



Ricerca di Sistema elettrico

Aggiornamento del sistema operativo delle onde: implementazione, validazione e operatività

A. Carillo, E. Lombardi, MV. Struglia, M. Palma, G. Pisacane

AGGIORNAMENTO DEL SISTEMA OPERATIVO DELLE ONDE: IMPLEMENTAZIONE, VALIDAZIONE E OPERATIVITÀ

A. Carillo, E. Lombardi, MV. Struglia, M. Palma, G. Pisacane
Marzo 2022

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità 2021

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: “1.8 Energia elettrica dal mare”

Linea di attività: *LAI.16 Aggiornamento del sistema operativo delle onde: implementazione, validazione e operatività*

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione “*Piano triennale di realizzazione 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale*”

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Giuliana Mattiazzo

Indice

SOMMARIO	3
1 INTRODUZIONE.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	4
2.1 IL SISTEMA OPERATIVO DI PREVISIONE DELLE ONDE	4
2.2 IL MODELLO WW3	7
2.3 CATENA OPERATIVA.....	9
2.4 VALIDAZIONE PRELIMINARE CON I DATI DELLA BOA DI CIVITAVECCHIA.....	10
2.5 VALIDAZIONE PRELIMINARE CON I DATI DEI SATELLITI	12
2.6 VALIDAZIONE IN FASE OPERATIVA.....	13
2.7 SITO WEB	24
3 CONCLUSIONI	27
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	28

Sommario

Il rapporto descrive i lavori relativi alla Linea di Attività 1.16 che prevedeva l'aggiornamento del sistema operativo per la simulazione delle onde nel Mediterraneo. Il precedente sistema, realizzato nell'ambito dell'Accordo di Programma 2013 e attivo dal giugno dello stesso anno, è stato completamente rivisto utilizzando un nuovo modello numerico di previsione delle onde. Il sistema realizzato è interamente basato sul modello di onde WAVEWATCHIII ed effettua previsioni su cinque giorni per l'intero bacino Mediterraneo alla risoluzione spaziale di $1/32^\circ$ e per 9 sottobacini dei mari italiani alla risoluzione di $1/128^\circ$.

1 Introduzione

Le previsioni dello stato del mare sono ritenute di grande utilità nella gestione dei sistemi di conversione dell'energia del moto ondoso in energia elettrica. I dati relativi alle caratteristiche delle onde, quali la frequenza e l'altezza significativa, vengono utilizzati nella fase di gestione dei convertitori, da un lato fornendo indicazioni per la selezione di taluni parametri di esercizio che ne consentono un rendimento ottimale, dall'altro permettendo di stimare in anticipo la quantità di energia che potrà essere immessa nella rete. Previsioni accurate del moto ondoso rappresentano inoltre un valido supporto per la pianificazione delle fasi di manutenzione dei dispositivi.

A partire dal giugno 2013 è operativo in ENEA un sistema di previsione del moto ondoso, costituito da un modello che copre l'intera area mediterranea e da una serie di modelli relativi a sottobacini dei mari italiani. Il sistema è stato realizzato utilizzando il modello di onde WAM per la simulazione a larga scala, alla risoluzione di $1/32^\circ$, e il modello SWAN alla risoluzione di $1/128^\circ$ per i sottobacini. Negli ultimi anni questi due modelli, adottati da istituzioni differenti in varie parti del mondo, sono stati largamente modificati per scopi specifici, ma non sono state mantenute versioni comuni aggiornate. Un nuovo modello numerico (WAVEWATCHIII) si è diffuso a partire dal modello sviluppato alla NOAA negli anni 90 e viene attualmente aggiornato dalla comunità modellistica internazionale, includendo via via tutte le più recenti parametrizzazioni. Nato per la simulazione su larga scala può ora essere utilizzato su tutte le scale spaziali. Il sistema operativo realizzato in ENEA è quindi stato ridisegnato utilizzando il modello WAVEWATCHIII per la simulazione ad entrambe le scale spaziali.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Il sistema operativo di previsione delle onde

Il modello di onde utilizzato è il modello WAVEWATCHIII (WW3), versione v6.07 [1]. WW3 è un modello spettrale di terza generazione, sviluppato inizialmente presso lo US National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP) [2, 3], che risolve l'equazione di bilancio della densità spettrale in funzione di numero d'onda e direzione.

Il modello WW3 è stato inizialmente sviluppato per la simulazione in acque profonde ma nel suo continuo aggiornamento sono state introdotte opzioni che permettono di considerare termini caratteristici delle acque molto basse. Il codice numerico è scritto in ANSI standard FORTRAN 90 ed è possibile selezionare un elevato numero di parametrizzazioni.

Il primo passo necessario nella realizzazione di un modello di onde è costituito dalla definizione della griglia di simulazione e della relativa batimetria. Il modello precedente era realizzato a partire dalla Carta Batimetrica degli Oceani GEBCO alla risoluzione di 30 secondi di arco. Per la realizzazione della nuova versione del modello di previsione del moto ondoso, si è fatto uso di una versione aggiornata dei dati batimetrici, basandosi sulla nuova Carta Batimetrica degli Oceani [4] che fornisce i valori di elevazione e profondità su scala globale, su una griglia regolare alla risoluzione spaziale di 15 secondi di arco ($1/240^\circ$). Questa batimetria è stata realizzata attraverso il Nippon Foundation-GEBCO Seabed 2030 Project che ha lo scopo di mettere insieme tutti i dati batimetrici disponibili, a livello mondiale, per produrre una mappa di tutti gli oceani.

A partire da questi dati, sono state realizzate le batimetrie utilizzate dal modello WW3 alla risoluzione di $1/32^\circ$, corrispondente a circa 3.5 km, su tutto il Mediterraneo e alla risoluzione di $1/128^\circ$ (circa 700-800 m) su 9 sottobacini dei mari italiani.

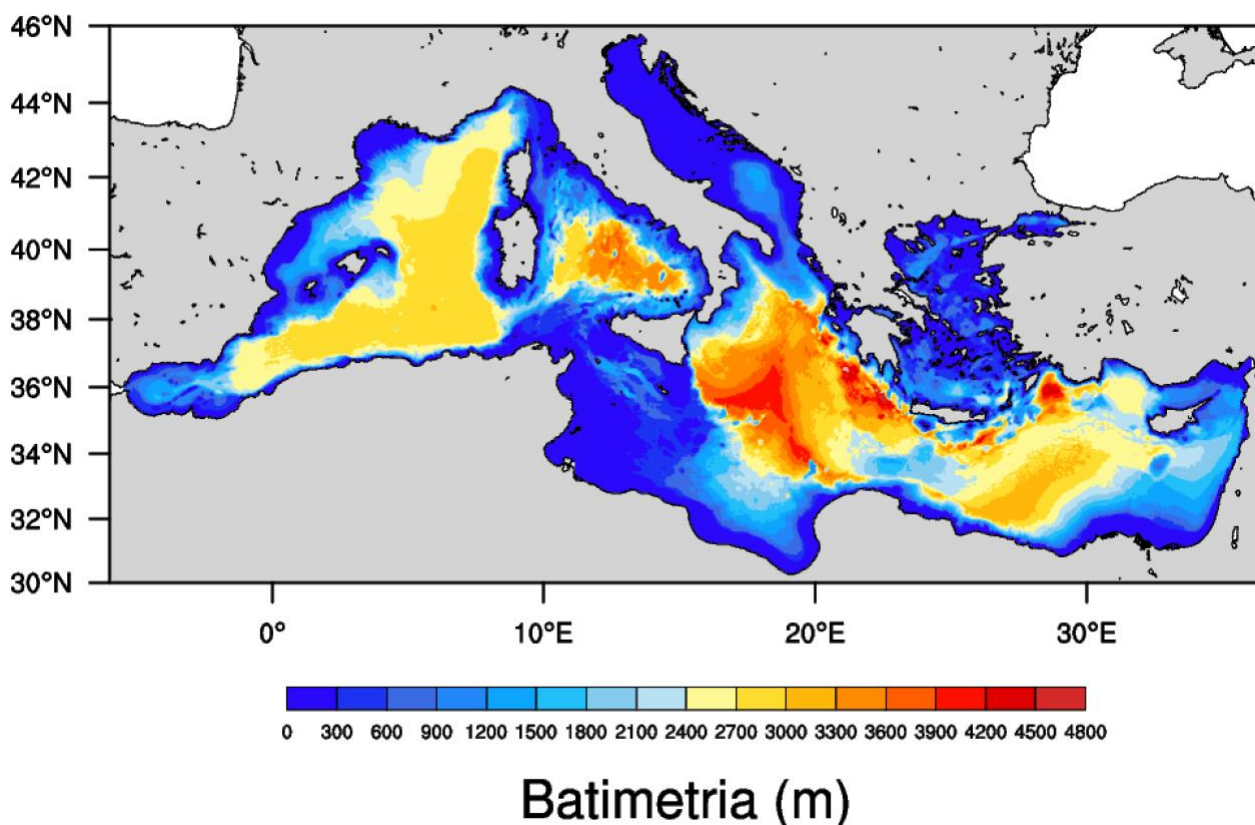


Figura 1 – Batimetria del modello WAVEWATCHIII per l'area mediterranea.

La batimetria ricavata per l'area mediterranea è riportata in Figura 1. In Figura 2 sono indicati i sottobacini per i quali le previsioni vengono effettuate a più alta risoluzione. Per la scelta dei sottobacini sono state utilizzate per la maggior parte le stesse aree già definite per la versione precedente del sistema operativo; fa eccezione l'area nell'alto mar ligure che è stata estesa per includere l'isola d'Elba che costituiva in precedenza un'area separata di simulazione.

