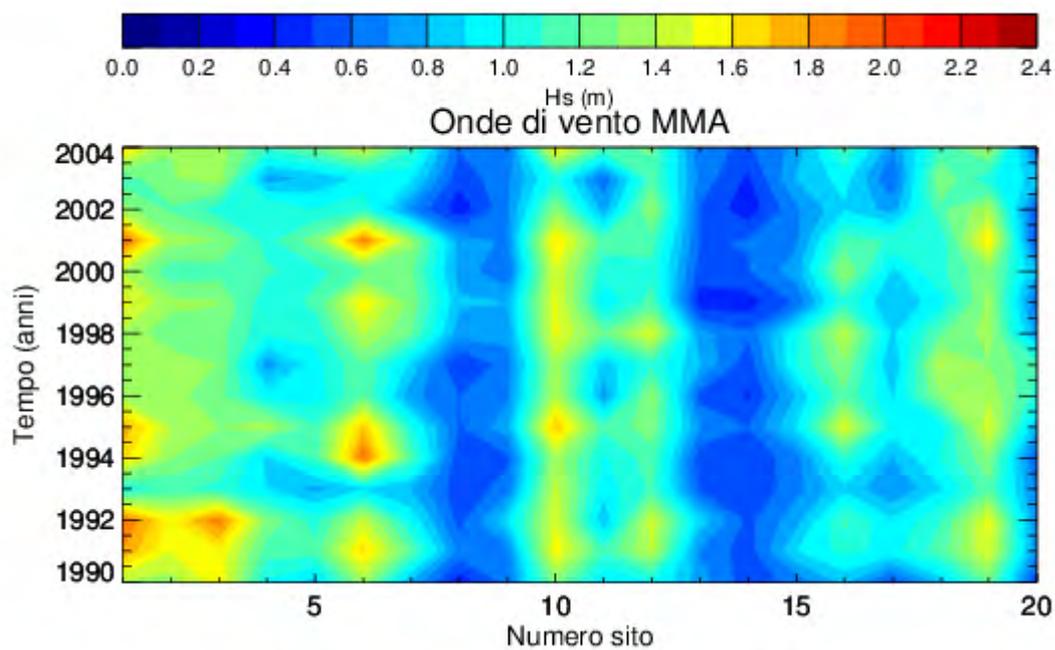


Figura 21. Valori medi dell'altezza significativa calcolata per ogni anno sul trimestre primaverile per le onde di vento.

