



Ricerca di Sistema elettrico

LA1.2: Previsioni operative dello stato del mare per il Mediterraneo e per 10 sotto- bacini italiani

S. Memè, A. Carillo, F. Antonioli, G. Pisacane, MV. Struglia, A.
Bargagli, R. Cannata, E. Lombardi, G. Sannino

LA1.2: Previsioni operative dello stato del mare per il Mediterraneo e per 10 sotto-bacini italiani

S. Memè, A. Carillo, F. Antonioli, G. Pisacane, MV. Struglia, A. Bargagli, R. Cannata, E. Lombardi, G. Sannino
Aprile 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.8 Energia elettrica dal mare

Work package: Energia elettrica dal mare

Linea di attività: LA1.2: Previsioni operative dello stato del mare per il Mediterraneo e per 10 sotto-bacini italiani

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino ENEA

Responsabile del Work package: 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.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA OPERATIVO	5
2.2 DESCRIZIONE DELLA CATENA OPERATIVA	10
2.3 DATI MEMORIZZATI	11
2.4 MAPPE DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA PER L'ANNO 2019	11
3 CONCLUSIONI.....	17
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	17

Sommario

Il presente rapporto descrive il sistema operativo per la previsione del moto ondoso, che è stato realizzato nell'ambito del PAR 2013 ed è stato mantenuto in operatività nel corso del 2019. Il sistema è operativo a partire dal giugno del 2013 sui computer dell'ENEA e produce quotidianamente previsioni su un dominio di calcolo che si estende su tutto il bacino Mediterraneo alla risoluzione di $1/32^\circ$, utilizzando un modello per la simulazione delle onde in acque profonde. Un diverso modello di calcolo, più idoneo all'uso in presenza di acque basse, viene poi utilizzato per realizzare previsioni alla risoluzione di $1/128^\circ$ su 10 sotto-aree dei mari italiani.

Il sistema produce quotidianamente le previsioni per i cinque giorni successivi, con una risoluzione temporale oraria. I campi bidimensionali relativi alle principali variabili, sia relativamente alla simulazione sul bacino Mediterraneo che a quelle sui sottobacini, vengono memorizzati sui computer dell'ENEA e entrano automaticamente a far parte della banca dati relativa al moto ondoso, incrementata quotidianamente.

I risultati delle simulazioni vengono anche pubblicati automaticamente sulla pagina web dell'ENEA (<https://giotto.casaccia.enea.it/waves>), dove sono disponibili mappe delle principali grandezze relative alle simulazioni del giorno corrente, sia per il Mediterraneo che per i 10 sottobacini.

Il presente rapporto richiama brevemente la descrizione del sistema operativo sia per la parte riguardante i modelli di onde utilizzati che la realizzazione della catena operativa. Nell'ultimo paragrafo vengono mostrate alcune mappe di altezza significativa calcolate sui dati prodotti nel corso del 2019.

1 Introduzione

L'ENEA è da anni impegnata in attività di modellistica del moto ondoso a supporto della progettazione e della sperimentazione sul campo di impianti per la produzione di energia.

Le climatologie del moto ondoso costituiscono la base per l'identificazione dei siti potenzialmente idonei per lo sfruttamento dell'energia tramite convertitori; la caratterizzazione delle onde in termini di altezza e frequenza, risulta anche fondamentale per progettare convertitori in grado di sfruttare al massimo l'energia disponibile. I dati provenienti dalle previsioni del moto ondoso, invece, costituiscono un importante supporto nella fase di esercizio dei convertitori di energia. In alcuni casi è possibile agire tramite un sistema di controllo su alcune caratteristiche del convertitore, allo scopo di ottimizzare l'estrazione di energia in funzione dell'onda in arrivo. Uno studio in questo senso è stato ad esempio effettuato relativamente all'ISWEC (Inertial Sea Wave Converter) sviluppato dal Politecnico di Torino, utilizzando le previsioni prodotte dall'ENEA [1].

I dati prodotti quotidianamente dalle previsioni operative permettono inoltre di aggiornare continuamente una banca dati delle variabili del moto ondoso, ad una risoluzione particolarmente elevata.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 *Descrizione del sistema operativo*

L'ENEA ha realizzato nell'ambito del PAR 2013 un sistema operativo per la previsione del moto ondoso che è nato con lo scopo principale di costituire un supporto alla gestione dei convertitori di energia dal moto ondoso. Il sistema è stato descritto in dettaglio nei rapporti tecnici [2,3], una prima validazione dei risultati ottenuti è stata effettuata a partire dai dati relativi ai primi anni di simulazione [4,5].

Il sistema operativo 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. Le informazioni derivate dal modello a risoluzione minore sono comunque utilizzate come condizioni al contorno ai vari modelli dei sotto-bacini, fornendo i dati relativi alle onde provenienti dalle regioni limitrofe, che possono rappresentare una importante componente rispetto a quelle generate localmente.

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, e in tempi ragionevolmente brevi dopo la loro produzione. Inoltre la risoluzione spaziale dei forzanti atmosferici deve essere sufficientemente elevata da tenere conto degli effetti topografici, particolarmente importanti nel bacino mediterraneo, caratterizzato da una topografia complessa, per la corretta valutazione del vento nelle zone costiere.

I dati atmosferici utilizzati sono attualmente quelli prodotti dal sistema SKIRON sviluppato dall'Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group dell'Università di Atene alla risoluzione orizzontale di $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. Il sistema operativo SKIRON [6,7,8] è in uso in circa 20 istituti di ricerca e servizi meteorologici nel mondo e si basa sul modello meteorologico ad area limitata Eta/NCEP [9], sviluppato nell'ambito di diversi progetti della Comunità Europea, in particolare per quanto riguarda la messa a punto delle parametrizzazioni della radiazione atmosferica e dei processi superficiali. Le previsioni del sistema SKIRON coprono un intervallo temporale di cinque giorni, i dati sono disponibili con frequenza oraria.

