



Ricerca di Sistema elettrico

Report di sintesi sulla realizzazione di un sistema operativo per la previsione dell'energia da moto ondoso

Adriana Carillo, Emanuele Lombardi, Gianmaria Sannino

REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA OPERATIVO PER LA PREVISIONE DELL'ENERGIA DA MOTO ONDOSI

Adriana Carillo, Emanuele Lombardi, Gianmaria Sannino (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

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: Sviluppo di un sistema per la previsione del moto ondoso a scala di bacino mediterraneo

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	5
2.1 VALUTAZIONE DEI FORZANTI ATMOSFERICI DISPONIBILI.....	5
2.2 SVILUPPO DEL MODELLO DI PREVISIONE DEL MOTO ONDOSO PER L'AREA MEDITERRANEA	21
2.3 AUTOMAZIONE DELLA PREVISIONE DELLO STATO DEL MARE	22
2.4 VERIFICA DEL RAPPORTO TRA RISOLUZIONE DEL FORZANTE ATMOSFERICO E GRIGLIA COMPUTAZIONALE	27
3 CONCLUSIONI	30
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	31

Sommario

Nel corso del PAR 2011 sono state svolte attività di modellistica per la produzione di mappe climatologiche di energia dal moto ondoso. Sono state individuate come regioni dei mari italiani più interessanti dal punto di vista del possibile sfruttamento energetico, la costa occidentale della Sardegna e quella nord-occidentale della Sicilia. Oltre alle mappe climatologiche prodotte per l'intero bacino Mediterraneo alla risoluzione di $1/16^\circ$ sono state calcolate le climatologie, alla risoluzione di $1/120^\circ$, per queste due zone e per la zona circostante l'isola di Pantelleria; scelta in questo caso anche per le particolari problematiche legate all'approvvigionamento energetico. Le simulazioni sono state effettuate utilizzando come forzante atmosferico i campi di vento provenienti dalle analisi fornite dal Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine (ECMWF).

L'attività svolta nel corso del progetto attuale è stata dedicata alla creazione di un sistema operativo per la previsione dell'energia del moto ondoso su tutto il Mediterraneo, ad una risoluzione di $1/32^\circ$. Come già illustrato nelle analisi svolte nel PAR precedente, il modello di onde più idoneo alla simulazione per l'intero bacino è il modello numerico di simulazione del moto ondoso WAM (WAVE prediction Model), utilizzato sia dai principali centri di ricerca che all'interno di sistemi per la previsione dello stato del mare.

I forzanti necessari per la realizzazione delle previsioni operative dello stato del mare sono costituiti dai campi di vento prodotti da sistemi operativi di previsione meteorologica. Tali campi devono essere prodotti in modo continuativo e affidabile e disponibili in tempi brevi dopo la loro produzione. Data la complessità della topografia delle aree circostanti il bacino Mediterraneo, la corretta valutazione del vento nelle zone costiere dipende in maniera significativa dalla risoluzione spaziale dei modelli atmosferici utilizzati. In questo rapporto vengono descritti i dati attualmente disponibili costituiti dalle previsioni fornite dal Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica (CNMCA) e dal sistema SKIRON sviluppato dall'*Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group* dell'Università di Atene. Quest'ultimo è stato scelto come forzante, in quanto fornisce previsioni per un intervallo di tempo maggiore (5 giorni) e ad una maggiore risoluzione temporale (1 ora). Preliminarmente alla messa a punto del sistema operativo è stata effettuata una simulazione per verificare i risultati del modello di onde, usando questi forzanti, rispetto ai dati osservati delle boe della Rete Ondametrica Nazionale.

Alcune simulazioni sono state ripetute sia utilizzando risoluzioni diverse del forzante che della griglia di calcolo del modello per verificarne l'effetto sui risultati.

1 Introduzione

L'attività svolta è finalizzata al supporto modellistico necessario all'applicazione di tecnologie innovative nel campo dell'energia ricavabile dal moto ondoso. Nel corso del PAR 2011 sono state prodotte mappe climatologiche del potenziale energetico ricavabile dal moto ondoso per l'intero bacino Mediterraneo. La climatologia è stata realizzata tramite una simulazione modellistica con il modello WAM utilizzando come forzanti dati di vento relativi al periodo 2001-2010. La costa occidentale della Sardegna e la zona nord-occidentale della Sicilia sono state individuate come le aree dei mari italiani più interessanti dal punto di vista energetico. Una analisi più dettagliata è stata effettuata anche per la zona di mare circostante l'isola di Pantelleria, che, anche se caratterizzata da una energia media inferiore, è interessante per lo sfruttamento di energia ondosa a causa delle particolari difficoltà di approvvigionamento energetico. Per queste aree sono state realizzate mappe climatologie a risoluzioni spaziali più elevate. In questo caso si è fatto uso di un diverso codice di calcolo (SWAN) che include la parametrizzazione di fenomeni fisici caratteristici delle acque poco profonde. Allo scopo di fornire informazioni utili alla messa a punto di tecnologie di conversione energetica specifiche per le coste italiane, è stata effettuata la caratterizzazione di alcuni siti

tramite la produzione di grafici della distribuzione di energia in funzione dell'altezza significativa e del periodo [1-2].

Le climatologie del moto ondoso realizzate rappresentano un'informazione assolutamente indispensabile durante le fasi di progettazione dei dispositivi di conversione del moto ondoso. Tuttavia tali informazioni non sono sufficienti durante le fasi di installazione, manutenzione ed esercizio dei dispositivi. Durante queste fasi diventa invece fondamentale conoscere con un certo margine di anticipo lo stato del mare in corrispondenza dei siti selezionati per l'installazione. A tale scopo è stato realizzato nel corso del progetto B.1.4 un sistema operativo per la previsione del moto ondoso e dell'energia ad esso associata. Si sottolinea che la realizzazione del sistema operativo ha visto l'integrazione di diverse competenze ENEA: la modellistica meteo-marina, la gestione di sistemi di calcolo e trasferimento dati, la visualizzazione e la realizzazione di siti web dedicati.

Il sistema operativo realizzato è stato messo a punto per l'intera area Mediterranea ad una risoluzione di $1/32^\circ$ (circa 3.5 Km). Questa risoluzione non è comunque sufficiente per fini ingegneristici, la catena operativa è quindi completata da una serie di modelli realizzati ad una risoluzione di circa $1/128^\circ$, corrispondente a distanze dell'ordine di 700-800 m, nelle zone ritenute interessanti [3]. La previsione sull'intero bacino Mediterraneo risulta comunque indispensabile per fornire le condizioni al contorno ai vari modelli dei sotto-bacini; l'intensità del moto ondoso dipende infatti sia dalle condizioni locali del vento che dalla propagazione delle onde da zone limitrofe. Questa seconda componente può essere dominante a seconda delle condizioni meteorologiche.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Valutazione dei forzanti atmosferici disponibili

Nel corso del precedente progetto PAR 2011 sono state prodotte mappe climatologiche relative al moto ondoso nel bacino Mediterraneo [1]. La realizzazione di queste mappe è stata ottenuta attraverso una simulazione numerica eseguita con il modello denominato WAM.

Per la simulazione sono stati utilizzati forzanti atmosferici ricavati dalle analisi provenienti dal Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine (ECMWF). Questi dati, utilizzati per lo studio climatologico, costituiscono un *dataset* omogeneo alla risoluzione spaziale di $1/4^\circ$ e coprono un arco temporale superiore a 10 anni.

La realizzazione di simulazioni operative del moto ondoso richiede in input campi di vento prodotti da un modello meteorologico girato in modalità operativa; tali dati devono essere disponibili in modo continuativo e affidabile, è inoltre fondamentale la disponibilità in tempi ragionevolmente brevi dopo la loro produzione. Poiché si intende raggiungere una risoluzione elevata è opportuno che anche i forzanti atmosferici utilizzati siano ad elevata risoluzione, questa caratteristica è fondamentale nel bacino Mediterraneo, caratterizzato da una topografia complessa, per la corretta valutazione del vento nelle zone costiere. Le previsioni meteorologiche che soddisfano questi requisiti, attualmente disponibili sull'area Mediterranea, sono costituite dal sistema SKIRON sviluppato dall'*Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group* dell'Università di Atene e dalle previsioni fornite dal Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica (CNMCA).

Il sistema operativo SKIRON [4, 5, 6] è in uso in circa 20 istituti di ricerca e servizi meteorologici nel mondo. Il sistema, basato sul modello meteorologico ad area limitata Eta/NCEP [7], è stato successivamente sviluppato nell'ambito di diversi progetti della Comunità Europea in particolare per quanto riguarda le

parametrizzazioni della radiazione atmosferica e dei processi superficiali. La versione attualmente in uso in maniera operativa presso l'Università di Atene ha una risoluzione orizzontale di $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ e copre un intervallo temporale di 5 giorni a partire dalla mezzanotte. Il sistema SKIRON si basa su un modello meteorologico non idrostatico, realizzato su una griglia di tipo Arakawa E che utilizza in verticale 45 livelli in coordinate *Eta* dalla superficie fino a 20 km di altitudine. I dati atmosferici utilizzati per produrre le condizioni iniziali e laterali sono ricavati dal modello globale NCEP/GFS alla risoluzione orizzontale di $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ con 26 livelli verticali di pressione. I dati di temperatura del mare in input sono alla risoluzione di $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, i dati di topografia sono derivati dal dataset USGS alla risoluzione di 30 secondi. La validazione dei risultati ottenuti con questo sistema operativo è stata effettuata in numerosi studi come ad esempio in [6]. I dati sono disponibili con frequenza oraria.

Il CNMCA utilizza operativamente il modello atmosferico denominato COSMO. COSMO (COntortium for Small-scale Modeling) è un consorzio costituito nel 1998 da alcuni servizi meteorologici europei (Germania, Svizzera, Italia, Grecia, Polonia, Russia, Romania) con lo scopo di sviluppare ed aggiornare un modello meteorologico non-idrostatico ad area limitata.

Il modello COSMO [8] è utilizzato in maniera operativa dal CNMCA in due diverse configurazioni: la configurazione COSMO-ME che si estende sull'area europea ad una risoluzione di $1/16^\circ$ e fornisce previsioni della lunghezza di 3 giorni, e la configurazione COSMO-IT, ad altissima risoluzione con un passo di griglia $1/40^\circ$, limitatamente al dominio italiano, che fornisce previsioni della durata di un giorno. Il modello COSMO-ME ha 40 livelli verticali che raggiungono la quota di 22 km. Le condizioni al contorno sono ricavate dal modello globale dell'ECMWF. Le integrazioni di COSMO-ME e COSMO-IT sono effettuate due volte al giorno (alle ore 00 e alle 12UTC). In questo caso i dati vengono memorizzati e resi disponibili con frequenza tri-oraria.

Poiché le previsioni meteorologiche a breve termine dipendono significativamente dalle condizioni iniziali, nei centri meteorologici operativi una intensa attività viene dedicata alla determinazione dello stato iniziale tramite l'assimilazione dati. Questa tecnica utilizza un elevato numero di osservazioni di diversa origine, sia osservazioni sinottiche convenzionali (TEMP, PILOT, SYNOP, SHIP, BUOY) che osservazioni ottenute da Wind-Profiler o da strumentazione a bordo di aerei e satelliti. I sistemi operativi presso l'Università di Atene e presso il CNMCA utilizzano implementazioni differenti della tecnica variazionale di assimilazione 3DVAR. La finestra temporale delle osservazioni che vengono raccolte per l'utilizzo nella fase di assimilazione ha un'ampiezza di 3 ore.

I dati operativi del sistema SKIRON e del CNMCA sono resi disponibili attraverso il Gruppo di Oceanografia Operativa, a cui partecipa l'Unità di Modellistica Energetica dell'ENEA. Per la realizzazione della catena operativa di previsione del moto ondoso si è deciso di utilizzare i dati provenienti dal sistema SKIRON sia in considerazione della più elevata frequenza temporale dei dati disponibili che della possibilità di effettuare simulazioni che coprono un maggiore intervallo temporale.

Nonostante la vasta letteratura riguardante la validazione del modello meteorologico, a cui si è fatto cenno in precedenza, si è preferito, preliminarmente alla messa a punto della catena operativa, effettuare una verifica diretta dei risultati ottenuti con il modello WAM forzato con i dati di vento ottenuti dal modello SKIRON. A questo scopo è stata realizzata una simulazione della durata di un mese utilizzando l'implementazione ad $1/16^\circ$ del modello WAM. I risultati sono stati confrontati sia con una simulazione effettuata utilizzando le analisi dell'ECMWF che i dati osservati. E' da notare che i due *dataset* in input sono completamente indipendenti poiché le condizioni iniziali e laterali per il modello atmosferico sull'area europea SKIRON, sono ricavate dal modello globale NCEP.

Come descritto nel rapporto relativo all'attività svolta nel PAR 2011 [1] i dati registrati dalle boe della rete ondometrica nazionale (RON) costituiscono il principale riferimento per quanto riguarda il moto ondoso intorno alla penisola italiana. Allo scopo di verificare i risultati ottenuti con i dati misurati dalle boe è stato

scelto come periodo per la simulazione il mese di gennaio 2008 poiché, come mostrato in [1], in questo periodo le boe in funzione forniscono una buona copertura dell'area di Mediterraneo circostante la penisola italiana (Figura 1). In questo caso è stata utilizzata una versione precedente del sistema SKIRON alla risoluzione di $0.1 \times 0.1^\circ$ in quanto dati alla risoluzione attuale sono stati resi disponibili solo recentemente. Per forzare la simulazione di test sono stati selezionati i campi di vento ricavati dal primo giorno di simulazione per ognuno dei giorni del mese.

