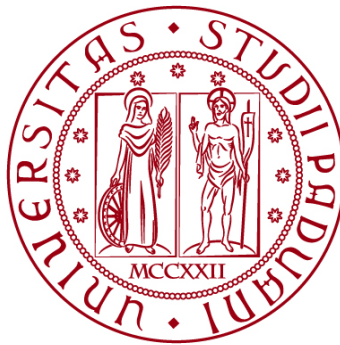


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**

*Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Idraulica**



**TESI DI LAUREA**

**"Analisi dell'evoluzione idro-morfologica della laguna di Caleri in relazione all'innalzamento del medio mare e applicazione di un modello idrodinamico bidimensionale per simulare circolazione e moto ondoso"**

**"Analysis of the hydro-morphological evolution of the Caleri Lagoon in relation to mean sea level rise and application of a two-dimensional hydrodynamic model to simulate circulation and waves,"**

Relatore: Prof. DANIELE PIETRO VIERO

Laureando: GIANMARCO SECHET (2054063)

Correlatore: Dott. Ing. BRUNO MATTICCHIO

**ANNO ACCADEMICO 2023-2024**



*Alla mia famiglia*



## **Abstract**

La Laguna di Caleri è un sistema lagunare costiero situato nel Delta del Po, caratterizzato da un delicato equilibrio tra componente antropica e naturale. L'ecosistema lagunare, così come le attività umane che dipendono da esso, sono estremamente sensibili alle variazioni della morfologia e dell'idrodinamica locale, che rischiano di mutare anche a causa degli scenari futuri legati al cambiamento climatico. Il presente elaborato di tesi nasce all'interno del "Progetto Caleri" dell'Università di Ferrara, al quale ho preso parte come borsista di ricerca per fornire supporto all'acquisizione, all'elaborazione e all'interpretazione di dati geomorfologici per il monitoraggio delle zone costiere e lagunari. Il progetto ha previsto anche una collaborazione con la società Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l. per lo svolgimento di attività di modellazione idrodinamica della circolazione e del moto ondoso. L'obiettivo di questa tesi è l'analisi dell'idrodinamica della Laguna di Caleri mediante modellazione numerica, analizzando gli effetti di eventi meteomarini estremi nello scenario attuale e in uno scenario futuro di innalzamento del livello del mare. È stato implementato, calibrato e poi applicato un modello matematico accoppiato 2DEF+SWAN per simulare le correnti di marea, la generazione e la propagazione del moto ondoso. I risultati hanno evidenziato che l'innalzamento del livello medio del mare porta a un aumento significativo delle portate scambiate tra laguna e mare (circa +15%) e a un aumento più contenuto (circa +6%) dell'altezza d'onda all'interno della laguna in caso di eventi meteo-marini estremi. Quest'ultimo aspetto porta, comunque, ad un peggioramento delle condizioni di sicurezza lungo i margini lagunari e suggerisce la necessità di realizzare interventi per la mitigazione degli impatti legati all'innalzamento del medio mare, quali per esempio il sovrizzo degli argini di prima difesa e/o la realizzazione di ulteriori barene nella parte occidentale del bacino, che potrebbero contribuire a limitare lo sviluppo del moto ondoso e dei fenomeni di erosione a esso collegati.

# Sommario

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INQUADRAMENTO GENERALE</b> .....	<b>3</b>
1.1 DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE DEL DELTA DEL PO E DELLA LAGUNA DI CALERI.....	3
1.2 ATTIVITÀ SVOLTE NEL "PROGETTO CALERI" .....	5
1.2.1 <i>Il "Progetto Caleri"</i> .....	6
1.2.2 <i>Rilievi Drone e GPS</i> .....	7
1.2.3 <i>Rilievi Batimetrici (bocca di Caleri e canali lagunari)</i> .....	11
1.2.4 <i>Attività in campo per il litter</i> .....	13
1.2.5 <i>Mappatura semplificata della vegetazione sulle barene della laguna di Caleri</i> .....	14
1.3 ANALISI DEI DATI METEOMARINI PER LA LAGUNA DI CALERI.....	23
1.3.1 <i>Regime Mareografico</i> .....	25
1.3.2 <i>Regime Anemologico</i> .....	26
1.3.3 <i>Regime Ondametrico</i> .....	32
1.3.4 <i>Eventi meteomarini significativi registrati nella laguna di Caleri</i> .....	37
1.3.5 <i>Previsioni di innalzamento del l.m.m. per effetto del cambiamento climatico</i> .....	49
<b>2 DESCRIZIONE DEI MODELLI MATEMATICI UTILIZZATI</b> .....	<b>53</b>
2.1 IL MODELLO MATEMATICO IDRODINAMICO 2DEF.....	53
2.1.1 <i>Modulo idrodinamico</i> .....	54
2.1.2 <i>Lo schema numerico</i> .....	56
2.1.3 <i>Elementi 2D speciali</i> .....	56
2.1.4 <i>Elementi unidimensionali</i> .....	57
2.2 MODULO DI MOTO ONDOSI .....	59
2.2.1 <i>Il modello SWAN</i> .....	59
2.2.2 <i>Accoppiamento 2DEF-SWAN</i> .....	61
<b>3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO PER LA LAGUNA DI CALERI</b> .....	<b>65</b>
3.1 GRIGLIA DI CALCOLO DEL MODELLO 2DEF.....	65
3.2 GRIGLIA DI CALCOLO DEL MODELLO SWAN.....	68
3.3 CONDIZIONI AL CONTORNO E SCENARI SIMULATI.....	69
3.4 TARATURA DEI MODELLI .....	71
3.4.1 <i>Taratura del modello 2DEF rispetto a misure mareografiche e correntometriche</i> .....	72

---

3.4.2	<i>Taratura del modello accoppiato 2DEF+SWAN rispetto alle misure di livello e di moto ondoso</i>	80
<b>4</b>	<b>APPLICAZIONI DEL MODELLO ACCOPPIATO ONDE-CORRENTI .....</b>	<b>93</b>
4.1	SIMULAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DURANTE UN EVENTO ESTREMO .....	93
4.2	SIMULAZIONE EVENTO CON SCENARIO S.L.R. ....	101
4.2.1	<i>Effetti sulle correnti di marea.....</i>	<i>101</i>
4.2.2	<i>Effetti sul moto ondoso .....</i>	<i>107</i>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>115</b>





## Introduzione

La laguna di Caleri, situata fra l'Adige e il Po di Levante, è una delle maggiori lagune costiere dell'area del Delta del Po. Essa fa parte di un più ampio sistema che comprende anche le lagune di Marinetta e di Vallona. L'ecosistema lagunare, caratterizzato da un delicato equilibrio fra componente antropica e naturale, risulta essere estremamente complesso e dinamico, in funzione delle correnti di marea, del moto ondoso e in relazione anche all'attuale tendenza all'innalzamento del livello medio del mare. In particolare, all'interno della laguna di Caleri sono presenti sia gli elementi morfologici tipici degli ecosistemi lagunari (canali, bassifondi, barene, velme) sia una serie di attività produttive legate alla pesca e all'acquacoltura, che risentono in modo significativo dell'evoluzione morfologica dei fondali della laguna e delle variazioni che coinvolgono l'idrodinamica locale. Il sistema ambientale della laguna di Caleri, particolarmente sensibile agli eventi meteomarini eccezionali, rischia di mutare anche a causa degli scenari futuri che si prospettano a seguito del cambiamento climatico.

La laguna di Caleri è un ambiente ben monitorato. All'interno della laguna sono presenti, infatti, due stazioni meteo-mareografiche: una, situata presso il porticciolo vicino alla bocca (Porto Caleri), e l'altra, di recente installazione (2022), posizionata in prossimità del margine interno della laguna (Caleri Moceniga). Entrambe fanno parte della Rete mareografica Alto Adriatico di ISPRA e forniscono dati funzionali al monitoraggio di parametri utili a comprendere l'idrodinamica e il moto ondoso locale.

Questo elaborato di tesi nasce all'interno del "Progetto Caleri" dell'Università di Ferrara, al quale ho preso parte come borsista di ricerca per fornire supporto all'acquisizione, all'elaborazione e all'interpretazione di dati geomorfologici per il monitoraggio delle zone costiere e lagunari. Il progetto ha previsto anche una collaborazione con la società Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l. per lo svolgimento di attività di modellazione idrodinamica della circolazione e del moto ondoso. Le attività svolte, che mi hanno permesso di ampliare le mie conoscenze sull'area oggetto di studio, sugli ambienti lagunari e sulle relative tecniche di modellazione numerica, hanno compreso diverse attività, quali per esempio l'esecuzione di rilievi in campo mediante strumentazione GPS, l'elaborazione di dati meteomarini provenienti da stazioni meteo-mareografiche, l'analisi del comportamento idrodinamico di un sistema lagunare e dei possibili effetti causati da eventi meteo-marini estremi e da scenari di innalzamento del livello medio del mare (SLR) sulle correnti di marea e sul moto ondoso.

La tesi è suddivisa in quattro capitoli: il primo contiene una descrizione generale dell'area del Delta del Po e, più nello specifico, della laguna di Caleri, con un approfondimento relativo all'evoluzione della

morfologia barenicola localizzata nella laguna. In seguito, vengono descritte le attività di monitoraggio svolte in veste di borsista dell'Università di Ferrara all'interno del "Progetto Caleri" e l'analisi dei dati meteomarini disponibili per la laguna.

Nel secondo capitolo viene riportata una descrizione dei modelli matematici utilizzati nelle fasi successive dello studio: il modello idrodinamico "2DEF" e il modello di moto ondoso "SWAN". Oltre alla teoria alla base di ciascuno di questi modelli, è descritta anche la tecnica con cui vengono accoppiati. Il terzo capitolo descrive l'implementazione dei modelli 2DEF e SWAN con riferimento alla laguna di Caleri: esso comprende la descrizione delle griglie di calcolo, delle condizioni al contorno imposte e delle simulazioni di taratura effettuate. Nel quarto capitolo sono presentati e descritti i risultati delle simulazioni modellistiche, che comprendono la simulazione di correnti e di moto ondoso per eventi estremi, considerando lo scenario attuale e uno scenario futuro con relativo innalzamento del livello medio del mare. Infine, le Conclusioni riassumono i principali risultati ottenuti nel corso delle analisi.

# 1 Inquadramento generale

## 1.1 Descrizione dell'ambiente del delta del Po e della laguna di Caleri

La laguna di Caleri è una laguna costiera situata tra l'Adige e il Po di Levante, in provincia di Rovigo. Occupa una superficie di circa 1000 ha, cui si aggiungono oltre 3000 ha di aree vallive (Fig. 1.1.1). La laguna è in comunicazione con il mar Adriatico mediante la bocca di Porto Caleri, attraverso la quale avviene la maggior parte dei ricambi idrici e a sud con la laguna di Vallona mediante varco Pozzatini. All'interno della laguna e nelle valli da pesca sono presenti numerose attività legate alla molluschicoltura.

Il territorio lagunare è stato soggetto, nel corso dei primi anni '90, a numerose opere e interventi di natura idraulica. Questi interventi sono stati giustificati data la rilevante importanza della laguna legata alla presenza di un ampio numero di valli da pesca (dieci), alle pessime condizioni ambientali e alla forte presenza di importanti centri turistico balneari (Albarella, Rosolina Mare). I progetti realizzati consistevano nel dragaggio di canali sub-lagunari, nella costruzione di barene, nell'ampliamento della bocca Pozzatini e nella costruzione di un manufatto per la regolazione della marea alla bocca stessa.



Fig. 1.1.1 - Foto satellitare della Laguna di Caleri e territorio circostante (Google Earth 04/2024)

La laguna di Caleri si sviluppa all'interno dell'area del Delta del Po. Questa area, localizzata nelle estremità orientali delle regioni Veneto ed Emilia-Romagna, contiene il più grande sistema lagunare italiano, con un'estensione di circa 400 km<sup>2</sup>. La sua morfologia è caratterizzata da una forma triangolare con uno sviluppo che si estende per 30 km dall'entroterra alla linea di costa. All'interno del Delta sono presenti numerosi bacini idrici semi-chiusi. La sua configurazione attuale è il risultato di sviluppi idraulici avvenuti nel corso degli ultimi secoli, con la forma attuale che risale principalmente agli anni '50 del XX secolo. La laguna di Caleri, situata nella parte settentrionale del delta del Po, ha subito un'evoluzione determinata dalla deviazione dei rami settentrionali del fiume Po e dall'abbandono del Po di Tramontana (Corbau et al., 2019).

L'ambiente lagunare è soggetto a un'interazione complessa di variabili idrodinamiche, le quali influenzano l'equilibrio delicato dell'intero ecosistema del Delta. Nel corso del tempo, l'equilibrio ambientale è stato alterato dall'intervento umano, principalmente attraverso la realizzazione di opere di bonifica e di difesa contro le inondazioni fluviali e marine. Inoltre, l'alto tasso di trasporto di sedimenti fluviali e costieri contribuisce a una continua evoluzione della linea di costa, modificando costantemente il paesaggio lagunare.

I fenomeni di innalzamento del livello del mare, oltre che alla subsidenza locale, comportano una serie di conseguenze, tra cui l'aumento delle aree lagunari e l'inondazione dei terreni agricoli, portando all'abbandono di alcune valli. Questo processo, noto come ingressione, causa la fusione delle valli con le lagune, come evidenziato sia nella laguna di Venezia che nel delta del Po.

Il delta del Po ha sperimentato fenomeni significativi di erosione a partire dagli anni '50, principalmente a causa della diminuzione dell'apporto solido del fiume, ridotto dalle opere di ingegneria come dighe e sbarramenti, oltre che all'escavazione del letto fluviale (Simeoni e Corbau, 2009). Questo degrado ha un riscontro fisico che, in assenza di interventi umani di contrasto, si manifesta con il deterioramento delle barene, seguito dall'erosione costiera legata alla marea (Fig. 1.1.2).

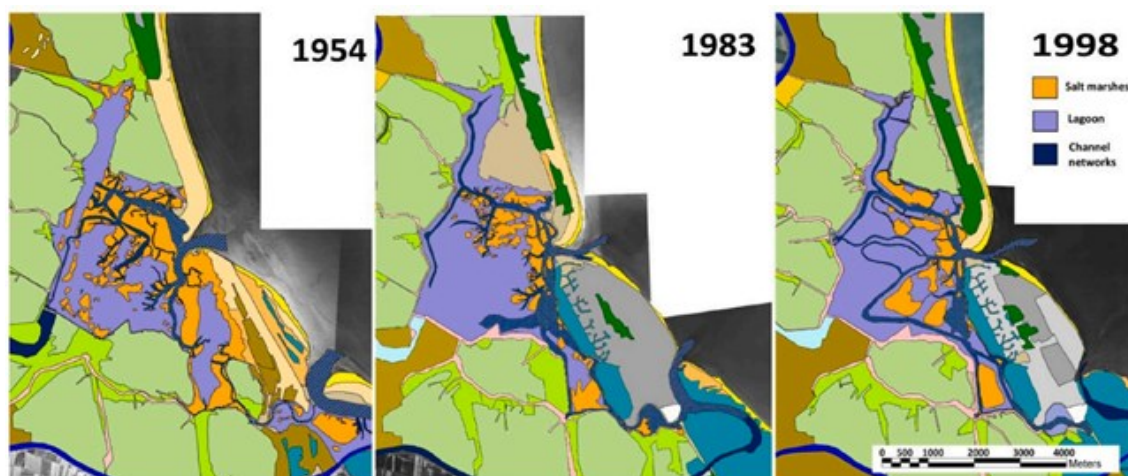


Fig. 1.1.2 – Evoluzione dei canali e delle valli nella Laguna di Caleri (1954-1998)

La componente barenicola è particolarmente sensibile ai cambiamenti idrodinamici e agli interventi umani. La combinazione di questi fattori, che risulta essersi accentuata nel corso degli ultimi decenni, compromette in maniera diretta la capacità di sopravvivenza delle barene (Carrasco, 2016). Se le variazioni all'idrodinamica locale non sono associate ad un adeguato apporto di sedimenti si riduce notevolmente la capacità di accrescimento o di permanenza della componente barenicola. La capacità di accrescimento di una barena dipende in grande misura dallo stato della vegetazione che essa supporta. Le piante alofile, fondamentali per la crescita delle barene, sono estremamente sensibili all'innalzamento del livello del mare. Esse sono suscettibili all'anossia, la quale, se persistente, determina la mortalità delle piante al di sotto di una profondità inferiore al livello medio della marea. Ciò comporta la perdita della loro funzione primaria di protezione contro i processi erosivi, con conseguente impatto negativo sulla fauna locale.

## 1.2 Attività svolte nel “Progetto Caleri”

Nel corso dello svolgimento di una borsa di studio, bandita dall'Università di Ferrara nell'ambito del più vasto “Progetto Caleri” (Fig. 1.2.1), sono stati raccolti dati di vario tipo relativi alla laguna di Caleri, è stato eseguito uno studio degli eventi meteomarinari e, infine, sono state svolte attività di modellazione idrodinamica. Come descritto nel presente capitolo, le attività svolte hanno riguardato:

- indagini aeree con l'utilizzo di dispositivi UAVs sulle morfologie barenicole;
- rilievi batimetrici della bocca di Caleri e dei canali lagunari;
- raccolta del marine-litter in laguna;
- mappatura semplificata della vegetazione.

### 1.2.1 Il “Progetto Caleri”

Il “Progetto Caleri”, il cui logo è riportato in Fig. 1.2.1, è stato avviato grazie ad un bando del Fondo Europeo per gli Affari Marittimi e la Pesca (FEAMP) nell’ambito della “Protezione e ripristino della biodiversità e degli ecosistemi marini e dei regimi di compensazione nell’ambito di attività di pesca sostenibili”.

Il bando è stato assegnato al Dipartimento di Scienze dell’Ambiente e della Prevenzione dell’Università di Ferrara, con responsabile scientifico la Prof.ssa Carmela Vaccaro. Il sottoscritto ha partecipato alle attività del progetto come borsista nel periodo 1/06/2023 – 31/10/2023, contribuendo alle attività in campo e collaborando con la società Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l.



**Fig. 1.2.1 - Logo del "Progetto Caleri"**

Il progetto si focalizza sull'analisi dell'evoluzione socioeconomica e ambientale delle aree costiere dell'alto Adriatico, concentrandosi principalmente sulla Laguna di Caleri. È stata confrontata l'evoluzione delle lagune e delle coste nell'era dell'Antropocene con quella delle precedenti epoche storiche. Da questo confronto sono emersi scenari per il monitoraggio, l'implementazione di buone pratiche e l'introduzione di interventi mirati a mitigare l'impatto climatico e a potenziare la resilienza ambientale. Nella Laguna di Caleri, sito pilota del progetto, sono state effettuate diverse campagne per analizzare la distribuzione dei rifiuti marini in relazione all'ambiente geomorfologico. I rifiuti sono stati raccolti e classificati, in modo da stimarne la tipologia e le zone di accumulo.

Sono stati sono attivamente coinvolti pescatori e acquacoltori nella realizzazione delle varie attività. Il progetto mira a promuovere una gestione partecipativa delle attività locali, coinvolgendo le comunità interessate, al fine di preservare le caratteristiche ecologiche delle lagune e prevenire il deterioramento dei loro habitat, sia dal punto di vista ambientale che socioeconomico. Un aspetto cruciale del progetto è la messa a punto di un piano di comunicazione che coinvolge pescatori,

acquacoltori, ricercatori e altri stakeholder rilevanti. L'obiettivo primario è lo sviluppo e l'adozione di buone pratiche volte a garantire una maggiore tutela ambientale, nonché una sostenibilità sociale ed economica nell'utilizzo delle zone umide.

Di seguito vengono elencati gli interventi realizzati nell'ambito del progetto:

1. analisi dello stato della laguna: valutazione delle pressioni e degli impatti ambientali, con la proposta di una lista di controllo per realizzare un monitoraggio più efficiente.
2. raccolta di dati per la creazione di un modello di gestione e sviluppo di linee guida per favorire l'adattamento sostenibile della laguna in previsione dei cambiamenti climatici.
3. sensibilizzazione, coinvolgimento e formazione degli stakeholders interessati alla gestione e alla conservazione della laguna.

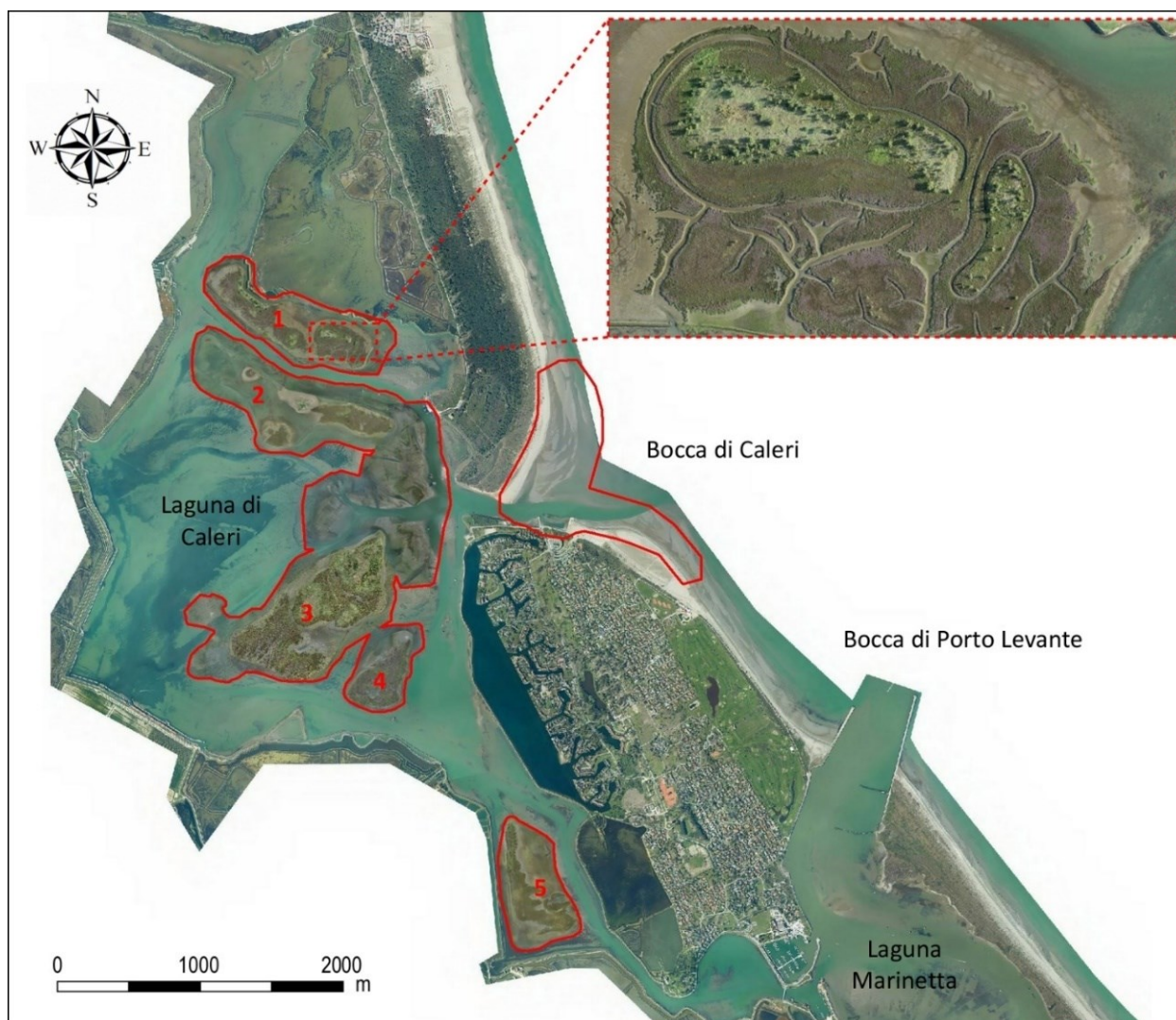
Per ogni intervento pianificato, sono state effettuate attività di coinvolgimento e valorizzazione con la partecipazione attiva dei pescatori, acquacoltori e degli altri enti operanti nella zona. L'obiettivo principale è quello di adottare pratiche gestionali ottimali per affrontare le sfide attuali e future della Laguna di Caleri, considerando sia gli aspetti ambientali che socioeconomici.

Inoltre, è stata redatta un'analisi completa, sia storica che recente, della laguna al fine di comprendere i suoi processi evolutivi dal punto di vista geomorfologico e socioeconomico. Per questa analisi sono stati impiegati una varietà di dati, tra cui mappe, foto aeree e dati meteorologici ed economici relativi all'area di interesse.

### 1.2.2 Rilievi Drone e GPS

Al fine di acquisire dati aggiornati sulla morfologia dell'area della laguna, sono state condotte una serie di rilievi in campo in diverse giornate dal 1° al 4 agosto, durante le quali sono state eseguite le seguenti attività:

- 1° agosto: rilievo della Bocca di Porto Caleri in condizioni di bassa marea (solo ortofoto)
- 3 agosto: rilievo delle barene 1-2-3 (ortofoto e DEM)
- 4 agosto: rilievo delle barene 4-5 e flood delta (ortofoto e DEM)



**Fig. 1.2.2 – Foto aerea della laguna di Caleri con evidenziate le aree coperte dal rilievo aerofotogrammetrico ad alta risoluzione eseguito nell’agosto 2023. Nel riquadro è rappresentato un particolare della Barena 1.**

I rilievi sono stati eseguiti utilizzando un drone SAPR modello DJI Phantom 4 RTK appositamente progettato per rilievi fotogrammetrici tridimensionali. Le operazioni di rilievo sono state condotte a un'altitudine di 100 metri dal suolo. I piani di volo sono stati configurati per garantire un'adesione dell'80% tra i singoli fotogrammi in direzione longitudinale e del 70% in direzione trasversale. L'acquisizione delle immagini è stata prima eseguita con la fotocamera ortogonale al terreno e successivamente inclinata, per produrre modelli tridimensionali precisi e ortofoto ad alta risoluzione (Fig. 1.2.2).

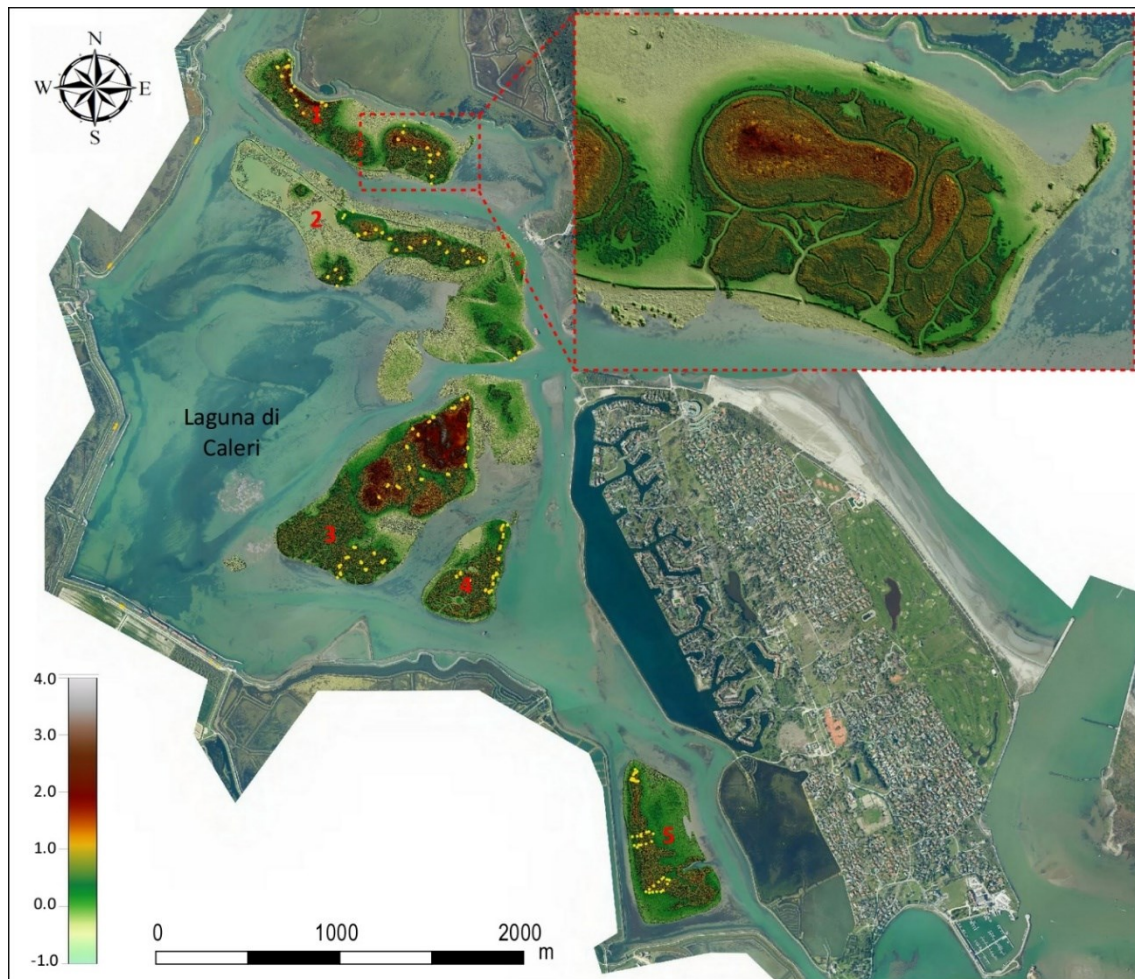


Durante una serie di indagini specificamente condotte, è stata eseguita la verifica topografica dei vertici trigonometrici disponibili in loco, con le relative monografie messe a disposizione dall'Ufficio del Genio Civile di Rovigo. Inoltre, sono stati posizionati circa 400 punti di controllo a terra lungo i margini lagunari e sulle barene, essi sono rappresentati come punti gialli in Fig. 1.2.3. Le altitudini dei punti sono state misurate utilizzando strumentazione GPS in modalità RTK, con antenna Leika Viva GS16, utilizzando servizi di correzione differenziale forniti dalla rete HxGN Smartnet (ITALPOS).

I punti di controllo hanno avuto principalmente lo scopo di attestare la congruenza tra i differenti dataset impiegati durante il corso dell'indagine. In aggiunta, i punti posizionati sulle barene sono stati utilizzati per determinare l'altezza del suolo nei medesimi punti delle barene, dove i dati rilevati dal drone non si riferivano al suolo bensì alla sommità della vegetazione.

In Figura 2.1 viene riportata l'immagine aerea georeferenziata della laguna di Caleri, ottenuta tramite un volo eseguito nel 2018 dal Genio Civile di Rovigo, per il rilievo Lidar della costa e delle lagune. Sull'immagine del 2018 è sovrapposta un'immagine ad alta risoluzione (pixel 5x5 cm) delle aree rilevate con il drone il 3 e 4 agosto 2023, evidenziate da un contorno rosso. Queste aree corrispondono alle cinque barene presenti nella laguna, oltre alla zona di bassifondi compresa tra le barene 2 e 3 e la bocca (denominata "flood delta"). Su queste aree, i dati raccolti dal drone hanno permesso di elaborare un modello altimetrico digitale (DEM) con una risoluzione di 10x10 cm. I voli sono stati effettuati nelle prime ore del mattino, coincidendo con le condizioni di bassa marea, al fine di rilevare altimetricamente la più ampia area possibile delle barene e dei bassifondi adiacenti.

