



Ricerca di Sistema elettrico

Validazione del sistema operativo per la previsione del moto ondoso nel Mediterraneo

Adriana Carillo, Emanuele Lombardi, Gianmaria Sannino

VALIDAZIONE DEL SISTEMA OPERATIVO PER LA PREVISIONE DEL MOTO ONDOSI NEL MEDITERRANEO

Adriana Carillo, Emanuele Lombardi, Gianmaria Sannino (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

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

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

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 DESCRIZIONE DEI MODELLI UTILIZZATI.....	5
2.2 VALIDAZIONE DEL SISTEMA OPERATIVO CON DATI SATELLITARI.....	9
2.3 VALIDAZIONE DEL SISTEMA OPERATIVO RISPETTO ALLE BOE.....	14
3 CONCLUSIONI.....	22
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	23

Sommario

L'ENEA sta svolgendo una attività di modellistica del moto ondoso con lo scopo sia di fornire una caratterizzazione della risorsa energetica per i mari italiani, che un supporto nelle fasi di sperimentazione in campo e di gestione di impianti di conversione. Per questo scopo è stato realizzato un sistema per la previsione dello stato del mare e dell'energia associata che è in funzione in modalità operativa a partire dal giugno 2013. Il sistema fornisce previsioni sull'intero bacino Mediterraneo alla risoluzione di $1/32^\circ$ e inoltre simulazioni a più alta risoluzione su sottobacini dei mari italiani per i cinque giorni successivi.

Il sistema, era inizialmente costituito da 10 sottobacini per i quali venivano forniti i campi delle principali variabili integrate rappresentative delle condizioni del mare. In questa annualità è stata inserita nella catena previsionale la simulazione su un ulteriore centrato nello stretto di Messina. Le previsioni ad alta risoluzione in questa area hanno lo scopo di fornire supporto alle attività sperimentali che vengono svolte dall'Università Mediterranea di Reggio Calabria in collaborazione con l'ENEA, all'interno dell'Accordo di Programma.

Nel corso della presente annualità è stata inoltre effettuata la validazione del sistema di previsione rispetto ai dati di altezza d'onda ricavati dai sensori dei satelliti Jason-2 e Saral / Altika e rispetto ai valori registrati dalle boe della Rete Ondametrica Nazionale. Dall'analisi statistica è risultato che le previsioni fornite mostrano in generale un buon accordo con le misure.

1 Introduzione

L'ENEA sta svolgendo una attività di modellistica del moto ondoso con lo scopo sia di fornire una caratterizzazione della risorsa energetica per i mari italiani, che un supporto nelle fasi di sperimentazione in campo e di gestione di impianti di conversione. Per questo scopo è stato realizzato, nell'ambito dell'Accordo di Programma, un sistema per la previsione dello stato del mare e dell'energia associata che è in funzione in modalità operativa a partire dal giugno 2013. Il sistema fornisce previsioni sull'intero bacino Mediterraneo e inoltre, a più alta risoluzione, su sottobacini dei mari italiani. In questo lavoro viene descritto il sistema previsionale ed effettuata una prima validazione delle altezze delle onde rispetto a valori misurati da sensori satellitari e dati ricavati dalle boe della Rete Ondametrica Nazionale.

L'energia da moto ondoso è una risorsa rinnovabile promettente che sta ricevendo un'attenzione particolare nei paesi che si affacciano sull'oceano Atlantico e Pacifico, dove il potenziale dell'energia delle onde è particolarmente elevato. In Europa la maggior parte degli impianti in funzione o in fase di progettazione si trovano lungo le coste atlantiche, in paesi come l'Irlanda, il Portogallo, la Spagna, e l'Inghilterra. Il Mediterraneo è un mare semichiuso ed è caratterizzato da valori inferiori di energia delle onde rispetto ai principali oceani; tuttavia la conversione dell'energia delle onde può rappresentare una risorsa economicamente vantaggiosa se si utilizzano convertitori di energia progettati per le sue caratteristiche specifiche. Se infatti l'energia disponibile è inferiore, d'altro canto i dispositivi utilizzati possono avere dimensioni ridotte e richiedere ridotti costi di manutenzione.

Il primo passo da seguire per lo sviluppo delle attività nel campo della produzione di energia dalle onde del mare è la caratterizzazione della risorsa. Una prima climatologia dell'energia disponibile nel bacino del Mediterraneo è stata effettuata utilizzando un modello delle onde alla risoluzione orizzontale di $1/16^\circ$ [1,2] e in seguito alla risoluzione di $1/32^\circ$ [3]. Le zone più produttive lungo le coste italiane sono state individuate lungo la costa occidentale della Sardegna e la costa nord-occidentale della Sicilia. L'installazione e la manutenzione degli apparecchi e la pianificazione di campagne sperimentali sul campo necessitano inoltre di disporre della previsione delle condizioni di onda in siti specifici. Dopo l'installazione dei dispositivi la previsione dell'energia disponibile risulta fondamentale per la gestione della rete elettrica in cui è inserita l'energia ricavata dal moto ondoso.

A tale scopo è stato realizzato un sistema di previsione operativa alla risoluzione spaziale di $1/32^\circ$ per tutto il bacino Mediterraneo. Le condizioni al contorno fornite da questo modello vengono poi utilizzate per forzare modelli con risoluzione maggiore sviluppate per le zone più interessanti lungo le coste italiane. Il sistema di previsione è operativo da più di un anno quindi la mole di dati raccolti ha permesso nel corso di questa annualità di effettuare una validazione con i dati derivati da misure satellitari e con i dati delle boe.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Descrizione dei modelli utilizzati

Le simulazioni sono state eseguite utilizzando una versione parallela del modello WAM ciclo 4.5.3. [4,5]. WAM è un modello spettrale 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 del modello di previsione 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. Il dominio è discretizzato in coordinate sferiche con una risoluzione uniforme di $1/32^\circ$ in ogni direzione, corrispondente ad una dimensione della griglia lineare di circa 3,5 chilometri. La batimetria del modello è stata calcolata a partire dalla Carta Batimetrica Generale degli Oceani (GEBCO) disponibile alla risoluzione di 30 secondi di arco. La Figura 1 mostra il dominio di calcolo e la batimetria del modello.

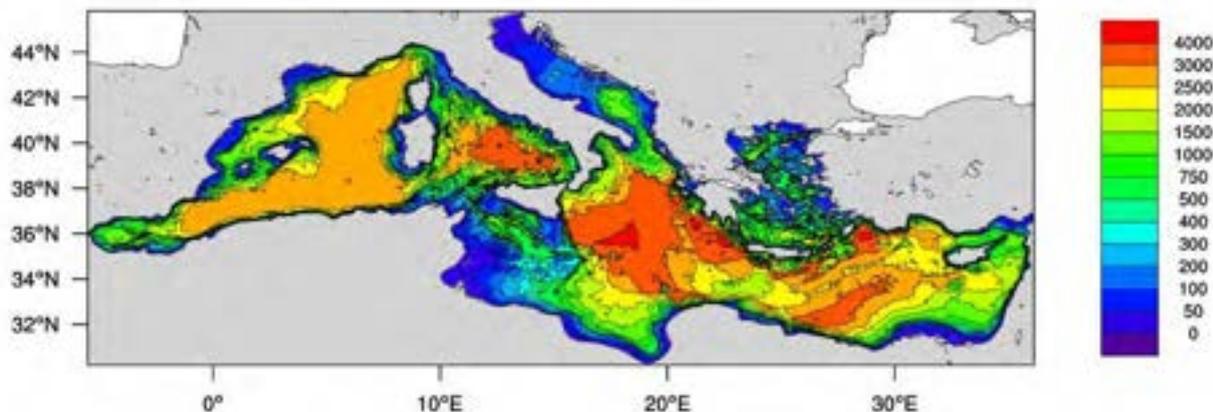


Figura 1. Batimetria del modello WAM per l'intero bacino Mediterraneo (profondità in m).

Lo spettro bidimensionale di densità di energia delle onde viene 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.

Il sistema operativo è completato con ulteriori 10 sottobacini situati lungo le coste italiane in cui la previsione del moto ondoso viene effettuata alla risoluzione di $1/128^\circ$.

