



Implementazione modello operativo accoppiato onde- correnti

A. Carillo, MV. Struglia G. Pisacane, R. Iacono, E. Lombardi, G.
Sannino, E. Napolitano

IMPLEMENTAZIONE MODELLO OPERATIVO ACCOPPIATO ONDE-CORRENTI

A. Carillo, MV. Struglia G. Pisacane, R. Iacono, E. Lombardi, G. Sannino, E. Napolitano

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: *LA1.17 Implementazione modello operativo accoppiato onde-correnti*

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.....	5
2.1 DESCRIZIONE DEI SISTEMI OPERATIVI DI ONDE E CORRENTI	5
2.2 INTERAZIONE ONDE CORRENTI.....	6
2.3 TEST CON IL MODELLO DI ONDE WAVEWATCHIII	7
3 CONCLUSIONI	24
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	25

Sommario

Come previsto nel Piano Triennale del progetto, sono stati ultimati i lavori della linea di attività 1.17 che prevedeva di valutare la possibilità di accoppiare il modello di previsione del moto ondoso con il modello di circolazione, al fine di migliorare le previsioni. Con il modello di onde WAVEWATCHIII è stata effettuata una valutazione dell'effetto della circolazione superficiale sull'ampiezza e il periodo delle onde in situazioni diverse, rilevando una differenza non significativa a scala del bacino Mediterraneo. Anche confronti puntuali relativamente a misure di ampiezza d'onda e di periodo misurati alle boe, hanno mostrato solo minime differenze per l'introduzione dell'effetto della corrente.

1 Introduzione

Il rendimento dei sistemi di conversione delle onde in energia del tipo *point-absorber*, come ad esempio il prototipo PEWEC, sviluppato da ENEA all'interno degli Accordi di Programma precedenti, può utilizzare le previsioni del moto ondoso per la regolazione di taluni parametri di esercizio che ne permettono una ottimizzazione del rendimento.

Allo scopo di fornire un supporto ai convertitori di energia di questo tipo, è stato sviluppato nel corso di precedenti Accordi di Programma un sistema operativo di previsione delle onde per il bacino Mediterraneo. Questo sistema, operativo dal 2013, è stato recentemente aggiornato utilizzando il modello di onde WAVEWATCHIII, che costituisce attualmente un riferimento della comunità scientifica e viene continuamente aggiornato con l'introduzione di nuove parametrizzazioni.

Sempre all'interno delle attività svolte dall'ENEA all'interno degli Accordi di Programma, è stato realizzato nel corso del 2015 un sistema di previsione della circolazione del mare ad alta risoluzione per l'intero bacino Mediterraneo e per il Mar Nero, in grado di fornire le correnti superficiali alla stessa risoluzione temporale di un'ora del modello di onde.

Poiché le correnti sono in grado di influenzare la crescita ed il decadimento delle onde, modificandone sia l'ampiezza che il periodo, sono state effettuate delle simulazioni specifiche allo scopo di valutare l'opportunità di accoppiare i due sistemi operativi.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Descrizione dei sistemi operativi di onde e correnti

Il Laboratorio di Modellistica Climatica ed Impatti dell'ENEA ha realizzato un sistema di previsione dello stato del mare relativo al bacino Mediterraneo, basato sul modello di onde WAVEWATCHIII. Il sistema operativo, descritto in dettaglio in [1], è costituito da un modello dell'intero bacino alla risoluzione spaziale di $1/32^\circ$ e da 9 modelli per sottobacini dei mari italiani alla risoluzione di $1/128^\circ$. Il modello di onde utilizzato è il modello WAVEWATCHIII (WW3), versione v6.07 [2]. WW3 è un modello spettrale di terza generazione che risolve l'equazione di bilancio della densità spettrale, funzione di numero d'onda e direzione. Il modello è stato inizialmente sviluppato presso la Delft University of Technology [3] e successivamente presso lo US National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP) [4]; ed è attualmente divenuto un *framework* modellistico di riferimento che include tutti gli sviluppi più recenti nel campo della dinamica delle onde.

Il sistema è stato messo a punto nel corso del 2021 ed è operativo nell'attuale versione dal gennaio 2022; effettua giornalmente previsioni dello stato del mare per i cinque giorni successivi, memorizzando le principali variabili che caratterizzano il moto ondoso su tutti i punti della griglia di calcolo con frequenza oraria.

Un sistema di previsione della circolazione basato sul modello MITgcm [5], anch'esso sviluppato all'interno delle attività dell'Accordo di Programma, è operativo dal 2015 presso lo stesso laboratorio dell'ENEA [6, 7]. Questo modello copre l'intero bacino Mediterraneo e il Mar Nero ad una risoluzione regolare di $1/48^\circ$ nella parte centrale del dominio di calcolo e con risoluzioni significativamente più elevate negli stretti di Gibilterra e nel sistema degli stretti turchi, allo scopo di simulare al meglio gli scambi con l'oceano Atlantico e tra il Mediterraneo e il Mar Nero. Un'altra caratteristica significativa del modello è rappresentata dall'introduzione diretta degli effetti della componente laterale della marea, che dall'oceano Atlantico si propaga all'interno del bacino, e della *equilibrium tide* che agisce direttamente sul bacino. Il modello è stato validato tramite il confronto con dati sperimentali [8] e fornisce quotidianamente le previsioni per i cinque giorni successivi.

I forzanti del modello di onde e del modello di circolazione sono ricavati dai campi delle variabili atmosferiche prodotte dal sistema operativo SKIRON, sviluppato dall'Università di Atene, basato sul modello ad area limitata Eta/NCEP [9]. Il modello di onde utilizza esclusivamente i campi di vento superficiale mentre il modello di circolazione necessita anche delle variabili per il calcolo dei flussi di calore ed energia. I campi in input, alla risoluzione spaziale di 0.05° , sono disponibili con frequenza oraria.

Oltre ai forzanti superficiali forniti dal modello atmosferico, il modello di circolazione necessita di condizioni laterali costituite dai valori di altezza del livello del mare, salinità e temperatura al bordo del dominio atlantico. Tali dati sono ricavati dalle previsioni della circolazione prodotte operativamente dal *Mediterranean Forecasting System* (MFS) e disponibili sul portale Copernicus (www.copernicus.eu). Una volta alla settimana, inoltre, i campi tridimensionali vengono inizializzati utilizzando i campi prodotti dal modello MFS e viene eseguita una simulazione in cui i forzanti superficiali sono ricavati dai campi atmosferici di analisi relativi ai nove giorni precedenti quello di inizio della previsione.

2.2 Interazione onde correnti

Le onde del mare possono essere descritte attraverso le loro componenti spettrali, definendo il vettore numero d'onda k , la direzione di propagazione θ , perpendicolare alla cresta dell'onda, e le frequenze. Nel caso si considerino gli effetti delle correnti sulle onde, si distingue tra la frequenza σ ($=2\pi f_r$) nel sistema di riferimento in movimento con la corrente, e la frequenza assoluta ω ($=2\pi f_a$) osservata in un sistema fisso. Nel limite in cui le scale di variazione delle profondità e della corrente sono molto più lunghe di quelle delle onde, si può usare l'approssimazione lineare ottenendo la relazione di dispersione:

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

La relazione tipo Doppler lega la frequenza assoluta al numero d'onda

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

d rappresenta la profondità media dell'acqua e U è la velocità della corrente. Nel caso di onde irregolari la varianza della superficie del mare è descritta dallo spettro densità di varianza dell'elevazione F , detto comunemente spettro di energia ed è una funzione di tutti i parametri di fase indipendenti. Nel caso si possa utilizzare la relazione lineare di dispersione si utilizzano solo due parametri di fase e lo spettro istantaneo diventa bidimensionale. Il modello WAVEWATCHIII si basa sullo spettro funzione di numero d'onda e direzione.

In presenza di correnti, l'energia di un pacchetto di onde non si conserva a causa del trasferimento di energia da parte della corrente, si conserva invece l'azione dell'onda definita come $N(k, \theta) \equiv F(k, \theta)/\sigma$. L'equazione di propagazione delle onde può essere scritta, in coordinate cartesiane, come:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma}$$

dove x è il vettore posizione e \dot{x} il vettore velocità di gruppo, S rappresenta l'effetto di tutti i termini sorgente che includono sia il trasferimento di energia dal vento che i termini dissipativi.

Quando le onde interagiscono con le correnti superficiali le velocità di propagazione possono essere scritte come:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= c_g + U \\ \dot{k} &= -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \\ \dot{\theta} &= -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \end{aligned}$$

Dove s è la coordinata nella direzione dell'onda e m quella nella direzione perpendicolare. La corrente U ha quindi effetto sulle onde attraverso quattro diversi meccanismi: la modifica della velocità di avvezione che è la somma della velocità di gruppo dell'onda e della velocità della corrente, la modifica della direzione di propagazione $\dot{\theta}$ e del numero d'onda \dot{k} ; infine il termine sorgente è funzione della velocità del vento rispetto alla velocità della corrente.

2.3 Test con il modello di onde WAVEWATCHIII

Sono state effettuate coppie di simulazioni forzando rispettivamente il modello di onde con i soli campi di vento o introducendo anche l'effetto della velocità superficiale, ricavata dal sistema operativo di circolazione. In particolare, le due componenti orizzontali della velocità nel primo livello del modello di circolazione vengono interpolate dalla griglia a $1/48^\circ$ sulla griglia del modello di onde e fornite in input con frequenza oraria. Per il confronto sono stati utilizzati i primi giorni delle simulazioni effettuate per il periodo dal 1 al 16 ottobre 2021.

Una prima validazione dell'ampiezza significativa delle onde è stata effettuata utilizzando i dati di altezza provenienti dalle misure altimetriche da satellite. In particolare sono stati scaricati dal sito COPERNICUS i dati lungo le tracce satellitari *near-real-time* relativi alle missioni Jason-3, Sentinel-3[°], Sentinel-3B, Cryosat-2, SARAL/AltiKa, CFOSAT. I dati satellitari sono stati confrontati con i valori nel punto di griglia ed al tempo più vicino, senza alcuna interpolazione spaziale o temporale. Per ciascuna simulazione il confronto è stato effettuato solo per il primo giorno simulato, utilizzando tutte le tracce disponibili.

