



**ISPRA**

Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

**Applicazione di modelli numerici di  
propagazione ondosa a costa per il  
miglioramento dei sistemi di previsione  
dello stato di mare**

**Ing. Francesca Catini**

**Tutor: Dr. Roberto Inghilesi**

Data	Firma Stagista	Firma Tutor	Firma Responsabile Servizio

## **Abstract**

Il SIMM, operativo presso il Dipartimento per la Tutela delle Acque Interne e Marine dell'ISPRA, attualmente effettua la previsione dei parametri meteomarini attraverso l'impiego di modelli numerici in grado di fornire informazioni su scala oceanica. In particolare per la previsione dello stato di mare su tutto il Mediterraneo viene utilizzato il WAM. Questo modello di calcolo nasce per lo studio di propagazione del moto ondoso in acque alte e la risoluzione della griglia sulla quale vengono effettuate le simulazioni non è sufficiente a caratterizzare adeguatamente lo stato di mare in prossimità della costa. Questo lavoro è finalizzato a migliorare i sistemi di previsione dello stato di mare a costa attraverso l'ausilio del codice di calcolo SWAN.

Sono stati riportati i risultati dell'applicazione del sistema previsionale su due zone dell'alto Adriatico.

## **Prefazione**

La corretta previsione degli episodi di mareggiata è un compito importante con grandi ricadute in campo economico, di protezione civile ed ambientale. Alla sempre migliore affidabilità degli strumenti numerici di previsione si arriva mediante la costante verifica dei risultati e dei metodi di impiego dei modelli. Il contributo critico del lavoro all'impiego ottimale di modelli di trasporto ondoso su bassi fondali è di estrema utilità nella progettazione dei sistemi di previsione dello stato del mare in condizioni di batimetria complessa, come anche all'analisi dei climi ondosi, e quindi alla valutazione dei fenomeni di tipo erosivo ed alla progettazione delle opere di difesa dei litorali.

## INDICE

1.	Introduzione .....	4
1.1	Metodologia .....	4
2.	Aree oggetto di studio .....	5
3.	Rete di monitoraggio.....	6
4.	Procedimento .....	7
5.	Griglie di Calcolo.....	8
6.	Selezione Mareggiate.....	9
7.	Analisi dei risultati.....	10
7.1	Emilia Romagna.....	11
7.1.1	Mareggiata del 29 luglio 2007 .....	11
7.1.2	Mareggiata del 14 dicembre 2007.....	15
7.1.3	Mareggiata del 19 ottobre 2007 .....	19
7.1.4	Mareggiata del 3 marzo 2008 .....	22
7.1.5	Mareggiata del 24 dicembre 2008.....	25
7.1.6	Nesting Emilia Romagna .....	28
7.2	Veneto .....	34
7.2.1	Mareggiata del 13 settembre 2001 .....	34
7.2.2	Mareggiata del 21 ottobre 2002 .....	40
7.2.3	Mareggiata del 13 novembre 2002 .....	46
7.2.4	Mareggiata del 24 novembre 2002 .....	53
7.2.5	Mareggiata del 04 ottobre 2003 .....	59
7.2.6	Nesting Veneto.....	65
8.	Conclusioni .....	72

## 1. Introduzione

Il presente documento descrive i risultati ottenuti dall'implementazione e lo sviluppo di modellistica numerica adottata per l'ottimizzazione delle previsioni dello stato di mare a scala regionale e locale nella zona dell'Alto Adriatico.

### 1.1 Metodologia

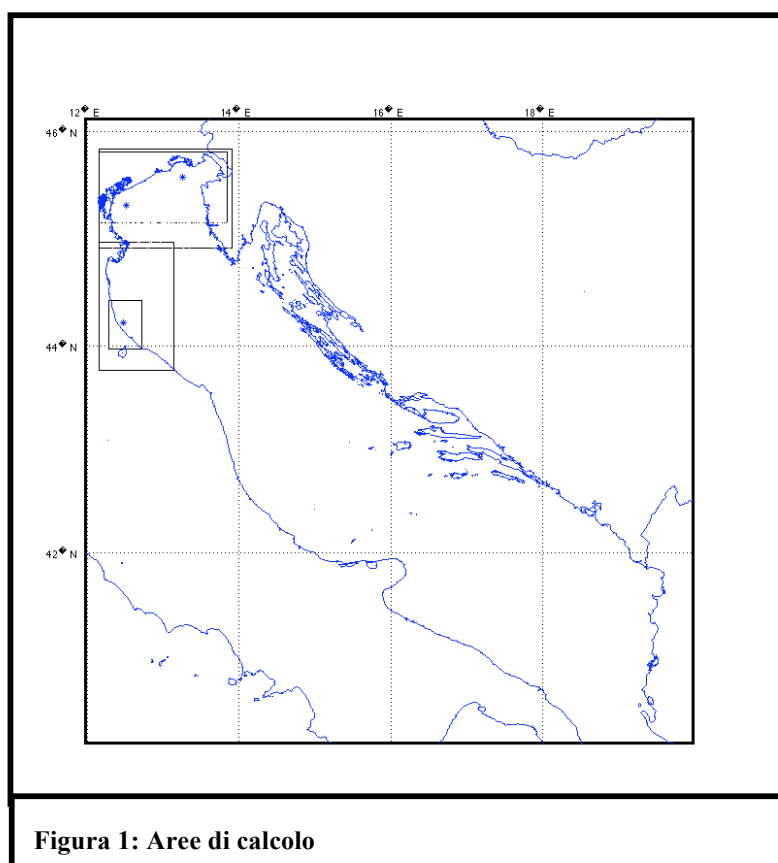
Il lavoro è articolato nelle seguenti attività:

- individuazione ed implementazione dei modelli numerici di propagazione a costa del moto ondoso in funzione delle condizioni di impiego in prossimità della costa su aree limitate, delle condizioni finali di impiego di tipo operativo e rispetto alla necessità di implementazione all'interno del sistema IDRO-METEO-MARE operativo presso l'ISPRA;
- individuazione di due aree pilota in relazioni alle necessità dell'ISPRA, alle capacità elaborative delle machine disponibili ed ai tempi di calcolo in fase di operatività del sistema;
- implementazione e la calibrazione del modello sulle due aree pilota sulla base della simulazione di 5 mareggiate scelte in funzione della disponibilità dei dati in punti di misura in prossimità della costa, e in funzione ad uno studio climatologico dell'area in esame.

## 2. Aree oggetto di studio

La scelta delle aree d'interesse in cui effettuare le simulazioni deve tener conto delle esigenze dell'ISPRA e della disponibilità di misure di moto ondoso per ciascuna area. In particolare, poiché il fine di questo studio è quello di migliorare il sistema previsionale dello stato di mare nelle aree costiere, è opportuno scegliere ondometri ubicati a basse profondità, perché è qui che c'interessa effettuare i confronti con i risultati ottenuti dalle simulazioni prodotte dal modello di calcolo impiegato. Inoltre nella selezione delle aree si è preferito scegliere quelle maggiormente soggette a mareggiate intense e caratterizzate da condizioni di batimetria complessa. Le aree individuate, come mostrato in figura sono:

- Emilia Romagna
- Veneto



### 3. Rete di monitoraggio

Per le aree selezionate le boe ondametriche le cui registrazioni potrebbero risultare disponibili e che rispondono ai criteri richiesti sono le seguenti:

□ **Emilia Romagna:**

*1) Boa Nausicaa*, del “Servizio Idro Meteo Clima” dell’ARPA Emilia Romagna è una boa ondametrica Datawell Directional wave rider MkIII 70. La boa è collocata a circa 8 Km al largo di Cesenatico su un fondale di 10 m di profondità in una zona interdetta alla navigazione, in posizione geografica 44.2155°N 12.4766°E. E’ attiva dal 2007.

□ **Veneto:**

*2) Piattaforma oceanografica Acqua Alta del CNR*, dotata di tre sonde ultrasoniche e di un correntometro elettromagnetico per misure direzionali, è ubicata a 16 m di profondità in posizione geografica 45.3138°N,12.5088°E. E’ stata operativa negli anni 1978-1986 e 1987-2006.

*3) Boa di Grado della Reg. Friuli* è una boa accelerometrica direzionale ubicata a 20 m di profondità in posizione geografica 45.576°N,13.2578°E, operativa negli anni 2001-2003.

## 4. Procedimento

Per lo studio di propagazione del moto ondoso all'interno delle due aree selezionate sarà utilizzato il modello di calcolo SWAN. SWAN è un codice avanzato, concepito per lo studio specifico della propagazione delle onde da vento in acque basse. E' un "wave action model" di terza generazione, cioè dinamico e completamente spettrale in frequenza e direzione. Ha un'implementazione fisica ed algoritmi di calcolo numerico sviluppati e studiati appositamente per superare le tradizionali difficoltà incontrate nell'applicazione di un modello d'onda in zone costiere caratterizzate da basse profondità. Il modello SWAN può tenere conto dei seguenti processi: rifrazione dovuta al fondo e ai gradienti di corrente, shoaling dovuto al fondo e ai gradienti di corrente, riflessione dovuta alla corrente. Il modello inoltre considera le seguenti forzanti/processi dissipativi: generazione dovuta al vento, dissipazione dovuta al whitecapping, frangimento, attrito al fondo, redistribuzione dell'energia sullo spettro dovuta ad interazioni non lineari. La diffrazione e la riflessione non sono modellate da SWAN. Il modello non è perciò affidabile nelle immediate vicinanze di ostacoli ed all'interno di porti.

Per tener conto del moto ondoso generato nelle zone non direttamente coperte dalle griglie di calcolo e che si propaga all'interno delle aree oggetto di studio è necessario collegare il sistema previsionale di dettaglio a un sistema che fornisce previsioni su scala più estesa, come ad esempio il modello WAM impiegato dal SIMM.

Esistono tuttavia situazioni particolari, come ad esempio per l'area Adriatica in cui, utilizzando una griglia di calcolo che copre l'intero bacino, non si necessita di ulteriori condizioni al contorno poiché tutto il moto ondoso che si propaga all'interno di questa area è stato generato all'interno della stessa. Inoltre sull'area Adriatica, a causa dei bassi fondali, il codice di calcolo SWAN risulta essere più efficiente del WAM per la propagazione del moto ondoso. Verrà effettuata una prima simulazione su tutto l'Adriatico e i risultati ottenuti sulla prima griglia di calcolo, ottenuti con lo SWAN, verranno utilizzati come dati di ingresso per le griglie di maggiore dettaglio.

## 5. Griglie di Calcolo

Generalmente è necessario collegare il sistema previsionale per lo studio a costa, SWAN ad un sistema che fornisce previsioni in acque profonde, come ad esempio il modello WAM impiegato dal SIMM. Come illustrato in precedenza esistono tuttavia situazioni particolari, come ad esempio nel Mar Adriatico, nelle quali è possibile fare a meno di tale accoppiamento.

In questo caso in particolare verrà effettuata una prima simulazione di propagazione del moto ondoso su tutto l'Adriatico utilizzando una griglia con passo costante in latitudine e in longitudine, pari a  $1/30$  di grado. Si è scelto di lavorare in coordinate sferiche a causa delle elevate dimensioni delle griglie che saranno impiegate nel modello. Nel modello di calcolo SWAN, l'utilizzo delle coordinate sferiche esclude la possibilità di utilizzare griglie ruotate, quindi tutte le griglie saranno orientate E-W, S-N. I risultati delle simulazioni basate sulla griglia più estesa, tramite l'operazione di 'nesting', verranno utilizzati come input per le simulazioni annidate sulle griglie di maggior dettaglio.

91.3 Una è quella prospiciente l'Emilia Romagna con  $119 \times 145$  nodi (passo  $1/120$  di grado) a cui è annidata un'ulteriore griglia di maggiore dettaglio (passo  $1/240$  di grado) con  $107 \times 111$  nodi.

91.3 Per l'altra area, nell'Alto Adriatico, comprendente il Golfo di Venezia e il Golfo di Trieste, è stata utilizzata una griglia con  $211 \times 111$  nodi (passo  $1/120$  di grado). A questa griglia è stata annidata un'ulteriore griglia a maglia più fitta (passo  $1/240$  di grado) con  $406 \times 157$  nodi, comprendente la Piattaforma Oceanografica Acqua Alta, e la boa di Grado.

91.3 Le linee batimetriche sono state fornite dall'Istituto Idrografico della Marina nel riferimento UTM33T con risoluzione  $1:100000$  e dall'ARPA Emilia Romagna con risoluzione  $1/240$  di grado.

Le batimetrie utilizzate nel modello sono state realizzate mediante un accurato lavoro di preprocessing delle linee batimetriche effettuato con SWAN DELFT 3D.



## 6. Selezione Mareggiate

Per la validazione del sistema previsionale saranno confrontati i risultati ottenuti dalle simulazioni, effettuate con il modello di calcolo SWAN, con misure di campo. Gli ondametri a cui si farà riferimento sono la boa Nausicaa dell'ARPA Emilia Romagna, entrata in funzione a partire dal 2007 per la prima area di calcolo. Nella zona comprendente il Golfo di Venezia e quello di Trieste, per il confronto tra le registrazioni e le previsioni, sono state utilizzate sia la boa di Grado della Reg. Friuli, operativa negli anni 2001-2003, che la Piattaforma Oceanografica Acqua Alta del CNR, operativa negli anni 1978-1986 e 1987-2006. Ciò ci permetterà di osservare se su una delle due stazioni di misura, SWAN mostri un funzionamento migliore e in tal caso si potrà analizzare la causa di questo comportamento.

Sono state individuate 5 mareggiate che hanno interessato la zona dell'Emilia Romagna tra il 2007 e il 2008 e altre 5 mareggiate che hanno interessato la zona comprendente il Golfo di Venezia e quello di Trieste tra il 2001 e il 2003. La scelta delle mareggiate è stata determinata in funzione della disponibilità delle registrazioni ondametriche.

La direzione registrata dagli ondametri è la direzione di provenienza del moto ondoso.

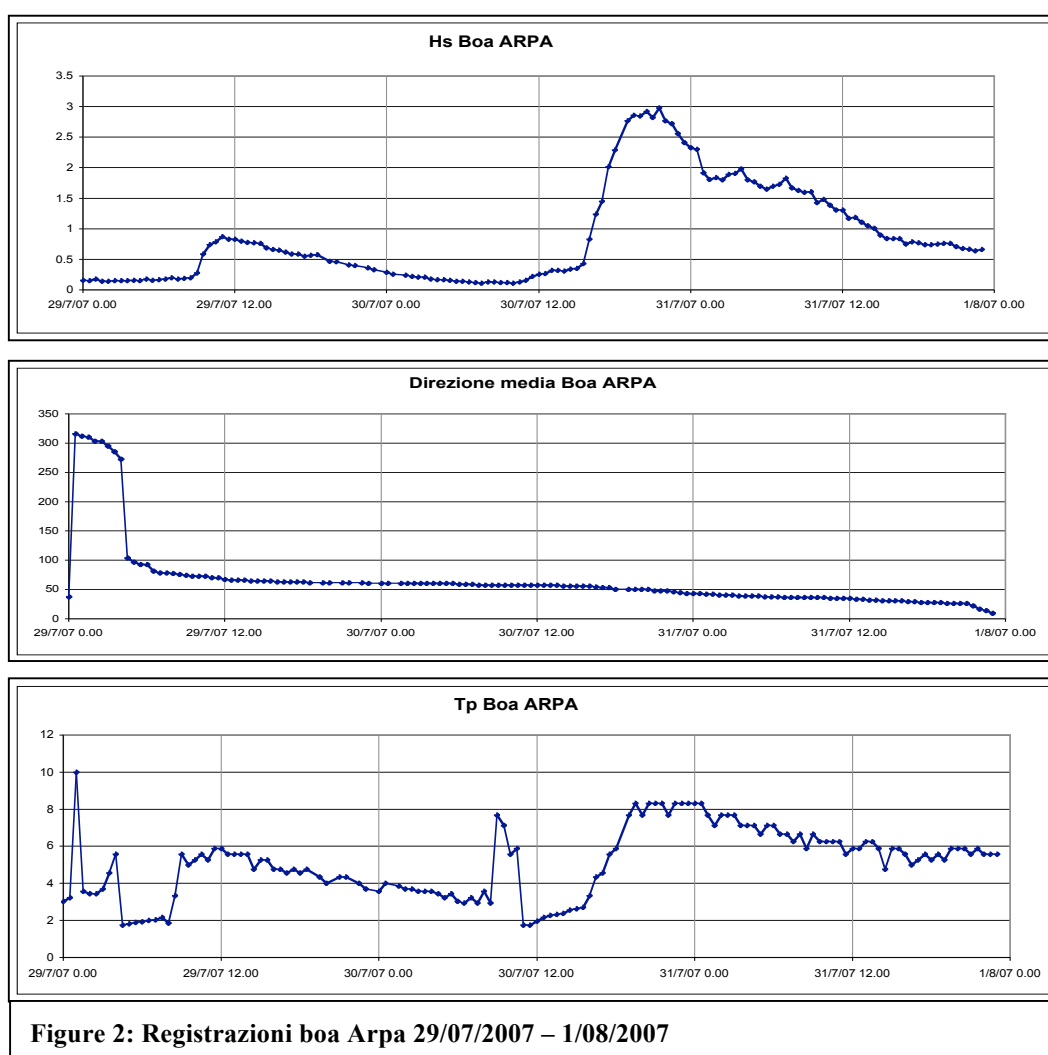
## 7. Analisi dei risultati

Utilizzando le analisi del vento del SIMM come forzanti per la generazione delle onde da vento, è stata effettuata una prima simulazione di propagazione del moto ondoso sulla griglia di maggiori dimensioni, utilizzando il modello di calcolo SWAN. Il processo di generazione da vento considerato è quello di Komen per il termine esponenziale e di Cavaleri e Malanotte-Rizzoli per il termine di crescita lineare. Nel modello sono stati implementati i processi dissipativi come il whitecapping, il frangimento, l'attrito al fondo e la redistribuzione dell'energia sullo spettro dovuta ad interazioni non lineari (triplette e quadruplette).

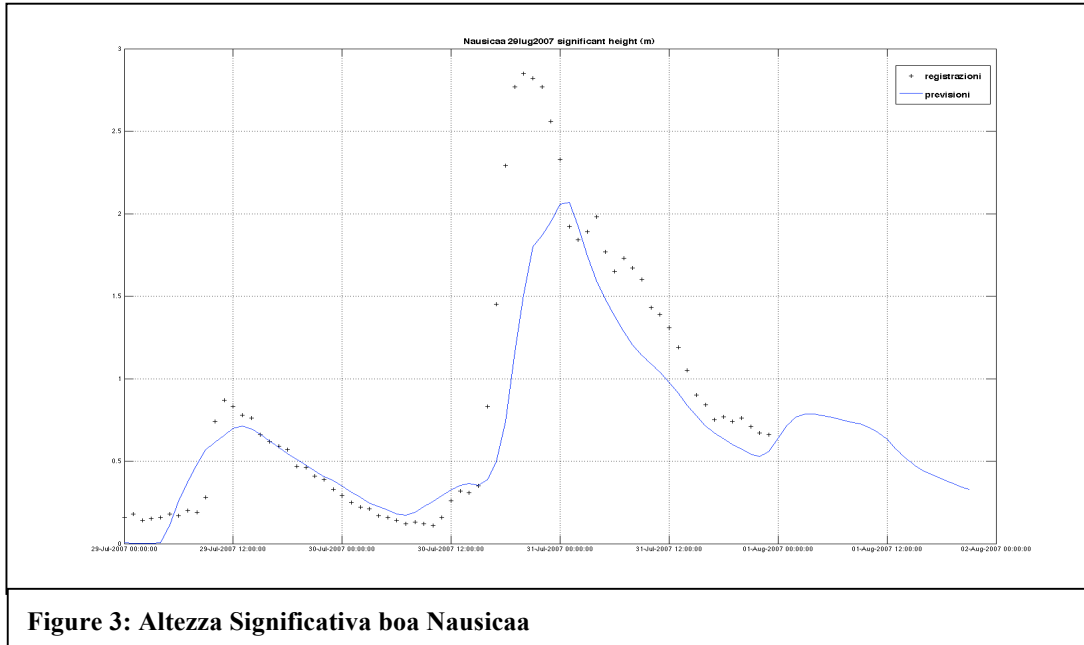
## 7.1 EMILIA ROMAGNA

### 7.1.1 Mareggiata del 29 luglio 2007

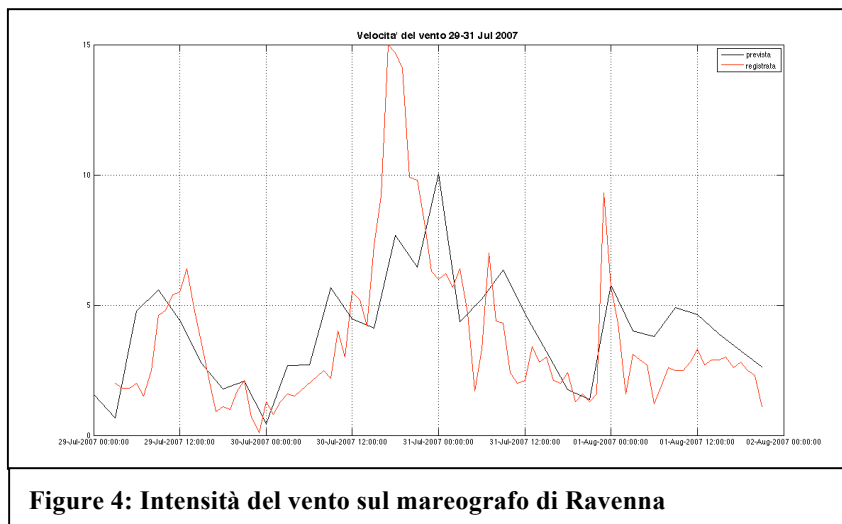
I risultati della simulazione numerica sono stati confrontati con la boa ondametria Nausicaa dell'Emilia Romagna. Questo ondometro, posizionato ad una profondità di 10 metri, è parzialmente schermato a Nord dall'apparato deltizio del Po e a Sud dalle Marche. Le mareggiate più importanti che sono state registrate dalla boa hanno, infatti, una direzione prevalente di provenienza compresa tra 30° e 100°N.



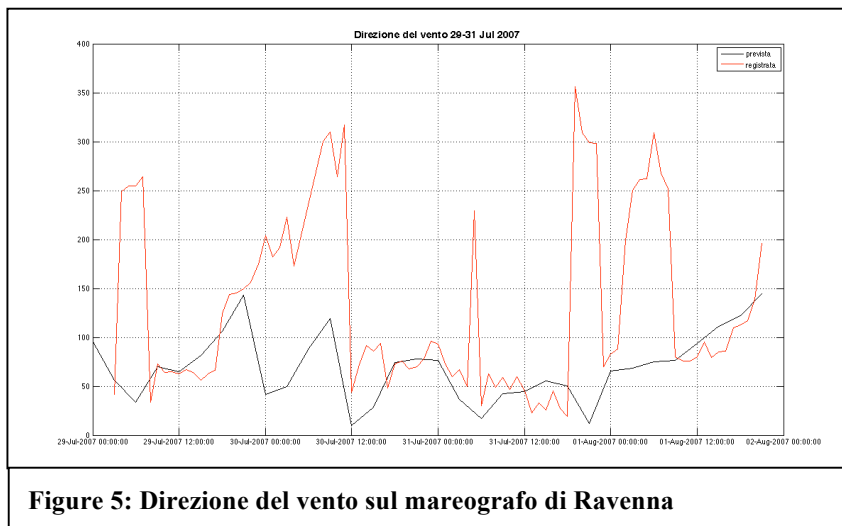
L'andamento dell'altezza significativa stimata con lo SWAN e quello registrato dalla boa Nausicaa sono simili. E' evidente tuttavia che l'altezza d'onda significativa valutata dal modello sottostima di circa il 30% il picco della mareggiata.



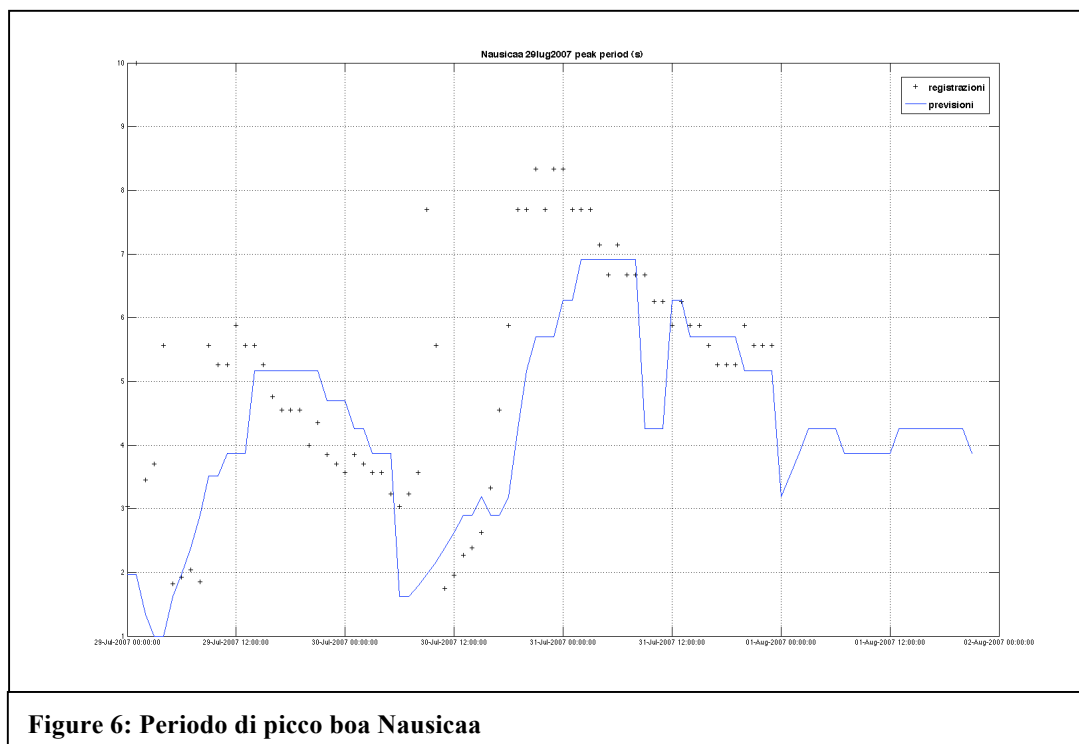
Questo comportamento non è da imputare al modello numerico ma alla sottostima delle previsioni di vento. Nella figura sottostante è riportato l'andamento della velocità del vento registrato dal mareografo di Ravenna a confronto con le previsioni. Si osserva una sottostima della massima velocità di vento prevista del 30%. Inoltre il picco del vento previsto è sfasato temporalmente rispetto alla massima intensità del vento misurata, situazione che rispecchia esattamente anche l'andamento dell'altezza d'onda significativa prevista e misurata.



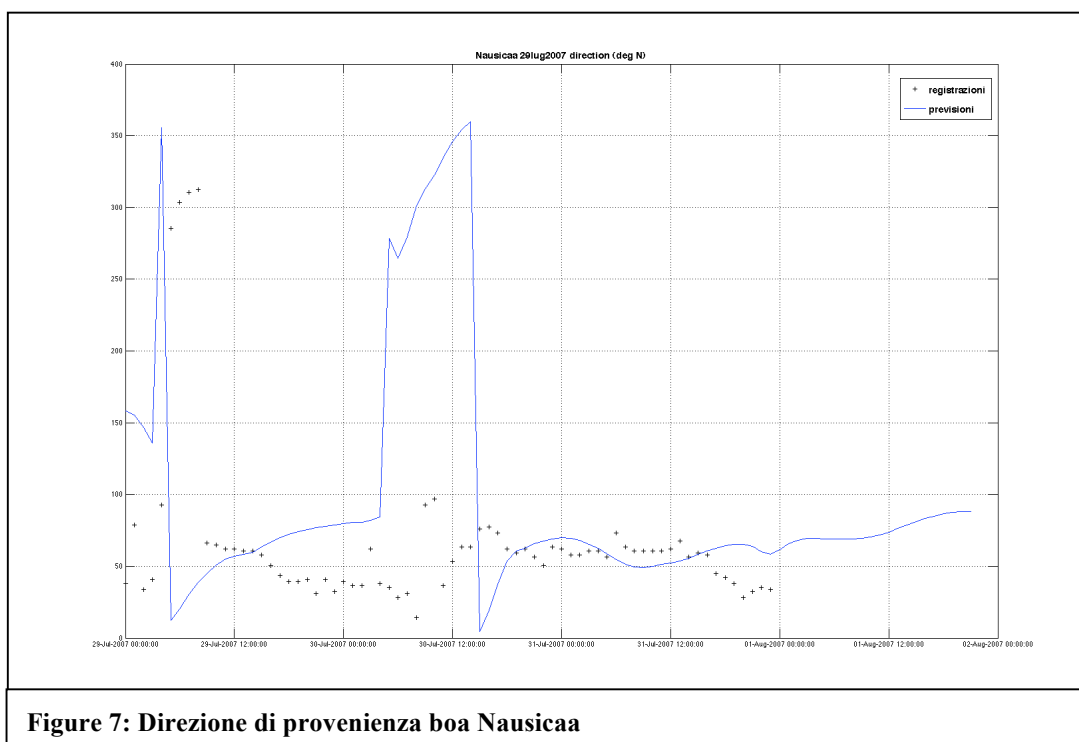
La direzione prevista dal SIMM, in corrispondenza dei massimi valori dell'intensità del vento (30 luglio 2007 12:00:00 - 31 luglio 2007 03:00:00), segue invece molto bene le registrazioni del mareografo di Ravenna.



Anche i valori del periodo di picco stimati da SWAN sulla boa di Nausicaa mostrano un comportamento analogo a quanto osservato per l'andamento dell'altezza d'onda.