A titolo di esempio nelle Figure 2-3 viene mostrato il confronto tra i campi di vento prodotti dal sistema operativo SKIRON e dal modello dell'ECMWF. Si sottolinea che in quest'ultimo caso i campi mostrati non sono campi di previsione ma di analisi, ottenuti dal modello attraverso l'assimilazione dei dati osservati. Le analisi del Centro Europeo, disponibili ogni sei ore, sono alla risoluzione spaziale di $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

I dati del modello meteorologico mostrati si riferiscono ad una previsione a 12 e 18 ore rispettivamente, partita alle ore 00 del giorno 23 gennaio 2008. Si può osservare come le caratteristiche principali dei campi prodotti siano essenzialmente le stesse, con la zona del Mediterraneo centrale interessata da forti venti da nord-nord-est. Risulta evidente l'effetto della più alta risoluzione del modello, come ovvio soprattutto nelle aree di terra dove la rappresentazione della topografia è fondamentale, ma anche nelle zone sottovento ai rilievi come ad esempio a sud della Sicilia e nell'alto Tirreno. Una caratteristica significativa dei campi a più alta risoluzione mostrati è la intensificazione dei valori di vento nella zona ionica, effetto questo che può in parte bilanciare la sottostima dei valori riscontrata da più autori nei campi di vento prodotti dal modello meteorologico dell'ECMWF [9, 10].

Nelle Figure 4-9 sono mostrati i confronti tra i valori prodotti dalle due simulazioni con il codice WAM e quelli registrati da tutte le boe della rete ondametria nazionale disponibili nella data della simulazione. I confronti sono relativi a: ampiezza significativa, periodo medio, periodo di picco e direzione. Si può notare che gli andamenti relativi alle due simulazioni sono molto simili tra di loro e concordano molto bene per tutte le variabili con i dati sperimentali.

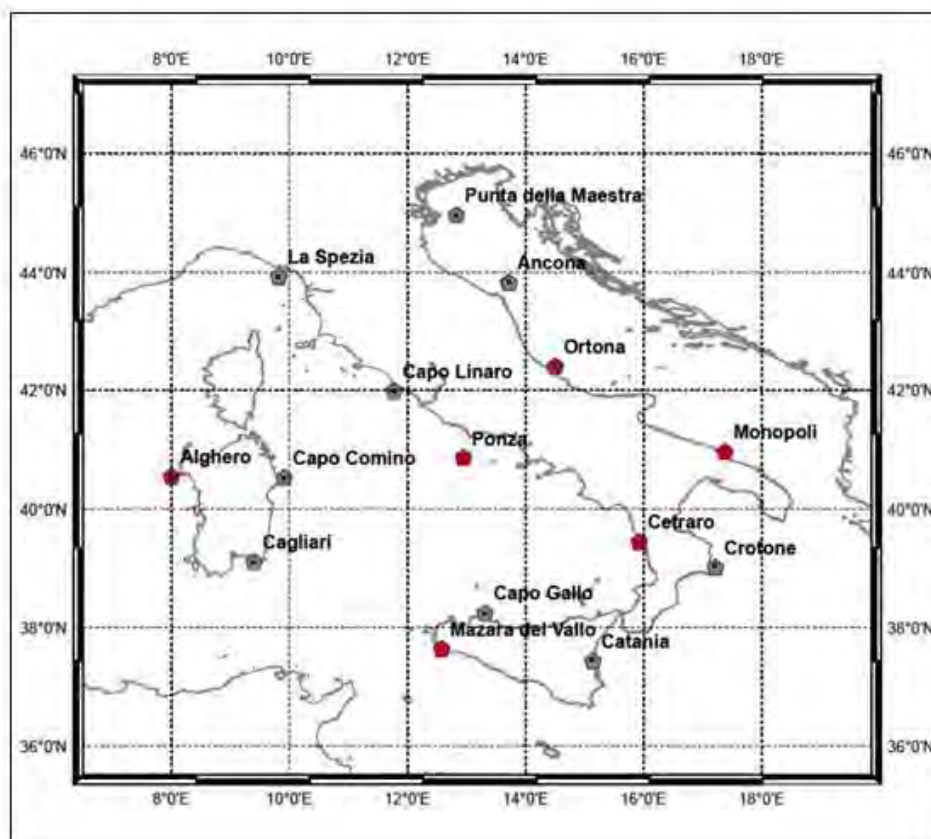


Figura 1. Posizione delle boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON). In rosso sono indicate le boe per le quali sono disponibili dati nel periodo di interesse.

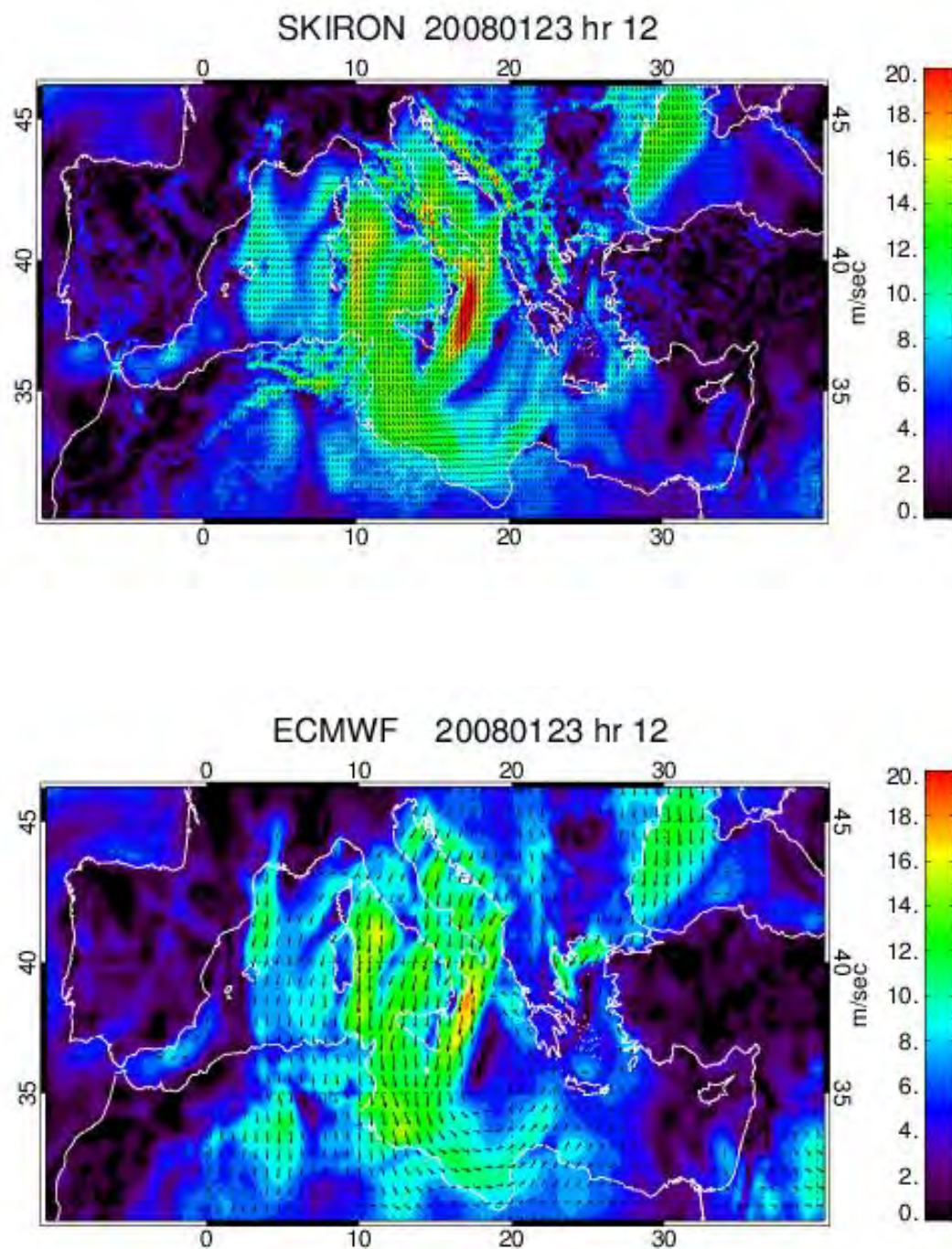


Figura 2. Campo di vento a 10 m per le ore 12 del giorno 23 gennaio 2008. Pannello superiore campo ricavato dalla previsione a 12 ore effettuata con il sistema SKIRON alla risoluzione di $0.1 \times 0.1^\circ$, pannello inferiore analisi a $\frac{1}{4}^\circ$ fornita dal ECMWF. In entrambi i casi viene mostrato un vettore ogni 3 punti di griglia.

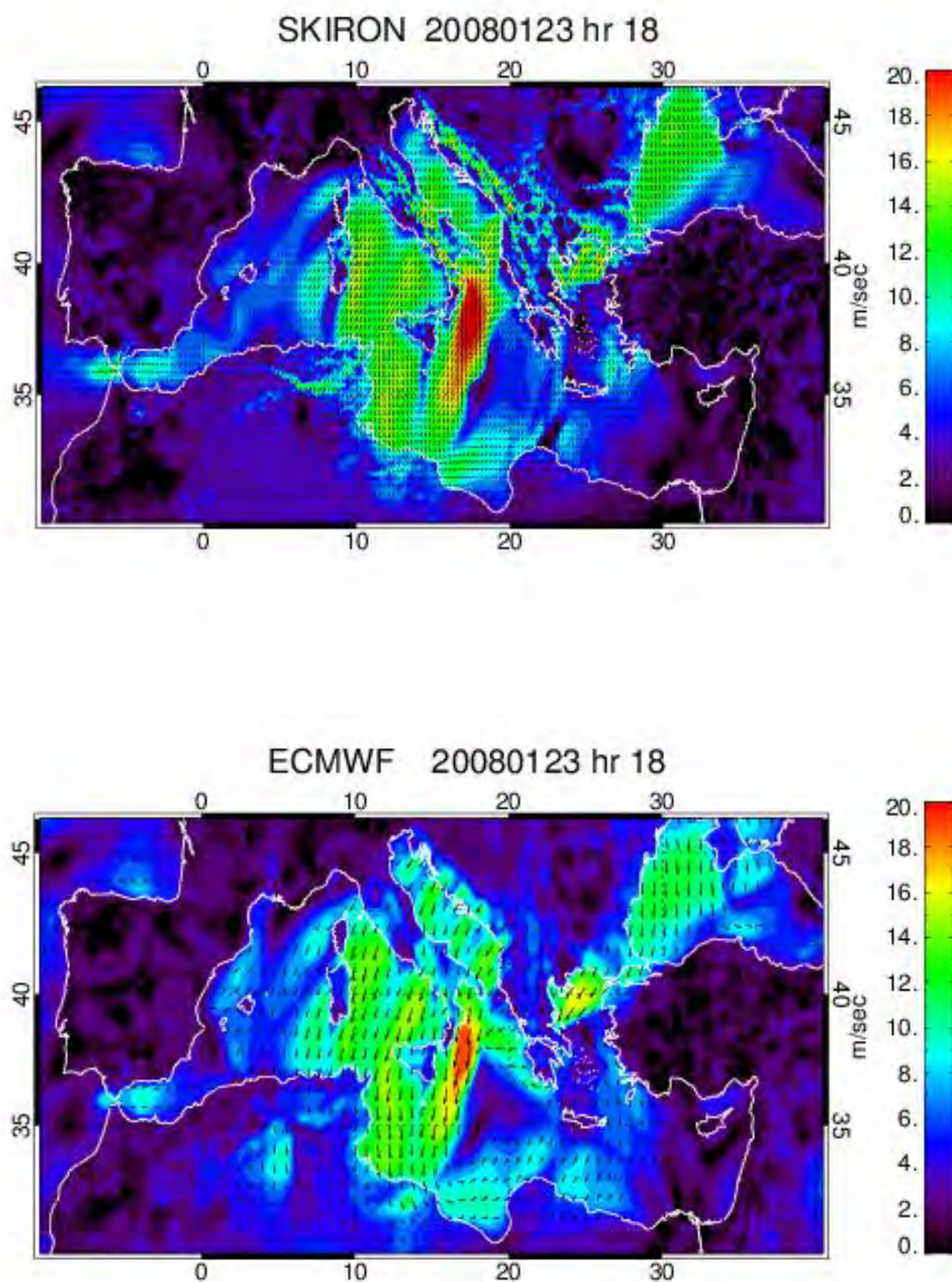


Figura 3. Campo di vento a 10 m per le ore 18 del giorno 23 gennaio 2008. Pannello superiore campo ricavato dalla previsione a 18 ore effettuata con il sistema SKIRON alla risoluzione di $0.1 \times 0.1^\circ$, pannello inferiore analisi a $\frac{1}{4}^\circ$ fornita dal ECMWF. In entrambi i casi viene mostrato un vettore ogni 3 punti di griglia.