Al fine di tenere conto sia delle onde generate localmente dai venti che delle onde che si propagano da zone lontane è stata applicata una procedura di *nesting*; i dati spettrali delle onde, derivati dal modello WAM, vengono utilizzati come condizioni al contorno per i modelli a risoluzione più elevata, le condizioni al contorno sono applicate con frequenza oraria. I domini di calcolo dei modelli ad alta risoluzione, illustrati nella Figura 2, sono stati scelti allo scopo di includere le aree più interessanti dal punto di vista del possibile sfruttamento dell'energia ondosa. Sono state quindi inserite sia aree caratterizzate da un elevato contenuto energetico, che aree per le quali le particolari condizioni di isolamento rendono la produzione di energia dal moto ondoso particolarmente interessante per contribuire in modo significativo alla indipendenza energetica. Tutti questi modelli hanno una risoluzione spaziale di $1/128^\circ$.

Il sistema operativo è attivo dal luglio 2013 relativamente alla simulazione sull'intero Mediterraneo e dieci sottobacini; nel corso dell'annualità corrente è stato inserito un ulteriore sottobacino, il numero 11 nella figura, centrato nello stretto di Messina. Questa zona è stata inserita allo scopo di fornire un supporto alla attività sperimentale effettuata, all'interno dell'Accordo di Programma, in collaborazione con l'Università Mediterranea di Reggio Calabria. La batimetria del modello sviluppato per questa area è riportata nella figura 3.

Le simulazioni nei sotto-bacini vengono effettuate utilizzando il modello SWAN ((Simulating WAVes Nearshore) [6]. SWAN è un modello numerico utilizzato specificamente per l'uso in acque poco profonde e comprende gli effetti di rottura delle onde indotte dalla batimetria e le interazioni tra le onde, importanti per le previsioni in prossimità della costa. SWAN è un modello di onde di terza generazione che integra lo spettro di densità di azione, senza alcuna ipotesi sulla forma spettrale. Qui è stata utilizzata la stessa discretizzazione in frequenza e direzione definita per il modello WAM.

L'intero sistema di previsione, composto dai modelli WAM e SWAN è forzato in superficie con campi di vento orari ottenuti dal sistema meteorologico operativo SKIRON, sviluppato dall'Università di Atene [7]. Il modello atmosferico è basato sul modello atmosferico ad area limitata Eta / NCEP ed è eseguito

quotidianamente sul bacino del Mediterraneo alla risoluzione orizzontale di $0,05^\circ \times 0,05^\circ$. La previsione si estende su un periodo di cinque giorni.

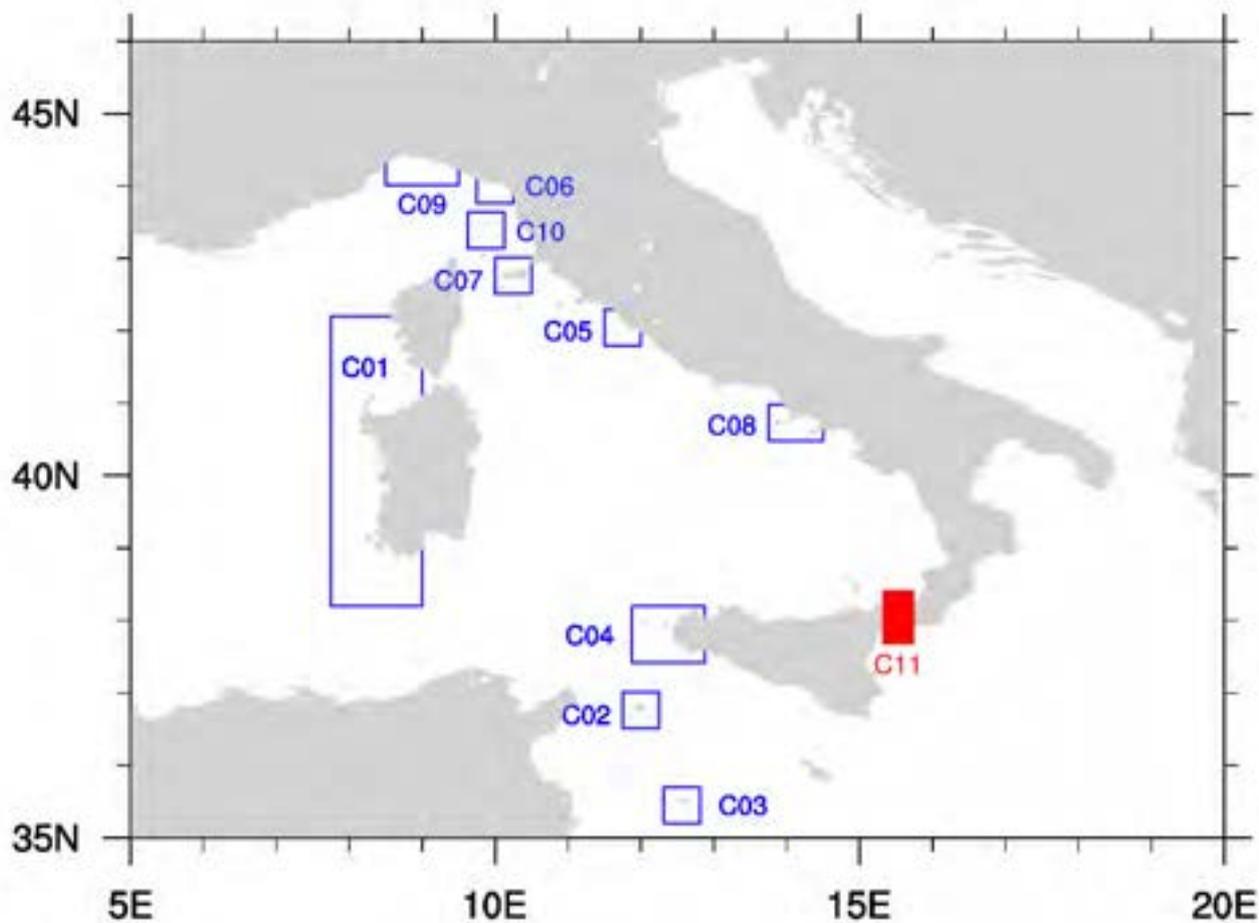


Figura 2. Aree relative ai modelli ad alta risoluzione, in rosso l'ultimo dominio introdotto relativo allo stretto di Messina.

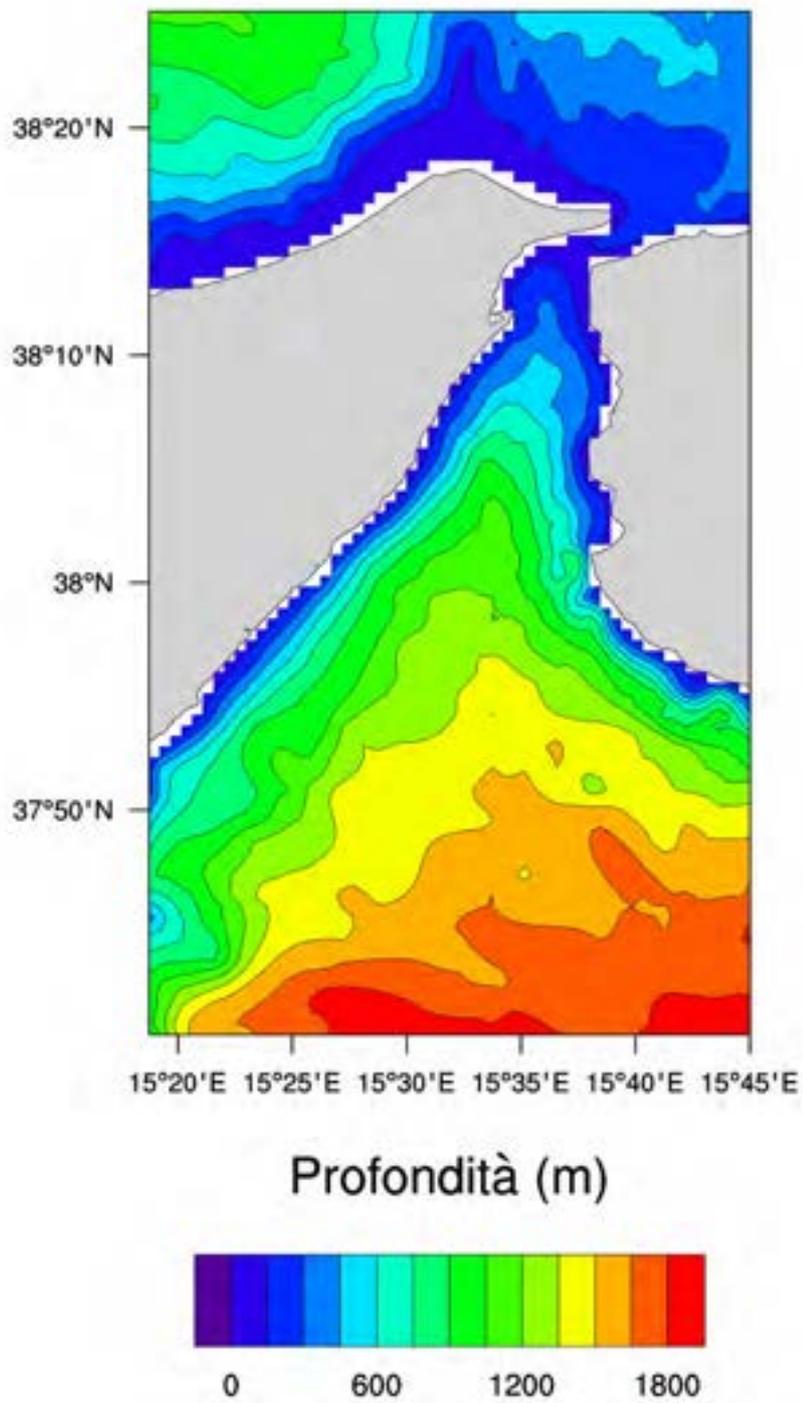


Figura 3. Batimetria del modello utilizzato per la zona dello stretto di Messina.