In tabella 1 è riportato il confronto, per ciascun giorno, delle principali statistiche calcolate sulle due serie di dati.

Tabella 1 – Statistiche relative al confronto tra le altezze significative per il primo giorno di simulazione e i valori satellitari

Giorno	Simulazione	Media satelliti	Bias	Slope	Correlazione	indice Willmott
1	Senza corrente	1.17	-0.26	0.79	0.89	0.88
	Con corrente		-0.27	0.79	0.89	0.88
2	Senza corrente	1.07	-0.37	0.68	0.84	0.80
	Con corrente		-0.39	0.67	0.84	0.79
3	Senza corrente	0.98	-0.22	0.79	0.85	0.87
	Con corrente		-0.23	0.78	0.85	0.86
4	Senza corrente	1.34	-0.23	0.82	0.84	0.88
	Con corrente		-0.24	0.81	0.84	0.88
5	Senza corrente	1.27	-0.23	0.82	0.81	0.86
	Con corrente		-0.23	0.81	0.82	0.87
6	Senza corrente	1.48	-0.35	0.79	0.93	0.92
	Con corrente		-0.36	0.78	0.93	0.92
7	Senza corrente	1.78	-0.26	0.86	0.95	0.95
	Con corrente		-0.29	0.84	0.94	0.94
8	Senza corrente	1.35	-0.13	0.91	0.90	0.94
	Con corrente		-0.15	0.89	0.90	0.93
9	Senza corrente	1.04	-0.14	0.86	0.78	0.84
	Con corrente		-0.15	0.85	0.78	0.84
10	Senza corrente	1.00	-0.16	0.82	0.82	0.86
	Con corrente		-0.17	0.81	0.82	0.86
11	Senza corrente	1.06	-0.15	0.83	0.69	0.80
	Con corrente		-0.16	0.82	0.69	0.80
12	Senza corrente	1.00	-0.08	0.91	0.74	0.85
	Con corrente		-0.10	0.89	0.74	0.84
13	Senza corrente	1.26	-0.20	0.84	0.94	0.95
	Con corrente		-0.21	0.82	0.94	0.95
14	Senza corrente	1.48	-0.20	0.85	0.84	0.90
	Con corrente		-0.21	0.84	0.84	0.89
15	Senza corrente	1.98	-0.19	0.92	0.94	0.97
	Con corrente		-0.20	0.91	0.95	0.97
16	Senza corrente	1.51	-0.20	0.88	0.92	0.94
	Con corrente		-0.21	0.87	0.92	0.94

Si può osservare che i parametri statistici risultano praticamente identici tra le due simulazioni, con e senza l'effetto delle correnti, per ciascun giorno. I valori della previsione risultano in buon accordo con le misure, con un bias negativo intorno ai 20 cm, una correlazione in media uguale a 0.85 e inferiore a 0.80 solo tre giorni. Anche l'indice di Willmott (Willmott, 1982) ha un valore medio prossimo a 0.9 e risulta quasi sempre ben superiore a 0.8.

Per verificare l'effetto in prossimità della costa, i risultati ottenuti con le due simulazioni sono stati confrontati anche con le misure fornite dalle boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON), gestita da ISPRA. Nella tabella 2 sono riportate le posizioni delle boe, nelle successive tabelle 3 e 4 sono riportati i valori delle statistiche, calcolate rispettivamente sui valori dell'ampiezza significativa e sul periodo medio, per il periodo dal 1° ottobre al 16 ottobre 2021 di entrambe le simulazioni.

Le analisi statistiche (tabella 3) mostrano per tutte le località dei buoni valori di correlazione, i valori del bias sono in generale intorno ai 20 cm, ad eccezione della boa di Ancona dove si ha una sottostima maggiore di 30 cm, comunque accompagnata da un ottimo valore della correlazione. Ottimi risultati si ottengono anche per i confronti con i periodi medi delle onde, in questo caso la pendenza della retta di regressione è in molte occasioni molto prossima all'unità. L'effetto dovuto all'introduzione delle correnti, anche in base al confronto con i valori delle boe, non sembra significativo.

Tabella 2 – 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

Tabella 3 – statistiche relative al confronto tra le altezze significative per il primo giorno di simulazione e i valori misurati alle boe della rete RON sul periodo 1-16 ottobre 2021.

boa	Simulazione	Media boa	Bias	Slope	Correlazione	indice Willmott
Alghero	Senza corrente	1.23	-0.26	0.80	0.91	0.92
	Con corrente		-0.32	0.77	0.93	0.92
Ancona	Senza corrente	1.39	-0.35	0.75	0.96	0.89
	Con corrente		-0.36	0.74	0.93	0.88
Crotone	Senza corrente	0.88	-0.06	0.99	0.90	0.93
	Con corrente		-0.08	0.96	0.89	0.93
La Spezia	Senza corrente	0.84	-0.28	0.80	0.94	0.94
	Con corrente		-0.26	0.80	0.94	0.94
Mazara del Vallo	Senza corrente	1.24	-0.07	0.94	0.90	0.94
	Con corrente		-0.13	0.89	0.90	0.89
Monopoli	Senza corrente	0.88	-0.03	0.99	0.83	0.86
	Con corrente		-0.09	0.92	0.84	0.90
Ponza	Senza corrente	1.08	-0.23	0.81	0.77	0.83
	Con corrente		-0.24	0.79	0.76	0.82

Tabella 4 – statistiche relative al confronto tra i periodi medi per il primo giorno di simulazione e i valori misurati alle boe della rete RON sul periodo 1-16 ottobre 2021.

boa	Simulazione	Media boa	Bias	Slope	Correlazione	indice Willmott
Alghero	Senza corrente	5.57	-0.42	0.92	0.86	0.90
	Con corrente		-0.44	0.92	0.88	0.91
Ancona	Senza corrente	4.81	-0.70	0.86	0.87	0.83
	Con corrente		-0.68	0.86	0.87	0.83
Crotone	Senza corrente	4.55	-0.35	0.92	0.79	0.86
	Con corrente		-0.29	0.93	0.80	0.87
La Spezia	Senza corrente	3.93	0.06	1.01	0.83	0.90
	Con corrente		0.58	1.11	0.70	0.80
Mazara del Vallo	Senza corrente	5.29	-0.53	0.90	0.82	0.83
	Con corrente		-0.52	0.90	0.79	0.82
Monopoli	Senza corrente	4.29	-0.23	0.94	0.73	0.84
	Con corrente		-0.38	0.90	0.69	0.79
Ponza	Senza corrente	4.69	0.05	1.01	0.77	0.86
	Con corrente		-0.03	0.99	0.72	0.83

Il sistema operativo per la previsione del moto ondoso è composto, oltre che da un modello del Mediterraneo alla risoluzione di $1/32^\circ$, anche da 9 modelli relativi a sottobacini, che ricevono le condizioni laterali dal modello del Mediterraneo. In questo caso le simulazioni vengono eseguite alla risoluzione di $1/128^\circ$. Tra questi sottobacini il più esteso copre l'area ad ovest della Sardegna, che rappresenta una delle zone più interessanti dal punto di vista della risorsa ondosa. Per verificare l'effetto delle correnti sulle onde alla scala inferiore, coppie di simulazioni sono state ripetute su questa area con e senza l'introduzione delle correnti. In figura 1 è riportato il confronto dell'andamento dell'ampiezza significativa dell'onda ricavata dal modello senza correnti con il valore misurato alla boa di Alghero per l'intero periodo di 16 giorni del mese di ottobre 2021. Nella Figura 2 è riportato il confronto relativo al modello con le correnti. Analogamente nelle successive figure 3 e 4 sono riportati i confronti degli andamenti relativi al periodo medio delle onde.

Il confronto mostra una buona correlazione degli andamenti simulati con il dato osservato, una ottima rappresentazione del picco maggiore, ma una contenuta sottostima dell'ampiezza per gran parte del periodo. La differenza tra le due simulazioni risulta minima, con una leggera diminuzione della sottostima del secondo picco presente il giorno 5 ed una migliore rappresentazione della fase discendente del picco maggiore, in particolare il giorno 8, nel caso si introducano le correnti. Anche le differenze tra gli andamenti relativi al periodo medio risultano molto limitate, con un'ottima rappresentazione del periodo in corrispondenza del massimo dell'ampiezza.

Per le ore 12 del giorno 8 ottobre, sono riportate nella figura 5 mappe per tutto il dominio di calcolo del modello di onde ad alta risoluzione, relative al campo di velocità della corrente e all'ampiezza significativa delle onde, nel caso sia incluso l'effetto della corrente. In figura 6 sono mostrate le mappe differenza tra le due simulazioni, sia per quanto riguarda l'ampiezza che il periodo medio. La corrente superficiale segue la costa propagandosi in direzione sud e determina prevalentemente una riduzione dell'ampiezza delle onde che raggiunge il massimo, di circa 30 cm, proprio nella zona in cui è posizionata la boa di Alghero. In questa zona i valori della corrente sono circa pari a 20 cm/s, e la direzione risulta parallela alla propagazione delle onde. La differenza nel periodo medio ha una distribuzione spaziale diversa rispetto a quella delle ampiezze, con valori per la maggior parte inferiori a 0.3 s.

Per verificare la differenza dell'effetto della velocità della corrente sulle onde tra le due simulazioni a diverse risoluzioni spaziali di $1/32^\circ$ e $1/128^\circ$, nella figura 7 sono mostrate le mappe differenza relative ad ampiezza e periodo per la stessa ora ricavate dalle simulazioni del Mediterraneo alla risoluzione di $1/32^\circ$. I risultati in figura 7 sono molto simili ai precedenti ma con valori massimi leggermente ridotti.