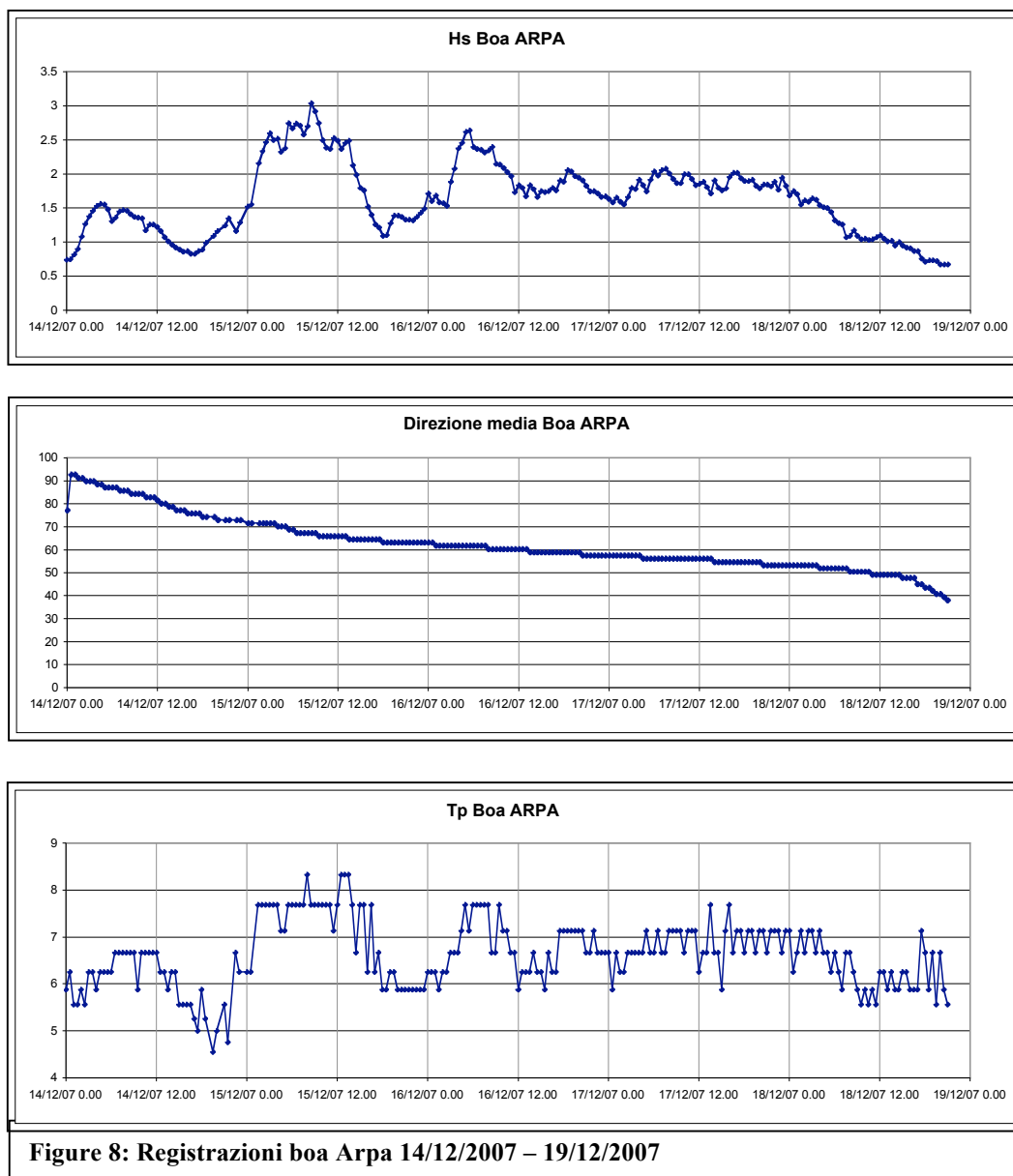
La direzione di provenienza del moto ondoso registrata dalla boa, durante il periodo in cui si è verificata il picco della mareggiata (30 luglio 2007 18:00:00 - 31 luglio 2007 12:00:00) è di circa 50°N (settore di Est-Nord-Est) in accordo con quanto previsto dal modello di calcolo. Si osserva una discordanza tra le simulazioni e le registrazioni nel periodo subito precedente, corrispondente ad intensità del vento inferiori ai 3 m/s, dunque poco influente per la generazione del moto ondoso.



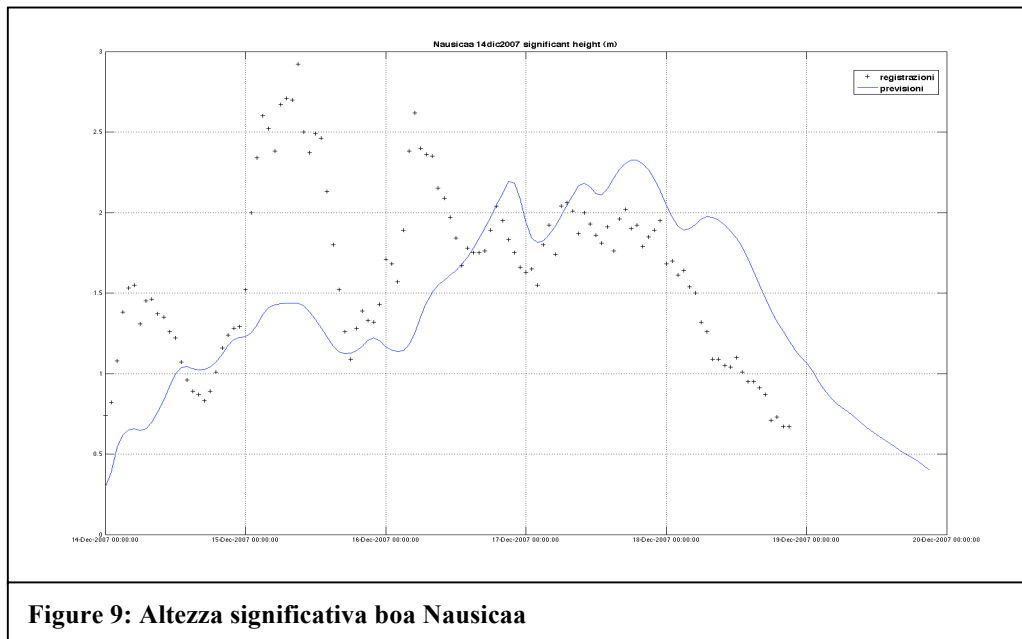
**Figure 7: Direzione di provenienza boa Nausicaa**

### 7.1.2 Mareggiata del 14 dicembre 2007

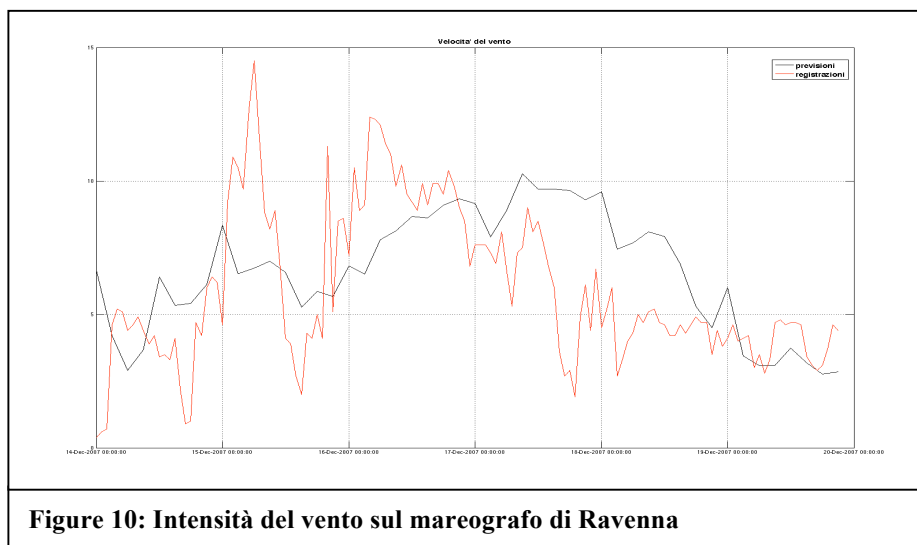
Questa mareggiata è caratterizzata da una direzione di provenienza prevalente E-NE. I massimi valori delle altezze significative si registrano sulla direzione di 60° N.



Come si osserva dal confronto tra le previsioni e le registrazioni dell'ondametro, riportato nel grafico seguente, non c'è correlazione tra le due serie di valori.



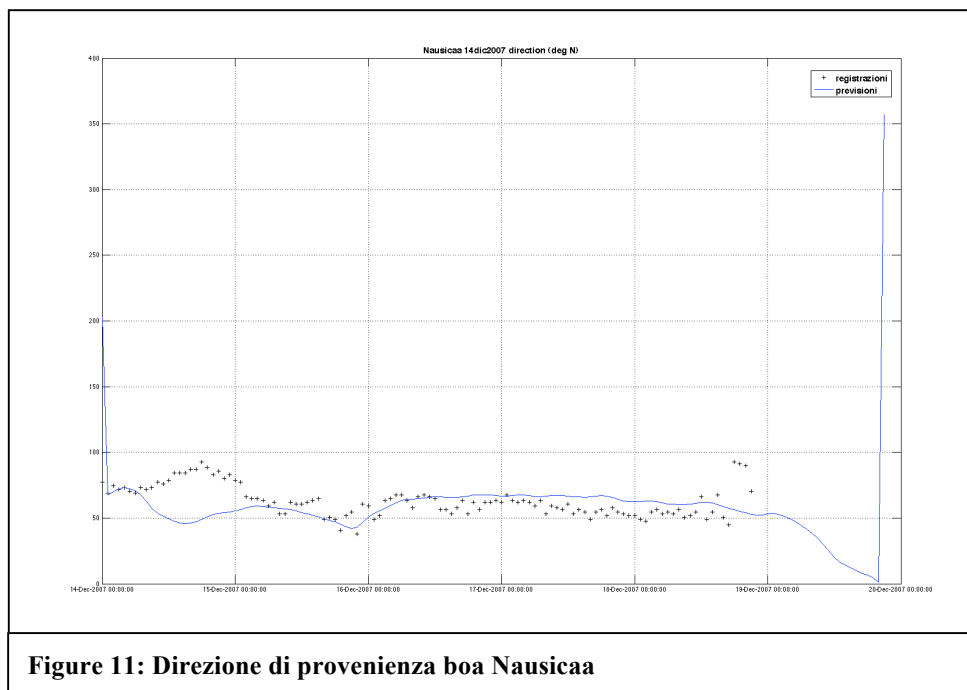
Per ricercare la causa di tali risultati è importante osservare il vento che ha generato il moto ondoso nel modello di calcolo. A tale scopo sono state confrontate le registrazioni mareografiche di una stazione sufficientemente vicina all'ondametro, quella di Ravenna, con le previsioni in corrispondenza dello steso punto di misura (fig.10). L'andamento del vento previsto si discosta completamente da quello registrato dal mareografo, in maniera analoga a quanto ottenuto per l'andamento dell'altezza d'onda.





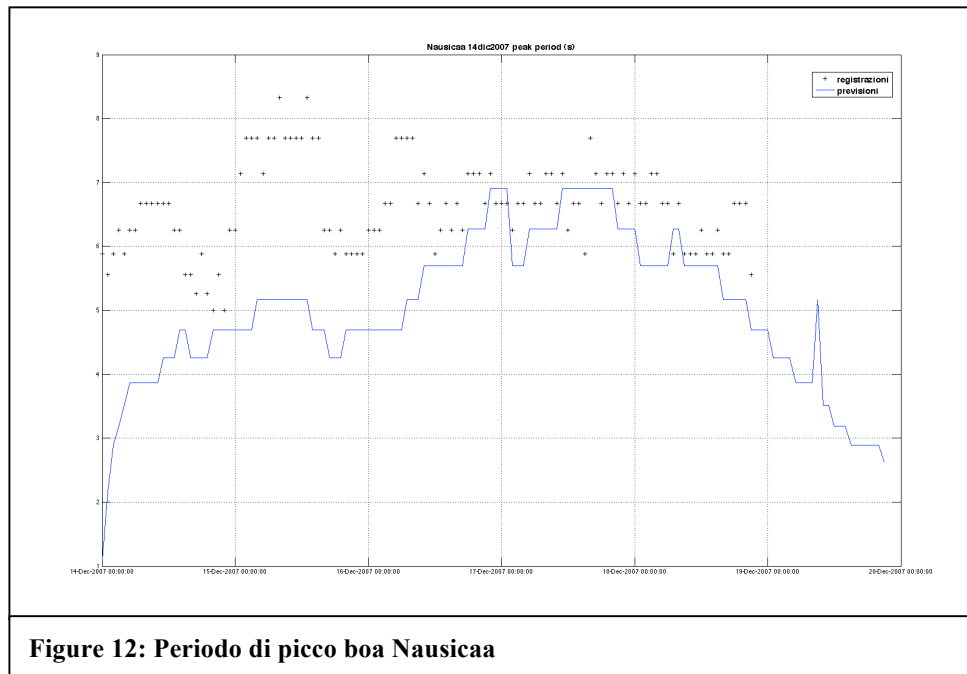
Intorno alle ore 09:00 del 15 dicembre 2007 il vento registrato dalla stazione di misura presenta un picco di circa 14 m/s responsabile della generazione del picco della mareggiata osservato dall'ondametro. Al contrario il vento previsto dal SIMM non presenta questa stessa intensificazione, tanto che per lo stesso istante il vento è dell'ordine di 7 m/s. In questo caso quindi la difformità tra l'altezza d'onda osservata e quella prevista è legata anche all'errata previsione del vento.

Al contrario, come risulta dal seguente grafico la direzione di provenienza stimata dal modello segue molto bene le registrazioni ondametrichhe. In corrispondenza del picco della mareggiata registrato dalla boa Nausicaa la direzione di provenienza è di circa 60° N.



**Figure 11: Direzione di provenienza boa Nausicaa**

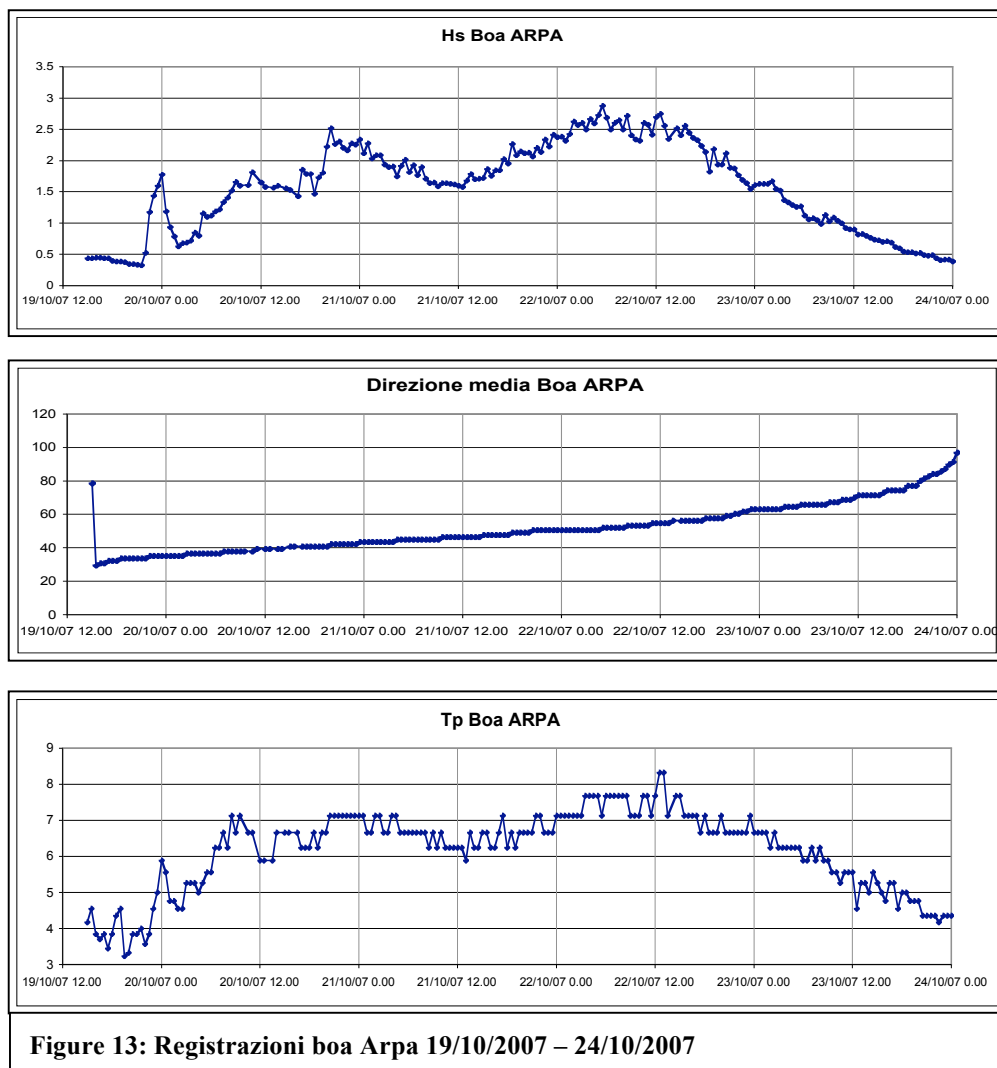
Il periodo di picco previsto, essendo funzione delle caratteristiche geometriche del moto, è contraddistinto da una discordanza con le osservazioni in analogia a quanto osservato per l'andamento dell'altezza d'onda.



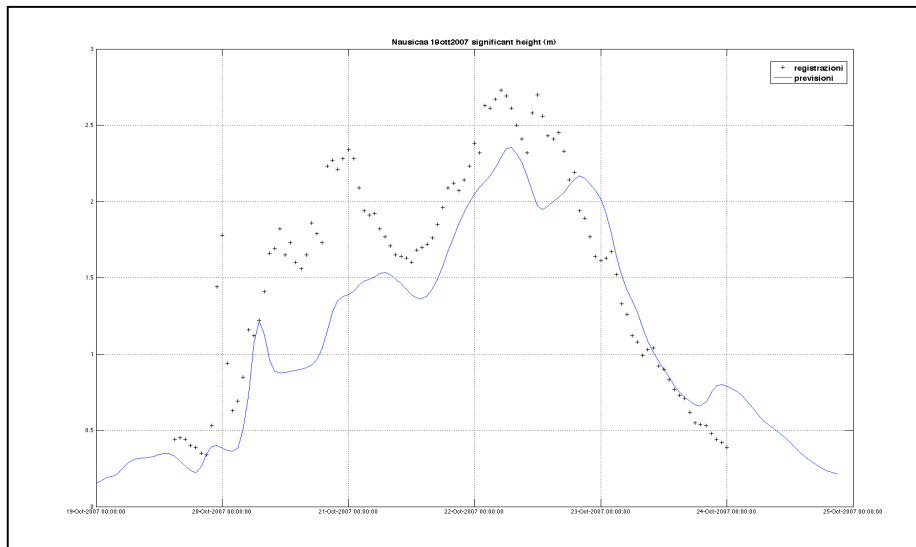
**Figure 12: Periodo di picco boa Nausicaa**

### 7.1.3 Mareggiata del 19 ottobre 2007

Questa mareggiata è caratterizzata da una direzione prevalente NE. Le onde registrate dalla boa appartengono al settore 30° N-90° N.

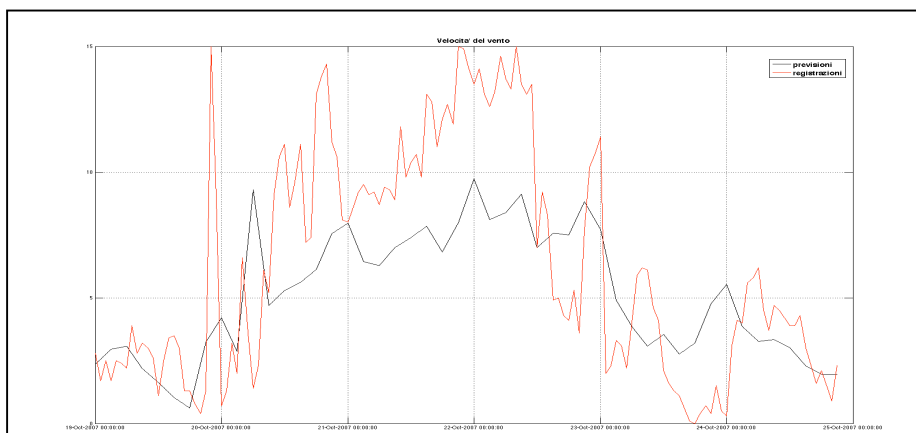


Nel periodo compreso tra il 20 ottobre 2007 alle ore 08:00 fino al 21 ottobre 2007 alle ore 09:00 si riscontra un tratto in cui le previsioni sottostimano particolarmente le registrazioni, anche dell'ordine del 40%. Una sottostima di circa il 15% si registra anche in corrispondenza del picco della mareggiata. Questo comportamento potrebbe essere legato al vento previsto dal SIMM e utilizzato come dato di ingresso per la simulazione.



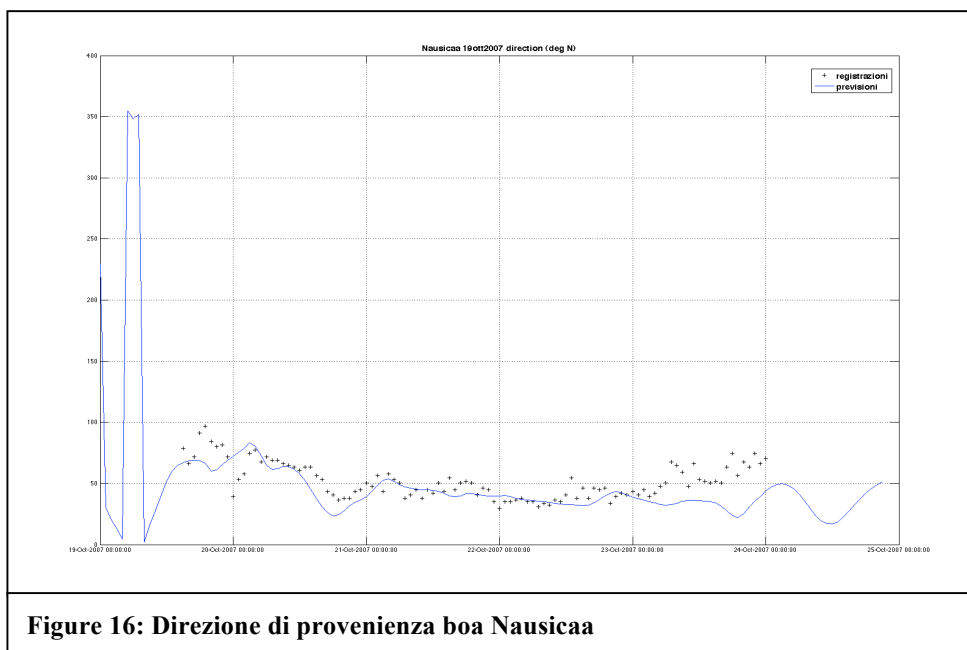
**Figure 14: Altezza Significativa boa Nausicaa**

Infatti l'andamento del vento previsto nella fase crescente della mareggiata è sottostimato rispetto a quello registrato dal mareografo di Ravenna (fig.15). Ad esempio, poco prima del 21 ottobre le registrazioni del vento del mareografo evidenziano un picco che non è stato previsto dal SIMM e che nel modello di calcolo ha portato alla sottostima in termini di altezza d'onda.

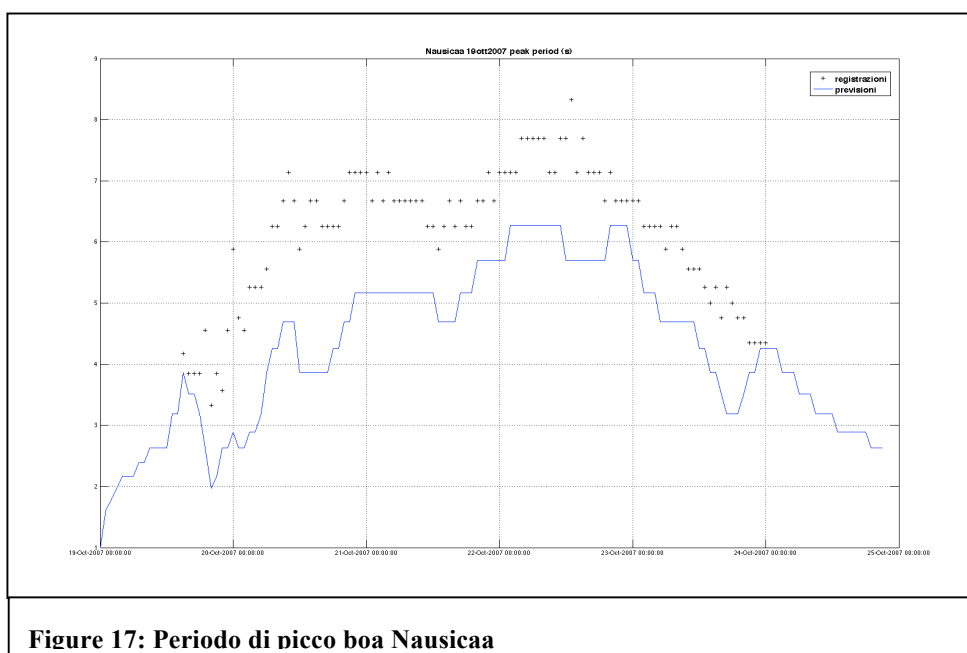


**Figure 15: Intensità del vento sul mareografo di Ravenna**

La direzione di provenienza stimata dal codice di calcolo segue perfettamente l'andamento dei dati misurati dalla boa, mostrando una direzione media prevalente di provenienza intorno a 50°N.

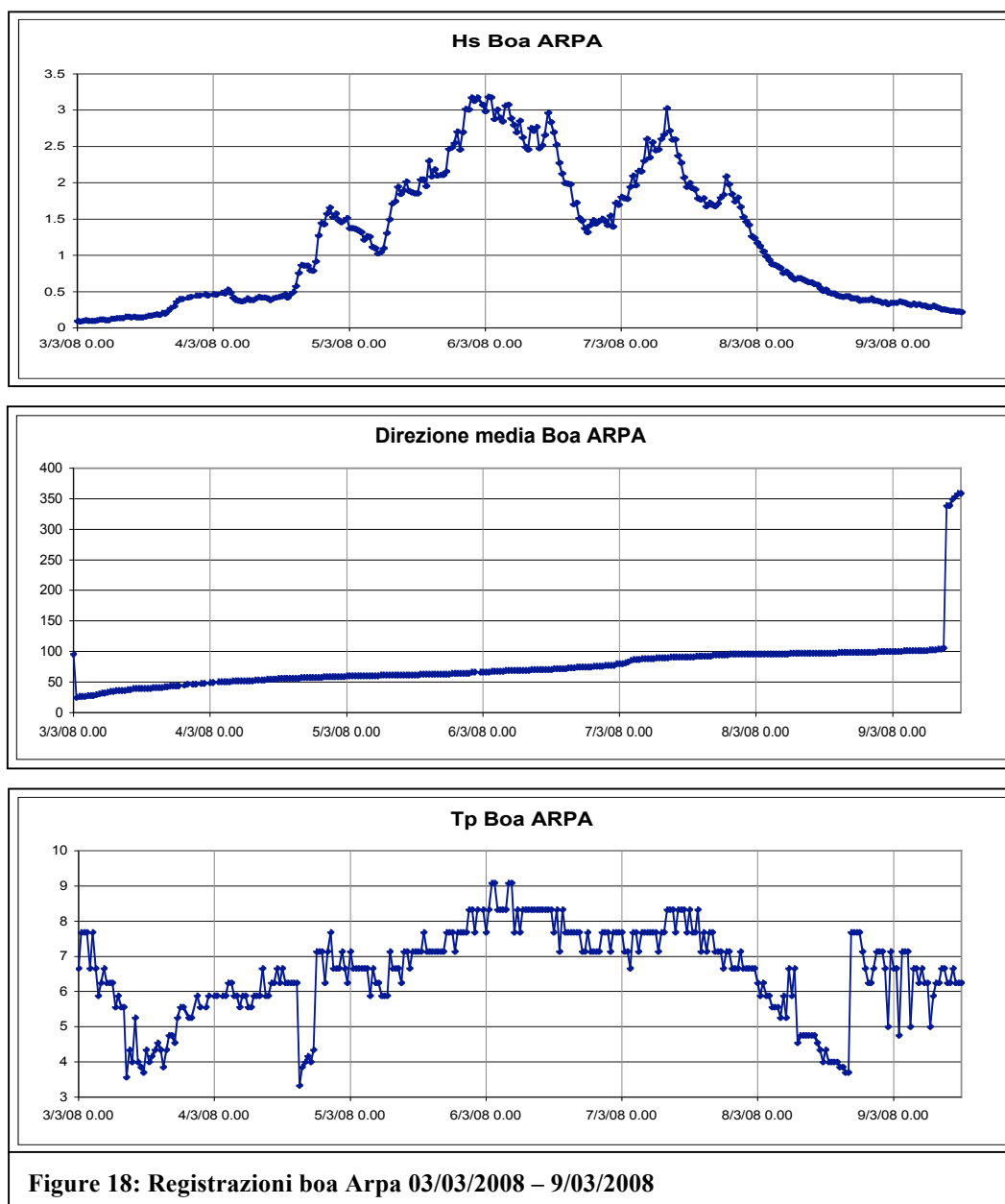


Come l'andamento dell'altezza d'onda anche il periodo di picco previsto, essendo funzione delle caratteristiche geometriche del moto, è congruente con le osservazioni. Anche per il periodo di picco, la sottostima delle previsioni è massima nella fase crescente della mareggiata.