Le previsioni del moto ondoso e dell'energia per tutto il Mediterraneo e gli undici sottobacini vengono eseguite ogni giorno per i successivi cinque giorni. Le principali variabili integrate che caratterizzano le onde sono memorizzate in ciascun punto della griglia ogni ora, in particolare vengono memorizzate: l'altezza d'onda significativa, il periodo medio dell'onda e il periodo di picco e la direzione di propagazione. Inoltre, il flusso di energia del moto ondoso per unità di cresta, definito con l'espressione:

$$J = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2$$

dove J è in Watt per metro di cresta dell'onda, g è l'accelerazione di gravità, ρ la densità dell'acqua di mare che viene assunta pari a 1025 kg / m³, H_s l'altezza significativa delle onde e T_e il periodo d'onda significativa. Una pagina web viene aggiornata quotidianamente con le mappe orarie relative alle principali grandezze sia per quanto riguarda il bacino Mediterraneo che i sottobacini.

2.2 Validazione del sistema operativo con dati satellitari

Il sistema operativo di previsione dello stato del mare è operativo in ENEA a partire dal giugno 2013. Una validazione delle previsioni d'onda è stata eseguita utilizzando per confronto i dati satellitari derivati da altimetri radar che forniscono una misura dell'altezza significativa delle onde (H_s). In particolare sono stati utilizzati i dati provenienti da due satelliti, Jason-2 e Saral / AltiKa, che erano in servizio nel periodo di interesse. I dati utilizzati sono stati scaricati dal sito web di AVISO [8]. In figura 4 sono mostrate le tracce al suolo dei satelliti, su cui vengono eseguite periodicamente le misure. Jason-2 ripete il suo ciclo ogni 10 giorni e le tracce sono distanziate di 315 km all'equatore, il satellite Saral invece ripete il suo ciclo ogni 35 giorni, in questo caso le tracce distano solo 75 km all'equatore. Il confronto di questi dati può essere utilizzato per valutare il comportamento complessivo del modello sull'intero Mediterraneo.

I dati sono stati elaborati seguendo la procedura descritta da Queffeuou e Bentany [9] per rimuovere valori anomali. Questa procedura si basa sull'analisi statistica della differenza tra punti consecutivi lungo la traccia. Non vengono considerate tracce rappresentate da meno di tre punti, inoltre non sono considerati punti in cui la profondità derivata dal satellite e la profondità del modello differiscono di oltre il cinquanta per cento. I dati satellitari sono confrontati direttamente con il punto più vicino del modello, senza alcuna interpolazione nello spazio o nel tempo.

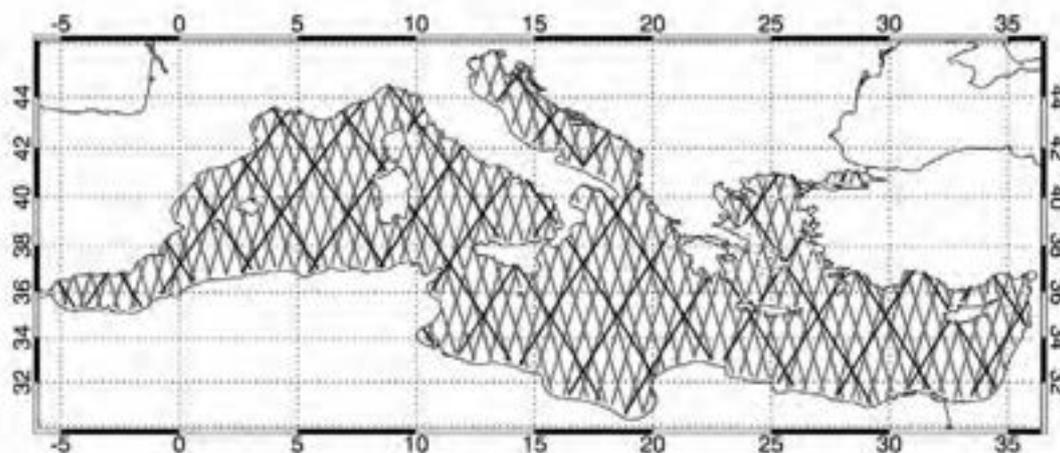


Figura 4. Tracce al suolo dei satelliti usati per la validazione. Le linee nere identificano il satellite Jason-2, le grigie il satellite Saral/Altika.

Tabella 1. Statistiche relative al confronto tra l'altezza significativa del modello e quella misurata dai satelliti per l'intero bacino Mediterraneo.

Satellite	previsione	Numero campioni	Bias (m)	Rmse (m)	si	slope	d
Jason-2	giorno 1	100,399	-0.20	0.40	0.34	0.83	0.93
	giorno 2	101,036	-0.22	0.44	0.37	0.81	0.92
	giorno 3	99,386	-0.24	0.50	0.42	0.78	0.89
Saral/Altika	giorno 1	74,709	-0.19	0.38	0.36	0.82	0.93
	giorno 2	74,896	-0.20	0.42	0.39	0.80	0.91
	giorno 3	74,691	-0.21	0.46	0.44	0.78	0.89

Come detto, le previsioni operative coprono i successivi cinque giorni. Sono state validate, tramite il confronto con i dati satellitari, le altezze significative delle onde prodotte dal modello WAM per l'intero bacino Mediterraneo separatamente per i primi tre giorni di simulazione.

La tabella 1 riporta per ciascun satellite i valori degli indici statistici usati per valutare le prestazioni del modello. E' stato utilizzato nell'analisi il bias tra il modello e le misure (bias), l'errore quadratico medio (RMSE), l'indice di dispersione (si) e la pendenza della retta di regressione passante per l'origine (slope). Considerando la serie di n misure x_i e i corrispondenti valori del modello y_i , questi indici sono calcolati come segue:

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

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

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

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

L'ultimo indice riportato in tabella è l'indice di Willmott (d) definito come:

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

dove y_i e x_i sono le deviazioni rispetto alla media. L'indice di Willmott assume valore 1 quando la corrispondenza tra le due serie di dati è perfetta.

Nelle figure da 5 e 6 vengono riportati come esempio gli *scatter plot* ottenuti utilizzando tutti i dati disponibili di altezza significativa provenienti dal satellite Jason-2 ed i dati del modello WAM su tutto il Mediterraneo calcolati separatamente per il primo ed il secondo giorno di simulazione. Analogamente nelle figure 7 e 8 sono riportati gli *scatter plot* ottenuti utilizzando i dati provenienti dal satellite Saral/Altika.

Lo *scatter plot* è stato realizzato raggruppando i valori di altezza in intervalli di 0,2 m. Per rappresentare il numero di dati contenuti in ogni intervallo è stata utilizzata la scala logaritmica.

Dai valori delle tabelle e dalle figure si può notare un ragionevole accordo tra le altezze previste dal modello e quelle misurate tramite satellite. Risulta evidente un leggero aumento sia della dispersione che dell'errore quadratico medio al crescere del giorno di previsione. I parametri statistici considerati non cambiano significativamente con l'aumentare dei giorni dall'inizio della previsione. Passando dal primo al terzo giorno della simulazione si riscontra un leggero peggioramento di tutti parametri, tuttavia il *bias* supera di poco 0,2 m anche il terzo giorno, l'indice Willmott rimane sempre vicino a 0,9. Una sottostima sistematica è sempre presente con valori della pendenza di circa 0,8.