Le previsioni del moto ondoso per l'intera area mediterranea sono state eseguite utilizzando una versione parallela del modello WAM ciclo 4.5.3 [10]. WAM è un modello spettrale di terza generazione che risolve l'equazione di trasporto delle onde esplicitamente, senza assunzioni sulla forma dello spettro dell'onda. Il modello, ampiamente utilizzato su scale di bacino, è stato sviluppato per simulare la propagazione delle onde in acque profonde. Il dominio di calcolo copre tutto il Mar Mediterraneo, da 5.50 W a 36.125 °E di longitudine e di 30.2 °N a 45.825 °N di latitudine ed è discretizzato ad una risoluzione uniforme di 1/32° in entrambe le direzioni, corrispondente ad una dimensione della griglia lineare di circa 3.5 chilometri. Il numero di nodi di calcolo utilizzati è pari a 1333 x 501.

La batimetria del modello è stata calcolata a partire dalla Carta Batimetrica Generale degli Oceani (GEBCO) disponibile alla risoluzione di 30 secondi di arco [11].

Lo spettro bidimensionale di densità di energia delle onde è stato discretizzato utilizzando 36 direzioni angolari, corrispondenti ad una risoluzione di 10°, e 32 intervalli di frequenza a partire da 0.05 Hz con incrementi relativi di 0.1 tra un intervallo di frequenza e il successivo. L'intervallo di tempo per la propagazione delle onde è stato fissato a 15 secondi, questo valore costituisce un limite superiore in quanto il codice WAM è in grado in maniera automatica di ridurlo nel caso le velocità siano tali da violare il criterio di stabilità CFL (Courant-Friedrichs-Lewy).

Le simulazioni a più alta risoluzione sono invece effettuate mediante il codice SWAN (Simulating WAVes Nearshore) ad una risoluzione di 1/128° che corrisponde nell'area di interesse a distanze di circa 700 - 800 m. Il modello SWAN [12] è stato sviluppato per l'uso in acque costiere ed è dotato di parametrizzazioni specifiche delle acque poco profonde, tiene conto della dissipazione delle onde dovuta all'attrito sul fondo e alla rottura delle onde causata dalla diminuzione della profondità. È stata adottata la stessa discretizzazione in frequenza e in direzione dello spettro utilizzata per il codice WAM, corrispondente a 32 livelli di frequenza e 36 direzioni angolari.

Le simulazioni a più alta risoluzione vengono effettuate su 10 aree nei mari italiani che sono state scelte sulla base di considerazioni di carattere energetico. Le due aree più estese sono state definite nella zona ovest della Sardegna e nell'area della Sicilia nord-occidentale che, sulla base della climatologia delle onde nel Mediterraneo, risultano presentare i valori maggiori di energia [13]. Le altre zone includono importanti aree portuali in cui è in corso l'installazione di impianti di produzione di energia dal moto ondoso (come Civitavecchia) e isole minori, per le quali l'autosufficienza energetica risulta fondamentale.

I domini di calcolo dei modelli SWAN sono mostrati in Figura 1 sulla batimetria del Mar Mediterraneo e le coordinate dei limiti in longitudine e latitudine sono riportate in Tabella 1.

Rispetto alle 10 aree definite all'inizio del periodo di operatività del sistema e mostrate in [3], nel giugno 2016 due aree vicine sono state accorpate per costituire l'area del Tirreno settentrionale. Inoltre nel luglio 2015 è stata inserita una nuova area nello stretto di Messina. Nelle figure 2 e 3 sono riportate le batimetrie delle due nuove aree, per quella situata nel Tirreno settentrionale sono indicati i limiti delle aree definite in precedenza.