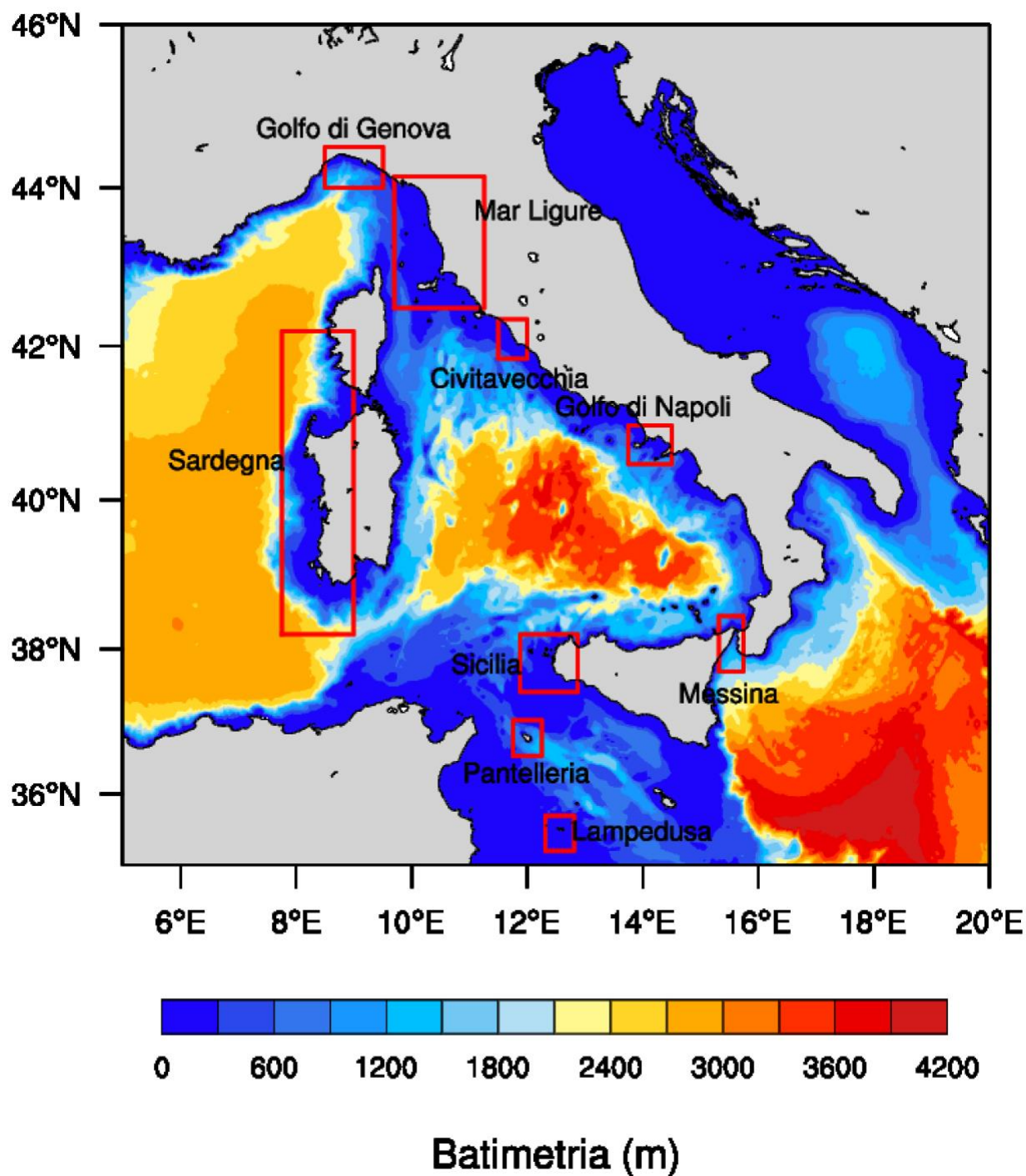


Figura 2 – Batimetria del modello WAVEWATCHIII per i mari italiani con indicati i sottobacini a più alta risoluzione.

Le aree selezionate includono le zone costiere italiane interessate dalla maggiore intensità di moto ondoso, rappresentate dalla zona occidentale della Sardegna e della Sicilia, e zone portuali o insulari per le quali la possibilità di utilizzo del moto ondoso può costituire una importante alternativa energetica. In tabella 1 sono riportate le coordinate delle aree.

Tabella 1 – Coordinate degli estremi delle aree ad alta risoluzione.

Indice area	Nome area	Latitudine minima	Latitudine massima	Longitudine minima	Longitudine massima	N punti
C01	Sardegna occidentale	38.2	42.2	7.75	9.	161*513
C02	isola di Pantelleria	36.53	37.03	11.75	12.25	65*65
C03	isola di Lampedusa	35.2	35.7	12.3125	12.8125	65*65
C04	Sicilia nord-occidentale	37.41875	38.2	11.875	12.875	129*101
C05	Civitavecchia	41.85	42.35	11.5	12.0	65*65
C06	Golfo di Genova	44.0125	44.5125	8.5	9.5	129*65
C07	Mar Ligure	42.5	44.1484	9.7	11.2625	201*212
C08	Golfo di Napoli	40.48125	40.98125	13.75	14.5	97*65
C09	Stretto di Messina	37.7	38.45	15.3125	15.75	57*97

La griglia del modello del Mediterraneo si estende da 5.50°W a 36.09375°E e da 30.1°N a 45.975°N per un totale di 1332 per 509 punti. Lo spettro bidimensionale è discretizzato tramite 30 frequenze distribuite in maniera logaritmica con un fattore di incremento di 1.10 a partire dalla frequenza minima pari a 0.05 Hz con frequenza massima 0.7932 Hz e 36 direzioni angolari corrispondenti a 10° di risoluzione.

Come nella versione precedente, il sistema è forzato in superficie con i campi di vento prodotti dal sistema operativo SKIRON [5]. Il sistema SKIRON è basato sul modello meteorologico ad area limitata Eta/NCEP [6] successivamente sviluppato nell'ambito di diversi progetti della Comunità Europea. La versione attualmente in uso in maniera operativa presso l'Università di Atene ha una risoluzione orizzontale di 0.05° x 0.05° e copre un intervallo temporale di 5 giorni a partire dalla mezzanotte. I dati di vento sono disponibili con cadenza oraria.

Il sistema di previsione delle onde relativo al Mediterraneo e ai sottobacini viene eseguito ogni giorno e fornisce previsioni per i 5 giorni successivi. Le principali variabili caratteristiche delle onde vengono memorizzate su tutti i punti di griglia di ciascuno dei bacini con frequenza oraria. Il modello a larga scala fornisce le condizioni laterali, rappresentate dagli spettri bidimensionali dell'energia, su tutti i bordi delle aree relative ai sottobacini, alla frequenza temporale di un'ora.

2.2 Il modello WW3

I modelli numerici per la propagazione del moto ondoso attualmente in uso, sono di tipo spettrale, le onde sono quindi rappresentate attraverso il loro spettro bidimensionale, funzione di frequenza e direzione.

La direzione θ è definita perpendicolare alla cresta dell'onda e la sua frequenza relativa è data da ω ($= 2\pi f$). La frequenza ω ($= 2\pi f_a$) osservata nel sistema di riferimento fisso risulta diversa dalla frequenza intrinseca σ ($= 2\pi f_r$), nel caso di presenza di correnti. Nell'approssimazione di acque profonde e correnti che variano lentamente, applicando la teoria lineare, i parametri di fase sono legati dalla relazione di dispersione e dall'equazione tipo Doppler:

$$\sigma^2 = gk \tanh kd$$

$$\omega = \sigma + k \cdot U$$

dove k è il numero d'onda, d la profondità media e U la velocità della corrente.

Il modello WW3 si basa sull'equazione di conservazione dell'azione d'onda, valida anche in presenza di correnti:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla c_g N = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Dove c_g è la velocità di gruppo e $N(k, \theta)$ è lo spettro densità d'azione.

I termini a destra dell'equazione rappresentano tutti i flussi di energia sia positivi che negativi, in acque profonde:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$$

Dove S_{in} , termine di interazione atmosfera-onda, rappresenta l'input dell'energia eolica, S_{nl} è il termine di interazione non lineare onda-onda e S_{ds} il termine di dissipazione.

In acque poco profonde è necessario considerare alcuni processi aggiuntivi, nel caso del modello WW3 possono essere introdotti termini per le interazioni onda-fondo (S_{bot}), termini di rottura delle onde per l'interazione con il fondo, termini di riflessione dalla costa e interazioni onda-onda (S_{tr}).

L'equazione d'azione è risolta usando un metodo a passo frazionario che permette una efficiente vettorizzazione e parallelizzazione del codice.

Sono definiti quattro passi temporali di integrazione. Il primo è legato al CFL per la propagazione spaziale, che definisce la stabilità dello schema numerico relativamente alla dimensione della griglia di calcolo e alla massima velocità di gruppo delle onde. Il numero critico C_c del CFL definito come:

$$C_c = \frac{c_{g,max} \Delta t}{\min(\Delta x, \Delta y)}$$

è uguale a 1.

Il secondo intervallo temporale è costituito dal passo temporale globale che deve essere minore o uguale al precedente ed è il più piccolo intervallo di tempo a cui vengono calcolati i campi in input ed in output al modello.

Il terzo intervallo è relativo alla propagazione intra-spettrale e può essere scelto uguale al passo globale nel caso di acque profonde mentre per acque basse valori più bassi permettono di rappresentare meglio gli effetti della rifrazione; questo passo temporale deve essere una frazione pari di quello globale in modo da garantire che la rifrazione delle onde di *swell* di lungo periodo non generi ondulazioni sui parametri medi delle onde.

L'ultimo passo temporale è relativo all'integrazione dei termini sorgente ed è tipicamente fissato tra 5 e 15 s.

Per il modello operativo è stata selezionata l'interpolazione lineare del vento nello spazio e nel tempo e sono state scelte alcune parametrizzazioni che includono la parametrizzazione di Arhuin et al (2010) [7] per il termine sorgente (secondo il pacchetto ST4 del modello WW3), l'interazione lineare onda-onda modellata attraverso l'approssimazione discreta (DIA, [8]). È stata attivata la parametrizzazione relativa alla riflessione dalla costa, per l'attrito sul fondo è stata utilizzata la formulazione di JONSWAP con valori standard, già adottata nel modello WAM [9]. È stata inoltre usata la parametrizzazione della rottura delle onde indotta dalla batimetria [10].

2.3 Catena operativa

Il sistema di previsione del moto ondoso è attivo in modalità operativa sul sistema di calcolo del Laboratorio di Modellistica Climatica e Impatti dell'ENEA. Le simulazioni sono effettuate quotidianamente e le previsioni coprono un intervallo temporale di 5 giorni.

I dati di previsione del vento superficiale prodotti dal sistema SKIRON, vengono acquisiti automaticamente dal sito del Dipartimento dell'Università di Atene. Tali dati sono costituiti da file orari che coprono l'intero intervallo della simulazione, sono disponibili in formato grib (GRIBed Binary) che costituisce uno standard per lo scambio di dati meteorologici in seno alla WMO (World Meteorological Organization). In generale i dati sono disponibili sul sito intorno alle 3, ora italiana. Le previsioni vengono effettuate tramite il codice di calcolo `ww3_shel` che necessita in input, oltre che del file relativo al forzante di vento, di alcuni altri files che contengono tutte le caratteristiche della simulazione. Il file `mod_def.ww3` contiene tutte le informazioni relative al settaggio della simulazione, quali i valori dei coefficienti relativi alle parametrizzazioni scelte e gli intervalli di integrazione temporale. Questo file, generato dal codice `ww3_grid` a partire dai dati di batimetria, contiene la definizione del dominio di integrazione del modello e la posizione delle condizioni al contorno dei sottodomini innestati. I settaggi relativi a tutti i domini sono stati effettuati all'inizio del periodo di operatività del sistema.

Un altro file necessario all'inizio di ogni simulazione è rappresentato dal file `restart.ww3` che contiene le condizioni iniziali dello stato del mare e può essere generato dal codice `ww3_strt` utilizzando formule standard. Nella catena operativa le condizioni del mare, rappresentate dagli spettri bidimensionali su tutto il dominio di calcolo, vengono memorizzate dopo 24 ore di simulazione e utilizzate come condizioni iniziali per la simulazione del giorno successivo.

La catena operativa è stata predisposta secondo la sequenza:

- Ricezione automatica dei dati del sistema SKIRON
- Trasformazione dei files contenenti i forzanti superficiali relativi a tutta la durata della simulazione in un unico file in formato netcdf (Network Common Data Form),
- Esecuzione del codice `ww3_prnc` che, leggendo dal file `mod_def.ww3` le caratteristiche della griglia di calcolo, interpola i valori delle componenti del vento nel tempo e nello spazio e trasforma nel formato di lettura del modello WW3 scrivendo il file `wind.ww3`.
- Esecuzione della simulazione di previsione per l'intero bacino Mediterraneo tramite il codice `ww3_shel` che fornisce in output un unico file (`out_grd.ww3`) contenente le variabili selezionate su tutto il dominio di calcolo alla risoluzione temporale di un'ora. Il codice per il bacino Mediterraneo scrive inoltre per ciascuno dei sottobacini, un file contenente gli spettri bidimensionali che ne costituiscono le condizioni al contorno, numerati da 1 a 9. Anche questi valori sono memorizzati con frequenza oraria.
- Post-processamento del file in output con il codice `ww3_ounf` per la scrittura dei campi selezionati in formato netcdf.
- Esecuzione del codice per l'interpolazione nello spazio e nel tempo del vento superficiale e la scrittura del file `wind.ww3` per ciascuno dei sottobacini.
- Esecuzione delle simulazioni relative a ciascun sottobacino utilizzando le condizioni laterali prodotte dal modello del Mediterraneo e le condizioni iniziali ricavate dalla simulazione del giorno precedente.
- Post-processamento dei files in output per ciascun sottodominio con il codice `ww3_ounf` per la scrittura dei campi selezionati in formato netcdf.