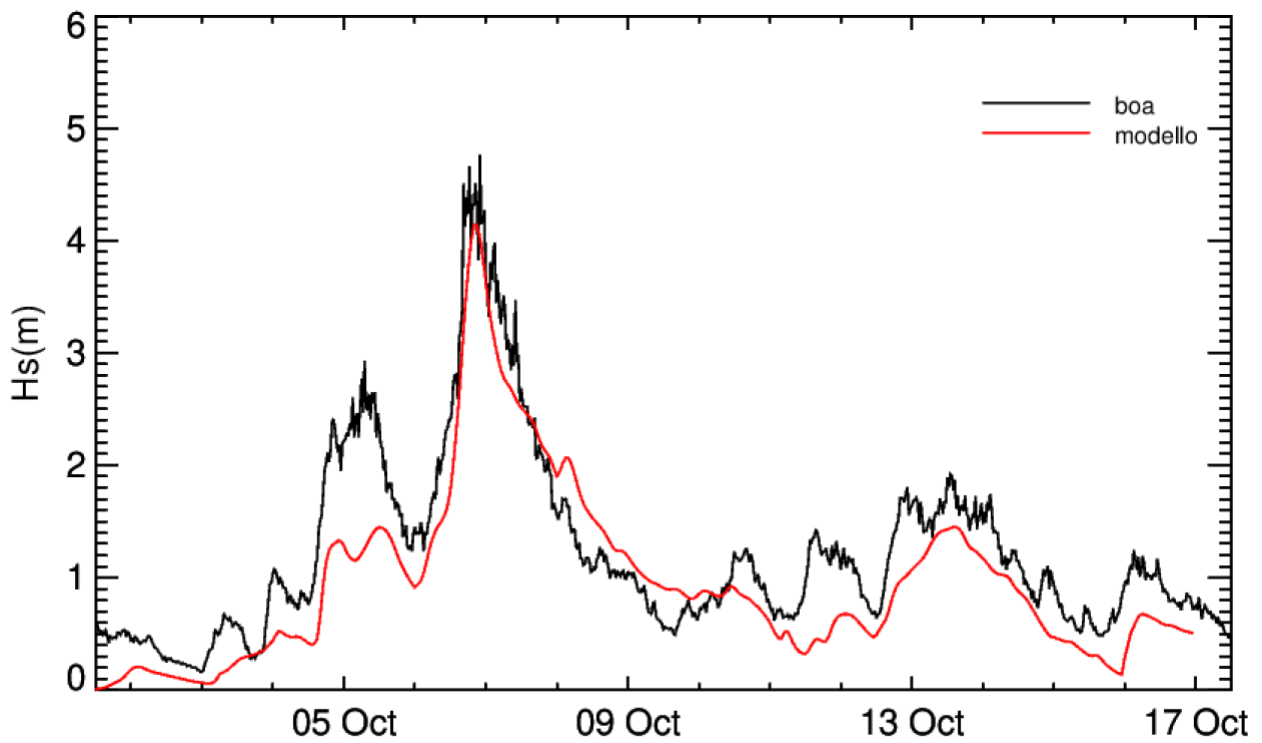


Figura 1 – Confronto dell'andamento dell'altezza significativa calcolata per la posizione della boa di Alghero con il valore misurato. Modello per la regione ad ovest della Sardegna senza introduzione delle correnti.

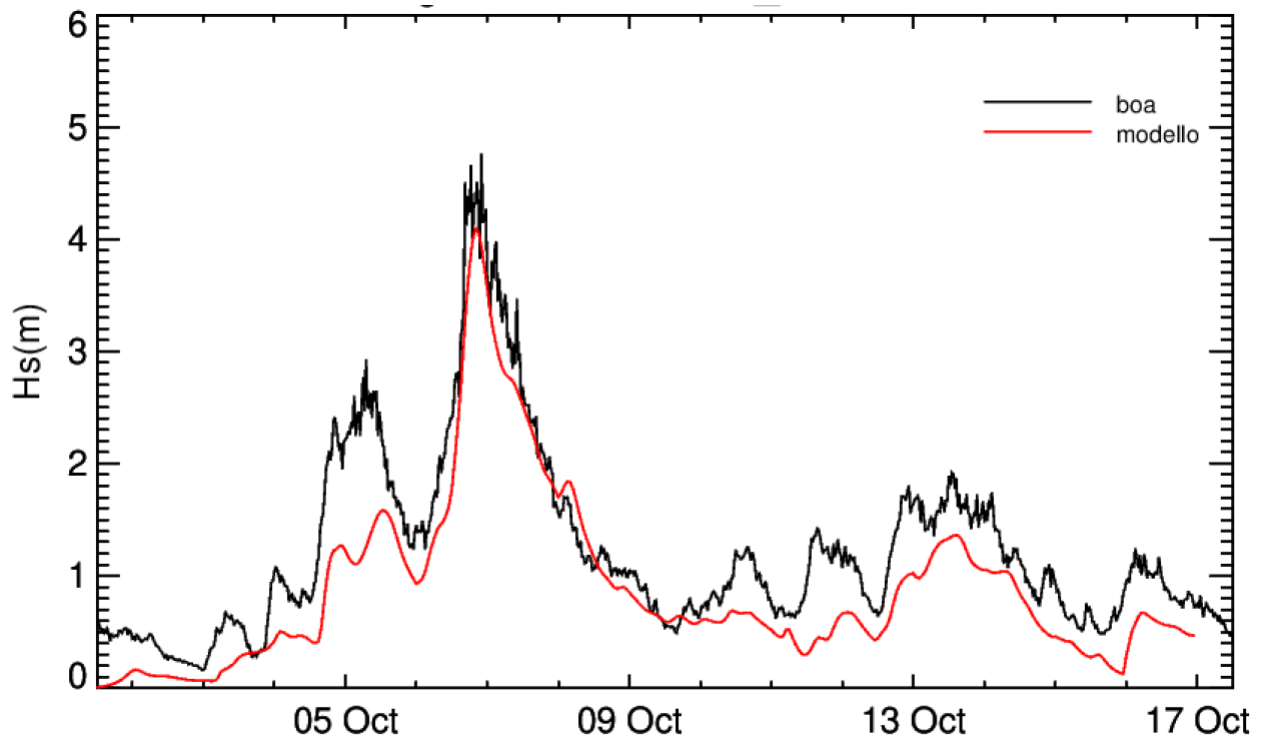


Figura 2 – Confronto dell'andamento dell'altezza significativa calcolata per la posizione della boa di Alghero con il valore misurato. Modello per la regione ad ovest della Sardegna con introduzione delle correnti.

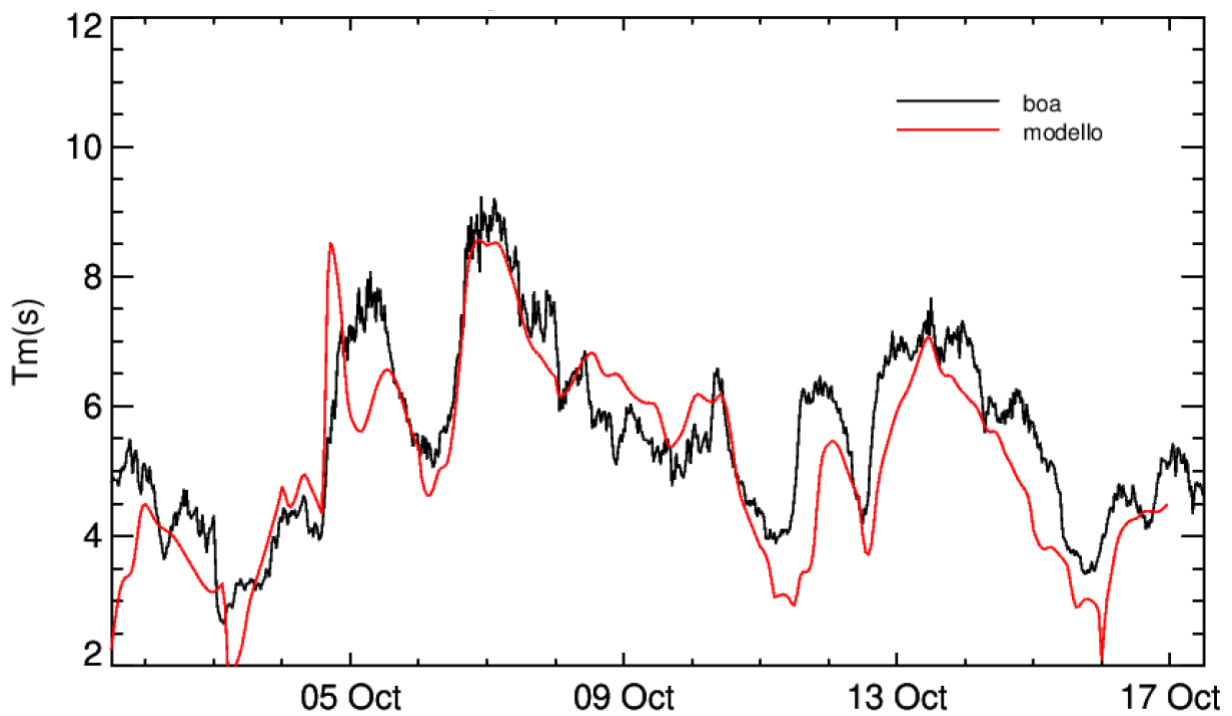


Figura 3—Confronto dell’andamento del periodo medio calcolato per la posizione della boa di Alghero con il valore misurato. Modello per la regione ad ovest della Sardegna senza introduzione delle correnti.