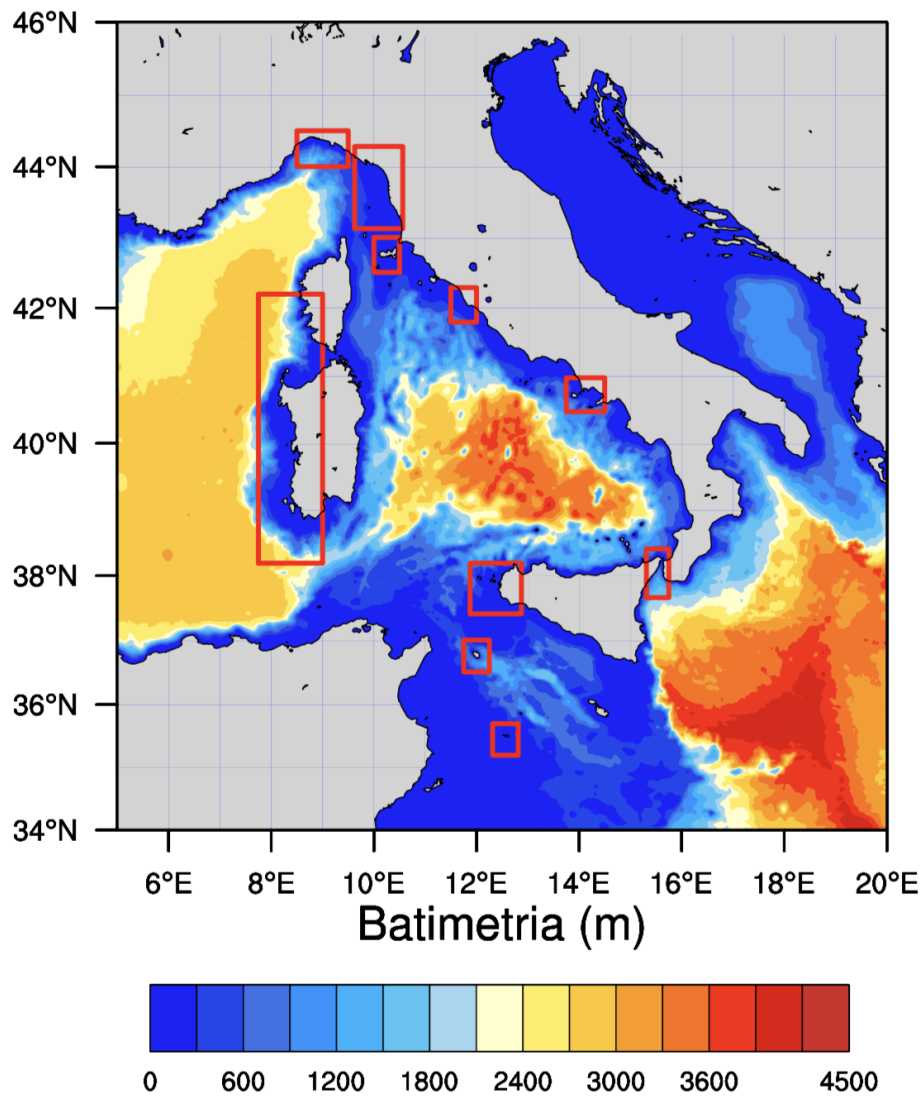


Figura 1. Batimetria dei mari italiani con indicazione delle aree sulle quali vengono effettuate le simulazioni ad alta risoluzione.

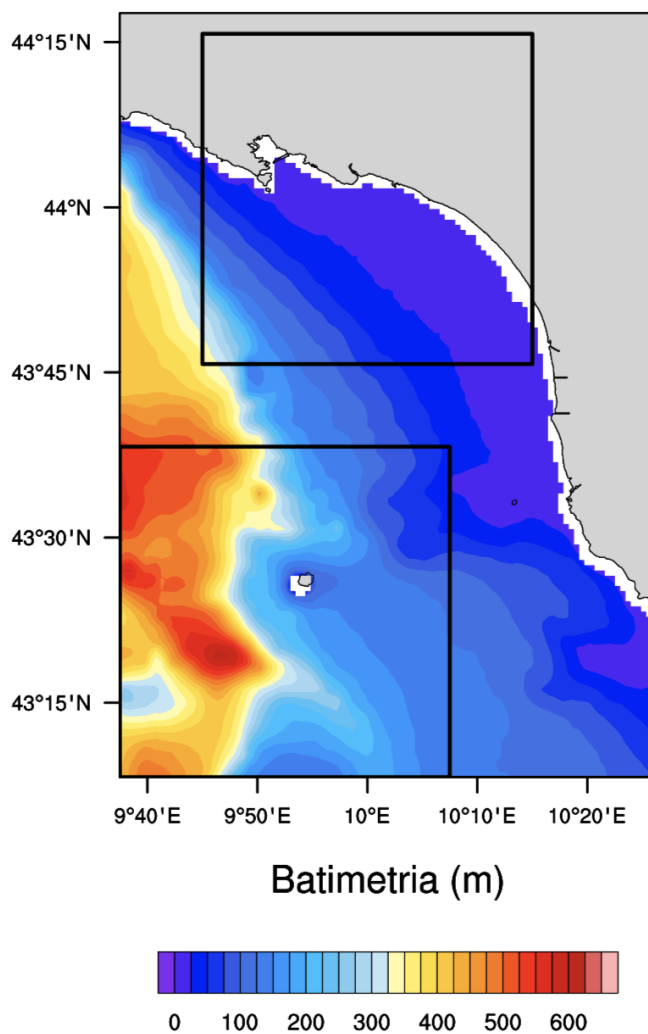


Figura 2. Dominio di calcolo e batimetria dell'area definita nel Tirreno settentrionale per la simulazione con il modello SWAN. Sono indicati i limiti delle due aree definite in precedenza.

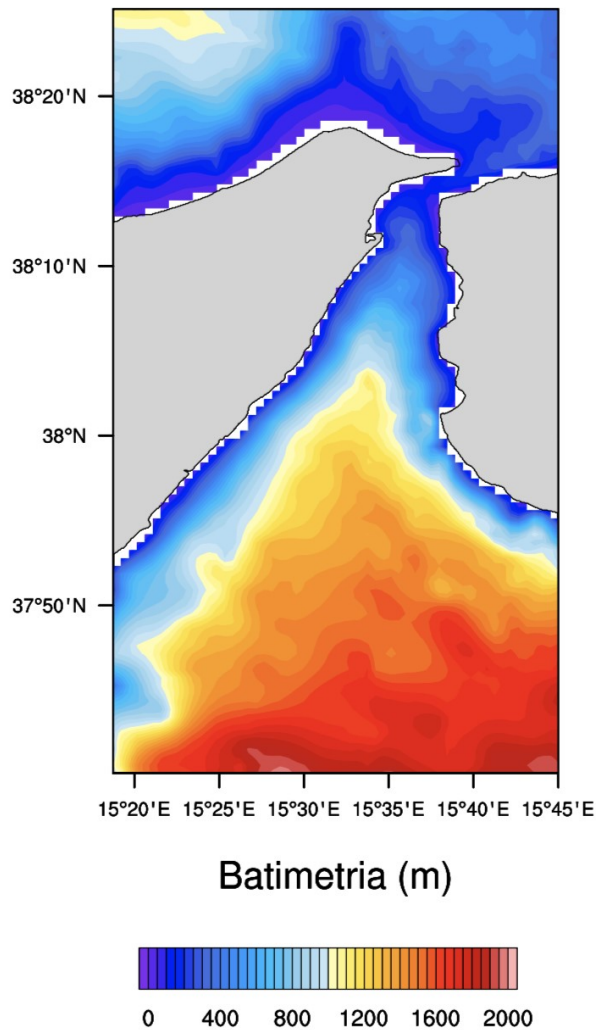


Figura 3. Dominio di calcolo e batimetria dell'area relativa allo stretto di Messina usata per la previsione con il modello SWAN.