- Creazione di mappe relative alle altezze significative e al periodo medio delle onde su ciascuno dei domini di calcolo tramite codici di grafica in linguaggio ncl (NCAR Command Language).
- Pubblicazione delle mappe sulla pagina web dedicata.

2.4 Validazione preliminare con i dati della boa di Civitavecchia

Per i confronti sono stati utilizzati i seguenti indici statistici: il bias tra il modello e le misure (bias), l'errore quadratico medio (RMSE), l'indice di dispersione (si) e la pendenza della retta di regressione passante per l'origine (slope). Considerando la serie di n misure x_i e i corrispondenti valori del modello y_i , questi indici sono calcolati come segue:

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)$$

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}$$

$$si = \frac{rmse}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i}$$

$$slope = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i x_i}$$

Inoltre, è stato calcolato l'indice di Willmott (Willmott, 1982) che determina l'accordo tra due serie di dati ed è definito nell'intervallo $[0,1]$,

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i| - |x_i|)^2} \right]$$

Nelle equazioni y_i' e x_i' rappresentano la deviazione rispetto alla media. Il miglior accordo tra le due serie di dati si ottiene per valori bassi di bias, rmse e si, e per pendenza della retta di regressione e indice di Willmott prossimi all'unità.

Una prima verifica del modello è stata effettuata su una serie di simulazioni che sono state girate in modalità analoga all'operativa su un periodo compreso tra il 25 gennaio e il 13 febbraio 2019.

Per questo periodo son stati forniti da RSE dati di altezza significativa e periodo medio registrati dalla boa ondametria installata di fronte all'antimurale del Porto di Civitavecchia (coordinate 42°05'50.91"N e 11°44'39.23"E). I dati registrati sono disponibili con una risoluzione temporale di circa 3 ore e il confronto è stato effettuato utilizzando il tempo e il punto di griglia del modello più vicini senza alcuna interpolazione.

Nelle Figure 3 e 4 è riportato il confronto dell'andamento dei dati registrati alla boa con i dati ricavati dal primo giorno della simulazione sia per l'altezza significativa che per il periodo medio.

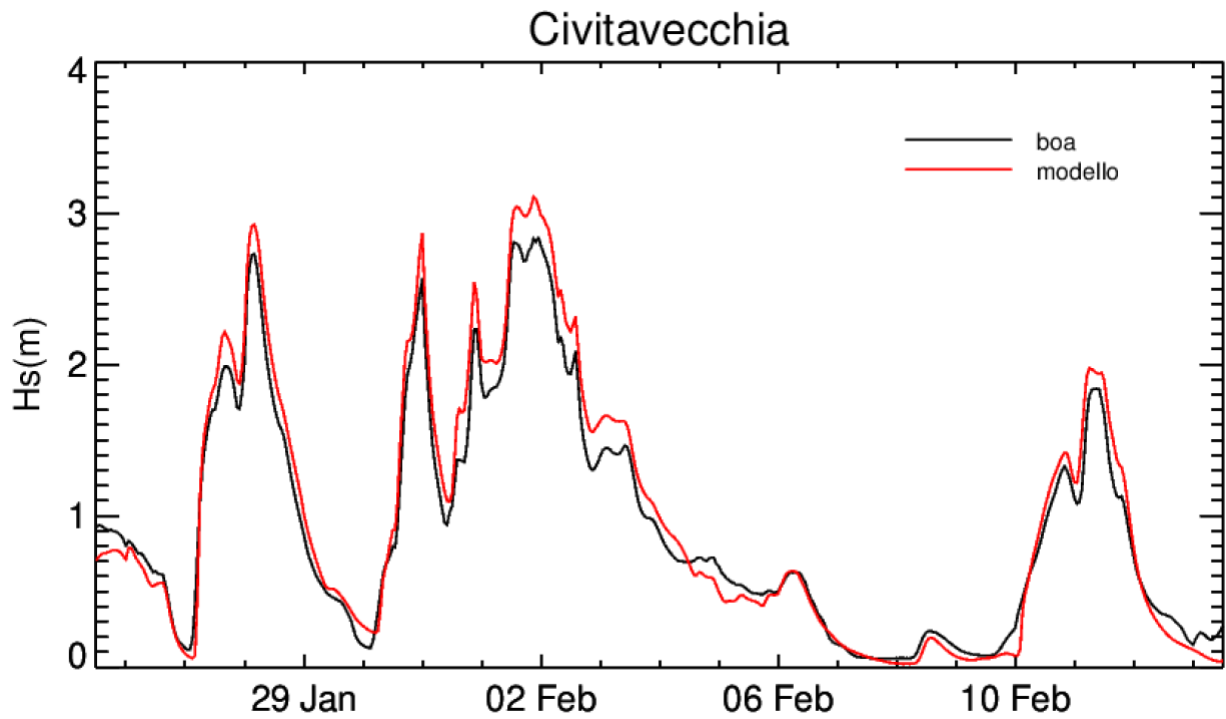


Figura 3 – Confronto dell'altezza significativa ricavata dalla simulazione con il modello WW3 con il valore registrato alla boa di Civitavecchia.

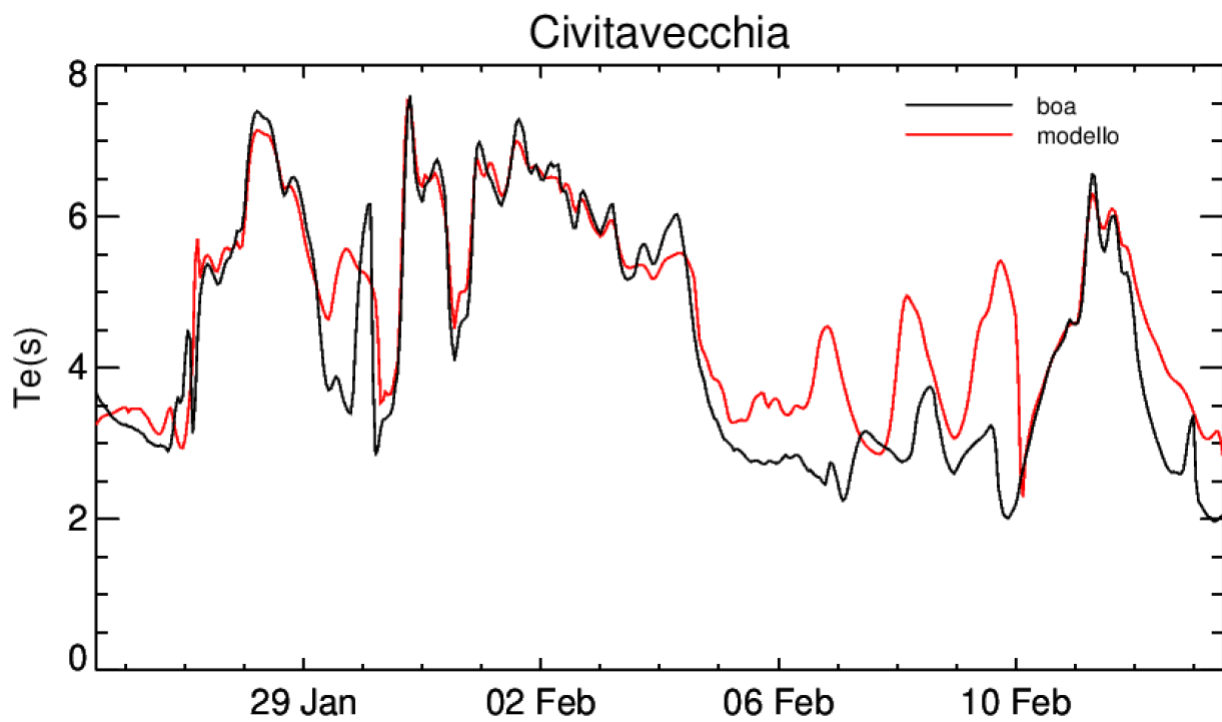


Figura 4 – Confronto del periodo medio dell'onda ricavato dalla simulazione con il modello WW3 con il valore registrato alla boa di Civitavecchia.

Nella tabella 2 sono riportate le statistiche relative al confronto sia per quanto riguarda le altezze che i periodi medi tra i valori del primo giorno di simulazione e i dati della boa. Per entrambe le variabili si può notare che l'accordo risulta estremamente buono, con una correlazione e un indice di Willmott molto prossimi all'unità nel caso dell'ampiezza.

Tabella 2 – statistiche relative al confronto del primo giorno di previsione di altezza significativa dell'onda per il periodo tra il 25 gennaio e il 14 febbraio 2019.

Boa	media boa	RMSE	BIAS	scatter	willmot	slope	R
Civitavecchia Hs (m)	1,04	0,15	0,07	0,13	0,99	1,10	0,99
Civitavecchia Te (s)	4,55	0,76	0,28	0,16	0,92	1,03	0,88

2.5 Validazione preliminare con i dati dei satelliti

Per la validazione delle altezze significative delle onde sono stati inoltre usati valori provenienti dalle misure altimetriche da satellite. In particolare, sono stati scaricati dal sito COPERNICUS tutti i dati disponibili corrispondenti alle altezze significative lungo le tracce satellitari, *near-real-time*, per le seguenti missioni: Jason-3, Sentinel-3A, Sentinel-3B, Cryosat-2, SARAL/AltiKa, CFOSAT (WAVE_GLO_WAV_L3_SWH_NRT_OBSERVATIONS_014_001).

Il sistema è stato eseguito per un periodo di prova nel mese di ottobre 2021 ed i risultati confrontati con i dati satellitari, utilizzando i valori nel punto di griglia ed al tempo più vicino, senza alcuna interpolazione spaziale o temporale. Il confronto è stato effettuato per ciascun giorno di simulazione per l'intero periodo dal 1° ottobre al 16 ottobre, in tabella 3 sono riportate le statistiche relative.

Per tutto il periodo il bias si mantiene negativo e intorno ai 20 cm. La correlazione media è pari a 0.85, con un valore di 0.69 solo per il giorno 11. L'indice di Willmott è comunque sempre maggiore di 0.80, con una buona correlazione.

Tabella 3 – statistiche relative al confronto delle altezze significative delle onde per ciascun giorno di previsione rispetto a tutti i dati satellitari considerati per il mese di ottobre 2021.