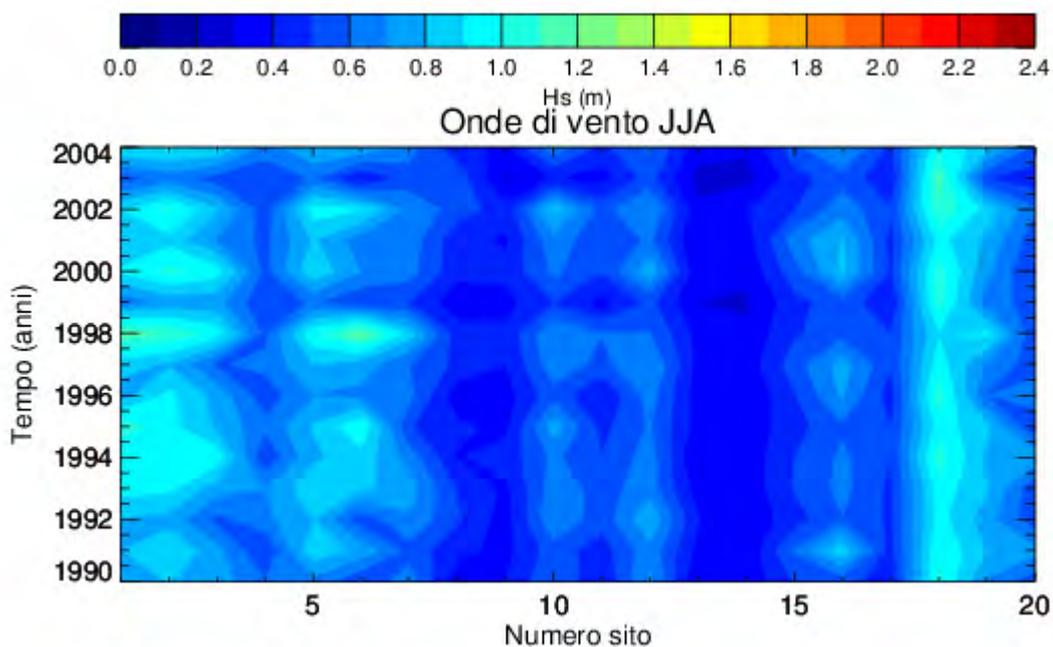


Figura 22. Valori medi dell'altezza significativa calcolata per ogni anno sul trimestre estivo per le onde di vento.

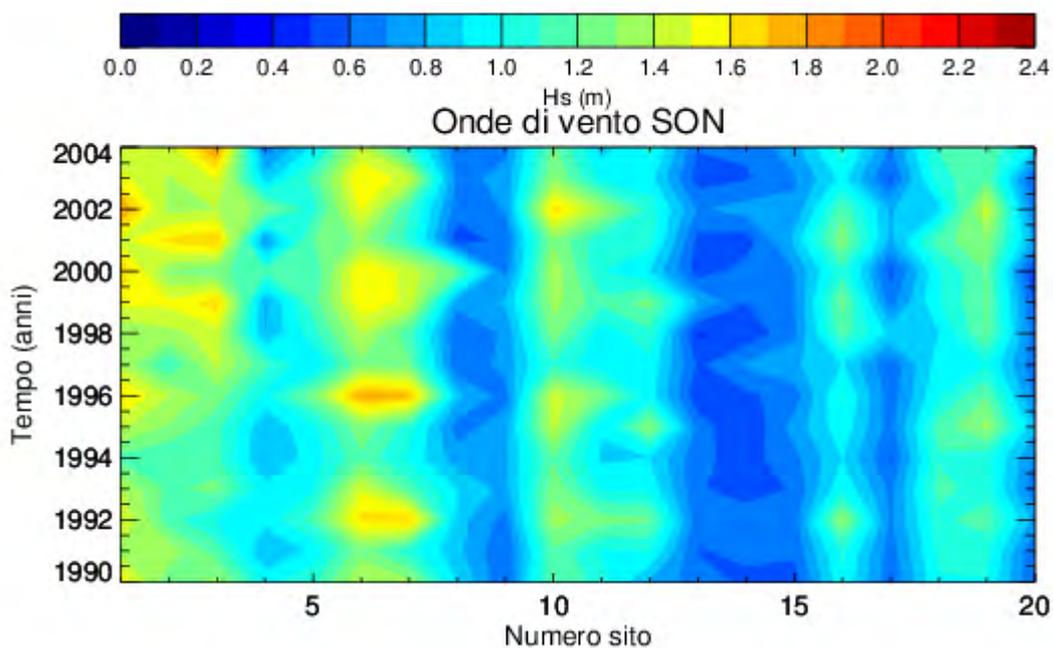


Figura 23. Valori medi dell'altezza significativa calcolata per ogni anno sul trimestre autunnale per le onde di vento.