Nella Fig. 1.2.2 è anche presentata la foto ad alta risoluzione (con pixel di dimensioni 5x5 cm) dell'area oggetto di rilevamento effettuato con il drone, sulla bocca della laguna, effettuata 1° agosto. Tuttavia, per quest'area, non è stato possibile generare il modello altimetrico digitale a causa delle limitazioni tecniche riscontrate nell'applicare la tecnica aerofotogrammetrica, dovute alle condizioni di luce presenti nelle prime ore del mattino, momento in cui è stato effettuato il volo.

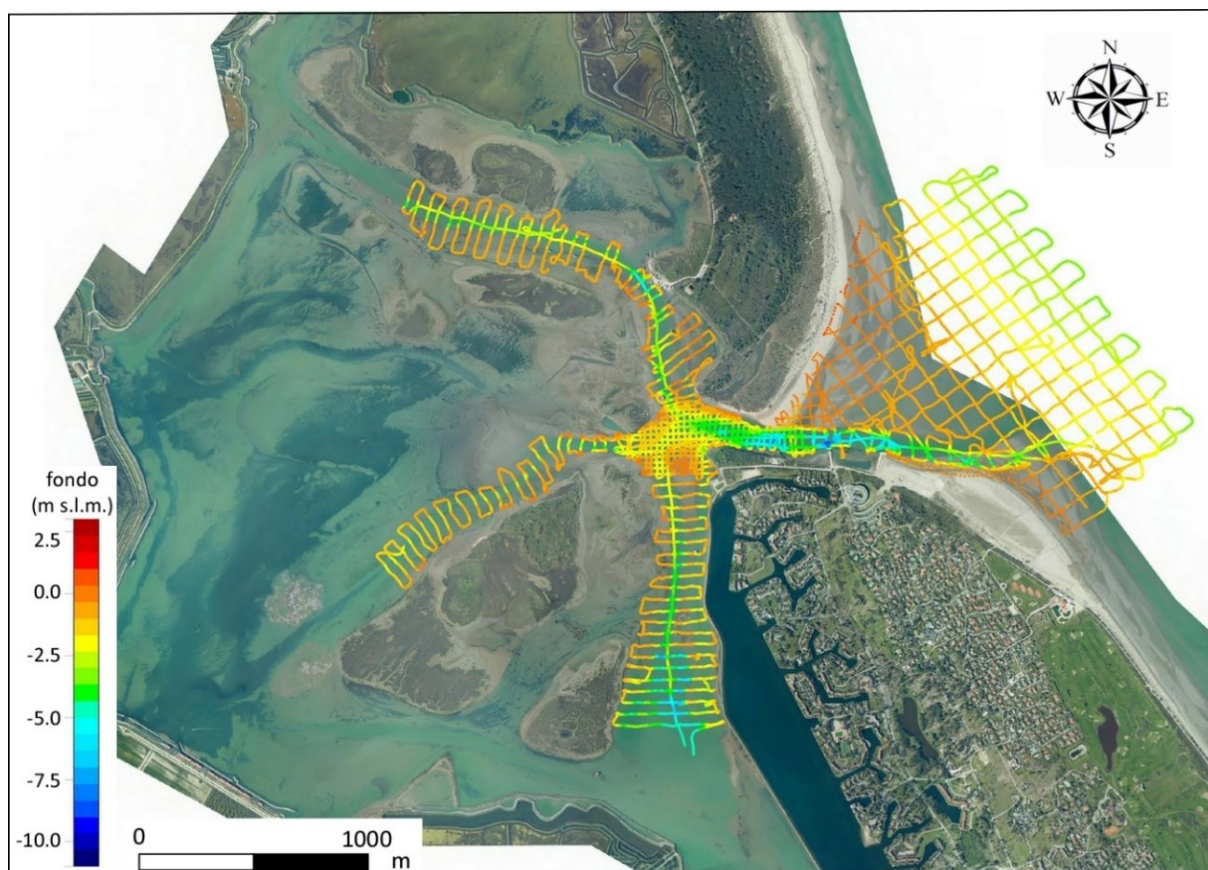


**Fig. 1.2.3 – Foto aerea della laguna di Caleri con evidenziate le aree coperte dal modello altimetrico digitale (DSM/DTM) ottenuto dal rilievo aerofotogrammetrico ad alta risoluzione eseguito nell'agosto 2023. Nel riquadro è rappresentato un particolare della Barena 1.**

### 1.2.3 Rilievi Batimetrici (bocca di Caleri e canali lagunari)

I rilievi batimetrici sono stati condotti nei giorni 1, 3 e 4 di agosto durante le fasi di alta marea per massimizzare l'area rilevata. Le operazioni sono state eseguite utilizzando un'imbarcazione attrezzata con un ecoscandaglio single beam, un sistema di posizionamento GPS e un sistema di navigazione.

I punti batimetrici sono stati registrati lungo transetti perpendicolari all'asse dei canali e seguendo una griglia nella parte di immissione a mare del canale principale. La distanza tra i transetti è stata variabile (50 metri per i canali interni, 25 metri all'imboccatura a mare, 100 metri nella parte a mare), mentre i punti lungo i transetti sono stati misurati a intervalli di 50-100 cm.



**Fig. 1.2.4 - Foto aerea della laguna di Caleri con evidenziate le strisciate del rilievo batimetrico effettuato sulla bocca e nei canali lagunari.**

Il controllo altimetrico è stato effettuato confrontando l'oscillazione di marea con quella registrata dal mareografo di Porto Caleri e incrociando i dati batimetrici con quelli fotogrammetrici, ottenuti in condizioni di marea opposte (bassa marea per il drone e alta marea per la batimetria). I risultati hanno mostrato una congruenza eccellente tra le misurazioni.

Nella Fig. 1.2.4 sono mostrate le strisce del rilievo batimetrico, con le relative quote evidenziate attraverso una scala cromatica. Si specifica che il rilievo dei bassifondi adiacenti al canale di bocca, situati all'esterno del canale stesso (le spiagge di Porto Caleri a nord e di Albarella a sud), è stato condotto utilizzando strumentazione tradizionale (antenna GPS a piedi), poiché le quote del fondo in queste aree non sono compatibili con la navigazione neanche durante l'alta marea. Il rilievo di tali aree è stato eseguito il 22/8/2023 in condizioni di bassa marea.

#### 1.2.4 Attività in campo per il litter

Con l'obiettivo di identificare i siti di accumulo di marine-litter nella laguna di Caleri, sono state condotte operazioni di raccolta delle plastiche durante i mesi di agosto e settembre 2023. Inoltre, a maggio e settembre dello stesso anno, sono state effettuate due campagne esplorative lungo i margini occidentali della laguna, che sono accessibili esclusivamente a piedi. I rifiuti raccolti sono stati suddivisi e classificati in base alla loro tipologia e alla possibile origine; le informazioni sono state georeferenziate. In Fig. 1.2.5 si riporta la localizzazione dei punti di campionamento sovrapposta all'ortofoto della laguna realizzata nell'ambito del progetto.

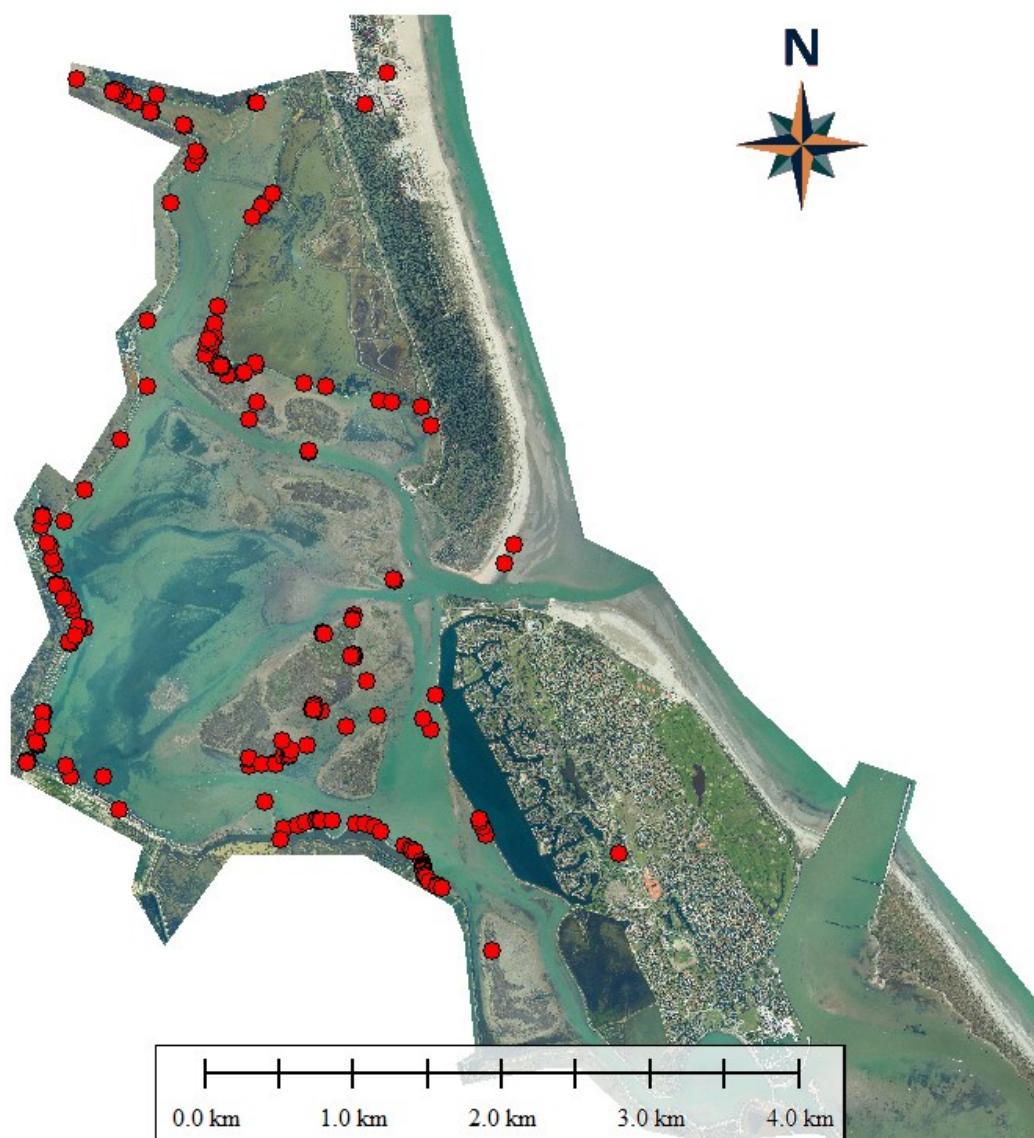


Fig. 1.2.5 - Posizione litter raccolto durante le attività di campionamento.

### 1.2.5 Mappatura semplificata della vegetazione sulle barene della laguna di Caleri

Nel corso dei mesi di agosto e settembre sono stati svolte una serie di attività in campo da parte del personale e dei borsisti dell'Università di Ferrara nell'ambito del "Progetto Caleri". Questi sopralluoghi sono stati finalizzati ad effettuare un monitoraggio del litter galleggiante nelle acque lagunari, alla raccolta di campioni di sedimento e alla realizzazione di una mappatura vegetazionale dell'habitat barenicolo. Utilizzando le ortofoto ad alta risoluzione prodotte da vari voli drone effettuati ad agosto 2023 è stato possibile realizzare una mappatura vegetazionale semplificata della laguna di Caleri, suddividendo l'area delle barene e del flood delta in base alla presenza e alla tipologia della vegetazione (Fig. 1.2.9). Questa è stata suddivisa in tre categorie: vegetazione tipica di barena, vegetazione di duna e vegetazione anomala relativa a colmate recenti, per ogni categoria è stato calcolato lo sviluppo superficiale.

Sono state mappate le conterminazioni, suddividendole in burghe originarie preesistenti (Fig. 1.2.7) e burghe ripristinate (Fig. 1.2.8). Quest'ultime sono costituite da manufatti di pietrame contenuto all'interno di geogriglie di polimeri, realizzate in seguito all'intervento del genio civile nel 2020. È stato calcolato lo sviluppo in lunghezza di entrambe le tipologie di burghe per ogni barena, nonché per il margine non protetto da conterminazione. Sulla base della suddivisione eseguita, è stata predisposta una mappatura della vegetazione dominante con riferimento alle tre categorie individuate, ovvero: vegetazione tipica di barena, vegetazione di duna e vegetazione anomala relativa a colmate recenti.

Il rilievo eseguito con il drone è stato verificato e controllato nella fase esecutiva mediante la realizzazione di una serie di misure in campo, volte a ottenere dei punti quotati sulle barene e sulle strade limitrofe. Questi punti sono stati battuti per mezzo di strumentazione che acquisisce dati GPS in modalità RTK, in totale i punti acquisiti sono 268 e si differenziano in punti di controllo per il DEM, punti di controllo sul pelo libero della laguna, e punti funzionali per valutare l'altezza della vegetazione. I dati aerei forniti dal drone hanno permesso di ricostruire un modello altimetrico digitale delle barene (DEM, con risoluzione 10x10 cm). Questo modello è stato realizzato mediante la tecnica dell'aerofotogrammetria, di conseguenza, non vengono filtrati i dati altimetrici relativi alla vegetazione e nel modello la quota superficiale restituita è quella della sommità delle varie specie vegetate o della chioma degli alberi. Confrontando l'altimetria dei punti ottenuti mediante i rilievi in campo sulle barene con la posizione corrispondente all'interno del DEM, è possibile ottenere l'altezza della vegetazione in ogni barena (Fig. 1.2.6).



**Fig. 1.2.6 - Esempio di confronto fra le quote altimetriche ottenute mediante palina GPS (in azzurro) e DEM 2023 (in rosso) per un'area coperta da vegetazione di duna nella barena 1.**



**Fig. 1.2.7 - Burghe preesistenti degradate.**



**Fig. 1.2.8 - Burghe ripristinate con geogriglie di polimeri riempite di pietrame.**



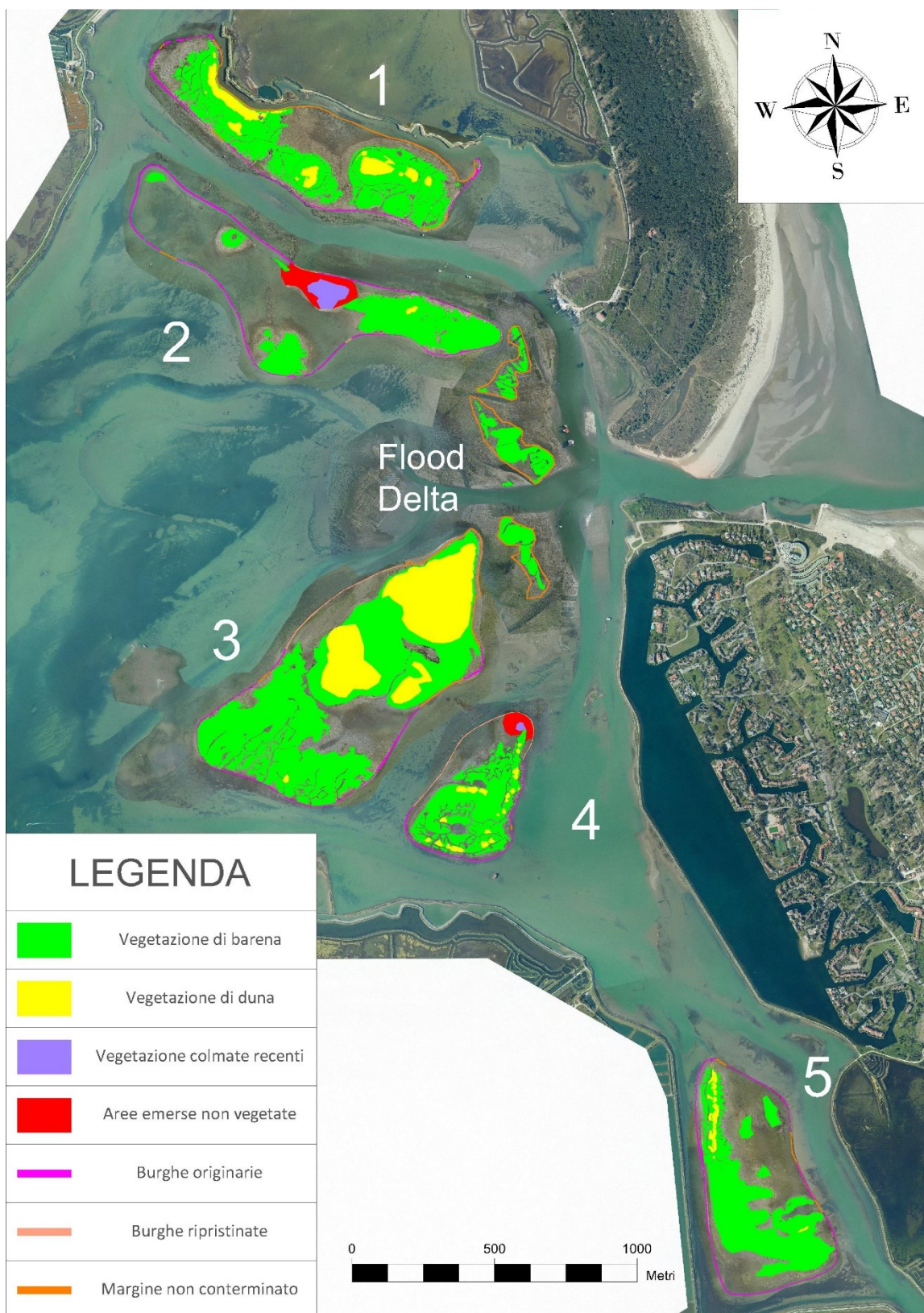


Fig. 1.2.9 - Mappatura semplificata vegetazionale della laguna di Caleri (settembre 2024)

Barena 1

Superficie	(ha)	Conterminazione	(km)
Vegetazione di duna	2.48	Burghe originarie	1.73
Vegetazione di barena	16.50	Burghe ripristinate	0.00
Vegetazione colmate recenti	0.00	Margine conterminato	1.73
Aree emerse non vegetate	0.00	Margine non conterminato	1.42
Aree sommerse non vegetate	13.63		
Area vegetata	18.99		
Area totale	32.62		

**Tab. 1.2.1 - Dati sull'estensione delle superfici e sullo sviluppo delle conterminazioni per la barena 1**

La barena 1 presenta una superficie totale di 32.62 ha, di cui 18.99 ha sono costituiti da area vegetata, 13.63 ha da area sommersa non vegetata, non è presente area emersa non vegetata. Nella superficie vegetata 16.50 ha sono relativi alla vegetazione di barena mentre 2.48 ha alla vegetazione di duna, non presenta vegetazione di colmate recenti. Questa barena presenta 1.73 km di conterminazioni realizzate in burghe originarie, non sono presenti burghe ripristinate, la lunghezza della zona non conterminata è di 1.42 km.



**Fig. 1.2.10 - Vegetazione di barena sulla barena 1**

Barena 2

Superficie	(ha)	Conterminazione	(km)
Vegetazione di duna	0.08	Burghe originarie	3.36
Vegetazione di barena	9.64	Burghe ripristinate	0.12
Vegetazione colmate recenti	1.13	Margine conterminato	3.48
Aree emerse non vegetate	1.60	Margine non conterminato	0.08
Aree sommerse non vegetate	26.97		
Area vegetata	10.84		
Area totale	37.81		

**Tab. 1.2.2 - Dati sull'estensione delle superfici e sullo sviluppo delle conterminazioni per la barena 2**

La barena 2 presenta una superficie totale di 37.81 ha, di cui 10.84 ha sono costituiti da area vegetata, 26.97 ha da area sommersa non vegetata, e 1.60 da area emersa non vegetata. Nella superficie vegetata 9.64 ha sono relativi alla vegetazione di barena, 0.08 ha alla vegetazione di duna, e 1.13 ha di vegetazione di colmate recenti. Questa barena presenta 3.48 km di conterminazioni, di cui 3.36 realizzate in burghe originari e 0.12 in burghe ripristinate, la lunghezza della zona non conterminata è di 0.08 km.



**Fig. 1.2.11 - Area emersa non vegetata sulla barena 2**

Barena 3

Superficie	(ha)	Conterminazione	(km)
Vegetazione di duna	13.38	Burghe originarie	1.73
Vegetazione di barena	30.99	Burghe ripristinate	0.57
Vegetazione colmate recenti	0.00	Margine conterminato	2.30
Aree emerse non vegetate	0.00	Margine non conterminato	1.05
Aree sommerse non vegetate	14.22		
Area vegetata	44.36		
Area totale	58.58		

**Tab. 1.2.3 - Dati sull'estensione delle superfici e sullo sviluppo delle conterminazioni per la barena 3**

La barena 3 presenta una superficie totale di 58.58 ha, di cui 44.36 ha sono costituiti da area vegetata, 14.22 ha da area sommersa non vegetata, non è presente area emersa non vegetata. Nella superficie vegetata 30.99 ha sono relativi alla vegetazione di barena mentre 13.38 ha alla vegetazione di duna, non presenta vegetazione di colmate recenti. Questa barena presenta 2.30 km di conterminazioni, di cui 1.73 km realizzate in burghe originarie 0.57 in burghe ripristinate, la lunghezza della zona non conterminata è di 1.05 km.



**Fig. 1.2.12 - Vegetazione di duna sulla barena 3**

Barena 4

Superficie	(ha)	Conterminazione	(km)
Vegetazione di duna	0.69	Burghe originarie	0.87
Vegetazione di barena	10.24	Burghe ripristinate	0.77
Vegetazione colmate recenti	0.10	Margine conterminato	1.64
Aree emerse non vegetate	0.70	Margine non conterminato	0.02
Aree sommerse non vegetate	5.97		
Area vegetata	11.02		
Area totale	17.00		

**Tab. 1.2.4 - Dati sull'estensione delle superfici e sullo sviluppo delle conterminazioni per la barena 4**

La barena 4 presenta una superficie totale di 17.00 ha, di cui 11.02 ha sono costituiti da area vegetata, 5.67 ha da area sommersa non vegetata, e 0.70 da area emersa non vegetata. Nella superficie vegetata 10.24 ha sono relativi alla vegetazione di barena, 0.69 ha alla vegetazione di duna, e 0.10 ha di vegetazione di colmate recenti. Questa barena presenta 1.64 km di conterminazioni, di cui 0.87 realizzate in burghe originarie 0.77 in burghe ripristinate, la lunghezza della zona non conterminata è di 0.02 km.



**Fig. 1.2.13 - Vegetazione di barena sulla barena 4**

Barena 5

Superficie	(ha)	Conterminazione	(km)
Vegetazione di duna	0.57	Burghe originarie	1.78
Vegetazione di barena	12.77	Burghe ripristinate	0.00
Vegetazione colmate recenti	0.00	Margine conterminato	1.78
Aree emerse non vegetate	0.00	Margine non conterminato	0.38
Aree sommerse non vegetate	18.22		
Area vegetata	13.34		
Area totale	31.55		

**Tab. 1.2.5 - Dati sull'estensione delle superfici e sullo sviluppo delle conterminazioni per la barena 5**

La barena 5 presenta una superficie totale di 31.55 ha, di cui 13.34 ha sono costituiti da area vegetata, 18.22 ha da area sommersa non vegetata, non è presente area emersa non vegetata. Nella superficie vegetata 12.77 ha sono relativi alla vegetazione di barena mentre 0.57 ha alla vegetazione di duna, non presenta vegetazione di colmate recenti. Questa barena presenta 1.78 km di conterminazioni realizzate in burghe originarie, non sono presenti burghe ripristinate, la lunghezza della zona non conterminata è di 0.38 km.



**Fig. 1.2.14 – Area di velma e vegetazione di barena sulla barena 5**

### Flood Delta

Oltre alle barene precedenti è stata considerata anche l'area di flood delta, quest'area è compresa fra la bocca di Caleri e le barene 2 e 3. È costituita esclusivamente da barene naturali, le uniche di questa tipologia presenti in laguna, in quanto, tutte le altre barene sono artificiali. La flora del flood delta è quella tipica di ambiente barenicolo, esso presenta una superficie totale suddivisa in varie barene di piccole dimensioni di circa 8.33 ha di cui 5.28 ha sono vegetati. Non presenta vegetazione di duna, di colmate recenti o aree emerse non vegetate, non sono inoltre presenti conterminazioni di alcun tipo.



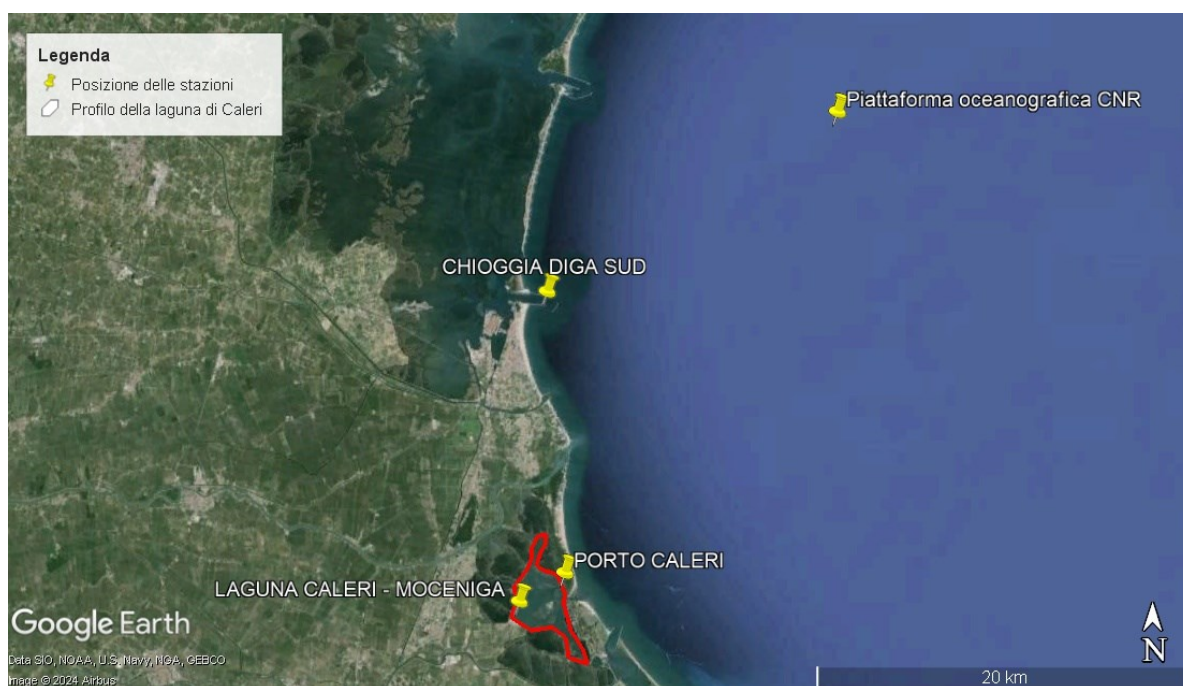
Fig. 1.2.15 - Vegetazione di barena nel Flood Delta

### **1.3 Analisi dei dati meteomarini per la laguna di Caleri**

All'interno del bacino della laguna sono presenti due stazioni meteo-mareografiche, situate rispettivamente presso il porticciolo vicino alla bocca (Porto Caleri) e in prossimità del margine interno della laguna (Caleri Moceniga). Entrambe le stazioni sono di proprietà di ISPRA e forniscono dati funzionali al monitoraggio di parametri significativi per la laguna. Nello specifico, vengono misurati i dati di livello a passo orario ogni cinque minuti per entrambe le stazioni, mentre per la stazione di Moceniga, di più recente installazione (agosto 2022), sono rilevati anche i dati relativi alla velocità e alla direzione del vento, periodo e altezza d'onda significativa, temperatura e piovosità. Nell'ambito di questa tesi sono stati valutati anche i dati meteomarini provenienti dalle stazioni ISPRA di Chioggia

diga Sud (livelli) e Piattaforma CNR (livelli, velocità e direzione del vento). Nella Fig. 1.3.1 è rappresentato il contorno del bacino lagunare ed è riportata la posizione delle stazioni in prossimità della laguna e in mare aperto.

La stazione meteo-mareografica di Caleri Moceniga è stata finanziata grazie al progetto INTERREG Italia-Croazia ADRIACLIM ed è attiva da agosto 2022. Si riporta infine, che i dati delle stazioni di Moceniga, Porto Caleri e Diga Sud Chioggia utilizzati ed elaborati in questa tesi, sono stati forniti sotto richiesta da ISPRA e non sono stati validati.



**Fig. 1.3.1 - Posizione delle stazioni di misura dei livelli.**

La propagazione della marea all'interno delle lagune è condizionata da molteplici fattori, che vanno dalla conformazione delle bocche di porto alla morfologia delle tipiche forme lagunari (canali, bassifondi, barene, velme). Procedendo dalle bocche comunicanti con il mare verso l'interno della laguna, il segnale che descrive l'oscillazione della superficie libera modifica la sua ampiezza e la sua forma e subendo allo stesso tempo un progressivo ritardo di fase. È da notare come l'attività antropica influenzi in modo non trascurabile il regime locale delle maree, la Laguna di Caleri a differenza di quella di Venezia presenta un grado di antropizzazione minore tanto che la bocca di porto è priva di dighe foranee. Le dinamiche mareali sono inoltre influenzate anche dalle variazioni morfologiche che la laguna ha subito nel tempo (come la riduzione della superficie delle barene e l'interrimento dei canali),



fenomeni legati in parte ai naturali processi di evoluzione dell'ambiente lagunare ma anche dovuti ad interventi antropici.

### 1.3.1 Regime Mareografico

La laguna di Caleri è caratterizzata da un regime mareografico semi-diurno con un'escursione media di circa 50 cm, che si amplificano fino a superare i 100 cm durante le fasi lunari di sizigia. La laguna è in comunicazione con l'Adriatico ad est mediante la bocca di Porto Caleri, mentre a sud comunica con la laguna di Vallona mediante il Varco Pozzatini.

L'escursione del livello di marea all'interno della laguna è influenzata principalmente dall'andamento del livello del mare davanti alle bocche che a sua volta dipende da più fattori. Il primo è la marea astronomica, essa può essere prevista con largo anticipo e determina il verificarsi di due colmi e due cavi nel corso della giornata (regime semidiurno). Il secondo fattore è relativo alla marea meteorologica, la quale a sua volta è causata da diverse componenti che agiscono sul livello del mare nell'alto Adriatico, di cui le principali sono il vento, le variazioni di pressione e le sesse. Nel nord Adriatico, in presenza di bassa pressione e vento il livello può innalzarsi anche di parecchie decine di centimetri; inoltre, la presenza delle sesse, che sono delle oscillazioni generate da rapide variazioni di vento e pressione, possono essere causa di sovralti ulteriori. Nel complesso, le variazioni di livello legate alla componente meteorologica della marea possono portare ad un sovralto che può arrivare fino al metro. Il livello di marea all'interno della laguna può essere a sua volta influenzato anche dall'azione del vento locale. Nello specifico, si possono generare delle differenze di livello fra le varie aree lagunari che possono arrivare anche a qualche decina di centimetri.