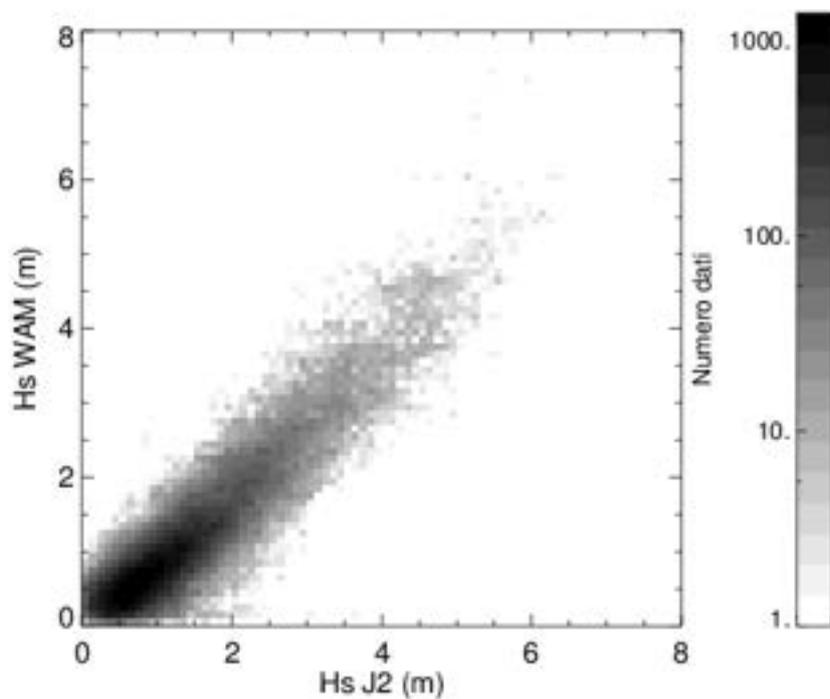


Figura 5. Scatter plot per l'altezza significativa ottenuto usando i dati del satellite Jason-2 e quelli del modello WAM per l'intero Mediterraneo. I valori sono raggruppati in intervalli di 0.2 m. I dati del modello sono relativi al primo giorno di simulazione.

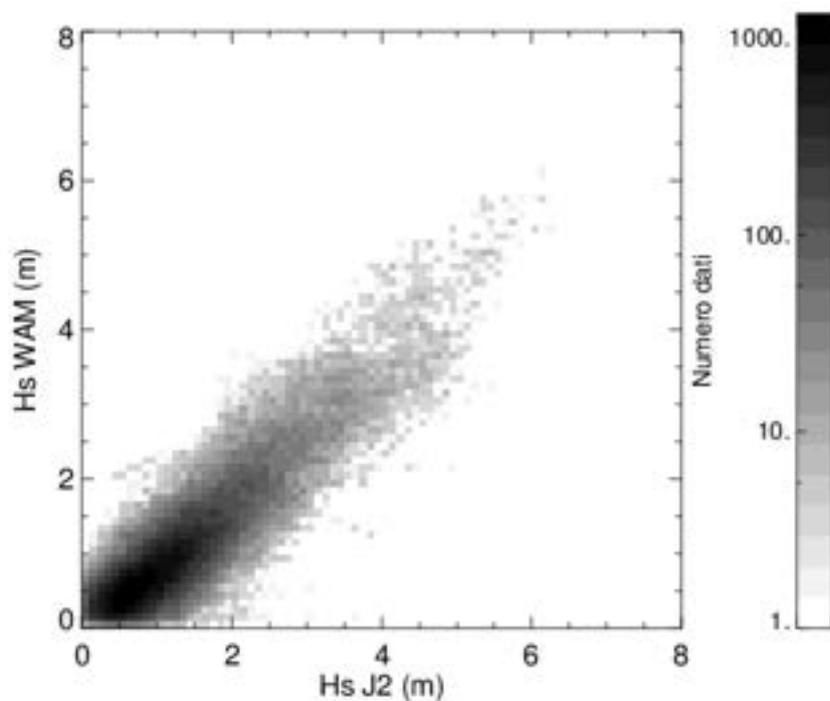


Figura 6. Scatter plot per l'altezza significativa ottenuto usando i dati del satellite Jason-2 e quelli del modello WAM per l'intero Mediterraneo. I valori sono raggruppati in intervalli di 0.2 m. I dati del modello sono relativi al secondo giorno di simulazione.

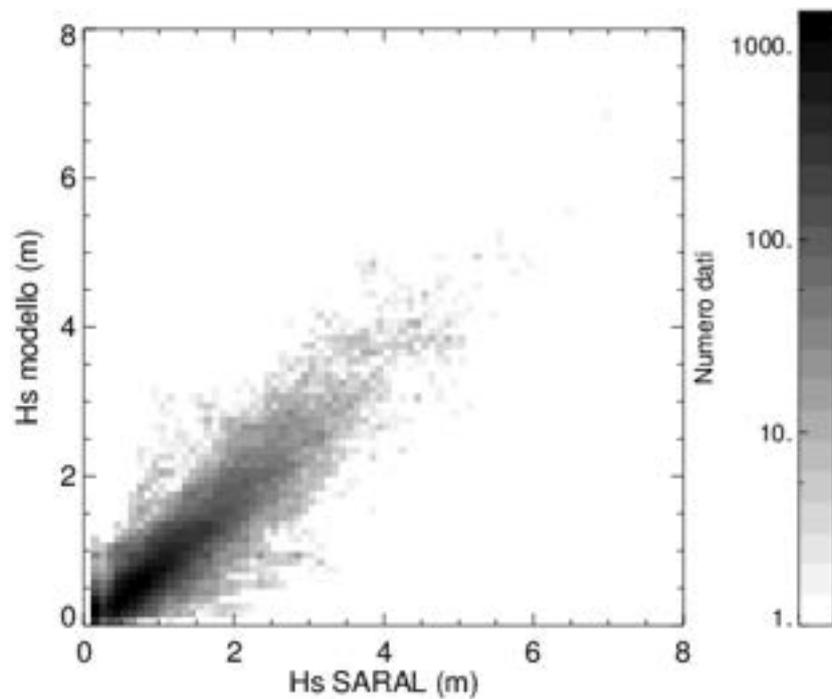


Figura 7. Scatter plot per l'altezza significativa ottenuto usando i dati del satellite Saral/Altika e quelli del modello WAM per l'intero Mediterraneo. I valori sono raggruppati in intervalli di 0.2 m. I dati del modello sono relativi al primo giorno di simulazione.

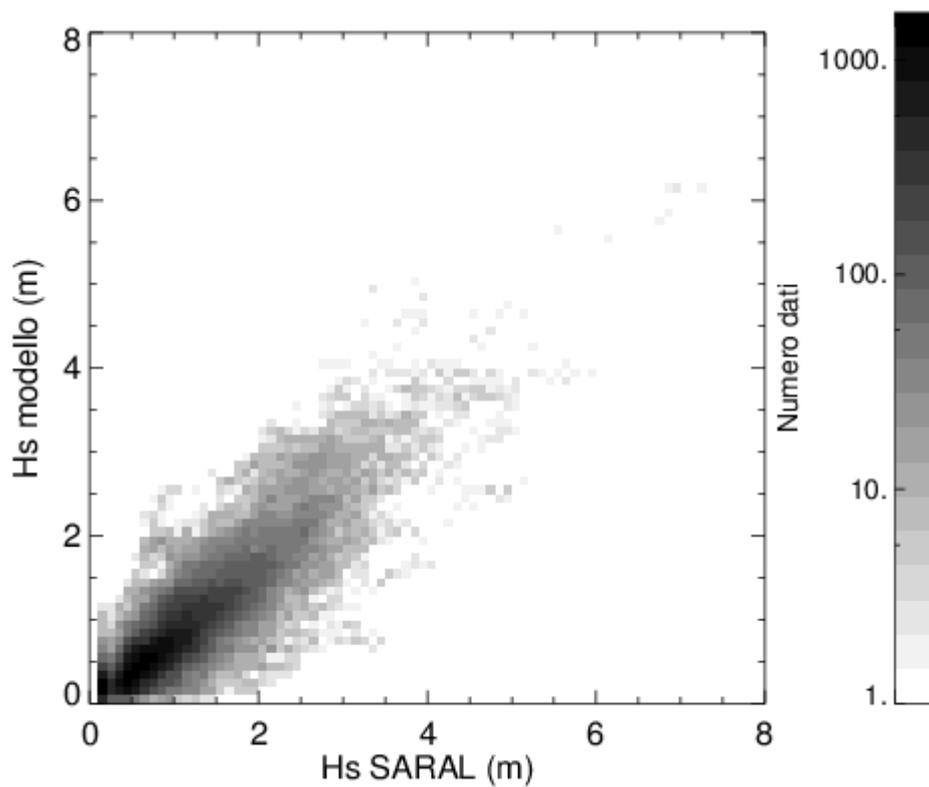


Figura 8. Scatter plot per l'altezza significativa ottenuto usando i dati del satellite Saral/Altika e quelli del modello WAM per l'intero Mediterraneo. I valori sono raggruppati in intervalli di 0.2 m. I dati del modello sono relativi al secondo giorno di simulazione.