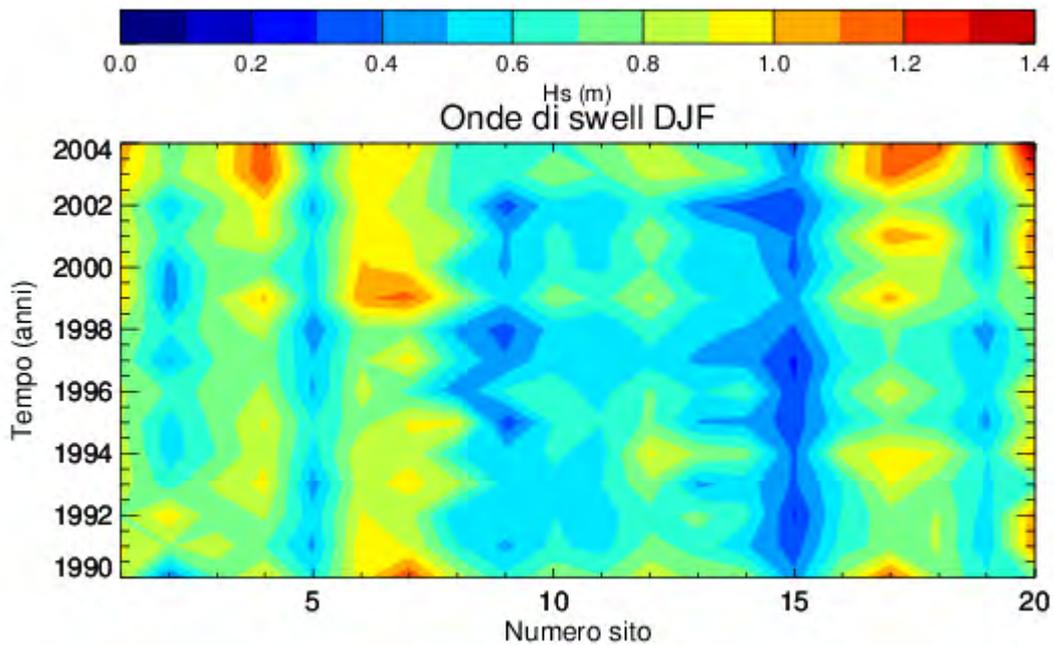


Figura 24. Valori medi dell'altezza significativa calcolata per ogni anno sul trimestre invernale per le onde di swell.

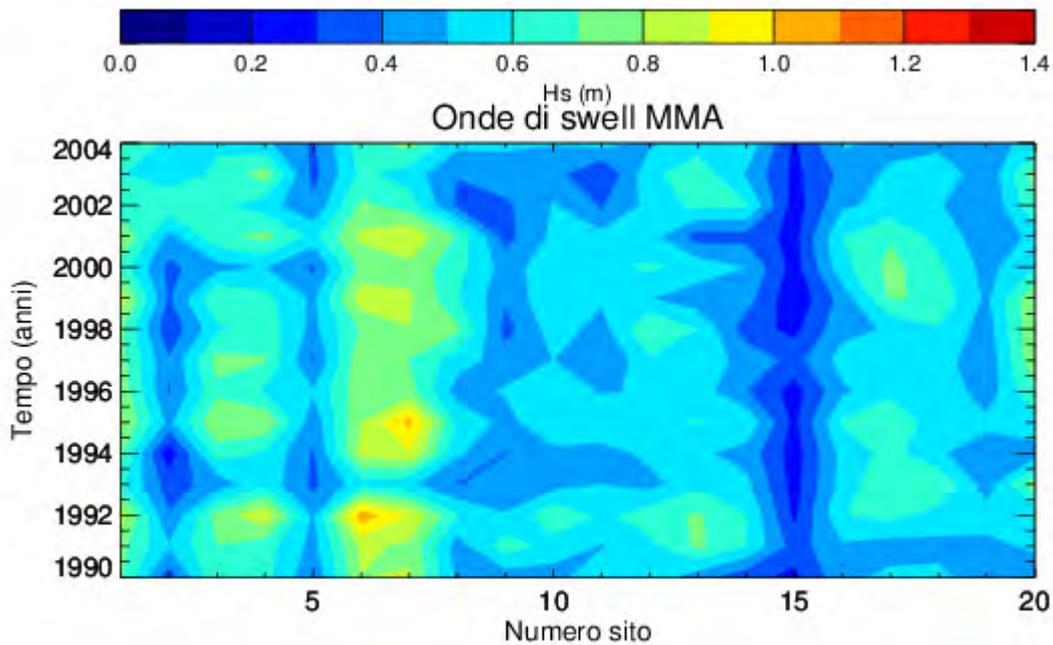


Figura 25. Valori medi dell'altezza significativa calcolata per ogni anno sul trimestre primaverile per le onde di swell.