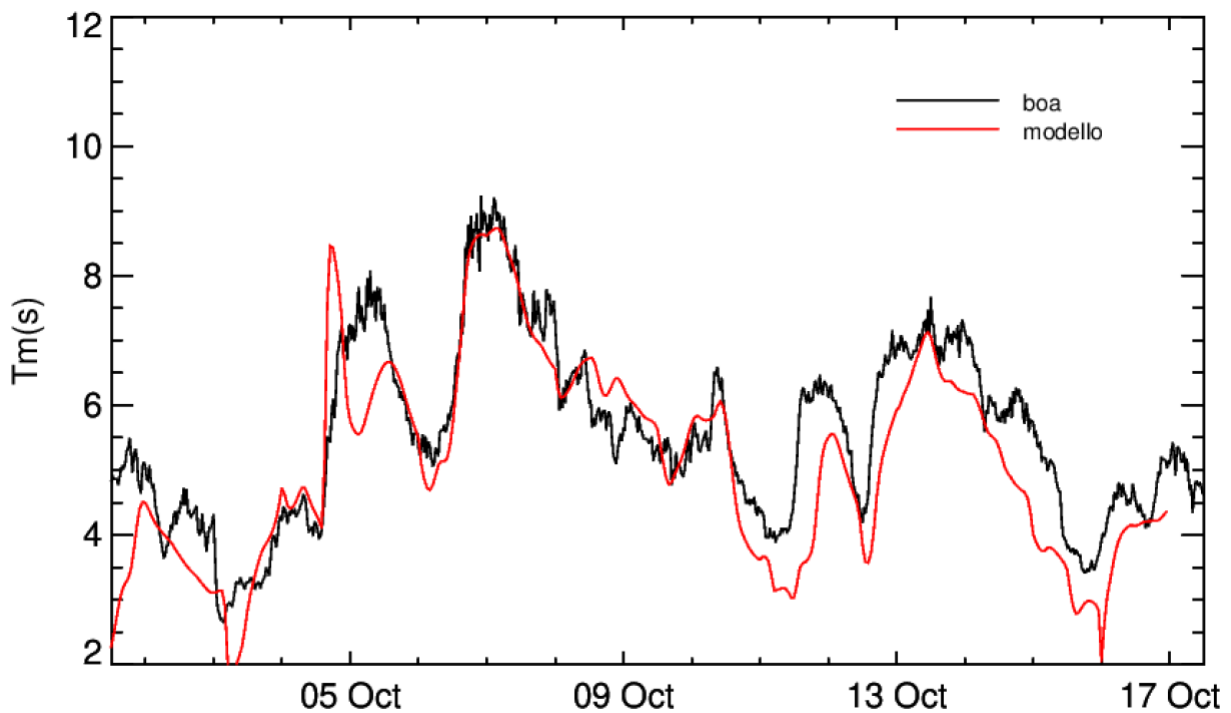


Figura 4 - Confronto dell’andamento del periodo medio calcolato per la posizione della boa di Alghero con il valore misurato. Modello per la regione ad ovest della Sardegna con introduzione delle correnti.

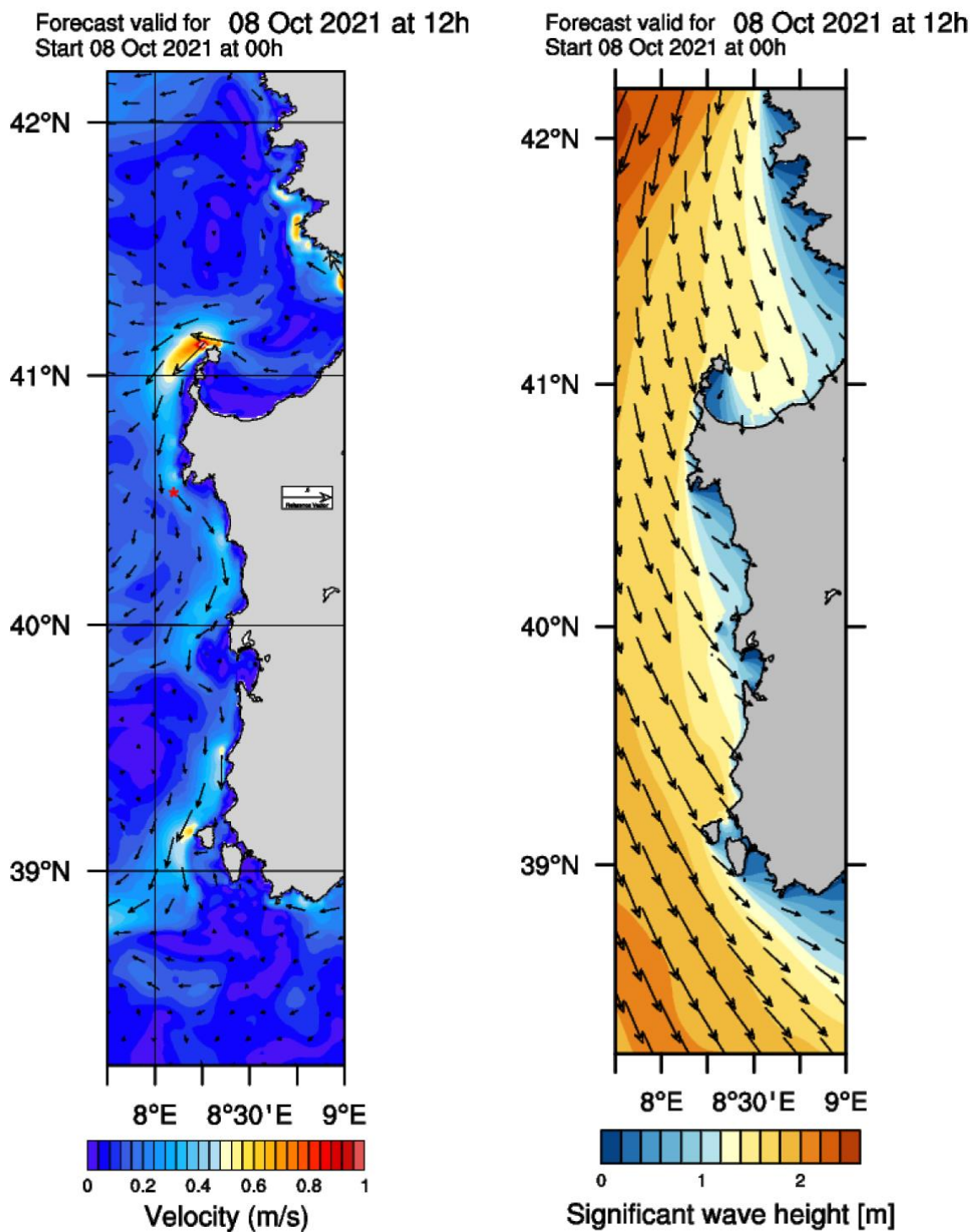


Figura 5 – Campo di velocità della corrente a), altezza significativa ricavata dalla simulazione che include l'effetto della corrente b) per il modello a 1/128° relativo alla Sardegna alle ore 12 del giorno 8 ottobre 2021. Nel pannello è segnata la posizione della boa di Alghero.

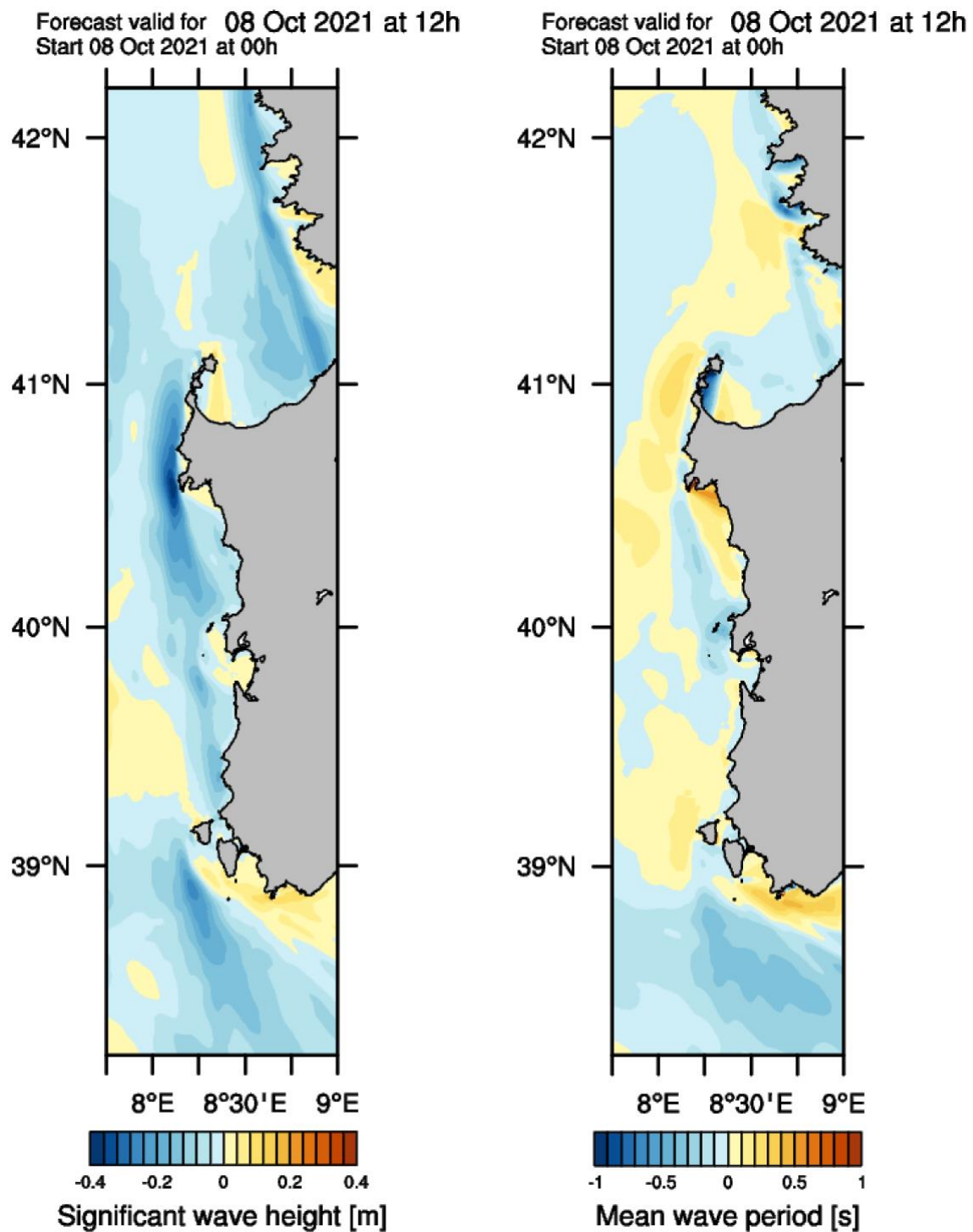


Figura 6 –Differenza dell'ampiezza delle onde tra la simulazione con e senza corrente a) differenza tra i periodi medi tra la simulazione con e senza corrente b) per il modello di onde a 1/128° relativo alla Sardegna. Previsione per il giorno 8 ottobre 2021 alle ore 12.