I dati da satellite forniscono informazioni soprattutto relative alle condizioni di mare aperto, presentando alcune difficoltà nella misura soprattutto nelle vicinanze della costa, nel passaggio dalla zona di terra a quella di mare.

Per confrontare i risultati ottenuti con il modello WAM con quelli ottenuti con il modello SWAN, a maggiore risoluzione, si è quindi utilizzata la regione corrispondente al sottobacino della Sardegna, il maggiore in estensione tra quelli definiti. Il calcolo dei parametri statistici è stato effettuato utilizzando il primo giorno di simulazione per il modello WAM ed il modello SWAN, e selezionando i valori di altezza all'interno dell'area in comune tra i due modelli.

Nella tabella 2 sono riportati i parametri statistici calcolati utilizzando l'altezza significativa delle onde delle due simulazioni. Anche se solo poche tracce satellitari sono incluse nella zona, il numero di campioni è sufficiente per il confronto. Si può osservare che, per entrambi i satelliti, tutte le grandezze statistiche valutate a partire dai dati del modello SWAN mostrano un accordo sistematicamente, anche se di poco, migliore di quelle calcolate usando il modello WAM.

Dal confronto con la tabella 1 si può notare che tutte le grandezze statistiche calcolate in questa regione per il modello WAM presentano valori più elevati di bias e di RMSE rispetto a quelli calcolati per l'intero Mediterraneo. Ciò può essere spiegato con il fatto che, come già rilevato, i satelliti forniscono una migliore rappresentazione delle onde in mare aperto rispetto alla zona costiera.

Tabella 2. Statistiche relative al confronto tra l'altezza significativa prevista dal modello WAM e dal modello SWAN per il primo giorno di simulazione con l'altezza misurata dai satelliti nella zona del sottobacino C1, corrispondente all'area ad ovest della Sardegna.

Satellite	modello	Numero campioni	Bias (m)	Rmse (m)	si	slope	d
Jason-2	WAM	1,421	-0.33	0.60	0.40	0.82	0.93
	SWAN	1,421	-0.32	0.51	0.34	0.83	0.95
Saral/Altika	WAM	860	-0.26	0.50	0.38	0.78	0.91
	SWAN	860	-0.24	0.40	0.30	0.81	0.94

2.3 Validazione del sistema operativo rispetto alle boe

La validazione del sistema operativo è stata completata tramite il confronto con le boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dal Servizio Mareografico dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). I dati raccolti per il confronto si riferiscono al periodo che va dall'inizio dell'entrata in funzione del sistema di previsione dello stato del mare e dell'energia associata, al dicembre 2015. Le posizioni delle boe attive nel periodo in esame e utilizzate per il confronto sono riportate nella figura 9.

Le stesse statistiche utilizzate in precedenza per il confronto delle altezze delle onde con i dati da satellite sono riportate in tabella 3 per il confronto con i dati misurati dalle boe. Nella prima colonna è indicato il numero di campioni confrontati, è da notare che non tutte le boe coprono interamente l'intervallo di tempo selezionato.

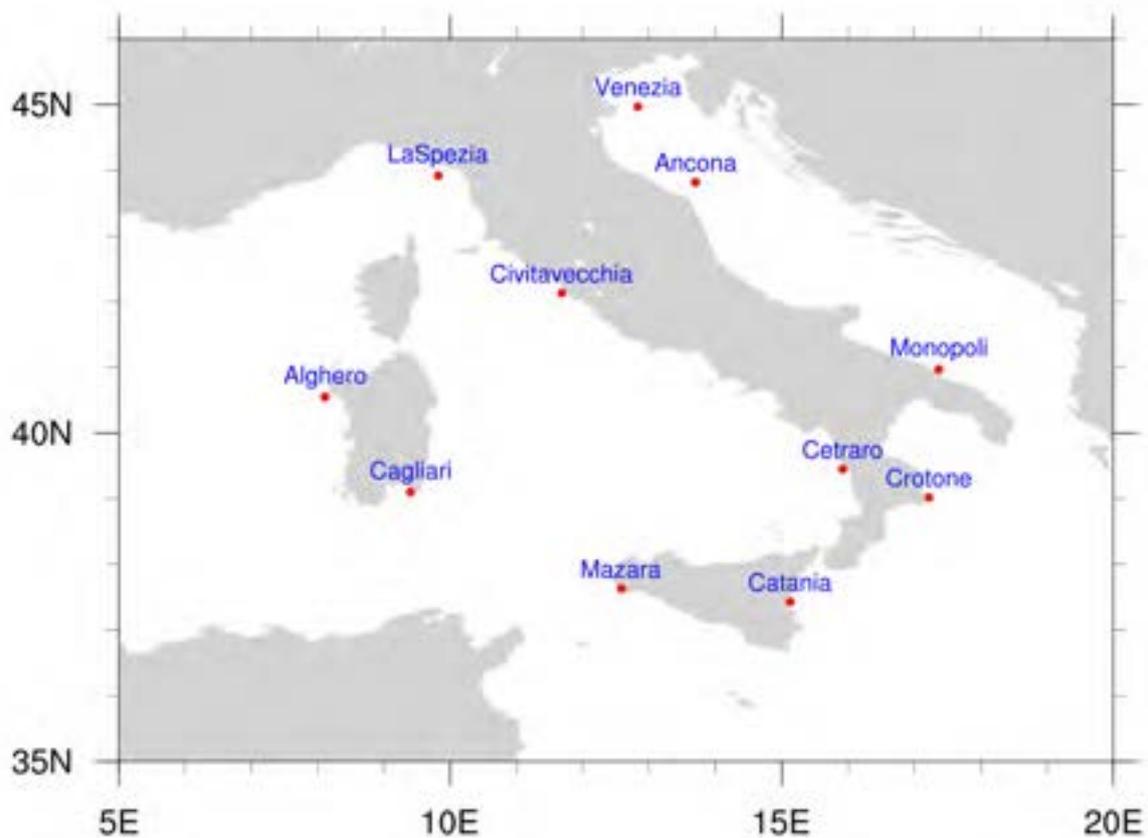


Figura 9 – Posizione delle boe della Rete Ondametrica Nazionale usate per la validazione dei dati del modello.

Tabella 3. Statistiche relative al confronto delle altezze significative ricavate dal modello WAM del sistema operativo, per il primo giorno di previsione, con i dati misurati dalle boe della rete RON.

boa	Numero campioni	bias	Rmse	Slope	Si	d
Alghero	7788	-0.33	0.46	0.79	0.50	0.95
Ancona	2857	-0.19	0.40	0.82	0.49	0.93
Cagliari	9975	-0.23	0.32	0.66	0.86	0.89
Catania	8272	-0.25	0.33	0.63	0.96	0.86
Crotone	12342	-0.16	0.31	0.79	0.56	0.93
Cetraro	13114	-0.19	0.32	0.72	0.72	0.91
Civitavecchia	11850	-0.09	0.26	0.86	0.47	0.93
La Spezia	10566	-0.23	0.35	0.75	0.62	0.92
Mazara	5816	-0.11	0.27	0.87	0.37	0.94
Monopoli	12466	-0.15	0.31	0.79	0.60	0.89
Venezia	11783	-0.06	0.30	0.86	0.66	0.88

Tabella 4. Statistiche relative al confronto delle direzioni di propagazione ricavate dal modello WAM del sistema operativo, per il primo giorno di previsione, con i dati misurati dalle boe della rete RON.

boa	Bias°	var
Alghero	3.82	0.13
Ancona	12.16	0.27
Cagliari	-1.65	0.16
Catania	11.84	0.24
Crotone	19.62	0.29
Cetraro	4.54	0.17
Civitavecchia	9.36	0.17
La Spezia	-1.42	0.23
Mazara	-0.11	0.27
Monopoli	-0.33	0.17
Venezia	1.98	0.40