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

Area	Latitudine minima	Latitudine massima	Longitudine minima	Longitudine massima
Sardegna Occidentale	38.2	42.2	7.75	9.
Sicilia nord-occidentale	37.41875	38.2	11.875	12.875
isola di Lampedusa	35.2	35.7	12.3125	12.8125
Isola d'Elba	42.5125	43.0125	10.	10.5
Golfo di Napoli	40.48125	40.98125	13.75	14.5
Golfo di Genova	44.0125	44.5125	8.5	9.5
isola di Pantelleria	36.5125	37.0125	11.75	12.25
Mar Ligure	43.1375	44.29375	9.625	10.4375
Stretto di Messina	37.66875	38.41875	15.3125	15.75

2.2 Descrizione della catena operativa

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 a partire dal 2013. Le previsioni vengono effettuate ogni mattina e le simulazioni hanno inizio automaticamente non appena i dati in input risultano disponibili.

La procedura attivata prevede i seguenti passi:

1. I dati orari di vento 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 6, ora italiana.
2. Dai 121 file grib vengono estratti i dati relativi al vento a 10 m e con essi vengono prodotti due files, uno per la componente U e l'altro per la componente V relativi all'intero periodo di 5 giorni, in formato *netcdf* (Network Common Data Form).
3. Una procedura scritta in linguaggio *idl* trasforma i file *netcdf* in un file binario idoneo alla lettura da parte dei codici di onde WAM e SWAN.
4. Viene eseguito il modello WAM sull'intero bacino Mediterraneo. Vengono memorizzati su files, con risoluzione oraria, i valori degli spettri bidimensionali dell'energia lungo tutto il bordo di ciascun sottobacino, tali dati vengono usati come condizioni laterali per le simulazioni con il modello SWAN. Vengono memorizzati su file i dati necessari per il *restart* del codice a distanza di un giorno di simulazione. Ogni giorno la simulazione viene infatti inizializzata con i dati prodotti dalla simulazione del giorno precedente, in caso il file relativo sia assente viene automaticamente utilizzato il *restart* prodotto dalla simulazione del giorno prima.
5. Il sistema operativo procede con l'esecuzione del codice SWAN su tutti i sottobacini. Anche in questo caso per ciascun sottobacino vengono memorizzati su file i dati necessari per il *restart* del codice a distanza di un giorno di simulazione, tali files verranno usati per inizializzare la simulazione SWAN del giorno successivo.
6. Vengono create le mappe statiche e le animazioni dei risultati dei modelli di previsione sull'intero bacino Mediterraneo e sui sottobacini. Per ogni ora simulata vengono prodotte e rese disponibili sul sito ENEA mappe per le variabili: energia delle onde, altezza e periodo medio. Sulla pagina del sito è possibile, per la simulazione del giorno corrente, selezionare l'ora da visualizzare, scorrere tra le immagini o visualizzare direttamente la sequenza delle immagini.

Il computer utilizzato è un UV2000 della Silicon Graphics costituito di 128 cores e con 512GB di RAM condivisa. Per tutta la durata del calcolo della previsione dello stato del mare il computer viene interamente dedicato all'esecuzione del sistema operativo. L'esecuzione del codice WAM avviene al massimo entro due ore dall'inizio della simulazione. Questo valore varia essenzialmente a causa della variazione automatica dell'intervallo di propagazione del codice WAM, in funzione della situazione meteorologica. Per quanto riguarda le simulazioni del modello SWAN su sottobacini, la parallelizzazione viene effettuata su un numero diverso di CPUs per ciascun sottobacino, in funzione della dimensione della griglia, in modo da contenere al massimo il tempo di esecuzione di tutte le simulazioni.

La catena operativa è stata eseguita regolarmente per tutti i giorni del 2019, tranne due date isolate, in cui erano comunque disponibili le simulazioni corrispondenti al secondo giorno simulato.

2.3 Dati memorizzati

Le simulazioni con il modello WAM producono quotidianamente 120 *files*, uno in corrispondenza di ciascuna ora della previsione per tutta la durata di 5 giorni della simulazione. Questi *files*, in formato binario, contengono i dati su tutta la griglia di calcolo di una serie di variabili bidimensionali, tra cui l'ampiezza significativa dell'onda, il periodo medio, il periodo di picco e la direzione di propagazione. Tutti i *files* prodotti, a partire dall'inizio del periodo di operatività del sistema nel giugno 2013, sono memorizzati sulle macchine dell'ENEA e vanno ad accrescere la banca dati del moto ondoso. Vengono inoltre memorizzati sia i campi di vento utilizzati come forzante che i *files* contenenti le condizioni laterali per i modelli ad alta risoluzione, in modo da rendere possibile una eventuale ripetizione di un caso di particolare interesse.

In maniera analoga per ciascun sottobacino vengono memorizzati, in questo caso in formato *netcdf*, i campi orari per tutte le variabili in uscita del modello. In questo caso, vengono memorizzati anche tutti i *files* di *restart* prodotti.