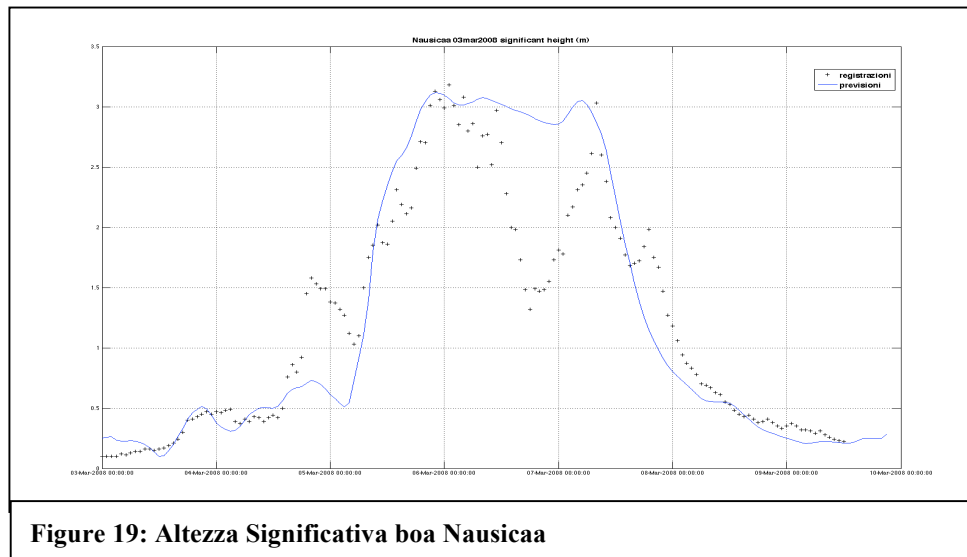
### 7.1.4 Mareggiata del 3 marzo 2008

Questa mareggiata è particolarmente interessante perché bimodale con le due direzioni medie prevalenti, rispettivamente a 60° N e 90° N. Le massime altezze significative sono state registrate per direzioni E-NE. Quelle con direzione di provenienza 90° N sono inferiori al metro dunque poco rilevanti rispetto alla mareggiata considerata.

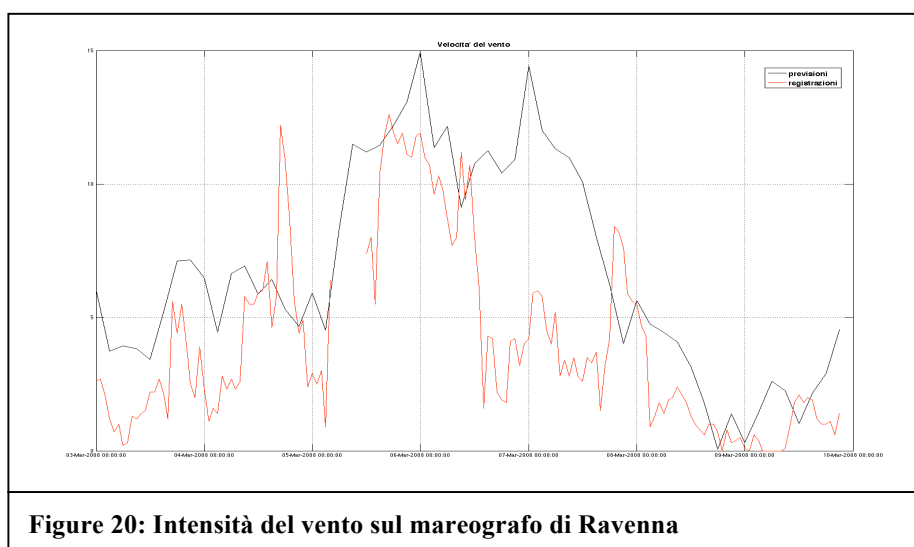


Le previsioni del modello SWAN sulla boa Nausicaa seguono molto bene l'andamento dell'altezza d'onda registrata dall'ondametro, riuscendo a cogliere perfettamente il picco della mareggiata.

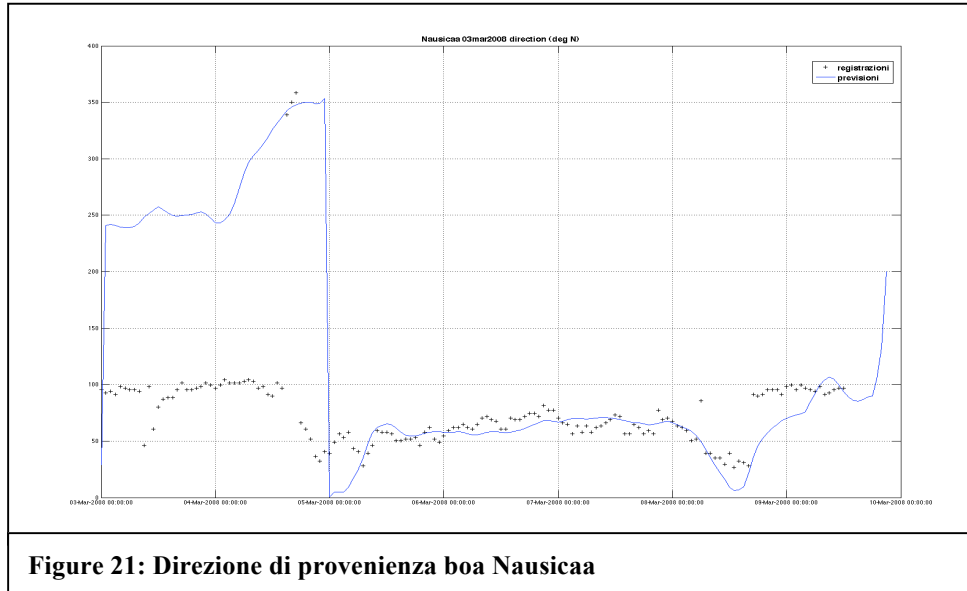
L'unica discordanza riguarda il periodo compreso tra il 6 marzo alle ore 10:00 e il 7 marzo alle ore 8:00, in cui l'altezza d'onda prevista rimane pressoché costante al contrario di quella registrata che prima decresce rapidamente per poi aumentare altrettanto celermente.



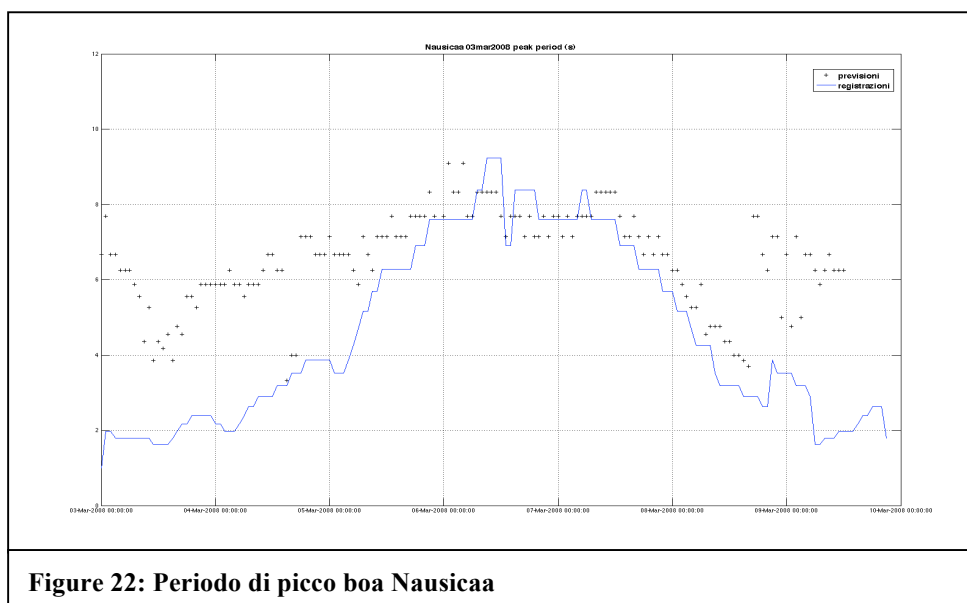
Come mostrato in figura 20, tale comportamento è dovuto al vento previsto dal SIMM. Per il periodo successivo al picco della mareggiata il vento previsto si riduce lievemente per poi aumentare in accordo con l'andamento dell'altezza d'onda previsto. E' da notare che tra il 6 marzo alle 18:00 e il 7 marzo alle 19:00 le registrazioni ondametriche non corrispondono perfettamente a quelle anemologiche.



La direzione di provenienza prevista dal modello numerico è la stessa registrata dall'ondametro. Le uniche differenze si riscontrano tra il 3 ed il 5 marzo, in cui la direzione osservata è circa  $100^{\circ}\text{N}$ , mentre quella prevista fino al 4 marzo è circa  $250^{\circ}\text{N}$  per poi aumentare fino a  $350^{\circ}\text{N}$  il 5 marzo. Tuttavia questo periodo è poco interessante perché non riguarda il picco della mareggiata.



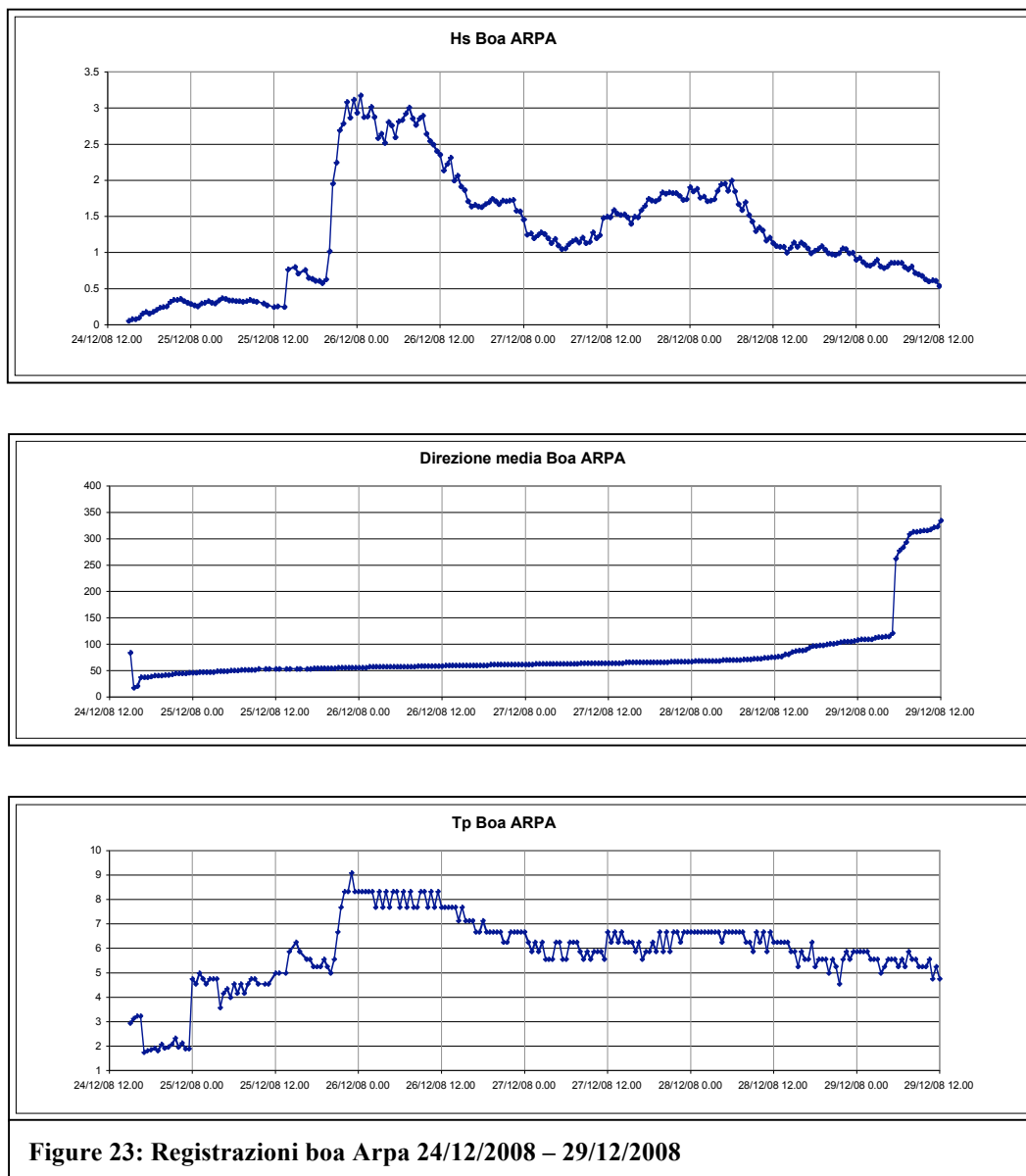
Essendo funzione delle caratteristiche geometriche del moto, il periodo di picco previsto segue molto bene le registrazioni come avviene per l'altezza d'onda. Si registra una sottostima nelle simulazioni nel periodo in cui esiste una discordanza tra direzione di provenienza prevista e osservata.



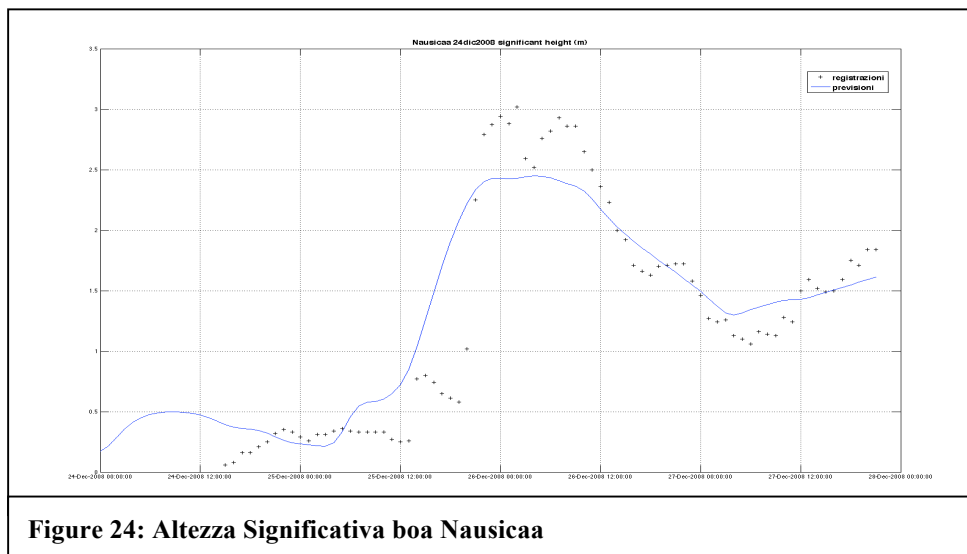


### 7.1.5 Mareggiata del 24 dicembre 2008

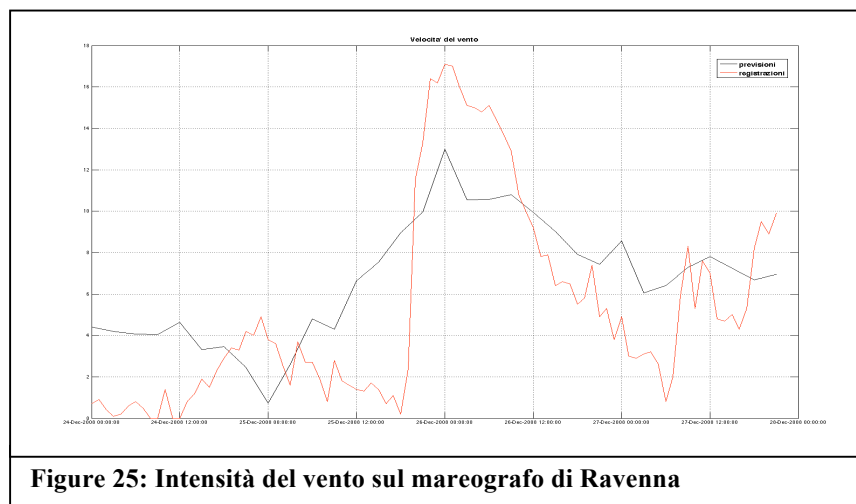
L'analisi di questo evento meteomarinico evidenzia una direzione media di provenienza fortemente incentrata intorno a 60° N, per la quale si registrano anche le altezze significative più elevate.



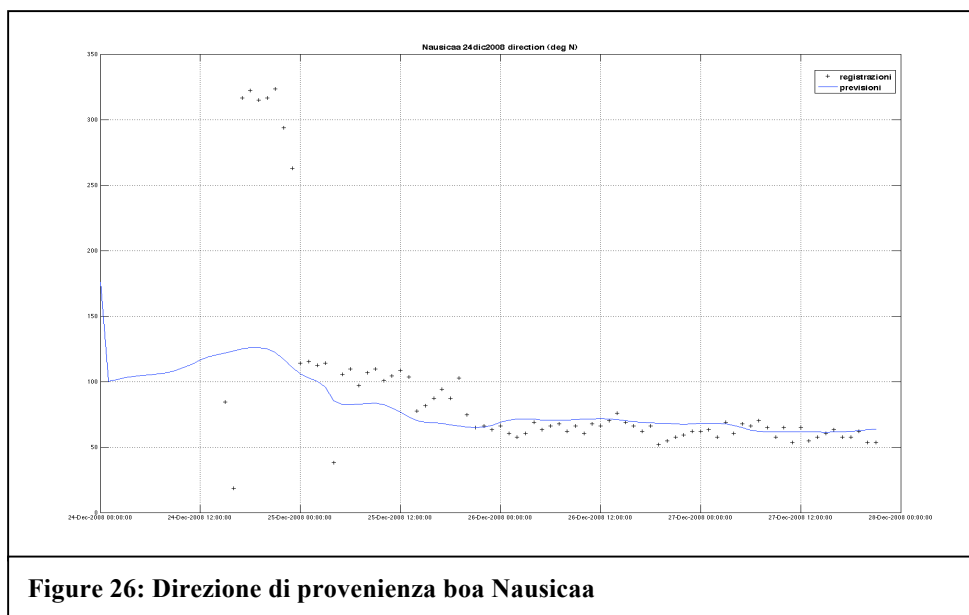
L'andamento dell'altezza d'onda stimato dal modello numerico segue bene le registrazioni dell'ondametro, come mostrato nel grafico seguente. Nella fase decrescente della mareggiata l'altezza d'onda prevista segue perfettamente le osservazioni. Va notato tuttavia che nella fase crescente della mareggiata l'altezza d'onda prevista dal modello SWAN sovrastima le registrazioni dell'ondametro. Inoltre, il picco della mareggiata previsto dal modello è sottostimato di circa il 15% rispetto alle registrazioni. Questo problema è legato al vento previsto dal SIMM e utilizzato come dato di ingresso per la simulazione.



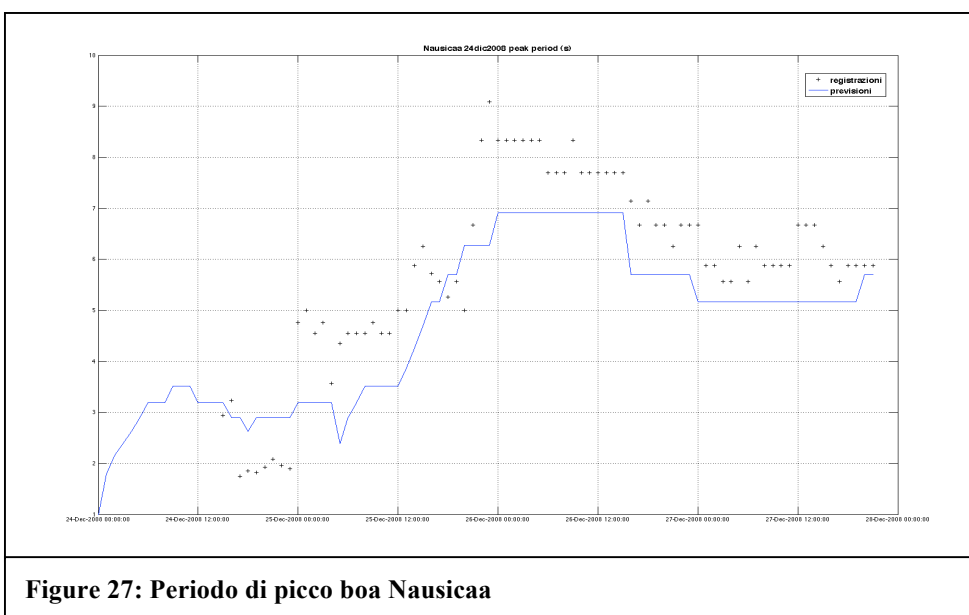
In fig. 25 sono riportate a confronto le previsioni e le registrazioni del vento in corrispondenza del mareografo di Ravenna. Il valore massimo dell'intensità del vento previsto dal SIMM è sottostimato rispetto alle registrazioni. Inoltre il vento previsto sovrastima quello registrato il 25 dicembre tre le ore 05:00 e le ore 21:00, in maniera analoga a quanto ottenuto per l'andamento dell'altezza d'onda.



La direzione stimata dal codice di calcolo è assimilabile a quella registrata dal 26 dicembre 2008, periodo comprendente il picco della mareggiata dunque più importante ai fini della previsione del moto ondoso a costa. Nel periodo compreso tra il 25 ed il 26 dicembre la direzioni di provenienza media varia intorno a  $70^{\circ}\text{N}$  mentre le registrazioni indicano una direzione prossima a  $100^{\circ}\text{N}$ .



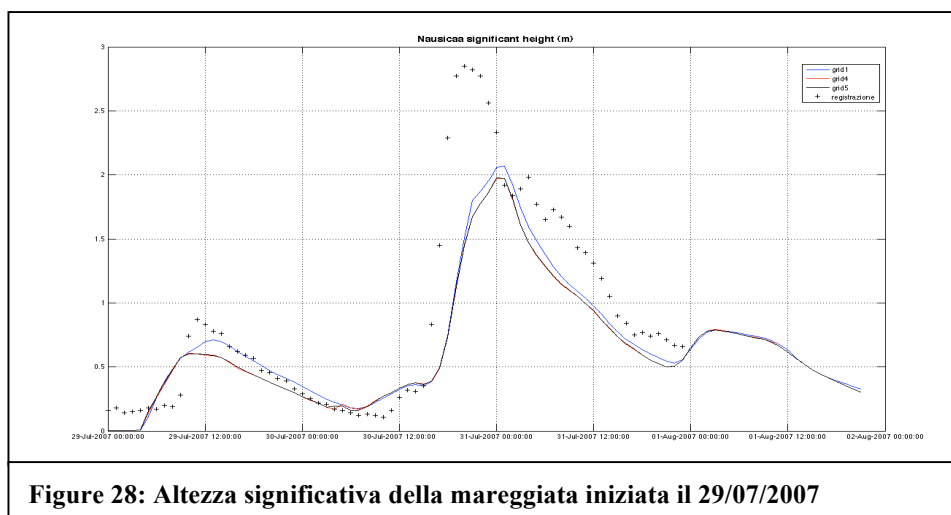
L'andamento del periodo di picco previsto dallo SWAN segue molto bene le osservazioni dell'ondametro, come mostrato in figura:



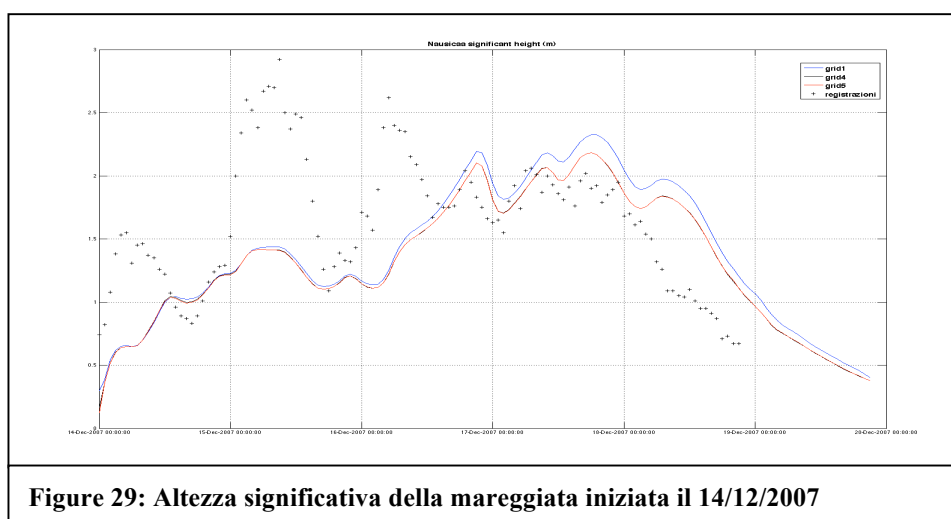
### 7.1.6 Nesting Emilia Romagna

I risultati ottenuti dalla prima simulazione numerica su tutto l'Adriatico, su una griglia con passo costante in latitudine e in longitudine pari a  $1/30$  di grado, sono stati utilizzati, tramite l'operazione di 'nesting', come condizioni al contorno per una griglia locale a maggiore risoluzione ( $1/120^\circ$ ), a cui è annidata un'ulteriore griglia di maggiore dettaglio (passo  $1/240$  di grado).

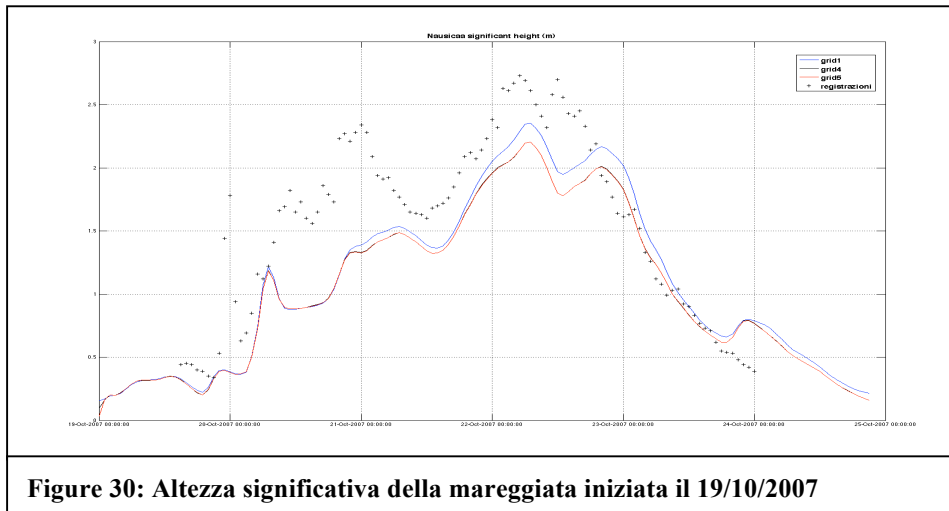
Per ognuna delle mareggiate considerate sono riportate a confronto le altezze significative, determinate in corrispondenza della boa Nausicaa dell'Emilia Romagna, nella simulazione a larga scala e nei successivi livelli di nesting.



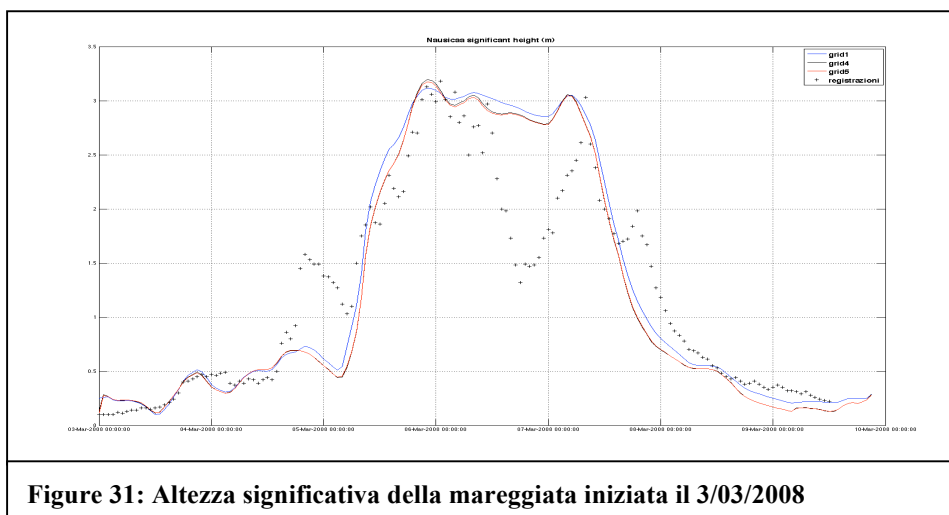
**Figure 28: Altezza significativa della mareggiata iniziata il 29/07/2007**



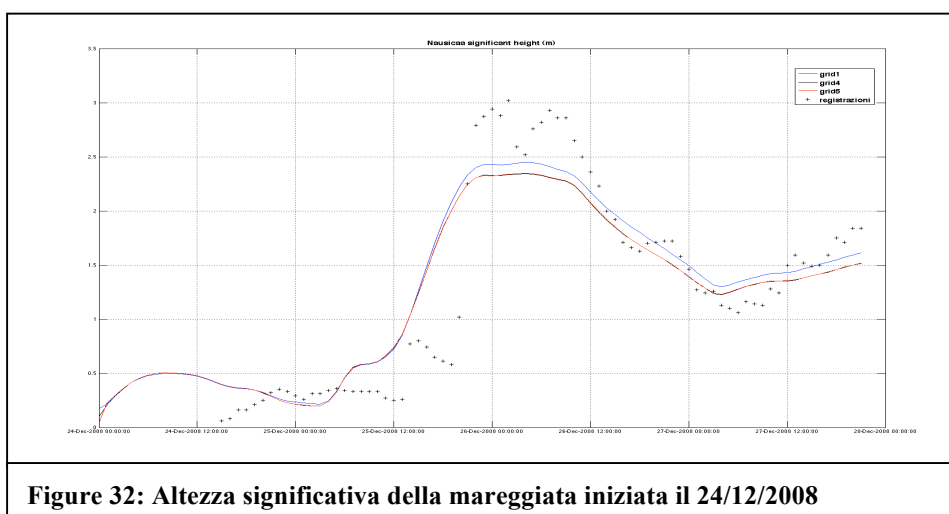
**Figure 29: Altezza significativa della mareggiata iniziata il 14/12/2007**



**Figure 30: Altezza significativa della mareggiata iniziata il 19/10/2007**



**Figure 31: Altezza significativa della mareggiata iniziata il 3/03/2008**



**Figure 32: Altezza significativa della mareggiata iniziata il 24/12/2008**

I risultati ottenuti evidenziano che annidare le griglie per aumentare la risoluzione spaziale fino ad un passo di 400 m non determina miglioramenti nella simulazione. Questo comportamento è da imputare a diversi fattori:

- il posizionamento della griglia di dettaglio; infatti lavorando in coordinate sferiche non è stato possibile ruotare le griglie di calcolo in modo da disporle parallelamente alla linea di costa. In questo modo infatti, le condizioni al contorno prodotte dal run precedente sarebbero state su tre lati della griglia annidata, tenendo conto in maniera migliore di tutte le possibili direzioni di provenienza; l'adozione di una griglia ruotata inoltre avrebbe permesso di avere un lato perpendicolare alla direzione di attacco del moto ondoso proveniente da NE e quindi minori problemi di diffrazione ai bordi.