Tabella 5. Statistiche relative al confronto delle altezze significative ricavate dal modello SWAN del sistema operativo, per il primo giorno di previsione, con i dati misurati dalle boe della rete RON.

boa	Numero campioni	bias	Rmse	Slope	Si	d
Alghero	7763	-0.34	0.47	0.78	0.51	0.95
Civitavecchia	11616	-0.09	0.26	0.87	0.45	0.94
La Spezia	8659	-0.25	0.36	0.76	0.59	0.92
Mazara	5794	-0.09	0.26	0.89	0.35	0.95

Tabella 6. Statistiche relative al confronto delle altezze significative ricavate dal modello SWAN del sistema operativo, per il primo giorno di previsione, con i dati misurati dalle boe della rete RON.

boa	Bias°	var
Alghero	3.94	0.12
Civitavecchia	8.81	0.17
La Spezia	-3.53	0.23
Mazara	7.12	0.16

Anche in questo caso si può osservare che le altezze provenienti dalla simulazione mostrano una sottostima sistematica rispetto alle misure, come indicato sia dai valori negativi del bias che dalla pendenza inferiore ad 1. L'indice di Willmott (d) che fornisce una indicazione sulla correlazione dei dati è comunque quasi sempre maggiore di 0.9.

Poiché nel caso delle boe è possibile utilizzare anche l'informazione relativa alla direzione di propagazione dell'onda, in tabella 4 sono riportati i confronti relativi.

Il bias direzionale e la varianza direzionale sono calcolati tramite le seguenti equazioni, dove n rappresenta il numero dei valori comuni presi in considerazione, con y_i sono indicate le direzioni fornite dal modello e con x_i le direzioni misurate:

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

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

$$\bar{R} = (\bar{C}^2 + \bar{S}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$bias^0 = \arctan \left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}} \right)$$

$$var^0 = (1 - \bar{R})$$

L'intervallo possibile dei valori della varianza angolare è compreso tra 0 e 1. I valori di bias angolare calcolati sono in generale inferiori a 5°, valori superiori a 10° si trovano solo in corrispondenza di boe situate sul versante adriatico.

Il confronto con i valori registrati dalle boe è stato effettuato anche per le uscite del modello SWAN, nei casi in cui esistevano simulazioni effettuate sulla griglia ad alta risoluzione. Le statistiche di confronto sono riportate nelle tabelle 5 e 6 rispettivamente per l'altezza e per la direzione delle onde. Si può osservare che i confronti statistici sono molto simili ai precedenti, questo risultato non deve sorprendere in quanto le boe sono posizionate ad una certa distanza dalla costa, in corrispondenza di valori di profondità intorno ai 100m, valore in cui l'approssimazione di mare profondo è da considerarsi valida e per il quale i due modelli d'onda forniscono risultati molto simili.

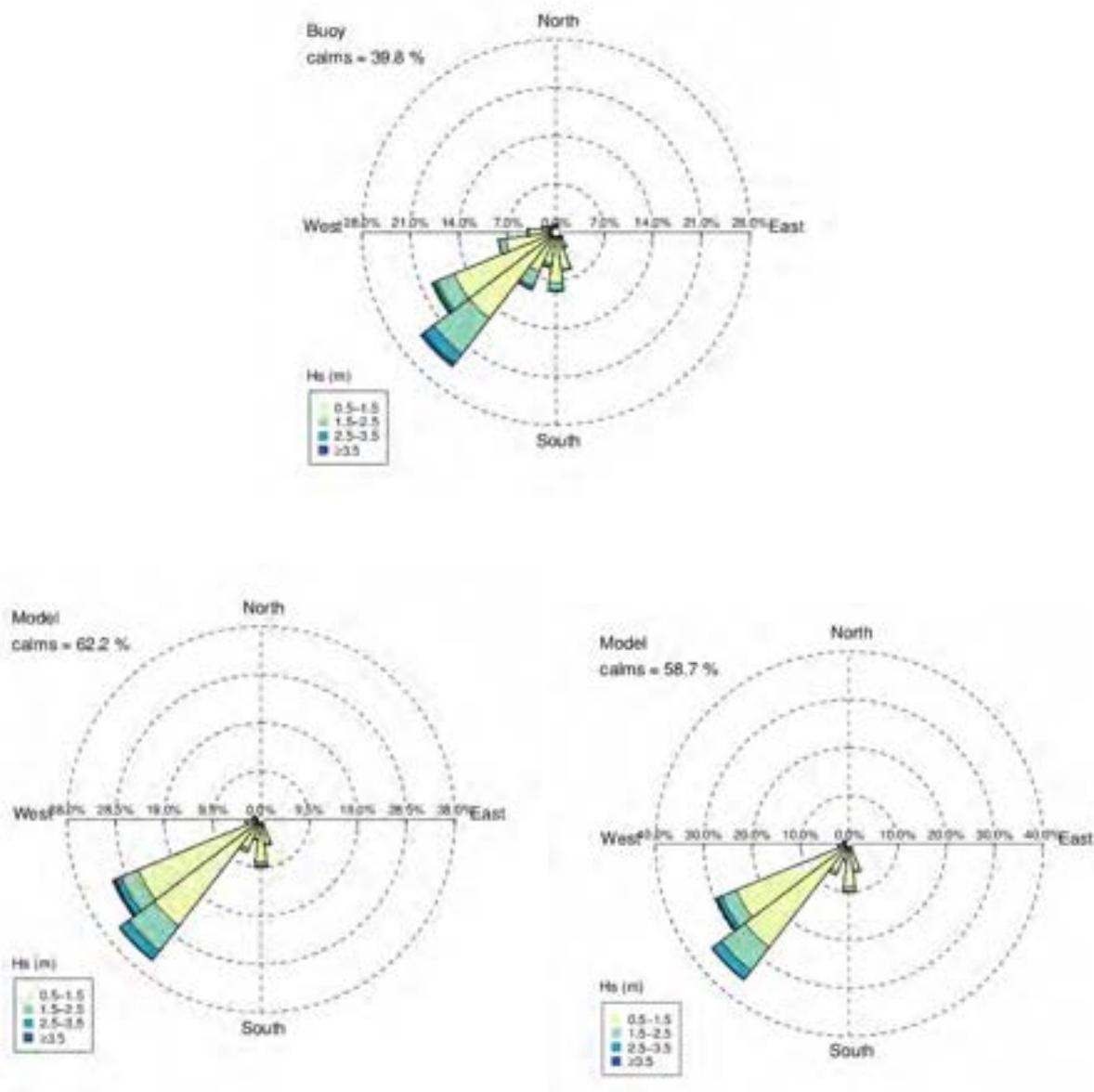


Figura 10. Grafico polare del clima d'onda (direzione di provenienza delle onde). In alto valori registrati dalla boa di La Spezia, in basso il primo giorno di previsione, a sinistra derivato dal modello WAM e a destra dal modello SWAN.