Giorno	Media satelliti	Bias	Slope	Correlazione	indice Willmott
1	1.17	-0.26	0.79	0.89	0.88
2	1.07	-0.37	0.68	0.84	0.80
3	0.98	-0.22	0.79	0.85	0.87
4	1.34	-0.23	0.82	0.84	0.88
5	1.27	-0.23	0.82	0.81	0.86
6	1.48	-0.35	0.79	0.93	0.92
7	1.78	-0.26	0.86	0.95	0.95
8	1.35	-0.13	0.91	0.90	0.94
9	1.04	-0.14	0.86	0.78	0.84
10	1.00	-0.16	0.82	0.82	0.86
11	1.06	-0.15	0.83	0.69	0.80
12	1.00	-0.08	0.91	0.74	0.85
13	1.26	-0.20	0.84	0.94	0.95
14	1.48	-0.20	0.85	0.84	0.90
15	1.98	-0.19	0.92	0.94	0.97
16	1.51	-0.20	0.88	0.92	0.94

2.6 Validazione in fase operativa

Il nuovo sistema di previsione delle onde è operativo a partire dal 1° gennaio 2022. La validazione dei risultati è stata effettuata sui primi due mesi di operatività rispetto a tutte le boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita da ISPRA. La rete tornata in funzione a partire dal maggio 2021 è costituita attualmente da 7 boe elencate in tabella 4 con le rispettive coordinate.

Tabella 4 – Posizione delle boe della rete RON

Boa	Longitudine	Latitudine
Alghero	08°06'25" E	40°32'55" N
Ancona	13° 43' 10" E	43°49'26" N
Crotone	17°13'12" E	39°01'25" N
La Spezia	09°49'40" E	43°55'45" N
Mazara del Vallo	12°32'00" E	37°31'05" N
Monopoli	17°22'40" E	40°58'30" N
Ponza	12°57'00" E	40°52'00" N

Le boe forniscono misure relative all'altezza significativa delle onde, al periodo medio ed al periodo di picco. I dati relativi al sistema operativo sono stati estratti dal primo giorno della simulazione effettuata sul dominio di calcolo relativo all'intero bacino mediterraneo; sono stati utilizzati i valori più vicini alla posizione della boa e confrontati ai tempi coincidenti. I valori delle boe sono forniti alla risoluzione temporale di 30 minuti mentre i valori del modello sono prodotti a intervalli di un'ora. I confronti sono stati effettuati per ciascun tempo di ogni previsione effettuata per i due mesi di gennaio e febbraio 2022. Nelle Tabelle dalla 5 alla 8 sono riportati, separatamente per i due mesi di gennaio e febbraio, i valori delle grandezze statistiche calcolate rispetto a ciascuna boa, per l'altezza significativa e per il periodo medio. Per quanto riguarda i valori di ampiezza, la correlazione e l'indice di Willmott risultano sempre molto vicini all'unità, i valori del bias risultano sempre negativi, indicando quindi una leggera sottostima da parte del modello. Per quanto riguarda il periodo medio, sia la pendenza che l'indice di Willmott sono molto buoni, in particolare nel mese di febbraio, con pendenze della retta di regressione molto vicine all'unità.

Tabella 5 – statistiche relative al confronto del primo giorno di previsione di altezza significativa dell'onda per il mese gennaio 2022.

Boa	media boa	RMSE	BIAS	scatter	willmot	slope	R
Alghero	1,51	0,47	-0,31	0,39	0,96	0,86	0,96
Ancona	0,88	0,43	-0,34	0,79	0,89	0,69	0,92
Crotone	1,22	0,35	-0,15	0,33	0,95	0,89	0,91
Monopoli	1,26	0,42	-0,22	0,42	0,91	0,81	0,88
La Spezia	0,74	0,39	-0,28	0,84	0,84	0,72	0,85
Mazara	1,17	0,31	-0,15	0,31	0,96	0,92	0,95
Ponza	0,99	0,45	-0,32	0,67	0,87	0,74	0,87

Tabella 6 – statistiche relative al confronto del primo giorno di previsione di altezza significativa dell’onda per il mese febbraio 2022.

Boa	media boa	RMSE	BIAS	scatter	willmot	slope	R
Alghero	1,98	0,40	-0,22	0,23	0,98	0,91	0,97
Ancona	0,85	0,35	-0,20	0,53	0,93	0,76	0,92
Crotone	1,13	0,33	-0,11	0,32	0,96	0,93	0,93
Monopoli	1,05	0,35	-0,11	0,37	0,97	1,01	0,96
La Spezia	0,97	0,35	-0,23	0,48	0,91	0,83	0,90
Mazara	1,41	0,30	-0,10	0,23	0,98	0,97	0,97
Ponza	1,05	0,32	-0,18	0,37	0,95	0,88	0,93

Tabella 7 – statistiche relative al confronto del primo giorno di previsione di periodo medio dell’onda per il mese gennaio 2022.

Boa	media boa	RMSE	BIAS	scatter	willmot	slope	R
Alghero	5,60	0,72	-0,29	0,14	0,96	0,95	0,94
Ancona	3,86	0,83	-0,22	0,23	0,86	0,93	0,75
Crotone	4,79	0,67	-0,23	0,15	0,83	0,95	0,73
Monopoli	4,80	0,72	-0,39	0,16	0,89	0,91	0,85
La Spezia	4,48	1,35	0,47	0,27	0,74	1,09	0,61
Mazara	5,21	0,72	-0,36	0,15	0,93	0,93	0,90
Ponza	4,59	0,75	-0,39	0,18	0,88	0,92	0,85

Tabella 8 – statistiche relative al confronto del primo giorno di previsione di periodo medio dell’onda per il mese febbraio 2022.

Boa	media boa	RMSE	BIAS	scatter	willmot	slope	R
Alghero	6,48	0,61	-0,07	0,10	0,97	0,99	0,95
Ancona	4,03	0,91	-0,10	0,23	0,80	0,97	0,67
Crotone	4,76	0,67	-0,15	0,15	0,88	0,96	0,79
Monopoli	4,49	0,72	-0,31	0,17	0,92	0,94	0,89
La Spezia	5,43	0,80	0,24	0,14	0,94	1,04	0,90
Mazara	5,61	0,68	-0,28	0,13	0,94	0,95	0,91
Ponza	4,97	0,69	-0,05	0,14	0,91	0,99	0,84

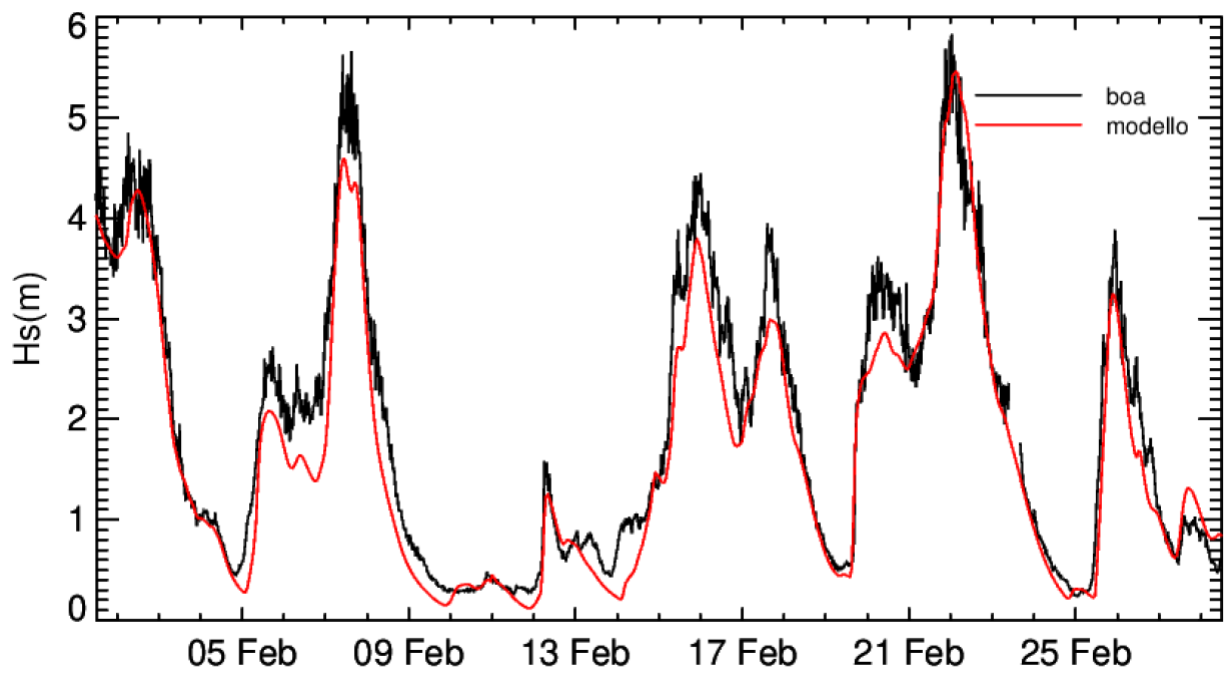


Figura 5 – Confronto dell'altezza significativa ricavata dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Alghero, per il mese febbraio 2022.

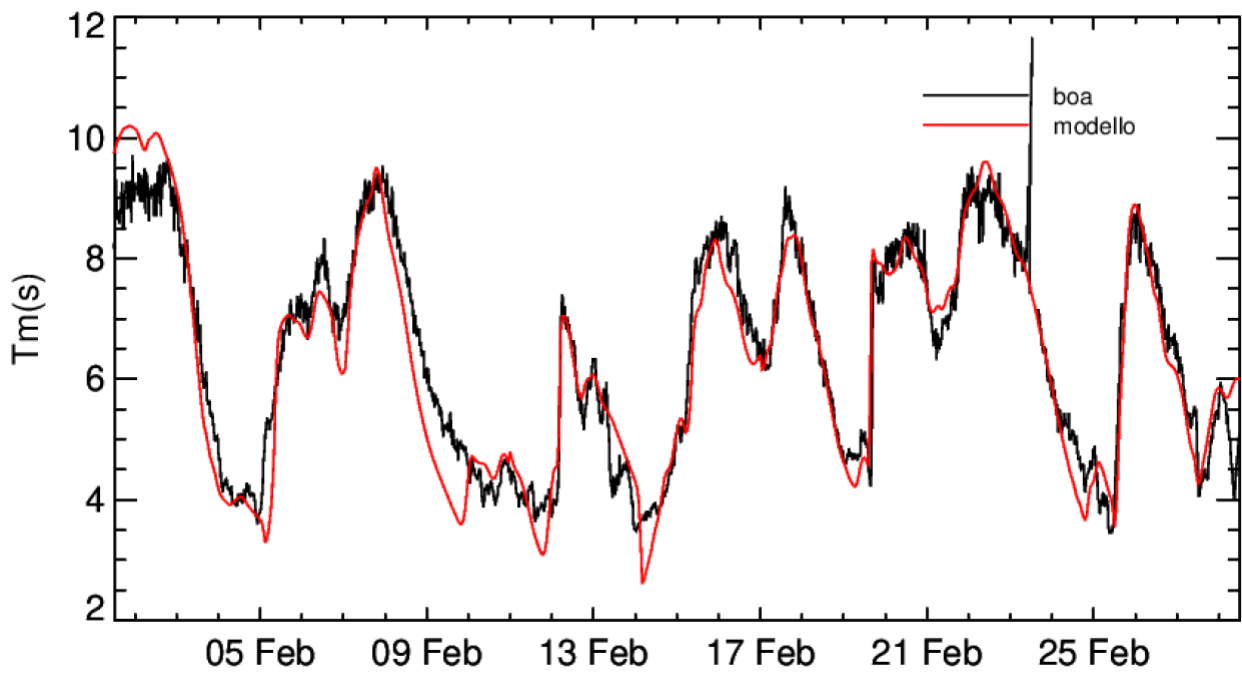


Figura 6 – Confronto del periodo medio dell'onda ricavato dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Alghero, per il mese febbraio 2022.