- la batimetria piuttosto uniforme su tutto il bacino non rende apprezzabile l'adozione di una risoluzione spaziale più elevata.

Tuttavia, la scelta di utilizzare una griglia ad elevata risoluzione spaziale permette di realizzare sistemi di previsione dello stato di mare che possano essere propedeutici alla protezione civile ed ambientale, come all'analisi dei climi ondosi, alla valutazione dei fenomeni erosivi ed alla progettazione delle opere di difesa dei litorali.

Per valutare la bontà del modello e la sua capacità di stimare i valori dell'altezza d'onda rispetto a quelli osservati dall'ondametro di riferimento sono state stimate alcune misure di scostamento. Per oggettivare questa valutazione si può ricorrere pertanto a dei numeri in grado di descrivere quantitativamente la distanza fra simulazione e realtà.

Le possibili misure sono le seguenti:

- BIAS, ossia la misura di distorsione definita come:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_i^n (\hat{x}_i - x_i)$$

in cui  $\hat{x}_i$  e  $x_i$  sono rispettivamente il valore previsto e quello osservato al tempo  $i$ .

- MAE (Mean Absolute Error) misura la deviazione intorno alla media ed è definito come:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_i^n |\hat{x}_i - x_i|$$

- MSE (Mean Square Error) definito come:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_i^n (\hat{x}_i - x_i)^2$$

- Correlazione, ossia una relazione tra i valori misurati e quelli previsti che rappresenta la tendenza di una variabile a variare in funzione di un'altra. L'indice di correlazione può assumere un valore compreso tra meno uno (quando le variabili considerate sono inversamente correlate) e l'unità (quando vi sia correlazione assoluta cioè quando alla variazione di una variabile corrisponde una variazione rigidamente dipendente dall'altra), ovviamente un indice di correlazione pari a zero indica un'assenza di correlazione.

La correlazione è definita come:

$$C = corr(x, \hat{x}) = \frac{\text{cov}(x, \hat{x})}{\sqrt{\text{var}(x) \cdot \text{var}(\hat{x})}}$$

in cui:

$$\text{cov}(x, \hat{x}) = \frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x}_i)(\hat{x}_i - \bar{\hat{x}}_i)$$

$$\text{var}(x) = \frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x}_i)^2$$

$$\text{var}(\hat{x}) = \frac{1}{n} \sum_i^n (\hat{x}_i - \bar{\hat{x}}_i)^2$$

avendo indicato con  $\bar{x}_i$  e  $\bar{\hat{x}}_i$  rispettivamente la media dei valori osservati e la media dei valori previsti.

Si riportano le suddette misure di scostamento, per le tre griglie di calcolo, per ciascuna delle mareggiate.

**Table 1: Mareggiata iniziata il 29/07/2007**

	BIAS	MAE	MSE	Corr
Grid1	-0.18	0.24	0.17	0.91
Grid2	-0.23	0.28	0.20	0.91
Grid3	-0.23	0.28	0.20	0.91

I valori ottenuti per il BIAS indicano che mediamente le previsioni sottostimano i valori osservati di circa il 18% nella prima griglia di calcolo e di circa il 23% nelle griglie di maggiore dettaglio. Anche in termini di errore assoluto ed errore quadratico medio si ottengono risultati migliori nella griglia a larga scala. I dati osservati e le previsioni risultano essere fortemente correlati. Quindi il modello di calcolo di calcolo utilizzato ha permesso di ricostruire in maniera apprezzabile lo stato di mare nel periodo considerato.

**Table 2: Mareggiata iniziata il 14/12/2007**

	BIAS	MAE	MSE	Corr
Grid1	-0.12	0.49	0.37	0.31
Grid4	-0.19	0.45	0.35	0.35
Grid5	-0.19	0.45	0.35	0.35

I risultati ottenuti sulla boa Nausicaa sono scorrelati dalle registrazioni. Lo scarto assoluto e lo scarto quadratico medio confermano questo risultato. Il valore ottenuto per il BIAS in questo caso è poco significativo, poiché, non valutando lo scarto in termini di valore assoluto, la sottostima dei valori previsti è compensata da periodi in cui tali valori sovrastimano le registrazioni.

Per questa mareggiata, inoltre, non ha molto senso effettuare ulteriori simulazioni annidando le griglie di dettaglio alla griglia a larga scala poiché l'errata previsione del



vento del SIMM ha prodotto uno sviluppo della mareggiata completamente differente da quello reale, registrato dall'ondametro, già per la prima griglia di calcolo.

**Table 3: Mareggiata iniziata il 19/10/2007**

	BIAS	MAE	MSE	Corr
Grid1	-0.27	0.40	0.24	0.82
Grid4	-0.34	0.41	0.26	0.84
Grid5	-0.34	0.41	0.26	0.84

In questo caso le registrazioni e le previsioni sono ben correlate. Aver utilizzato le griglie di dettaglio (grid4, grid5) ha comportato un peggioramento delle previsioni, come mostrato anche dai risultati ottenuti per il BIAS, lo scarto assoluto e lo scarto quadratico medio. Il motivo per cui la correlazione aumenta per le simulazioni sulle griglie di maggior dettaglio è spiegabile osservando il tratto decrescente della mareggiata. In questo periodo infatti le previsioni ottenute sulla prima griglia di calcolo sovrastimano le registrazioni in maniera maggiore di quanto ottenuto per le griglie di dettaglio.

**Table 4: Mareggiata iniziata il 3/03/2008**

	BIAS	MAE	MSE	Corr
Grid1	-0.07	0.31	0.23	0.92
Grid4	-0.01	0.32	0.23	0.91
Grid5	-0.01	0.32	0.23	0.91

Le altezze d'onda previste dal modello di calcolo sulla boa di Nausicaa sono fortemente correlate alle registrazioni. I risultati ottenuti sulle varie griglie sono molto simili anche in termini di parametri statistici di scostamento.

**Table 5: Mareggiata iniziata il 24/12/2008**

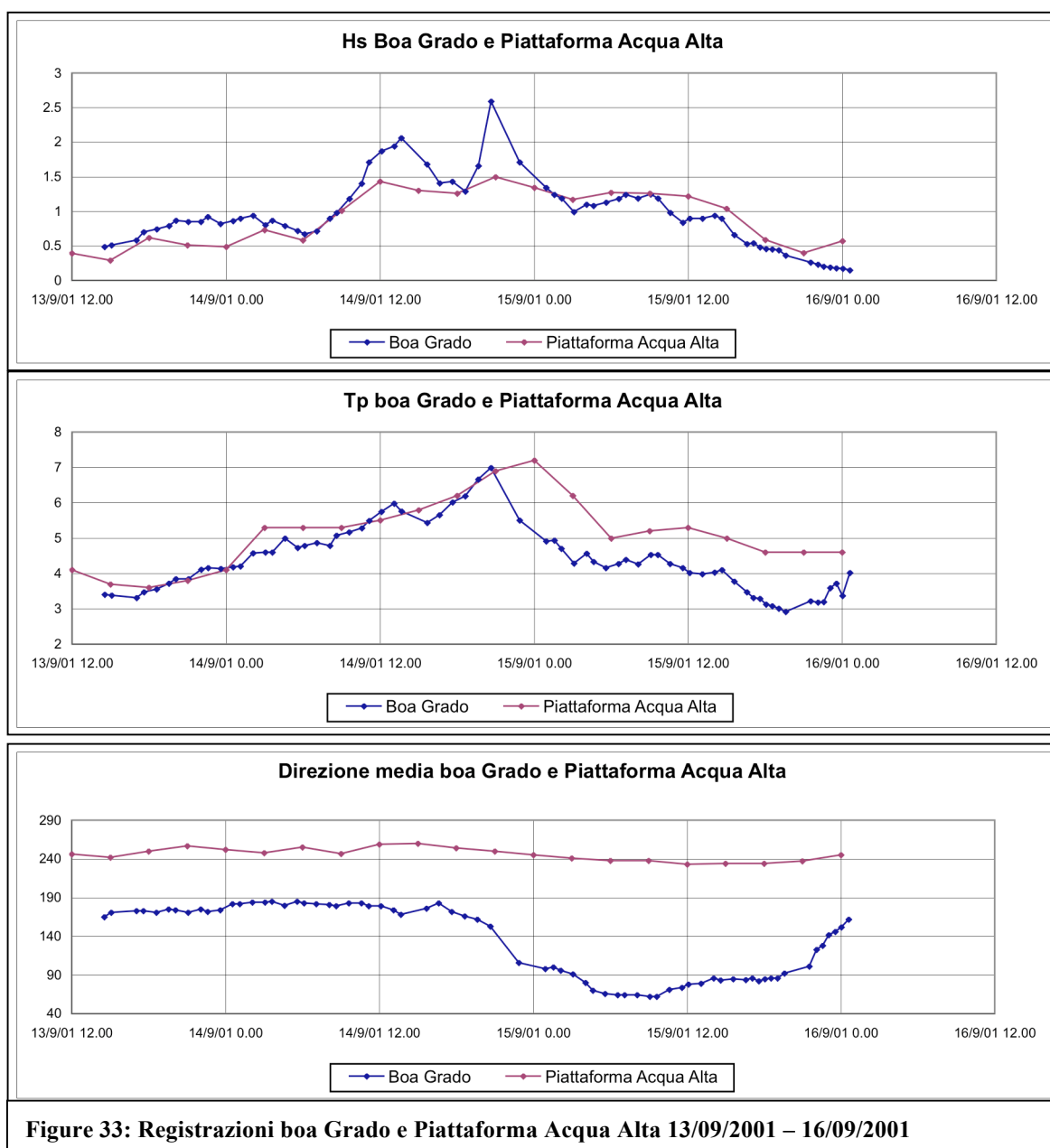
	BIAS	MAE	MSE	Corr
Grid1	0.007	0.26	0.15	0.91
Grid4	0.007	0.28	0.16	0.91
Grid5	0.008	0.28	0.16	0.91

Anche per questa mareggiata, i risultati ottenuti sulle varie griglie sono molto simili sia in termini di correlazione che di parametri statistici di scostamento. Gli errori sono da attribuire alle errate previsioni anemologiche effettuate dal SIMM.

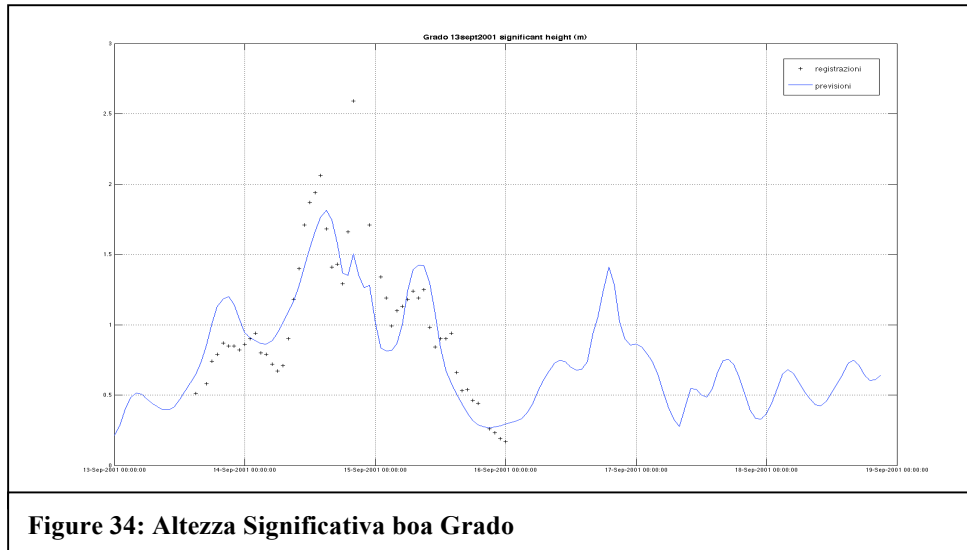
## 7.2 VENETO

### 7.2.1 Mareggiata del 13 settembre 2001

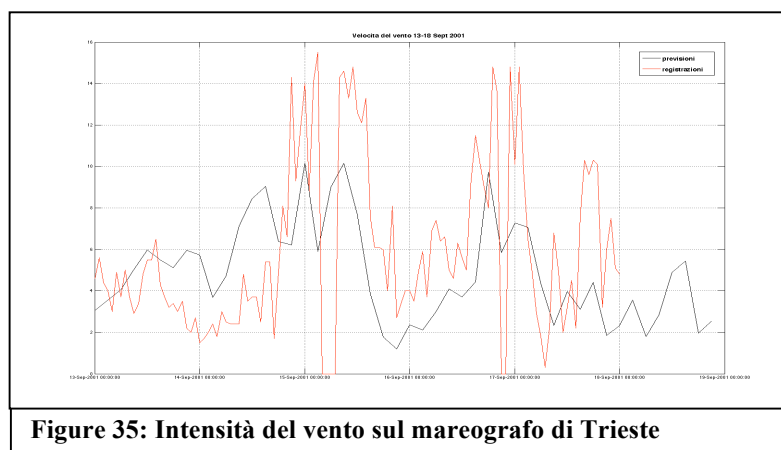
La mareggiata osservata dalla piattaforma Acqua Alta ha direzione prevalente 240° N. Dalle registrazioni della boa di Grado la mareggiata risulta essere bimodale, con due direzioni prevalenti di 90° N e 180° N.

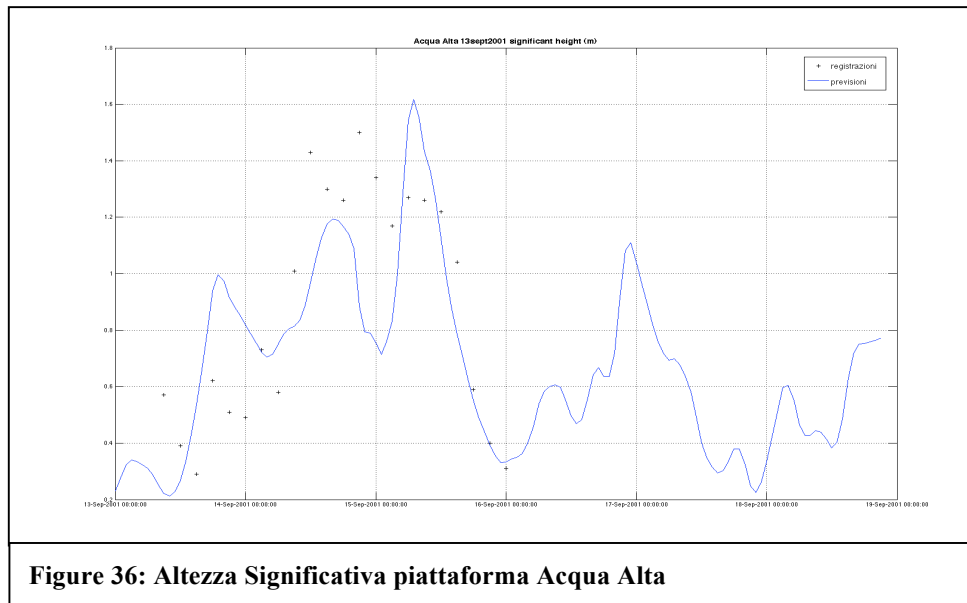


I risultati ottenuti da questa prima simulazione mostrano come il modello sia in grado di riprodurre opportunamente l'andamento della mareggiata, evidenziando tuttavia una sottostima delle altezze d'onda rispetto a quelle registrate dalla boa di Grado, in particolare in corrispondenza del picco della mareggiata.

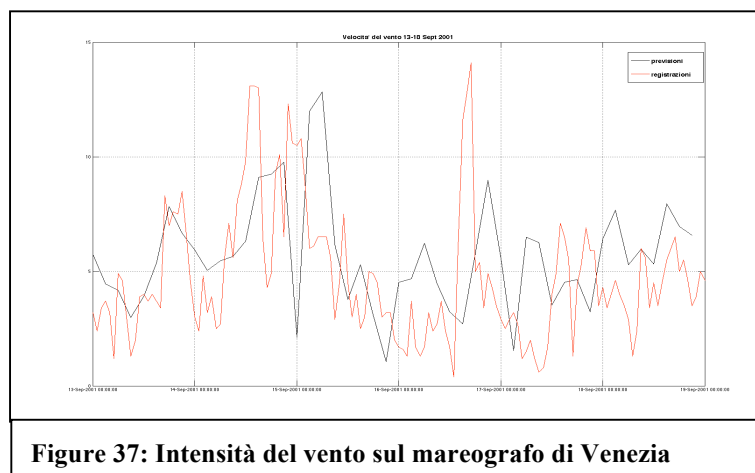


Poiché l'incremento dell'altezza d'onda fino al valore massimo della mareggiata viene raggiunto in un limitato intervallo temporale (1 ora), la causa di questo risultato potrebbe essere la bassa frequenza di previsioni del vento del SIMM che porta ad una sottostima del vento previsto. Infatti, il dominio d'integrazione permette di fornire le previsioni anemologiche ogni 3 ore, non tenendo conto di eventuali intensificazioni della forzante eolica dell'ordine di pochi minuti che potrebbero però dar luogo ad un'importante aumento di altezza d'onda significativa. La sottostima del vento previsto intorno al periodo in cui si è verificato il picco della mareggiata (14 settembre 2001 16:00:00) è mostrato in figura 35, in cui sono stati riportati i dati registrati dal mareografo di Trieste a confronto con le previsioni del vento del SIMM.

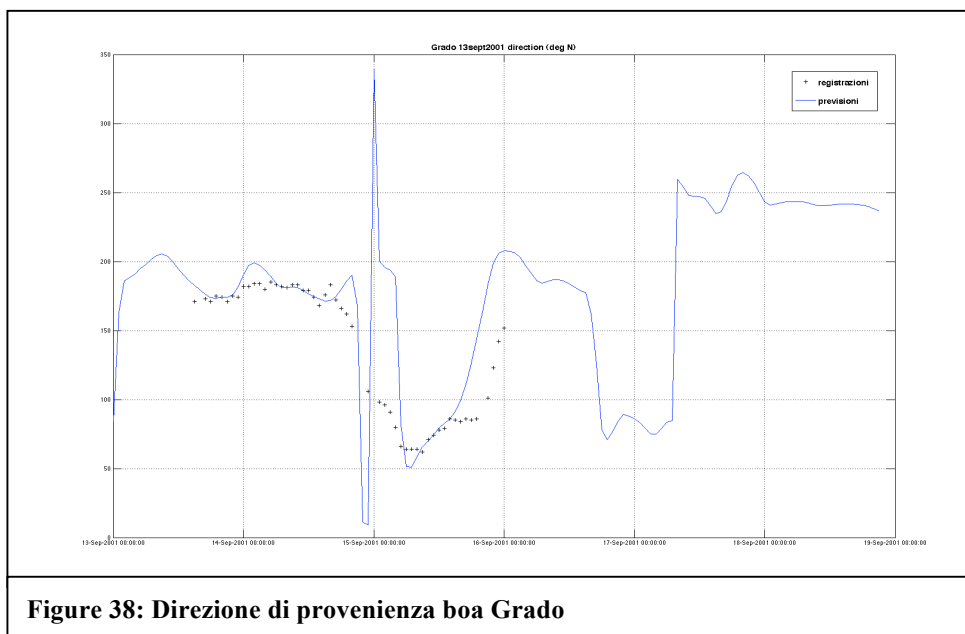




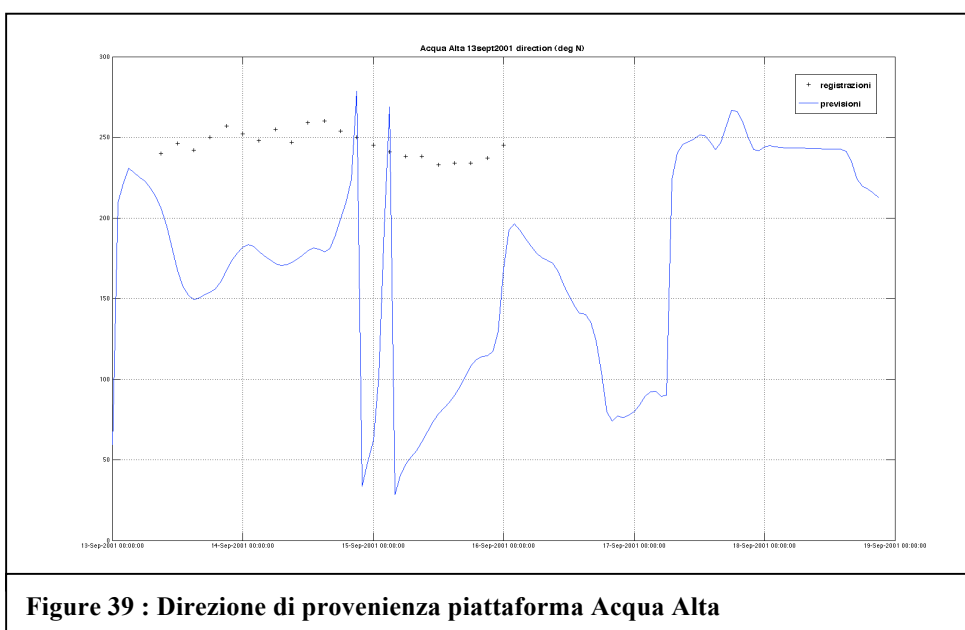
I risultati ottenuti con il codice di calcolo non seguono molto bene l'andamento dell'altezza d'onda registrata, pur riuscendo a ottenere un valore dell'altezza significativa massima molto prossima a quella osservata dalle strumentazioni. Nel seguente grafico è riportato il confronto tra il vento registrato dal mareografo di Venezia ed il vento previsto in corrispondenza di questa stazione di misura. Si riscontra che lo sfasamento tra il picco previsto della mareggiata e quello delle registrazioni della piattaforma Acqua Alta è analogo allo sfasamento tra il massimo valore dell'intensità del vento previsto e quello registrato dal mareografo di Venezia.



Per controllare il corretto funzionamento del modello di calcolo è stato riportato anche l'andamento temporale delle direzioni e del periodo di picco a confronto con le registrazioni dei due ondametri. Il grafico seguente mostra una buona predizione del modello per la direzione media del moto ondoso rispetto alle registrazioni della boa ondametrica di Grado.

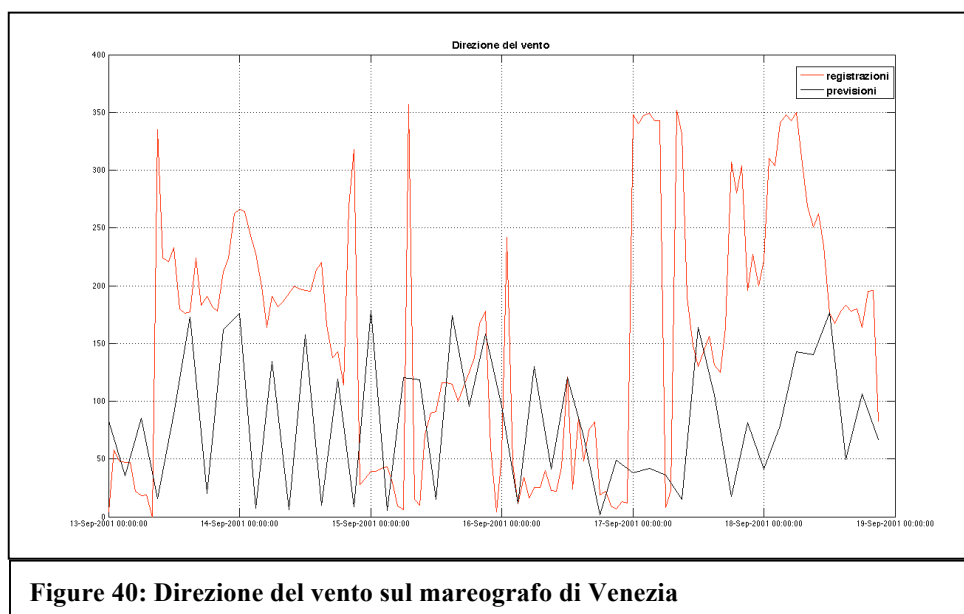


Al contrario, in corrispondenza della piattaforma Acqua Alta si riscontrano notevoli differenze tra la direzione di provenienza stimata dal modello e quella fornita dalle registrazioni.

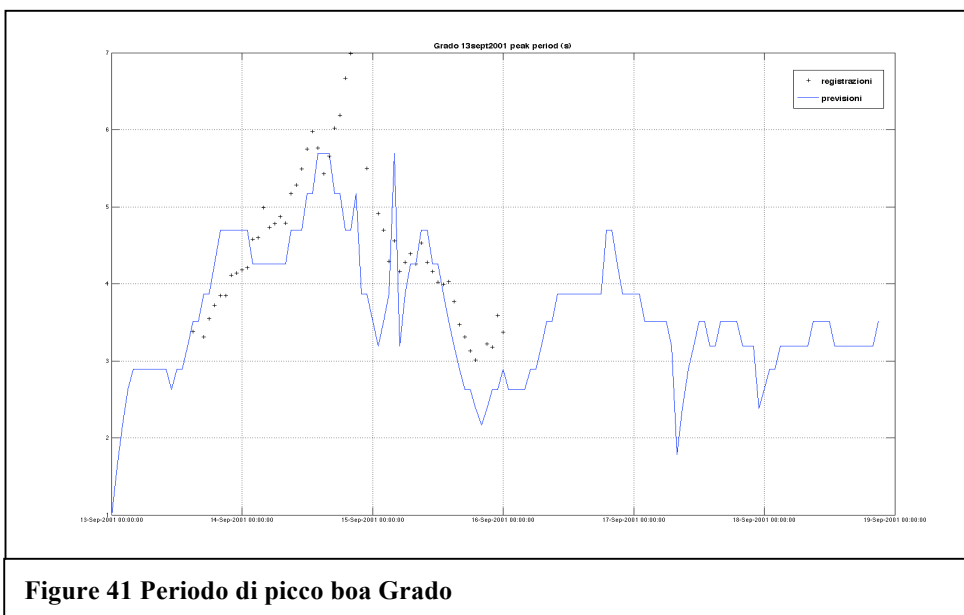


Di seguito si riporta, per un'analisi più approfondita la direzione del vento prevista dal SIMM a confronto con le registrazioni del mareografo di Venezia.

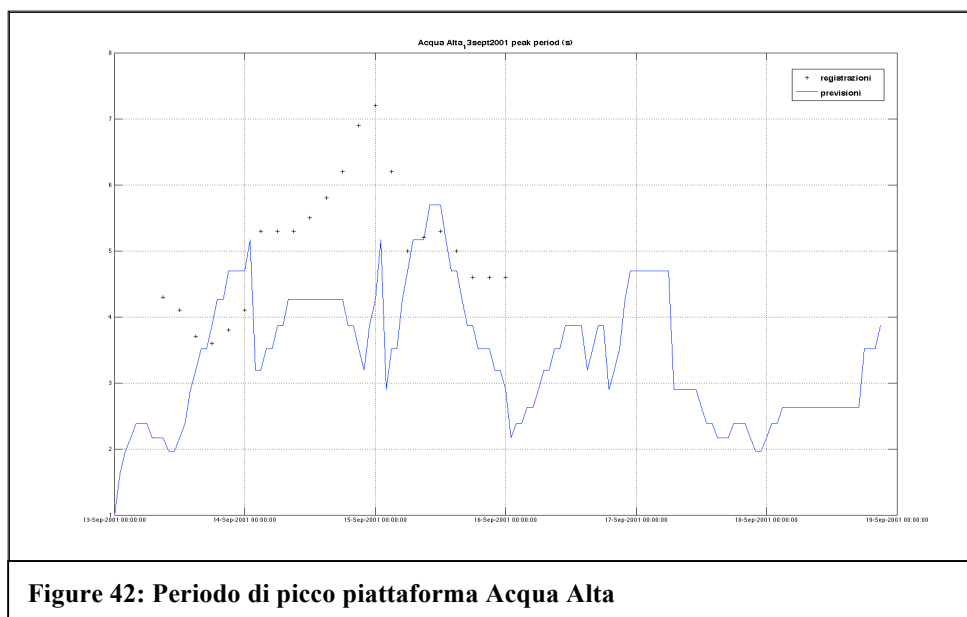
In prossimità del picco della mareggiata (15/09/2002 alle ore 08:00) la direzione del vento registrata dalla stazione mareografica di Venezia e quella prevista dal SIMM è analoga alla direzione del moto ondoso prevista dal modello di calcolo.



I valori del periodo di picco stimati da SWAN sulla boa di Grado sono molto simili ai dati osservati dallo strumento di misura.