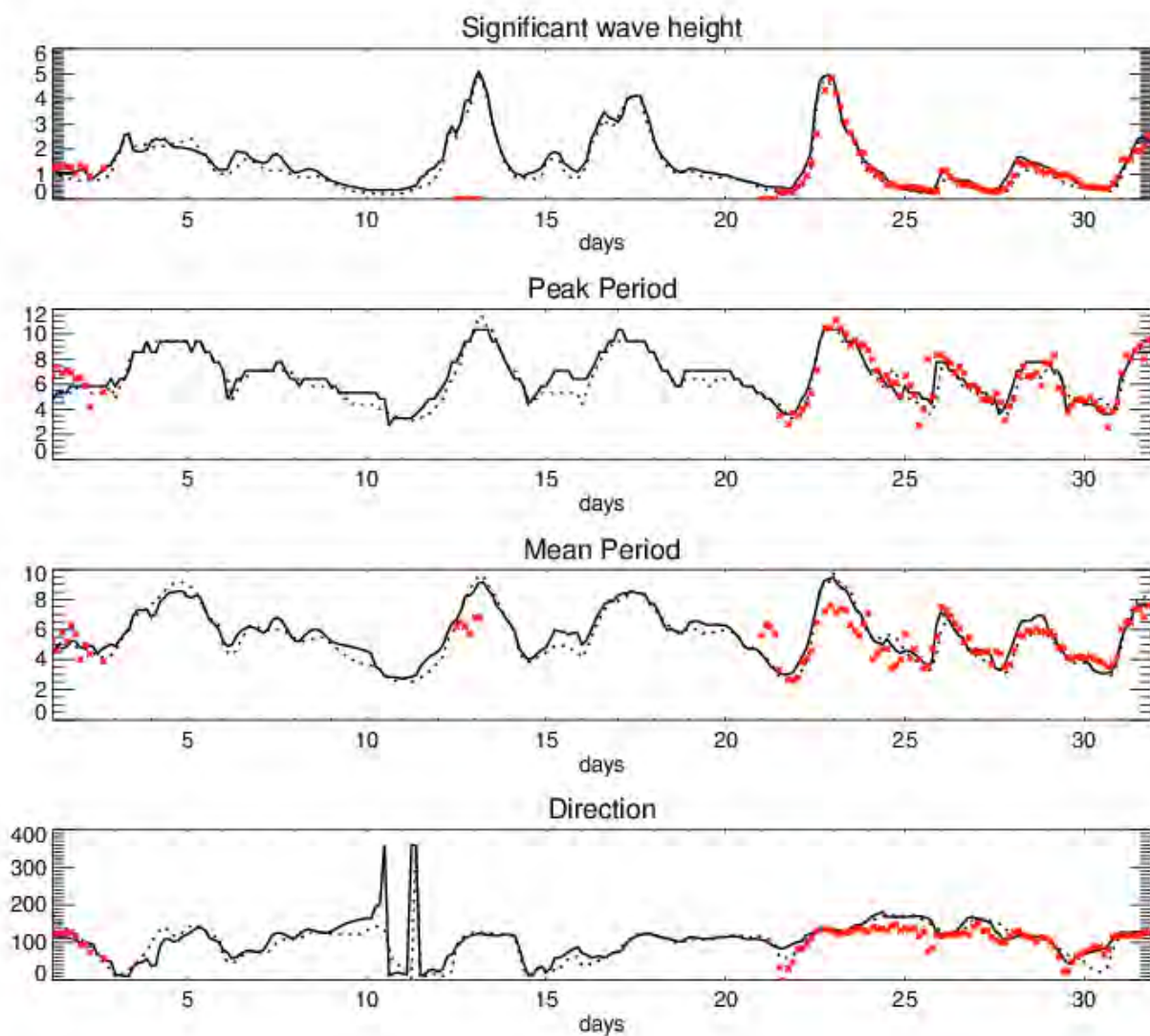


Figura 4. Andamento temporale relativo al mese di gennaio 2008 di altezza significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione in corrispondenza della boa di Alghero. La linea continua è relativa ad una simulazione con il codice WAM forzato con i campi ECMWF, la riga tratteggiata d una simulazione forzata con i campi di vento ricavati dalla previsione con il sistema SKIRON, in rosso i dati della boa.

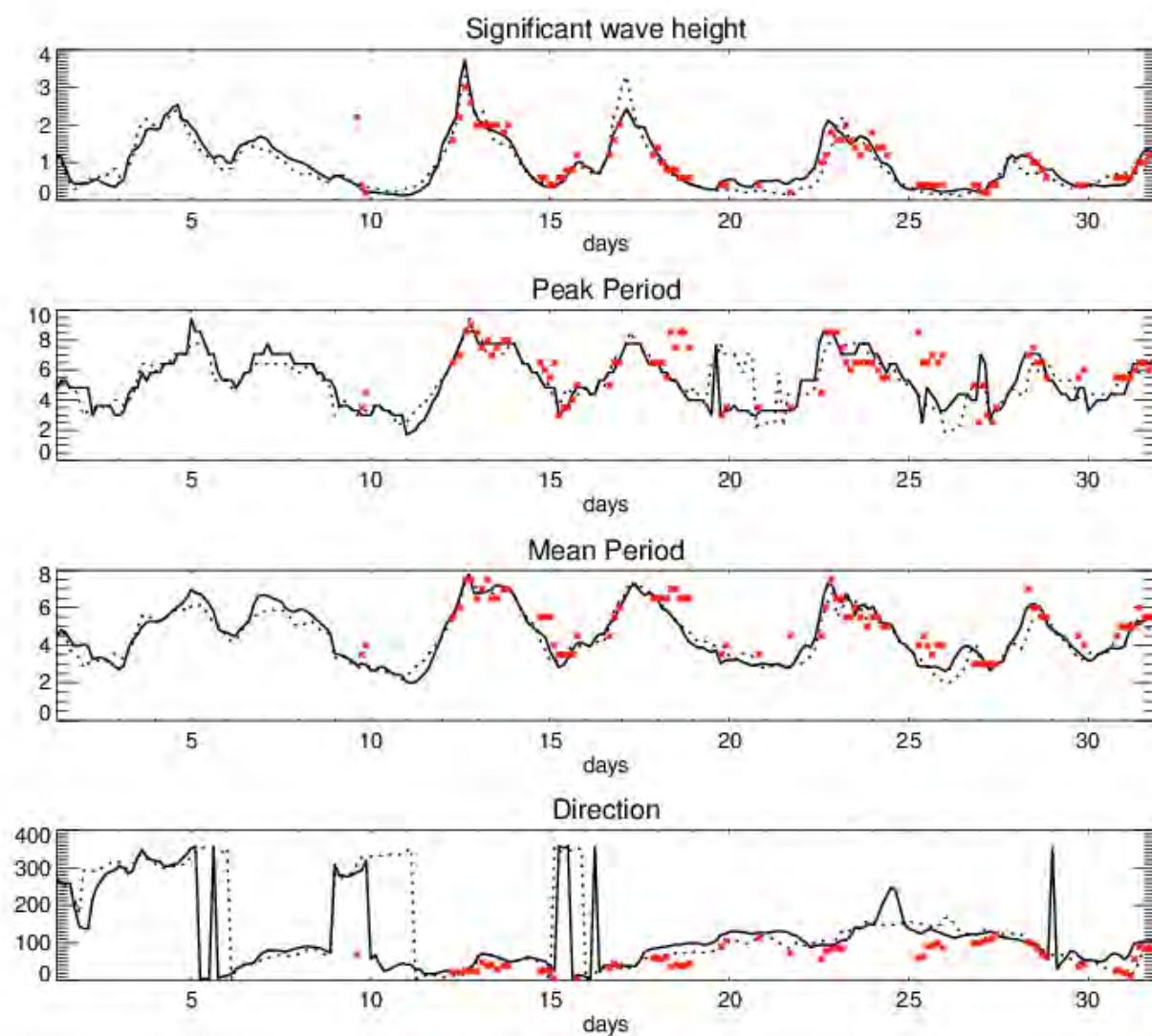


Figura 5. Andamento temporale relativo al mese di gennaio 2008 di altezza significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione in corrispondenza della boa di Ponza. La linea continua è relativa ad una simulazione con il codice WAM forzato con i campi ECMWF, la riga tratteggiata d una simulazione forzata con i campi di vento ricavati dalla previsione con il sistema SKIRON, in rosso i dati della boa.

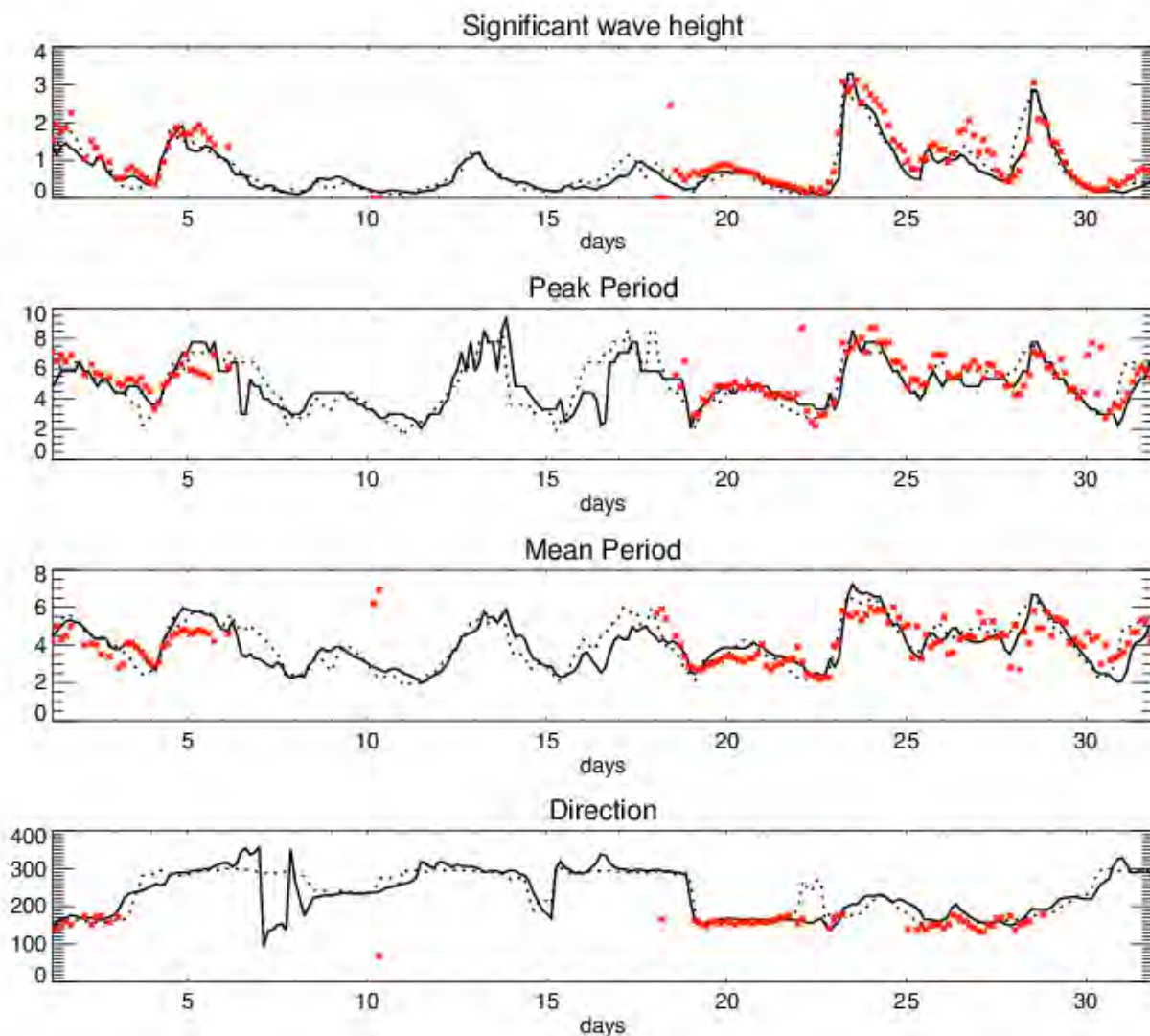


Figura 6. Andamento temporale relativo al mese di gennaio 2008 di altezza significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione in corrispondenza della boa di Monopoli. La linea continua è relativa ad una simulazione con il codice WAM forzato con i campi ECMWF, la riga tratteggiata d una simulazione forzata con i campi di vento ricavati dalla previsione con il sistema SKIRON, in rosso i dati della boa.

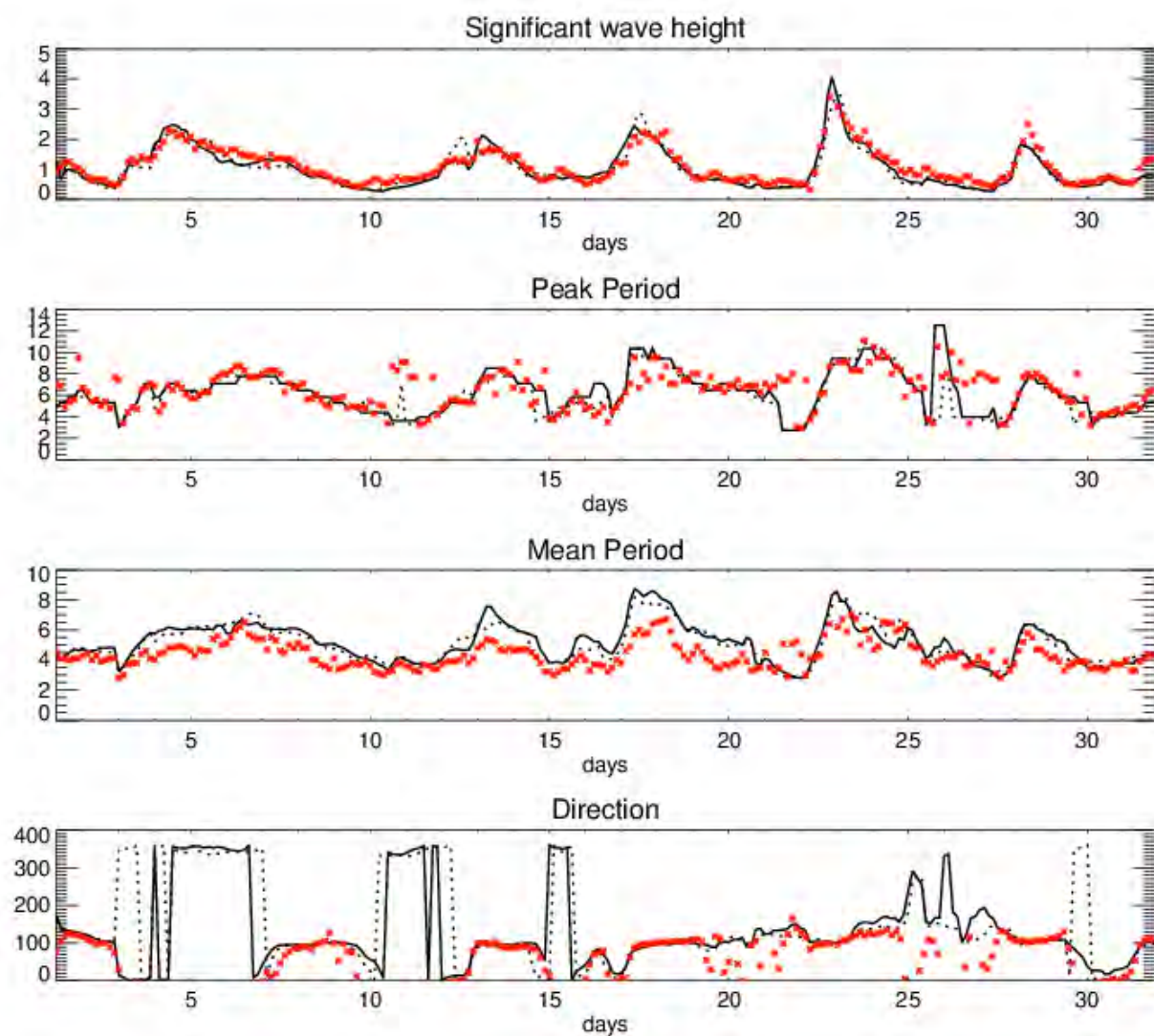


Figura 7. Andamento temporale relativo al mese di gennaio 2008 di altezza significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione in corrispondenza della boa di Mazara del Vallo. La linea continua è relativa ad una simulazione con il codice WAM forzato con i campi ECMWF, la riga tratteggiata d una simulazione forzata con i campi di vento ricavati dalla previsione con il sistema SKIRON, in rosso i dati della boa.