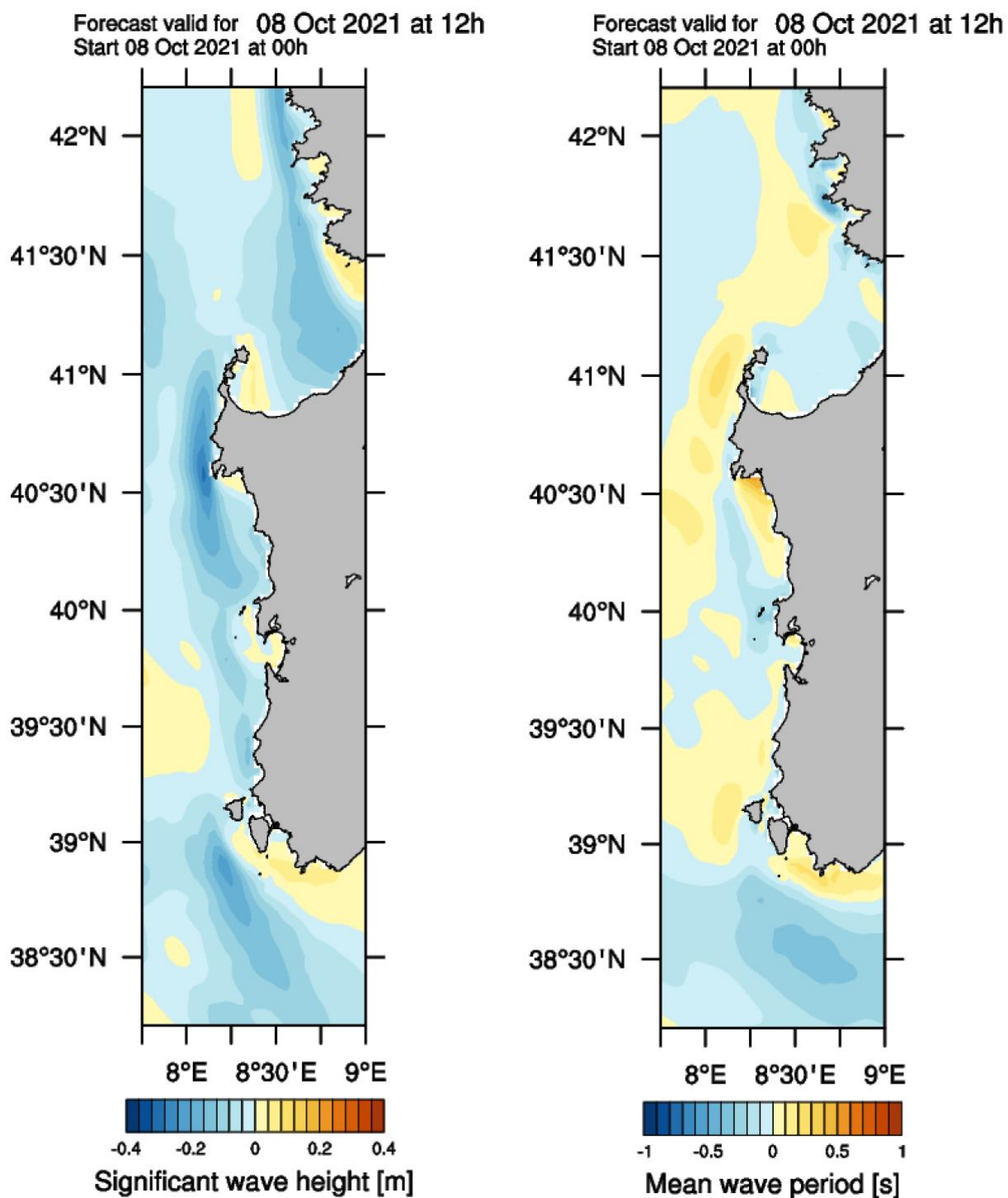


Figura 7 –Differenza dell'ampiezza delle onde tra la simulazione con e senza corrente a) differenza tra i periodi medi tra la simulazione con e senza corrente b) per il modello di onde a 1/32° per il bacino Mediterraneo. Previsione per il giorno 8 ottobre 2021 alle ore 12.

Tra le zone per le quali vengono effettuate simulazioni operative alla risoluzione di $1/128^\circ$ vi è anche la zona ad ovest della Sicilia, che costituisce insieme alla Sardegna una delle aree più interessanti per la produzione di energia dal moto ondoso, ed è caratterizzata da correnti costiere di intensità non trascurabile. La simulazione per quest'area è stata quindi ripetuta utilizzando le correnti provenienti dal sistema operativo della circolazione.

Un confronto è stato effettuato sui dati di questa simulazione con i dati provenienti dalla boa di Mazara del Vallo. Nella Figura 8 è riportato, per tutti i primi sedici giorni del mese di ottobre 2021, il confronto del valore di altezza significativa proveniente dalla simulazione in modalità operativa rispetto ai dati della boa. Nella Figura 9 il confronto per la simulazione in cui è stato introdotto l'effetto delle correnti. Si può osservare un ottimo accordo tra i valori simulati e quelli osservati per tutto il periodo in esame, con differenze minime tra le due simulazioni. Allo stesso modo non risultano differenze evidenti nel confronto tra i periodi medi delle onde riportati nelle figure 10 e 11.

Nelle successive figure sono riportate mappe per tutto il dominio di calcolo della simulazione ad alta risoluzione, relative al campo di velocità della corrente, all'ampiezza significativa delle onde nel caso sia incluso l'effetto della corrente, e mappe differenza tra le due simulazioni sia per quanto riguarda l'ampiezza che il periodo medio.

Nelle figure sono mostrati i valori alle ore 00 del giorno 7 ottobre, questo tempo è stato scelto perché corrispondente alla massima ampiezza delle onde alla boa. Si può osservare una vasta area a sud-ovest della Sicilia, poco a nord della posizione della boa, caratterizzata da valori di velocità della corrente che raggiungono 1 m/s. Nella stessa zona le onde raggiungono ampiezze prossime a 2 m e si propagano in una direzione ruotata verso est di quasi 45° rispetto alla corrente. L'introduzione delle correnti determina una riduzione dei valori delle ampiezze dell'ordine di 20 cm nella zona del massimo, le differenze nei valori del periodo medio presentano una analoga distribuzione spaziale.

Poiché le simulazioni della corrente includono i valori mareali, la stessa analisi è stata ripetuta ad una distanza di 6 ore dalla precedente. In questo caso le direzioni delle onde sono rimaste praticamente inalterate rispetto alle ore 0, mentre le correnti presentano una leggera rotazione verso ovest e una intensità significativamente ridotta. Le differenze nell'ampiezza delle onde hanno intensità analoghe a quelle del caso precedente, e raggiungono i valori massimi nella zona della boa.

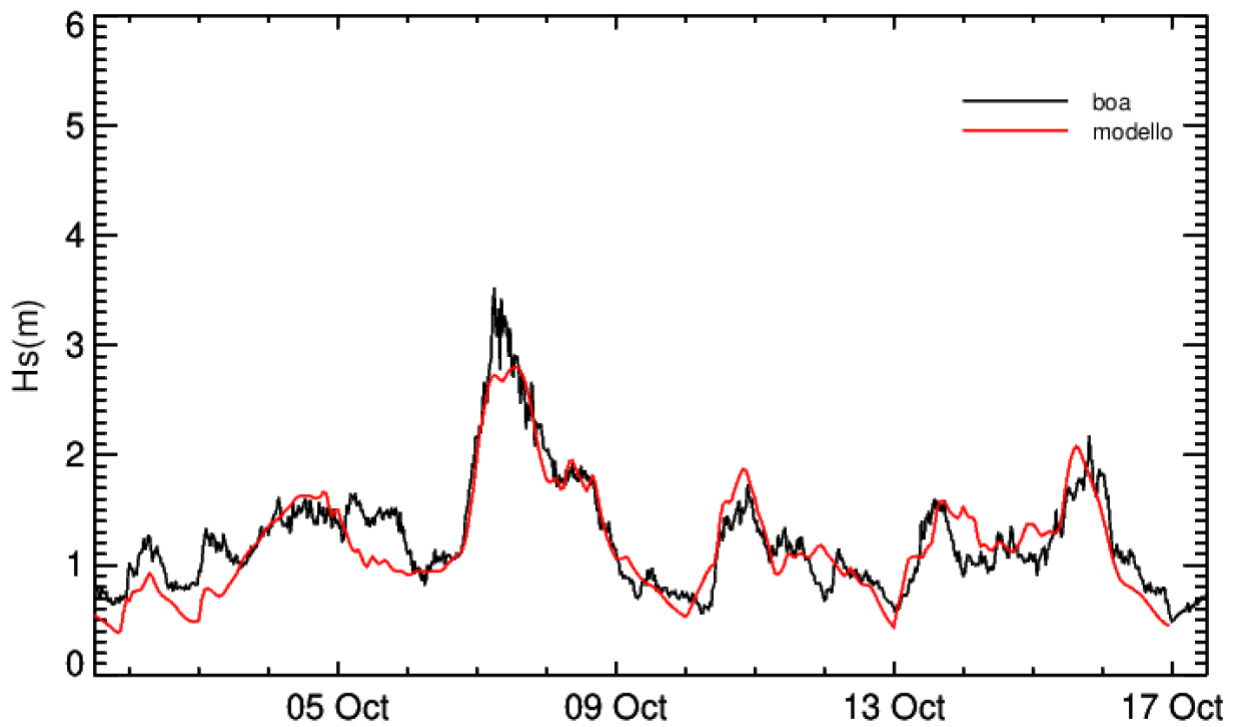


Figura 8 – Confronto dell’ampiezza significativa ricavata dalla simulazione operativa per la posizione della boa di Mazara e il valore misurato alla boa. Modello alla risoluzione di 1/128°.