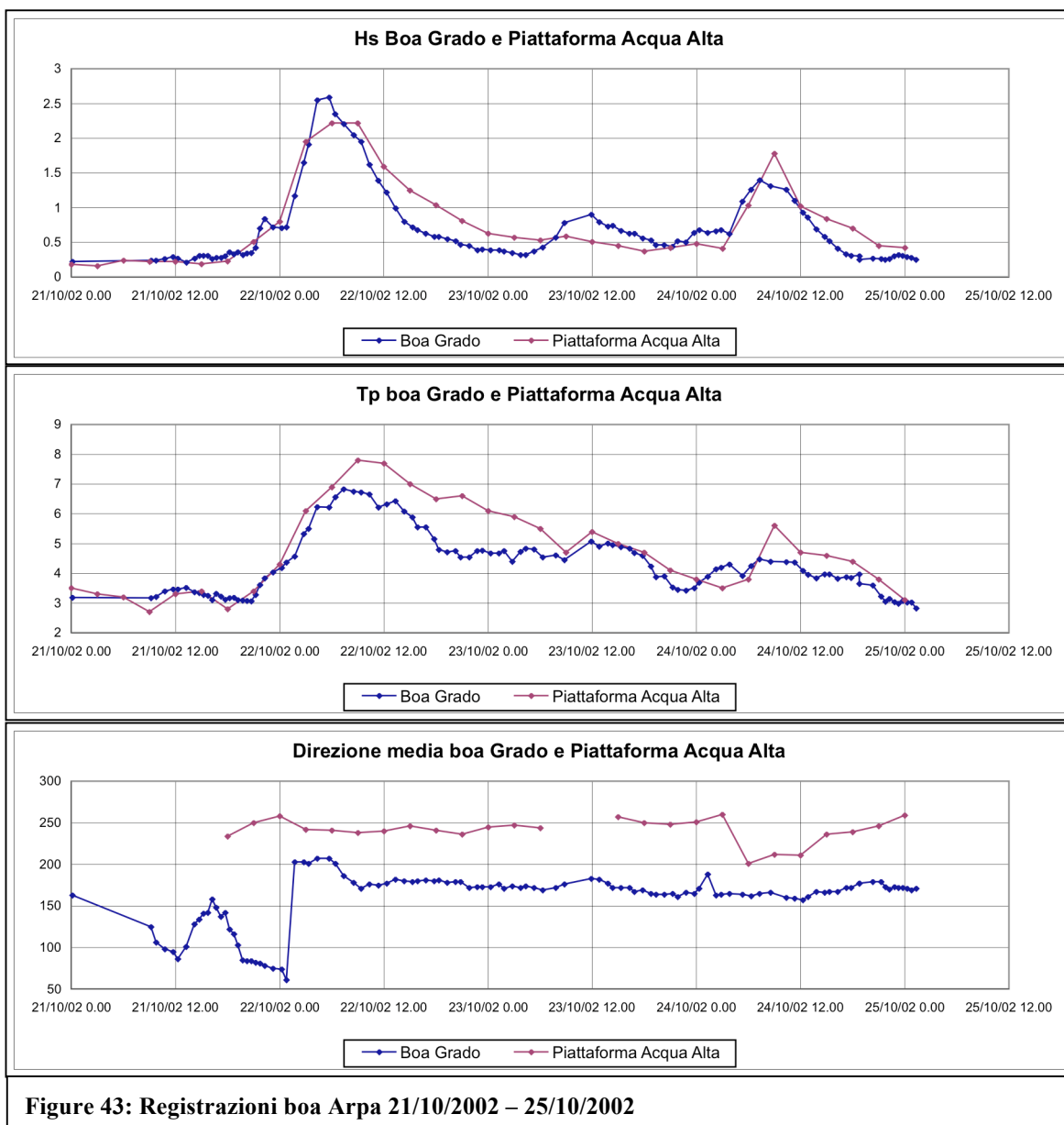
Si osserva, invece una notevole differenza in corrispondenza della stazione Acqua Alta analogamente a quanto visto per l'altezza significativa.



**Figure 42: Periodo di picco piattaforma Acqua Alta**

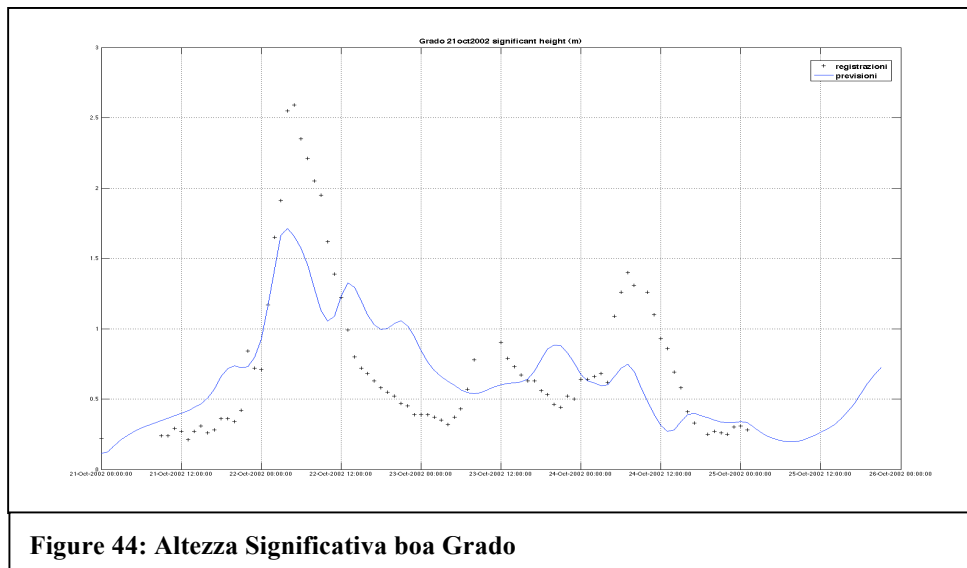
### 7.2.2 Mareggiata del 21 ottobre 2002

La piattaforma oceanografica Acqua Alta ha registrato per questa mareggiata una direzione prevalente di 240°N. La boa di Grado ha registrato per lo stesso evento una direzione media prevalente di provenienza di circa 180° N.

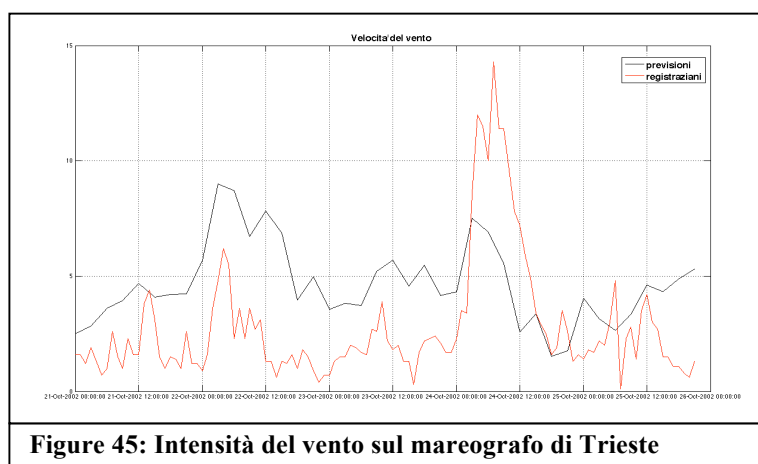




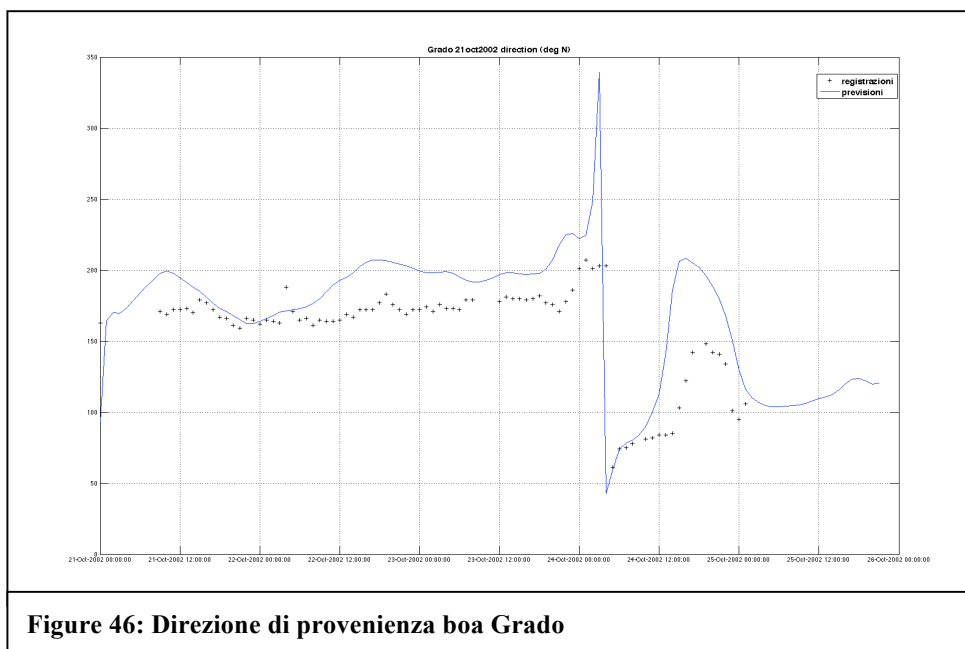
I risultati ottenuti da questa prima simulazione per l'altezza significativa si discostano dalle registrazioni sulla boa di Grado. Emerge inoltre una sottostima del picco della mareggiata di circa il 35%.



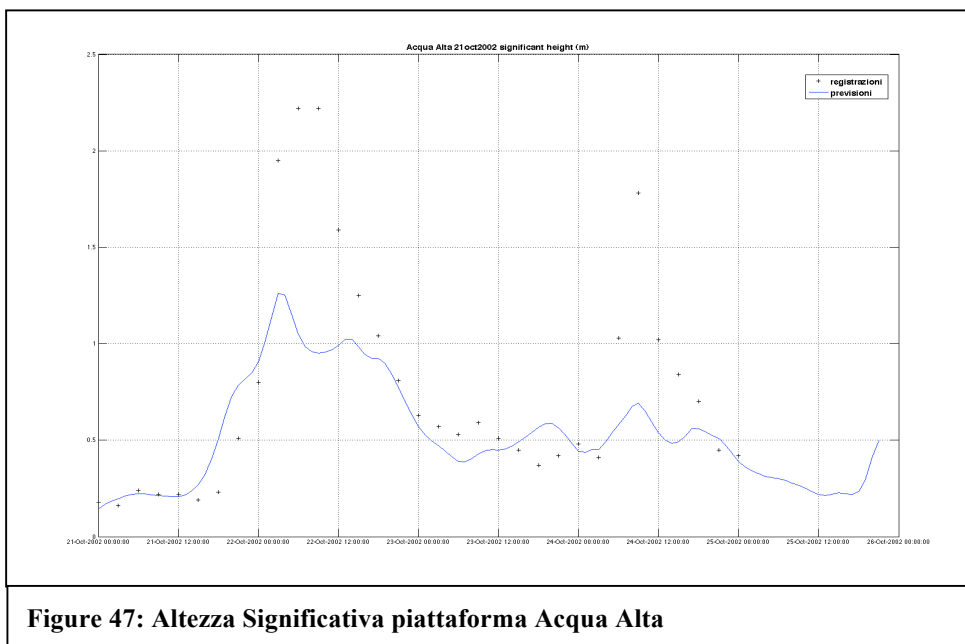
La causa di questo risultato potrebbe essere ricercata nelle previsioni del vento del SIMM implementate nel modello di calcolo. Il mareografo di riferimento è quello di Trieste. Osservando la fig.45 è evidente che la sottostima dell'altezza d'onda intorno al 24 ottobre alle ore 08:00 è da imputare alla sottostima del vento rispetto alle registrazioni. Al contrario, intorno al primo picco della mareggiata, il 22 ottobre tra le ore 02:00 e le ore 12:00 il vento previsto risulta sovrastimare le registrazioni del mareografo di Trieste. Visto l'andamento dell'altezza d'onda registrato ci si aspetterebbe un vento molto intenso proprio in questo periodo, al contrario di quanto risulta dal mareografo. Inoltre questa stazione di misura si trova circa a 40 Km di distanza dall'ondametro di Grado, quindi è lecito pensare che in realtà il vento previsto dal SIMM in questo intervallo temporale in corrispondenza della boa di Grado sottostimi il vento che realmente ha interessato questa area.



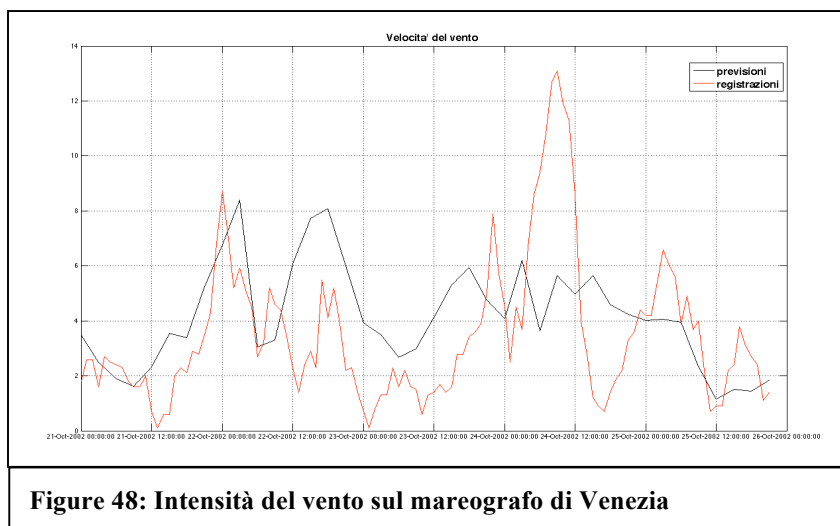
L'andamento della direzione di propagazione stimata dal modello segue abbastanza bene l'andamento delle registrazioni.



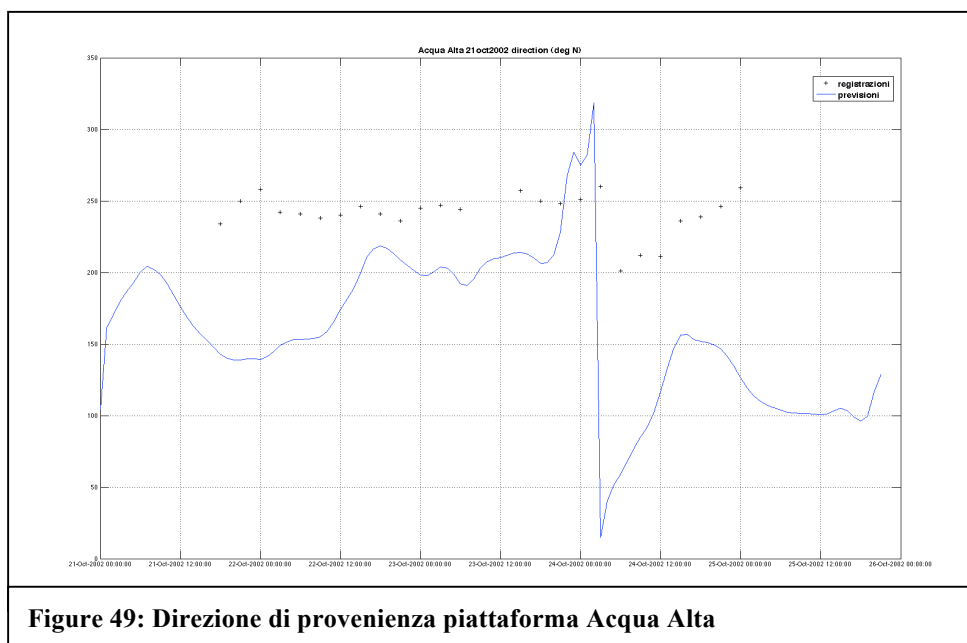
Sulla piattaforma Acqua Alta le previsioni sottostimano le registrazioni proprio in corrispondenza dei due picchi della mareggiata, ovvero il 22 ottobre alle ore 06:00 ed il 24 ottobre alle ore 09:00. Questo risultato è dovuto alle analisi del vento del SIMM.



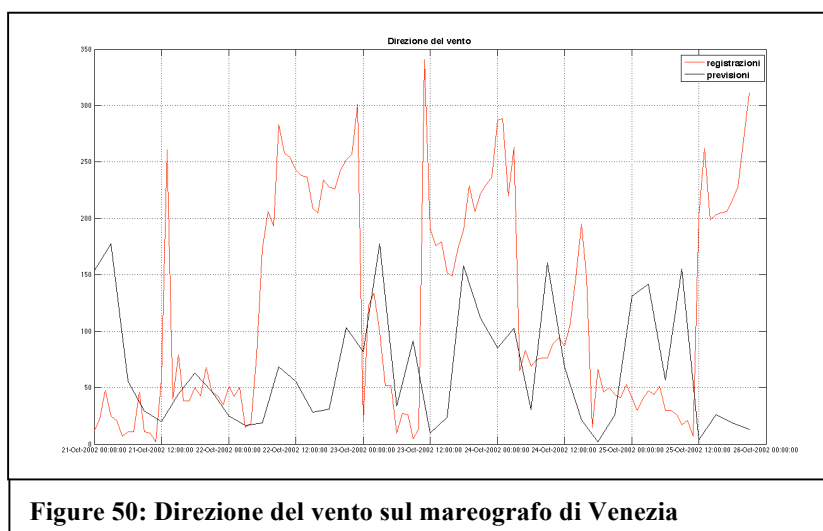
Infatti, dalla fig.48 si osserva una sottostima dell'intensità del vento previsto rispetto a quello registrato dal mareografo di Venezia intorno al 24 ottobre alle ore 09:00, stesso periodo in cui è stata riscontrata la sottostima dell'altezza d'onda prevista dal modello rispetto alle registrazioni dell'ondametro.



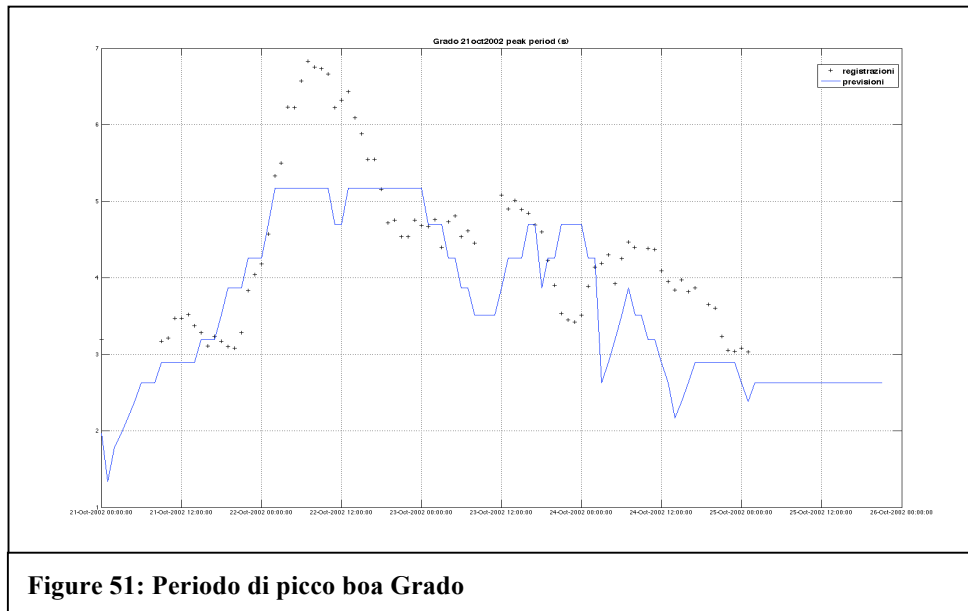
Per quanto riguarda la sottostima dell'altezza d'onda prevista intorno al 22 ottobre alle ore 06:00 la ragione è da ricercare nell'errata previsione della direzione del vento. Di seguito si riporta l'andamento della direzione di provenienza del moto ondoso previsto da SWAN a confronto con le registrazioni della piattaforma Acqua Alta.



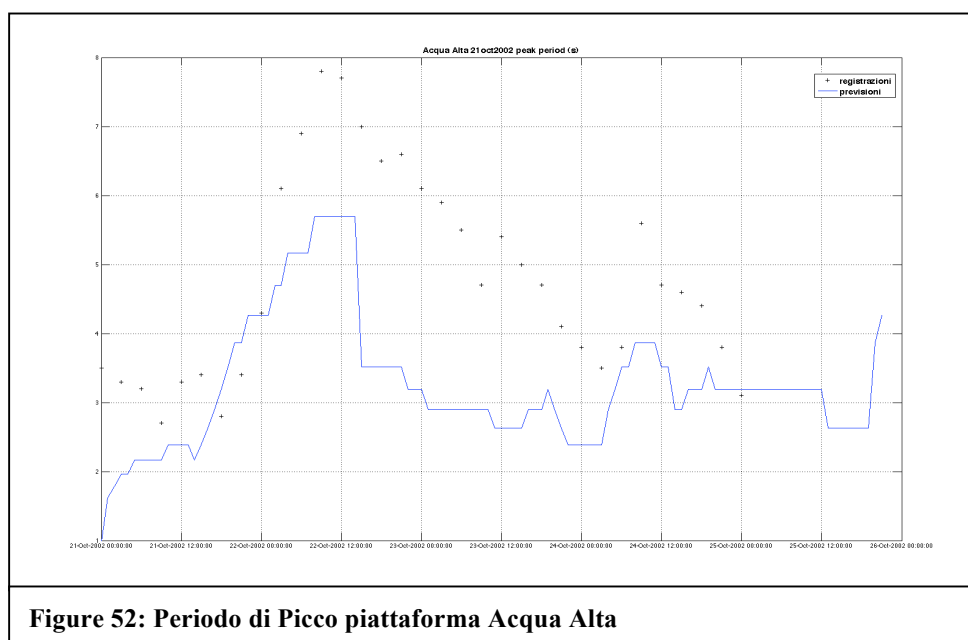
I risultati della simulazione indicano una direzione di provenienza media diversa dalle registrazioni della piattaforma Acqua Alta per l'intera durata della mareggiata da imputare all'errata previsione del vento del SIMM.



Il periodo di picco previsto sulla boa di Grado, essendo funzione delle caratteristiche geometriche del moto, è contraddistinto da una sottostima in corrispondenza del picco della mareggiata (24 ottobre 2002 ore 08:00), come osservato per l'altezza d'onda significativa.

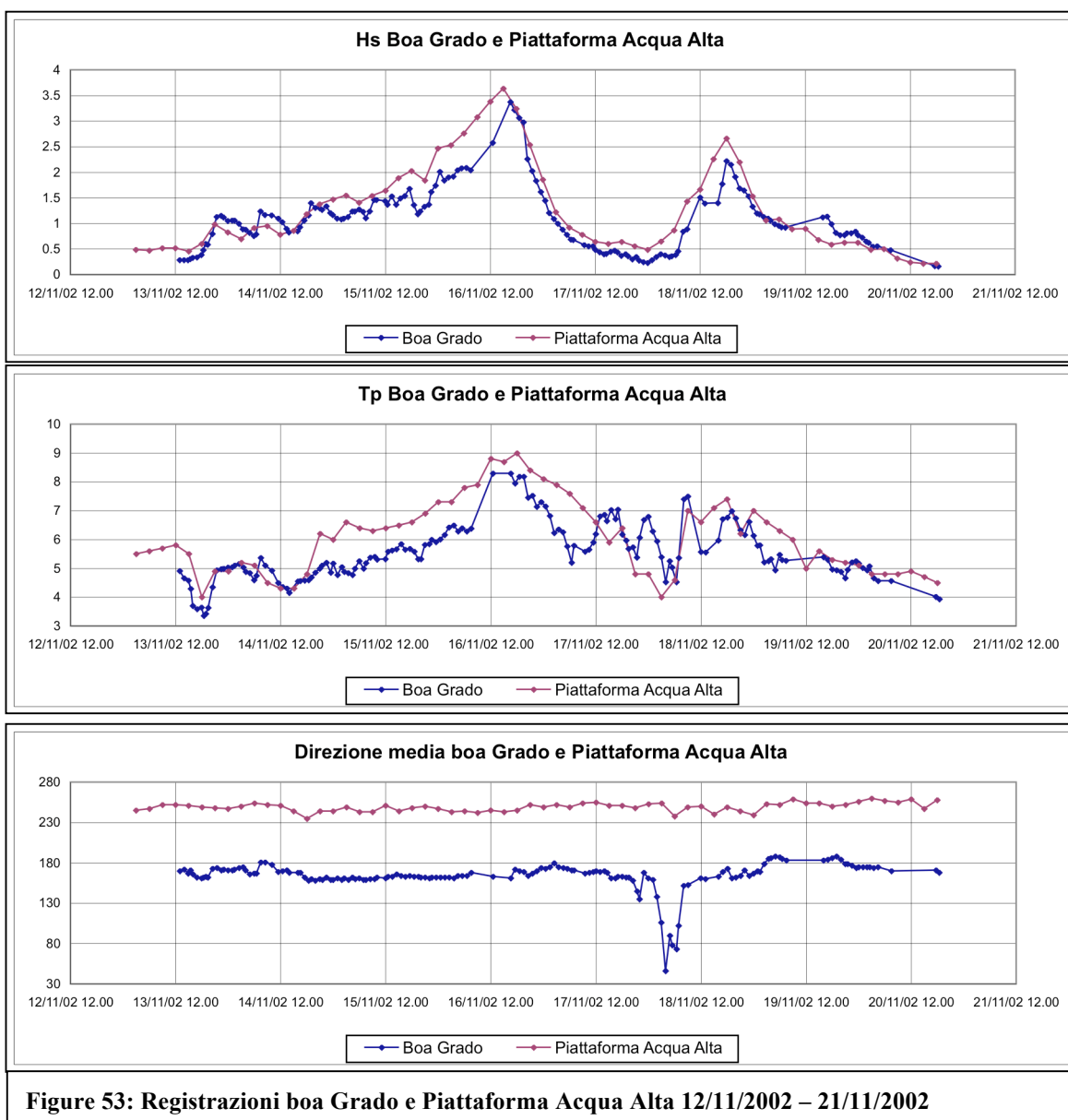


Per la stazione Acqua Alta sono state ottenute notevoli discrepanze tra i valori previsti e quelli misurati per l'altezza d'onda e la direzione di provenienza, a causa dell'errata previsione del vento del SIMM. Una situazione analoga si ottiene anche per il periodo di picco.



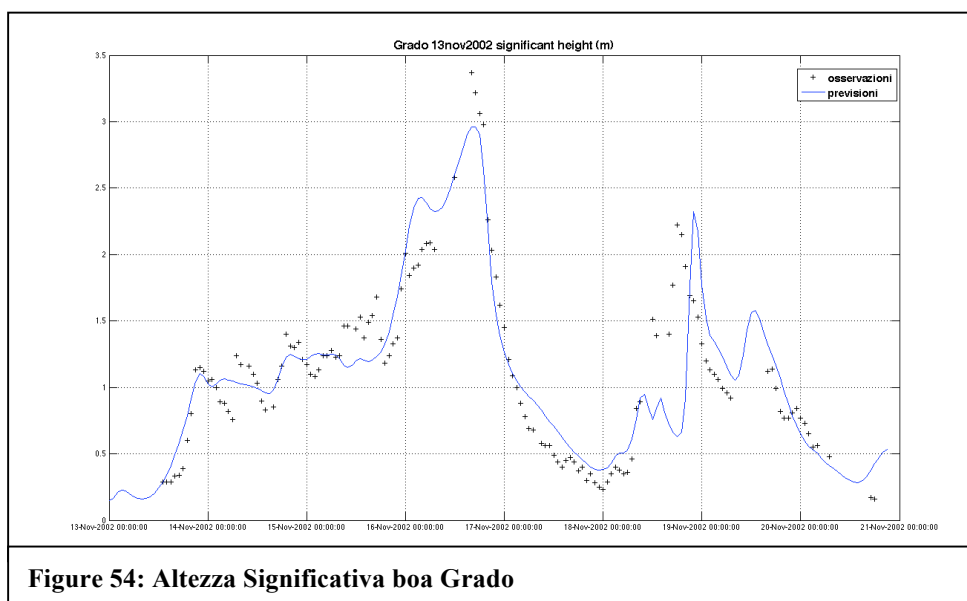
### 7.2.3 Mareggiata del 13 novembre 2002

Per il periodo compreso tra il 13 ed il 20 novembre 2002 la piattaforma oceanografica Acqua Alta ha registrato una direzione prevalente di provenienza di circa 240°N. La massima altezza d'onda osservata dalla stazione di misura è stata di 3,64m il 16 novembre 2002 alle ore 15:00. A Grado la mareggiata giunge da S-SE; il massimo valore dell'altezza d'onda osservato dall'ondametro è 3,37m il 16 novembre 2002 alle ore 16:00.

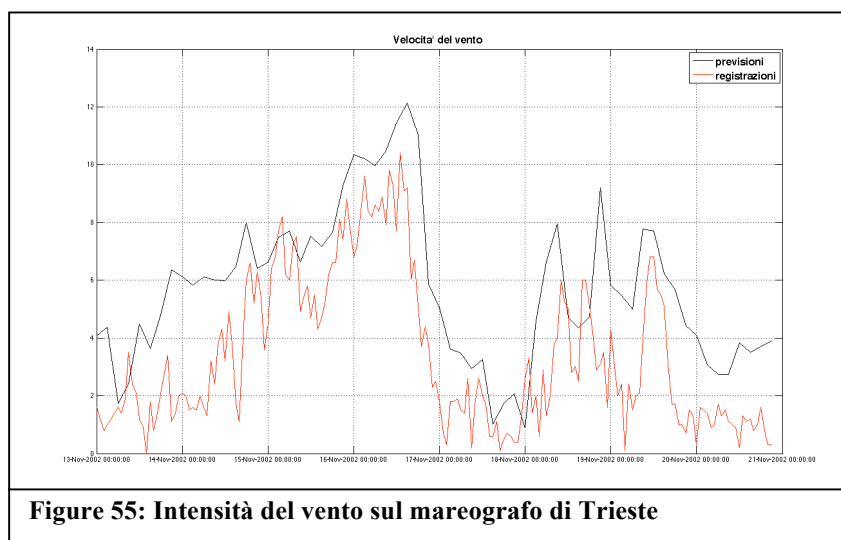


Dai risultati della simulazione numerica effettuata con il codice di calcolo SWAN sulla prima griglia di calcolo, che ha per dominio l'intero bacino del Mar Adriatico (risoluzione  $1/30^\circ$ ), il picco della mareggiata in corrispondenza della piattaforma oceanografica Acqua Alta risulta essere avvenuto il 16 novembre 2002 alle ore 15:00 in accordo con le osservazioni. La direzione di propagazione risultante dalla simulazione è di circa  $150^\circ\text{N}$ , differendo notevolmente dalle registrazioni dalle quali la mareggiata risultava giungere da W-SW. Per l'ondametro di Grado si riscontra invece una buona corrispondenza tra la direzione stimata e quella prevista; il picco previsto della mareggiata risulta essere sfasato di due ore rispetto a quello osservato.

L'andamento dell'altezza d'onda significativa ottenuto dalla simulazione è messo a confronto con le registrazioni ondametriche della boa di Grado.