L'analisi dei dati mareografici è stata svolta raccogliendo alcune serie di registrazioni relative a stazioni mareografiche gestite dall'ISPRA, la cui posizione è indicata in Fig. 1.3.1. La Tab. 1.3.1 riassume le informazioni sui dati raccolti.

I dati di livello dei mareografi forniti dall'ISPRA sono basati sul riferimento dello Zero Mareografico di Punta della Salute a Venezia (1897), nel seguito indicato con l'acronimo ZMPS. I dati di livello graficati in questa tesi sono stati allineati al riferimento cartografico nazionale (livello medio del mare I.G.M. Genova 1942), di conseguenza è necessario apportare una correzione sottraendo il valore di 23.56 cm rispetto ai dati forniti.

<b>Nome</b>	Chioggia Diga Sud	Porto Caleri	Laguna Caleri - Moceniga
<b>Proprietario</b>	ISPRA	ISPRA	ISPRA
<b>Posizione</b>	Litorale Mare Adriatico	Laguna di Caleri	Laguna di Caleri
<b>Dato</b>	Livelli (Mareometro a galleggiante)	Livelli (Mareometro a galleggiante)	Livelli (Ondametro radar)
<b>Rif. Altimetrico</b>	ZMPS 1897	ZMPS 1897	ZMPS 1897
<b>Inizio Reg.</b>	1935	1907	2022
<b><math>\Delta t</math> registrazioni</b>	10 minuti	10 minuti	5 min
<b>Località</b>	Chioggia (VE)	Caleri (RO)	Caleri (RO)
<b>Coordinate</b>	Lat: 45° 13' 42,77" N Long: 12° 18' 45,96" E	Lat: 45° 05' 42,88" N Long: 12° 19' 31,33" E	Lat: 45° 04' 53,53" N Long: 12° 17' 41,36" E
<b>Ora</b>	UTC +01:00	UTC +01:00	UTC +01:00

Tab. 1.3.1 - Stazioni di misura dei livelli.

### 1.3.2 Regime Anemologico

L'azione del vento sulla superficie lagunare può determinare una variazione significativa dei livelli e modificare la circolazione delle correnti di marea. Risulta quindi di fondamentale importanza la determinazione del regime anemometrico locale, in modo da conoscere i venti più frequenti e quelli più intensi che interessano l'area di studio.

I dati di velocità e direzione del vento sono stati ricavati dalla stazione meteo-mareografica di Caleri Moceniga, i cui dettagli sono riportati nella Tab. 1.3.2. Come riportato in Fig. la stazione si trova all'estremità occidentale della laguna di Caleri, all'interno del suo perimetro.

Il livello della marea all'interno della laguna, come quello del mare, viene influenzato anche da fattori meteorologici, tra di essi i più rilevanti sono le variazioni di pressione atmosferica e il vento.

La pressione atmosferica è la forza esercitata dalla massa d'aria sulla superficie terrestre. Tale forza si estende anche ai mari e agli oceani, comprimendoli in maniera proporzionale alla sua intensità. In generale, per valori di bassa pressione atmosferica si ha un aumento del livello del mare, mentre valori di alta pressione ne causano un abbassamento, questo fenomeno è noto come effetto barometrico inverso. L'effetto del vento risulta invece di più complessa interpretazione e dipende dalla sua

intensità, direzione e durata, così come dalla conformazione e dall'ampiezza del corpo d'acqua su cui agisce. In generale, il vento tende ad insaccare le acque nel proprio verso di propagazione. I venti maggiormente significativi e in grado di generare i maggiori sovralti nell'Adriatico settentrionale sono lo Scirocco (settore 120 – 150 °N) e la Bora (settore 30 - 60°N).

<b>Nome</b>	Laguna Caleri - Moceniga
<b>Proprietario</b>	ISPRA
<b>Posizione</b>	Laguna di Caleri
<b>Dato</b>	Dati di velocità e direzione del vento in °N
<b>Int Reg.</b>	2/08/2022 - 20/11/2023
<b><math>\Delta t</math> registrazioni</b>	5 min
<b>Località</b>	Caleri (RO)
<b>Coordinate</b>	Lat: 45° 04' 53.53" N; Long: 12° 17' 41.36" E
<b>Ora</b>	UTC +01:00

Tab. 1.3.2 - Stazione di misura della velocità e direzione del vento.

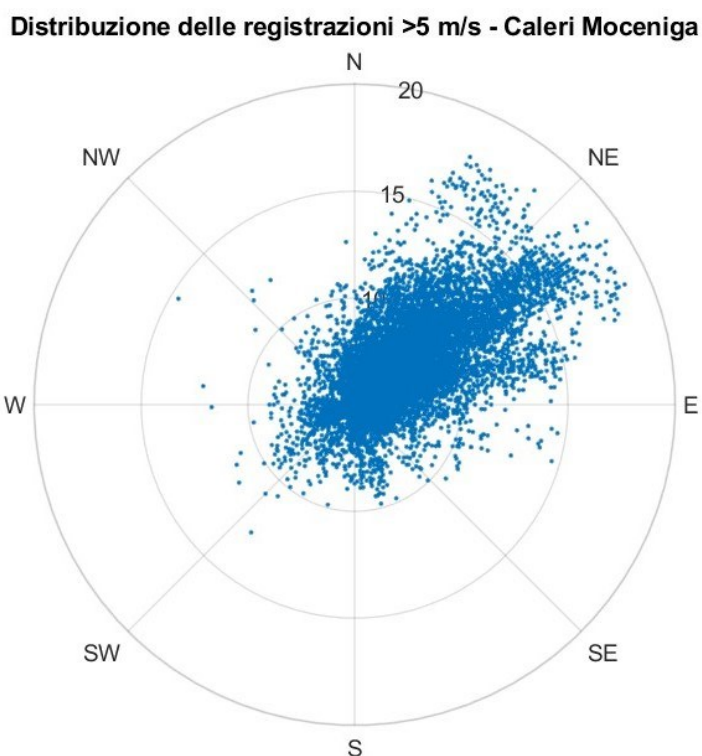


Fig. 1.3.2 - Distribuzione delle registrazioni di velocità e direzione del vento per Caleri Moceniga (2/08/2022 - 20/11/2023 –  $v \geq 5$  m/s).

La serie storica di Caleri Moceniga è disponibile da poco tempo (2/08/2022 - 20/11/2023) ma permette comunque di analizzare il regime anemometrico locale. L'analisi dei dati di intensità e direzione del vento, è stata rappresentata mediante un grafico radiale (Fig. 1.3.2), in cui viene rappresentata la distribuzione delle registrazioni della stazione filtrando i periodi di calma. Da un grafico polare (Fig. 1.3.3) in cui vengono rappresentati direzione e velocità del vento e dalla Tab. Per tutti i grafici l'analisi è stata eseguita escludendo le registrazioni con calma di vento. A tale scopo sono state considerate solo le registrazioni con velocità di vento  $\geq 5.0$  m/s

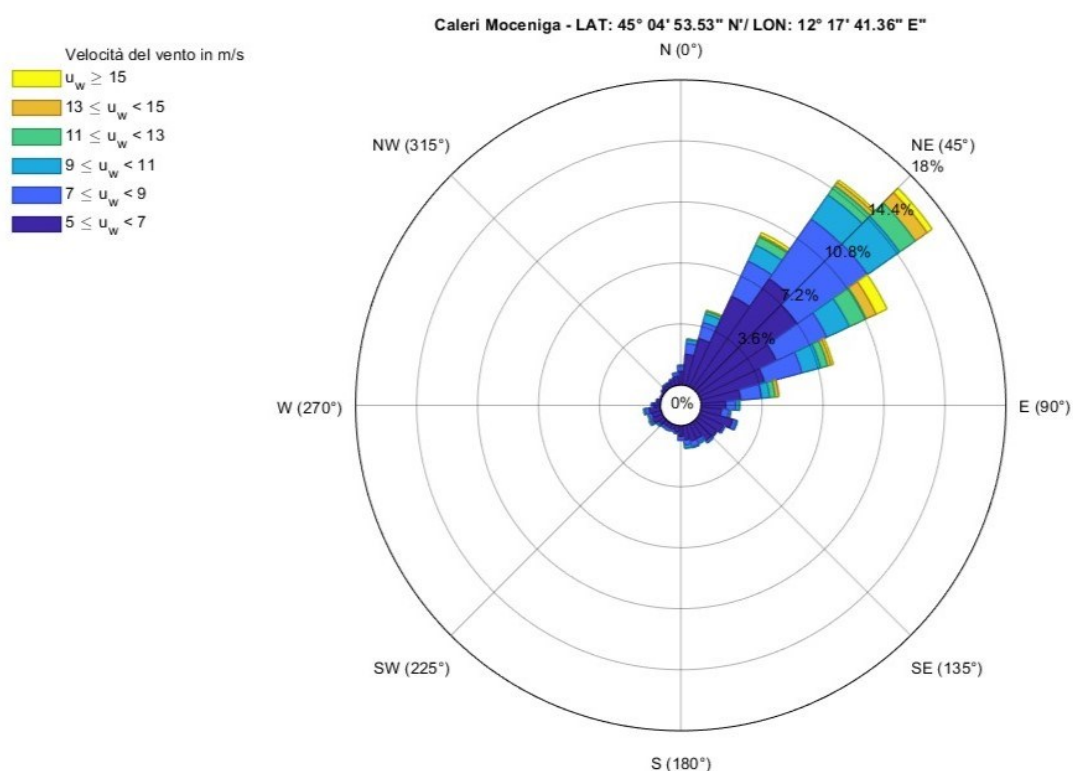


Fig. 1.3.3 - Clima anemometrico alla stazione di Caleri Moceniga (2/08/2022 - 20/11/2023 –  $v \geq 5$  m/s)

Direzione		Velocità del vento (m/s)						Frequenza (%)
Dir. (°N)	Dir. Media	[5, 7)	[7, 9)	[9, 11)	[11, 13)	[13, 15)	[15, Inf)	TOTALE
[355, 5)	0	0.80	0.31	0.06	0.01	0.00	0.00	1.18
[5, 15)	10	1.82	0.64	0.21	0.06	0.01	0.00	2.74
[15, 25)	20	2.87	0.98	0.51	0.17	0.04	0.05	4.62
[25, 35)	30	5.89	2.29	1.05	0.53	0.10	0.19	10.06
[35, 45)	40	7.90	4.31	1.74	0.67	0.25	0.16	15.04
[45, 55)	50	7.17	5.09	2.31	1.14	0.85	0.38	16.93
[55, 65)	60	5.03	3.28	1.47	1.09	0.65	0.72	12.24
[65, 75)	70	3.92	2.29	1.15	0.42	0.21	0.14	8.14
[75, 85)	80	2.34	1.22	0.50	0.32	0.22	0.02	4.63
[85, 95)	90	1.46	0.59	0.20	0.05	0.01	0.00	2.30
[95, 105)	100	1.21	0.43	0.11	0.02	0.03	0.00	1.80
[105, 115)	110	1.98	0.23	0.06	0.02	0.00	0.00	2.28
[115, 125)	120	1.56	0.11	0.04	0.00	0.00	0.00	1.71
[125, 135)	130	1.38	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	1.45
[135, 145)	140	1.34	0.13	0.06	0.01	0.00	0.00	1.54
[145, 155)	150	0.99	0.20	0.12	0.00	0.00	0.00	1.31
[155, 165)	160	0.99	0.35	0.06	0.00	0.00	0.00	1.40
[165, 175)	170	0.85	0.31	0.17	0.04	0.00	0.00	1.37
[175, 185)	180	0.63	0.23	0.03	0.00	0.00	0.00	0.88
[185, 195)	190	0.37	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.50
[195, 205)	200	0.28	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.43
[205, 215)	210	0.27	0.19	0.03	0.00	0.00	0.00	0.49
[215, 225)	220	0.27	0.14	0.06	0.00	0.00	0.00	0.47
[225, 235)	230	0.37	0.13	0.08	0.02	0.00	0.00	0.60
[235, 245)	240	0.64	0.14	0.07	0.04	0.02	0.00	0.91
[245, 255)	250	0.56	0.19	0.04	0.03	0.02	0.00	0.84
[255, 265)	260	0.65	0.25	0.06	0.06	0.00	0.00	1.02
[265, 275)	270	0.41	0.11	0.01	0.02	0.00	0.00	0.55
[275, 285)	280	0.22	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27
[285, 295)	290	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
[295, 305)	300	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
[305, 315)	310	0.18	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23
[315, 325)	320	0.26	0.09	0.00	0.01	0.00	0.00	0.36
[325, 335)	330	0.26	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.34
[335, 345)	340	0.36	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.45
[345, 355)	350	0.53	0.17	0.05	0.00	0.00	0.00	0.75
[0, 360)	<b>Totale</b>	55.90	24.97	10.30	4.73	2.43	1.66	100.00

Tab. 1.3.3 - Distribuzione della velocità del vento  $\geq 5$  m/s per classi d'intensità e settori di provenienza (2/08/2022 - 20/11/2023 -  $v \geq 5$  m/s)

L'analisi è stata eseguita considerando solo le registrazioni di vento con intensità  $\geq 5.0$  m/s, registrate presso la stazione di Caleri Moceniga. Nel periodo di registrazione considerato (2/08/2022 – 20/11/23) sono stati misurati 136912 dati, di questi il 18.46 % sono relativi a venti con intensità  $\geq 5.0$  m/s mentre il restante 81.54 % è costituito da brezze e da calma di vento. Il regime anemometrico di intensità  $\geq 5.0$  m/s è rappresentato per il 78.18 % da venti provenienti dal primo quadrante (N, NE, E) e per il 21.82 % dai venti provenienti dagli altri quadranti. Il vento maggiormente significativo e in grado di provocare rialzi nella laguna è quello di bora che corrisponde al 54.27 % delle registrazioni (settore 25 - 65°N - Tab. ).

Come si è detto, l'Adriatico settentrionale è caratterizzato da due venti principali, la Bora e lo Scirocco, che soffiano rispettivamente da Nord-Est e da Sud-Est. Entrambi questi venti possono generare delle gravose combinazioni di onde e livelli che causano fenomeni di erosione costiera e ingressione marina lungo le coste del Veneto. Nel caso della Laguna di Caleri, in base ai dati disponibili, il settore prevalente come frequenza ed intensità risulta essere quello di Bora. La massima velocità registrata nel periodo 2/08/2022 – 20/11/2023 è di 19.04 m/s, ed è relativa ad un episodio del 26/02/2023, con vento di direzione di 57 °N.

Con lo scopo di confrontare il regime anemometrico all'interno della laguna di Caleri e in mare aperto è stato considerato l'evento in cui sono state registrate le maggiori velocità di vento, ovvero il giorno 26/02/2023. Per questo confronto viene graficato il clima anemometrico registrato sia dalla stazione di Caleri Moceniga che dalla Piattaforma CNR, considerando un intervallo temporale che va dalle 12:00 del 25/02/23 alle 12:00 del 27/02/23. L'analisi è stata eseguita considerando solo le registrazioni di vento con intensità  $\geq 5.0$  m/s per entrambe le stazioni, in modo da escludere le calme di vento.

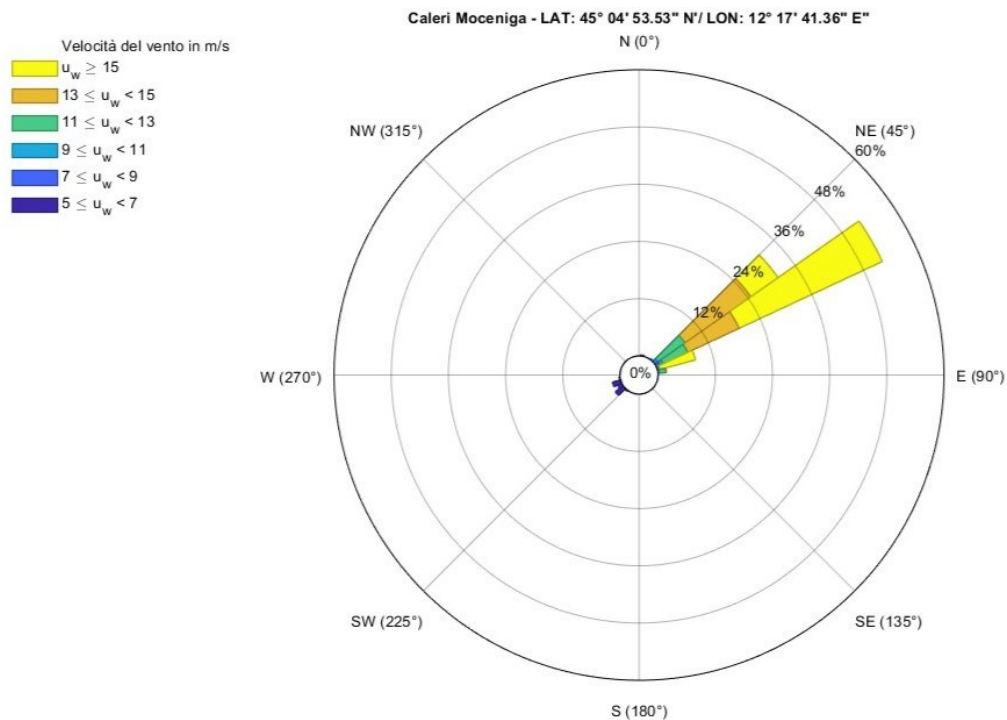


Fig. 1.3.4 - Clima anemometrico alla stazione di Caleri Moceniga (25/02/23-27/02/23)

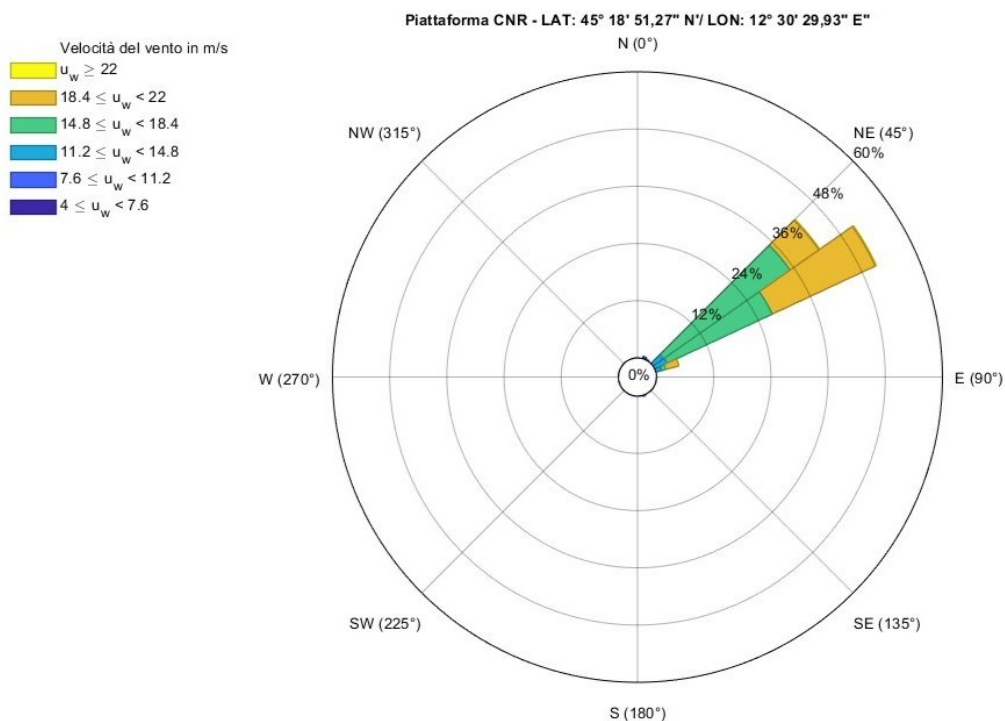


Fig. 1.3.5 - Clima anemometrico alla stazione di Piattaforma CNR (25/02/23-27/02/23)

Piattaforma CNR è situata a circa 8 miglia al largo del litorale di Venezia, in uno specchio di mare avente una profondità di circa 16 m. Dispone di un anemometro ad ultrasuoni per la registrazione dei dati di velocità e direzione del vento; la posizione della stazione la rende ottimale per valutare il regime del vento in mare aperto. Da un confronto visivo dei grafici in Fig. e Fig. , risulta evidente come la maggior parte delle registrazioni siano relative a venti che provengono dal primo quadrante per entrambe le stazioni (99.76% per Piattaforma CNR, 94.30% per Moceniga). Nel corso dell'evento si verificano velocità di vento maggiori in mare aperto, rispetto alla laguna. Se si considerano le registrazioni di vento con velocità  $\geq 15.0$  m/s queste corrispondono al 92.36% delle registrazioni totali per Piattaforma CNR e al 77.20% per Moceniga. La massima velocità registrata nel periodo 25/02/23-27/02/23 per Piattaforma CNR è di 23.00 m/s, con direzione di 58 °N (Bora), superiore del 17.22% alla massima velocità registrata a Moceniga, pari a 19.04 m/s, con direzione 57 °N (Bora).

### 1.3.3 Regime Ondametrico

Per la descrizione dei parametri di periodo ed altezza d'onda significativa, è stata considerata la serie di dati disponibile per la stazione di Caleri Moceniga. Nella Tab. 1.3.4 sono riassunte le informazioni sulla stazione e sui dati raccolti. Nella Fig. 1.3.1 si riporta la posizione della stazione.

<b>Nome</b>	Laguna Caleri - Moceniga
<b>Proprietario</b>	ISPRA
<b>Posizione</b>	Laguna di Caleri
<b>Dato</b>	Hs e Periodo (Ondametro radar)
<b>Int Reg.</b>	2/08/2022 - 20/11/2023
<b><math>\Delta t</math> registrazioni</b>	5 min
<b>Località</b>	Caleri (RO)
<b>Coordinate</b>	Lat: 45° 04' 53.53" N; Long: 12° 17' 41.36" E
<b>Ora</b>	UTC +01:00

**Tab. 1.3.4 – Caratteristiche della stazione ondometrica Caleri Moceniga**

L'altezza significativa delle onde, misurata in metri (m), rappresenta la media delle altezze del terzo delle onde più alte, quando queste sono registrate e ordinate in ordine crescente. Questa misura dovrebbe riflettere l'altezza percepita da un osservatore senza strumenti, rendendola facilmente comprensibile e interpretabile. L'altezza d'onda significativa, nota anche come  $H_{1/3}$  o  $H_s$ , viene



determinata mediante un'analisi nel dominio dei tempi direttamente dalla serie storica dell'elevazione della superficie, la formulazione usata è la seguente:

$$H_{1/3} = \frac{1}{\frac{1}{3}N} \sum_{m=1}^{\frac{1}{3}N} H_m$$

Nella formula  $N$  rappresenta la numerosità totale del campione di onde esaminato,  $H_m$  l'altezza individuale delle singole onde, disposte in ordine decrescente al tendere di  $m$  da 1 ad  $N$ . La distribuzione statistica delle singole altezze d'onda è ben approssimata dalla distribuzione statistica di Rayleigh, di conseguenza è possibile valutare l'altezza d'onda significativa a partire da considerazioni statistiche. Con riferimento alla curva che descrive la distribuzione, bisogna considerare la porzione della pdf (probability density function) che rappresenta il 33% delle onde di altezza maggiore, l' $H_s$  è il valor medio di queste onde, ovvero il valore centrale della porzione della curva considerata.

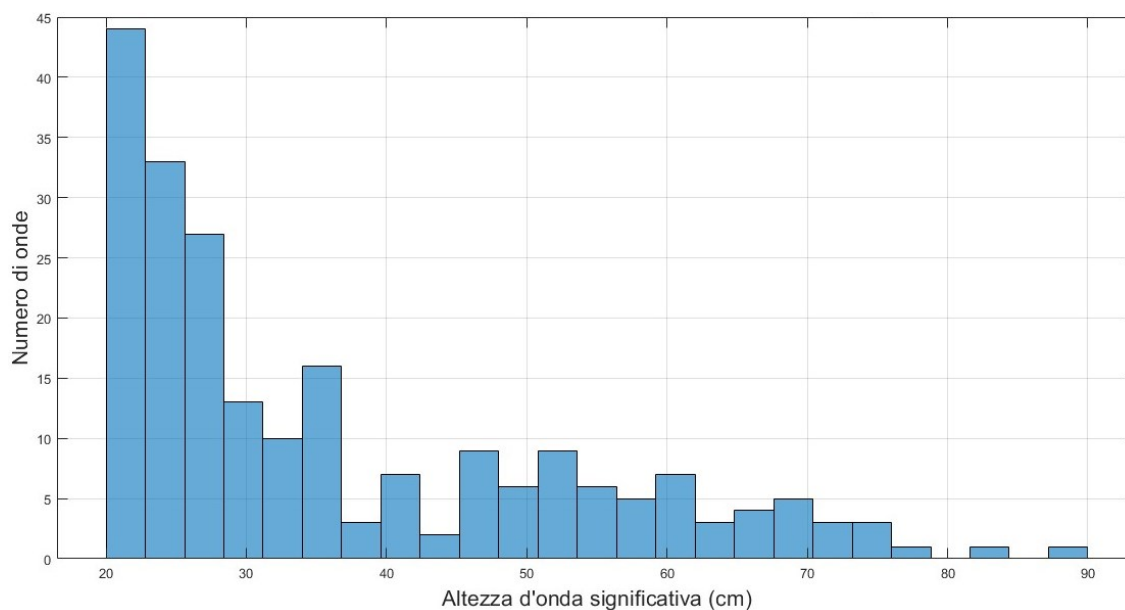
In questo capitolo si rappresentano, in seguito, i parametri relativi all'altezza d'onda significativa e al periodo misurati per la stazione di Moceniga. L'obiettivo di questa tesi è dimostrare che il modello accoppiato (2DEF+SWAN), è in grado di riprodurre correttamente l'altezza delle onde in presenza di eventi significativi, in corrispondenza della stazione di Moceniga. Un evento può essere considerato significativo se caratterizzato da velocità del vento superiori a 15 m/s, verranno quindi considerati valori di altezza d'onda significativa che tengano conto del campo perturbato.

I dati disponibili registrati dalla stazione di Moceniga sono stati forniti con un passo temporale di cinque minuti. Al fine di renderli idonei per eseguire delle simulazioni con il modello accoppiato di moto ondoso, si è resa necessaria un'elaborazione preliminare per ricostruire un serie a passo orario. Le registrazioni originali (136917 dati), relative a dati di velocità e direzione del vento, periodo e altezza d'onda significativa e livello sono state elaborate mediante una media mobile a 13 valori (60 minuti) ed in seguito ricampionate a passo orario (11409 dati).

La stazione registra l'altezza d'onda e il periodo mediante ondometro radar, la frequenza di campionamento è di 4 Hz. Ogni dato viene elaborato in un intervallo di registrazione di cinque minuti, durante questo intervallo di tempo le singole onde vengono estratte dalla registrazione con un processo di zero down crossing, sono poi escluse le letture relative all'onda più alta e più bassa. L'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) è calcolata come la media aritmetica del terzo delle onde più alte registrate durante l'intervallo di osservazione.

Dai dati ricavati dalla stazione di Moceniga si riporta la distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'intervallo temporale che va dal 2/08/2022 al 20/11/23. I dati ottenuti dalla stazione di sono stati filtrati, valutando solo eventi significativi ( $H_s \geq 20 \text{ cm}$ ). Considerando un totale di 11409 registrazioni, i dati esaminati ammontano a 218, ovvero l'1.91 % del totale.

Dal grafico in Fig. 1.3.6 è possibile notare come l'altezza d'onda significativa maggiormente presente in laguna si attesti in un intervallo compreso fra 0.20-0.23 m. Durante il periodo di osservazione compreso tra il 2 agosto 2022 e il 20 novembre 2023, l'altezza d'onda significativa rilevata all'interno della laguna è costantemente rimasta al di sotto dei 90 cm, persino durante gli eventi più rilevanti. La mancanza di registrazioni significative è attribuibile sia alle dinamiche interne della laguna, dove il moto ondoso nella parte orientale si mantiene a livelli modesti, sia alla scarsità complessiva dei dati a disposizione, dovuta alla recente installazione della stazione di monitoraggio a Moceniga.



**Fig. 1.3.6 - Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per la stazione di Caleri Moceniga (2/08/2022-20/11/23)**

Dai dati ricavati dalla stazione di Moceniga è possibile fare una considerazione sulla distribuzione del periodo medio dell'onda ( $T_0$ ) per l'intervallo temporale che va dal 2/08/2022 al 20/11/22. La stazione registra il periodo mediante ondometro radar, la frequenza di campionamento è di 10 Hz. Ogni dato viene elaborato in un intervallo di registrazione di cinque minuti, durante questo intervallo di tempo le singole onde vengono estratte dalla registrazione con un processo di zero down crossing.

Il singolo dato di periodo viene calcolato attraverso la media aritmetica dei periodi delle singole onde registrate nei cinque minuti di campionamento.

I dati analizzati sono stati filtrati non considerando i periodi di calma, ovvero per periodi di durata inferiore 0.4 s. Considerando un totale di 11409 registrazioni, i dati esaminati ammontano a 11366, ovvero il 99.62 % del totale. Dalle registrazioni a disposizione il periodo d'onda maggiormente presente in laguna si attesta in un intervallo compreso fra 1.6-1.8 s, corrispondente al 23.20 % delle registrazioni totali.

Con l'obiettivo di mostrare la correlazione presente fra la velocità del vento e l'altezza d'onda significativa, è stato realizzato un grafico a dispersione (Fig. 1.3.7) in cui vengono confrontate tutte le registrazioni per questi due parametri, ricavate dalla stazione di Moceniga. I dati sono stati elaborati mediante una media mobile a 13 valori (60 min) e con ricampionamento ogni ora, alla distribuzione è stato associato un approssimante in forma esponenziale ottenuto mediante software Matlab, che fornisce una buona rappresentazione dell'altezza d'onda significativa per valori elevati di velocità del vento ( $W_s \geq 8 \text{ m/s}$ ).