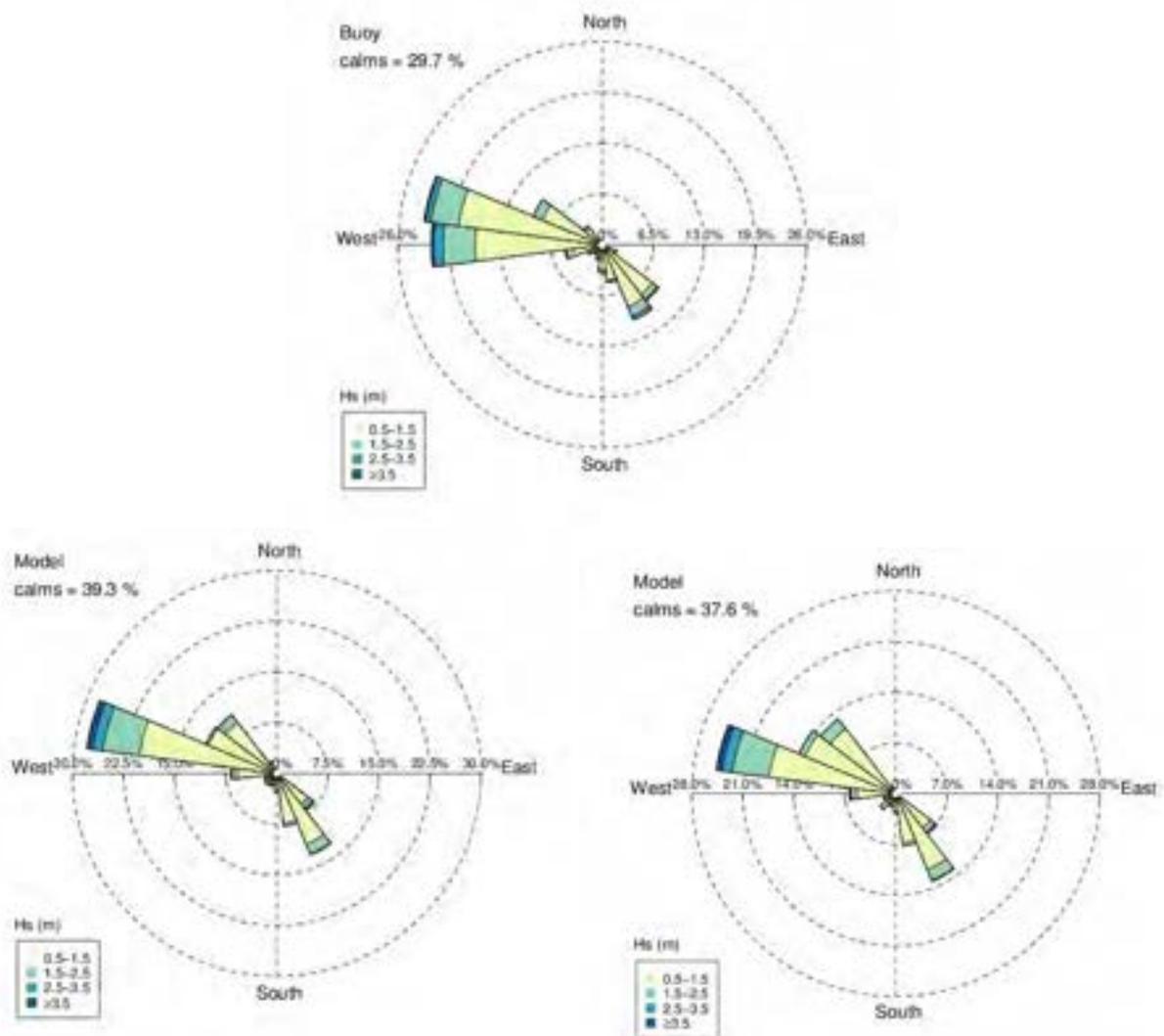


Figura 11. Grafico polare del clima d'onda (direzione di provenienza delle onde). In alto valori registrati dalla boa di Mazara, in basso il primo giorno di previsione, a sinistra derivato dal modello WAM e a destra dal modello SWAN.

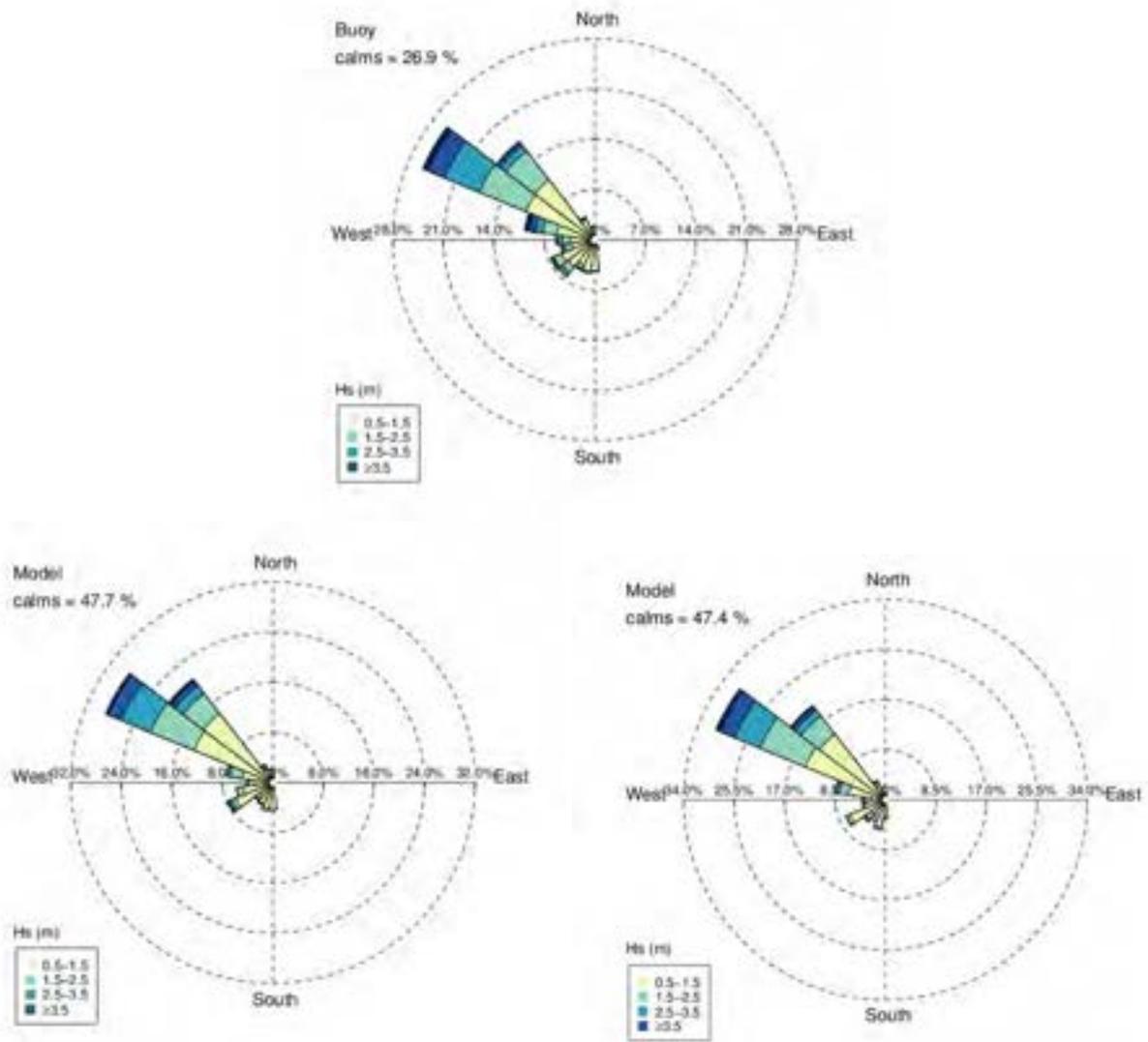


Figura 12. Grafico polare del clima d'onda (direzione di provenienza delle onde). In alto valori registrati dalla boa di Alghero, in basso il primo giorno di previsione, a sinistra derivato dal modello WAM e a destra dal modello SWAN.

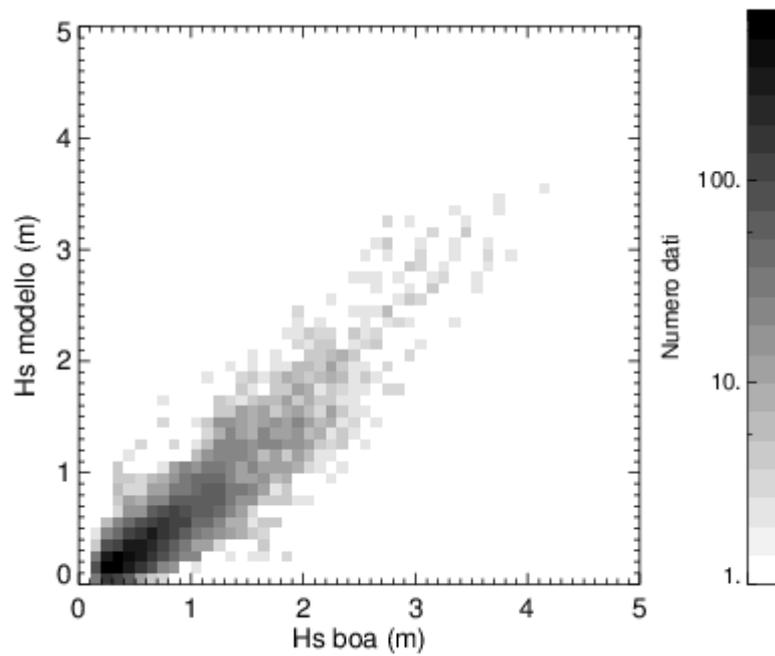


Figura 13. Scatter plot per l'altezza significativa ottenuto usando i dati della boa di La Spezia e quelli del modello WAM. I valori sono raggruppati in intervalli di 0.2 m. I dati del modello sono relativi al primo giorno di simulazione.