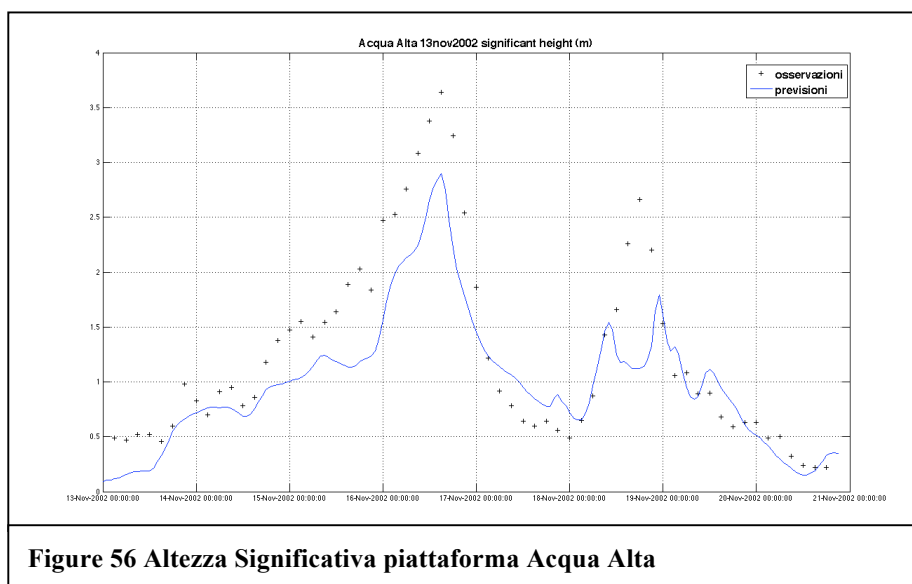


L'andamento della mareggiata ricostruito dal codice di calcolo SWAN è fortemente correlato alle registrazioni. Il picco della mareggiata è sottostimato di circa il 12%. Dal confronto dell'intensità del vento prevista dal SIMM con le registrazioni del mareografo di Trieste questa sottostima non risulta essere legata a problematiche relative alla componente anemologica implementata nel modello di calcolo. Tuttavia è da notare che il confronto è stato effettuato in corrispondenza della stazione mareografica di Trieste che si trova a circa 40 Km di distanza dall'ondametro di Grado, dunque il vento previsto dal SIMM e quello reale nella zona pertinente alla boa di Grado potrebbero essere diversi, anche se in misura modesta, rispetto al vento registrato dal mareografo di Trieste.

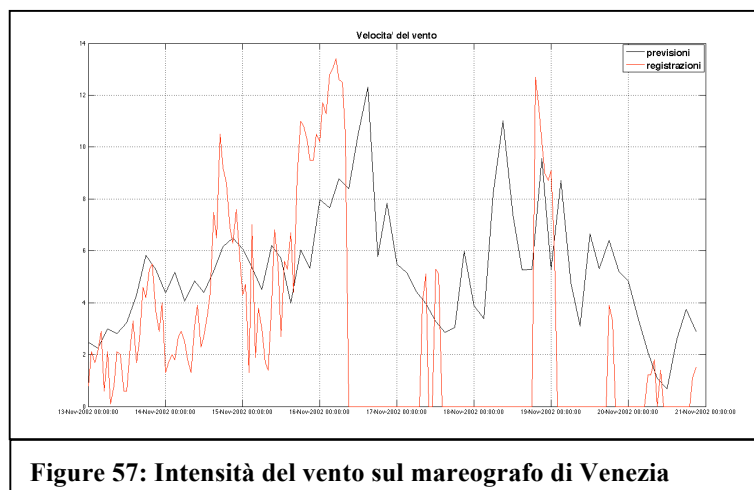




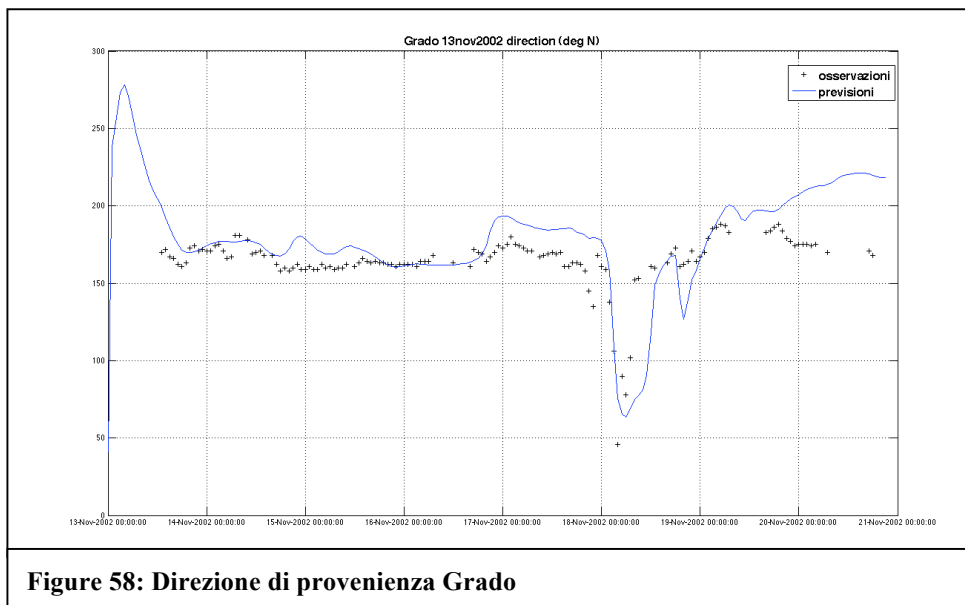
Nella fase crescente della mareggiata, sulla piattaforma Acqua Alta, le previsioni sottostimano l'altezza d'onda osservata dalla stazione di misura di circa il 20%.



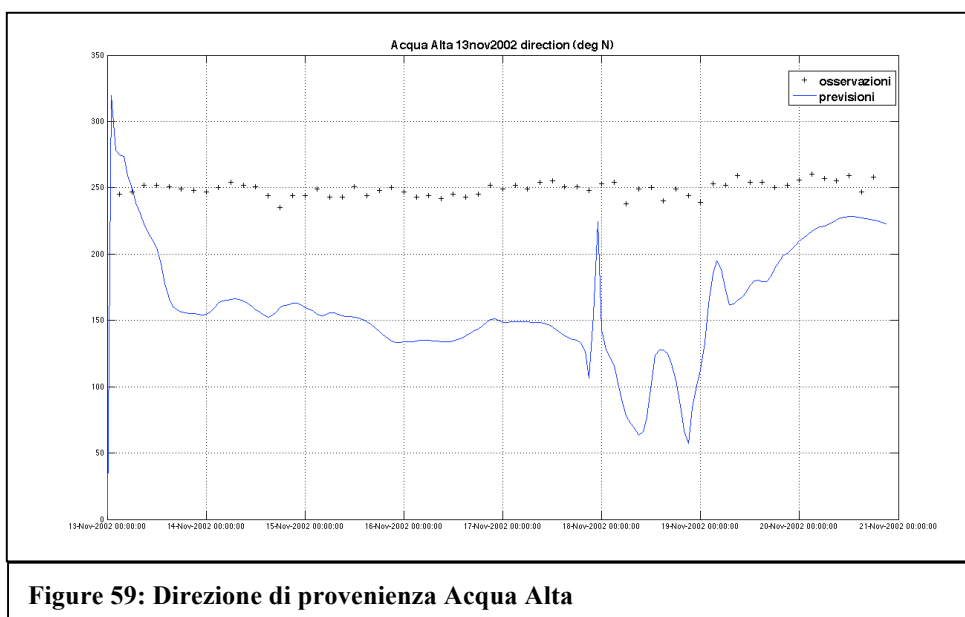
Tra il 18 /11/2002 alle ore 18:00 ed il 19/11/2002 le registrazioni mostrano un secondo picco della mareggiata che al contrario non risulta dalle previsioni ottenute con il codice di calcolo SWAN. Questo risultato è da imputare a problematiche relative al vento previsto dal SIMM. Nel seguente grafico è riportato il confronto tra il vento registrato dal mareografo di Venezia ed il vento previsto in corrispondenza di questa stazione di misura. Purtroppo si nota che proprio nei periodi in cui ci interessa conoscere con esattezza l'andamento dell'intensità del vento registrato dal mareografo lo strumento di misura non ha funzionato. È evidente tuttavia che nell'intervallo precedente all'istante in cui si è verificato il picco della mareggiata, finché lo strumento ha registrato, le previsioni del vento risultano sottostimare i valori osservati, in analogia a quanto ottenuto per l'andamento dell'altezza d'onda.



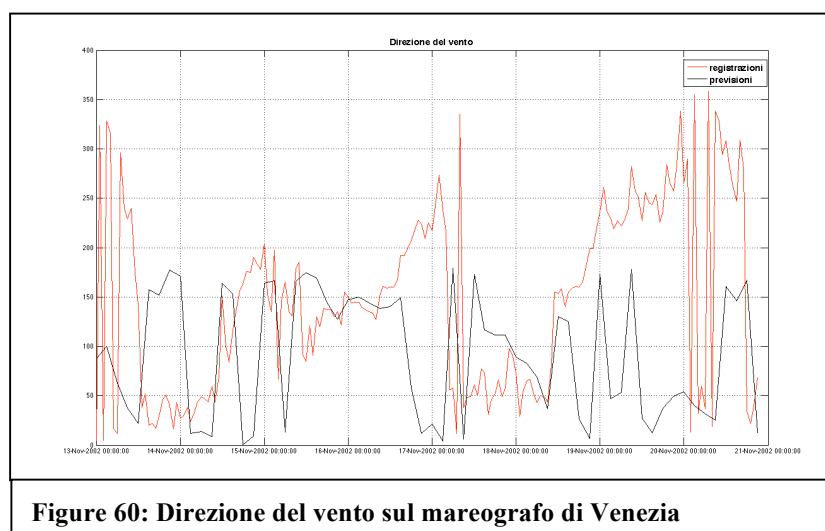
La direzione di propagazione stimata dal modello segue perfettamente le registrazioni dell'ondametro di Grado. Si riscontrano degli scostamenti di lieve entità (circa  $15^\circ$ ) tra il 17/11/2002 e il 18/11/2002 alle ore 12:00 e più rilevanti (circa  $50^\circ$ ) dopo il 19/11/2002 alle ore 18:00.



Al contrario la direzione di propagazione prevista dallo SWAN risulta essere completamente diversa da quella osservata dalla piattaforma oceanografica Acqua Alta.

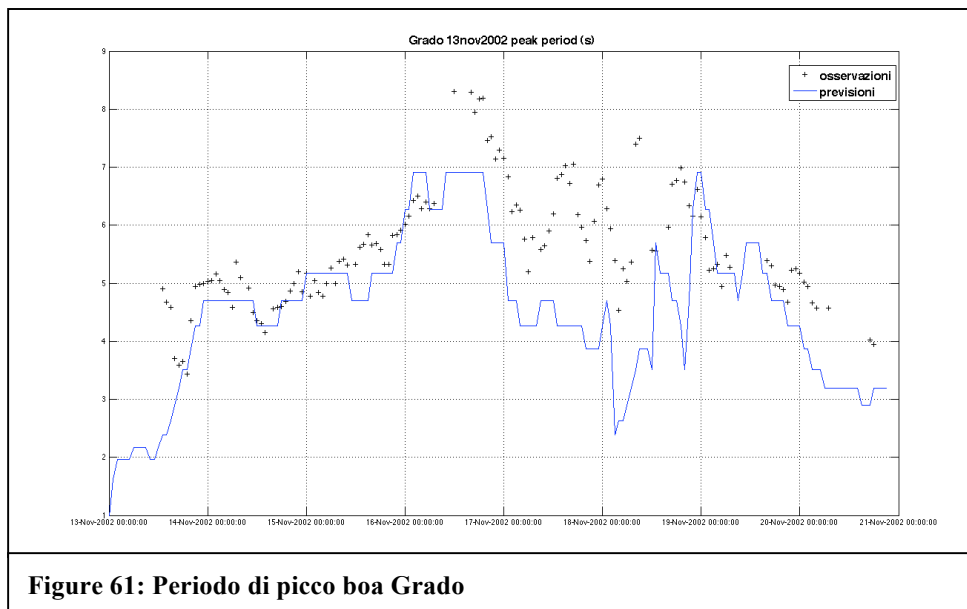


Per comprendere le motivazioni che hanno portato ad un risultato di questo tipo, è riportato di seguito l'andamento della direzione di provenienza del vento registrato dal mareografo di Venezia a confronto con le previsioni del SIMM. Quello che si osserva è una direzione osservata del vento molto simile a quella prevista intorno al picco della mareggiata (tra il 15/11/2002 ed il 16/11/2002 alle ore 15:00) e soprattutto compatibile con la direzione di provenienza del moto ondoso stimata dal modello. Inoltre l'andamento dell'altezza d'onda stimato dal codice di calcolo segue bene quello registrato dalla piattaforma oceanografica. Dunque, è lecito pensare che questa mareggiata fosse effettivamente una mareggiata di scirocco e che lo strumento di misura della direzione ondometrica della piattaforma oceanografica Acqua Alta non abbia funzionato correttamente.

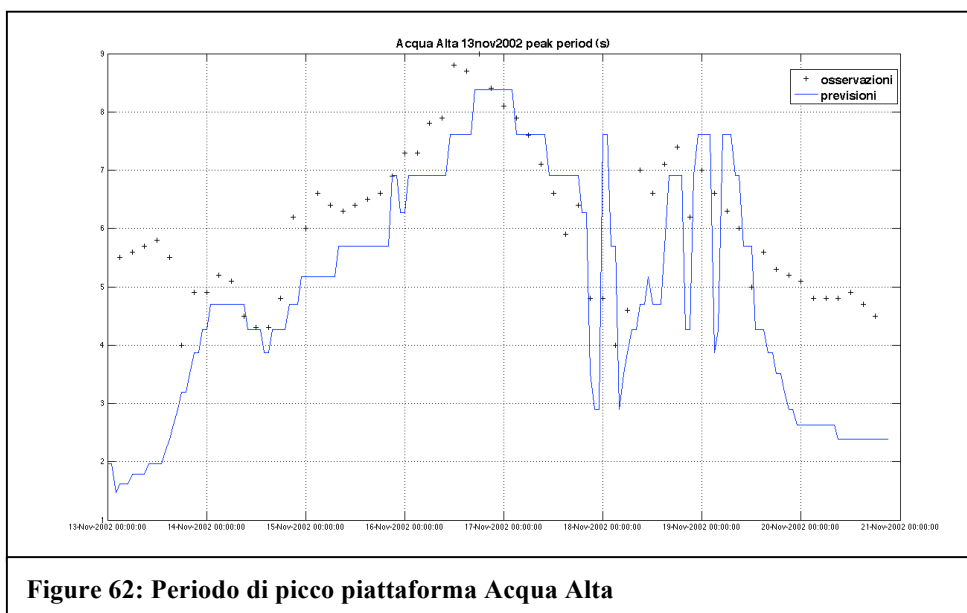


**Figure 60: Direzione del vento sul mareografo di Venezia**

I valori del periodo di picco stimati da SWAN sulla boa di Grado e sulla piattaforma Acqua Alta sono molto simili ai dati osservati dallo strumento di misura. Per l'ondametro di Grado, il periodo di picco previsto è sottostimato rispetto alle registrazioni negli stessi periodi in cui sono state rilevate delle differenze tra i valori previsti e quelli registrati della direzione di provenienza del moto ondoso.



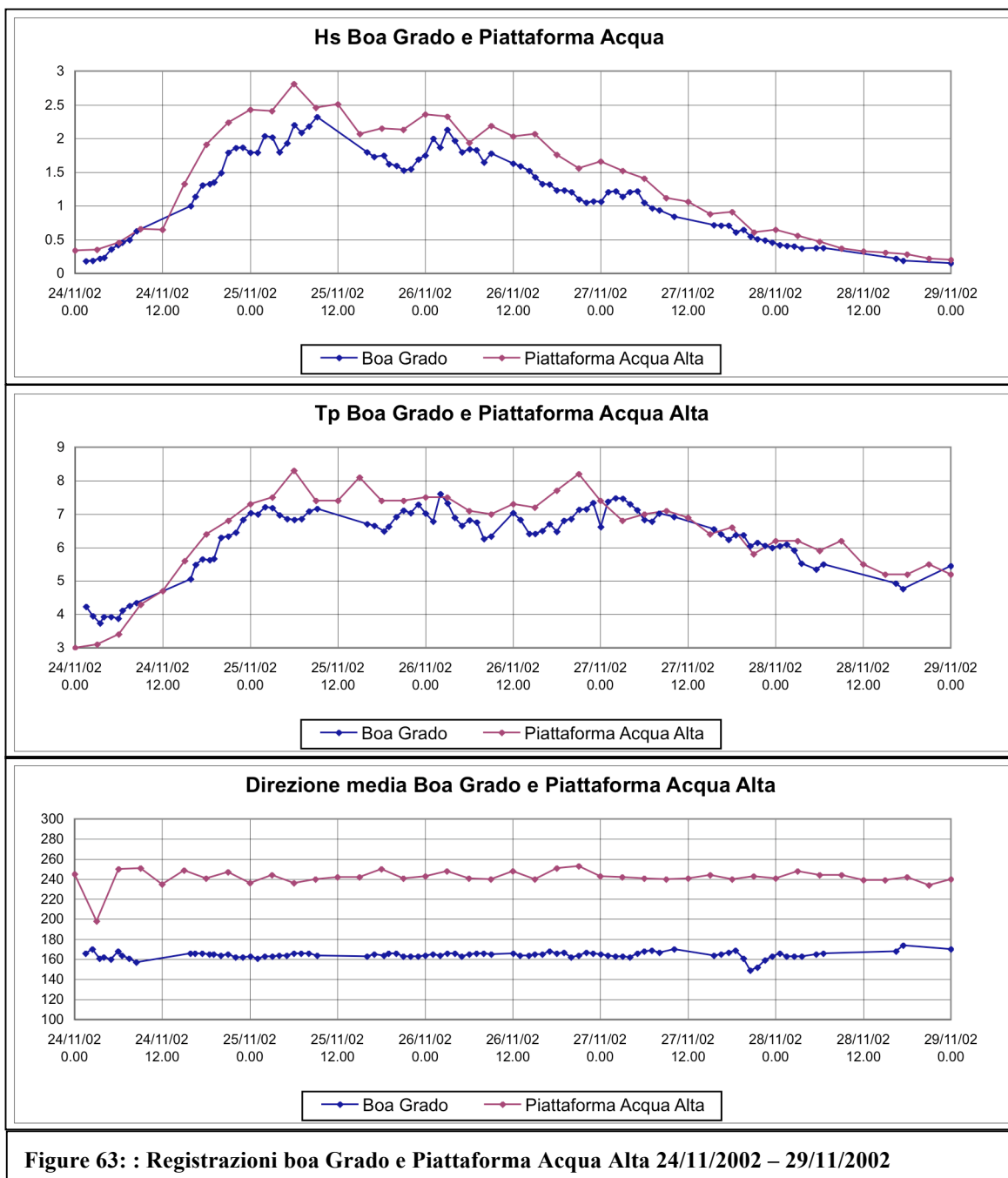
**Figure 61: Periodo di picco boa Grado**



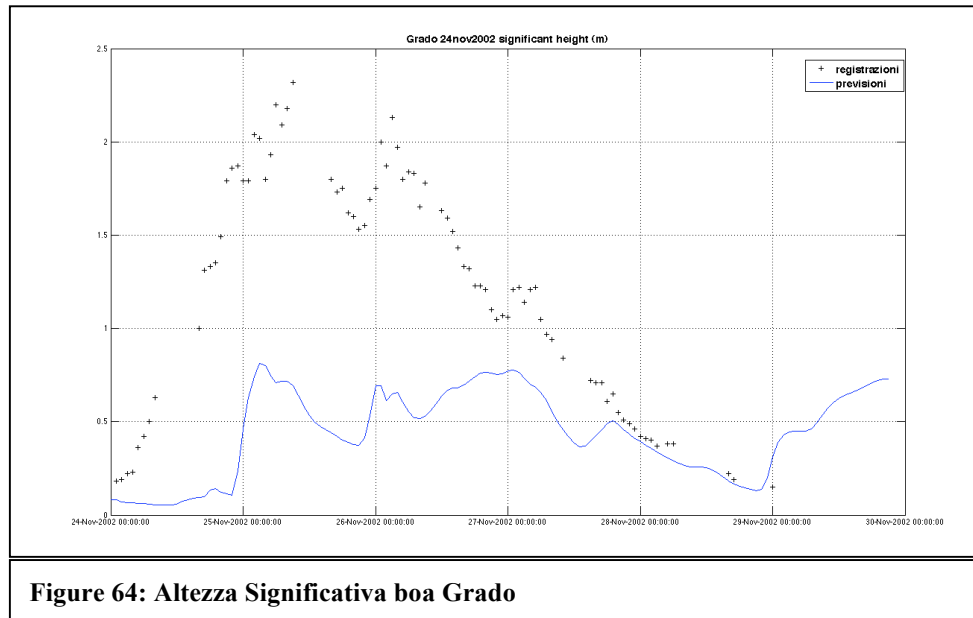
**Figure 62: Periodo di picco piattaforma Acqua Alta**

### 7.2.4 Mareggiata del 24 novembre 2002

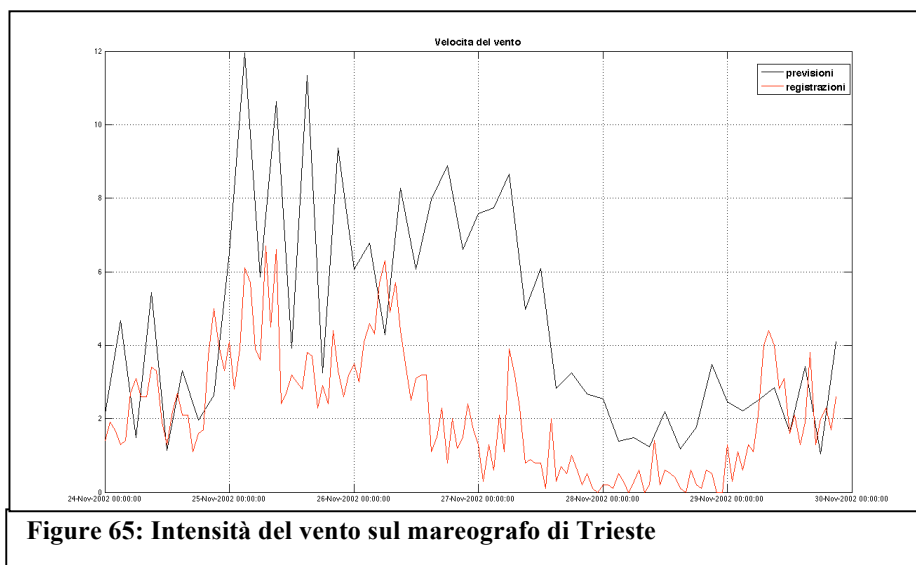
Dalle registrazioni ondametriche della boa di Grado la direzione media di provenienza è circa 170° N. La direzione media osservata dalla piattaforma Acqua Alta proviene dal settore di W-SW. Le altezze d'onda massime, registrate dai due strumenti di misura, sono di 2,81 m per la piattaforma Acqua Alta e di 2,32 m per la boa di Grado.



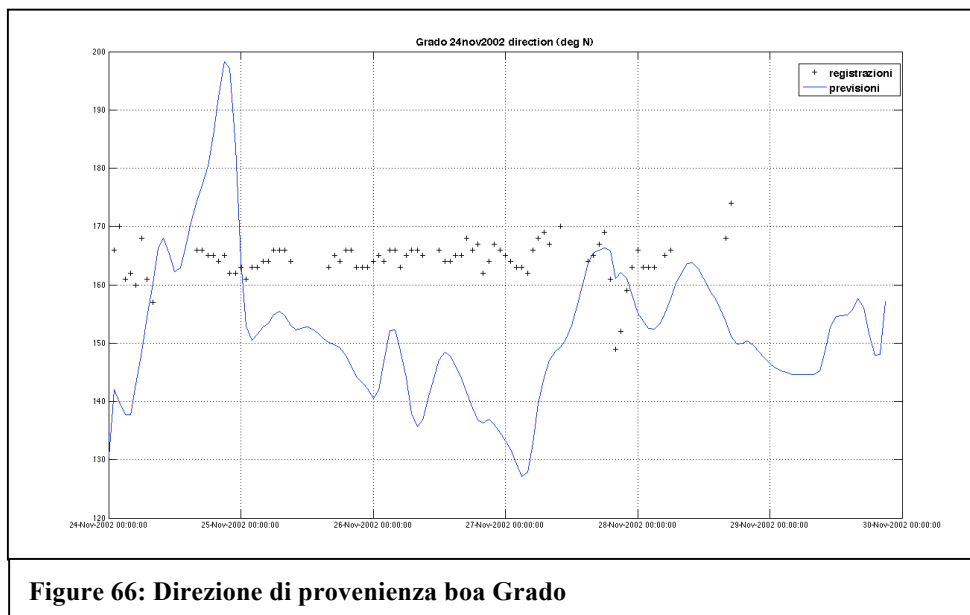
È riportato l'andamento dell'altezza d'onda significativa registrato dalla boa di Grado a confronto con i risultati della simulazione numerica sulla prima griglia di calcolo (risoluzione 1/30°).



Da questa prima girata del modello si è ottenuta un'elevata sottostima rispetto alle osservazioni (circa del 65%) dovuta ad una importante sottostima del vento previsto dal SIMM. In fig.65, dal confronto tra le registrazioni del mareografo di Trieste e l'intensità del vento prevista dal SIMM si osserva, infatti, una sottostima dell'ordine del 45%.

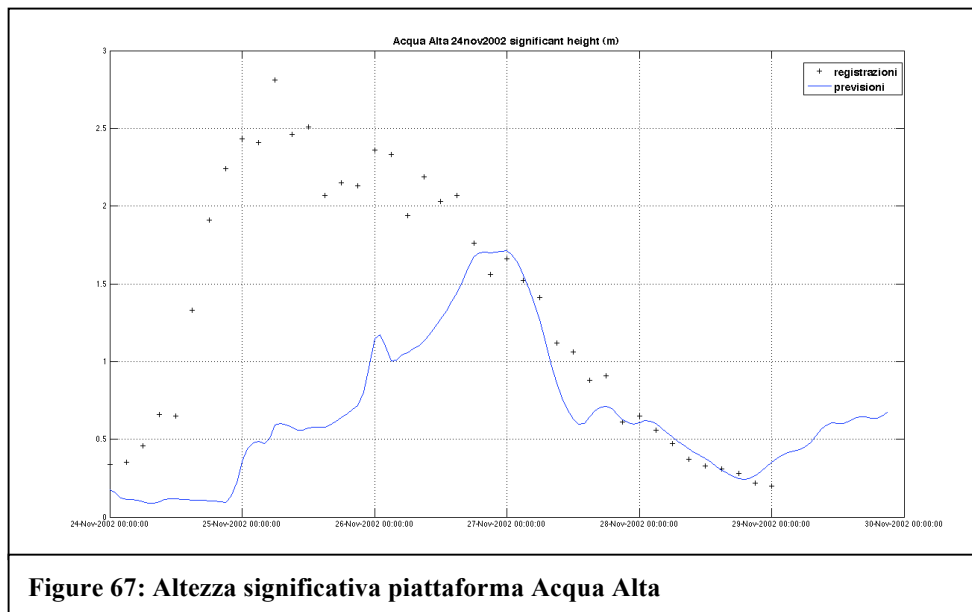


Nella figura seguente si osserva che, mentre la direzione di provenienza registrata dall'ondametro di Grado è fortemente incentrata intorno a 165° N, quella stimata dal modello è molto più variabile. Intorno al picco della mareggiata la direzione di provenienza prevista è di circa 145° N scostandosi dalle registrazioni per le quali la direzione è di circa 20°N. Il settore di provenienza è comunque quello di S-E.

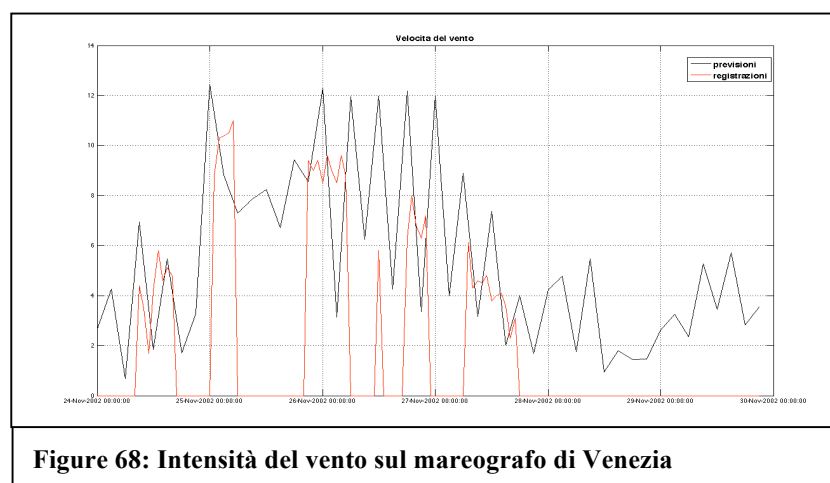


**Figure 66: Direzione di provenienza boa Grado**

I risultati ottenuti sulla piattaforma Acqua Alta evidenziano uno sfasamento del picco della mareggiata di circa un giorno. Infatti, il picco della mareggiata stimato dal codice di calcolo SWAN, in corrispondenza della stazione di misura, risulta essere avvenuto il 27 novembre 2002 alle ore 01:00, mentre secondo le registrazioni è avvenuto il 26 novembre 2002 alle ore 00:00. Le previsioni inoltre sottostimano l'altezza d'onda osservata dalla stazione di misura di circa il 35%.