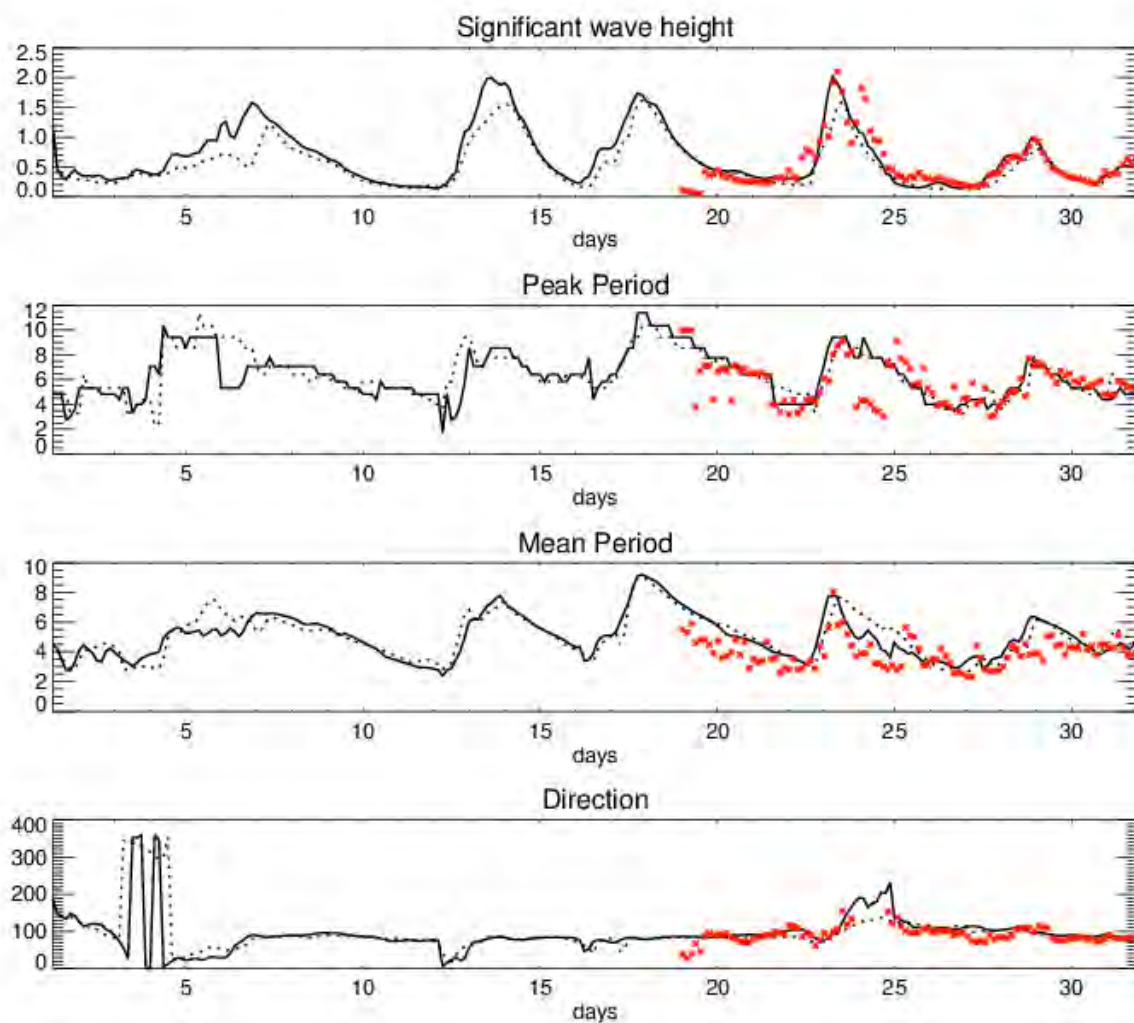


Figura 8. Andamento temporale relativo al mese di gennaio 2008 di altezza significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione in corrispondenza della boa di Cetraro. La linea continua è relativa ad una simulazione con il codice WAM forzato con i campi ECMWF, la riga tratteggiata d una simulazione forzata con i campi di vento ricavati dalla previsione con il sistema SKIRON, in rosso i dati della boa.

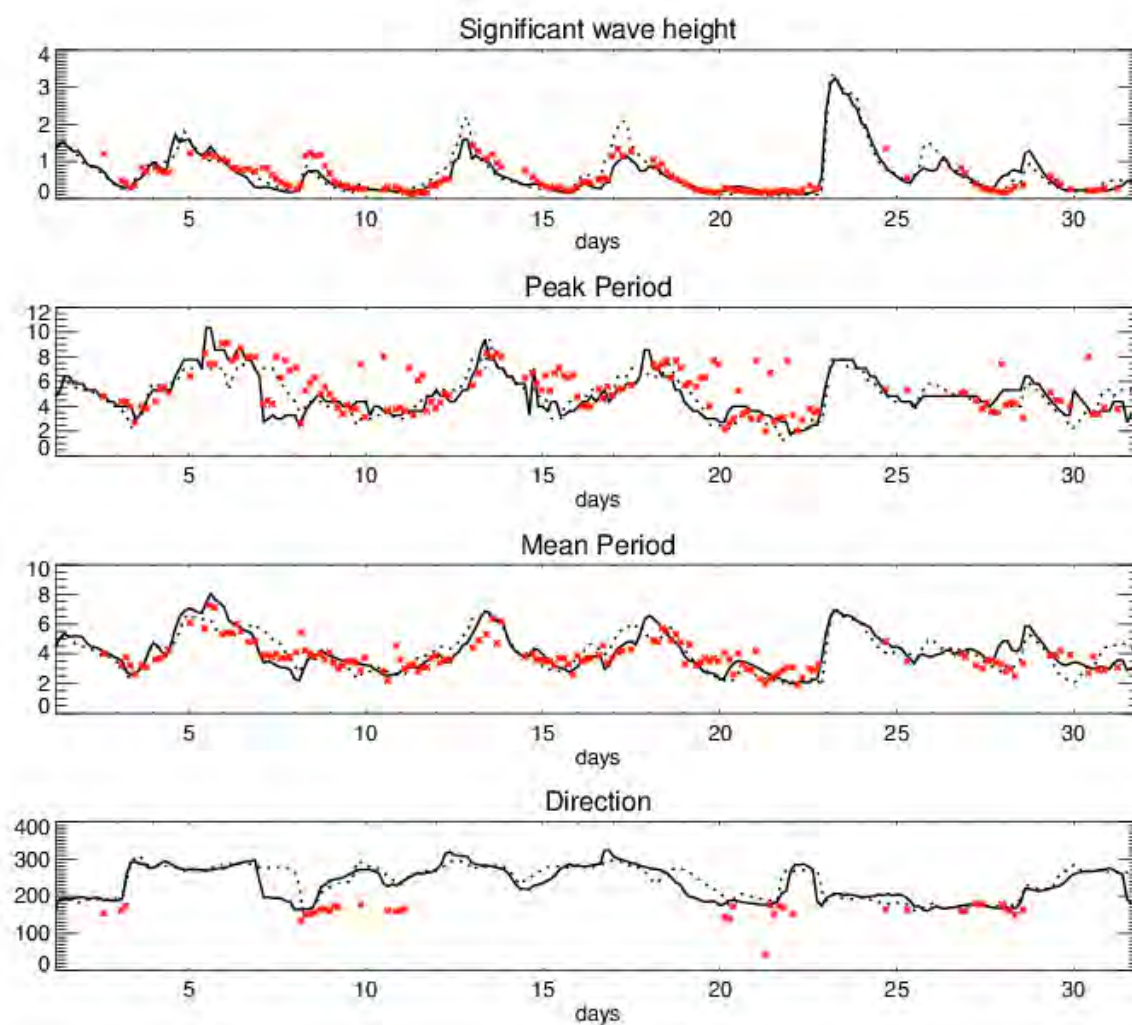


Figura 9. Andamento temporale relativo al mese di gennaio 2008 di altezza significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione in corrispondenza della boa di Ortona. La linea continua è relativa ad una simulazione con il codice WAM forzato con i campi ECMWF, la riga tratteggiata d una simulazione forzata con i campi di vento ricavati dalla previsione con il sistema SKIRON, in rosso i dati della boa.

Nonostante sia stato deciso di utilizzare per la catena operativa di previsione del moto ondoso i dati provenienti dal sistema SKIRON, un confronto è stato effettuato tra i campi di vento forniti da questo sistema e quelli ottenuti dal sistema del CNMCA per valutare l'ampiezza delle differenze derivanti dalla scelta del forzante atmosferico. Poiché i due modelli meteorologici utilizzano forzanti laterali differenti e specifiche procedure di assimilazione, in Figura 10 viene riportato un primo esempio di confronto tra i campi di analisi forniti da entrambi i sistemi operativi per il giorno 9 agosto 2013 alle ore 00. Nelle figure i campi di vento sono interpolati sulla stessa griglia alla risoluzione di $1/16^\circ$.

Le caratteristiche generali del campo sono comuni alle due simulazioni ma mostrano comunque alcune significative differenze. L'analisi del modello COSMO risulta in generale più frastagliata, ad esempio il massimo nel golfo del Leone risulta separato in due rami con una intensità massima maggiore di 17 m/sec, il massimo di intensità corrispondente fornito dal modello SKIRON risulta inferiore di circa 2 m/sec rispetto a questo valore. Sono inoltre presenti differenze nel Mar Adriatico, dove l'intensità massima viene raggiunta rispettivamente nella zona nord e nella zona centrale del bacino.

Nella Figura 11 è riportato un confronto relativo alla previsione a 12 ore per lo stesso giorno 9 agosto. La differenza più significativa si trova ancora nel golfo del Leone, dove anche in questo caso il modello COSMO presenta valori più elevati, con una intensità massima superiore ai 20 m/sec. I campi di vento nel resto del bacino sono sostanzialmente simili. Si può comunque osservare che, anche se la risoluzione del modello COSMO ($1/16^\circ$) è leggermente inferiore a quella del modello SKIRON ($1/20^\circ$), il primo presenta in maniera più evidente, effetti locali dovuti all'interazione con la topografia. Questa caratteristica si può osservare in varie zone, ad esempio nella parte del mare Ionio a ridosso della costa calabra, nell'alto Adriatico e a sud di Creta.

Le differenze riscontrate nei campi di vento hanno quindi suggerito di estendere il confronto, verificando l'effetto sui campi di altezza significativa delle onde, simulati tramite il modello WAM alla risoluzione di $1/16^\circ$. Sono state quindi realizzate due simulazioni per lo stesso periodo della durata di un giorno, a partire dalle ore 00 del 9 agosto sino alle 00 del 10 agosto, utilizzando i due diversi forzanti atmosferici. Il modello WAM in parte riduce le differenze osservate nei campi di vento, tuttavia si nota una zona molto più estesa di altezze d'onda elevate generate dai venti provenienti dalla valle del Rodano nel caso in cui la simulazione sia stata forzata con i dati del modello COSMO. Sono anche evidenti gli effetti a scala locale dei diversi venti costieri.