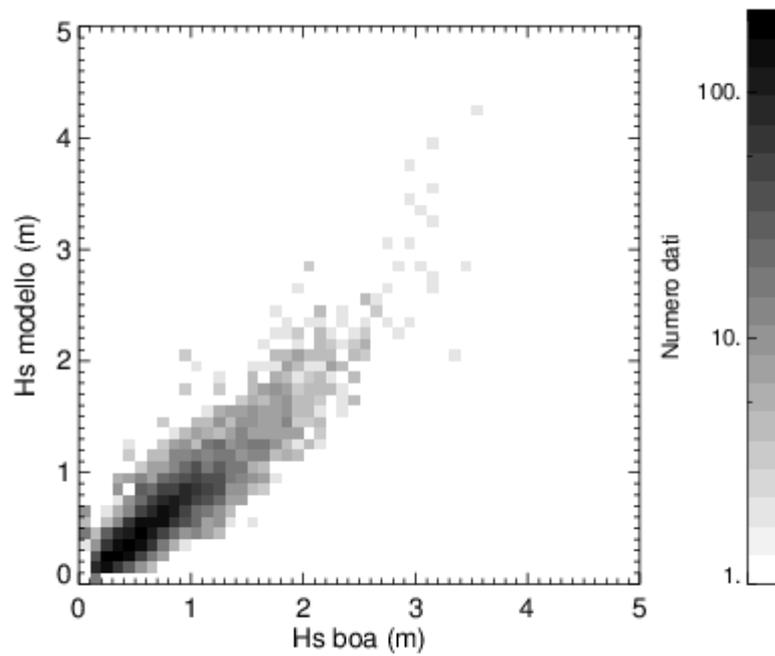


Figura 14. Scatter plot per l'altezza significativa ottenuto usando i dati della boa di Mazara e quelli del modello WAM. I valori sono raggruppati in intervalli di 0.2 m. I dati del modello sono relativi al primo giorno di simulazione.

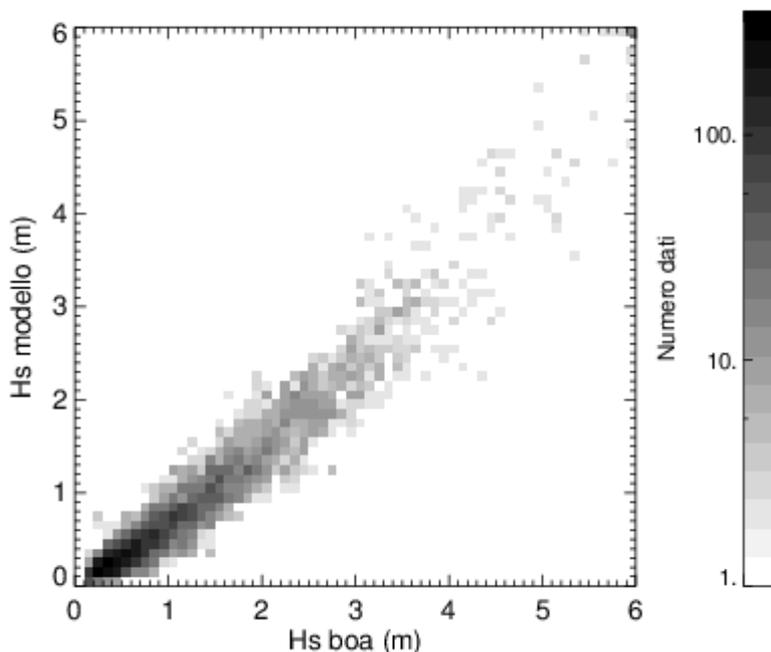


Figura 15. Scatter plot per l’altezza significativa ottenuto usando i dati della boa di Alghero e quelli del modello WAM. I valori sono raggruppati in intervalli di 0.2 m. I dati del modello sono relativi al primo giorno di simulazione.

A titolo di esempio, nelle figure 10-12 sono riportate le rose della direzione di provenienza delle onde, calcolate utilizzando i valori registrati dalle boe di La Spezia, Mazara e Alghero e quelle ricavate utilizzando i valori delle previsioni nei punti corrispondenti. Sono state scelte per il confronto queste boe per le quali, oltre alla simulazione con il modello WAM, sono disponibili le simulazioni ad alta risoluzione effettuate con il modello SWAN. Le direzioni sono divise in intervalli di 15° e le ampiezze in intervalli di 1 m, i valori sotto 0.5 m sono considerati calma. Le maggiori differenze riscontrate in tutti i siti mostrati sono proprio relative alla percentuale di casi sotto il valore di soglia, che nelle simulazioni risultano significativamente più numerosi. La distribuzione nelle altre classi di intensità, ottenute dalle previsioni con il modello WAM e con i modelli SWAN relativi ai diversi sottobacini corrispondenti, risultano invece molto simili a quelle ricavate dalle misure alle boe con una buona rappresentazione delle direzioni, sia quelle prevalenti che secondarie. Nelle figure 13-15 infine sono riportati gli scatter plot relativi alle stesse boe. Il numero di dati disponibili per il confronto è ovviamente molto ridotto rispetto al caso dei confronti con i dati da satellite, mostrati in precedenza. Anche da queste figure si nota la leggera sottostima dei valori ottenuti con le simulazioni, già evidenziata nelle precedenti tabelle. Nel caso della boa di Alghero si osserva una minore dispersione dei valori rispetto alle altre due boe mostrate, i casi con maggiore intensità sembrano riprodotti in maniera soddisfacente.

3 Conclusioni

Il sistema di previsione del moto ondoso e dell’energia associata, realizzato in una precedente annualità dell’Accordo di Programma è attualmente in esecuzione in modalità operativa. Il sistema è composto da un modello di onde relativo all’intero bacino Mediterraneo alla risoluzione di 1/32° e da vari modelli per sottobacini dell’area italiana, alla risoluzione di 1/128°.

I dati delle principali grandezze rappresentative delle onde sono stati quotidianamente memorizzati su tutto il dominio di calcolo a partire dall'entrata in funzione del sistema nel giugno 2013. Le previsioni coprono un intervallo temporale di cinque giorni, le uscite dei modelli vengono fornite alla risoluzione temporale di un'ora.

Nel corso di questa annualità ai dieci sottobacini iniziali è stato aggiunto un ulteriore sottobacino nella zona dello stretto di Messina, allo scopo di fornire un supporto alle attività sperimentali effettuate in collaborazione con l'Università Mediterranea di Reggio Calabria.

E' stata qui presentata la validazione dei risultati ottenuti. Sono stati effettuati confronti dei valori delle altezze rispetto a quelli misurati con i due satelliti Jason-2 e Saral/Altika. Il confronto eseguito separatamente sui dati relativi ai primi tre giorni della simulazione con il modello WAM hanno mostrato un ragionevole accordo, in particolare si è osservato che la qualità dei risultati non varia in maniera significativa all'aumentare della distanza dall'inizio della simulazione.

Il confronto effettuato anche rispetto alle misure ricavate dalle boe della rete RON ha mostrato in generale un accordo delle simulazioni anche rispetto alla direzione delle onde. Da entrambi i confronti risulta una buona correlazione ma una leggera sottostima dei valori delle ampiezze, soprattutto relativamente ai valori più bassi.

4 Riferimenti bibliografici

1. L. Liberti, A. Carillo, G. Sannino, "Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective (2013)" *Renewable Energy*, 50, pp. 938-949. DOI: 10.1016/j.renene.2012.08.023
2. 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
3. A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino, "Climatologia ad alta risoluzione spaziale dell'energia associata al moto ondoso nel Mediterraneo: mappe e indicatori di produttività", Report RdS/PAR2013/167
4. WAMDI-group: S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing, 1988. "The WAM model - a third generation ocean wave prediction model". *J. Phys. Ocean.* 18, 1775 - 1810.
5. H. Günther, A. Behrens, "The wam model validation document version 4.5.3." Tech. Rep. Institute of Coastal Research Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) (2011)
6. N. Booij, R.C. Ris, L.H. Holthuijsen, "A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation", in *J. Geophys. Res.*, vol. 104, C4, 7649-7666, 1999.
7. 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.
8. The altimeter products were produced and distributed by Aviso (<http://www.aviso.altimetry.fr/>), as part of the Ssalto ground processing segment.
9. P. Queffelec, A. Bentamy, Analysis of wave height variability using altimeter measurements: application to the Mediterranean sea, in *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(12), 2078-2092, 2007.