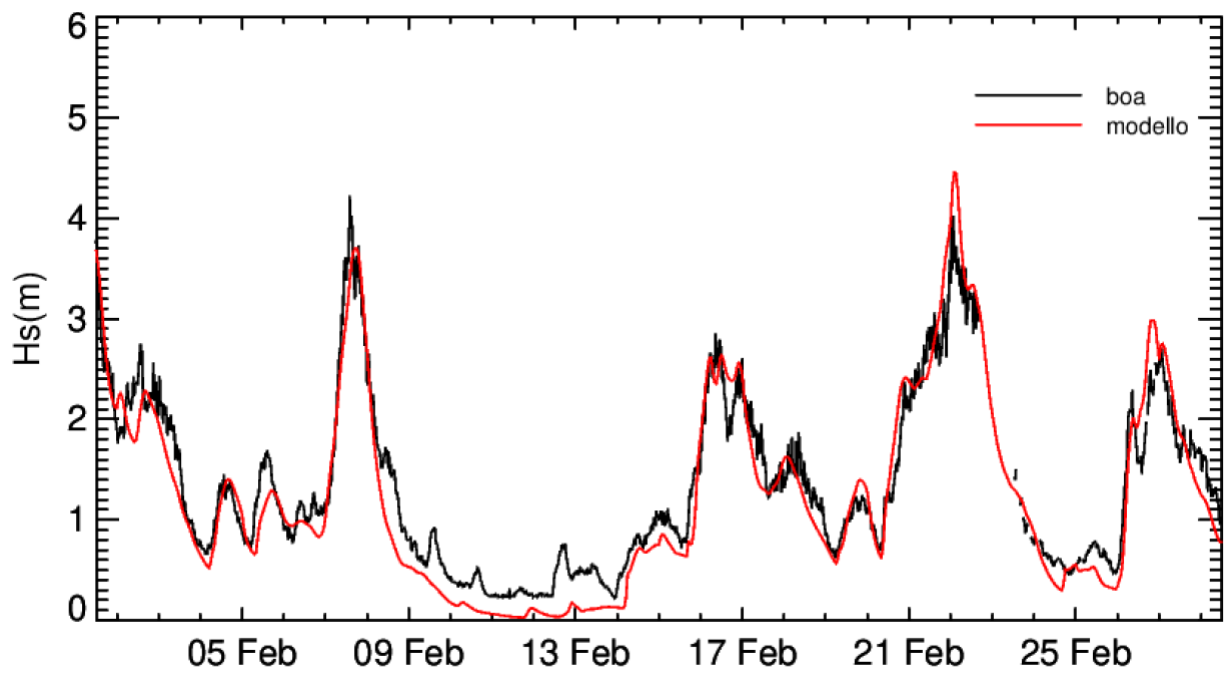


Figura 7 – Confronto dell'altezza significativa ricavata dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Mazara del Vallo, per il mese febbraio 2022.

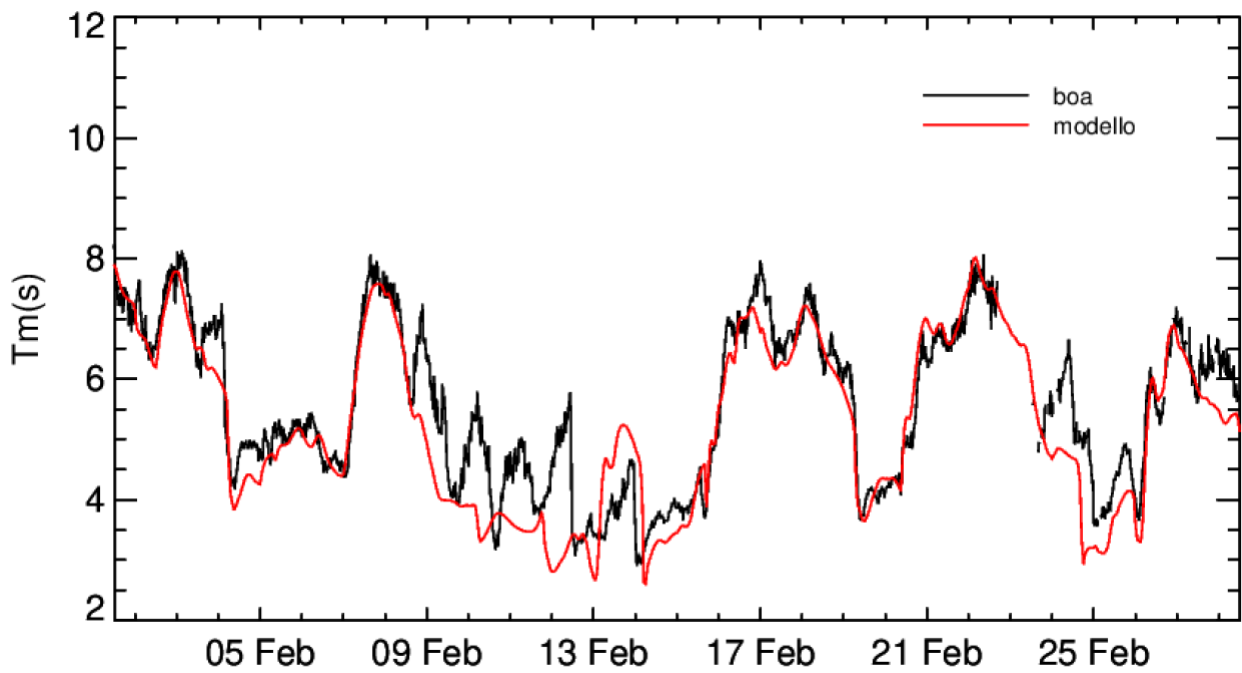


Figura 8 – Confronto del periodo medio dell'onda ricavato dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Mazara del Vallo, per il mese febbraio 2022.

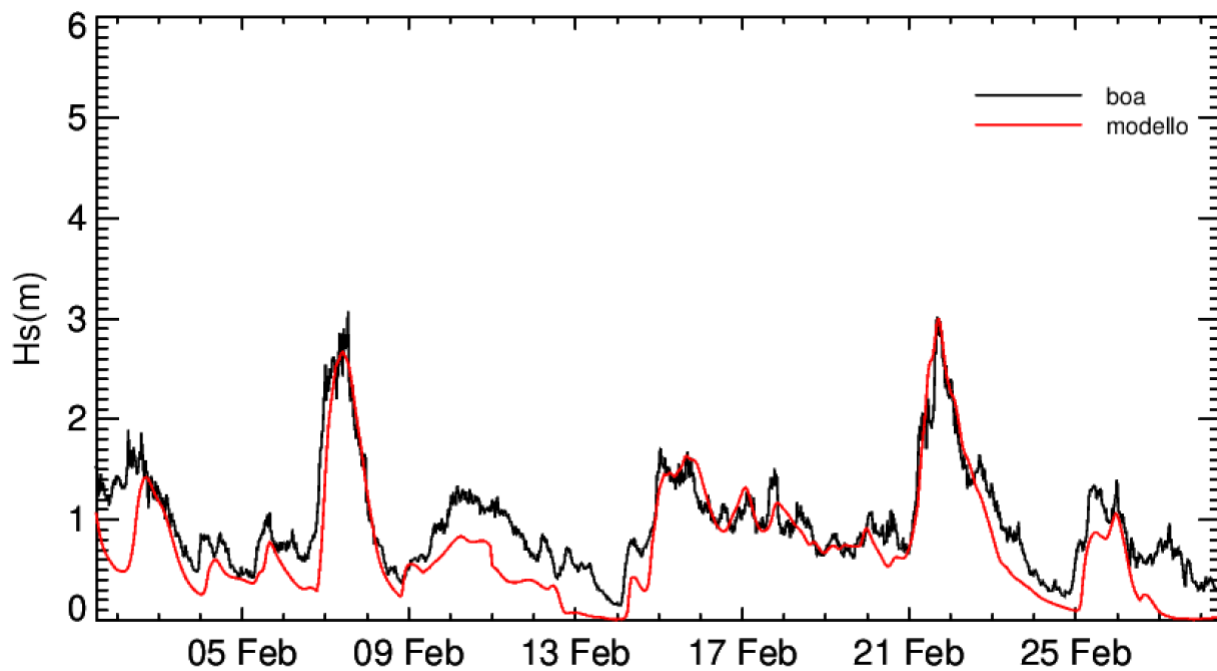


Figura 9 – Confronto dell'altezza significativa ricavata dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di La Spezia, per il mese febbraio 2022.

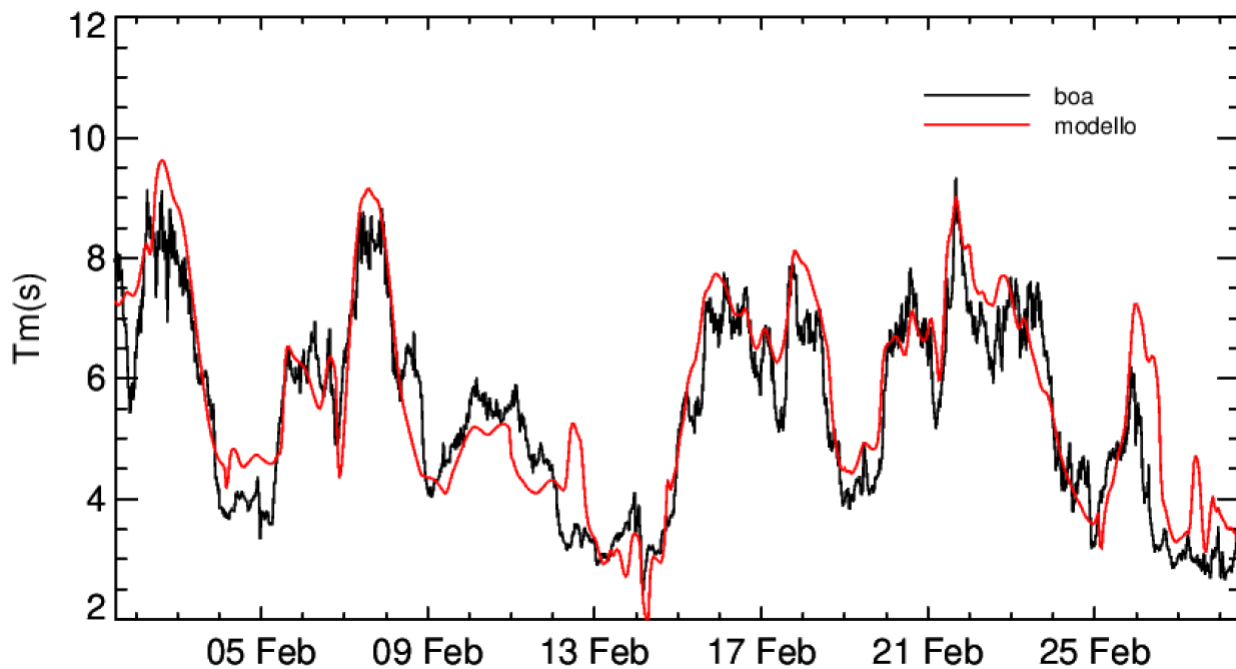


Figura 10 – Confronto del periodo medio dell'onda ricavato dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di La Spezia, per il mese febbraio 2022.