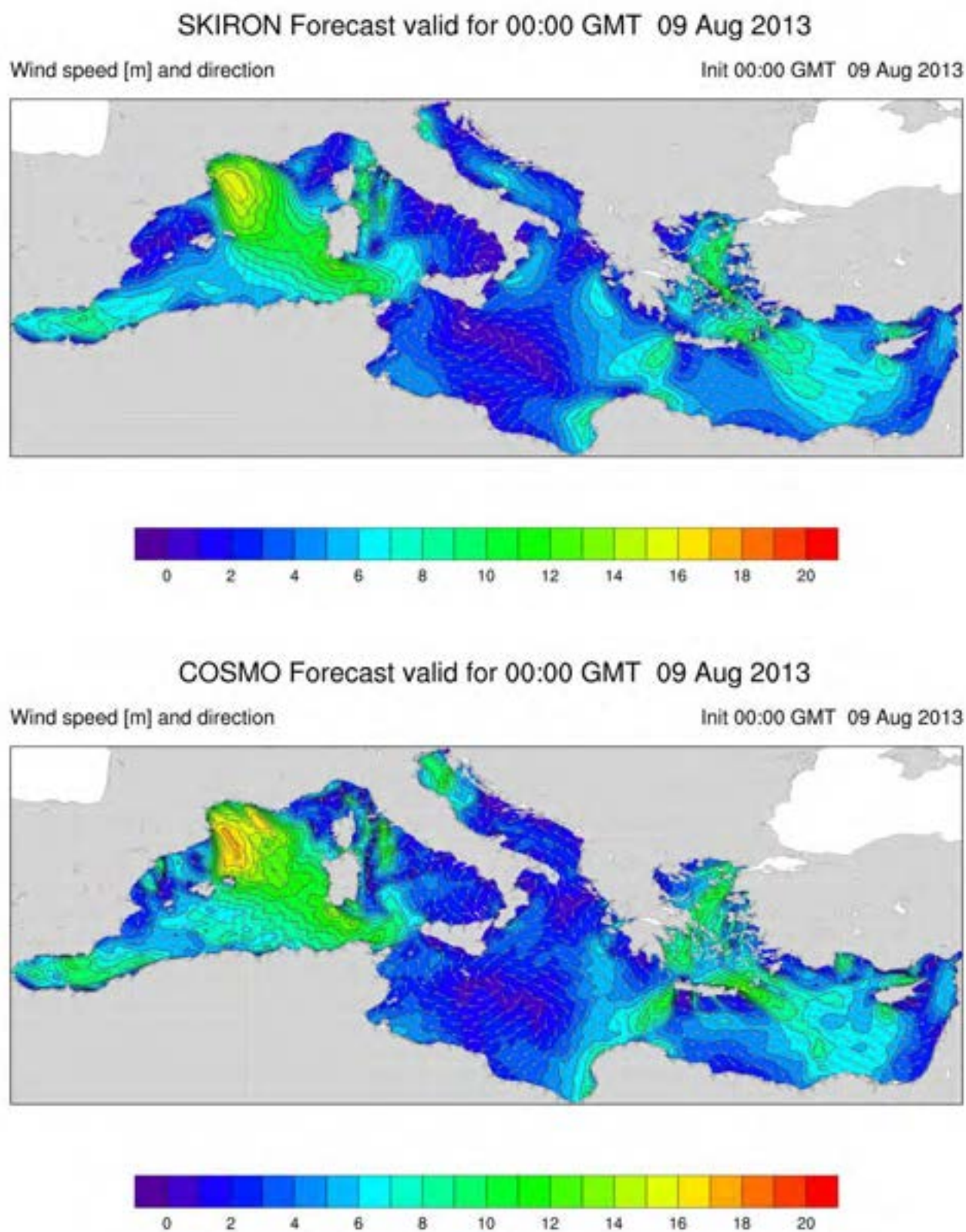
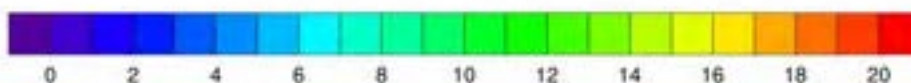
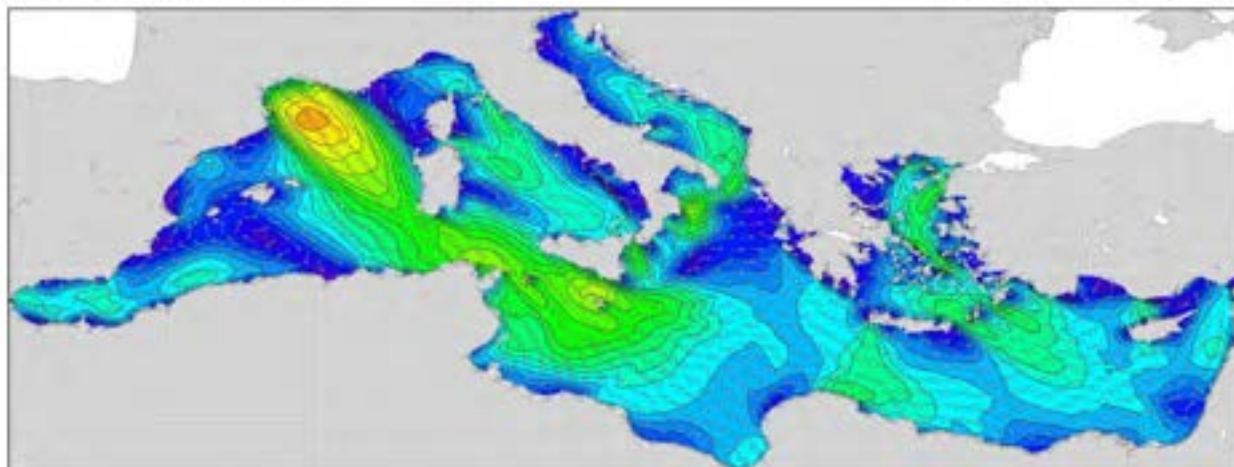


Figura 10. Campo di vento a 10 m per le ore 00 del giorno 9 agosto 2013. Pannello superiore campo di analisi ricavato dal sistema SKIRON, pannello inferiore campo di analisi proveniente dal modello COSMO.

SKIRON Forecast valid for 00:00 GMT 10 Aug 2013

Wind speed [m] and direction

Init 00:00 GMT 09 Aug 2013



COSMO Forecast valid for 00:00 GMT 10 Aug 2013

Wind speed [m] and direction

Init 00:00 GMT 09 Aug 2013

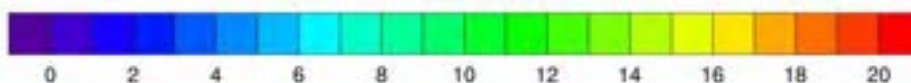
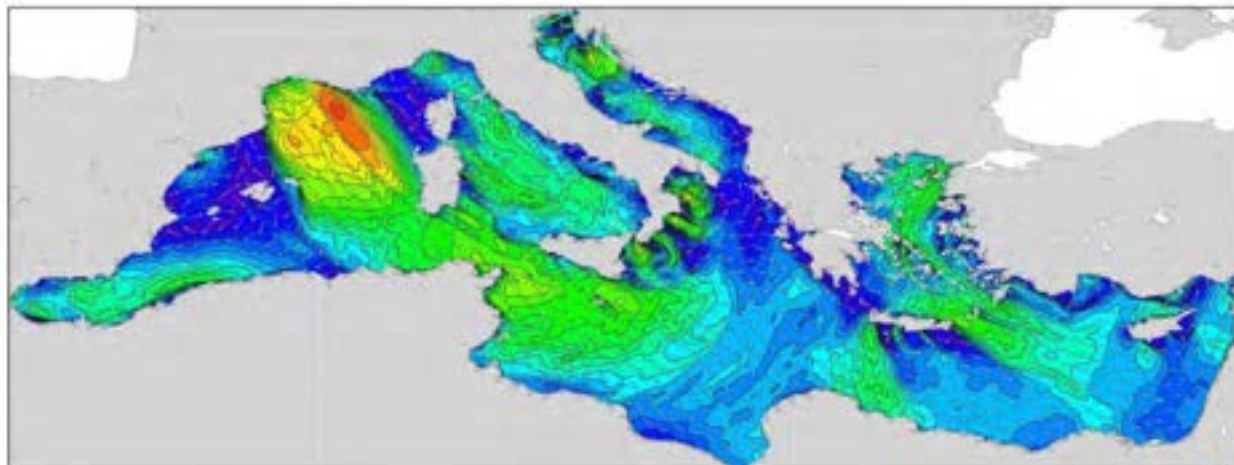


Figura 11. Previsioni relative al campo di vento a 10 m per le ore 12 del giorno 9 agosto 2013. Pannello superiore campo ricavato dal sistema SKIRON, pannello inferiore campo proveniente dal modello COSMO.

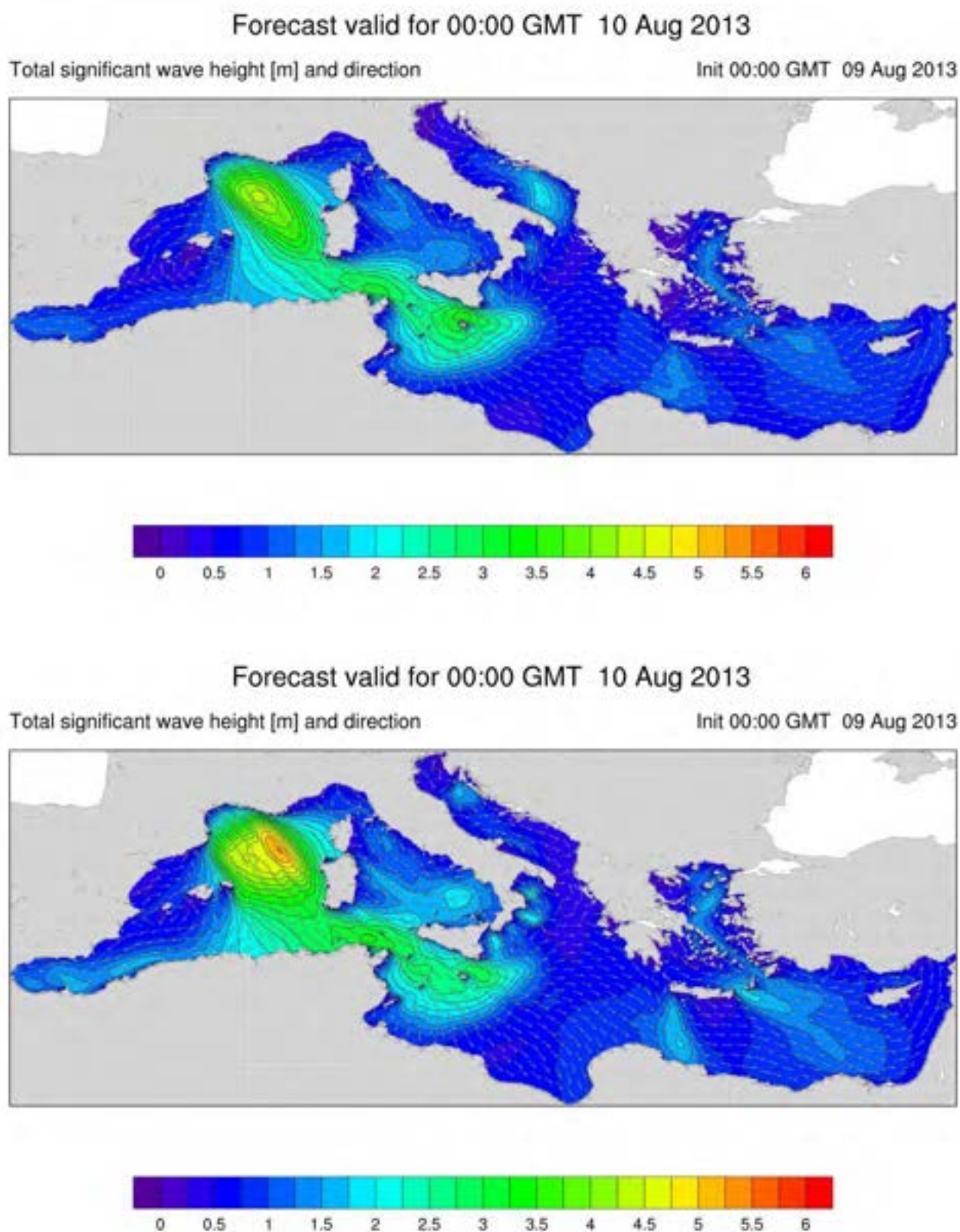


Figura 10. Previsione ottenuta con il modello WAM alla risoluzione di $1/16^\circ$ per il giorno 10 agosto alle 00. Nel pannello superiore previsione utilizzando i dati del vento SKIRON, nel pannello inferiore i dati del modello COSMO.

2.2 Sviluppo del modello di previsione del moto ondoso per l'area Mediterranea

Nel corso del PAR 2011 è stata realizzata una mappa climatologica dell'energia prodotta dal moto ondoso, sull'intero bacino Mediterraneo [1]. La simulazione è stata realizzata utilizzando una versione parallela del modello WAM [11] su una griglia orizzontale alla risoluzione di $1/16^\circ \times 1/16^\circ$, corrispondente a circa 7 Km. La climatologia è stata prodotta usando come forzanti i campi di vento ogni sei ore provenienti dalle analisi operative dell'ECMWF alla risoluzione di $1/4^\circ$, per i dieci anni 2001-2010. I risultati ottenuti in termine di altezza significativa e periodo medio dell'onda, sono stati verificati rispetto alle misure provenienti dalle boe della rete ondometrica nazionale (RON) e rispetto a dati di altezza ricavati da satellite.

Nel caso della catena modellistica messa a punto per la previsione dell'energia del moto ondoso, le simulazioni che vengono effettuate hanno ciascuna la durata di 5 giorni, utilizzando i dati provenienti dal sistema operativo SKIRON. Dovendo effettuare una simulazione di breve durata è quindi possibile aumentare la risoluzione spaziale mantenendo i tempi della simulazione all'interno di un intervallo di poche ore, necessario per rendere le previsioni disponibili in tempi utili. E' stata quindi generata una griglia regolare alla risoluzione spaziale di $1/32^\circ$ a partire dalla Carta Batimetrica Generale degli Oceani (GEBCO) [12] disponibile alla risoluzione di 30 secondi di arco. Il dominio di calcolo è esteso all'intero bacino Mediterraneo e copre l'area da 5.50°W a 36.125°E e da 30.2°N a 45.825°N (Figura 10) con un numero di punti di nodi di calcolo pari a 1333×501 .