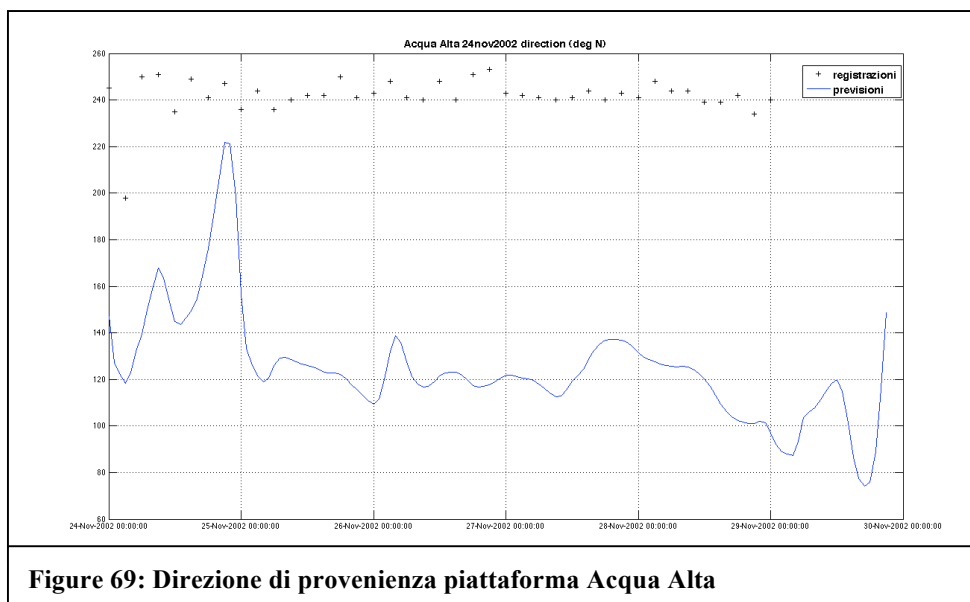


Nel grafico in fig.68 è riportato il confronto tra il vento registrato dal mareografo di Venezia ed il vento previsto in corrispondenza di questa stazione di misura. Purtroppo si nota che lo strumento di misura non ha funzionato bene mostrando numerosi periodi di assenza di misurazioni, dunque il confronto non è molto significativo.

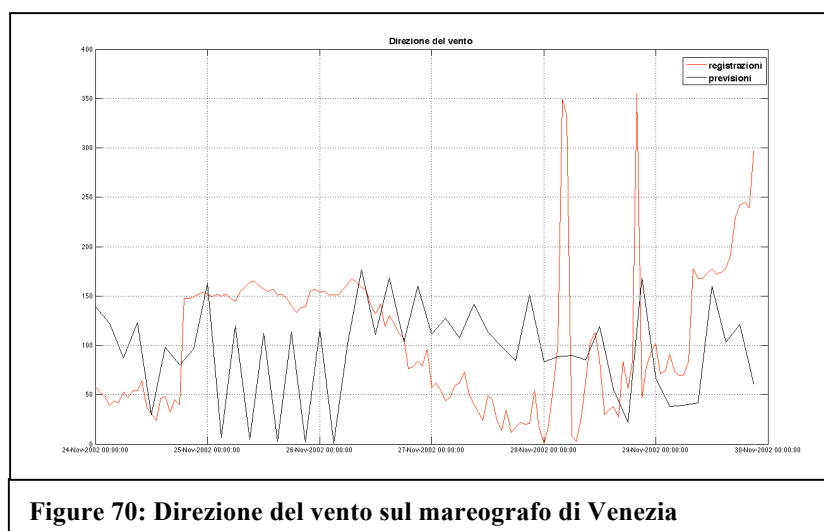




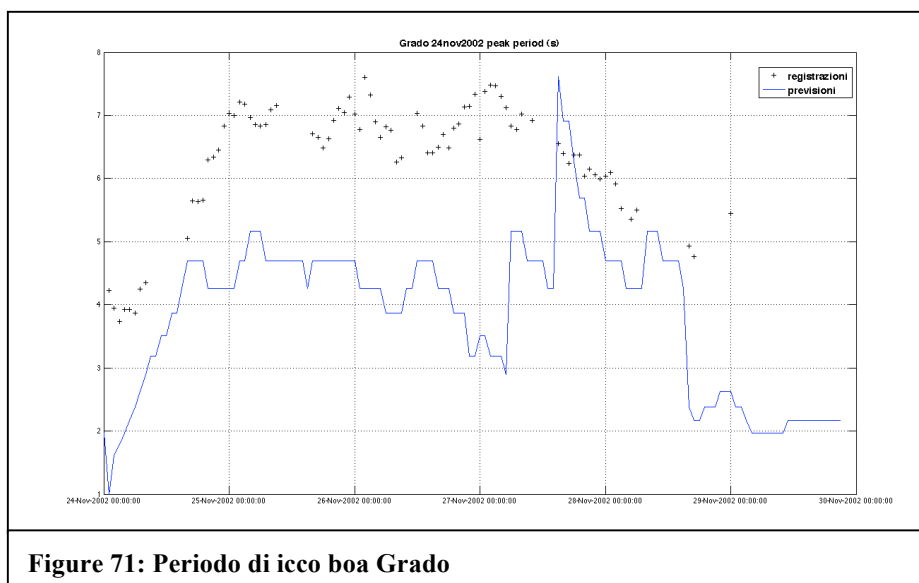
La direzione di propagazione del moto ondoso risultante dalla simulazione numerica (circa 120° N) non corrisponde a quella registrata dalla piattaforma Acqua Alta. Dalle previsioni del codice di calcolo, la mareggiata avvenuta tra il 24 ed il 29 novembre 2002 e che ha interessato il Golfo di Trieste e quello di Venezia risulta essere una mareggiata di Scirocco.



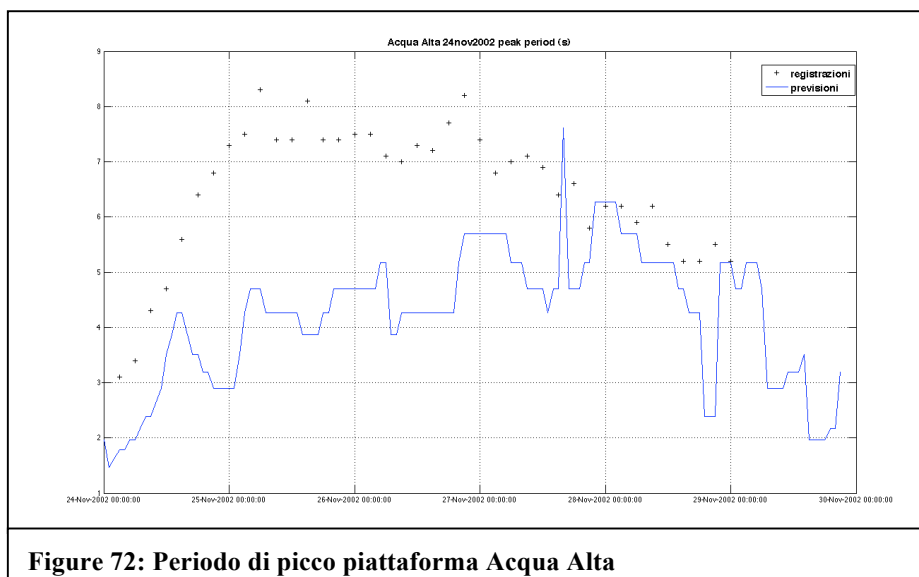
Anche il vento registrato dal mareografo di Venezia e quello previsto dal SIMM hanno una direzione media di provenienza appartenente al settore di S-E in accordo con la direzione del moto ondoso prevista dal codice di calcolo.



I valori del periodo di picco stimati da SWAN sulla boa di Grado e sulla piattaforma Acqua Alta sottostimano i dati osservati dallo strumento di misura negli stessi periodi in cui è stata osservata la sottostima tra i valori previsti e quelli registrati dell'altezza d'onda, come era lecito aspettarsi.



**Figure 71: Periodo di picco boa Grado**



**Figure 72: Periodo di picco piattaforma Acqua Alta**

### 7.2.5 Mareggiata del 04 ottobre 2003

Secondo le registrazioni ondametriche della piattaforma oceanografica Acqua Alta questa mareggiata è caratterizzata da una direzione prevalente di 30° N. Sulla boa di Grado è stato osservata una direzione prevalente di provenienza di 200° N.

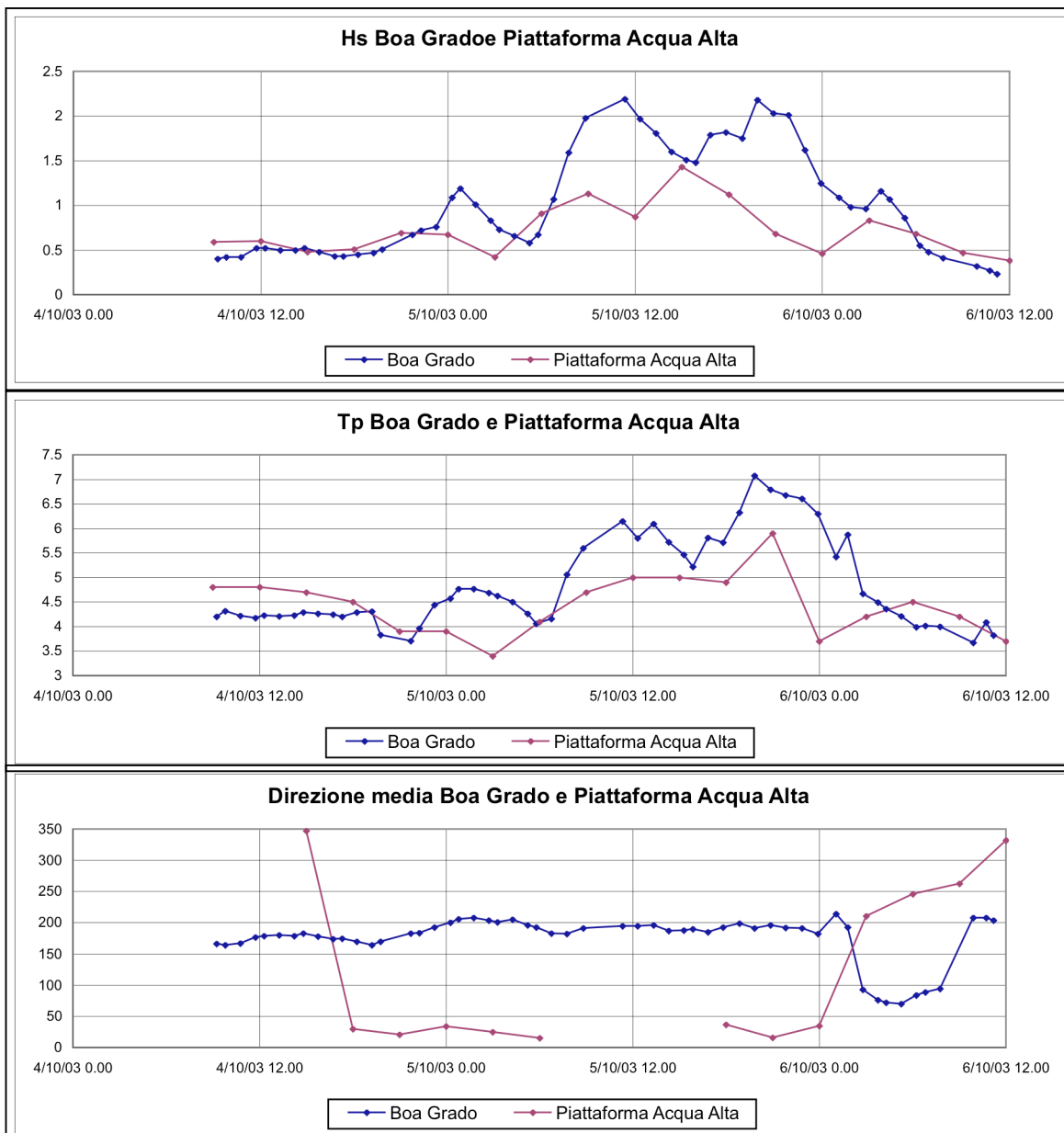
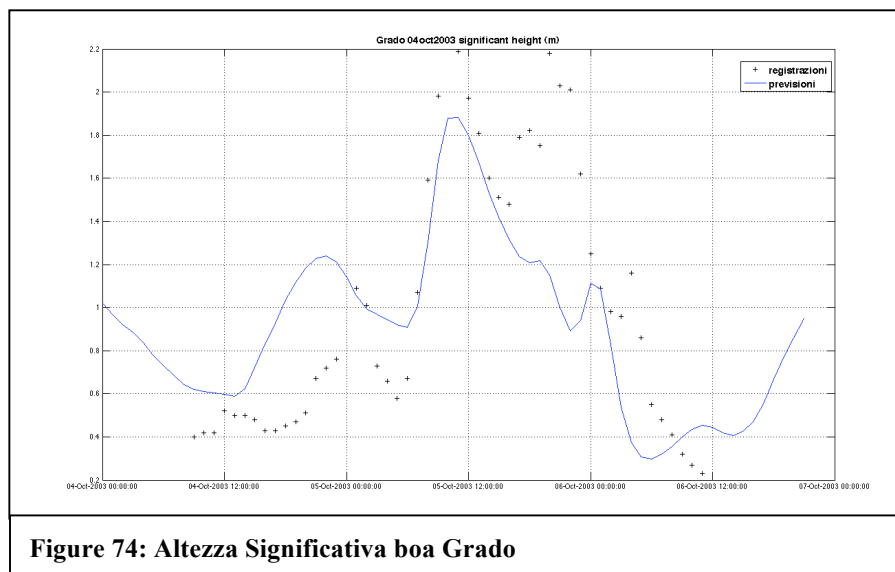
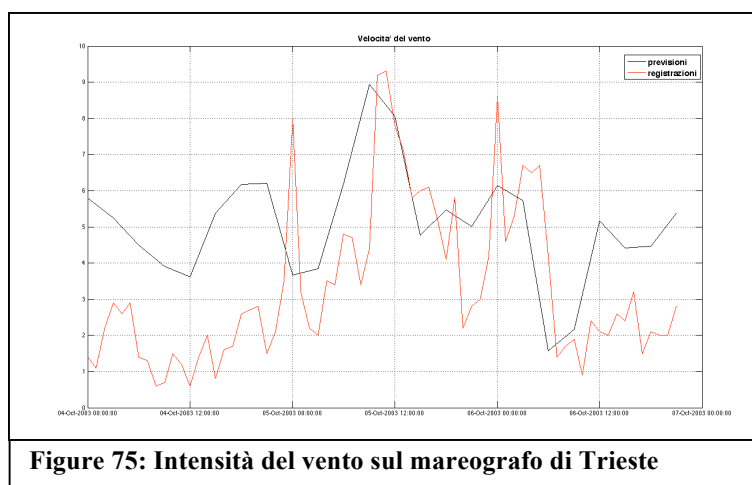


Figure 73: : Registrazioni boa Grado e Piattaforma Acqua Alta 4/10/2003 – 6/10/2003

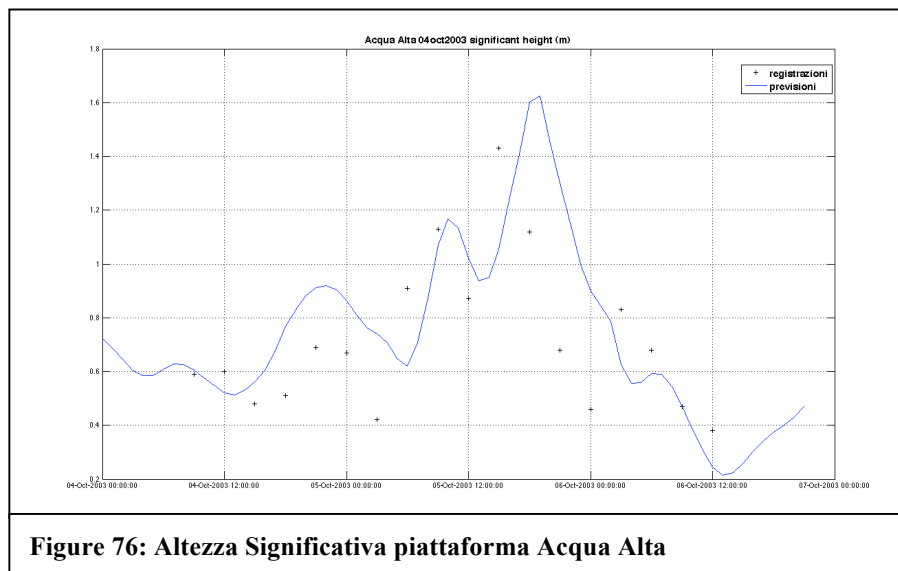
L'andamento della mareggiata ricostruito dal codice di calcolo SWAN sulla boa di Grado non è molto correlato alle registrazioni.



Il picco della mareggiata è sottostimato di circa il 12%. Per un'analisi più approfondita è stata confrontata l'intensità del vento prevista dal SIMM con le registrazioni del mareografo di Trieste (fig.75). Si osserva che non vi è corrispondenza tra le misurazioni e le previsioni del vento, in particolare nella parte iniziale e finale della mareggiata. In corrispondenza del picco (05 ottobre 2003 alle ore 11:00), la sottostima del vento rispetto alle registrazioni è di circa il 10%. Inoltre l'andamento dell'altezza d'onda previsto dal modello numerico è del tutto analogo all'andamento del vento previsto dal SIMM. È quindi a causa della non corretta previsione del vento del SIMM che le previsioni ondametrichhe si discostano dalle registrazioni.

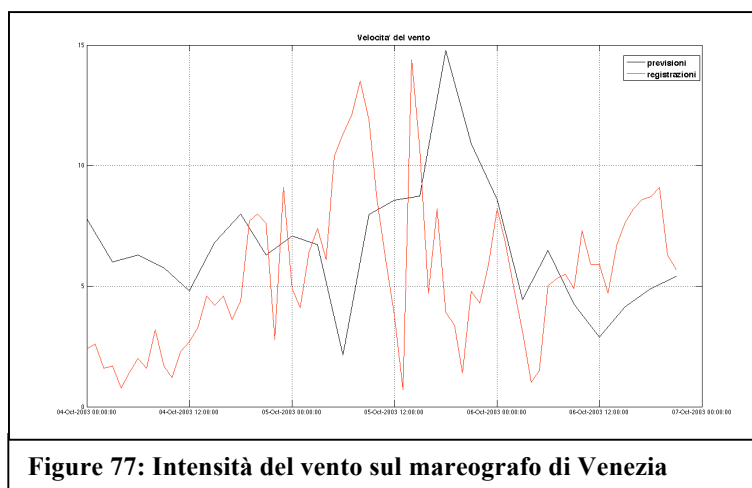


Sulla piattaforma Acqua Alta, lo sfasamento del picco della mareggiata di circa 5 ore tra le registrazioni e le previsioni. Inoltre la massima altezza d'onda prevista sovrastima le registrazioni di circa il 14%.



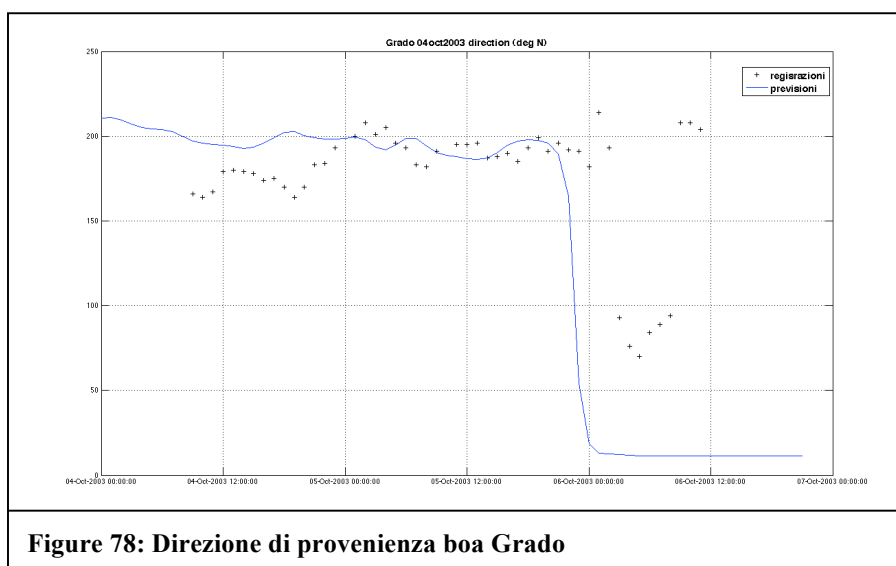
**Figure 76: Altezza Significativa piattaforma Acqua Alta**

Nel seguente grafico è riportato il confronto tra il vento registrato dal mareografo di Venezia ed il vento previsto in corrispondenza di questa stazione di misura. È evidente che lo sfasamento e la sovrastima del picco della mareggiata ottenuto dalla simulazione è del tutto corrispondente allo sfasamento e alla sovrastima del vento previsto rispetto alle registrazioni del mareografo.

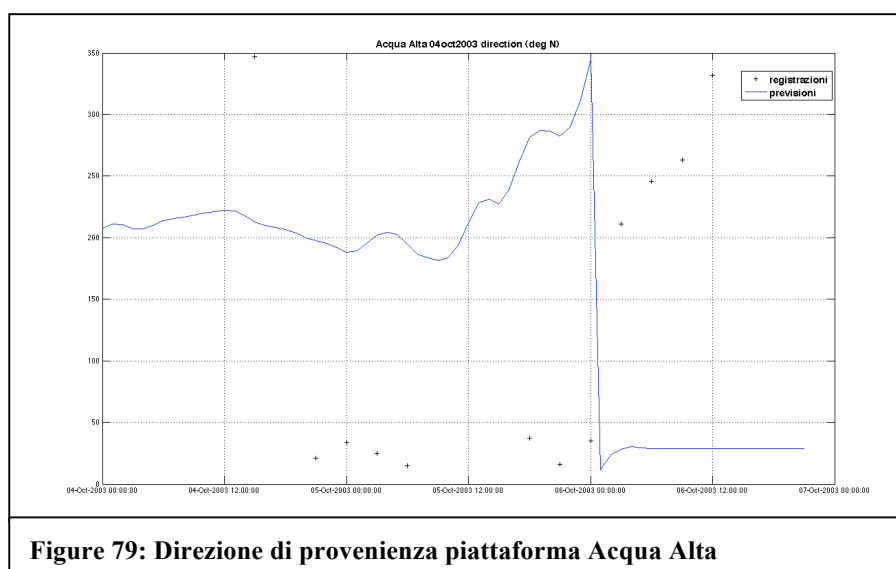


**Figure 77: Intensità del vento sul mareografo di Venezia**

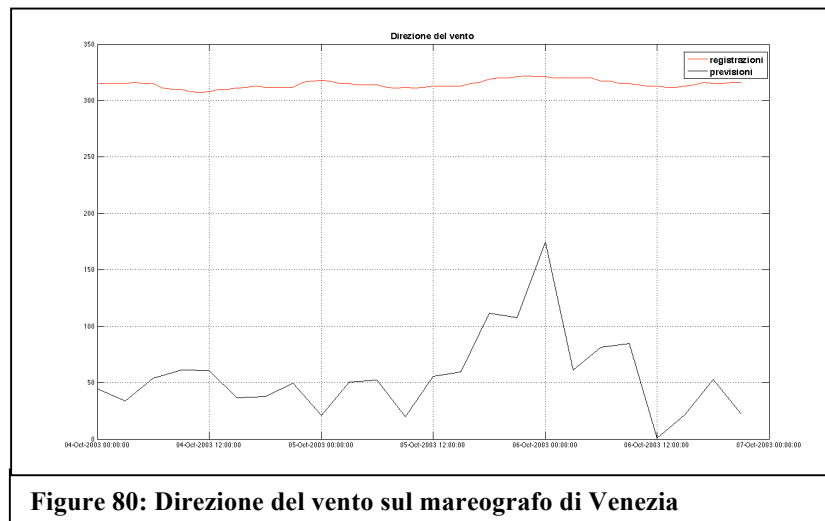
La direzione di propagazione stimata dal modello coincide con le registrazioni dell'ondametro di Grado per il periodo intorno al picco della mareggiata. Si riscontrano degli variazioni più rilevanti dopo il 05/10/2003 alle 22:00. Lo scostamento massimo si registra il 06/10/2003 alle 00:00 in cui dalle osservazioni risulta una direzione di provenienza di circa 180°N mentre dalle previsioni di circa 20°N.



La direzione di provenienza prevista sulla piattaforma Acqua Alta ha il seguente andamento: circa 200°N fino al 5/10/2003 alle 12:00 poi ruota fino a 350°N il 6/10/2003 alle 00:00 per poi tendere rapidamente a 30°N e mantenersi costante per il resto della simulazione. Diverso è l'andamento della direzione di provenienza osservata dalla piattaforma oceanografica Acqua Alta: fino al 6/10/2003 alle 00:00 è di circa 30°N. Per il restante periodo la direzione osservata ruota in senso orario da 200°N a 340°N.

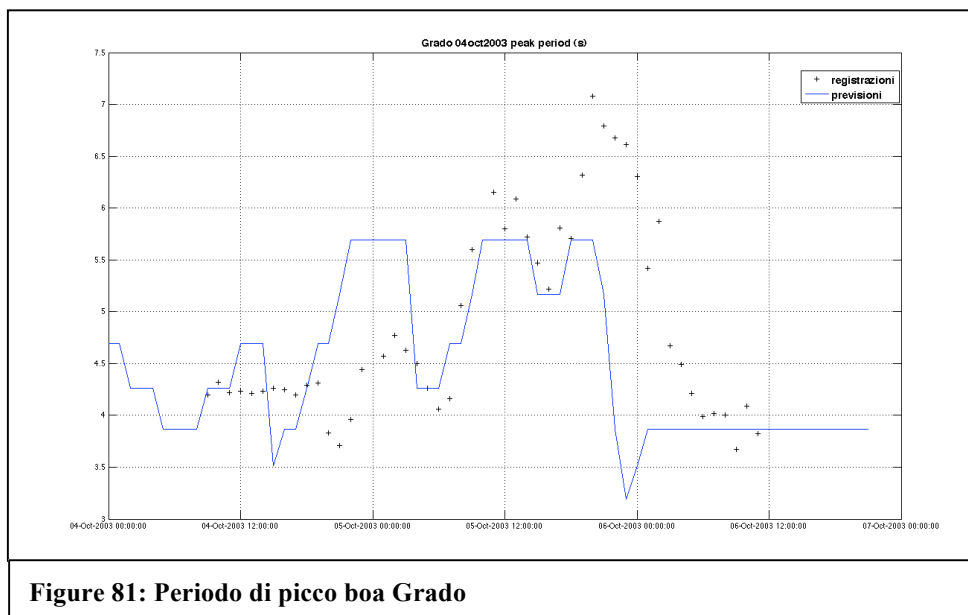


È dunque necessario confrontare l'andamento della direzione di provenienza del vento registrato dal mareografo di Venezia con le previsioni del SIMM. Il vento osservato è pressoché costante intorno a  $310^{\circ}\text{N}$ , mentre la direzione di provenienza registrata dalla piattaforma oceanografica è di circa  $30^{\circ}\text{N}$ . La direzione prevista del vento si discosta notevolmente dalle registrazioni: fino al 5/10/2003 alle 12:00 si mantiene intorno a  $50^{\circ}\text{N}$ , poi ruota in senso orario fino a  $170^{\circ}\text{N}$  il 6/10/2003 alle 00:00. Questa analisi mostra inoltre che non c'è una corrispondenza né tra le registrazioni della direzione del vento e delle onde, né tra le previsioni anemologiche ed ondametriches. Dunque non è possibile comprendere quale sia stata realmente la direzione di propagazione della mareggiata in esame e se gli strumenti di misura e i modelli previsionali della direzione del vento e delle onde abbiano funzionato correttamente.

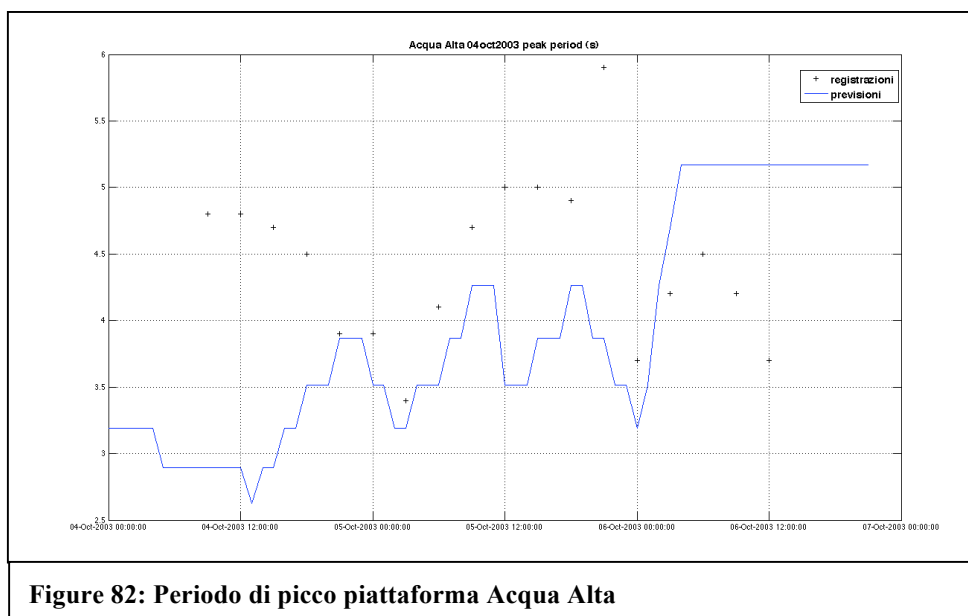


**Figure 80: Direzione del vento sul mareografo di Venezia**

I valori del periodo di picco stimati da SWAN sulla boa di Grado sono caratterizzati da scostamenti rispetto alle registrazioni del tutto simili alle differenze osservate in termini di altezza d'onda. Per la piattaforma Acqua Alta gli scostamenti tra i periodi di picco osservati e quelli previsti sono invece il risultato delle differenze tra i valori stimati e registrati sia dell'altezza d'onda che della direzione di provenienza.