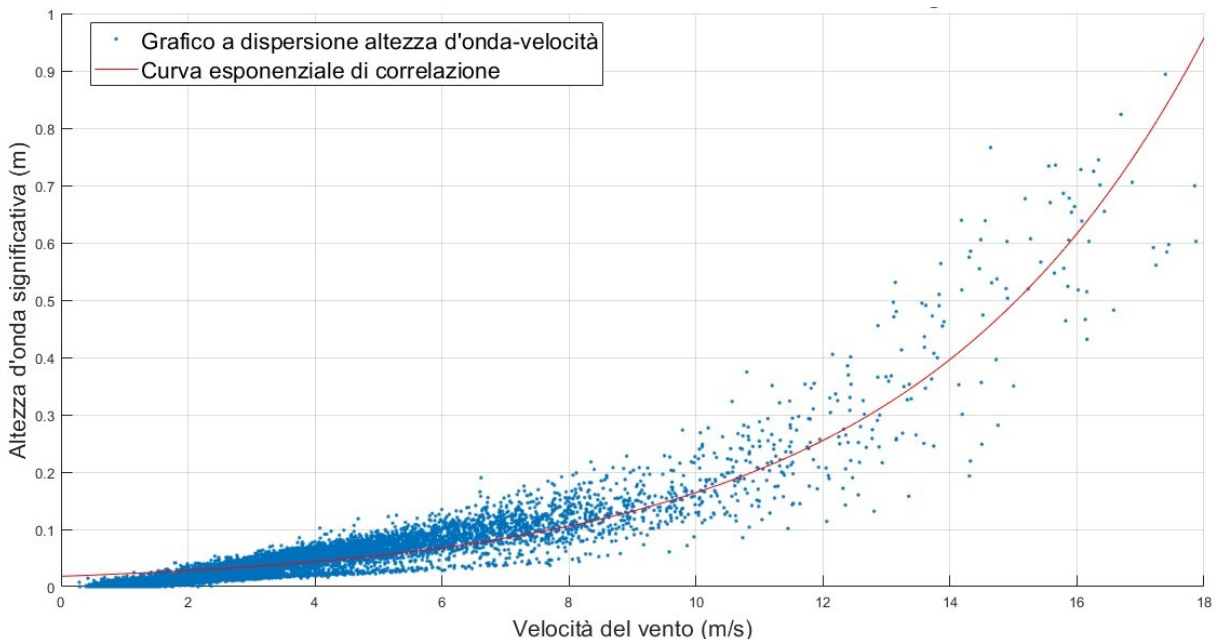
L'approssimante ha una forma del tipo:

$$y(x) = ae^{bx}$$

Con  $y$  che equivale all'altezza d'onda significativa,  $x$  alla velocità del vento mentre  $a$  e  $b$  sono dei coefficienti riportati in seguito:

Coefficienti (con limiti di confidenza del 95%)		
<b>a</b>	0.0182	(0.01788, 0.01839)
<b>b</b>	0.2209	(0.2192, 0.2215)

Tab. 1.3.5 - Coefficienti dell'approssimante esponenziale



**Fig. 1.3.7 - Correlazione fra velocità del vento e altezza d'onda significativa**

Con lo scopo di valutare la correlazione fra periodo medio dell'onda e altezza d'onda significativa, è stato realizzato un grafico a dispersione (Fig. 1.3.8) in cui vengono confrontate tutte le registrazioni per questi due parametri, ricavate dalla stazione di Moceniga. I dati sono stati elaborati mediante una media mobile a 13 valori (60 min) e con ricampionamento ogni ora. Sono stati considerate solo  $H_s \geq 0.2 \text{ m}$ , in modo da considerare solo gli eventi significativi.

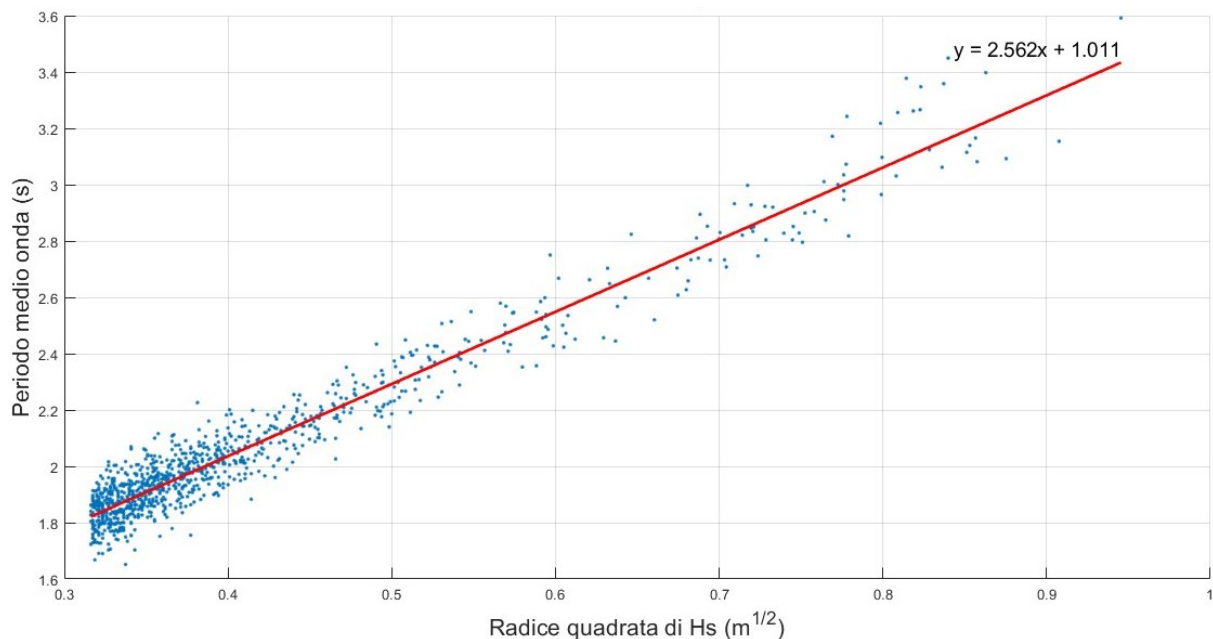
Alla distribuzione è stato associato un approssimante in forma polinomiale ottenuto mediante software Matlab, che fornisce i coefficienti di regressione A e B per descrivere la relazione fra periodo medio e altezza d'onda significativa:

$$T_0 = A + B\sqrt{H_s}$$

I coefficienti di regressione sono riportati in seguito:

Coefficienti	
A	1.011
B	2.562

**Tab. 1.3.6 - Coefficienti dell'approssimante polinomiale**



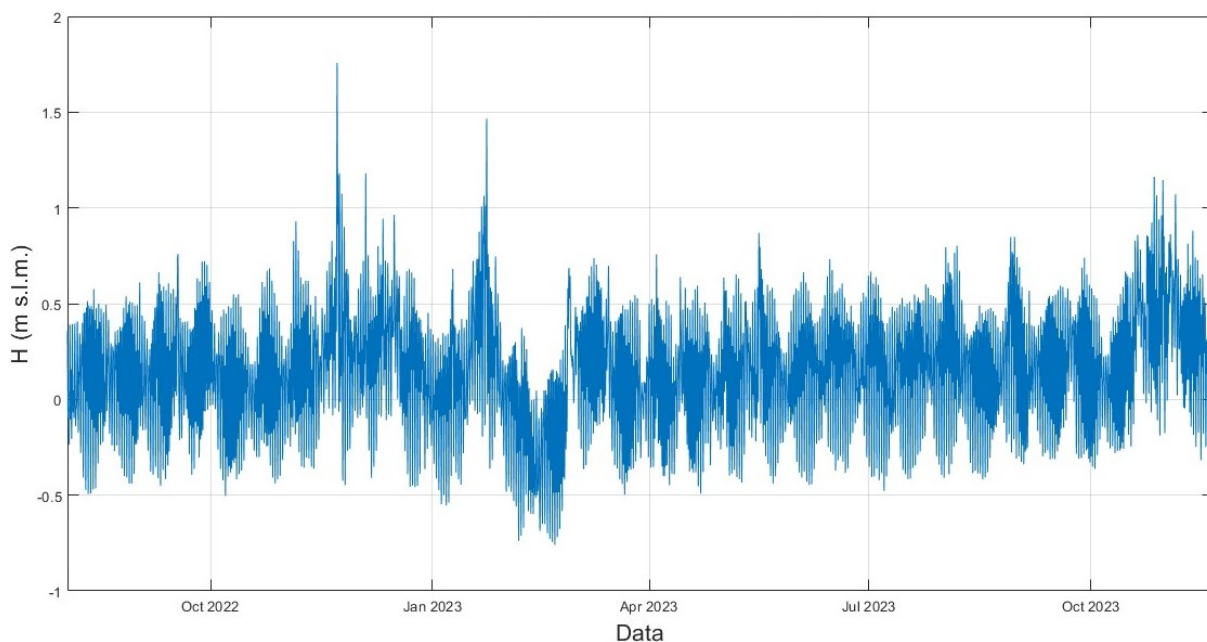
**Fig. 1.3.8 - Correlazione fra periodo medio d'onda e radice quadrata di Hs.**

#### 1.3.4 Eventi meteomarini significativi registrati nella laguna di Caleri

Il livello del mare a Diga Sud Chioggia è pressoché identico al livello del mare davanti alla bocca di porto Caleri. Tuttavia, la marea, propagandosi all'interno della laguna, subisce un ritardo rispetto al livello esterno a causa della strozzatura della bocca di porto che limita il flusso d'acqua entrante. Mentre il livello in mare si alza, sia a Diga Sud che davanti a porto Caleri, l'acqua inizia ad entrare in laguna, questo innalzamento del livello interno, però, avviene in ritardo rispetto all'esterno. Se il livello in mare inizia ad abbassarsi, dopo un certo tempo si ha un abbassamento del livello a porto Caleri. L'andamento del livello misurato nelle stazioni all'interno della laguna manifesta gli stessi picchi e gli stessi cavi dei mareografi in mare ma con un sistematico ritardo. Tra il mare davanti a porto Caleri e Diga Sud, non ci sono differenze significative di livello, in quanto la propagazione della marea avviene quasi istantaneamente senza incontrare resistenze. All'interno della laguna, invece, il livello a porto Caleri coincide pressoché con quello di Moceniga in assenza di vento. In situazioni ventose si possono instaurare significative differenze di livello all'interno e all'esterno della laguna, di conseguenza si rende necessario utilizzare un modello idrodinamico e di moto ondoso, per poter stimare il livello, oltre che altri parametri significativi all'interno della laguna.

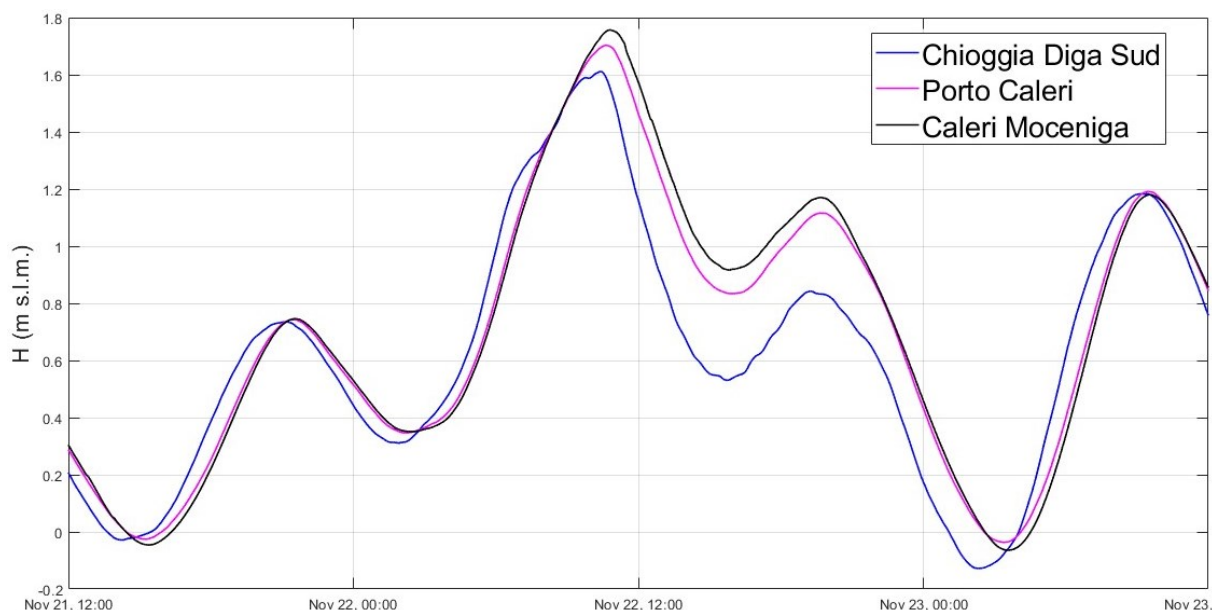
Utilizzando la serie storica disponibile per la stazione di Caleri Moceniga (2/08/2022 – 20/11/23) è possibile ricostruire l'andamento del livello idrometrico, come rappresentato in Fig. 1.3.9. Con lo scopo

di rappresentare le condizioni meteorologiche più gravose, avvenute all'interno della laguna, vengono distinti i due eventi di entità maggiore avvenuti durante il periodo d'osservazione (2/08/2022 - 20/11/23). Essi corrispondono a due picchi di livello che è possibile distinguere visivamente, relativi agli eventi avvenuti in data 22/11/2022 e 23/01/2023.



**Fig. 1.3.9 - Livello misurato a Caleri Moceniga (2/08/2022 – 20/11/23)**

Per analizzare il primo evento (22 novembre 2022), è stato considerato l'intervallo temporale fra le 12:00 del 21/11/2022 e le 12:00 del 23/11/2022. Sono stati presi in esame i dati di livello delle stazioni di Chioggia Diga Sud, Porto Caleri e di Caleri Moceniga, le cui caratteristiche sono riportate in Tab. 1.3.1 e la posizione in Fig. 1.3.1.



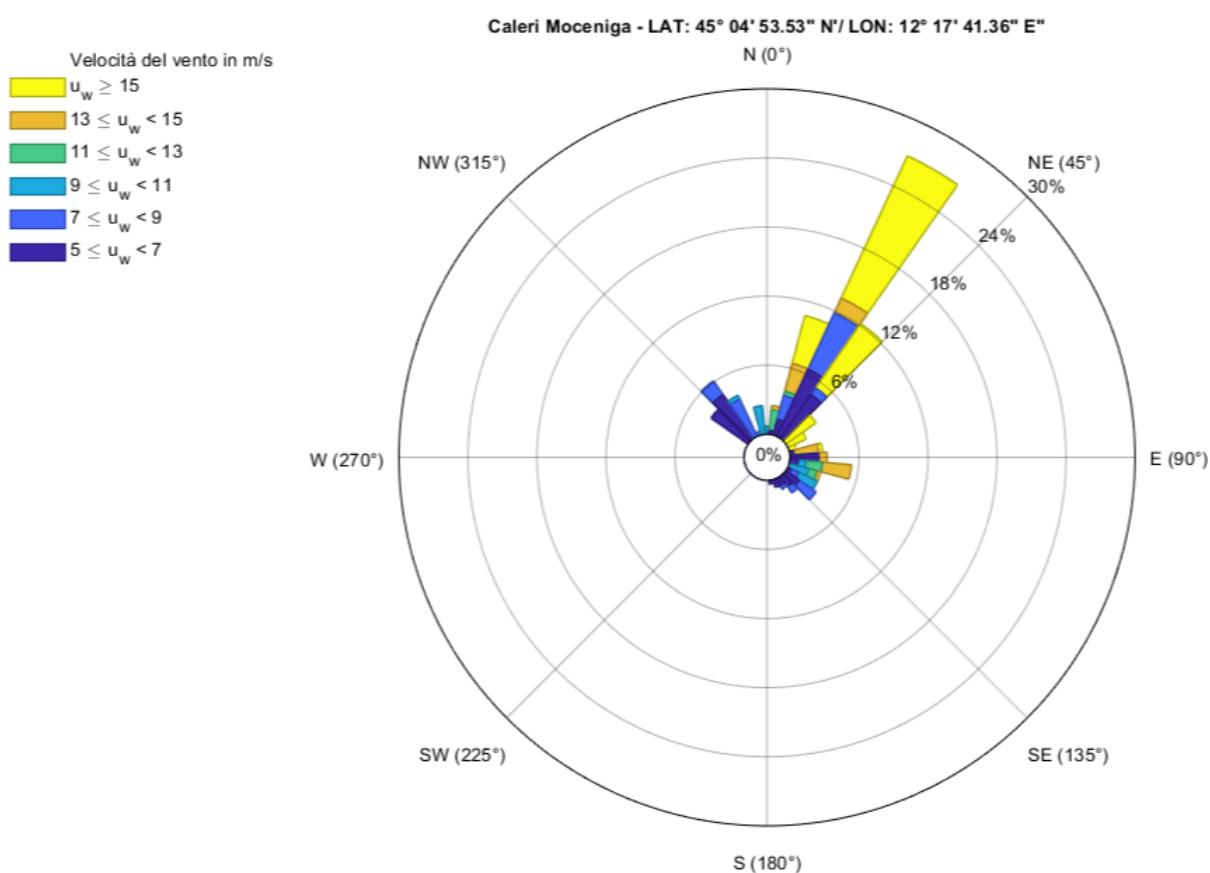
**Fig. 1.3.10 - Confronto serie di livelli misurati a Chioggia Diga Sud, Porto Caleri e Caleri Moceniga durante l'evento di novembre 2022 (riferimento IGM).**

Nel grafico di Fig. 1.3.10 viene riportato l'andamento del livello per le stazioni di Chioggia Diga Sud, Porto Caleri e di Caleri Moceniga. I dati di livello originari sono stati elaborati mediante una media mobile a tredici valori (60 min). Dal grafico si evince che il livello massimo del mareografo di Chioggia Diga Sud (1.61 m) viene raggiunto il giorno 22 alle ore 10:25; ad esso segue il mareografo di Porto Caleri con un livello di 1.70 m alle 10:40 e infine il mareografo di Caleri Moceniga con un valore di 1.75 m alle ore 10:45. Il minimo per Chioggia Diga Sud viene raggiunto alle ore 02:20 del giorno 23 con un valore di -0.12 m; il minimo per Porto Caleri viene raggiunto alle ore 03:25 con un valore di -0.04 m, mentre per Caleri Moceniga alle 03:35 con un valore di -0.06 m.

Dato che l'andamento del livello registrato dal mareografo di Chioggia Diga Sud rappresenta bene le condizioni del livello del mare all'esterno della laguna, si può concludere che le variazioni del livello in mare sono sistematicamente in anticipo rispetto ai livelli misurati all'interno della laguna. I livelli misurati dai mareografi di Porto Caleri di Caleri Moceniga, essendo entrambi situati all'interno della laguna, presentano un andamento molto simile tra loro. Le differenze di livello sono in questo caso legate alla presenza del vento (Fig. 1.3.11) e agli effetti della propagazione del moto ondoso all'interno della laguna.

Per questo evento viene riportata in un grafico polare (Fig. 1.3.11) la distribuzione delle registrazioni relative alla velocità ( $W_s$ ) e alla direzione del vento. Questi dati sono stati ottenuti a partire dalla stazione di Caleri Moceniga considerando l'intervallo temporale fra le ore 12:00 del

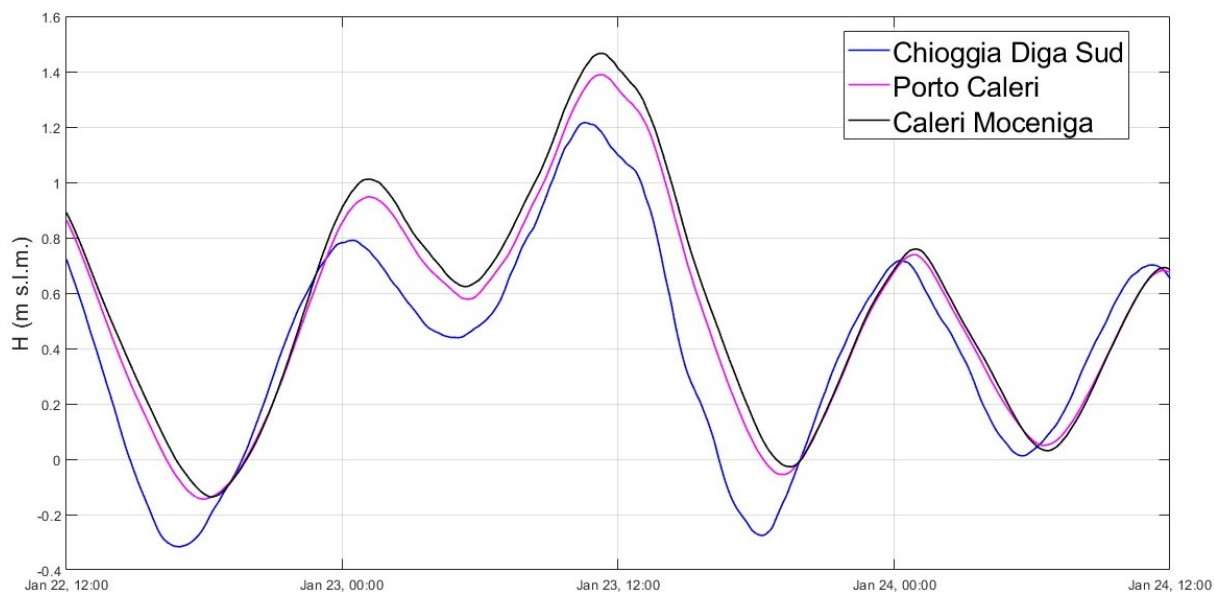
21/11/2022 e le 12:00 del 23/11/2022. Lo scopo è quello di rappresentare la distribuzione direzionale del regime anemometrico durante questo evento. Dai dati originali sono state escluse le calme di vento, ossia considerando solo valori di  $W_s \geq 5 \text{ m/s}$ . Si ottiene che il regime dei venti è rappresentato per il 64.16% da venti provenienti dal primo quadrante (N, NE, E), e per il 35.84% da venti provenienti dagli altri quadranti. La velocità di vento più frequente è quella della classe 5 – 7 m/s (30% delle registrazioni totali). La massima velocità registrata nel periodo è di 18.70 m/s relativa ad un evento di vento con direzione di 57 °N (Bora).



**Fig. 1.3.11 - Distribuzione della velocità del vento  $\geq 5 \text{ m/s}$  per classi d'intensità e settori di provenienza durante l'evento di novembre 2022 (riferimento IGM).**

Per analizzare il secondo evento (23 gennaio 2023), è stato considerato l'intervallo temporale fra le 12:00 del 22/01/2023 e le 12:00 del 24/01/2023. Sono stati presi in esame i dati di livello delle stazioni di Chioggia Diga Sud, Porto Caleri e di Caleri Moceniga, le cui caratteristiche sono riportate in Tab. 1.3.1 e la posizione in Fig. 1.3.1.





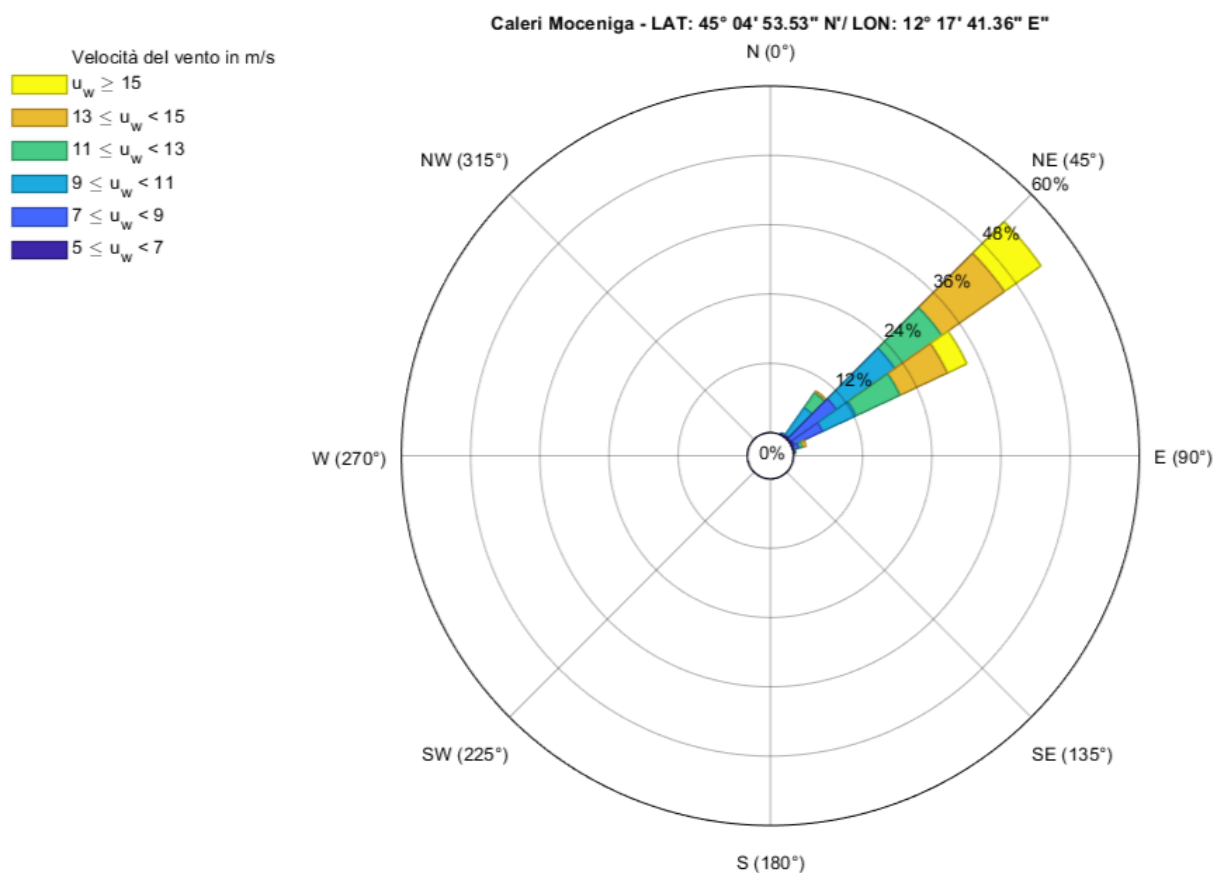
**Fig. 1.3.12 - Confronto serie di livelli misurati a Chioggia Diga Sud, Porto Caleri e Caleri Moceniga durante l'evento di gennaio 2023**

Nel grafico di Fig. 1.3.12 viene riportato l'andamento del livello per le stazioni di Chioggia Diga Sud, Porto Caleri e di Caleri Moceniga. I dati di livello originari sono stati elaborati mediante una media mobile a tredici valori (60 min). Dal grafico si evince che il livello massimo del mareografo di Chioggia Diga Sud (1.22 m) viene raggiunto il giorno 23 alle ore 10:35; ad esso segue il mareografo di Porto Caleri con un livello di 1.40 m alle 11:15 e infine il mareografo di Caleri Moceniga con un valore di 1.47 m alle ore 11:15. Il minimo per Chioggia Diga Sud viene raggiunto alle ore 18:15 del giorno 23 con un valore di -0.28 m; il minimo per Porto Caleri viene raggiunto alle 19:10 con un valore di -0.05 m mentre per Caleri Moceniga alle 19:30 con un valore di -0.03 m.

Come menzionato in precedenza, l'andamento del livello registrato dal mareografo di Chioggia Diga Sud rappresenta bene le condizioni del livello del mare all'esterno della laguna, si può concludere che le variazioni del livello in mare sono sistematicamente in anticipo rispetto ai livelli misurati all'interno della laguna. I livelli misurati dai mareografi di Porto Caleri di Caleri Moceniga, essendo entrambi situati all'interno della laguna, presentano un andamento molto simile tra loro. Le differenze di livello sono in questo caso legate alla presenza del vento (Fig. 1.3.11) e agli effetti della propagazione del moto ondoso all'interno della laguna.

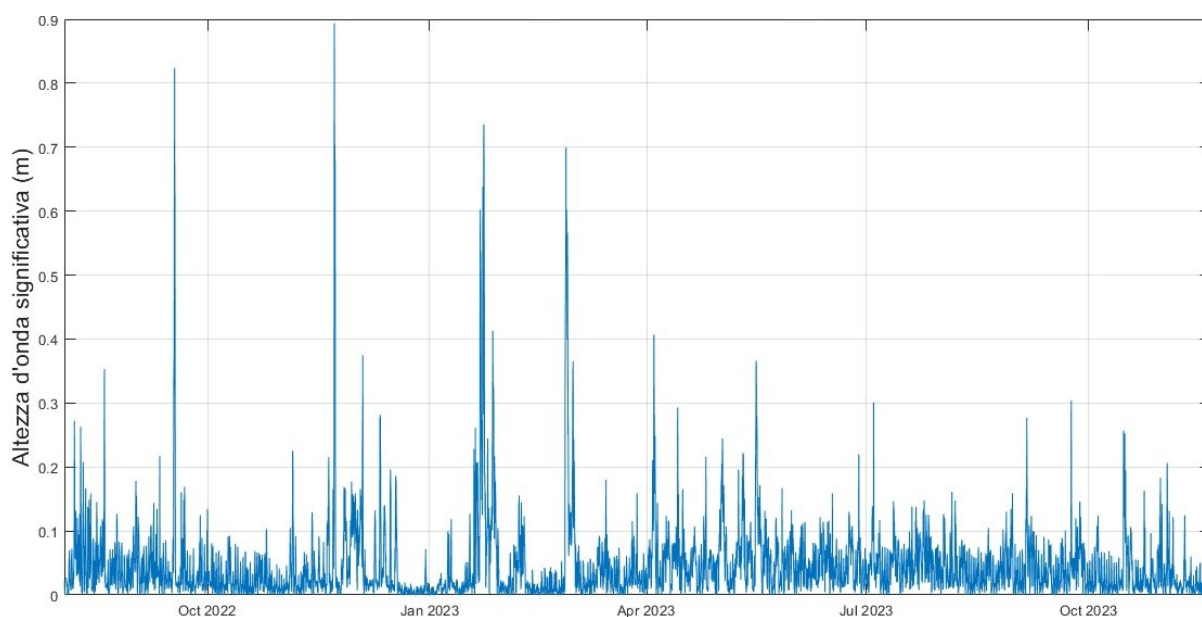
Per questo evento viene riportata in un grafico polare (Fig. 1.3.13) la distribuzione delle registrazioni relative alla velocità ( $W_s$ ) e alla direzione del vento. Questi dati sono stati ottenuti a partire dalla stazione di Caleri Moceniga considerando l'intervallo temporale fra le ore 12:00 del

22/01/2023 e le 12:00 del 24/01/2023. Lo scopo è quello di rappresentare la distribuzione direzionale del regime anemometrico durante questo evento. Dai dati originali sono state escluse le calme di vento, ossia considerando solo valori di  $W_s \geq 5 \text{ m/s}$ . Si ottiene che il regime dei venti è rappresentato per il 100% da venti provenienti dal primo quadrante (N, NE, E). La velocità di vento più frequente è quella della classe  $13 - 15 \text{ m/s}$  (23.45% delle registrazioni totali). La massima velocità registrata nel periodo è di  $18.26 \text{ m/s}$  relativa ad un evento di vento con direzione di  $56^\circ \text{ N}$  (Bora).