Il modello descrive in maniera esplicita l'evoluzione dello spettro di densità di energia, tale spettro è stato discretizzato utilizzando 36 direzioni angolari, corrispondenti a 10° , e 32 intervalli di frequenza, a partire da 0.06 Hz. L'intervallo di tempo per la propagazione delle onde è stato fissato a 15 secondi, è da notare che questo valore costituisce un limite superiore in quanto il codice WAM è in grado in maniera automatica di ridurre tale valore in caso le velocità siano tali da violare il criterio di stabilità CFL (Courant-Friedrichs-Lewy).

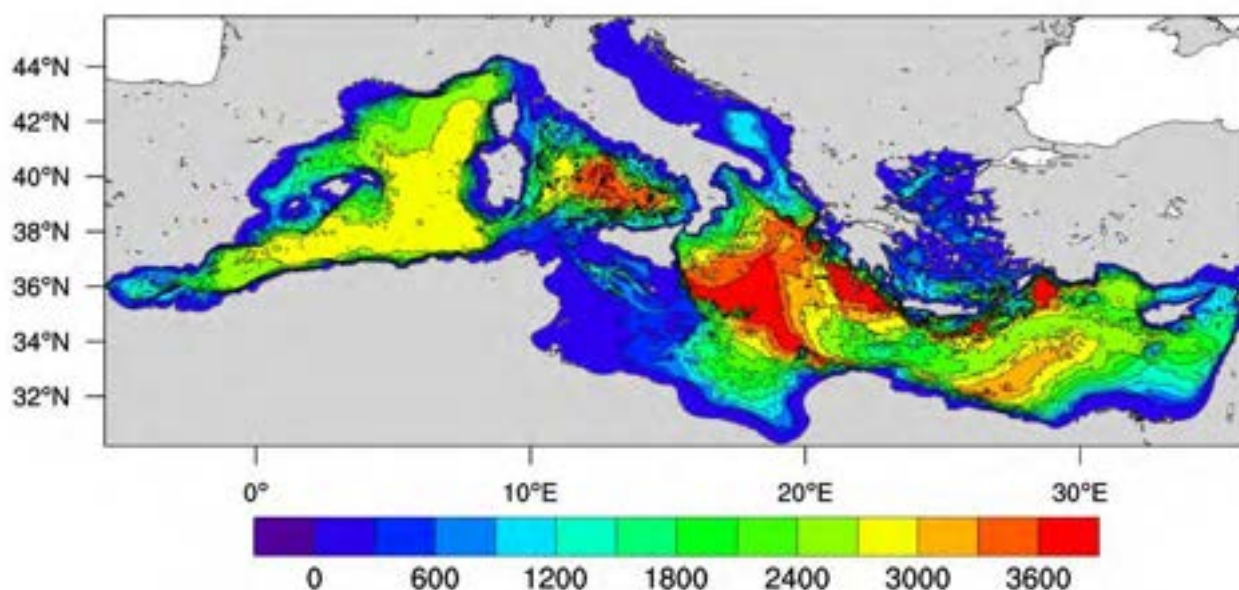


Figura 10. Batimetria del Mediterraneo utilizzata per il modello WAM alla risoluzione di $1/32^\circ$

2.3 Automazione della previsione dello stato del mare

Il sistema per la previsione dello stato del mare è stato attivato in modalità operativa sul computer centrale dell'unità di Modellistica Ambientale dell'ENEA. Le previsioni per una durata di 5 giorni, vengono effettuate ogni mattina e comportano la seguente sequenza di operazioni:

1. I dati orari di vento relativi alla previsione effettuata dal dipartimento di fisica dell'Università di Atene vengono copiati tramite *ftp* dal sito relativo al sistema operativo SKIRON. I dati sono contenuti in 121 file in formato grib (GRIdded Binary) che costituisce uno standard per lo scambio di dati meteorologici in seno alla WMO (World Meteorological Organization). Ciascuno dei file ha dimensioni di circa 12 Mb e contiene tutte le variabili prodotte dalla simulazione meteorologica. In generale i dati sono disponibili sul sito intorno alle 3, ora italiana.
2. Dai 121 file grib vengono estratti i dati relativi al vento a 10 m e con essi vengono prodotti due file, uno per la componente U (file TOT_U) e l'altro per la componente V (file TOT_V), relativi all'intero periodo di 5 giorni. Questi file sono in formato *netcdf* (Network Common Data Form).
3. Una procedura scritta in linguaggio *idl* trasforma i file *netcdf* TOT_V e TOT_U nel file binario *wind_SKIN*, idoneo alla lettura da parte dei codici di onde WAM.
4. Viene eseguito il modello WAM sull'intero bacino Mediterraneo. Vengono memorizzati su file i dati necessari per il *restart* del codice in corrispondenza di un giorno di simulazione, tali file verranno usati per inizializzare la simulazione del giorno successivo. Il codice WAM produce, tra l'altro, 120 file MAP, uno per ciascuna ora di simulazione. I file MAP contengono tutte le variabili che descrivono ampiezza e frequenza delle onde e il flusso di energia derivato dal moto ondoso. Allo scopo di facilitare la distribuzione dei dati e la creazione di mappe viene anche prodotto un singolo file *netcdf* contenente tutti i dati della simulazione di 5 giorni.
5. Vengono create le mappe statiche ed animazioni dei risultati di WAM sull'intero bacino Mediterraneo. Per ogni ora simulata vengono prodotte due mappe statiche per ciascuna variabile (energia delle onde, altezza e periodo). Una prima mappa (chiamata "localmax") è scalata su massimi e minimi di quell'ora, una seconda mappa (chiamata "nolocalmax") viene invece scalata su massimi e minimi dell'intero periodo simulato. Le mappe "nolocalmax" vengono utilizzate per le animazioni poiché i valori corrispondenti ad ogni colore restano costanti su tutto il periodo simulato. Le mappe "localmax" sono invece utili per vedere nel dettaglio la situazione di ogni singola ora. Le mappe vengono create utilizzando NCL che è un software creato dall' NCAR (USA) appositamente per scopi scientifici ed è in grado di leggere i file *netcdf* e di scrivere mappe grafiche in formato .png (tra gli altri). Sono state create tre diverse procedure NCL, una per visualizzare l'energia, una per l'altezza ed una per il periodo. Per ciascun tempo della simulazione le tre procedure NCL vengono eseguite due volte: una per creare la mappa "localmax" e l'altra per creare la mappa "nolocalmax". Il risultato è la creazione di sei file .png per ciascuna ora simulata. Utilizzando appositi comandi vengono quindi create le animazioni in formato mp4 comprendenti tutte le 120 mappe orarie di ciascuna delle tre variabili, prima di tipo "localmax" e poi di tipo "nolocalmax". In totale alla fine su tutto il Mediterraneo sono prodotte:
 - 120 mappe statiche di energia "localmax"

- 120 mappe statiche di altezza “localmax”
- 120 mappe statiche di periodo “localmax”
- 120 mappe statiche di energia “nolocalmax”
- 120 mappe statiche di altezza “nolocalmax”
- 120 mappe statiche di periodo “nolocalmax”
- 1 animazione di energia “localmax”
- 1 animazione di altezza “localmax”
- 1 animazione di periodo “localmax”
- 1 animazione di energia “nolocalmax”
- 1 animazione di altezza “nolocalmax”
- 1 animazione di periodo “nolocalmax”

corrispondenti a $121 \times 6 = 726$ file grafici.

6. Tutte le mappe statiche e le animazioni per le tre variabili sono rese disponibili sul sito UTMEA. Nelle Figure 11-13 sono mostrati esempi tratti dal sito ENEA delle mappe disponibili. Le mappe possono essere visualizzate sia singolarmente che in sequenza.

NOTE TECNICHE:

- Il computer centrale utilizzato è un UV2000 della Silicon Graphics costituito di 128 cores e avente 512GB di RAM condivisa.
- Per tutta la durata del calcolo della previsione dello stato del mare il computer centrale viene interamente dedicato all'esecuzione.
- Al fine di velocizzarne l'esecuzione, il codice WAM viene eseguito in modalità parallela su tutti i processori.

L'esecuzione del codice WAM avviene al massimo entro due ore dall'inizio della simulazione. Questo valore varia essenzialmente a causa della variazione automatica, già citata, dell'intervallo di propagazione del codice WAM in funzione della situazione meteorologica.

Sulla pagina web sono rese disponibili per tutto l'intervallo della simulazione e su tutta l'area Mediterranea, mappe con le previsioni relative all'energia da moto ondoso, all'altezza significativa dell'onda, ed al periodo medio. La frequenza dei campi in uscita è di un'ora. Sulla pagina del sito è possibile per la simulazione della giornata corrente, selezionare l'ora da visualizzare, scorrere tra le immagini o visualizzare direttamente la sequenza delle immagini.

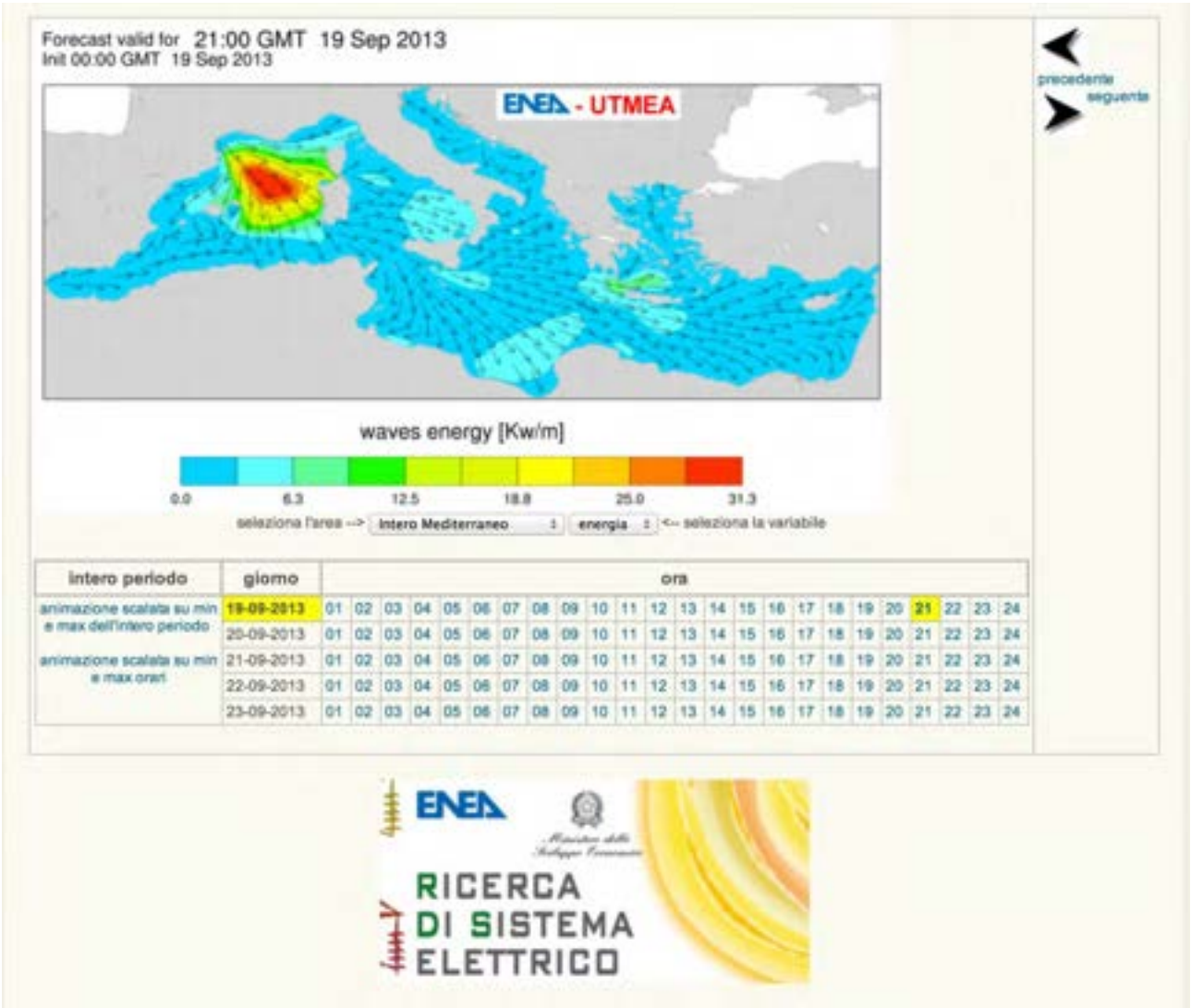


Figura 11. Esempio di previsione di energia delle onde per tutto il Mediterraneo tratta dal sito UTMEA.