**Figure 81: Periodo di picco boa Grado**



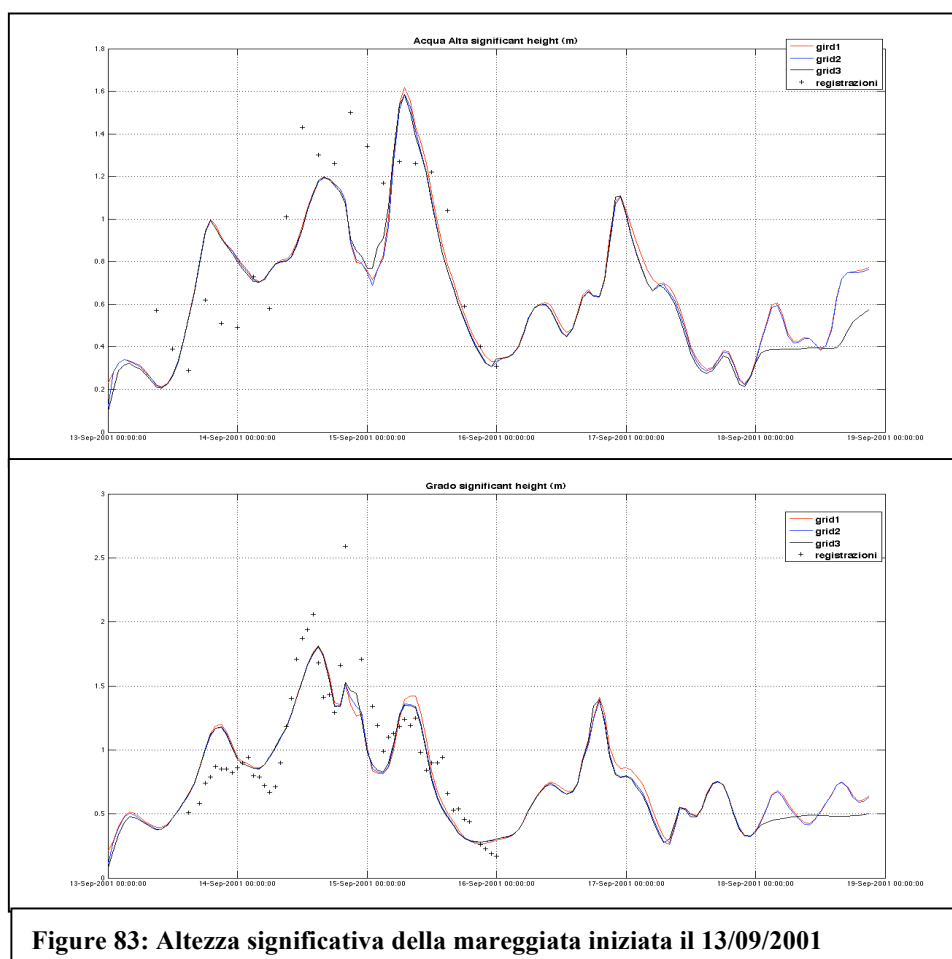
**Figure 82: Periodo di picco piattaforma Acqua Alta**

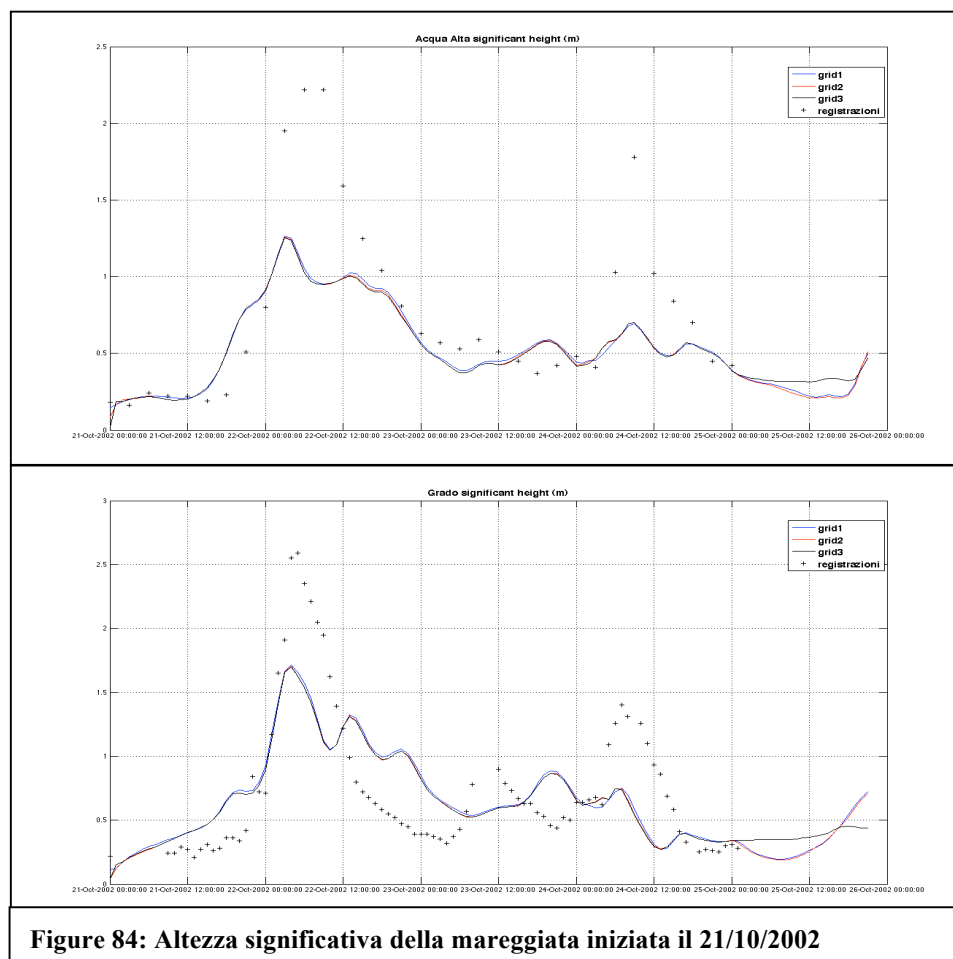


## 7.2.6 Nesting Veneto

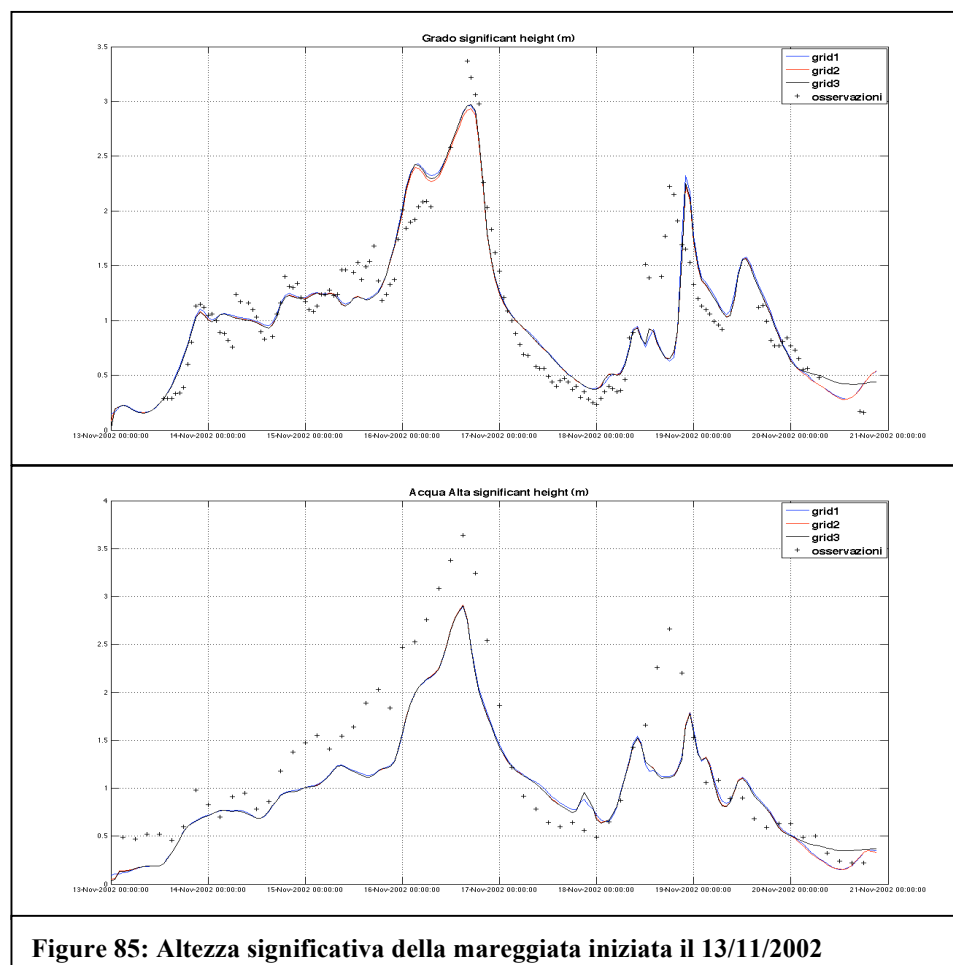
Dalla prima corsa del modello sull'intera area del Mar Adriatico, alla risoluzione di 1/30 di grado (circa 3 Km), si generano le condizioni al contorno per la successiva girata sul dominio dell'Alto Adriatico per una griglia con risoluzione 1/120 di grado (circa 800 m). I risultati di questa simulazione sono stati usati come dati di ingresso per un'ulteriore griglia di calcolo di maggior dettaglio annidata alla precedente al fine di ottenere una più accurata previsione spaziale (circa 400 m).

Di seguito si riporta l'andamento dell'altezza d'onda significativa, per ciascuna delle mareggiate analizzate e per ogni risoluzione spaziale considerata, rispettivamente sulla boa di Grado e sulla piattaforma Acqua Alta.

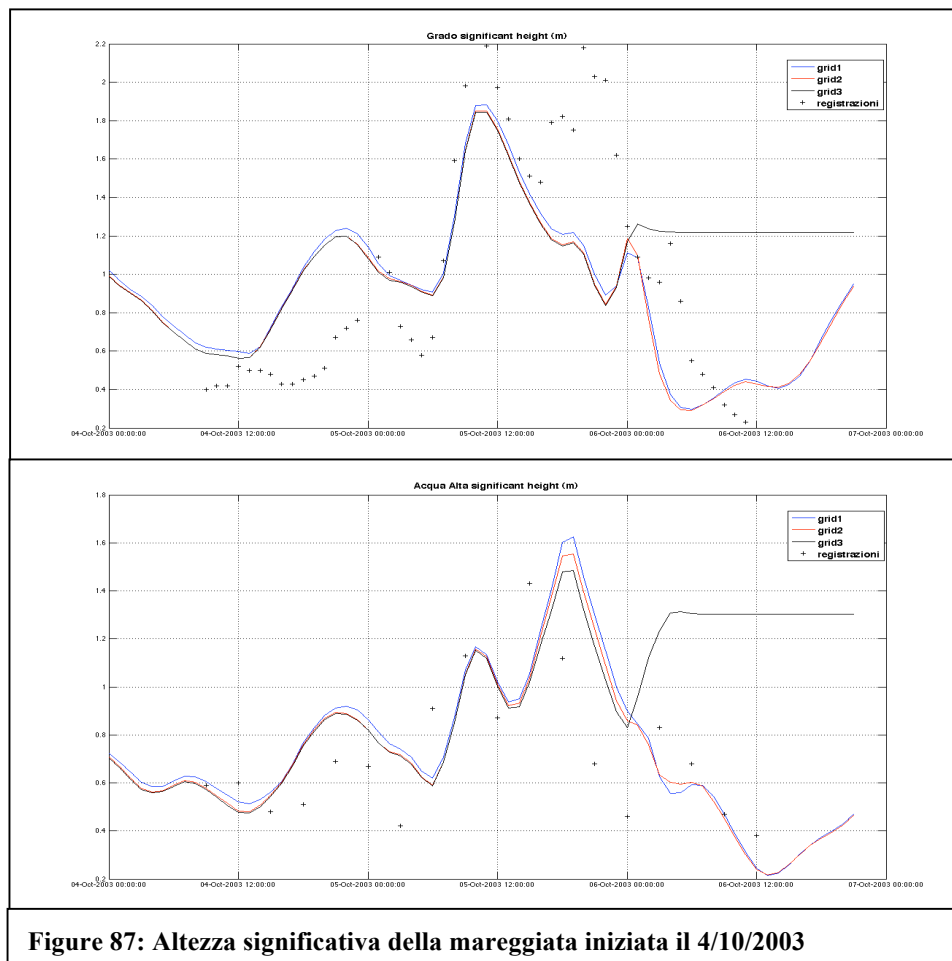
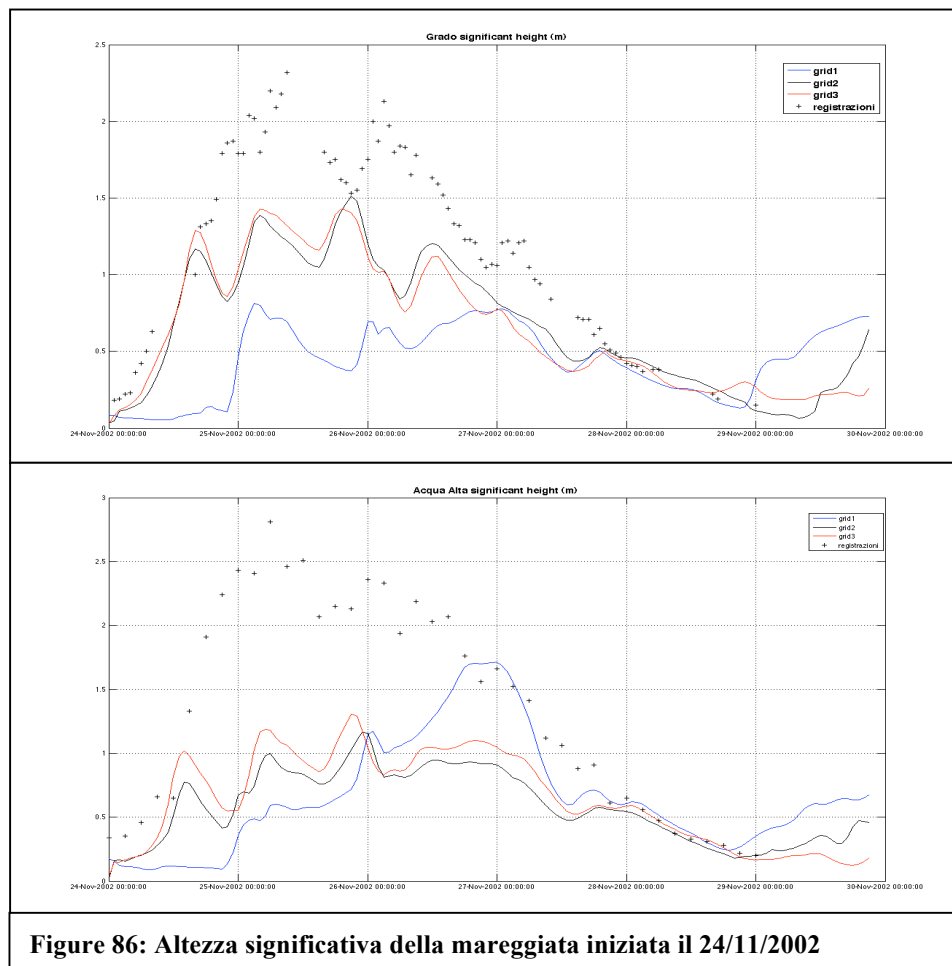




**Figure 84: Altezza significativa della mareggiata iniziata il 21/10/2002**



**Figure 85: Altezza significativa della mareggiata iniziata il 13/11/2002**



Dal confronto tra l'andamento dell'altezza d'onda significativa risultante dalla prima simulazione e dai successivi livelli di nesting, non si riscontra un miglioramento nonostante l'adozione di una risoluzione spaziale più elevata, fatta eccezione per la mareggiata del 24/11/2002. In questo caso, infatti, a causa della non corretta previsione del vento, sono stati ottenuti pessimi risultati per la prima simulazione con un margine di miglioramento molto elevato. Per questo motivo, con il primo livello di nesting è stata ridotta la sottostima dei valori previsti rispetto alle osservazioni. Nonostante il "nesting" in questo caso abbia portato ad un miglioramento delle uscite della simulazione, per questa mareggiata la sottostima tra i dati osservati e quelli previsti è ancora notevole.

In generale, a causa della batimetria piuttosto uniforme sull'area in esame, utilizzare un passo troppo piccolo per l'area di calcolo non comporta alcun beneficio.

L'utilizzo dei due livelli di nesting inoltre comporta tempi computazionali molto lunghi nella simulazione numerica (complessivamente circa 11 ore in aggiunta alle 3 ore circa richieste dalla prima girata). Visti i risultati ottenuti per entrambe le zone esaminate (Emilia Romagna e Veneto), converrebbe fermarsi alla prima girata (passo di circa 3 Km).

L'utilizzo del nesting potrebbe essere giustificato solo nel caso in cui si avesse bisogno di informazioni ondametrichi ad elevata risoluzione spaziale, necessarie ad esempio alla valutazione dei fenomeni erosivi e alla progettazione delle opere di difesa dei litorali.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti per alcuni parametri di scostamento per la mareggiata del 13/09/2001.

**Table 6: Mareggiata iniziata il 13/09/2001**

	BIAS	MAE	MSE	Correlazione
Grado				
Grid1	-0.01	0.20	0.07	0.83
Grid2	-0.02	0.19	0.07	0.84
Grid3	-0.02	0.19	0.07	0.84
Acqua Alta				
Grid1	-0.02	0.08	0.03	0.71
Grid2	-0.02	0.08	0.03	0.71
Grid3	-0.02	0.08	0.03	0.73

L'errore assoluto e l'errore quadratico medio sembrerebbero indicare un miglior adattamento delle previsioni alle registrazioni per la piattaforma Acqua Alta. In realtà ciò avviene esclusivamente per un bilanciamento tra i valori sottostimati e quelli sovrastimati rispetto alle osservazioni. Infatti, l'andamento dell'altezza d'onda stimato dal modello di calcolo in corrispondenza della boa di Grado segue meglio le registrazioni che non in corrispondenza della piattaforma oceanografica. Questo risultato è confermato dai valori ottenuti per la correlazione.

Per la mareggiata del 21/10/2002, sulla piattaforma oceanografica Acqua Alta sussiste una correlazione maggiore tra i dati previsti e le osservazioni rispetto alla boa di Grado. Sulla boa di Grado, infatti, la mareggiata prevista sembra essere stata generata da un vento completamente diverso da quello previsto dal SIMM e utilizzato come dato di ingresso della simulazione.

**Table 7: Mareggiata iniziata il 21/10/2002**

	BIAS	MAE	MSE	Correlazione
Grado				
Grid1	0.001	0.27	0.13	0.72
Grid2	-0.01	0.27	0.13	0.72
Grid3	-0.01	0.27	0.13	0.72
Acqua Alta				
Grid1	-0.06	0.09	0.06	0.83
Grid2	-0.06	0.09	0.06	0.83
Grid3	-0.06	0.09	0.06	0.83

I parametri di scostamento ottenuti per la mareggiata del 13/11/2002 mostrano che, in termini di errore assoluto, errore quadratico medio e correlazione, i livelli di nesting adottati rispetto alla prima corsa del modello non hanno portato ad un'ottimizzazione dei risultati.

**Table 8: Mareggiata iniziata il 13/11/2002**

	BIAS	MAE	MSE	Correlazione
Grado				
Grid1	0.01	0.17	0.08	0.87
Grid2	-0.002	0.17	0.08	0.87
Grid3	0.002	0.17	0.08	0.87
Acqua Alta				
Grid1	-0.08	0.12	0.08	0.91
Grid2	-0.09	0.12	0.08	0.91
Grid3	-0.08	0.12	0.08	0.91

Per la mareggiata del 24/11/2002, nonostante che nelle griglie di maggior dettaglio siano stati ottenuti valori elevati per la correlazione, le previsioni si discostano notevolmente dalle registrazioni in termini di errore assoluto, errore quadratico medio e BIAS.

**Table 9: Mareggiata iniziata il 24/11/2002**

	BIAS	MAE	MSE	Correlazione
Grado				
Grid1	-0.51	0.52	0.58	0.51
Grid2	-0.27	0.28	0.18	0.88
Grid3	-0.29	0.30	0.19	0.88
Acqua Alta				
Grid1	-0.23	0.24	0.36	0.41
Grid2	-0.25	0.25	0.31	0.84
Grid3	-0.22	0.22	0.26	0.82

Infine, per la mareggiata iniziata il 4/10 2003, i parametri statistici ottenuti confermano la non corretta previsione dei parametri ondametrici rispetto alle osservazioni e l'inutilità dell'adozione dei due livelli di nesting che porta addirittura al peggioramento della simulazione sulla griglia a maggiore risoluzione.

**Table 10: Mareggiata iniziata il 04/10/2003**

	BIAS	MAE	MSE	Correlazione
Grado				
Grid1	-0.053	0.33	0.18	0.69
Grid2	-0.076	0.34	0.19	0.68
Grid3	0.08	0.40	0.26	0.53
Acqua Alta				
Grid1	0.03	0.08	0.03	0.61
Grid2	0.02	0.07	0.02	0.62
Grid3	-0.08	0.12	0.06	0.27

## 8. Conclusioni

Il presente documento descrive le attività relative allo stage svolto presso l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) avente per oggetto: “Applicazione di modelli numerici di propagazione ondosa a costa per il miglioramento dei sistemi di previsione dello stato di mare”.

Il lavoro si articola nelle seguenti attività:

- 1) individuazione ed implementazione dei modelli numerici di propagazione a costa del moto ondoso in funzione delle condizioni di impiego in prossimità della costa su aree limitate, delle condizioni finali di impiego di tipo operativo e rispetto alla necessità di implementazione all'interno del sistema IDRO-METEO-MARE operativo presso l'ISPRA.

La scelta del modello di calcolo è ricaduta sul codice numerico SWAN. SWAN è un modello d'onda concepito per lo studio specifico della propagazione delle onde da vento in zone costiere caratterizzate da basse profondità. Inoltre, è un modello disponibile gratuitamente e facilmente reperibile in rete.

- 2) individuazione di due aree pilota in relazioni alle necessità dell'ISPRA, alle capacità elaborative delle macchine disponibili ed ai tempi di calcolo in fase di operatività del sistema.

Le due aree selezionate ricadono entrambe nell'alto Adriatico, una prospiciente l'Emilia Romagna, l'altra comprendente il Golfo di Venezia e il Golfo di Trieste. È stata fatta una prima simulazione di propagazione del moto ondoso su tutto l'Adriatico utilizzando una griglia con passo costante in latitudine e in longitudine, pari a  $1/30^\circ$ . Si è scelto di lavorare in coordinate sferiche a causa delle elevate dimensioni delle griglie impiegate nel modello. Nel modello di calcolo SWAN, l'utilizzo delle coordinate sferiche esclude la possibilità di utilizzare griglie ruotate, quindi tutte le griglie sono orientate E-W, S-N. I risultati della prima simulazione numerica, tramite l'operazione di 'nesting', sono stati utilizzati come dati di ingresso per le simulazioni sulle due griglie di maggior dettaglio (passo della griglia  $1/120^\circ$ ) annidate alla griglia a larga scala. A ciascuna di queste due griglie è stata annidata un'ulteriore griglia con risoluzione spaziale più elevata (passo  $1/240^\circ$ ), per studiare con



maggiore dettaglio la propagazione delle onde nell'area di interesse al fine di ottenere sistemi previsionali dello stato di mare che possano essere propedeutici alla protezione civile ed ambientale.

3) implementazione e la calibrazione del modello sulle due aree pilota.

Su ciascuna delle due aree pilota è stato implementato il modello di calcolo per la simulazione di 5 mareggiate che sono state scelte sulla base dei dati disponibili e dell'ubicazione degli ondamenti rispetto alla costa.

- Emilia Romagna

L'ondamento di riferimento con cui sono state confrontate le previsioni ondometriche è la boa Nausicaa della Regione Emilia Romagna. Le analisi del vento del SIMM utilizzate nel modello di calcolo sono state confrontate con le registrazioni del mareografo di Ravenna.

La griglia di calcolo utilizzata copre l'intero mar Adriatico ed ha risoluzione  $1/30^\circ$ . I risultati ottenuti sulla griglia di maggior dettaglio sono stati utilizzati come dati di ingresso per una seconda girata su una griglia a maggiore risoluzione (passo  $1/120^\circ$ ). È stato infine utilizzato un ulteriore livello di nesting per passare alla terza griglia di calcolo (passo  $1/240^\circ$ ).

Il modello di calcolo utilizzato ha permesso di ricostruire in maniera apprezzabile lo stato di mare nell'area in esame per i cinque episodi considerati, fatta eccezione per la seconda mareggiata (14 dicembre 2007). In questo caso, infatti, i valori dell'altezza d'onda significativa risultanti dalla simulazione sono scorrelati rispetto alle registrazioni a causa della non corretta previsione del vento del SIMM.

Per le altre quattro mareggiate è stata ottenuta una sottostima media del picco dell'ordine del 15% da attribuire in ogni caso alla sottostima del vento previsto dal SIMM.

La procedura di nesting non ha portato ad un miglioramento della previsione. Questo comportamento è da imputare in parte al posizionamento delle griglie di dettaglio, che non potendo essere ruotate, non sono disposte parallelamente alla linea di costa. In questo caso, infatti, dalla girata precedente si avrebbero maggiori condizioni al contorno per la simulazione numerica, su tre lati della griglia e non su due, riuscendo oltretutto a tener

conto meglio di ogni direzione di attacco del moto ondoso. Inoltre la batimetria piuttosto uniforme su tutto il bacino non rende apprezzabile l'adozione di una risoluzione spaziale più elevata.

Per la mareggiata del 14 dicembre 2007 annidare le griglie di dettaglio alla griglia a larga scala non porta a miglioramenti nella simulazione poiché l'errata previsione del vento del SIMM ha prodotto uno sviluppo della mareggiata completamente differente da quello reale già per la prima griglia di calcolo.

In ogni caso l'utilizzo delle griglie di dettaglio è utile per l'ottenimento di risultati con risoluzione spaziale elevata che possano essere finalizzati a studi specifici per la protezione civile ed ambientale, come l'analisi dei climi ondosi, la valutazione dei fenomeni erosivi ed la progettazione delle opere di difesa dei litorali.

- Veneto

Gli strumenti di misura con cui sono state confrontate le previsioni ondametriche, sono la boa di Grado e la Piattaforma Oceanografica Acqua Alta. Le analisi del vento del SIMM utilizzate nel modello di calcolo sono state confrontate con le registrazioni dei mareografi di Trieste e di Venezia.

La griglia di calcolo utilizzata, copre l'intero mar Adriatico ed ha risoluzione  $1/30^\circ$ . I risultati ottenuti sulla griglia di maggior dettaglio sono stati utilizzati come dati di ingresso per una seconda girata su una griglia a maggiore risoluzione (passo  $1/120^\circ$ ). È stato infine utilizzato un altro livello di nesting per passare alla terza griglia di calcolo (passo  $1/240^\circ$ ).

In corrispondenza della boa di Grado, le mareggiate simulate dal modello più simili alle osservazioni sono quelle del 13 settembre 2001 e del 13 novembre 2002. La sottostima del picco della mareggiata, varia dal 12% (mareggiata del 13 novembre 2002) al 42%, ottenuto per la mareggiata del 24 novembre 2002. In termini di direzione del moto ondoso si ha sempre corrispondenza tra le registrazioni e le previsioni del modello.

Per la piattaforma Acqua Alta, la simulazione più vicina all'andamento reale della mareggiata è quella del 13 novembre 2002. La sottostima del picco della mareggiata, varia dal 20% (mareggiata del 13 novembre 2002) al 45%, ottenuto per la mareggiata del 4 ottobre 2003. La direzione media di provenienza prevista differisce dai valori osservati per tutti gli episodi temporali considerati, anche per la mareggiata del 13 novembre 2002, per

la quale sono stati ottenuti buoni risultati in termini di altezza d'onda significativa. Non si esclude quindi un non corretto funzionamento nello strumento di misura della direzione ondometrica.

Per le cinque mareggiate che hanno interessato il Golfo di Venezia e quello di Trieste, la divergenza tra le previsioni e le registrazioni è attribuibile anche in questo caso alla non corretta previsione del vento del SIMM.

Per le mareggiate analizzate, il nesting non ha portato ad un miglioramento della previsione tranne che per la mareggiata del 24 novembre 2002 in cui, a causa della notevole differenza tra i valori previsti e le registrazioni, i margini di miglioramento erano molto elevati.

## Bibliografia

- Delft University of Technology. “Implementational Manual SWAN Cycle III version 40.72”  
website: <http://fluidmechanics.tudelt.nl/swan/index.htm>, (2008).
- “The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea”, Luigi Cavalieri, Mauro Sclavo (2005). *Institute of Marine Sciences (ISMAR)*
- “Comparison of wind and wave model data in the Mediterranean Sea”, Fabrice Ardhuin, Luciana Bertotti, Jean-Raymond Bidlot, Luigi Cavaleri, Valentina Filipetto, Jean-Michel Lefevre, Paul Wittmann (2006). *SHOM (Brest, France), ISMAR (Venice, Italy), ECMWF (UK), Météo France (Toulouse, France), FNMOC (Monterey, USA)*
- “Wave Modeling, where to go in the future”, Luigi Cavaleri (2005). *Institute of Marine Sciences (ISMAR)*
- “On coupling the SWAN and the WAM WAVE MODELS for accurate nearshore wave predictions”, Stephen F. Wornom, David J. S. Welsh, Keith W. Bedford (2001). *US Army Engineer Research and Development Center, Department of Civil and Environmental and Geodetic Science (The Ohio University)*
- “The wave model”, Peter Janssen (2000). *Research Department*
- “Atlante delle Onde nei Mari Italiani – Italian Wave Atlas”, Ing. S. Corsini, Prof. Ing. L. Franco, dr. R. Inghilesi, dr. Ing. R. Piscopia
- “Progetto Atlante Costiero – Il moto ondoso lungo le coste italiane”, APAT (Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici) – Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine

- “Construction d’une base de données d’états de mer le long des cotes françaises méditerranéennes par simulations rétrospectives couvrant la période 1979-2008”, David Morellato, Michel Benoit (2005). *Technopole Brest-Iroise (CETMEF), Laboratoire d’Hydraulique Saint-Venant, Université Paris Est*

## Ringraziamenti

Si ringrazia il Dott. Roberto Inghilesi, nella veste di tutor dello stage, per aver supportato la preparazione dei codici e per il coordinamento nelle attività, la Dott.ssa Sara Morucci per il reperimento delle linee batimetriche utilizzate in questo studio, la Dott.ssa Arianna Orasi per contributo fornito nella parte statistica della relazione, il Dott. Stefano Mariani e la Dott.ssa Arianna Orasi per il supporto nella parte relativa alla creazione dei files di vento necessari per le simulazioni numeriche effettuate con lo SWAN, l'Ing. Stefano Corsini.