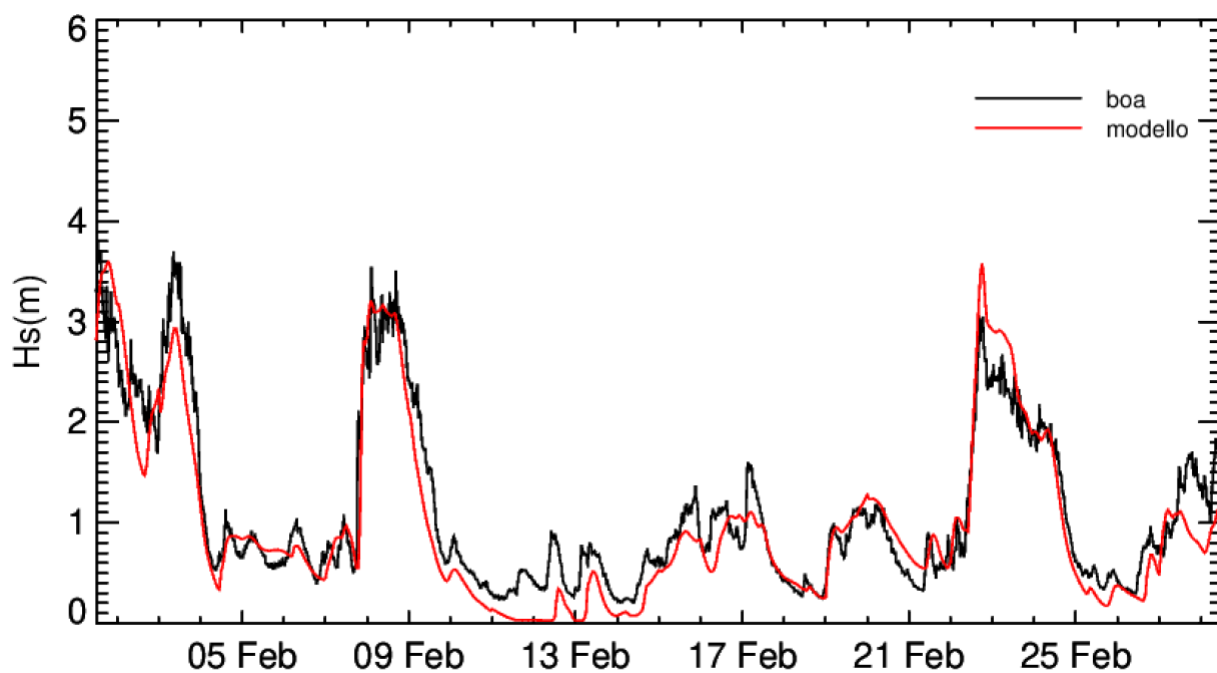


Figura 11 – Confronto dell'altezza significativa ricavata dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Crotona, per il mese febbraio 2022.

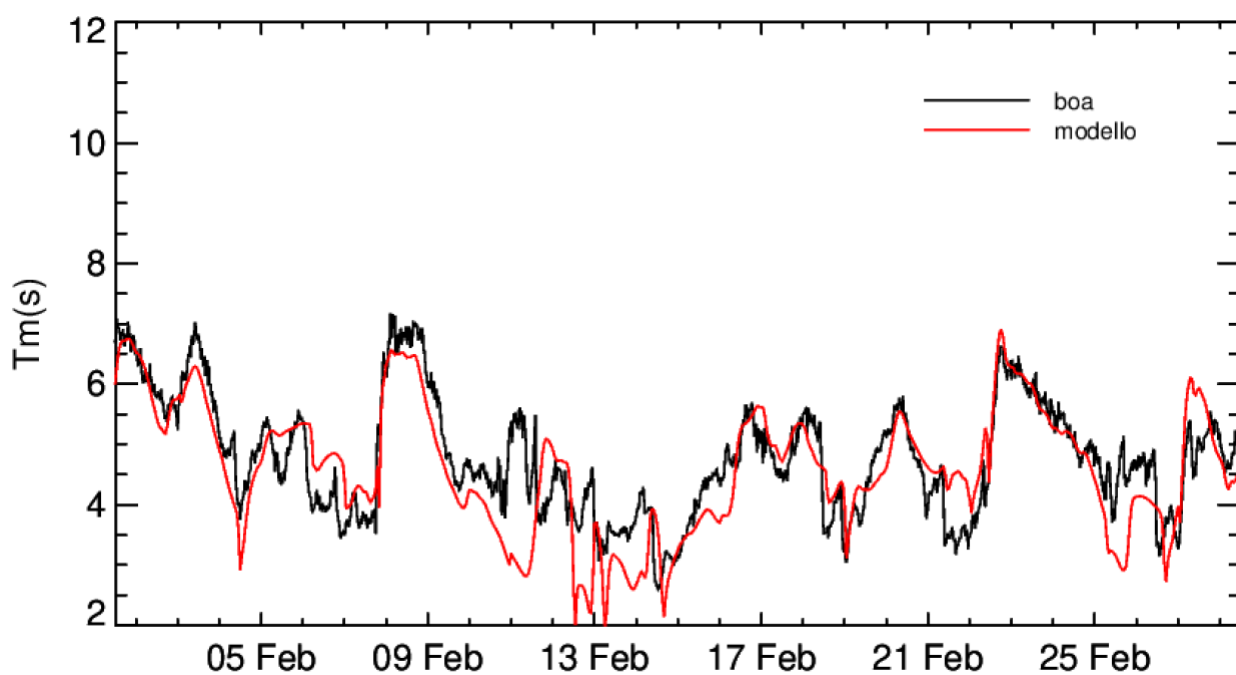


Figura 12 – Confronto del periodo medio dell'onda ricavato dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Crotona, per il mese febbraio 2022.

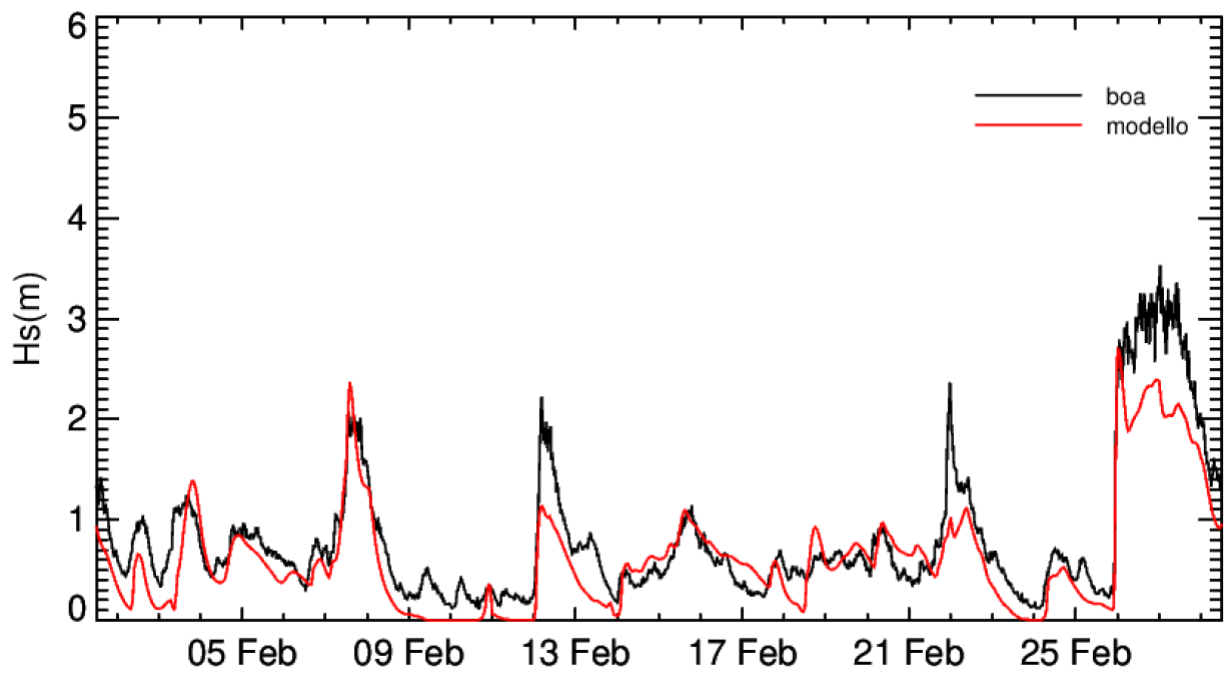


Figura 13 – Confronto dell'altezza significativa ricavata dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Ancona, per il mese febbraio 2022.

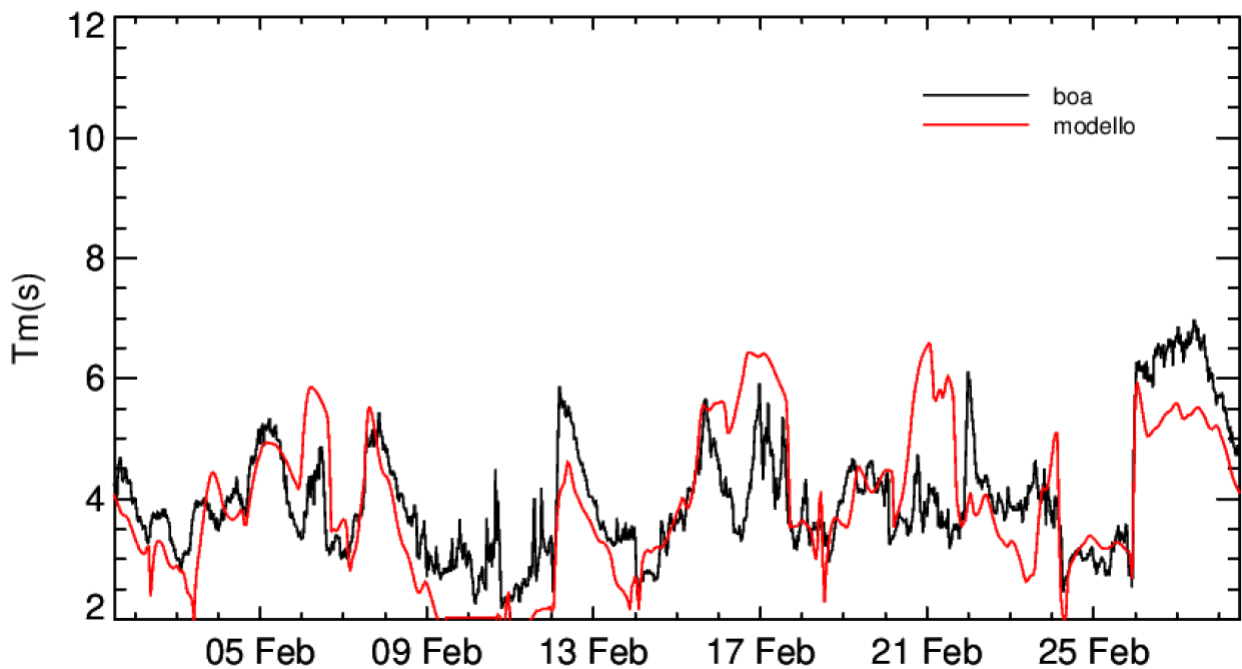


Figura 14 – Confronto del periodo medio dell'onda ricavato dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Ancona, per il mese febbraio 2022.