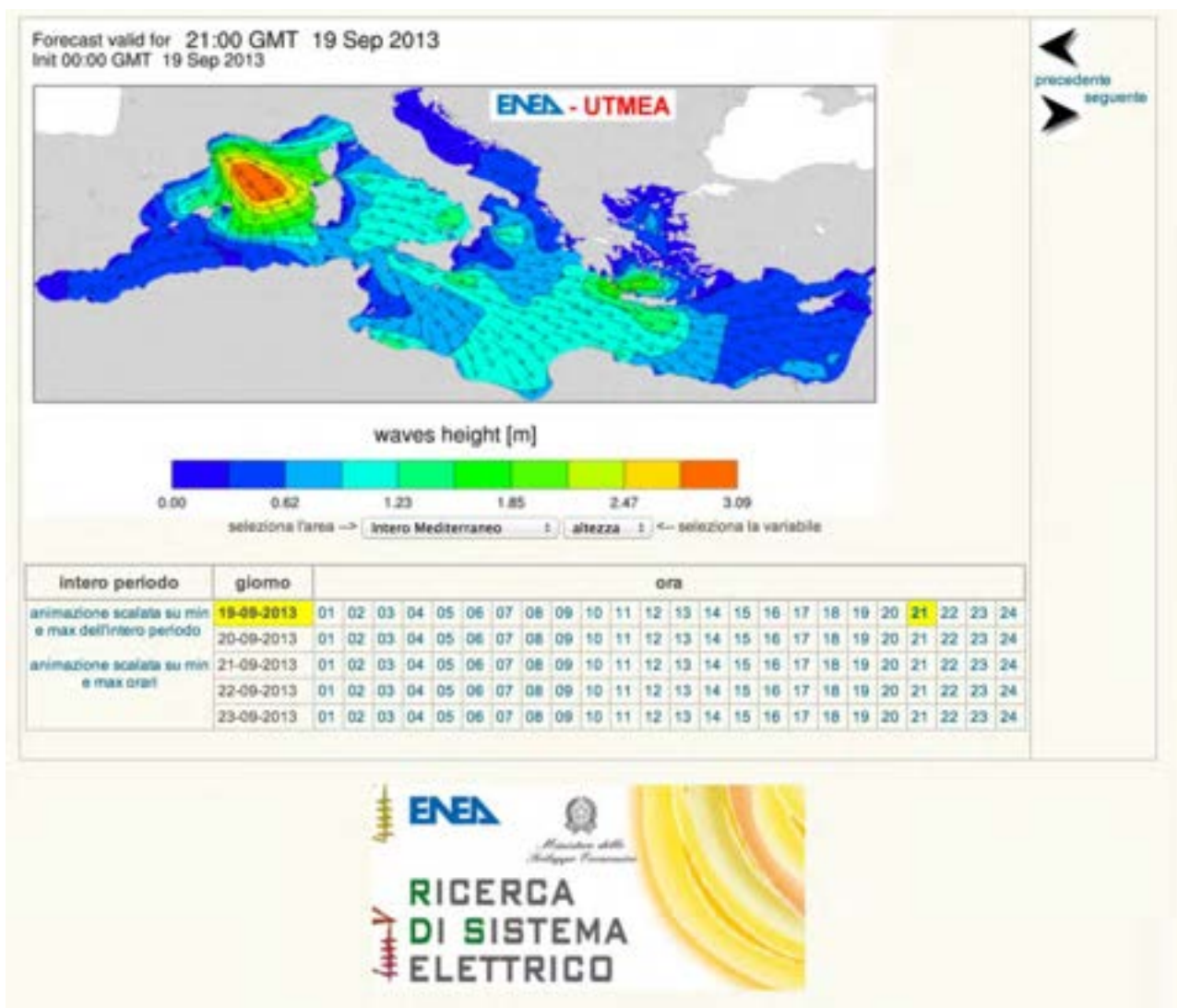


Figura 12. Esempio di previsione di altezza delle onde per tutto il Mediterraneo tratta dal sito UTMEA.

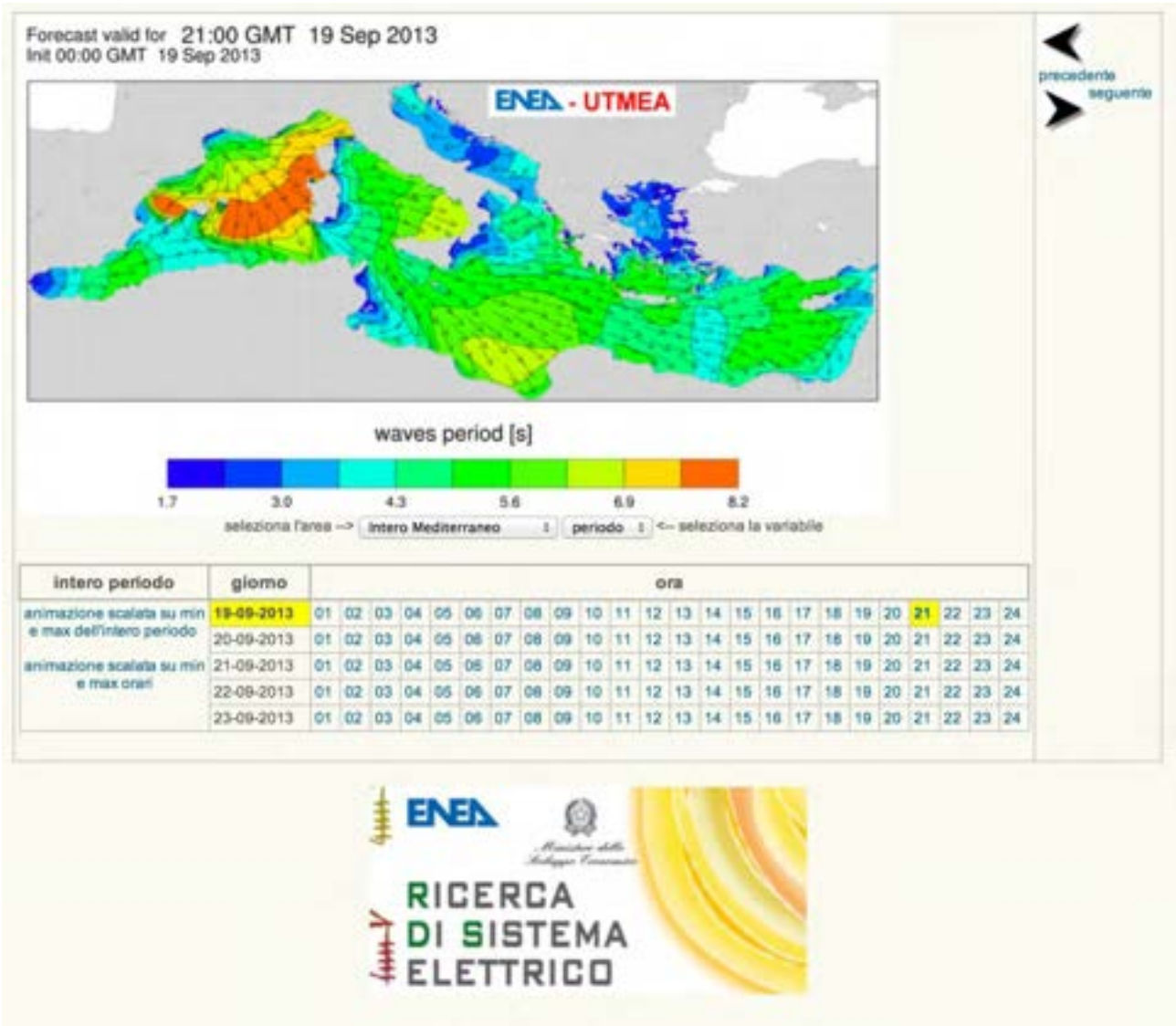


Figura 13. Esempio di previsione di periodo medio delle onde per tutto il Mediterraneo tratta dal sito UTMEA.

2.4 Verifica del rapporto tra risoluzione del forzante atmosferico e griglia computazionale

Per effettuare una valutazione relativa all'utilizzo di forzanti atmosferici a diverse risoluzioni, sono state effettuate due simulazioni dell'intero bacino Mediterraneo forzate rispettivamente con i dati provenienti dal sistema operativo SKIRON alle due risoluzioni spaziali di 0.1° e 0.05° . Le simulazioni sono state realizzate con il modello WAM alla risoluzione di $1/16^\circ$, sono state utilizzate le previsioni relative al mese di aprile 2012 per il quale le due versioni del sistema erano disponibili simultaneamente. I dati in ingresso al modello sono alla risoluzione temporale di un'ora.

Nelle figure 14 e 15 sono riportati i confronti tra le due simulazioni. In particolare in Figura 14 è riportata la *root mean square* calcolata per ogni tempo come somma dei quadrati delle differenze, per ogni punto della griglia del modello WAM, tra le due simulazioni; in Figura 15 la media calcolata sui punti della griglia del modello WAM per la singola simulazione. Si può osservare dal confronto tra le due figure che la differenza tra i due risultati è estremamente limitata. La *root mean square* raggiunge infatti valori massimi inferiori al centimetro in coincidenza con valori medi dell'ordine di 1.5 metri. Dal valore medio delle differenze, in Figura 16, risulta comunque che la simulazione con forzanti a più alta risoluzione presenta valori sistematicamente maggiori.

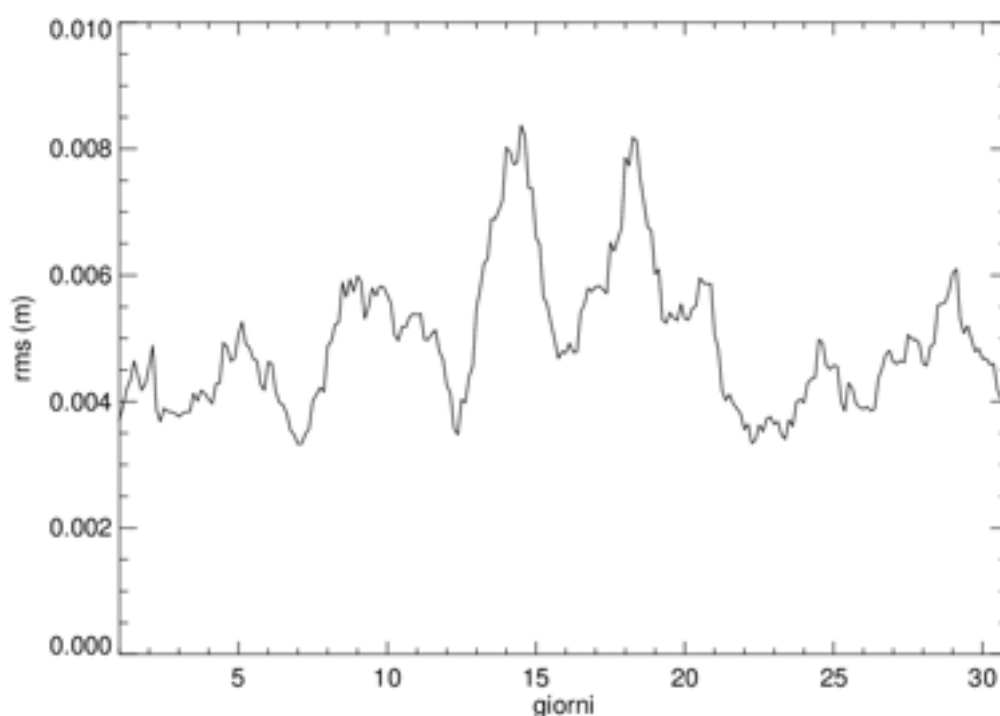


Figura 14. *Root mean square* calcolata per ogni tempo come somma dei quadrati delle differenze tra le due simulazioni con forzante a 0.05° e a 0.1° . Periodo utilizzato aprile 2012, risoluzione del modello WAM $1/16^\circ$.

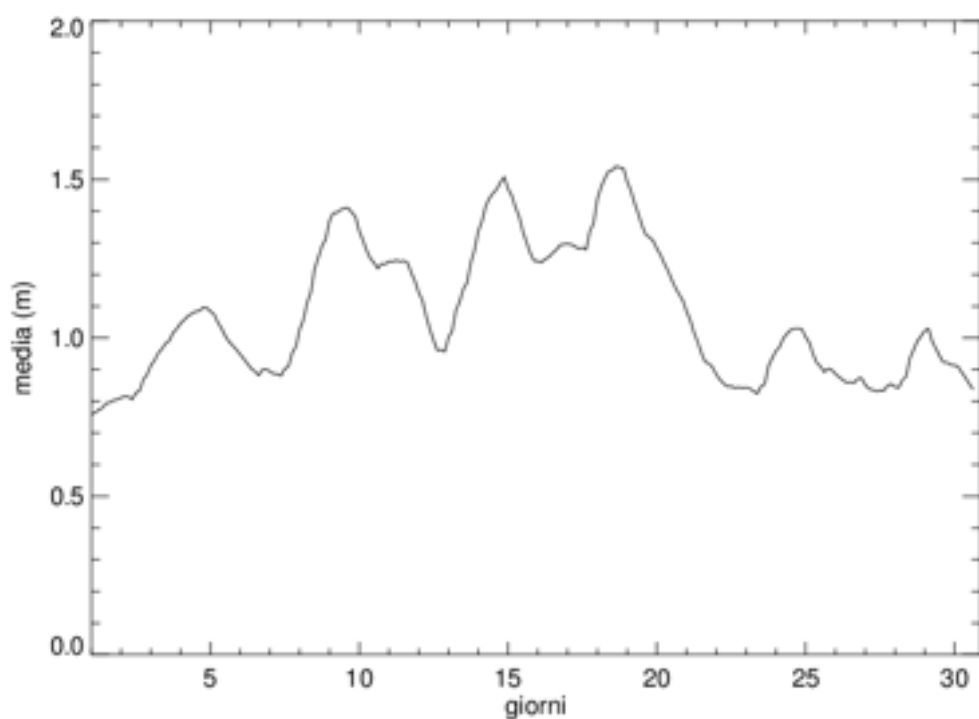


Figura 15. Media calcolata per ogni tempo su tutti i punti della griglia del modello WAM. Periodo utilizzato aprile 2012, risoluzione del modello WAM 1/16°.