2.4 Mappe di altezza significativa per l'anno 2019

A titolo di esempio si riportano nelle figure 4-7 i valori delle medie stagionali dell'ampiezza significativa delle onde, calcolate per l'anno 2019. È stato utilizzato il primo giorno della previsione per l'intero Mediterraneo effettuata con il modello operativo WAM. La media invernale è stata realizzata utilizzando solo i dati relativi ai mesi di gennaio e febbraio.

Si può osservare come la distribuzione delle medie stagionali sia consistente con le climatologie realizzate in precedenza utilizzando i dati relativi alla decade 2001-2010 [14]. Le mappe prodotte presentano infatti le maggiori intensità durante la stagione invernale; in questa stagione, la massima intensità ricopre il Mediterraneo occidentale ed in particolare l'area del golfo del Leone, inoltre valori maggiori di 1.75 m sono presenti anche sulla maggior parte del mar Ionio. L'ampiezza delle onde segue una distribuzione analoga anche nel periodo primaverile ma con valori ovunque inferiori. La stagione estiva è caratterizzata da valori medi che superano un metro solo in una zona limitata del Mediterraneo orientale sotto l'effetto dei venti etesiani. La stagione autunnale del 2019 presenta valori di altezza d'onda medi molto inferiori alla climatologia, che risulta invece più simile sia nei valori che nella distribuzione alla climatologia della stagione invernale.

Il valore medio dell'ampiezza d'onda particolarmente elevato nei mesi invernali deriva principalmente da alcuni episodi estremamente intensi che si sono verificati nel Mediterraneo occidentale nel corso del mese di gennaio. Nelle successive figure 8 e 9 vengono mostrate alcune mappe orarie, relative a questi episodi, ottenute dal sistema operativo per l'area a ovest della Sardegna. Come già osservato, questa è in generale la zona di mar italiano dove si verificano le condizioni estreme di moto ondoso.

Nella sequenza di mappe di previsione di ampiezza significativa d'onda per il 14 gennaio 2019 si osserva l'intensificazione del moto ondoso che colpisce la zona nord-occidentale della Sardegna, con onde che superano i 7 m in prossimità della costa.

Nell'episodio del 24 gennaio 2019, onde che raggiungono i 6 m di altezza significativa si propagano verso la costa meridionale della Sardegna già dalle primissime ore della mattina e nelle 4 ore successive superano la soglia degli 8.5 m al bordo del dominio di calcolo, con onde di circa 6.5 che raggiungono la costa.

Inverno 2019

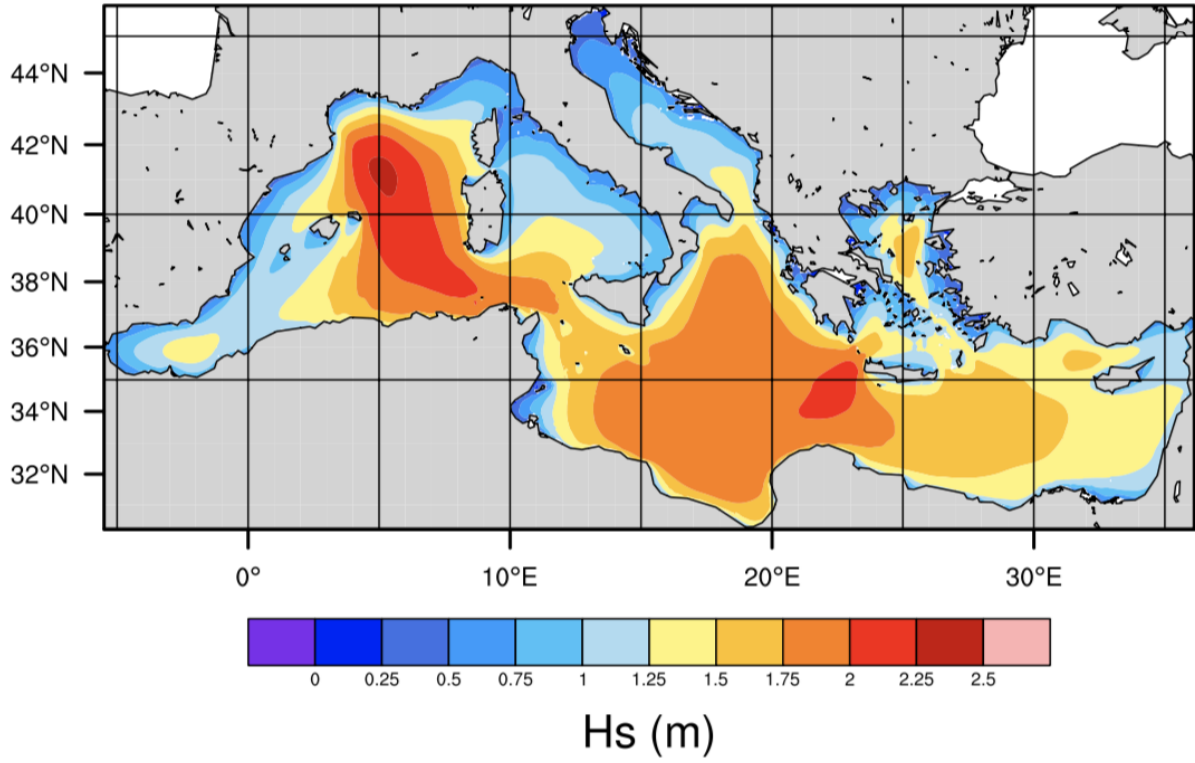


Figura 4. Media sui mesi invernali calcolata utilizzando il primo giorno di simulazione delle previsioni dell'anno 2019.