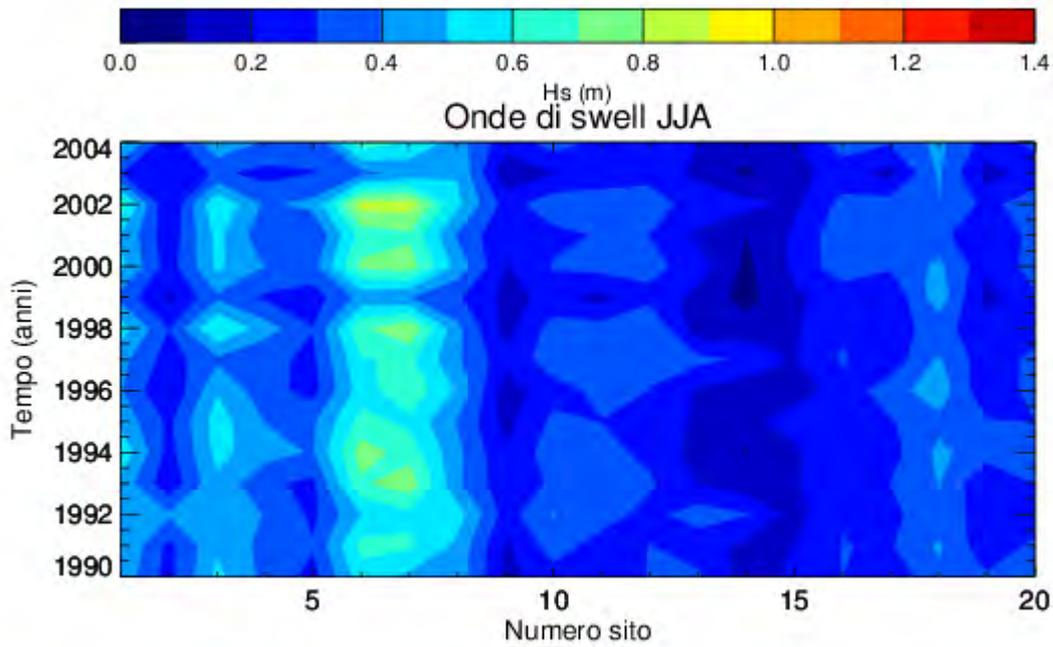


Figura 26. Valori medi dell'altezza significativa calcolata per ogni anno sul trimestre estivo per le onde di swell.