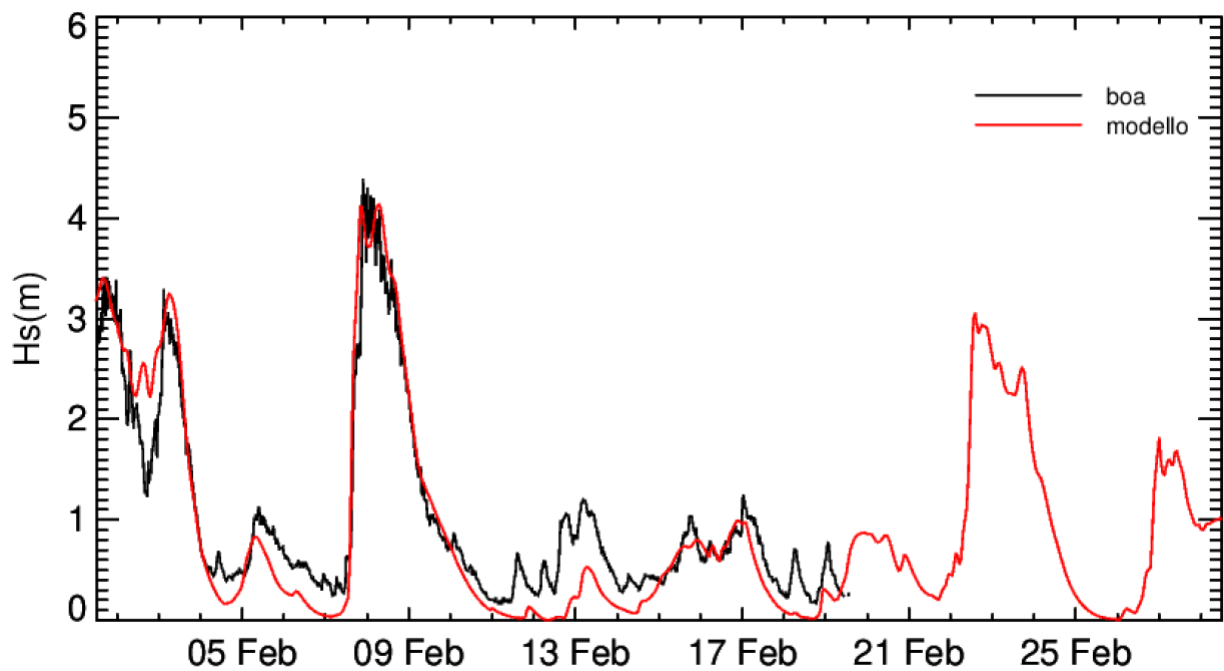


Figura 15 – Confronto dell'altezza significativa ricavata dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Monopoli, per il mese febbraio 2022.

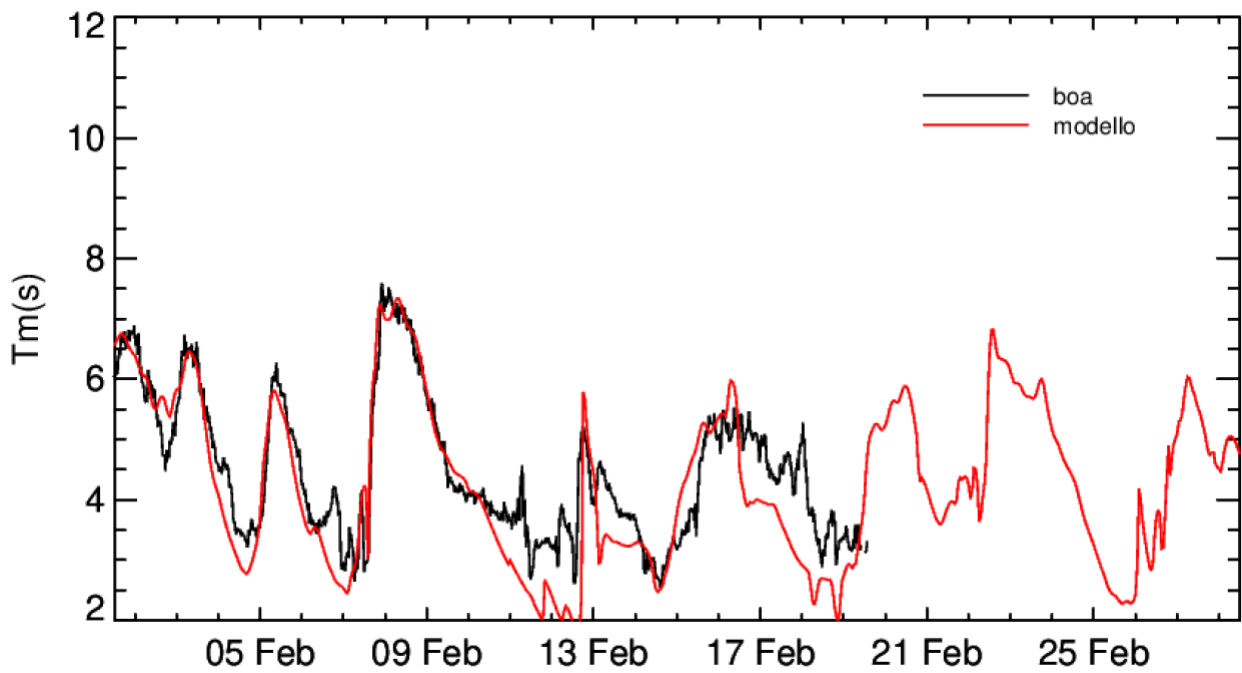


Figura 16 – Confronto del periodo medio dell'onda ricavato dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Monopoli, per il mese febbraio 2022.

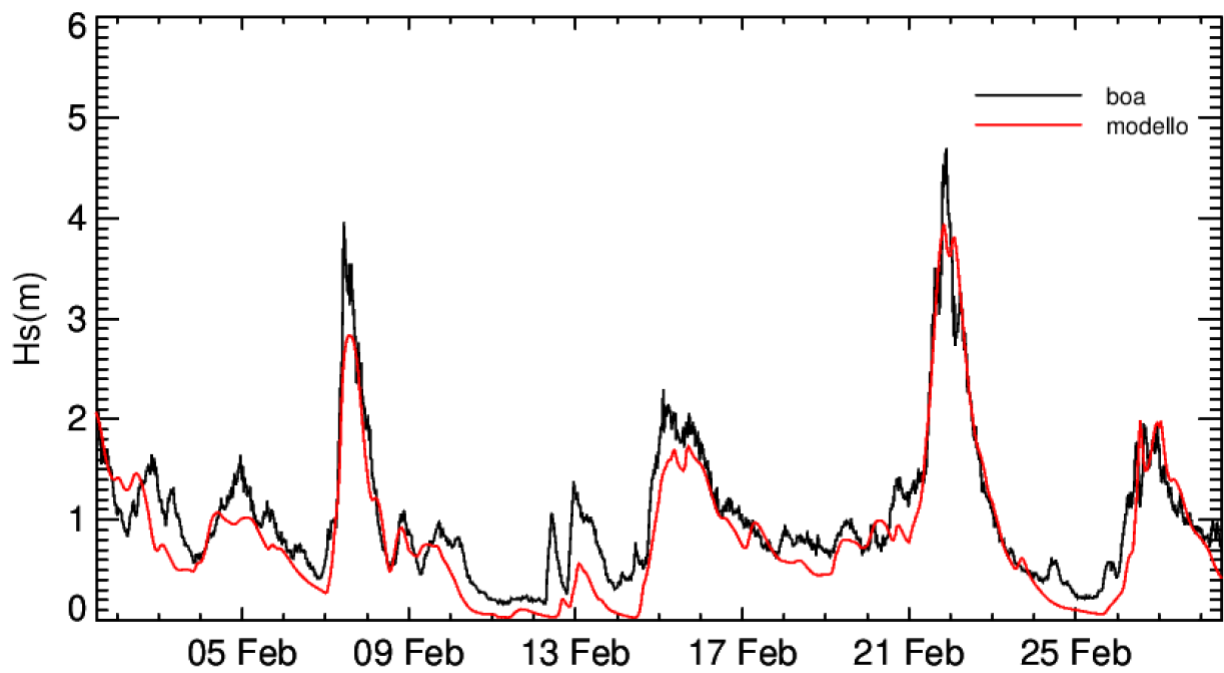


Figura 17 – Confronto dell'altezza significativa ricavata dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Ponza, per il mese febbraio 2022.

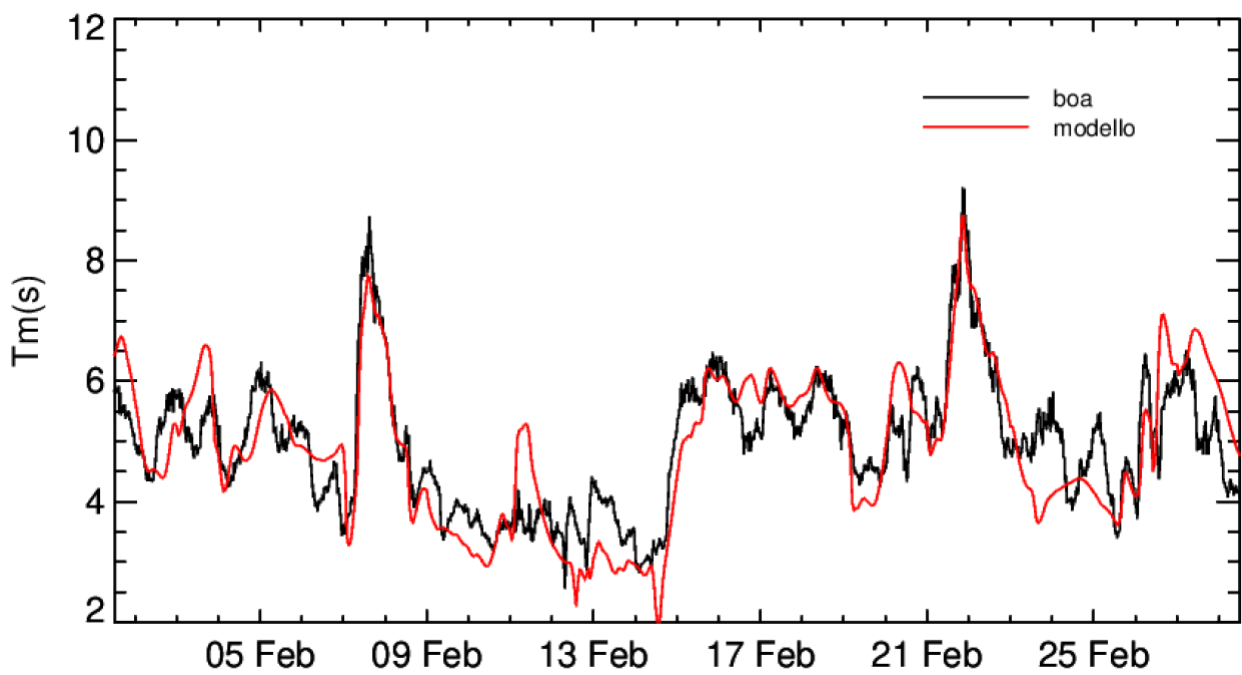


Figura 18 – Confronto del periodo medio dell'onda ricavato dal primo giorno di simulazione del sistema operativo con la boa di Ponza, per il mese febbraio 2022.

Nelle figure dalla 5 alla 18 sono mostrati, per tutte le boe disponibili, gli andamenti delle ampiezze dell'onda e del periodo medio per il primo giorno di previsione del modello operativo ed i corrispondenti valori registrati alle boe per il mese di febbraio 2022. In tutti i casi si può osservare che il modello segue molto bene le osservazioni, riproducendo i massimi registrati, per entrambe le variabili. Tra il 9 e il 14 febbraio, periodo di tempo caratterizzato da ampiezze limitate, in tutti i siti mostrati si osserva una sottostima dell'ampiezza probabilmente legata alla previsione meteorologica.