Primavera 2019

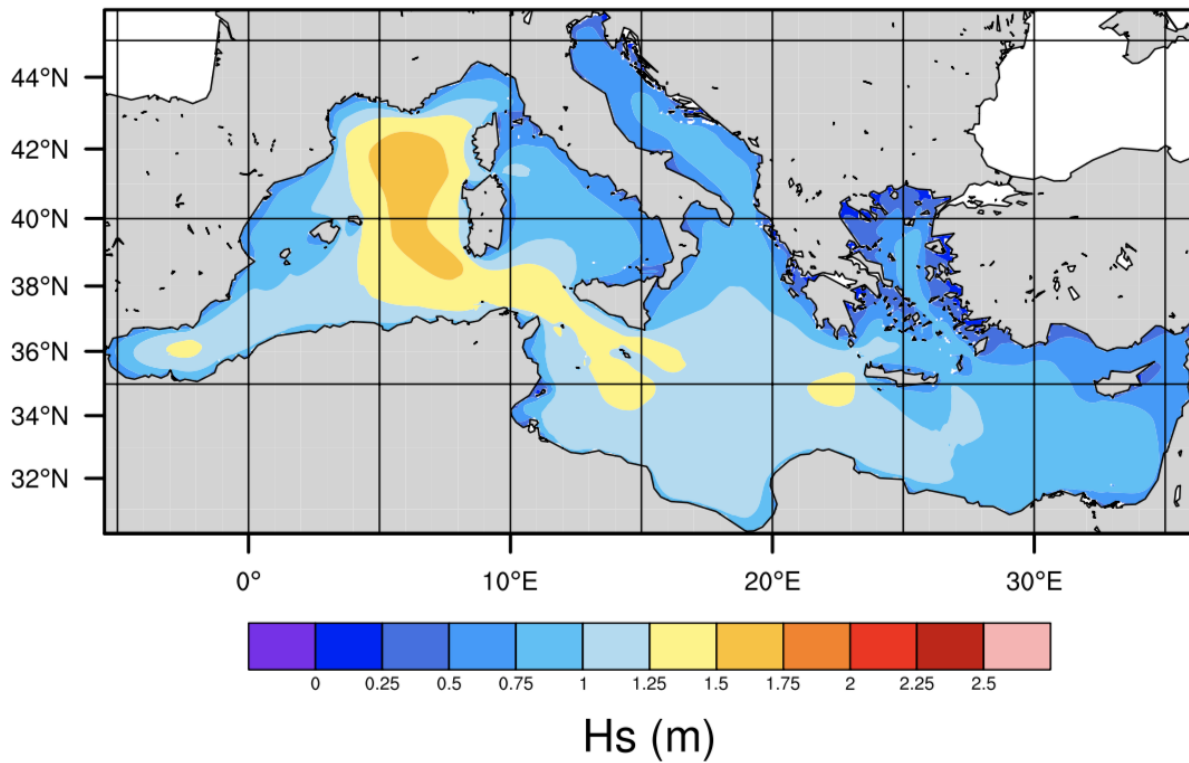


Figura 5. Media sulla primavera calcolata utilizzando il primo giorno di simulazione delle previsioni dell'anno 2019.

Estate 2019

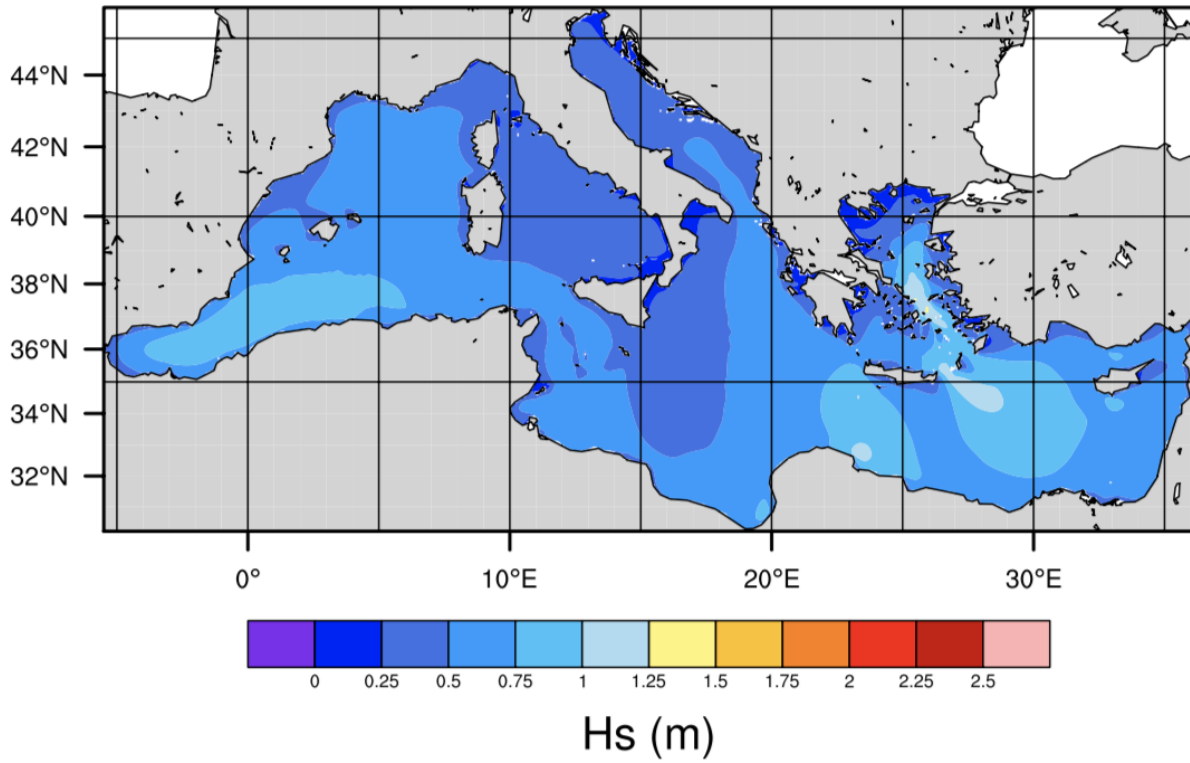


Figura 6. Media sui mesi estivi calcolata utilizzando il primo giorno di simulazione delle previsioni dell'anno 2019.