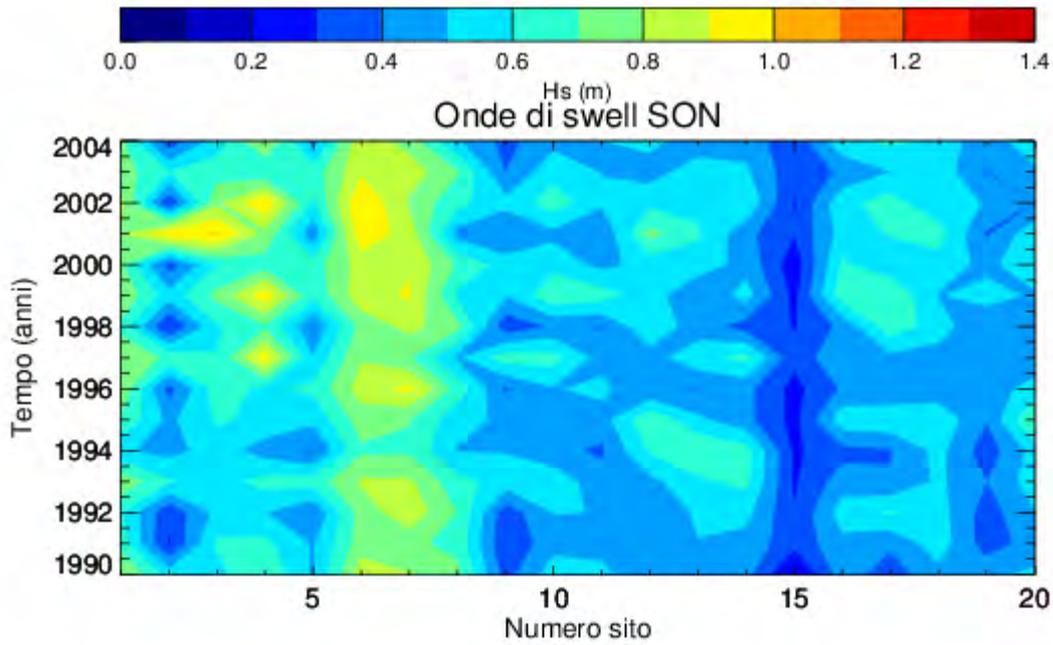


Figura 27. Valori medi dell'altezza significativa calcolata per ogni anno sul trimestre autunnale per le onde di swell.

3 Conclusioni

L'attività ha avuto come obiettivo una accurata analisi dei risultati relativi alla climatologia del moto ondoso per il bacino mediterraneo, prodotta nel corso della precedente annualità. La climatologia era stata realizzata, alla risoluzione spaziale di $1/32^\circ$, con il modello di onde WAM. Per 20 siti, selezionati lungo le coste del bacino, erano stati memorizzati gli spettri bidimensionali alla risoluzione temporale di un'ora.

Gli spettri sono stati analizzati utilizzando la tecnica del partizionamento, che permette di scomporre gli spettri, identificando la presenza di onde di origine diversa. In particolare la tecnica è stata utilizzata per separare le onde di vento dalle onde di *swell* e produrre quindi statistiche, calcolate sul periodo di 15 anni 1990-2004, relative alla presenza dei diversi tipi di onde ed alle loro caratteristiche. Sono state mostrate le distribuzioni relative al numero di eventi in funzione dell'altezza e del periodo corrispondente e dell'altezza e della direzione di propagazione, per alcuni siti lungo le coste italiane.

L'analisi è stata effettuata separatamente per le onde di vento e per quelle di *swell* ed ha mostrato differenze significative nella distribuzione ottenuta per i due casi. Per le onde di vento, che sono in genere risultate nel bacino le più energetiche, sono state mostrate anche, per gli stessi siti, le distribuzioni in funzione di altezza e periodo separando i dati relativi alle diverse stagioni.

Grafici dei valori medi dell'altezza, calcolati anno per anno e divisi per stagione, non hanno mostrato una significativa variazione dei valori nel corso del periodo analizzato.

4 Riferimenti bibliografici

1. H. Günther, A. Behrens, "The wam model validation document version 4.5.3." Tech. Rep. Institute of Coastal Research Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) (2011)
2. A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino, "Climatologia ad alta risoluzione spaziale dell'energia associata al moto ondoso nel Mediterraneo: mappe e indicatori di produttività" Report RdS/PAR2013/167 - 2013
3. T.W. Gerling, "Partitioning sequences and arrays of directional wave spectra into component wave systems" J. Atmos. Oceanic Technol. 9 (1992) 444:458
4. J. Portilla, F. J. Ocampo-Torres, J. Monbaliu, "Spectral Partitioning and Identification of Wind Sea and Swell" J. Atmos. Oceanic Technol. 26 (2009) 107:122
5. J.L.Hanson, and O.M. Phillips, "Automated Analysis of Ocean Surface Directional Wave Spectra", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 18 (2) (2001), 277–293.
6. J E Aarnes, H E Krogstad, "Partitioning sequences for the dissection of directional Ocean Wave Spectra : a Review". Part of work package 4 (Wp4) of the EnviWave (EVG-2001-00017) research program under the EU Energy, Environment and Sustainable Development programme, 2001