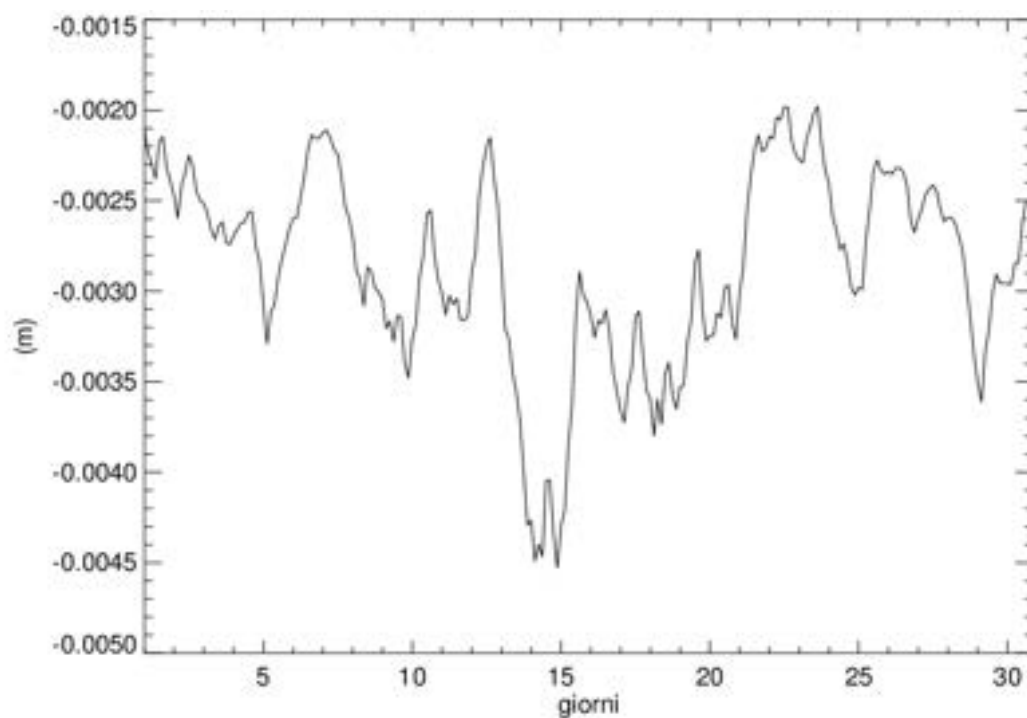


Figura 16. Media della differenza calcolata per ogni tempo su tutti i punti della griglia tra la simulazione con forzante a 0.1° e con forzante a 0.05°. Periodo utilizzato aprile 2012, risoluzione del modello WAM 1/16°.

Per verificare l'effetto legato all'uso di risoluzioni diverse del modello di onda sono state realizzate due simulazioni con lo stesso forzante per un periodo di 5 giorni. E' stato utilizzato il modello WAM alla risoluzione di $1/16^\circ$ e alla risoluzione di $1/32^\circ$. I modelli sono stati forzati utilizzando i campi del vento a 10 metri forniti dal sistema SKIRON alla risoluzione di 0.05° per i 5 giorni della previsione a partire dal giorno 20 maggio 2013. Nelle Figure 17-19 sono mostrate, per le altezze significative, la *root mean square* calcolata per i punti comuni tra le due griglie, la media relativa ad una delle due simulazioni e la media delle differenze. La *root mean square* aumenta con il passare del tempo mentre il valore medio della differenza varia nel corso della simulazione. Questo valore è maggiore di quello osservato confrontando i risultati ottenuti cambiando la risoluzione del forzante. Inoltre in questo caso il valore della differenza media, comunque molto basso, non ha un segno definito, indicando quindi che esistono alternativamente valori maggiori ora per l'una ora per l'altra simulazione.

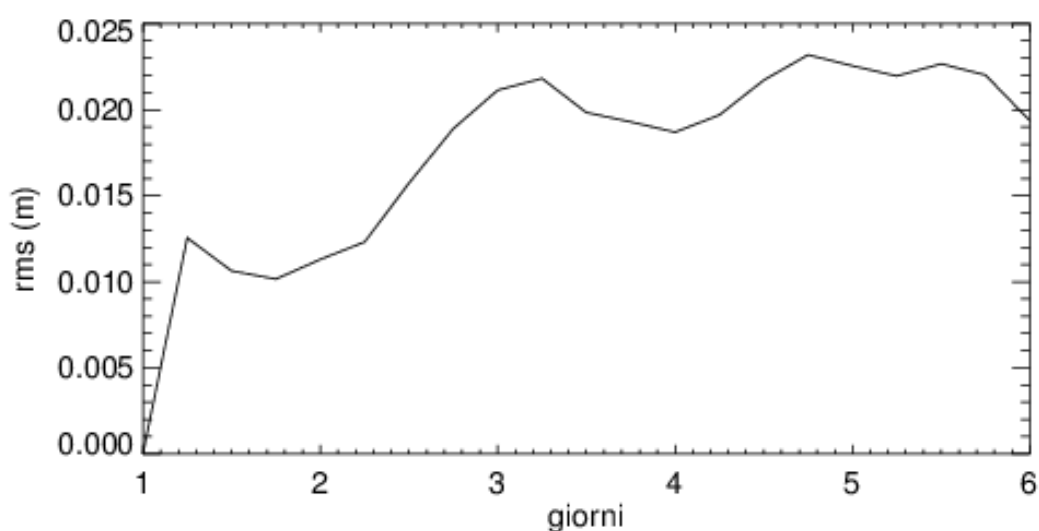


Figura 17. *Root mean square* calcolata per ogni tempo come somma dei quadrati delle differenze delle altezze delle onde nei punti coincidenti, tra due simulazioni con forzante SKIRON 0.05° . Periodo utilizzato dal 20 al 25 maggio 2013. Confronto tra la simulazione con il modello WAM alla risoluzione di $1/16^\circ$ ed alla risoluzione di $1/32^\circ$.

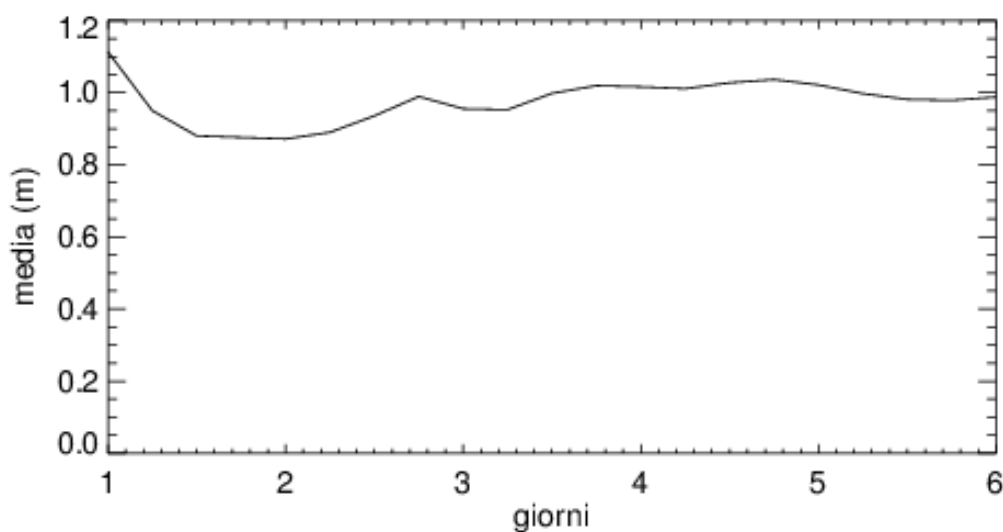


Figura 18. Media calcolata per ogni tempo come somma dei quadrati delle differenze nei punti coincidenti, tra due simulazioni con forzante SKIRON 0.05°. Periodo utilizzato dal 20 al 25 maggio 2013. Confronto tra la simulazione con il modello WAM alla risoluzione di 1/16° e WAM alla risoluzione di 1/32°.

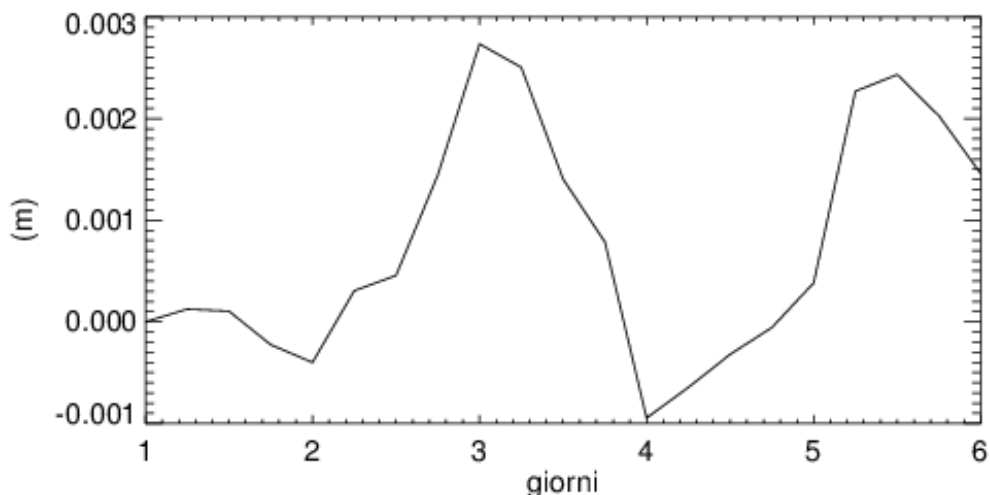


Figura 19. Media della differenza calcolata per ogni tempo come somma dei quadrati delle differenze nei punti coincidenti, tra due simulazioni con forzante SKIRON 0.05°. Periodo utilizzato dal 20 al 25 maggio 2013. Confronto tra la simulazione con il modello WAM alla risoluzione di 1/16° ed alla risoluzione di 1/32°.

3 Conclusioni

In questo rapporto viene descritta la realizzazione di un sistema operativo di previsione del moto ondoso per tutto il bacino Mediterraneo. Questo sistema fornisce campi di energia, altezza significativa e periodo delle onde alla risoluzione di 1/32° ed inoltre memorizza le condizioni al contorno necessarie per la simulazione delle onde a maggiore risoluzione per sottobacini del Mediterraneo.

Informazioni dettagliate sulle future condizioni del mare sono di grande utilità nella gestione di questa risorsa energetica, in quanto permettono, a partire dai dati di rendimento dei particolari sistemi di conversione, una valutazione preventiva dell'energia che potrà essere immessa nella rete. Inoltre taluni di questi sistemi di conversione possono migliorare lo sfruttamento energetico tramite la riconfigurazione di parametri di esercizio se si dispone in anticipo di informazioni relative alle caratteristiche spettrali delle onde.

La valutazione dei dati di previsione meteorologica disponibili per l'intero bacino Mediterraneo, ha portato a scegliere come dati per forzare il sistema operativo i venti a 10 metri prodotti dal modello SKIRON dell'Università di Atene. E' stata effettuata una valutazione preliminare di questi venti tramite il confronto dei risultati di una simulazione con il modello WAM rispetto ai valori misurati dalle boe della Rete Ondametrica Nazionale. Questa simulazione ha mostrato un ottimo accordo per tutte le boe considerate.

Simulazioni di confronto sono state anche rivolte all'analisi dell'influenza che riveste la risoluzione spaziale dei campi di vento e quella del modello di onda, sui risultati ottenuti. L'utilizzo di campi alla risoluzione di 1/20° o di 1/10° provenienti dallo stesso sistema meteorologico SKIRON, ha mostrato una influenza molto limitata sulla previsione delle onde. Un analogo risultato è stato ottenuto dal confronto tra simulazioni con uguale forzante, utilizzando il modello WAM alle due risoluzioni di 1/16° e 1/32°. Questi confronti non possono comunque essere ritenuti esaustivi anche perché le risoluzioni dei dati usati sono molto prossime

a quella del codice di onde, non essendo disponibili dati meteorologici più dettagliati per l'intero bacino Mediterraneo.

4 Riferimenti bibliografici

1. G. Sannino, A. Bargagli, A. Carillo, E. Caiaffa, E. Lombardi, P. Monti, G. Leuzzi, "Valutazione del potenziale energetico del moto ondoso lungo le coste Italiane" - Report RdS/2011/151 – 2011
2. A. Carillo, A. Bargagli, E. Caiaffa, R. Iacono, G. Sannino, "Stima del potenziale energetico associato al moto ondoso in regioni campione della costa italiana" - Report RdS/2012/170 – 2012
3. L. La Porta, E. Lombardi, M. Pollino, A. Carillo, E. Caiaffa, G. Sannino – "Sviluppo di modelli meteo-marini per la previsione del moto ondoso in aree portuali italiane: produzione di mappe energetiche e visualizzazione web-gis." – Report Rds/2013/229 - 2013
4. 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.
5. A. Papadopoulos, P. Katsafados, G. Kallos, "Regional weather forecasting for marine application". Global Atmos Ocean Syst 8(2–3) (2001), pp. 219–237.
6. A. Papadopoulos, P., Katsafados, G., Kallos, and S. Nickovic, "The weather forecasting system for POSEIDON – An overview" GAOS, 8(2–3), (2002) pp. 219–237.
7. 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.
8. M. Baldauf, A. Seifert, J. Förstner, D. Majewski, M. Raschendorfer, T. Reinhardt, "Operational convective-scale numerical weather prediction with the cosmo model: description and sensitivities". Mon. Wea. Rev., 139, (2011) 3887–3905. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-10-05013.1>
9. L. Cavaleri, L. Bertotti, "In search of the correct wind and wave fields in a minor basin" – Mon. Weather Review, 125 (1997), pp.1964-1975.
10. L. Bertotti, L. Cavaleri, "Wind and wave predictions in the Adriatic Sea" – J. Mar. Syst. 78 (2009) pp.S227-S234.
11. H. Günther, A. Behrens, "The wam model validation document version 4.5.3." Tech. Rep. Institute of Coastal Research Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) (2011)
12. GEBCO. [http://www.gebco.net/data and products/gridded bathymetry data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)