Autunno 2019

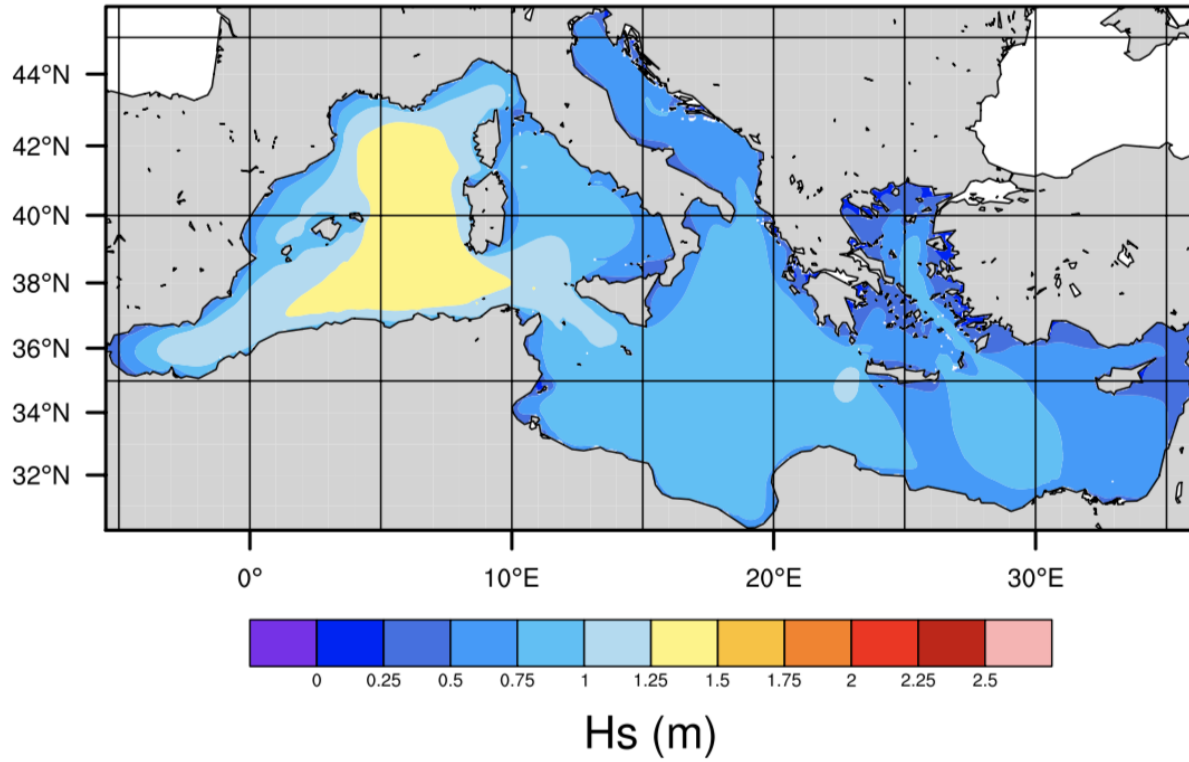
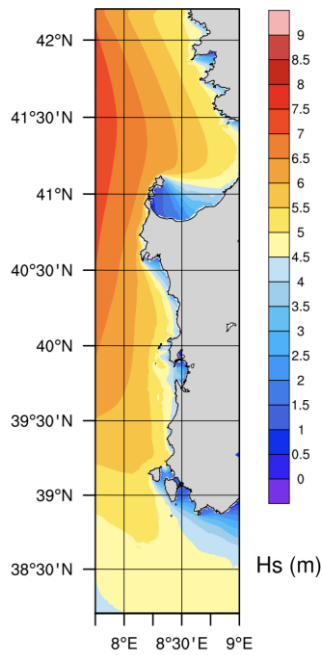
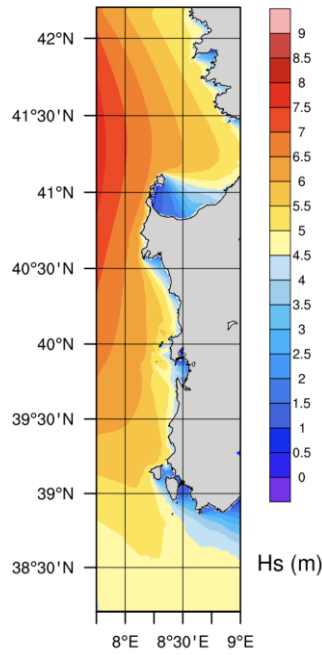


Figura 7. Media sui mesi autunnali calcolata utilizzando il primo giorno di simulazione delle previsioni dell'anno 2019.