**Fig. 1.3.13 - Distribuzione della velocità del vento  $\geq 5 \text{ m/s}$  per classi d'intensità e settori di provenienza durante l'evento di gennaio 2023.**

Utilizzando la serie storica disponibile per la stazione di Caleri Moceniga (2/08/2022 – 20/11/23) è possibile ricostruire l'andamento dell'altezza d'onda significativa, come rappresentato in Fig. 1.3.14. Con lo scopo di rappresentare le condizioni ondamiche più gravose, avvenute all'interno della laguna, vengono distinti i tre eventi per cui sono stati registrati i valori di  $H_s$  maggiore, avvenuti durante il periodo d'osservazione (2/08/2022 - 20/11/23).



**Fig. 1.3.14 -  $H_s$  misurata a Caleri Moceniga (2/08/2022 – 20/11/23)**

Con lo scopo di voler valutare l'andamento nel tempo di  $H_s$ , e di altri parametri, sono state graficate le rispettive serie storiche a confronto con i parametri originali valutati nello stesso intervallo temporale. I dati di livello, altezza d'onda significativa e di velocità del vento sono stati rielaborati mediante l'utilizzo di una media mobile a 13 valori (1 ora) e ricampionati a passo orario, come menzionato in precedenza.

Data	Velocità vento $_{Max}$ (m/s)	Direzione vento °N	$H_s$ $_{Max}$ (m)	$T$ $_{Max}$ (s)
16/09/2022 - 18/09/2022	16.69	33.69	0.82	3.38
21/11/2022 - 23/11/2022	17.39	55.15	0.89	3.59
22/01/2023 - 24/01/2023	15.91	55.77	0.74	3.26

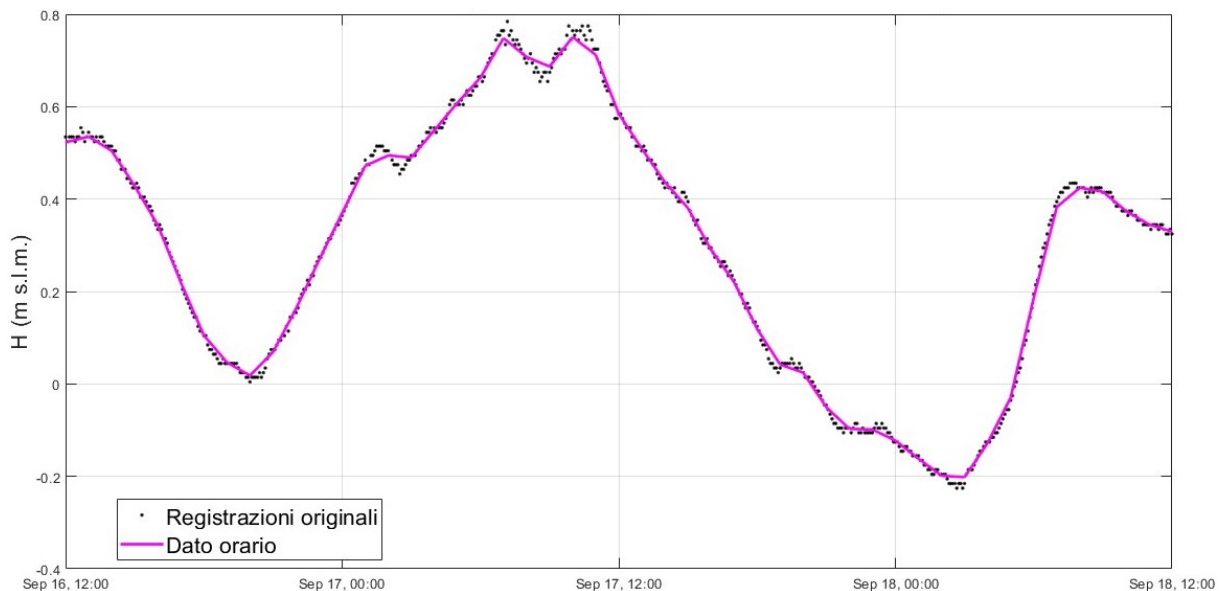
**Tab. 1.3.7 - Maggiori eventi per altezza d'onda significativa (2/08/2022-20/11/2023)**

Per ciascun evento, viene graficata l'evoluzione nel tempo dei valori di livello, d'altezza d'onda significativa, periodo, velocità e direzione del vento. Al fine di fornire una descrizione completa dello sviluppo dell'evento, si considera un intervallo temporale aggiuntivo di 12 ore rispetto alla data dell'evento stesso.

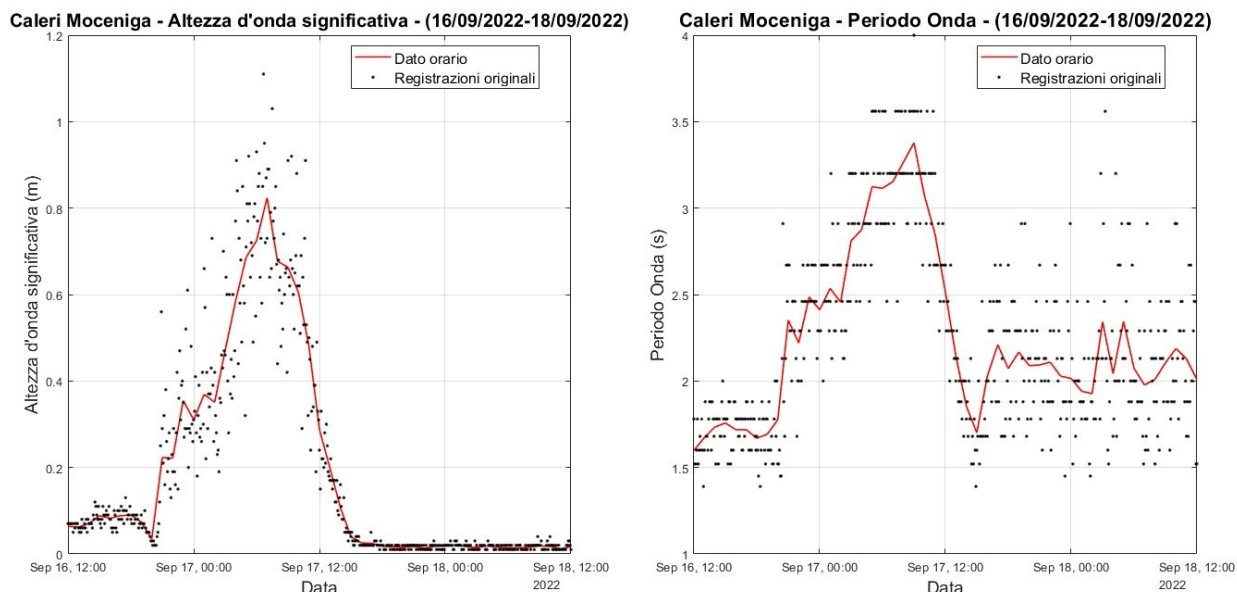
In ambiente lagunare l'altezza ed il periodo di un'onda dipendono da una serie di fattori, ovvero l'intensità e la durata del vento, la morfologia del fondale e l'andamento della marea. Con riferimento al modello di moto ondoso, solitamente il momento in cui si registra l'altezza massima dell'onda

coincide con quello di massima velocità del vento. Tuttavia, in situazioni reali, può verificarsi una discrepanza tra il picco massimo di altezza dell'onda ( $H_s$ ) e quello di velocità del vento ( $W_s$ ). Questa discrepanza è spesso dovuta alle variazioni del livello della marea, che possono influenzare lo sviluppo delle onde. In questa analisi sono stati utilizzati, sotto concessione di ISPRA, i dati del periodo registrati presso la stazione di Moceniga mediante ondometro radar. Come si può osservare dai grafici che seguono, l'andamento dei dati di periodo misurato mostra notevoli incertezze. Pertanto, nelle valutazioni successive, si farà riferimento all'andamento qualitativo del periodo piuttosto che ai dati misurati riportati nei grafici sottostanti.

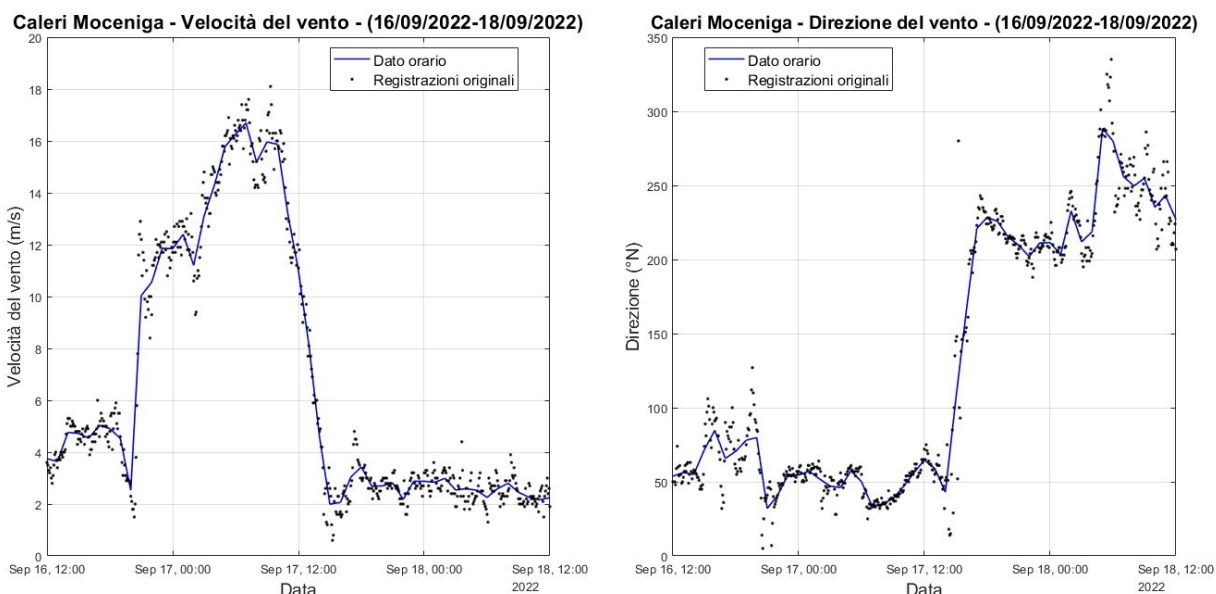
Nel primo evento, si analizza una registrazione dalle 12:00 del 16 settembre 2022 alle 12:00 del 18 settembre 2022. Durante questo intervallo, il livello massimo viene raggiunto fra le 7:00 e le 10:00 del 17 settembre, corrispondente a circa 0.75 m (Fig. 1.3.15). La massima altezza d'onda significativa registrata è di 0.82 m alle ore 7:00 del 17 settembre (Fig. 1.3.16), mentre la massima velocità del vento è di 16.69 m/s (33.69 °N) registrata alla medesima ora (Fig. 1.3.17). Il vento proviene principalmente dal primo quadrante (0-90 °N), caratterizzato dalle velocità del vento più elevate, e dal quarto quadrante (270-360 °N).



**Fig. 1.3.15 – Livello al mareografo di Caleri Moceniga, riferimento IGM (16/09/2022 - 18/09/2022).**



**Fig. 1.3.16 –  $H_s$  e T al mareografo di Caleri Moceniga (16/09/2022 - 18/09/2022)**

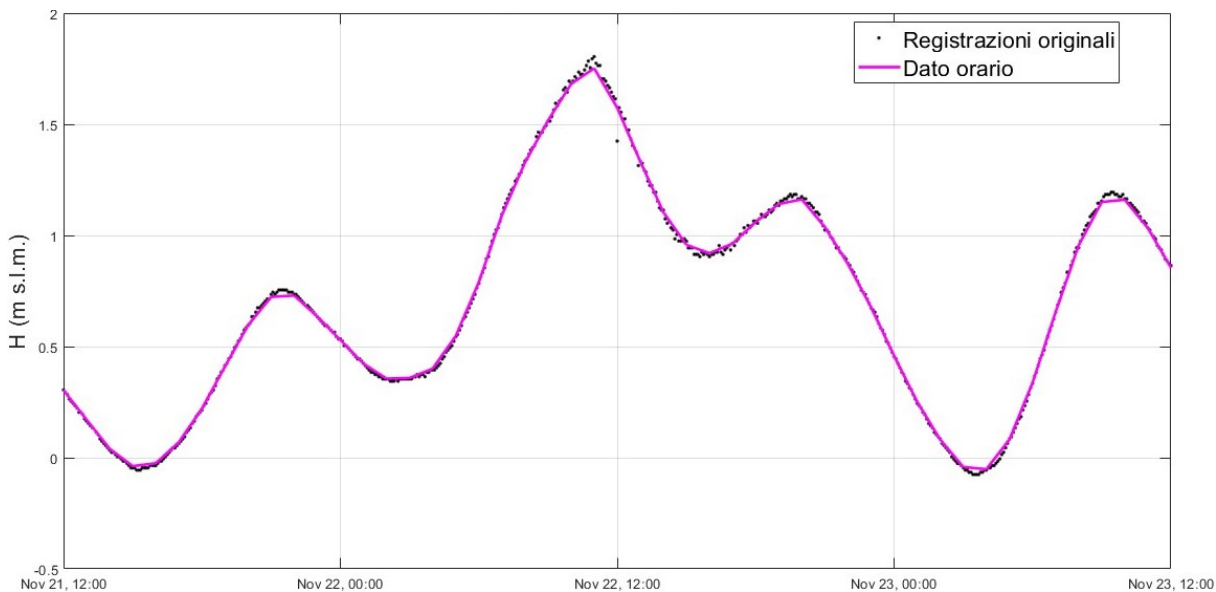


**Fig. 1.3.17 - Velocità e direzione del vento al mareografo di Caleri Moceniga (16/09/2022 - 18/09/2022)**

Da un'analisi dei grafici risulta che il massimo valore di  $H_s$ ,  $W_s$  e di livello coincidano e siano tutti riferiti allo stesso istante. Tuttavia, la dispersione nelle registrazioni originali, in particolare in riferimento ad  $H_s$ , può aver portato nonostante le operazioni di elaborazione con cui è stata realizzata la serie oraria, ad avere un certo grado di incertezza rispetto ai valori reali.

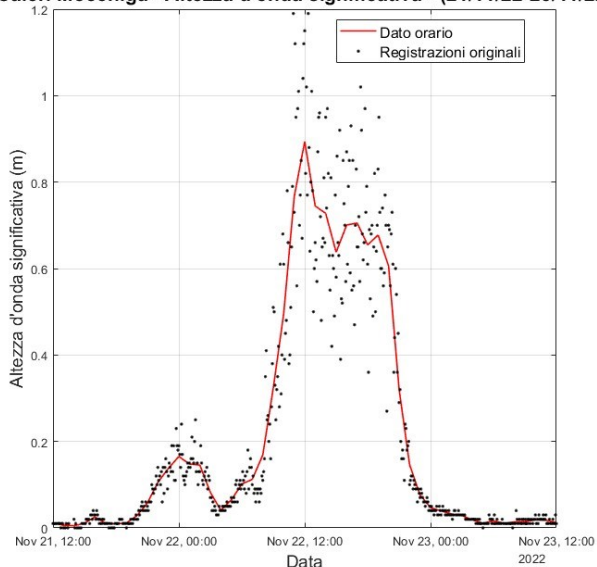
Nel secondo evento, si analizza una registrazione dalle 12:00 del 21/11/2022 alle 12:00 del 23/11/2022. Durante questo intervallo, il livello massimo viene raggiunto alle ore 11:00 del 22

novembre, corrispondente a circa 1.75 m (Fig. 1.3.18). La massima altezza d'onda significativa registrata è di 0.89 m alle ore 12:00 del 12 novembre (Fig. 1.3.19), mentre la massima velocità del vento è di 17.39 m/s (27.77 °N) registrata alle ore 12:00 (Fig. 1.3.20). Il vento proviene principalmente dal primo quadrante (0-90 °N), caratterizzato da velocità di vento più elevate, e dal quarto quadrante (270-360 °N). Da un'analisi dei grafici risulta che il massimo valore di  $H_s$  coincide con la massima registrazione di velocità del vento ( $W_s$ ).

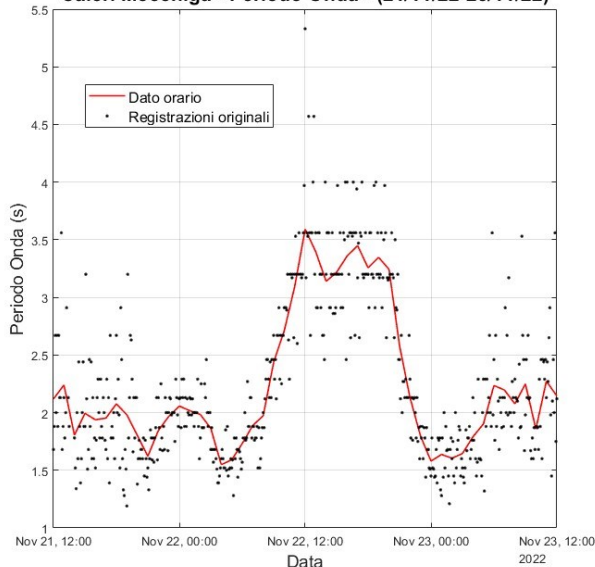


**Fig. 1.3.18 – Livello al mareografo di Caleri Moceniga, riferimento IGM (21/11/2022 - 23/11/2022).**

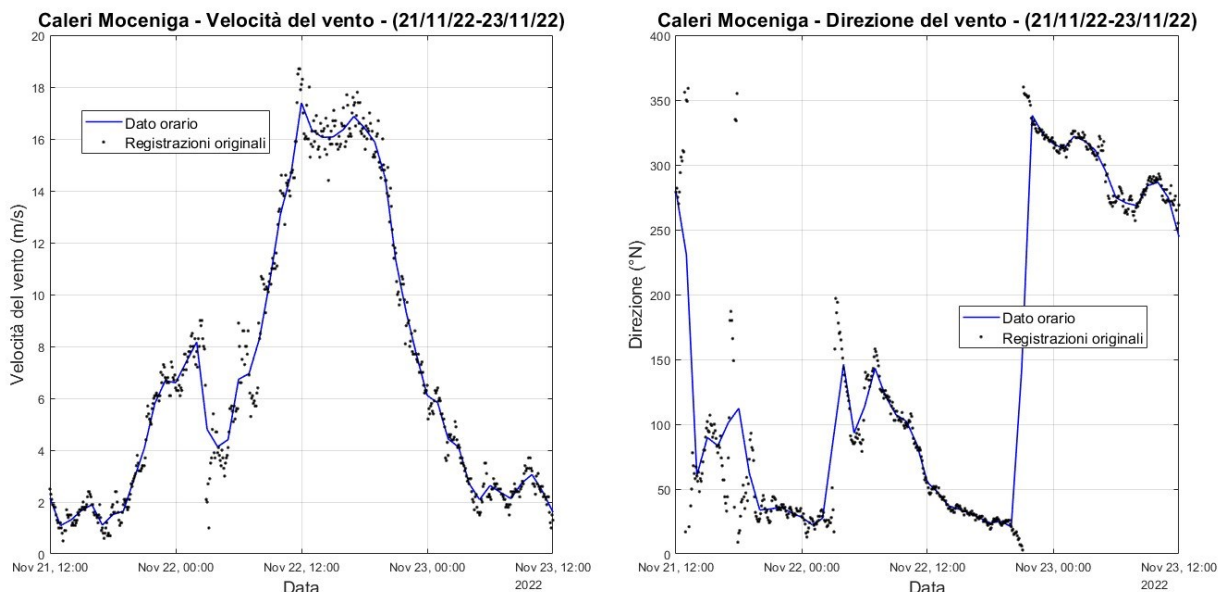
**Caleri Moceniga - Altezza d'onda significativa - (21/11/22-23/11/22)**



**Caleri Moceniga - Periodo Onda - (21/11/22-23/11/22)**

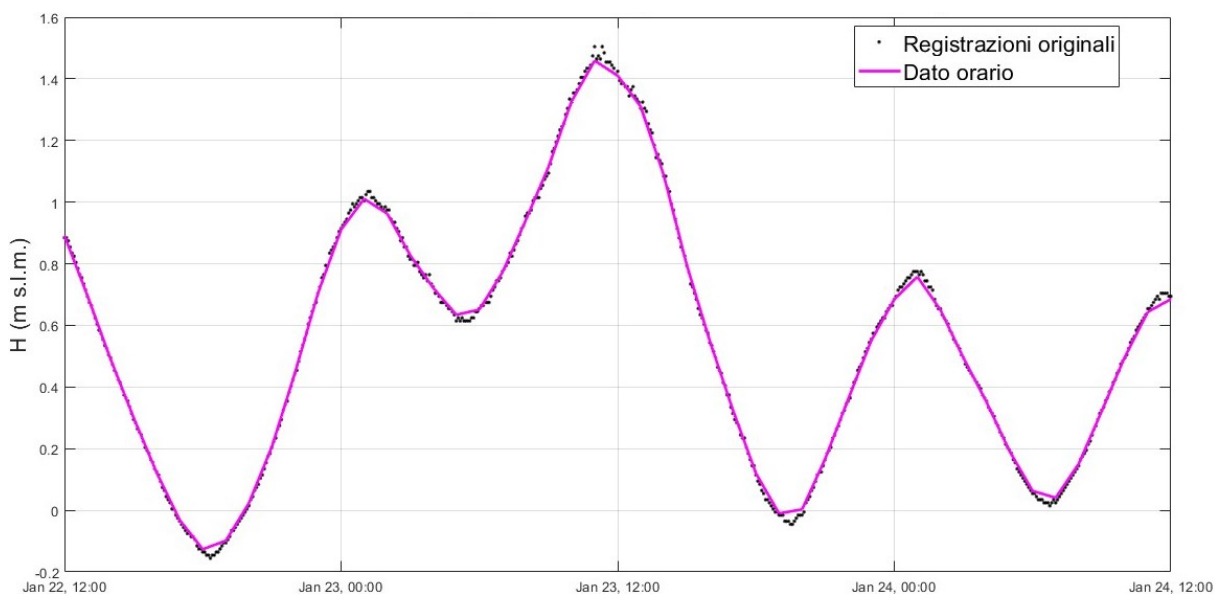


**Fig. 1.3.19 –  $H_s$  e T al mareografo di Caleri Moceniga (21/11/2022 - 23/11/2022).**

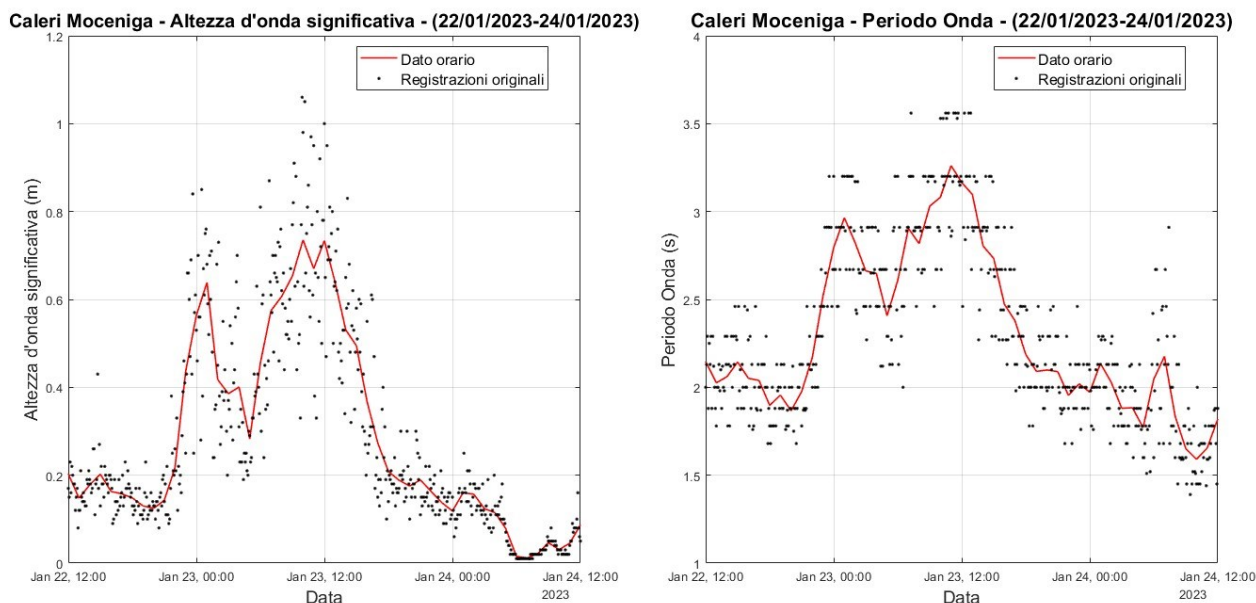


**Fig. 1.3.20 - Velocità e direzione del vento al mareografo di Caleri Moceniga (21/11/2022 - 23/11/2022).**

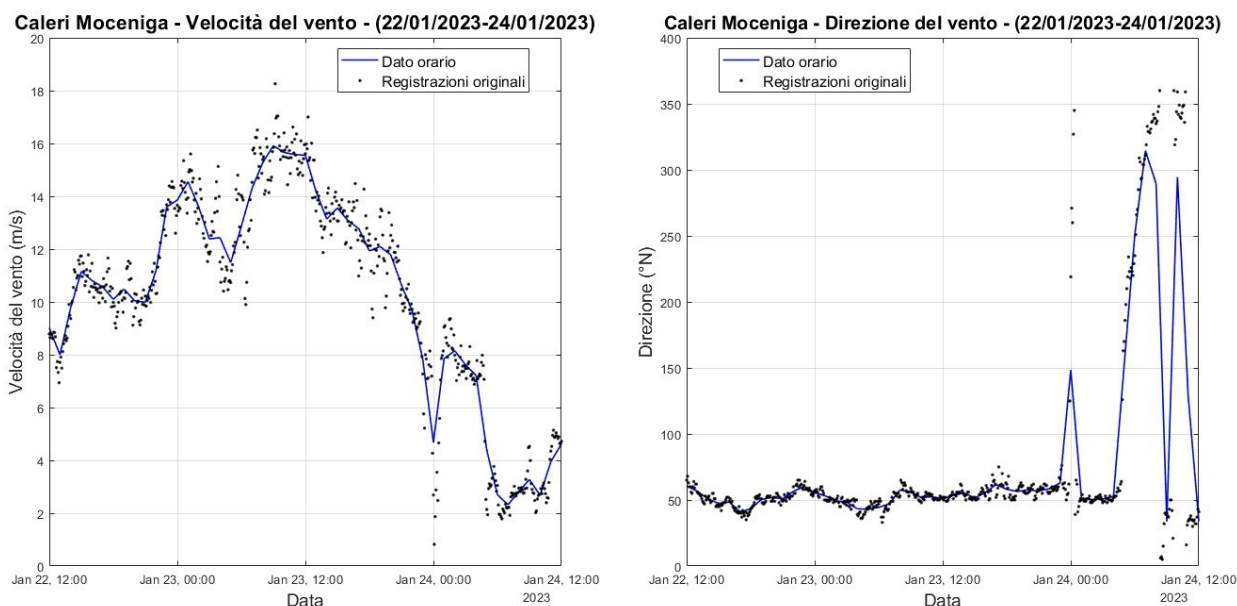
Nel terzo evento, si analizza una registrazione dalle 12:00 del 22/01/2023 alle 12:00 del 24/01/2023. Durante questo intervallo, il livello massimo viene raggiunto alle ore 11:00 del 23 gennaio, corrispondente a circa 1.46 m (Fig. 1.3.21). La massima altezza d'onda significativa registrata è di 0.74 m alle ore 10:00 del 23 gennaio (Fig. 1.3.22), mentre la massima velocità del vento è di 15.91 m/s (55.77 °N) registrata alle ore 9:00 (Fig. 1.3.23). Il vento proviene nella quasi totalità dal primo quadrante (0-90 °N), caratterizzato dalle velocità del vento più elevate, con poche registrazioni negli altri quadranti.



**Fig. 1.3.21 – Livello al mareografo di Caleri Moceniga, riferimento IGM (22/01/2023 - 24/01/2023).**



**Fig. 1.3.22 –  $H_s$  e T al mareografo di Caleri Moceniga (22/01/2023 - 24/01/2023)**



**Fig. 1.3.23 - Velocità e direzione del vento al mareografo di Caleri Moceniga (22/01/2023 - 24/01/2023)**

Da un'analisi dei grafici risulta che il massimo valore di  $H_s$  viene registrato un'ora dopo la massima registrazione di velocità del vento ( $W_s$ ). L'altezza d'onda è proporzionale all'intensità del vento che la genera, ma dipende anche dall'andamento della marea. In questo evento, alle ore 9:00 del 23 gennaio viene registrata la massima velocità di vento (15.91 m/s), alla stessa ora  $H_s$  è pari a 0.65 m. Alle 9:00, il livello di marea rilevato dalla stazione è in fase crescente, registrando 1.11 m e continua a salire fino



alle 11:00, quando viene raggiunto il picco massimo di 1.45 m. L'  $H_s$  massima viene misurata alle ore 10:00 del 23 gennaio, ad essa corrisponde una velocità del vento di 15.66 m/s e un livello di 1.33 m. Tuttavia, è importante notare che nell'ora successiva, con il picco massimo del livello di marea e una velocità del vento leggermente inferiore (15.58 m/s), l' $H_s$  misurata risulta essere pari a 0.67 m. Questo potrebbe essere attribuito alla significativa dispersione dei dati originali (Fig. 1.3.22), che nonostante l'elaborazione, influenza l'accuratezza del dato orario.

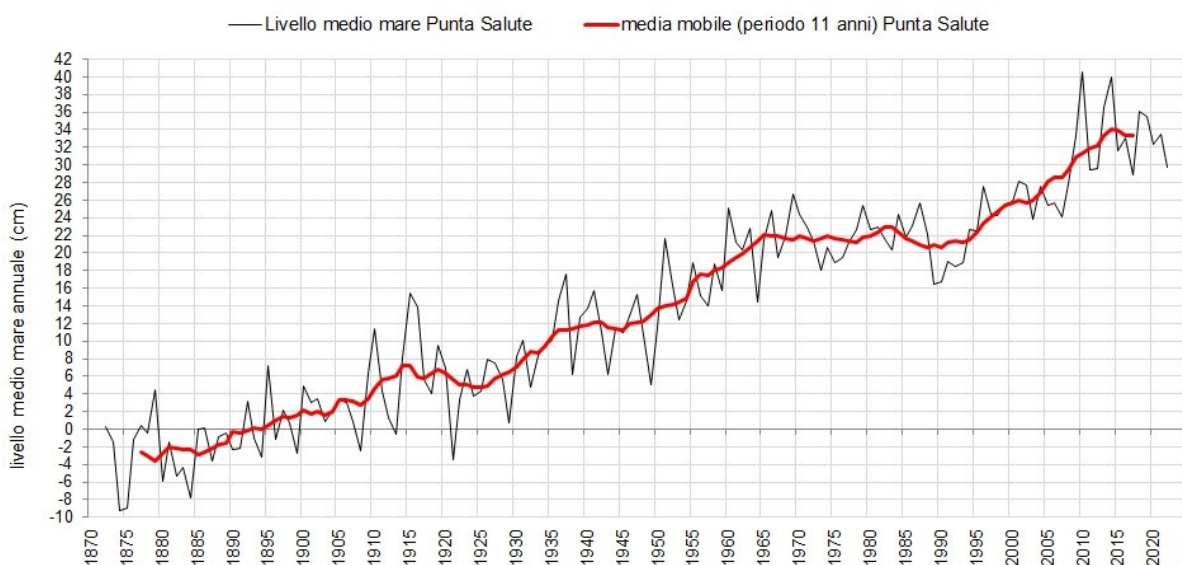
### 1.3.5 Previsioni di innalzamento del l.m.m. per effetto del cambiamento climatico

La serie storica di marea, registrata dai mareografi di Caleri Moceniga (inizio reg. 02/08/2022) e Porto Caleri (inizio reg. 01/06/2000), non è disponibile per un tempo sufficientemente lungo da permettere di fare delle valutazioni complete in merito all'innalzamento del livello medio del mare per effetto del cambiamento climatico. Alla luce della sua posizione geografica, per comprendere questo fenomeno, viene considerata la serie storica registrata al Mareografo di Punta della Salute. Esso dispone di una serie storica molto più lunga (145 anni), che rappresenta in maniera ottimale la situazione mareografica per il centro storico di Venezia.