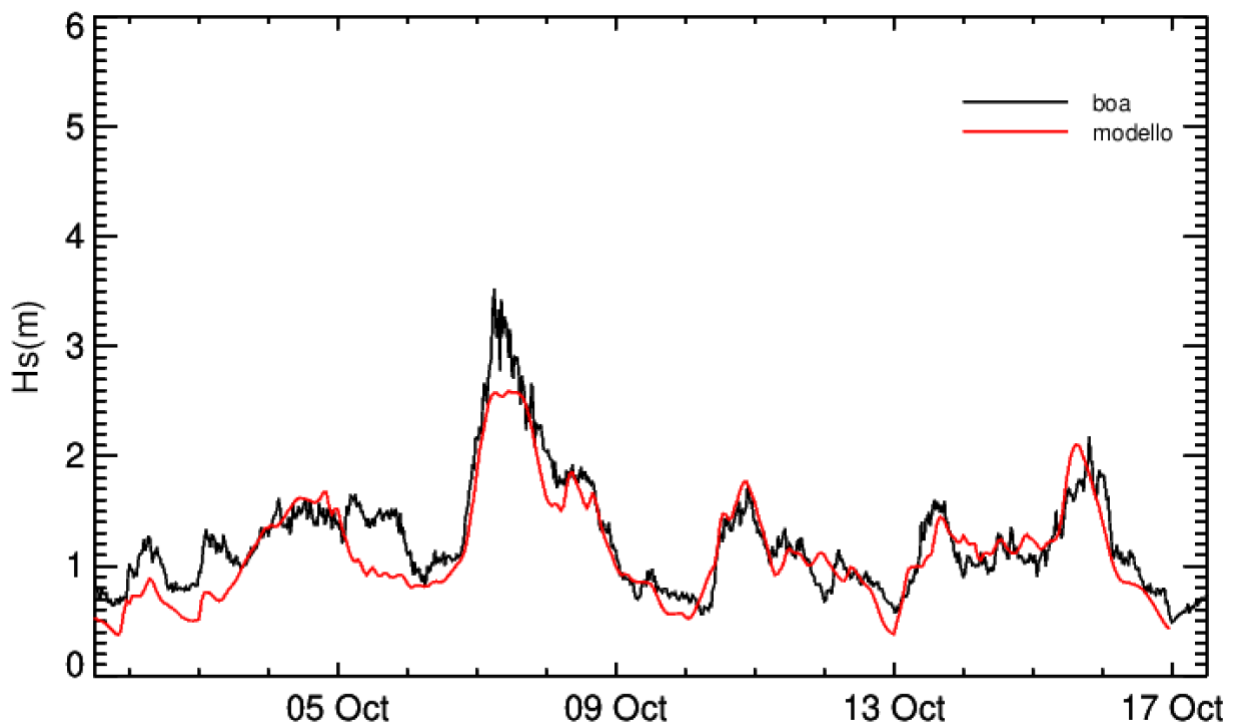


Figura 9 – Confronto dell’ampiezza significativa ricavata dalla simulazione ottenuta introducendo l’effetto della corrente per la posizione della boa di Mazara e il valore misurato alla boa. Modello alla risoluzione di 1/128°.

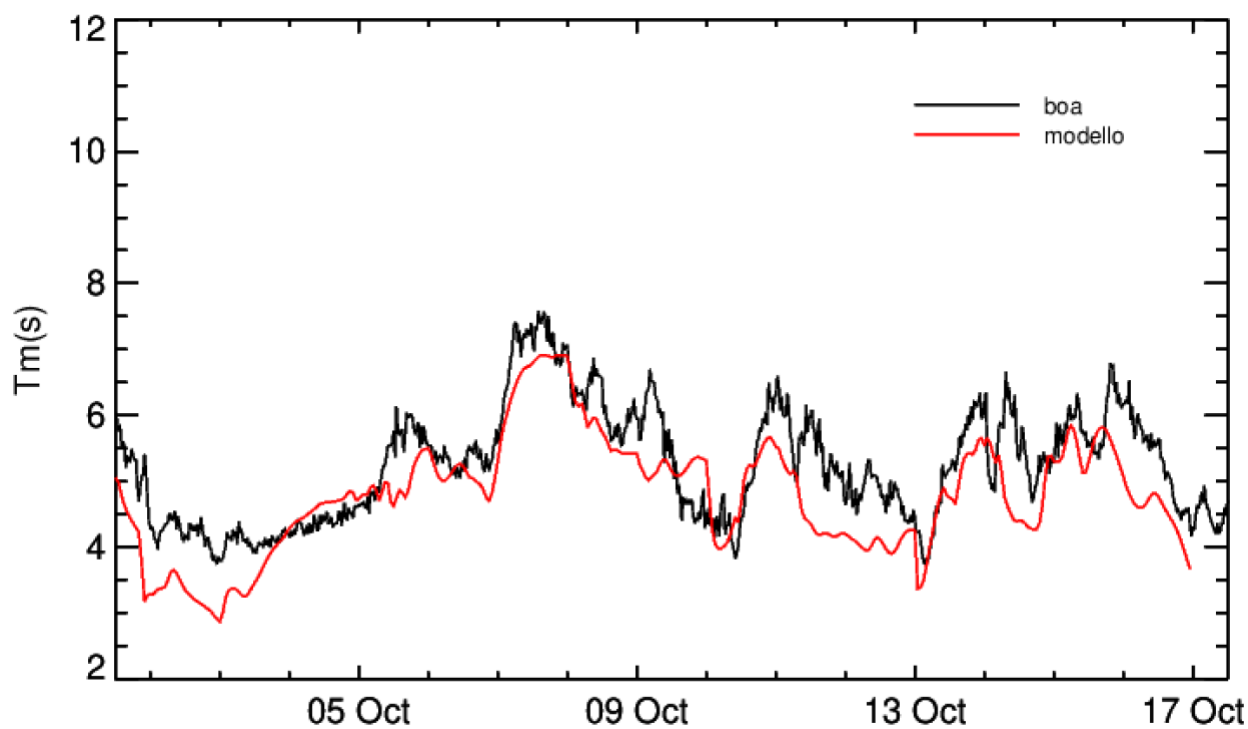


Figura 10 – Confronto del periodo medio ricavato dalla simulazione operativa per la posizione della boa di Mazara e il valore misurato alla boa. Modello alla risoluzione di $1/128^\circ$.

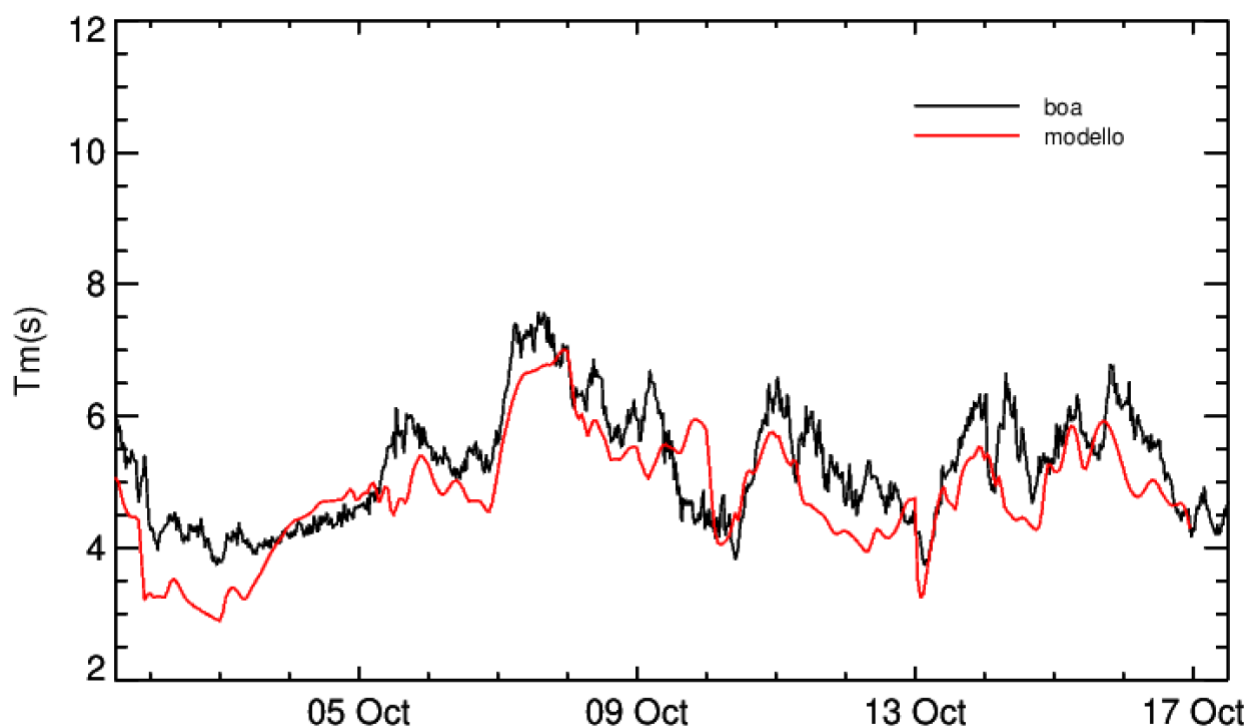
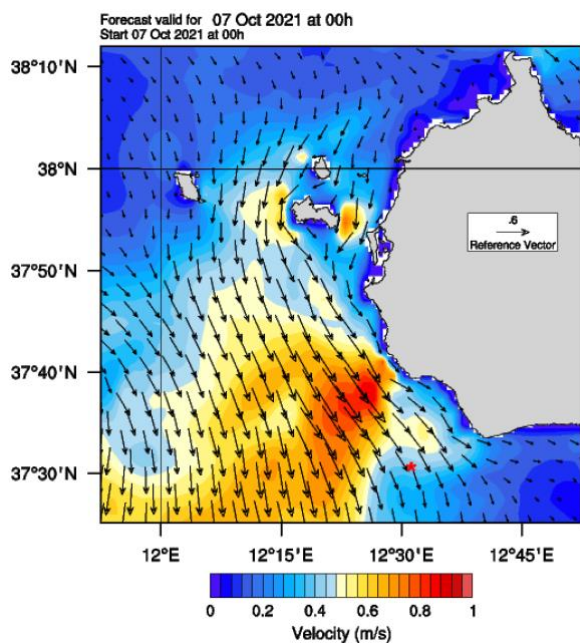
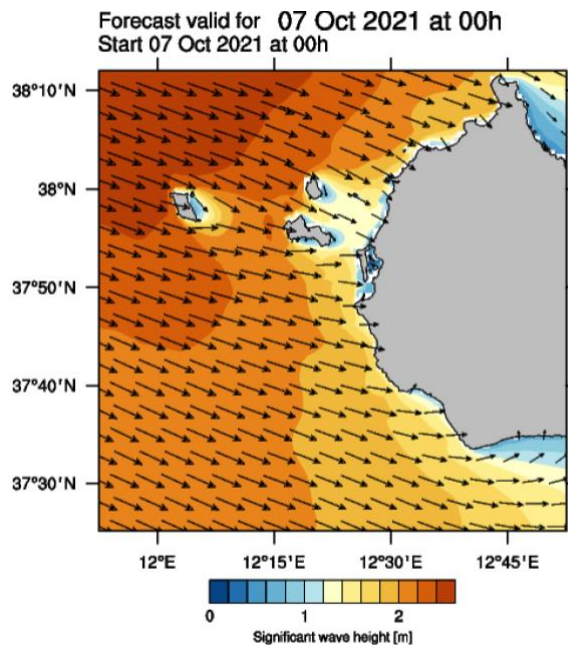