Previsione 14/1/2019 6h



Previsione 14/1/2019 8h



Previsione 14/1/2019 10h

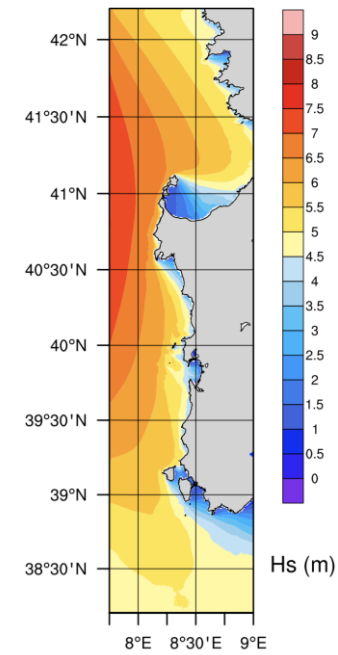
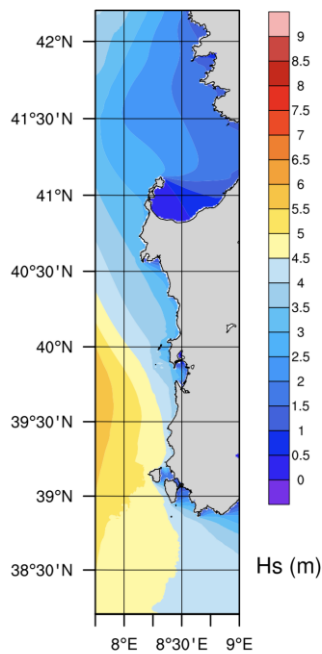
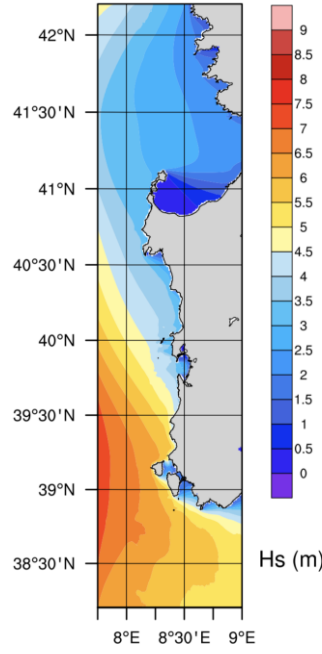


Figura 8. Sequenza di mappe relative alle previsioni del giorno 14 gennaio 2019.

Previsione 24/1/2019 2h



Previsione 24/1/2019 4h



Previsione 24/1/2019 6h

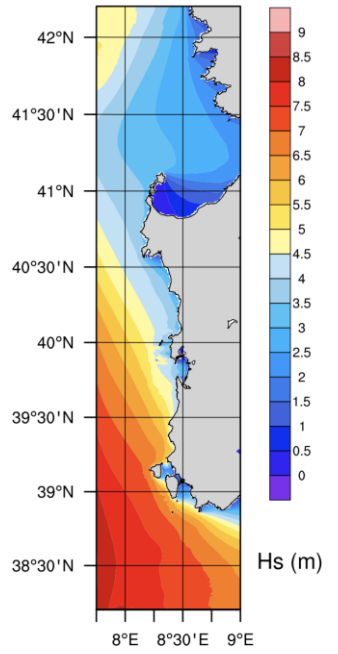


Figura 9. Sequenza di mappe relative alle previsioni del giorno 24 gennaio 2019.

3 Conclusioni

Nel presente rapporto è stato descritto il sistema per la previsione delle onde che è attualmente operativo all'ENEA. L'operatività è stata garantita per tutto l'arco dell'anno 2019 e i dati prodotti dalle simulazioni sono stati regolarmente raccolti per costituire una banca dati delle onde per la regione mediterranea.

Le mappe stagionali calcolate per l'anno 2019 risultano in linea con la climatologia dell'area. È stata osservata la particolare intensità del moto ondoso nel corso del mese di gennaio su tutto il bacino. Sono state quindi mostrate le previsioni ad alta risoluzione relative a due episodi di particolare intensità che si sono presentati nel corso del mese di gennaio ed hanno interessato in particolare la costa occidentale della Sardegna.

4 Riferimenti bibliografici

1. G. Bracco, A. Carillo, E. Giorcelli, L. Liberti, G. Mattiazzo, E. Prudentino, G. Sannino, G. Vissio, "Use of wave forecast for the regulation of ISWEC", EWTEC 2015, Nantes.
2. A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino, "Report di sintesi sulla realizzazione di un sistema operativo per la previsione dell'energia da moto ondoso", RdS/2013/085
3. A. Carillo, E. Lombardi, G. La Porta, M. Pollino, E. Caiaffa, G. Sannino, F. Arena, A. Viviano, A. Romolo, "Sviluppo di modelli meteo-marini per la previsione del moto ondoso in aree portuali italiane: produzione di mappe energetiche e visualizzazione web-gis" RdS/2013/229
4. A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino, "Validazione del sistema operativo per la previsione del moto ondoso nel Mediterraneo" RdS/PAR2014/238
5. A. Carillo, G. Sannino, E. Lombardi "Wave energy potential: A forecasting system for the Mediterranean basin" *Energia Ambiente e Innovazione* 61 (special n. 2), 16-21 (2015)
6. 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.
7. A. Papadopoulos, P. Katsafados, G. Kallos, "Regional weather forecasting for marine application". *Global Atmos Ocean Syst* 8(2-3) (2001), pp. 219-237.
8. 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.
9. 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.
10. H. Günther, A. Behrens, "The wam model validation document version 4.5.3." Tech. Rep. Institute of Coastal Research Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) (2011)
11. GEBCO. [http://www.gebco.net/data and products/gridded bathymetry data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)
12. The SWAN team, "SWAN User Manual", Delft University of Technology, The Netherlands, <http://www.swan.tudelft.nl>
13. L. Liberti, A. Carillo, G. Sannino, "Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective" *Renewable Energy*, Volume 50, Pages 938-949, ISSN 0960-1481, DOI: 10.1016/j.renene.2012.08.023.
14. 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" RdS/2011/151