Dai grafici rappresentati in Fig. 1.3.24 è possibile notare l'effetto dell'innalzamento del livello medio del mare (ISPRA, 2016) osservato a Venezia negli ultimi 145 anni. I valori riportati in questi grafici fanno riferimento allo Zero Mareografico di Punta della Salute (ZMPS), adottato come riferimento convenzionale per la misura dei livelli di marea in tutta la Laguna di Venezia, il quale rappresenta il livello medio del mare a Punta della Salute nel 1897 (calcolato mediando 25 anni di osservazioni, dal 1885 al 1909). Il motivo principale dell'innalzamento del livello medio del mare intorno a Venezia è il risultato di due fattori principali: la subsidenza e l'eustatismo. Lungo la costa occidentale del Nord Adriatico si verifica il fenomeno naturale della compattazione dei terreni, noto come subsidenza. Questo è particolarmente evidente nel delta del Po, che è un'area geologicamente giovane. L'attività umana ha in alcuni casi accelerato significativamente questo processo, soprattutto attraverso l'estrazione sistematica di fluidi dal sottosuolo: la diminuzione della pressione negli strati inferiori del terreno favorisce la compattazione, causando una perdita di altezza relativa rispetto al livello del medio mare.

Per la caratterizzazione dell'eustatismo, si fa riferimento alle proiezioni del Sesto rapporto di valutazione (AR6, 2022) dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Nel rapporto si definiscono cinque scenari futuri (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-6, e SSP4-8.5), tutti equamente

possibili, la cui suddivisione è basata sulle emissioni di gas serra negli anni futuri. Il valore assegnato a ogni RCP indica la Forzante Radiativa misurata in Watt per metro quadrato ( $W/m^2$ ) e rappresenta l'entità dei cambiamenti climatici causati dall'attività umana entro il 2100 rispetto al periodo preindustriale. Ogni RCP rappresenta una quantità differente di calore aggiuntivo immagazzinato nel sistema Terra a causa delle emissioni di gas serra.

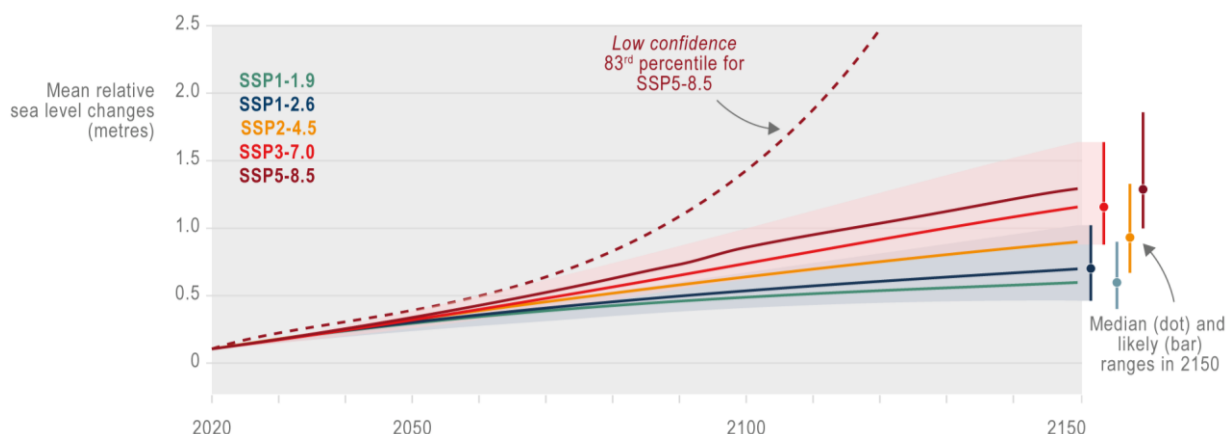


**Fig. 1.3.24 - Andamento del I.m.m. annuale a Venezia - Punta della Salute (ZMPS)**

Secondo il più recente rapporto di valutazione sul Mediterraneo (AR6 - CCP4, 2022), le previsioni indicano un possibile innalzamento del livello medio del mare fino a 1.1 metri entro la fine di questo secolo, rispetto ai livelli attuali (Tab. 1.3.8). Nel grafico in Fig. 1.3.25 sono rappresentate le diverse proiezioni per l'innalzamento del medio mare secondo diversi scenari SSP.

	2050 (m)	2100 (m)	2150 (m)
<b>SSP1–1.9</b>	0.22 [0.15–0.30]	0.43 [0.31–0.61]	0.52 [0.32–0.81]
<b>SSP1–2.6</b>	0.22 [0.16–0.30]	0.46 [0.34–0.66]	0.62 [0.39–0.95]
<b>SSP2–4.5</b>	0.23 [0.17–0.31]	0.57 [0.44–0.79]	0.83 [0.57–1.23]
<b>SSP3–7.0</b>	0.24 [0.18–0.31]	0.69 [0.56–0.94]	1.08 [0.80–1.57]
<b>SSP5–8.5</b>	0.26 [0.20–0.33]	0.79 [0.64–1.06]	1.22 [0.91–1.78]

**Tab. 1.3.8 - Proiezioni di sea level rise nel Mediterraneo (IPCC - SMCCP4.4)**



**Fig. 1.3.25 - Proiezioni d'innalzamento del medio mare nel mediterraneo 2020-2050.**

Il livello del mare nel Mediterraneo è aumentato di soli 1,4 mm all'anno nel corso del XX secolo, mentre in tempi più recenti di  $2.4 \pm 0.5$  mm all'anno, dal 1993 al 2012. Si prevede che questo livello aumenterà ulteriormente nel futuro, con un tasso d'incremento simile alla media globale (con un'incertezza di 10-20 cm). Secondo quanto riportato nel Sesto rapporto di valutazione (AR6) dell'IPCC, è previsto che l'incremento di livello possa raggiungere 1,1 m o più entro il 2100 in caso di riscaldamento globale intorno ai  $3^{\circ}\text{C}$ . Un ulteriore aumento deriva dall'incremento del tasso di perdita di ghiaccio nelle calotte glaciali della Groenlandia e dell'Antartide, oltre che alla continua perdita di massa dei ghiacciai e all'espansione termica dell'oceano. L'innalzamento del livello del mare ha impatti notevoli sulle aree costiere del mediterraneo, è previsto un incremento della frequenza delle inondazioni costiere, nonché un aumento dei rischi legati all'erosione e alla salinizzazione di molti bacini. Questi impatti si ripercuoterebbero su agricoltura, pesca e acquacoltura, sviluppo urbano, operazioni portuali, turismo, siti culturali e molti ecosistemi costieri.

L'alto Adriatico è caratterizzato da un regime mareale microtidale, in cui la differenza fra i livelli di alta e bassa marea astronomica è molto contenuta. Perciò, un innalzamento del livello del mare nell'ordine delle decine di centimetri può essere causa di danni molto significativi. Le ondate di mal tempo e le mareggiate possono produrre delle inondazioni costiere che hanno durate di qualche ora, causando grossi impatti sulle coste sabbiose, sulle lagune e sulle infrastrutture costiere.



## **2 Descrizione dei modelli matematici utilizzati**

### **2.1 Il modello matematico idrodinamico 2DEF**

Le modellazioni idrodinamiche esposte nel presente studio sono state effettuate utilizzando il codice di calcolo 2DEF messo a punto dai proff. L. D'Alpaos e A. Defina dell'Università di Padova. Esso è stato appositamente sviluppato per le indagini sull'idrodinamica e sulla morfologia di lagune microtidali, come quelle che si trovano lungo il litorale Adriatico. È stato ed è diffusamente impiegato per indagini e studi sulla Laguna di Venezia, ed è stato applicato anche alle altre lagune venete quali la Laguna di Marano Grado, la Laguna di Caorle e le lagune del Delta del Po. Per queste ultime, in particolare, esso costituisce fino dagli anni '90 un ormai ampiamente collaudato strumento di indagine a supporto del monitoraggio e della progettazione degli interventi finalizzati alla salvaguardia e alla gestione delle lagune stesse.

Va ricordato, infine, che il modello 2DEF è stato ed è impiegato diffusamente anche per svolgere indagini sulle condizioni idrauliche dei più importanti corsi d'acqua della pianura veneta a supporto degli interventi ingegneristici finalizzati al controllo del regime idrodinamico dei corsi d'acqua, e per la valutazione degli effetti di opere che possono interferire con il sistema idrografico in particolare in presenza di situazioni di rischio idraulico.

Il codice 2DEF è basato su di uno schema numerico ad elementi finiti, che risolve le equazioni differenziali che governano il moto bidimensionale di una corrente a superficie libera su bassi fondali, formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno indagato. Esso consente, tra l'altro, l'accoppiamento di elementi bidimensionali e unidimensionali (schema 2D-1D), utilizzando gli uni nelle zone in cui la direzione della velocità nel piano orizzontale non è a priori individuabile, gli altri per descrivere il funzionamento dei canali e dei corsi d'acqua minori presenti nel dominio di calcolo. È possibile, inoltre, inserire nella schematizzazione anche speciali elementi unidimensionali in grado di descrivere localmente il funzionamento idraulico di manufatti come soglie, traverse, botti a sifone, dispositivi controllati da paratoie, impianti idrovori, ecc. Il modello matematico dispone di una serie di moduli aggiuntivi. Con essi è possibile simulare la propagazione del moto ondoso e le correnti da esso indotte, il trasporto di sedimenti al fondo e in sospensione, e l'evoluzione dei fondali indotta dalle correnti di marea e da quelle generate dal moto ondoso, il trasporto e la diffusione di sostanze

rilasciate in acqua, e quindi i tempi di residenza, con approccio sia euleriano che lagrangiano.

### 2.1.1 Modulo idrodinamico

Per quanto riguarda gli aspetti idrodinamici, le equazioni che governano il moto in ipotesi di fondali lentamente erodibili sono formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno.

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{d(q_x/Y)}{dt} + \frac{q_x |\mathbf{q}|}{K_s^2 \cdot H^{10/3}} - \frac{\tau_{wx} + \tau_{RSx}}{\gamma Y} - Re_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{g} \frac{d(q_y/Y)}{dt} + \frac{q_y |\mathbf{q}|}{K_s^2 \cdot H^{10/3}} - \frac{\tau_{wy} + \tau_{RSy}}{\gamma Y} - Re_y = 0 \quad (2)$$

$$\eta(h) \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

Nelle equazioni precedenti,  $h$  indica la quota idrometrica,  $x, y$  sono le ascisse spaziali orizzontali correnti,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $K_s$  è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler,  $t$  è il tempo,  $\mathbf{q} = (q_x, q_y)$  è la velocità integrata sulla verticale,  $\boldsymbol{\tau}_w = (\tau_{wx}, \tau_{wy})$  e  $\boldsymbol{\tau}_{RS} = (\tau_{RSx}, \tau_{RSy})$  sono rispettivamente i termini che descrivono l'effetto sulla circolazione delle eventuali azioni del vento (*wind*) e del moto ondoso (*radiation stress*),  $Re_x$  e  $Re_y$  sono gli sforzi adimensionali di Reynolds nel piano orizzontale, calcolati mediante le seguenti relazioni:

$$Re_x = \frac{\nu_T}{g} \left( \frac{\partial^2 (\frac{q_x}{Y})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\frac{q_x}{Y})}{\partial y^2} \right) \quad Re_y = \frac{\nu_T}{g} \left( \frac{\partial^2 (\frac{q_y}{Y})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\frac{q_y}{Y})}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Il coefficiente di viscosità cinematica turbolenta  $\nu_T$  che compare nelle precedenti relazioni, è determinato utilizzando come schema di chiusura il modello suggerito da *Smagorinsky* e successivamente perfezionato da *Stansby*.

Nelle equazioni precedenti compaiono inoltre i termini  $\eta, Y$  e  $H$  i quali, nell'istante generico, indicano, rispettivamente, la frazione locale di dominio allagato, il volume d'acqua per unità di superficie e un'altezza d'acqua equivalente introdotta per descrivere correttamente l'effetto dei termini dissipativi nelle zone parzialmente bagnate. Tali termini sono dati dalle espressioni seguenti:

$$\eta(h) = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(2Y_a/a_r)] \quad (5)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta \cdot dz = a_r \left\{ \eta \frac{Y_a}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4(Y_a/a_r)^2} \right\} \quad (6)$$

$$H \cong Y + 0.27 \sqrt{Y \cdot a_r} \cdot e^{-2Y/a_r} \quad (7)$$

in cui  $\text{erf}()$  è la funzione errore,  $Y_a = h - h_f$ , essendo  $h_f$  l'altezza media locale del fondo e  $a_r$  indica l'ampiezza massima delle ondulazioni locali del terreno.

I termini  $\tau_{wx}$  e  $\tau_{wy}$  che compaiono nelle equazioni precedenti descrivono, come si è detto, l'effetto delle eventuali azioni del vento, che può essere valutata mediante una delle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} -\tau_w &= \rho_a c_{d0} \cdot 10^{-3} (1 - e^{-\varepsilon u_w}) \cdot u_w^2 && (\text{Defina, 1994, valori consigliati: } \rho_a=1.2, c_{d0}=1.35, \varepsilon=0.1,) \\ -\tau_w &= \rho_a (c_{d0} + \varepsilon \cdot u_w) \cdot 10^{-3} \cdot u_w^2 && (\text{Smith \& Banke, 1975, valori consigliati: } \rho_a=1.2, c_{d0}=0.63, \varepsilon=0.066,) \\ -\tau_w &= \rho_a \cdot c_d \cdot 10^{-3} \cdot u_w^2 && (\text{con } c_d \text{ costante o lineare a tratti in funzione di } u_w) \end{aligned}$$

nelle quali  $\tau_w$  è lo sforzo tangenziale,  $u_w$  e  $\vartheta_w$  sono la velocità e la direzione del vento  $c_d$  è il coefficiente di drag,  $\rho_a$  è la densità dell'aria,  $c_{d0}$  e  $\varepsilon$  sono parametri di taratura dipendenti dalla formulazione usata. Lo sforzo da vento così calcolato è poi proiettato sugli assi coordinati

$$\tau_{wx} = \tau_w \cos(\vartheta_w) \quad \tau_{wy} = \tau_w \sin(\vartheta_w) \quad (8)$$

Al contributo dovuto al vento può essere sommato quello prodotto dal moto ondoso,  $\tau_{RS}$ , determinato dalle variazioni spaziali dei *radiation stress*:

$$\tau_{wx} = - \left( \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) \quad \tau_{wy} = - \left( \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) \quad (9)$$

in cui le componenti  $R_{xx}$ ,  $R_{xy}$  e  $R_{yy}$  dei *radiation stress* possono essere valutate tramite il modulo di moto ondoso incorporato nel modello 2DEF, il quale risolve l'equazione differenziale che governa la conservazione dell'azione d'onda nell'ipotesi di onda monocromatica tramite la formulazione di *Longuet-Higgins e Stewart* o, in alternativa, accoppiando al modello 2DEF il modello SWAN (si veda a proposito il successivo Cap. 2.2).

### 2.1.2 Lo schema numerico

Si osserva, nelle equazioni precedenti, che l'accelerazione convettiva è, di fatto, considerata in modo lagrangiano, dato che la variazione nel tempo delle velocità mediate lungo la verticale è rappresentata da una derivata totale. Per la discretizzazione di questo termine il modello 2DEF adotta una tecnica alle differenze finite trascurando, perché generalmente piccola, la variazione temporale dell'altezza d'acqua  $Y$ . In queste ipotesi, ad esempio, la derivata totale della velocità nella direzione  $x$ , è calcolata come segue:

$$\frac{d(q_x/Y)}{dt} \cong \frac{(q_x/Y)' - (q_x/Y)'_0}{\Delta t} \quad (10)$$

nella quale le grandezze con apice riferite all'istante di calcolo precedente. Conseguentemente la derivata totale delle velocità, calcolata nel generico punto  $P$  del campo di moto, si scrive come differenza tra la velocità  $(q_x/Y)'$  calcolata nello stesso punto  $P$  e la velocità  $(q_x/Y)'_0$  calcolata, invece, nel punto  $P_0$  che si determina per integrazione a ritroso nel tempo lungo la "linea di fumo" passante per  $P$ .

Senza entrare nel merito della soluzione numerica adottata, ci si limita a ricordare che il sistema delle equazioni, nelle incognite  $h$  e  $q$ , è risolto con il metodo degli elementi finiti, adottando una soluzione secondo uno schema alle differenze finite semi-implicito per le derivate temporali.

Poiché nella discretizzazione spaziale del campo di moto si sono utilizzati elementi finiti di forma triangolare, la soluzione per i livelli prevede una variazione lineare delle quote idrometriche all'interno di ciascun elemento, mentre le velocità (integrate sulla verticale) sono considerate costanti sull'elemento.

### 2.1.3 Elementi 2D speciali

Nei sistemi idrografici naturali sono spesso presenti elementi il cui comportamento non può essere descritto in modo semplice e diretto mediante le equazioni appena descritte. Per le resistenze prodotte dalla presenza di vegetazione, ad esempio, che si vanno a sovrapporre a quelle dell'attrito sul fondo, è necessario introdurre una formulazione apposita. Così come, per gli effetti idrodinamici prodotti dalla presenza di pile e altre forme di ostruzione dell'alveo, qualora il grado di dettaglio della griglia di calcolo non sia sufficientemente spinto per poter correttamente descrivere l'idrodinamica



locale a piccola scala, è necessario introdurre opportune relazioni addizionali che ne tengano conto in modo complessivo. Altri effetti non considerati nelle equazioni presentate nel precedente paragrafo sono, ad esempio, la perdita di volume per infiltrazione o la presenza di piccole porzioni di dominio dove il moto può avvenire in pressione. Si pensi, a tale proposito, al funzionamento di un ponte quando il livello dell'acqua raggiunge la quota dell'impalcato.

Per descrivere queste situazioni, per le quali il moto mantiene ancora carattere bidimensionale, sono introdotti alcuni elementi speciali per i quali, nella fase di costruzione del reticolo di calcolo, è necessario specificare alcuni specifici parametri.

#### 2.1.4 Elementi unidimensionali

La schematizzazione con elementi bidimensionali della rete idrografica minore presenterebbe non poche difficoltà, poiché da una parte essa porterebbe all'utilizzo di elementi di dimensioni così piccole da rendere assai onerosa la fase di costruzione del reticolo, dall'altra potrebbe generare l'insorgere di problemi nella soluzione numerica, a meno di non adottare passi di integrazione temporale particolarmente ridotti. Inoltre, la schematizzazione di tratti di condotte a sezione chiusa mediante elementi bidimensionali risulta proibitiva. Per questa ragione il modello consente l'impiego accoppiato di elementi bidimensionali ed unidimensionali, utilizzando questi ultimi per descrivere il funzionamento dei canali della rete minore, che drena porzioni di territorio soggette a prosciugamento, per simulare piccole incisioni profonde in un dominio sostanzialmente bidimensionale o per includere nella schematizzazione tratti di condotte di sezione chiusa.

In pratica, nello schema adottato, gli elementi unidimensionali funzionano come canali "in pressione" a sezione costante, fino a quando le zone laterali che li fiancheggiano sono ricoperte dalle acque, e come canali a pelo libero quando il livello scende al di sotto della quota delle zone laterali.

Il comportamento idraulico di un sistema idrografico articolato e complesso può essere quindi descritto in modo efficace con un reticolo di elementi bidimensionali i cui lati seguono, nelle zone in cui ciò è necessario, il tracciato degli eventuali canali minori presenti. I canali unidimensionali, a loro volta, possono essere comunque connessi fra loro, purché siano disposti lungo i lati del reticolo bidimensionale e si appoggino agli stessi nodi. L'accorgimento consente operativamente che essi possano essere inseriti o disinseriti dal reticolo di calcolo senza dover modificare la struttura del reticolo formato dagli elementi bidimensionali.

Può accadere che il canale definito tra due nodi non sia affiancato da elementi bidimensionali o che durante l'evolversi del fenomeno gli elementi bidimensionali che lo fiancheggiano siano prosciugati. In queste condizioni, come si è detto, il canale funziona a superficie libera. Le possibili situazioni che si possono presentare sono tre, vale a dire il generico tronco di canale è affiancato da due elementi bidimensionali, da un solo elemento bidimensionale o da nessun elemento bidimensionale.

Nel modello, l'equazione dinamica contiene alcune semplificazioni. Si assume innanzitutto trascurabile l'inerzia convettiva. Il modello poi considera solo sezioni trasversali compatte, per quali sia possibile assumere una distribuzione di velocità sensibilmente uniforme. In queste ipotesi, le equazioni dinamica e di continuità sono:

$$\frac{\partial h}{\partial s} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q|Q|}{K_S^2 R_H^{4/3} A^2} = 0 \quad (11)$$

$$\eta(h) \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (12)$$

nelle quali A è l'area della sezione trasversale,  $R_H$  è il raggio idraulico, Q la portata e s l'ascissa curvilinea che descrive planimetricamente l'andamento dell'asse del canale.

Come per le equazioni dinamiche bidimensionali, il primo passo consiste nel discretizzare la derivata temporale che compare nella (11) alle differenze finite, ottenendo:

$$Q = - \left( \frac{1}{gA\Delta t} + \frac{|Q|}{k_S^2 R_H^{4/3} A^2} \right)^{-1} \left[ \frac{\partial h}{\partial s} - \left( \frac{Q}{gA\Delta t} \right) \right] \quad (13)$$

nella quale i termini tra parentesi rotonde sono calcolati al passo temporale precedente.

Nel modello, in particolare, sono implementate specifiche procedure per considerare che, per effetto della sovrapposizione tra elementi unidimensionali e bidimensionali, una frazione della portata che fluisce lungo i canali unidimensionali è già considerata nel calcolo attraverso gli elementi bidimensionali.

## 2.2 Modulo di moto ondoso

### 2.2.1 Il modello SWAN

Per il calcolo del moto ondoso e delle interazioni onda-corrente può essere utilizzato, come si è detto, il modulo incorporato nel codice 2DEF il quale risolve l'equazione differenziale che governa la conservazione dell'azione d'onda nell'ipotesi di onda monocromatica, tramite la formulazione di *Longuet-Higgins e Stewart*.

In alternativa, le componenti degli sforzi dovuti al moto ondoso possono essere valutate con il modello SWAN quando quest'ultimo è utilizzato in modo accoppiato nella simulazione non stazionaria del modello 2DEF.

Il modello SWAN (Simulating WAVes Nearshore) è un modello spettrale di terza generazione (Holthuijsen et al., 1993; Ris et al., 1999), utilizzato in questo elaborato nella versione 41.31 per simulare l'evoluzione del moto ondoso nella Laguna di Caleri. È il successore del modello stazionario di seconda generazione HISWA (Holthuijsen et al., 1989) e, rispetto a HISWA, in SWAN i processi fisici sono esplicitamente rappresentati con formulazioni allo stato dell'arte e con uno schema numerico incondizionatamente stabile, in quanto totalmente implicito. Inoltre, il modello SWAN può effettuare simulazioni utilizzando una griglia curvilinea e può – per esempio – generare l'output in termini di spettri mono e bi-dimensionali.

Inoltre, gli sforzi indotti dal moto ondoso, calcolati da SWAN sulla base dei gradienti dei "radiation stress" (invece che sulla base della dissipazione come in HISWA), possono essere utilizzati come forzanti per il modulo idrodinamico per calcolare le correnti indotte dal moto ondoso e il *wave set-up*.

Se utilizzato in modalità stand-alone, SWAN può essere impiegato per la progettazione di porti e di installazioni offshore e per progetti di gestione e sviluppo dei litorali. Esso può essere utilizzato anche per la ricostruzione dei campi d'onda del passato (*wave hindcast*). La dimensione tipica delle aree sulle quali è possibile applicare il modello va dai 2x2 km ai 50x50 km.

Nel modello SWAN, l'azione d'onda è definita come  $N = E/\sigma$  (dove  $E$  è la densità di energia e  $\sigma$  è la frequenza radiale). Questa quantità si conserva durante la propagazione dell'onda in presenza di correnti, mentre la densità di energia  $E$  non è costante (Whitman, 1974). L'equazione del bilancio d'azione d'onda in forma spettrale, impiegata in forma discreta nel modello è la seguente:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_x N}{\partial x} + \frac{\partial C_y N}{\partial y} + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (14)$$

I termini a sinistra rappresentano la componente cinematica dell'equazione. Il primo termine è relativo all'evoluzione dell'azione d'onda nel tempo, il secondo e il terzo descrivono la propagazione dell'energia dell'onda nello spazio bidimensionale, includendo il fenomeno dello shoaling. Il quarto termine rappresenta l'effetto di scostamento della frequenza radiale dovuto alle variazioni di profondità e di corrente media. Il quinto termine tiene conto della rifrazione indotta dalla profondità e dalla corrente.

Il termine di destra contiene  $S_{tot}$ , che è il parametro a cui sono riferiti tutti i termini non conservativi che rappresentano di processi fisici di generazione, dissipazione e redistribuzione dell'energia dell'onda (SWAN, 2012) . In acque basse vengono definiti sei parametri che contribuiscono all'incremento o alla riduzione di  $S_{tot}$ :

$$S_{tot} = S_{in} + S_{n13} + S_{n14} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (15)$$

Questi termini denotano, rispettivamente, la crescita delle onde da parte del vento, il trasferimento non lineare dell'energia delle onde attraverso le interazioni onda-onda (sia triadi che quadruplette) e il decadimento delle onde dovuto al whitecapping, all'attrito del fondo e al frangimento delle onde legato alla profondità.

Come appena accennato, il modello SWAN è basato sull'equazione di bilancio dell'azione d'onda in forma discreta ed è completamente spettrale (in tutte le direzioni e frequenze). Quest'ultima caratteristica implica che possono essere rappresentati adeguatamente campi di onde casuali a creste corte che si propagano simultaneamente da direzioni anche molto differenti. SWAN calcola l'evoluzione di onde casuali a creste corte in regioni costiere di acque profonde, intermedie e basse, considerando anche la presenza di correnti locali.

Il modello SWAN tiene conto della propagazione (rifrattiva) – come il modello HISWA – e descrive esplicitamente con formulazioni allo stato dell'arte i processi di generazione del moto ondoso dovuti al vento, i processi dissipativi dovuti a whitecapping, attrito sul fondo e frangimento per effetto della profondità, nonché le interazioni non lineari onda-onda (sia triadi che quadruplette). Il solutore adotta schemi di propagazione pienamente impliciti per evitare tempi di calcolo eccessivi e per ottenere simulazioni robuste nelle applicazioni pratiche. Va sottolineato peraltro che, sebbene in SWAN siano

implementate tecniche numeriche particolarmente efficienti, i tempi di calcolo per una tipica simulazione di propagazione del moto ondoso possono essere di molto superiori a quelli richiesti dal modello HISWA. Il modello SWAN è stato ripetutamente verificato e validato in situazioni di laboratorio e complesse situazioni reali (si veda ad esempio. Ris 1997; Ris et al. 1999). Si deve evidenziare che il modello SWAN (come del resto il modello HISWA) non tiene conto degli effetti della diffrazione.

Il modello SWAN è stato sviluppato presso la Delft University of Technology (Olanda) ed è continuamente oggetto di ulteriori aggiornamenti. Esso è considerato come l'attuale standard di settore per la modellazione del moto ondoso sottocosta e per gli studi di protezione costiera. Il modello SWAN è stato rilasciato come software di dominio pubblico.

### 2.2.2 Accoppiamento 2DEF-SWAN

Il modello 2DEF dispone di una procedura che consente l'accoppiamento diretto con SWAN. Nella corrente versione (v.2.5) il modello 2DEF è accoppiato con la versione di SWAN numerata come 41.31 AB.

Il dominio di calcolo utilizzato dai due modelli è ottenuto mediante la predisposizione di due griglie distinte. Il modello 2DEF utilizza una griglia non strutturata ad elementi finiti triangolari. Il modello SWAN utilizza una griglia strutturata a maglie rettangolari, che resta inclusa all'interno del contorno definito dalla griglia di 2DEF. Questo consente di controllare le forzanti del modello idrodinamico e limitare il possibile innescarsi di correnti parassite in prossimità dei bordi del dominio di calcolo.

Potenzialmente, il modello 2DEF è in grado di trasferire automaticamente tra i due moduli (accoppiamento bi-direzionale) tutte le grandezze di interesse, indipendentemente dal tipo di griglia utilizzata. In pratica, a seguito di numerose applicazioni e simulazioni test, si è riscontrato che le prestazioni di SWAN sono più accurate e robuste nel caso in cui esso sia applicato a griglie regolari, rettilinee o curvilinee, eventualmente con larghezza di righe e colonne variabili nel dominio di calcolo. La procedura implementata nella presente versione del modello 2DEF supporta pertanto solo griglie di questo tipo, mentre l'accoppiamento con griglie non strutturate non è più supportato.

Per garantire coerenza geometrica nel dominio di calcolo, è stata inizialmente predisposta la griglia di calcolo del modello 2DEF, che rappresenta nel dettaglio la morfologia del fondale lagunare e del braccio di mare antistante. Successivamente, si è predisposta la griglia rettangolare del modello SWAN utilizzando delle celle di dimensione adeguata da essere contenute all'interno delle maglie triangolari

di 2DEF, ma con una dimensione tale da rendere l'onere computazionale accettabile. Le quote del fondo assegnate alle celle di SWAN sono state ottenute interpolando spazialmente le quote delle celle triangolari di 2DEF.