Analogamente a quanto fatto per il periodo di ottobre, anche per questi due mesi, il confronto delle altezze è stato effettuato anche rispetto ai dati satellitari. In questo caso erano disponibili per ciascun giorno le simulazioni relative ai successivi cinque giorni, tutti i dati relativi a ciascun mese sono stati aggregati e i confronti sono stati effettuati separatamente per ciascuno dei cinque giorni di ogni simulazione. Nelle Tabelle 9 e 10 sono riportate le statistiche relative.

Si può osservare che la correlazione dell'ampiezza delle onde con il valore da satellite si mantiene superiore a 0.8 nei primi 3 giorni della simulazione. Il valore del *bias* è sempre negativo, ma i risultati per il mese di febbraio risultano in migliore accordo con le misure rispetto a quelli di gennaio, con un *bias* che resta inferiore a 0.22 m fino all'ultimo giorno della previsione. Il valore della pendenza della retta di regressione, sempre minore di 1, conferma una leggera sottostima delle ampiezze da parte del modello.

Tabella 9 – statistiche relative al confronto delle altezze significative delle onde per ciascun giorno di previsione rispetto a tutti i dati satellitari considerati per il mese di gennaio 2022.

	Gennaio 2022			
	Bias	slope	Correlazione	Willmott
Giorno 1	-0.27	0.84	0.90	0.90
Giorno 2	-0.28	0.83	0.87	0.88
Giorno 3	-0.27	0.82	0.83	0.86
Giorno 4	-0.32	0.79	0.78	0.82
Giorno 5	-0.36	0.76	0.69	0.76

Tabella 10 – statistiche relative al confronto delle altezze significative delle onde per ciascun giorno di previsione rispetto a tutti i dati satellitari considerati per il mese di febbraio 2022.

	Febbraio 2022			
	Bias	slope	Correlazione	Willmott
Giorno 1	-0.18	0.88	0.92	0.93
Giorno 2	-0.18	0.87	0.90	0.91
Giorno 3	-0.16	0.88	0.85	0.89
Giorno 4	-0.16	0.88	0.80	0.85
Giorno 5	-0.22	0.83	0.68	0.76

2.7 Sito Web

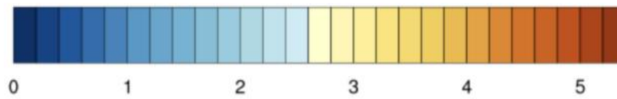
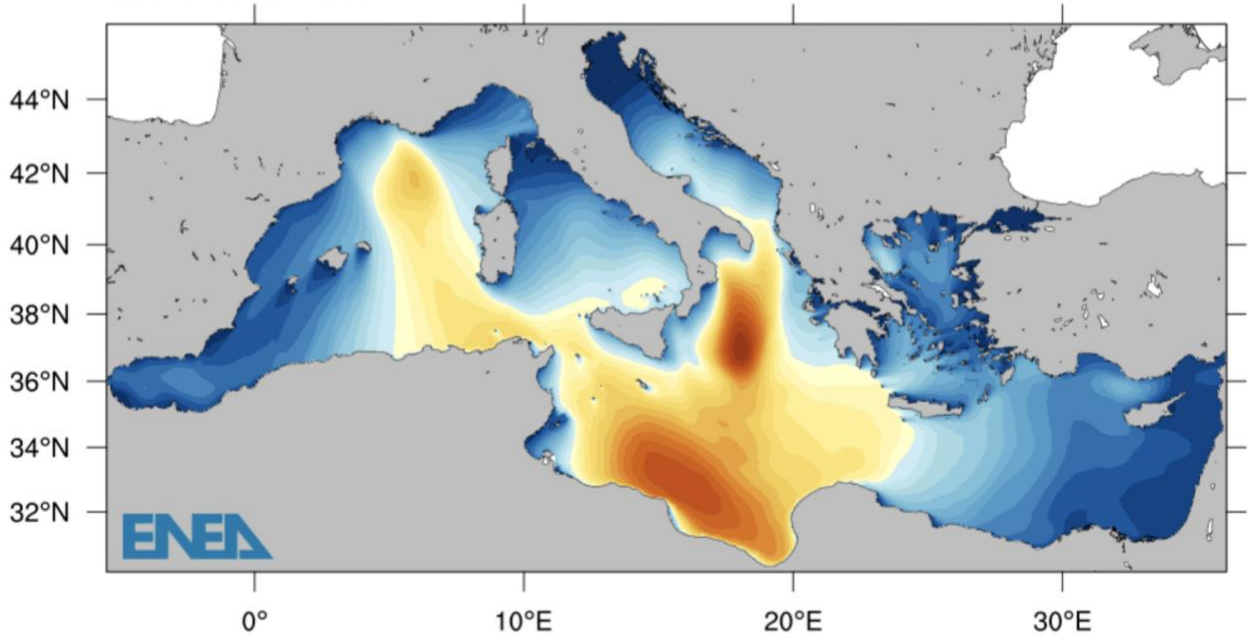
I risultati delle previsioni operative effettuate con il modello WW3 sono pubblicati giornalmente sul web, sulla pagina <https://giotto.casaccia.enea.it/ww3med>. Il sito è organizzato con menù a tendina che permettono la scelta delle varie opzioni, è possibile visualizzare i dati di altezza significativa delle onde e di periodo medio per tutto il periodo coperto dalla previsione e su tutti i bacini, scegliendo di scalare i valori rispetto al massimo orario oppure selezionando una scala prefissata. È inoltre possibile navigare all'interno delle previsioni effettuate per i giorni precedenti; oltre alle immagini dei singoli tempi, è presente un video che contiene la sequenza delle immagini relative all'intera simulazione. Nelle Figure 19 e 20 sono riportati esempi della pagina web relativi rispettivamente al bacino Mediterraneo ed al sottobacino relativo all'area ad ovest della Sicilia.

Mediterranean Wave Forecast

Size: 0.8

Mediterranean Sea

Forecast valid for 23 Feb 2022 at 00h
Start 23 Feb 2022 at 00h



Significant wave height [m]

day	hour																							
23-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
24-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
25-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
26-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
27-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
28-02-2022	00																							

Figura 19 – Esempio di previsione di altezza significativa pubblicata sulla pagina web per il bacino Mediterraneo.

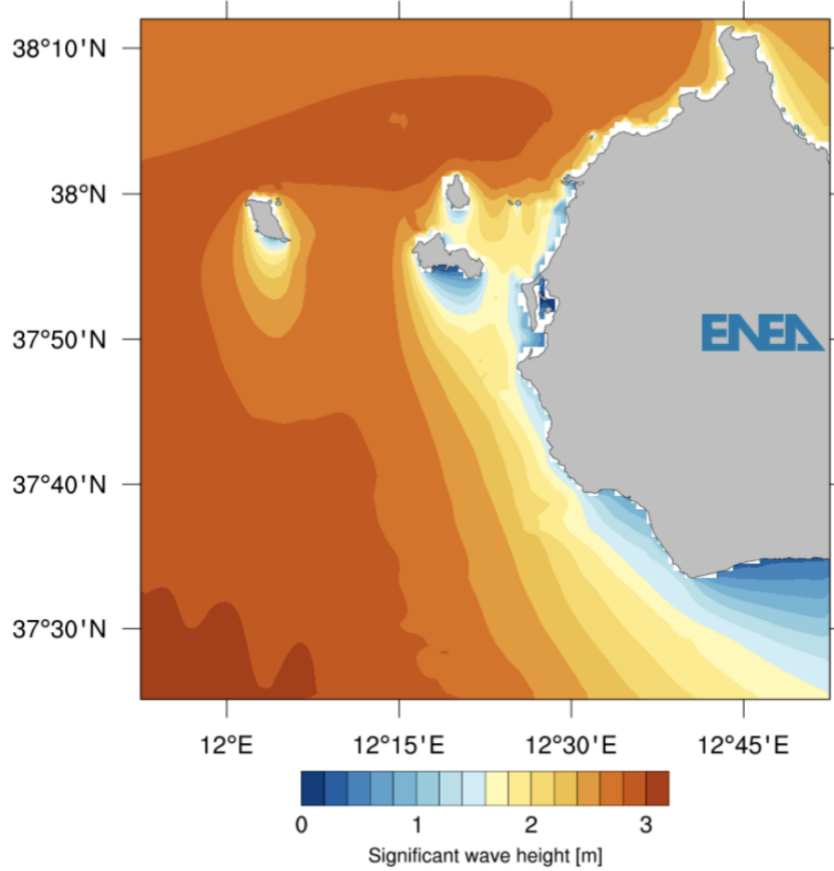
Mediterranean Wave Forecast

North-West Sicily wave height scaled on hourly values images

Size: 0.5

North-West Sicily

Forecast valid for 23 Feb 2022 at 00h
Start 23 Feb 2022 at 00h



<M <W <D **23-02-2022 at 00 h** >M
init on 20220223 >D >W >M

day	hour																							
23-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
24-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
25-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
26-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
27-02-2022	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
28-02-2022	00																							

Figura 20 – Esempio di previsione di altezza significativa pubblicata sulla pagina web per il sottobacino che include l'area a Nord-Ovest della Sicilia.

3 Conclusioni

Nel presente documento è descritto il nuovo sistema operativo per la simulazione delle onde nel mar Mediterraneo e in 9 sottobacini delle acque italiane. L'intero sistema è realizzato a partire dal modello di onde WAVEWATCHIII ed utilizza come forzante i dati di vento provenienti dal sistema operativo SKIRON dell'Università di Atene. Una prima validazione del modello è stata effettuata su due periodi limitati di tempo, rispettivamente tra gennaio e febbraio 2019 e ad ottobre 2021, utilizzando per il primo periodo dati provenienti da una boa installata a Civitavecchia da RSE e per il secondo dati relativi alle misure altimetriche effettuate lungo tracce satellitari disponibili dal sito COPERNICUS. Per il periodo gennaio-febbraio 2022, in cui il sistema ha funzionato in modalità operativa, è stata effettuata una validazione utilizzando tutte le boe della rete Ondametrica Nazionale e i dati satellitari. I risultati sono stati confrontati separatamente per i cinque giorni delle previsioni, ed hanno mostrato un buon accordo con le misure sperimentali anche nelle giornate successive alla prima.

4 Riferimenti bibliografici

1. The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG), 2019: User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices.
2. Tolman, H. L. (1991), A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents, *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 782–797
3. Tolman, H. L. (2009), User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14, Tech. Note 276, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 194 pp. + Appendices.
4. GEBCO_2021
- https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2021/
5. G. Kallos, "The regional weather forecasting system SKIRON", Proceedings, symposium on regional weather prediction on parallel computer environments, 15-17 October 1997, Athens p. 9.
6. Z.I. Janjic, "The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes, *Mon. Weather Rev.*, 122, (1994) pp. 927-945.
7. Ardhuin, F., W. E. Rogers, A. V. Babanin, J. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Queffelec, J. Lefevre, L. Aouf and F. Collard, 2010: Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 1,917–1,941.
8. Hasselmann, S., K. Hasselmann, J. H. Allender, and T. P. Barnett (1985), Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wavemodels, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1,378–1,391
9. Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A(8)*, 12, 95 pp.
10. Battjes, J. A., and J. P. F. M. Janssen (1978), Energy loss and set-up due to breaking of random waves, in *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng.*, pp. 569–587, ASCE.