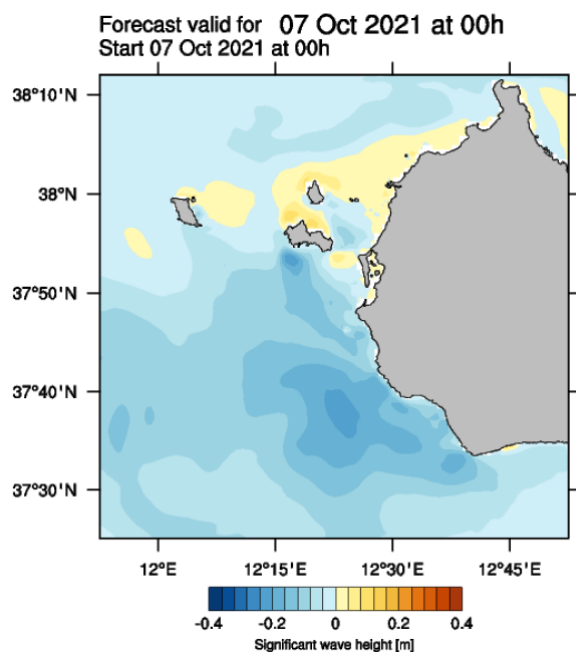
Figura 11 – Confronto del periodo medio ricavato dalla simulazione ottenuta introducendo l'effetto della corrente per la posizione della boa di Mazara e il valore misurato alla boa. Modello alla risoluzione di $1/128^\circ$.



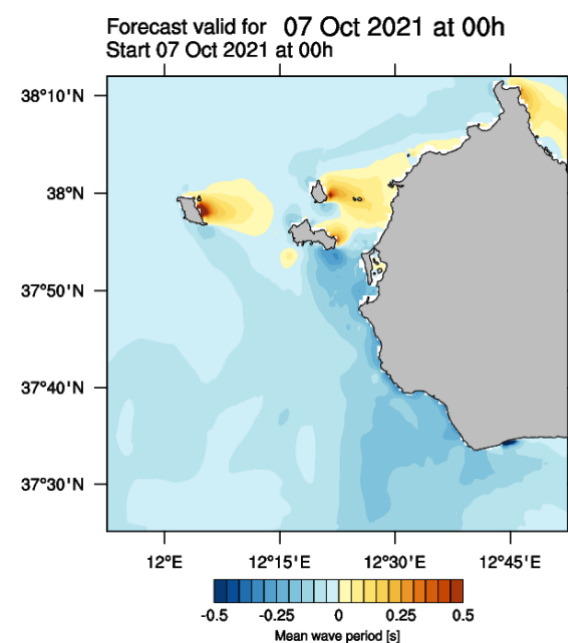
a)



b)

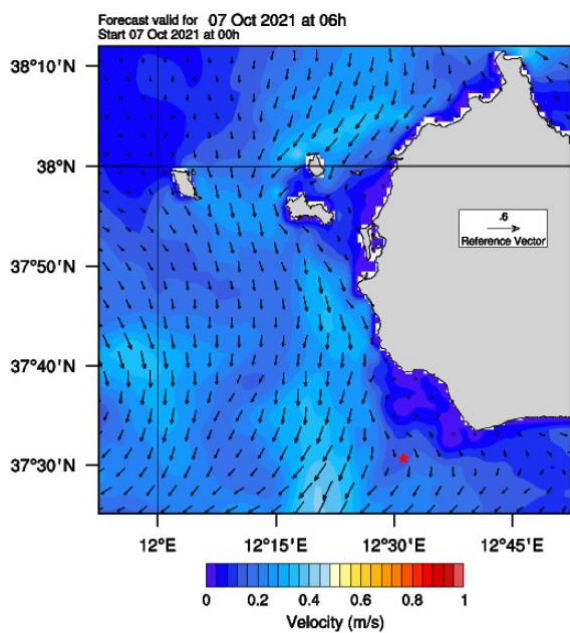


c)

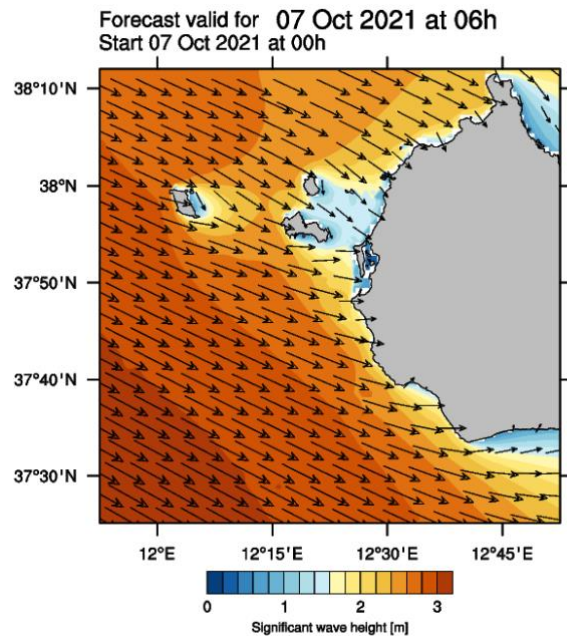


d)

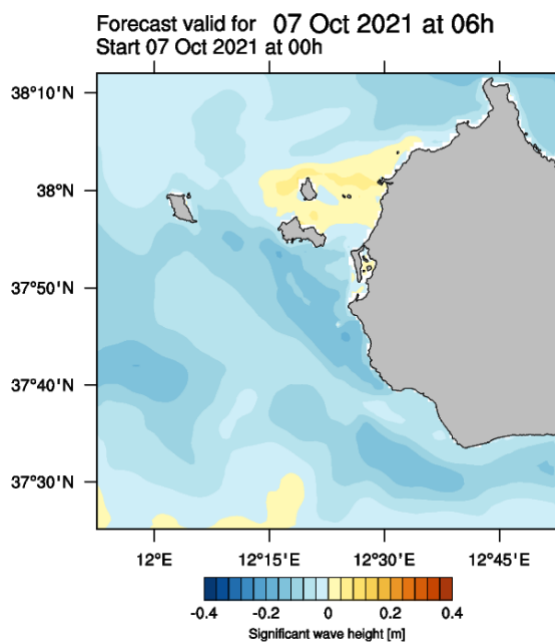
Figura 12 – Campo di velocità della corrente a), altezza significativa ricavata dalla simulazione che include l'effetto della corrente b), differenza dell'ampiezza delle onde tra la simulazione con e senza corrente c) differenza tra i periodi medi tra la simulazione con e senza corrente. Previsione per il giorno 7 ottobre alle ore 00. Nel pannello a) è segnata con un asterisco la posizione della boa di Mazara del Vallo.



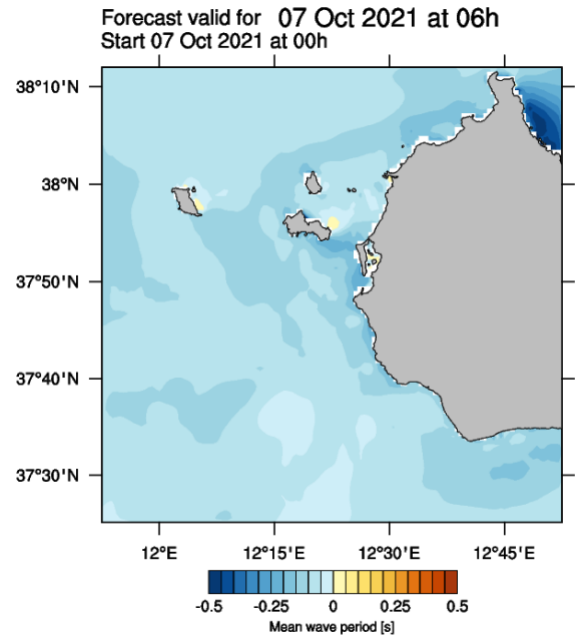
a)



b)



c)



d)

Figura 13 – Campo di velocità della corrente a), altezza significativa ricavata dalla simulazione che include l'effetto della corrente b), differenza dell'ampiezza delle onde tra la simulazione con e senza corrente c) differenza tra i periodi medi tra la simulazione con e senza corrente. Previsione per il giorno 7 ottobre alle ore 6. Nel pannello a) è segnata con un asterisco la posizione della boa.