Tenuto conto di questi vincoli, per effettuare una simulazione accoppiata 2DEF-SWAN è necessario predisporre un file della simulazione del moto ondoso (file di tipo “.swn”) che deve contenere il set delle condizioni al contorno del moto ondoso stesso. Parallelamente, nel file della simulazione idrodinamica (file di tipo “.sim”) è necessario predisporre i record con le istruzioni di chiamata alle corse di SWAN, in cui sono specificati, ad esempio, il nome del file “.swn”, l'intervallo temporale tra una corsa e la successiva, le tabelle in cui sono contenute le serie temporali con i dati del moto ondoso al largo, ecc.

Ad ogni attivazione, il codice 2DEF predispone i files di scambio tra i due modelli (valori nodali dei livelli, delle velocità delle correnti e, eventualmente, delle quote del fondo) e avvia la simulazione di SWAN. Al termine della corsa di SWAN, il codice 2DEF recupera e salva i risultati della simulazione del moto ondoso (altezza, direzione e periodo dell'onda), leggendo inoltre le forzanti per l'idrodinamica (sforzi dovuti ai “radiation stress” e velocità orbitali al fondo). Queste vengono mappate sul dominio di calcolo del modello 2DEF e vengono applicate come forzanti per la simulazione idrodinamica che riprende la sua corsa fino al successivo scadere dell'intervallo temporale delle corse di SWAN.

La procedura si ripete fino al termine della simulazione idrodinamica, e produce ad ogni step di output sia il campo d'onda calcolato da SWAN, sia il campo idrodinamico (correnti, set-up, etc.) forzato dalle consuete condizioni al contorno (livelli, portate, vento) combinate con le forzanti generate dal moto ondoso.

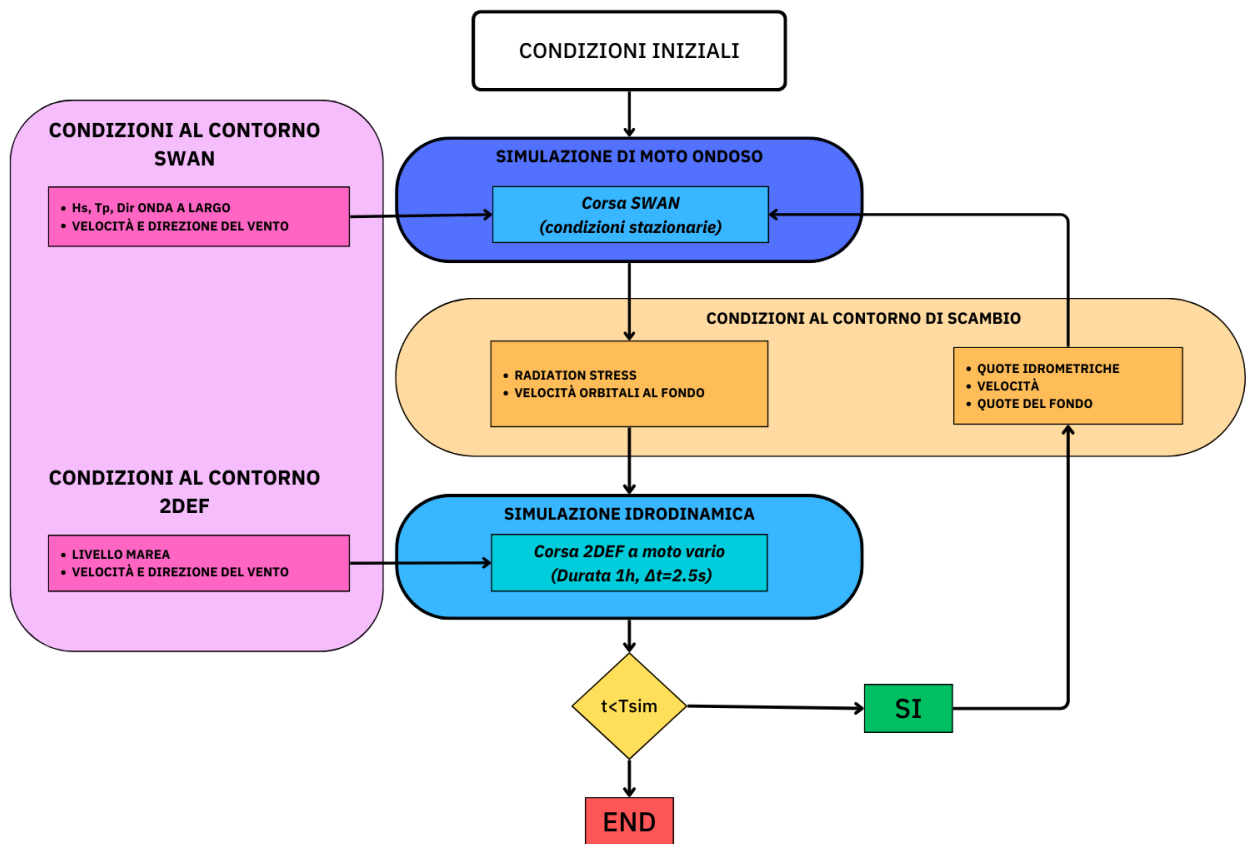


Fig. 2.2.1 - Diagramma di flusso che descrive l'accoppiamento 2DEF-SWAN.





## 3 Implementazione del modello per la Laguna di Caleri

### 3.1 Griglia di calcolo del modello 2DEF

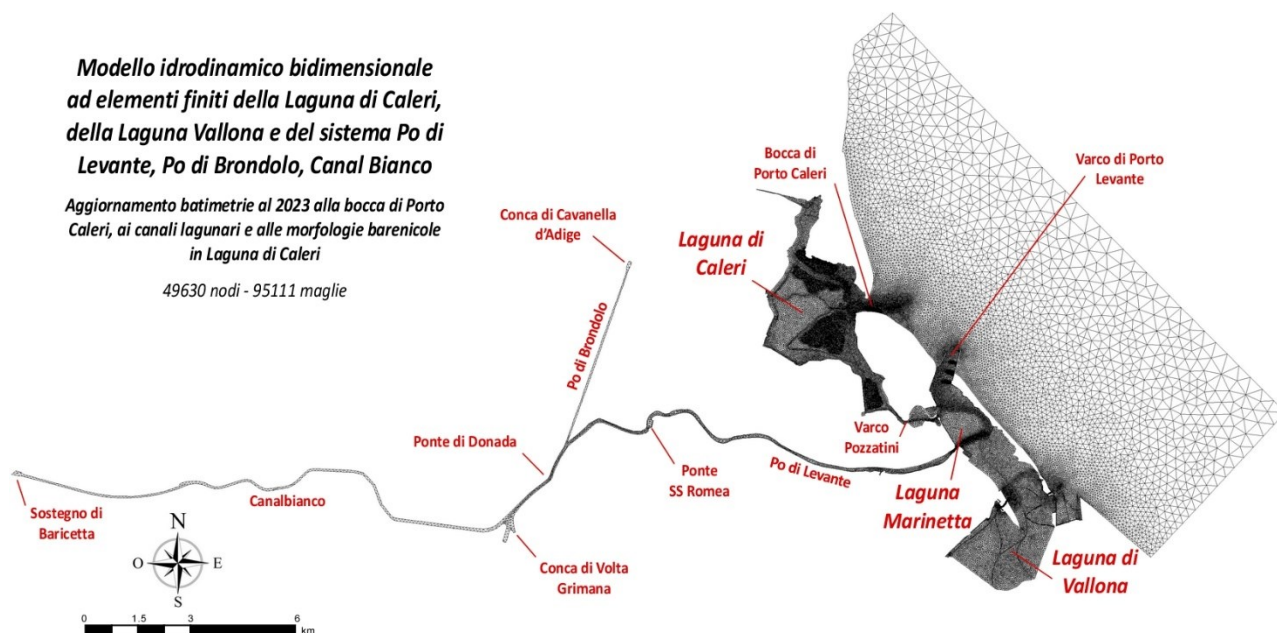
Il dominio di studio comprende un'area molto estesa. La griglia utilizzata, infatti, schematizza in un unico modello il sistema lagunare di Caleri, Vallona e Marinetta, collegate fra di loro mediante il Varco Pozzadini. Nel reticolo di calcolo (Fig. 3.1.1) è stata schematizzato il Po di Brondolo fino alla conca di Cavanella d'Adige, il Canal Bianco fino al sostegno di Baricetta e il braccio di mare antistante alle due lagune fino all'incirca alla batimetrica – 25 m s.l.m.

Il reticolo di calcolo appena descritto è stato originariamente realizzato dalla società Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l, ed è stato aggiornato nell'ambito del presente studio sulla base delle indagini in campo realizzate nel 2023. Gli aggiornamenti, che hanno interessato l'area nell'intorno di Porto Levante, sono stati effettuati impiegando i rilievi batimetrici realizzati sulla bocca di Caleri e nei canali lagunari. Il reticolo di calcolo è inoltre stato aggiornato sulla base delle indagini aeree effettuate impiegando dispositivi UAVs, che hanno permesso di creare un modello digitale del terreno delle morfologie barenicole nella laguna di Caleri.

Il reticolo di calcolo risultante copre una superficie di 68 km<sup>2</sup>, di cui circa 10 km<sup>2</sup> competono alla laguna di Caleri vera e propria. La griglia, di tipo non strutturato, è composta da 49630 nodi e 95111 maglie triangolari. Vengono impiegate maglie di dimensioni maggiori, fino a 300 m per lato, per schematizzare gli specchi d'acqua posti più a largo in mare aperto. Nella schematizzazione della laguna e in particolare per la bocca, i canali interni e tutti i punti in cui sono presenti singolarità rilevanti dal punto di vista idrodinamico la lunghezza delle maglie è ridotta fino a valori minimi dell'ordine di 5 m.

Il parametro  $\alpha_r$ , relativo alle macro-asperità delle maglie e correlato alla distribuzione di probabilità delle quote, è stato fissato a 0.3 m per tutte le maglie del dominio. Questa scelta è stata fatta in conformità con l'approccio adottato in casi simili precedentemente analizzati utilizzando lo stesso modello.

In Fig. 3.2.1 viene riportata la schematizzazione batimetrica utilizzata nel modello, la quale riflette il modello digitale dell'altimetria (DEM) ricostruito per la Laguna, basato sui dati aerei e batimetrici disponibili.



**Fig. 3.1.1 – Reticolo di calcolo del nuovo modello matematico bidimensionale della laguna di Caleri, aggiornato al 2023. La schematizzazione include anche la adiacente laguna Marinetta - Vallona, il Po di Levante, il Po di Brondolo fino alla conca di Cavanella d’Adige, il Canal Bianco fino al sostegno di Baricetta e il braccio di mare antistante alle due lagune fino all’incirca alla batimetrica - 25.**

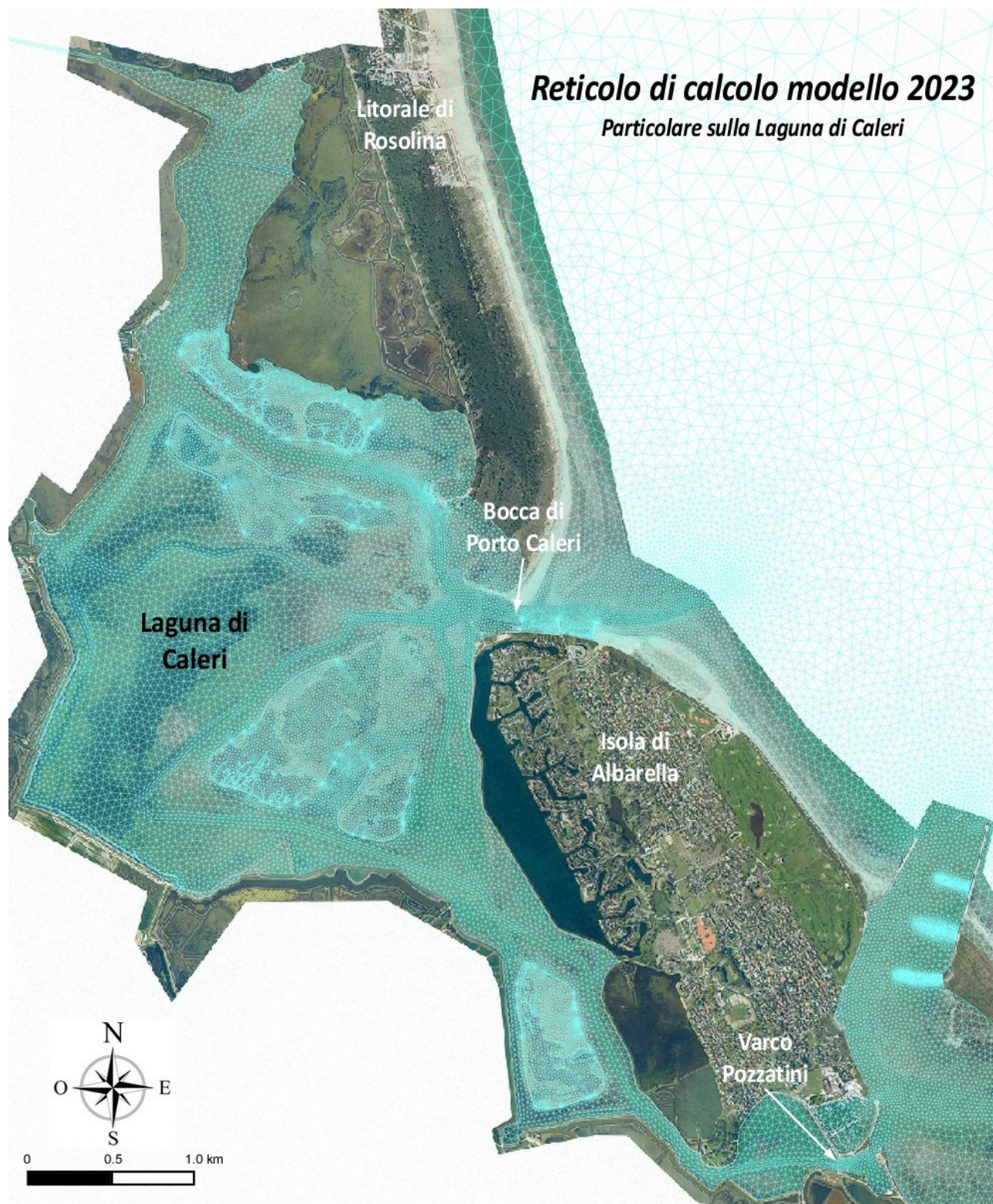


Fig. 3.1.2 – Particolare del nuovo reticolo di calcolo della Laguna di Caleri. Base: ortofoto volo LIDAR aprile 2018 Regione del Veneto, georeferenziata.

## 3.2 Griglia di calcolo del modello SWAN

Il reticolo di calcolo del modello SWAN è costituito da una griglia strutturata composta da celle rettangolari con dimensioni di 922 righe per 527 colonne. Il numero totale delle celle, escludendo le aree esterne alla laguna, ammonta a 224'925. La griglia si estende fino alla profondità di -10 m s.l.m. La risoluzione degli elementi quadrangolari è di 10 metri all'interno della laguna e di 50 metri nel vertice meridionale esterno.

La batimetria implementata nel modello SWAN coincide esattamente con quella del modello 2DEF, in quanto è generata automaticamente da quest'ultimo mediante una triangolazione basata sulle quote dei nodi. In Fig. 3.2.1 viene riportata la geometria dei due modelli e le quote batimetriche alla base di entrambi i modelli.

Le uniche differenze tra le due griglie riguardano la presenza di ostacoli nel dominio di calcolo, come i moli esterni di Porto Levante ed alcuni altri dispositivi (pennelli e barriere frangionde) che nel modello SWAN sono rappresentati tramite elementi speciali di tipo "*obstacle*".

Le corse del modello SWAN sono stazionarie e sono attivate ogni ora durante la simulazione idrodinamica 2DEF. Le condizioni al contorno di livello sono state applicate lungo l'intero margine libero della griglia di calcolo in mare aperto; il moto ondoso è stato applicato lungo i bordi orientali e meridionali del dominio di calcolo e il vento a tutta la superficie del dominio di calcolo (si veda il par 3.3 per maggior dettaglio).

Il modello SWAN è stato azionato in modalità GEN3, che rappresenta la configurazione di generazione più recente. Durante la simulazione, sono stati attivati i processi di frangimento con la formulazione di Battjes and Janssen, di interazione con il fondale tramite lo schema Jonswap, il whitecapping e l'azione generativa da vento, comprese le interazioni non lineari tra le onde (quadruplette). I parametri relativi alla configurazione del modello SWAN verranno riportati con maggior dettaglio nel par 3.4.2, relativo alla taratura del modello accoppiato.

Per quanto riguarda la schematizzazione dell'effetto dei pennelli presenti all'ingresso di Porto Caleri, delle barriere frangionda lungo i margini della laguna e delle barriere presenti nella bocca di Porto Levante, è stata adottata la formulazione di Goda (1967) utilizzando i coefficienti di Seelig (1979)  $\alpha = 2.6$  e  $\beta = 0.15$ , tipici delle strutture emerse o sommerse con una pendenza delle sponde di 1:3/2.

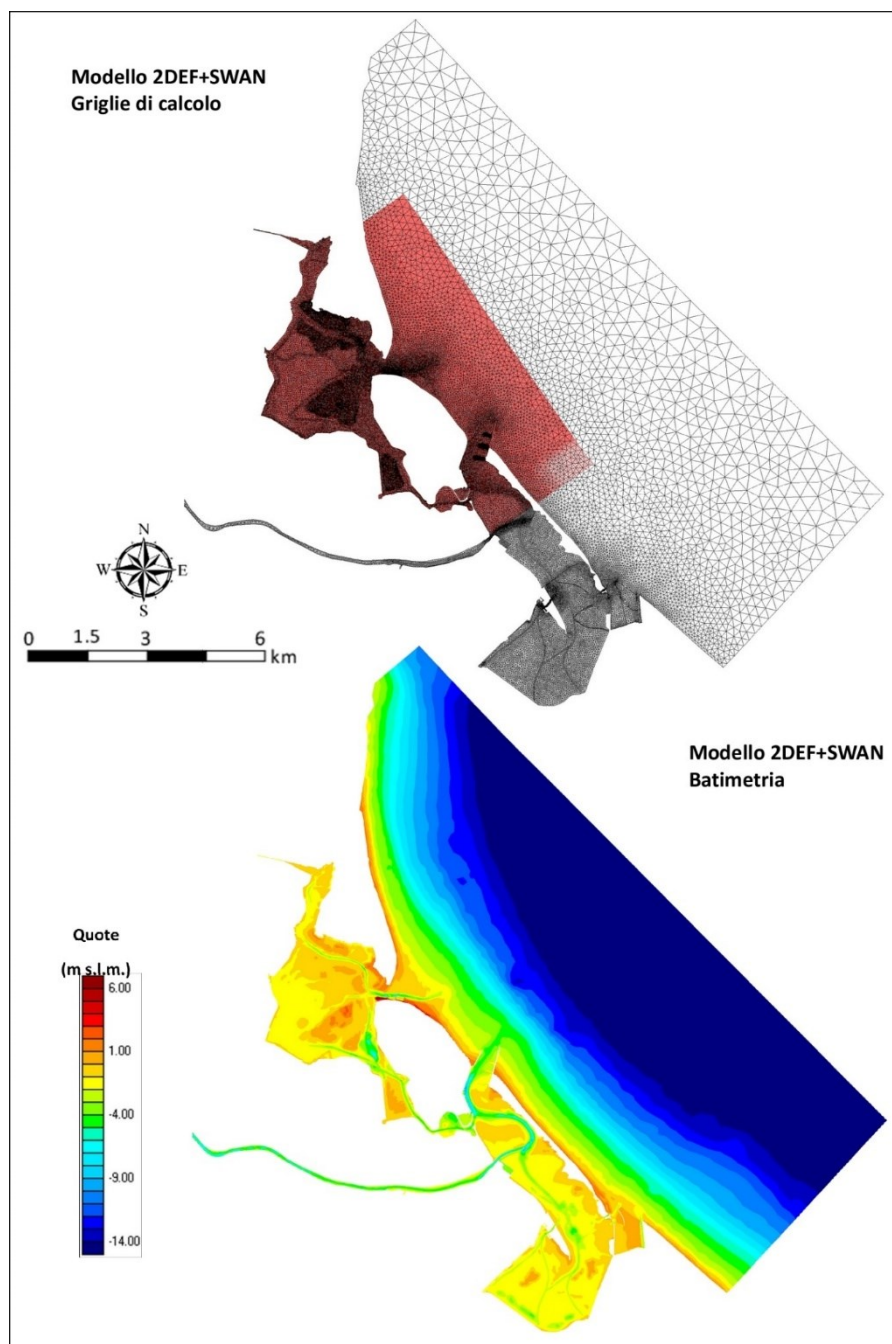


Fig. 3.2.1 – Griglia del modello 2DEF con sovrapposta la griglia del modello SWAN e quote batimetriche implementate nel modello della Laguna di Caleri. Aggiornamento 2023.

### 3.3 Condizioni al contorno e scenari simulati

Come riportato in precedenza, l'analisi modellistica è stata realizzata mediante uno strumento software che accoppia due modelli di tipo bidimensionale: il modello idrodinamico 2DEF e il modello

di moto ondoso SWAN. Il modello accoppiato è reso operativo mediante il software di interfaccia del modello 2DEF, denominato Incidenze e sviluppato dalla società Ipros Ingegneria Ambientale.

In questo capitolo sono riportate le condizioni al contorno principali utilizzate nelle simulazioni con riferimento a entrambi i modelli. All'interno di questa tesi sono state effettuate due tipologie di simulazioni: la prima è relativa alla taratura dei modelli, per la quale sono state svolte delle simulazioni per tarare il modello idrodinamico (2DEF) e il modello accoppiato (2DEF+SWAN). La seconda tipologia prevede l'utilizzo del modello accoppiato onde-correnti per riprodurre scenari di interesse specifico, come la simulazione della propagazione del moto ondoso durante eventi estremi o la simulazione di eventi estremi in un contesto di innalzamento del livello del mare (SLR).

Con riferimento al modello idrodinamico (2DEF), le condizioni al contorno principali per le simulazioni consistono nell'applicazione, sul bordo esterno del dominio di calcolo in mare aperto, dell'andamento della marea.

Per la prima tipologia di simulazione, sono stati applicati al modello i dati di marea misurati presso le più vicine stazioni disponibili. In particolare, per la simulazione dell'evento del 14/09/2023, nel corso del quale sono state effettuate le misure mareografiche e correntometriche, sono state considerate le misure effettuate dal mareografo ISPRA di Diga Sud Chioggia.

Nelle simulazioni di taratura si sono assegnate le portate entranti nel dominio di calcolo relative al Po di Levante. Data la modesta rilevanza che questi contributi rivestono sulla circolazione delle correnti nelle situazioni ordinarie, si è ipotizzato che questo fiume conferisca alla rispettiva foce una portata costante minima, corrispondente a situazioni di magra ( $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

La simulazione è stata avviata a partire da condizioni statiche (livello orizzontale e velocità nulla in tutto il dominio di calcolo) utilizzando un congruo intervallo di tempo iniziale prima del periodo di analisi per consentire la messa a regime del campo idrodinamico.

Per quanto riguarda l'attribuzione dei coefficienti di scabrezza alle maglie del reticolo di calcolo, in analogia con numerosi studi analoghi effettuati sulle lagune del Delta, si sono assegnati valori diversi dei coefficienti di scabrezza in ragione delle diverse profondità. Un'analisi più in dettaglio sull'attribuzione di  $K_s$  viene riportata nel paragrafo 3.4.1.

La durata della simulazione di taratura è pari a 36 ore, con un passo temporale di calcolo di 3.0 s.

Con riferimento al modello di moto ondoso (SWAN), le simulazioni numeriche si basano su condizioni al contorno definite nell'area interna e sul bordo esterno del dominio di calcolo. Le condizioni al contorno, utilizzate per forzare il modello nei vari scenari di simulazione sono:

- Andamento nel tempo del livello del mare, applicato lungo l'intero margine libero della griglia di calcolo in mare aperto.
- Direzione ( $^{\circ}$ N) e velocità del vento ( $W_s$ ), applicati sulla superficie di tutto il dominio di calcolo.
- Altezza d'onda significativa ( $H_s$ ), direzione dell'onda e periodo di picco ( $T_p$ ), applicati lungo i bordi orientali e meridionali del dominio di calcolo.

Come menzionato in precedenza, l'analisi modellistica è stata realizzata mediante uno strumento software che accoppia due modelli di tipo bidimensionale (2DEF+SWAN). Il modello accoppiato è stato utilizzato per effettuare simulazioni della prima tipologia (taratura) e della seconda (eventi estremi).

Per entrambe le tipologie di simulazione, sono stati applicati a SWAN, come condizione al contorno, i dati misurati presso le più vicine stazioni disponibili. In particolare, per la simulazione degli eventi di taratura (riportati in dettaglio nel par. 3.4.2) per l'andamento nel tempo della marea, sono state considerate le misurazioni effettuate dal mareografo ISPRA di Diga Sud Chioggia. Per i dati di direzione e velocità del vento, altezza d'onda significativa e periodo registrati nel corso degli eventi, sono state considerate le misurazioni effettuate dal mareografo ISPRA di Caleri Moceniga. È opportuno sottolineare che il periodo registrato dalla stazione non è il periodo di picco ( $T_p$ ) ma il periodo medio ( $T_0$ ). Si riporta inoltre che il mareografo di Moceniga non registra la direzione dell'onda, che verrà applicata al modello in modalità concorde con il dominio e le forzanti anemometriche registrate.

La durata delle simulazioni del modello accoppiato è pari a 48 ore. L'intervallo di calcolo è stato assunto fisso e pari a 2.5 secondi. Le corse del modello SWAN sono attivate ogni ora durante la simulazione idrodinamica.

### 3.4 Taratura dei modelli

Le variazioni di livello e la circolazione delle correnti all'interno della laguna sono determinate dalla combinazione delle azioni della marea, del moto ondoso e del vento. Per simulare l'andamento dell'altezza d'onda significativa all'interno della laguna o il sovrizzo, legato all'azione combinata di onda e vento, si rende necessario l'impiego di appositi modelli che simulino l'idrodinamica dell'ambiente lagunare e il moto ondoso. Un modello idrodinamico per rappresentare in maniera

fedele la realtà deve essere opportunamente tarato; se questo avviene significa che l'andamento dei dati calcolati riproduce in maniera corretta i dati misurati dalle varie stazioni mareografiche.

Per simulare le dinamiche lagunari è necessario sviluppare e calibrare due modelli, la prima fase prevede la taratura del modello idrodinamico (2DEF) rispetto ai livelli e alle portate scambiate valutate nelle sezioni significative della bocca di Porto Caleri, in condizioni marine non perturbate. La seconda fase di taratura riguarda il modello accoppiato di moto ondoso (2DEF+SWAN) per cui viene considerato l'andamento dei livelli (Mareografo di Chioggia Diga Sud, Porto Caleri e Moceniga), delle onde (Mareografo di Caleri) e del vento (Mareografo di Caleri) in condizioni marine perturbate.

### 3.4.1 Taratura del modello 2DEF rispetto a misure mareografiche e correntometriche

La taratura di un modello idrodinamico consiste nella calibrazione dei parametri e dei coefficienti che determinano il campo di moto simulato. Lo scopo è quello di ottenere la migliore corrispondenza possibile tra i risultati del calcolo e le misure reali.

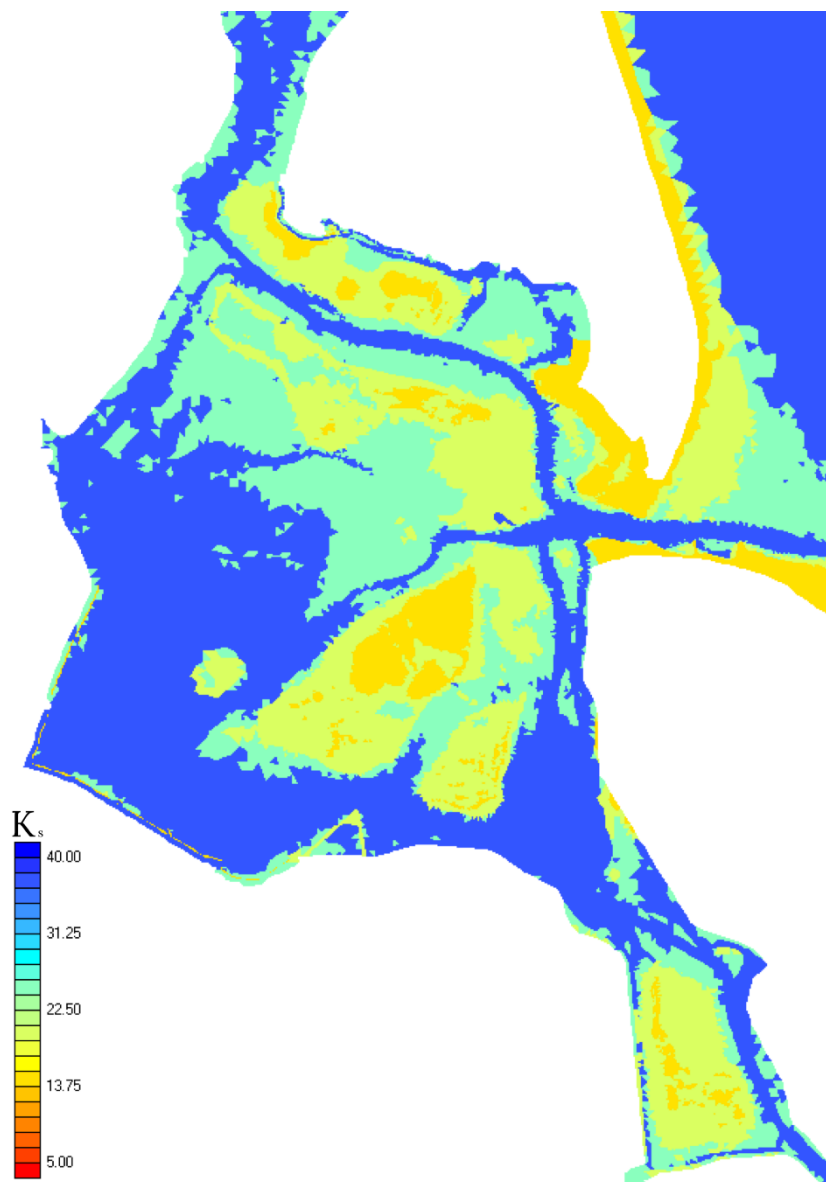
Nel caso in esame, il modello bidimensionale a elementi finiti si basa sulla rappresentazione precisa della morfologia del fondale. Ne consegue che gli unici parametri da calibrare sono i coefficienti di scabrezza assegnati alle maglie del reticolo di calcolo. Come valori di primo tentativo, sono stati assegnati i coefficienti di scabrezza più idonei sulla base di esperienze precedenti realizzate da Ipros Ingegneria Ambientale in casi analoghi nelle lagune del Delta del Po.