Tabella 5 – statistiche relative al confronto tra le altezze significative per il primo giorno di simulazione e i valori satellitari

	simulazione	Media satelliti	Bias	Slope	Correlazione	Indice Willmott
7 febbraio	Senza corrente	1.59	-0.19	0.94	0.98	0.98
	Con corrente		-0.21	0.92	0.97	0.98
8 febbraio	Senza corrente	2.23	-0.07	1.00	0.98	0.98
	Con corrente		-0.11	0.98	0.97	0.98
9 febbraio	Senza corrente	1.91	-0.16	0.93	0.97	0.98
	Con corrente		-0.18	0.92	0.97	0.98
10 febbraio	Senza corrente	1.87	-0.27	0.88	0.95	0.96
	Con corrente		-0.28	0.87	0.95	0.96
11 febbraio	Senza corrente	0.99	-0.30	0.75	0.93	0.89
	Con corrente		-0.23	0.80	0.93	0.91
12 febbraio	Senza corrente	0.71	-0.26	0.67	0.81	0.77
	Con corrente		-0.25	0.67	0.80	0.77
13 febbraio	Senza corrente	0.70	-0.25	0.67	0.83	0.80
	Con corrente		-0.23	0.69	0.83	0.81
14 febbraio	Senza corrente	0.99	-0.17	0.85	0.89	0.91
	Con corrente		-0.17	0.84	0.89	0.91
15 febbraio	Senza corrente	1.21	-0.15	0.87	0.91	0.94
	Con corrente		-0.16	0.87	0.91	0.94
16 febbraio	Senza corrente	1.37	-0.23	0.86	0.92	0.92
	Con corrente		-0.24	0.85	0.91	0.92
16 febbraio	Senza corrente	1.39	-0.14	0.86	0.92	0.92
	Con corrente		-0.15	0.92	0.96	0.97

Tabella 6 – statistiche relative al confronto tra le altezze significative per il primo giorno di simulazione e i valori misurati alle boe della rete RON per il periodo 7 -17 febbraio 2022.

boa	Simulazione	Media boa	Bias	Slope	Correlazione	indice Willmott
Alghero	Senza corrente	1.73	-0.30	0.83	0.98	0.97
	Con corrente		-0.30	0.83	0.99	0.97
Ancona	Senza corrente	0.61	-0.08	0.87	0.86	0.92
	Con corrente		-0.08	0.86	0.87	0.92
Crotone	Senza corrente	0.96	-0.16	0.89	0.96	0.97
	Con corrente		-0.17	0.87	0.96	0.97
La Spezia	Senza corrente	1.00	-0.17	0.87	0.93	0.94
	Con corrente		-0.15	0.89	0.94	0.95
Mazara del Vallo	Senza corrente	1.11	-0.17	0.92	0.98	0.98
	Con corrente		-0.19	0.88	0.98	0.98
Monopoli	Senza corrente	0.96	-0.09	1.00	0.97	0.98
	Con corrente		-0.14	0.94	0.97	0.98
Ponza	Senza corrente	0.96	-0.20	0.82	0.95	0.95
	Con corrente		-0.20	0.82	0.94	0.95

Tabella 7 – statistiche relative al confronto tra i periodi medi per il primo giorno di simulazione e i valori misurati alle boe della rete RON per il periodo 7 -16 febbraio 2022.

boa	Simulazione	Media boa	Bias	Slope	Correlazione	indice Willmott
Alghero	Senza corrente	6.08	-0.27	0.95	0.96	0.97
	Con corrente		-0.30	0.94	0.96	0.97
Ancona	Senza corrente	3.71	-0.25	0.95	0.77	0.80
	Con corrente		-0.28	0.94	0.77	0.81
Crotone	Senza corrente	4.54	-0.73	0.85	0.78	0.79
	Con corrente		-0.59	0.87	0.82	0.84
La Spezia	Senza corrente	5.33	-0.08	0.99	0.93	0.95
	Con corrente		0.09	1.02	0.93	0.96
Mazara del Vallo	Senza corrente	5.16	-0.74	0.86	0.84	0.86
	Con corrente		-0.22	0.94	0.78	0.88
Monopoli	Senza corrente	4.36	-0.48	0.90	0.88	0.90
	Con corrente		-0.55	0.89	0.89	0.89
Ponza	Senza corrente	4.56	-0.36	0.93	0.86	0.90
	Con corrente		-0.34	0.93	0.92	0.90

A partire dall'inizio di gennaio 2022 il modello WW3 è usato nella catena operativa per la previsione delle onde nel Mediterraneo. Una ulteriore verifica dell'effetto dell'introduzione delle correnti come forzante al modello di onde è stata quindi effettuata confrontando le uscite del sistema operativo con una serie di simulazioni specifiche con l'introduzione della corrente, per il periodo dal 7 febbraio al 16 febbraio. In tabella 5 sono riportate le statistiche relative al confronto delle altezze significative con i valori misurati da satellite. Anche in questo caso entrambe le previsioni ottenute mostrano in genere un buon accordo con il dato satellitare, con valori di correlazione e indice di Willmott superiori a 0.9 e valore del bias inferiore a 30 cm; una minore correlazione si ha nei giorni centrali del periodo (12 e 13 febbraio) probabilmente a causa di una situazione meteorologica non correttamente prevista. I risultati dei confronti rispetto alle misure alle boe sono mostrati nelle tabelle 6 e 7. I valori sono estremamente simili per le due serie di simulazioni, non mostrando alcun miglioramento legato all'introduzione dell'effetto della corrente sulle onde.

3 Conclusioni

Nel presente rapporto è stato presentato un lavoro di confronto tra simulazioni di moto ondoso effettuate con e senza l'introduzione dell'effetto della corrente sulle onde. In particolare, è stato utilizzato il sistema di previsione del moto ondoso (costituito dal modello di onde per il bacino Mediterraneo e da 9 sottobacini dei mari italiani e basato sul modello WW3) fornendo in input le correnti ricavate dal sistema operativo del Mediterraneo e del Mar Nero realizzato con il modello MITgcm.

Sono state realizzate coppie di simulazioni I) forzando il modello WW3 con il solo vento e II) inserendo anche l'effetto delle correnti superficiali provenienti dal modello MITgcm. Le altezze significative sono state confrontate con i valori ricavati dalle misure satellitari, ottenendo un buon accordo statistico per entrambe le serie di simulazioni, senza un chiaro miglioramento in presenza delle correnti.

Confronti statistici sono stati anche effettuati tra gli andamenti temporali delle ampiezze dell'onda e del periodo medio rispetto ai dati registrati dalle boe della rete ondometrica nazionale (RON). Anche in questo caso i risultati hanno mostrato differenze limitate tra i due casi, con risultati spesso migliori per la simulazione senza corrente.

Il sistema operativo per la previsione del moto ondoso è costituito da un modello a scala di bacino alla risoluzione orizzontale di $1/32^\circ$ e da modelli per aree limitate alla risoluzione di $1/128^\circ$. Il confronto è quindi stato effettuato anche relativamente a due delle aree più interessanti dal punto di vista energetico, costituite dalla zona ad ovest della Sardegna e della Sicilia.

È stato mostrato che l'effetto dell'introduzione della corrente sull'ampiezza e sul periodo del moto ondoso risulta limitato in intensità, anche considerando le simulazioni a più alta risoluzione.

Pure essendo solo preliminari ai fini di un eventuale futuro accoppiamento tra i due sistemi operativi, i risultati ottenuti finora non hanno evidenziato un apprezzabile beneficio dall'inserimento dell'effetto delle correnti e, considerati l'aumento nella complessità della gestione del sistema accoppiato ed il ritardo nella produzione delle previsioni del moto ondoso, non dimostrano l'effettiva utilità di un tale sforzo. Per il futuro si prevede di effettuare ulteriori analisi per confermare queste conclusioni, analizzando in dettaglio situazioni di evidente discrepanza tra le previsioni ed i dati osservati.

4 Riferimenti bibliografici

1. A. Carillo, E. Lombardi, MV. Struglia, M. Palma, G. Pisacane - Aggiornamento del sistema operativo delle onde: implementazione, validazione e operatività – Report RdS/PTR(2021)/337
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. J., Marshall, Adcroft, A., Hill, C., Perelman, L., Heisey, C., 1997. A finite-volume, incompressible Navier–Stokes model for, studies of the ocean on parallel computers. *J. Geophys. Res.* 102 (C3), 5753–5766.
6. Sannino G., Bargagli A., Carillo A., Lombardi E., Iacono R., Napolitano E., 2016 – Progettazione e realizzazione di un sistema di previsione della circolazione marina del Mediterraneo – RdS/PAR2015/304
7. Iacono, R., Memè S., Napolitano E., Bargagli A., Antonioli F., Struglia M.V., Carillo A., Pisacane G., Anav A., Cannata R., Lombardi E., Sannino G – 2020 RdS/PTR(2019)/162
8. Palma, M. and Iacono, R. and Sannino, G. and Bargagli, A. and Carillo, A. and Fekete, B. M. and Lombardi, E. and Napolitano, E. and Pisacane, G. and Struglia, M. V., 2020 - Short-term, linear, and non-linear local effects of the tides on the surface dynamics in a new, high-resolution model of the Mediterranean Sea circulation *Ocean Dynamics*, (2020) 70(7) 935—963
9. 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.
10. Willmott, C. J., 1982: Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 63, 1309–1313, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)63<1309:SCOMEV>2.0.CO;2)