Per simulare la scabrezza del fondale lagunare, sono stati assegnati diversi valori di  $K_s$  alle maglie del reticolo di calcolo (Fig. 3.4.1). In particolare, nella Laguna di Caleri, i valori variano da  $40 m^{1/3}/s$  nelle zone più profonde della bocca a  $15 m^{1/3}/s$  nelle zone semi-emerse. Valori intermedi sono stati utilizzati per i bassifondi e le aree di "velma".

Per simulare le dissipazioni di energia che si verificano nei varchi, bocchette e manufatti, sono stati utilizzati coefficienti di scabrezza compresi tra 5 e  $20 m^{1/3}/s$ . Ad esempio, lungo il canale che collega la Laguna di Caleri al Varco Pozzatini è stato imposto un coefficiente di scabrezza di  $20 m^{1/3}/s$ , mentre al di sotto del ponte del Varco Pozzatini il valore è stato fissato a  $5 m^{1/3}/s$ .

Il motivo per il quale sono stati attribuiti questi coefficienti di scabrezza è dovuto al processo di taratura del modello, con l'obiettivo di ottenere la migliore corrispondenza possibile tra i risultati del calcolo e le misure disponibili. In mare è stato adottato un valore uniforme di  $38 m^{1/3}/s$ .





**Fig. 3.4.1 - Mappa dei coefficienti di scabrezza utilizzati nel modello per la Laguna di Caleri**

Come menzionato in precedenza, la prima fase prevede la taratura del modello idrodinamico (2DEF) rispetto ai livelli e alle portate scambiate valutate nelle sezioni significative della bocca di Porto Caleri, in condizioni marine non perturbate. A tale scopo, in data 14/09/2023 è stata eseguita una campagna di misure mareografiche e correntometriche. In Fig. 3.4.2 viene rappresentata, su base ortofoto 2018, la posizione della postazione mareografica appositamente installata e delle 4 sezioni in corrispondenza delle quali sono state effettuate le misure di portata. Nella stessa figura è rappresentata anche la posizione delle stazioni mareografiche di “Porto Caleri” e di “Moceniga” di ISPRA.

Il mareografo ha registrato in continuo l'andamento della marea a partire dalle ore 15:00 del 13/09 e fino alla conclusione delle misure stesse. Le misure correntometriche sono state eseguite per l'intera giornata del 14 settembre al fine di monitorare continuamente il flusso attraverso le sezioni di misurazione durante le diverse fasi del ciclo di marea.

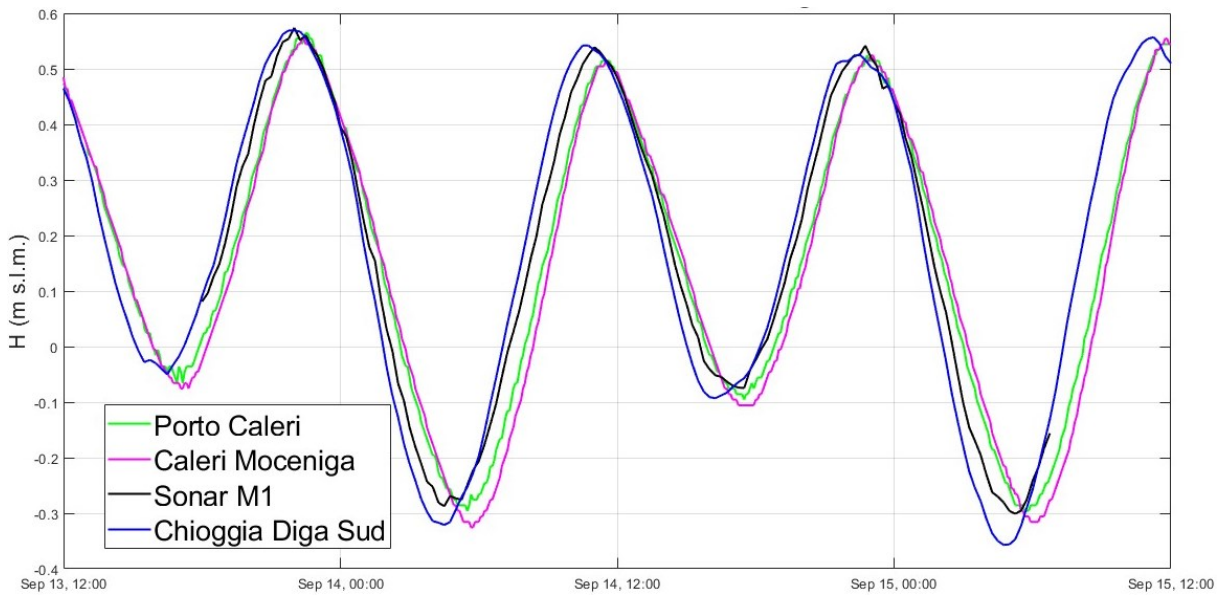
Il grafico di Fig. 3.4.3 mostra l'andamento del livello di marea registrato dal sensore M1 installato presso la darsena di Albarella. Nello stesso grafico è rappresentato anche l'andamento registrato dalle stazioni mareografiche più vicine, di cui si sono reperiti i dati. Queste sono le stazioni ISPRA di Chioggia Diga Sud, Porto Caleri e Moceniga. Dalla stessa Figura 4.4.2, analizzando i dati del mareografo di Chioggia Diga Sud, emerge che il 14 settembre è stato caratterizzato da una fase di marea crescente durante il giorno con un'ampiezza di 88 cm (con un minimo di -0,34 m e un massimo di +0,54 m s.l.m.), seguita da una fase di marea calante di ampiezza inferiore pari a 64 cm (con un minimo serale di -0,10 m s.l.m.). In Tab. 3.4.1 si riportano i valori delle portate misurate nel corso della campagna del 14/09/2023.

Rispetto al mareografo di Chioggia, i mareografi di Porto Caleri e Moceniga mostrano un ritardo medio di circa 50÷60 minuti nella registrazione dei dati, mentre tra Chioggia e il sensore di Albarella (M1) l'intervallo è di circa 20 minuti. Questo ritardo è influenzato dalle modifiche che l'onda di marea subisce durante la sua propagazione dal mare verso l'interno, principalmente a causa delle resistenze idrauliche provocate dal restringimento delle bocche e dalle dissipazioni sui bassi fondali lagunari.

Sulla base dei dati raccolti presso le stazioni meteo ISPRA, analizzati durante lo svolgimento della campagna di misura, risulta che le condizioni meteorologiche sono state caratterizzate da tempo stabile con vento debole al mattino e con un lieve rinforzo nel pomeriggio.



Fig. 3.4.2 – Campagna di misure del 14 settembre 2023. Posizione dei mareografi (M1, Porto Caleri e Moceniga) e dei transetti correntometrici ADCP. Le frecce indicano il verso positivo delle portate. Base: ortofoto volo LIDAR aprile 2018 Regione del Veneto, georeferenziata.



**Fig. 3.4.3 – Andamento della marea registrata presso il mareografo M1 (Albarella), alla Diga Sud di Chioggia (ISPRA), al Porto Caleri (ISPRA) e a Moceniga (ISPRA). Dati in ora legale.**

S1		S2		S3		S4	
Ora	Portata (m³/s)	Ora	Portata (m³/s)	Ora	Portata (m³/s)	Ora	Portata (m³/s)
06:42:05	202.57	06:55:30	76.3	07:05:48	68.6	07:15:22	82.5
07:28:39	260.52	07:36:39	91.7	07:45:58	76.4	07:57:44	88.4
08:34:06	355.00	08:46:47	122.3	08:54:30	101.2	09:16:05	97.7
09:29:45	371.89	09:40:08	131.4	09:49:08	97.1	09:59:22	81.7
10:28:33	257.92	10:39:24	85.4	10:53:13	58.0	11:04:22	37.0
11:53:30	-149.50	12:06:00	-78.4	12:15:44	-47.4	12:35:21	-57.2
13:00:45	-237.57	13:11:03	-75.3	13:20:55	-49.4	13:38:30	-70.9
14:04:04	-239.57	15:18:49	-80.1				
15:07:20	-261.03						

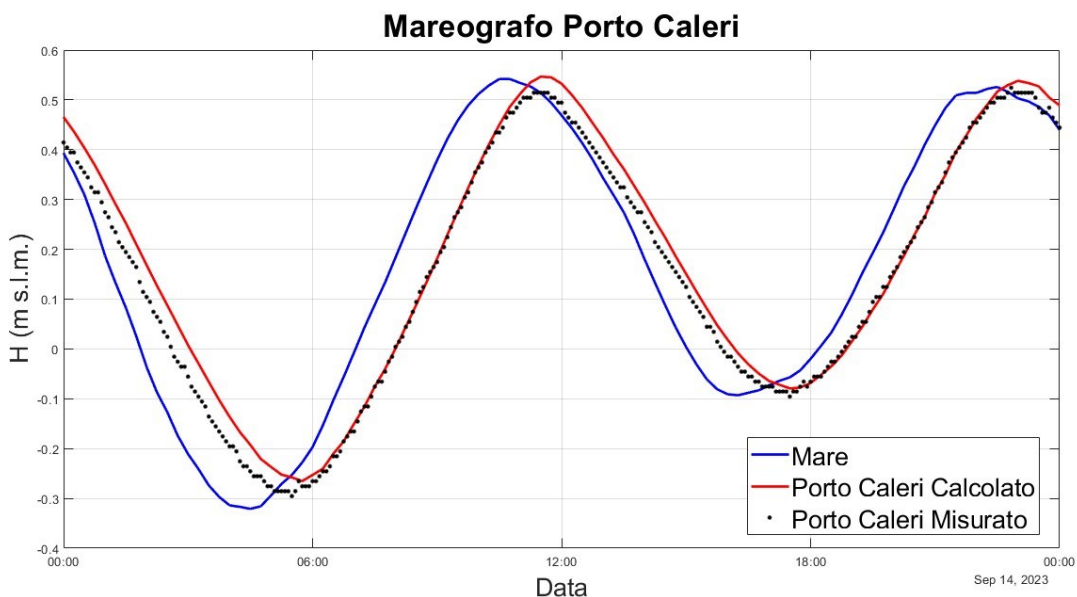
**Tab. 3.4.1 - Sintesi delle portate misurate il giorno 14 settembre 2023. Ora legale.**

La forzante vento è risultata del tutto trascurabile ai fini dei risultati modellistici di taratura, in linea con il fatto che, durante la giornata di misure del 14/09/2023, il tempo è rimasto stabile e caratterizzato da vento debole al mattino con un lieve rinforzo nel pomeriggio. Con tale assunzione, è stata effettuata la simulazione dell’evento del 14/09/2023 applicando come condizioni al contorno il solo andamento del livello in mare (misurato dalla stazione ISPRA Diga Sud Chioggia).

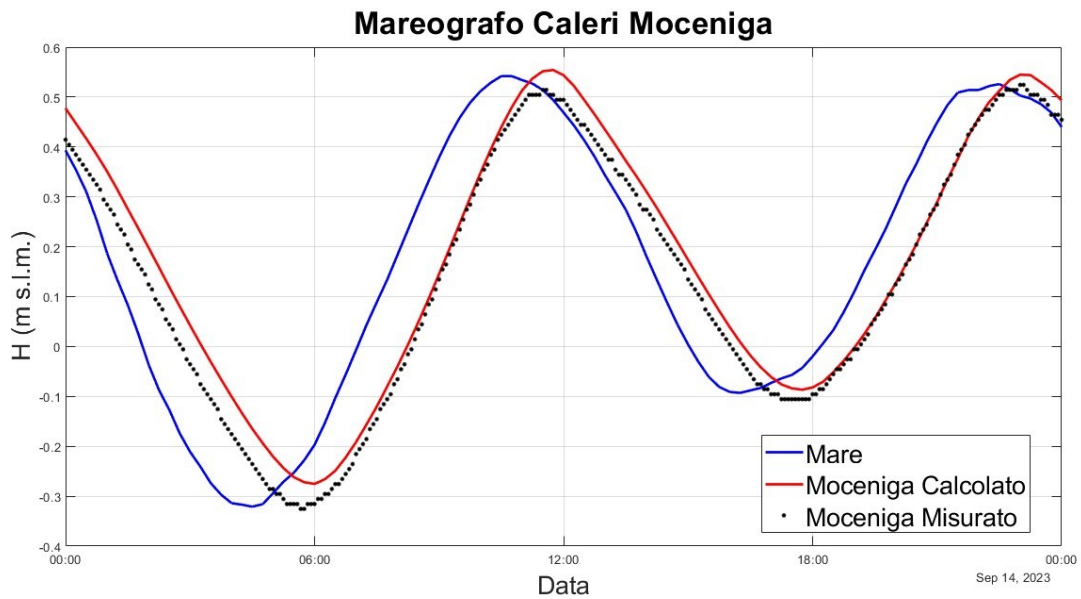
Nei grafici (Fig. 3.4.4, Fig. 3.4.5, Fig. 3.4.6) viene messo a confronto l’andamento dei livelli simulati con quelli misurati dalle varie stazioni mareografiche. È possibile osservare come il modello riproduca con buona approssimazione il livello misurato sia per le stazioni di Porto Caleri e Moceniga, sia per il

mareografo appositamente installato (M1). In particolare, il modello riproduce con precisione sia lo sfasamento temporale tra il segnale in mare e quello nei vari punti interni della laguna, sia l'ampiezza dell'oscillazione di marea, sia i valori estremi (colmi e cavi).

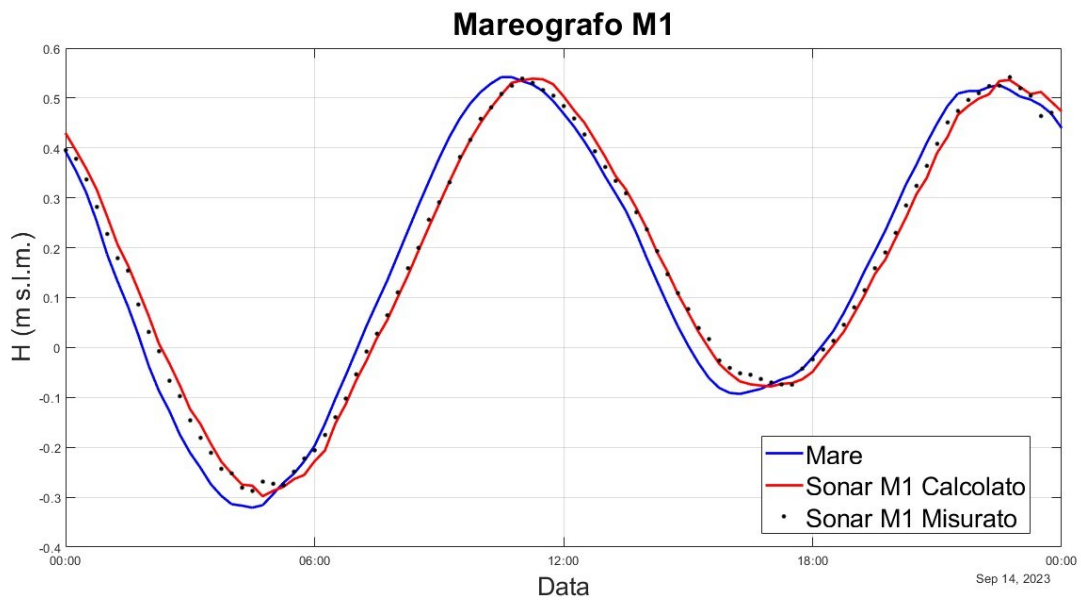
Il confronto tra i risultati del calcolo e le misure di portata effettuate con ADCP nelle quattro sezioni è risultato abbastanza soddisfacente. Nei grafici successivi (Fig. 3.4.7, Fig. 3.4.8, Fig. 3.4.9, Fig. 3.4.10) viene messo a confronto l'andamento delle portate calcolate con il modello e le misure di portata effettuate nel corso della giornata. È evidente che, per quasi tutte le sezioni presenti nella laguna, vi è un accordo più che soddisfacente tra il dato misurato e quello calcolato.



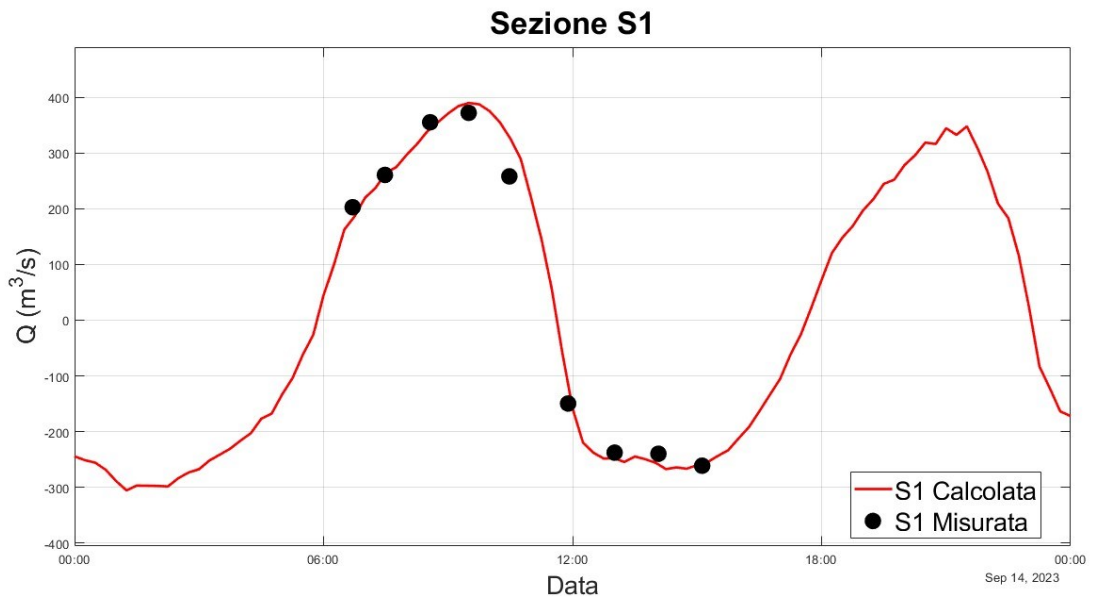
**Fig. 3.4.4 - Confronto tra livelli idrometrici misurati e calcolati con il modello 2D in corrispondenza di Porto Caleri. (Ora legale)**



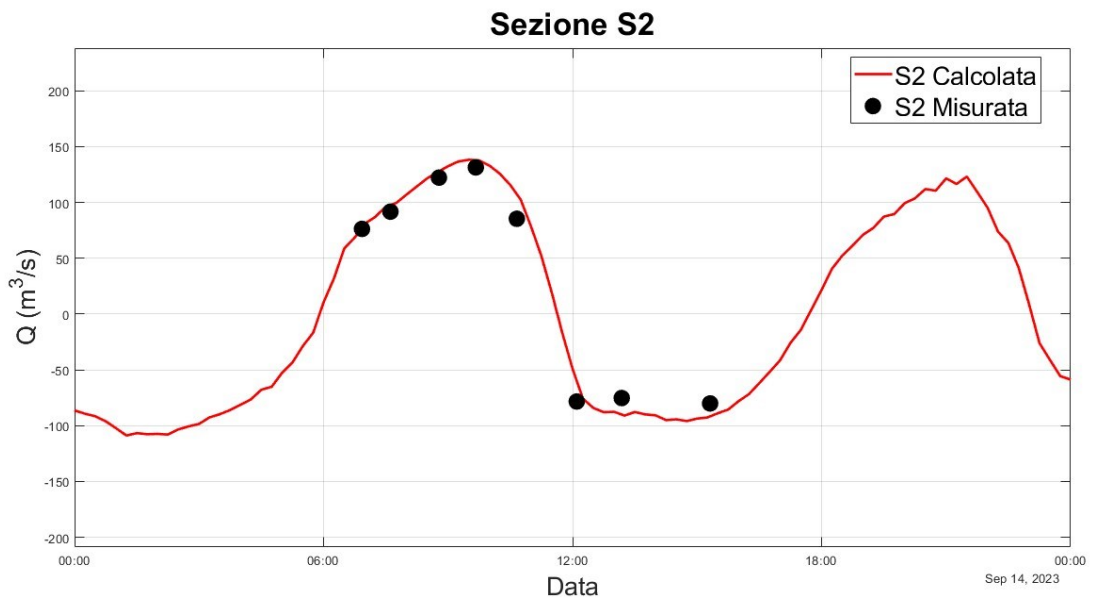
**Fig. 3.4.5 - Confronto tra livelli idrometrici misurati e calcolati con il modello 2D in corrispondenza di Moceniga. (Ora legale)**



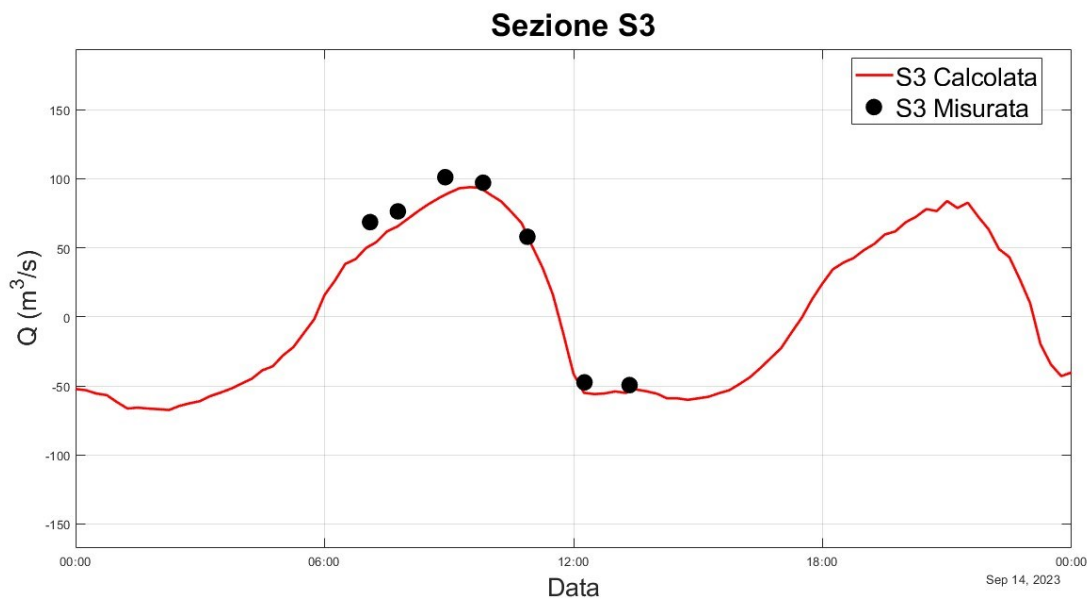
**Fig. 3.4.6 – Confronto tra livelli idrometrici misurati e calcolati con il modello 2D nel punto M1. (Ora legale)**



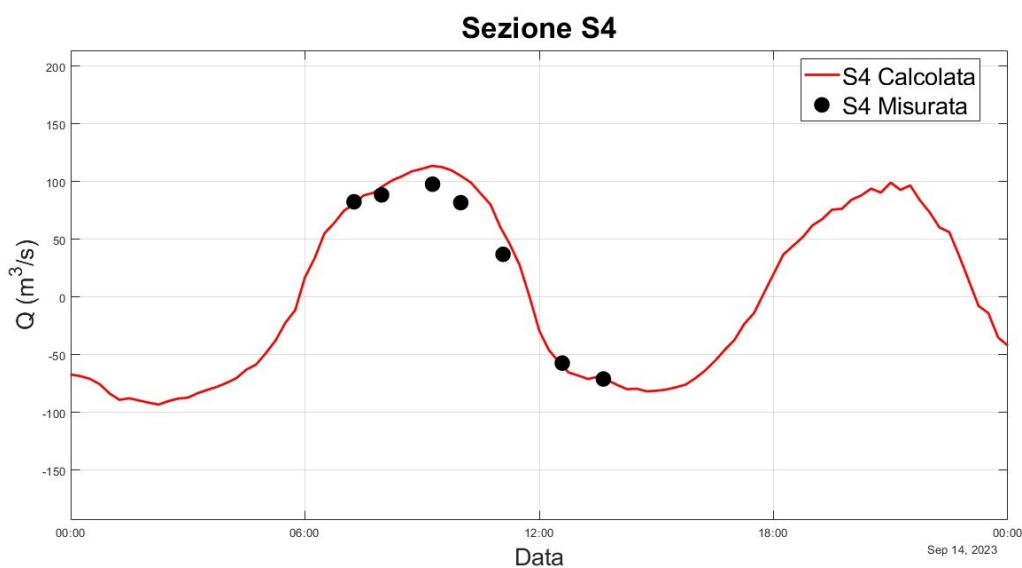
**Fig. 3.4.7 - Confronto tra portate misurate e calcolate con il modello 2D nella campagna ADCP del 14 settembre 2023, sezione S1. (Ora legale)**



**Fig. 3.4.8 – Confronto tra portate misurate e calcolate con il modello 2D nella campagna ADCP del 14 settembre 2023, sezione S2. (Ora legale)**



**Fig. 3.4.9 - Confronto tra portate misurate e calcolate con il modello 2D nella campagna ADCP del 14 settembre 2023, sezione S3. (Ora legale)**



**Fig. 3.4.10 – Confronto tra portate misurate e calcolate con il modello 2D nella campagna ADCP del 14 settembre 2023, sezione S4. (Ora legale)**

### 3.4.2 Taratura del modello accoppiato 2DEF+SWAN rispetto alle misure di livello e di moto ondoso

La taratura del modello accoppiato consiste nella calibrazione dei parametri e dei coefficienti che regolano i processi simulati fino ad ottenere il migliore accordo possibile tra i risultati del calcolo e le



misure disponibili. Avendo già eseguito la taratura del modello idrodinamico, come descritto nel precedente paragrafo, le operazioni di taratura qui descritte sono volte alla calibrazione del modello di moto ondoso.

Per tarare il modello accoppiato 2DEF+SWAN, descritto nei par. 2.2 e 3.2, sono stati considerati i tre eventi meteomarini con le condizioni ondometriche più gravose (par. 1.3.4) registrate all'interno della laguna durante la serie storica disponibile (2/08/2022 - 20/11/23). Gli eventi utilizzati per la taratura del modello accoppiato 2DEF+SWAN, perciò, sono quelli avvenuti il 17/09/2022, 22/11/2022 e 23/01/2023.

Come menzionato nel par. 2.2.1, il modello SWAN è basato sull'equazione del bilancio d'azione d'onda in forma spettrale, che è costituita da una componente cinematica e da una componente che rappresenta tutti i termini non conservativi (generazione, dissipazione e redistribuzione dell'energia dell'onda). La crescita dell'onda nel modello è controllata principalmente dall'intensità del vento e dai processi di dissipazione, mentre i termini non lineari redistribuiscono l'energia alle alte e basse frequenze. La morfologia del campo d'applicazione del modello è un'area lagunare scarsamente collegata al mare. Di conseguenza, la forzante generativa è legata all'intensità del vento, mentre quella dissipativa, a causa dello scarso sviluppo del moto ondoso, è legata principalmente all'azione del fondale e, in seconda misura, ai fenomeni di whitecapping e frangimento.

Il modello SWAN è stato azionato in modalità GEN3. La durata delle simulazioni del modello accoppiato è pari a 48 ore con un intervallo di calcolo, per il modello 2DEF, di 2.5 s. Le corse del modello SWAN sono attivate ogni ora durante la simulazione idrodinamica.

In SWAN, la soglia limite di profondità, *depmin*, è impostata pari a 0.05 m. Viene considerata la formulazione di default di Battjes e Janssen per il frangimento dell'onda indotto dalla profondità (con parametri  $\alpha=1$  e  $\gamma=0.73$ ). L'attrito sul fondo è stato attivato tramite lo schema di Jonswap, che considera un'equazione semi empirica (Hasselmann et al, 1973) con un coefficiente di attrito pari a  $0.038 \text{ m}^2/\text{s}^{-3}$ .

Viene utilizzato il pacchetto *KOMEN* per tenere conto degli effetti del vento, delle interazioni fra quadruplette e il whitecapping. Nelle simulazioni di taratura sono stati considerati i dati di direzione ( $^{\circ}\text{N}$ ) e velocità del vento ( $W_s$ ) registrati presso la stazione di Moceniga, come condizioni al contorno sulla superficie dell'intero dominio di calcolo.

Il trasferimento di energia dal vento alle onde viene descritto da SWAN mediante un termine di risonanza (Phillips, 1957) e un termine che descrive le fluttuazioni di pressione indotte dalle onde (Miles, 1957). La crescita totale dell'onda è legata al trasferimento di energia dal vento alle onde, questa viene descritta da SWAN mediante un termine che descrive la crescita lineare ( $A$ ) e un termine che descrive la crescita esponenziale ( $BE$ ). Nel modello è stata impiegata la formulazione di Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (1981) per la descrizione del termine lineare, incrementando significativamente il valore del coefficiente di proporzionalità mediante comando *AGROW* ( $\alpha = 0.02$ ). La crescita totale dell'onda è data dalla somma di questi due termini, che dipendono dalla frequenza dell'onda e dalla velocità del vento, mediante la seguente equazione:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (16)$$

La velocità del vento usata da SWAN è la velocità del vento a 10 m di altezza ( $U_{10}$ ). Dato che le registrazioni di velocità del vento usate per forzare il modello erano disponibili ad un'altezza di 5 metri, è stata apportata una correzione applicando un profilo logaritmico della velocità ( $U_{10} = 1.07 \cdot U_{reg}$ ). La velocità del vento ( $U_{10}$ ) è poi convertita dal modello in velocità d'attrito ( $U^*$ ), definita come  $U^{*2} = C_D U_{10}^2$ , con  $C_D$  il coefficiente di drag (Hsu, 1994). Per la stima di  $C_D$ , nelle simulazioni effettuate è stato utilizzato il polinomio di secondo ordine (Zijlema, 2012).

Le onde sono state caratterizzate da una distribuzione spettrale in frequenza secondo una distribuzione di tipo Jonswap, con un coefficiente di appuntimento di 3.3 e uno spreading direzionale definito dalla funzione coseno  $\cos^m(\vartheta)$ , dove  $\vartheta$  rappresenta la direzione e il coefficiente  $m$  è pari a 4. Lo spettro è stato discretizzato in 24 intervalli di frequenza ( $f_{min} = 0.1$  Hz,  $f_{max} = 2$  Hz) e 72 intervalli di direzione nell'intervallo 0-360°, suddiviso in settori da 5°.

Le simulazioni di taratura del modello accoppiato sono state effettuate a moto vario, assegnando sul bordo libero del modello in mare un livello variabile, pari a quello registrato presso il mareografo di Diga Sud Chioggia opportunamente corretto. Infatti, il livello in mare, davanti alla bocca di Porto Caleri, è comparabile a quello registrato a Diga Sud Chioggia in condizioni marine non perturbate. Se queste condizioni non sussistono, come nel caso delle simulazioni di taratura, è necessario correggere il livello del mare registrato a Diga Sud Chioggia introducendo un setup in corrispondenza dell'evento. La correzione è stata apportata mediante l'uso di una funzione additiva lineare a tratti. L'effetto è visibile nelle Fig. 3.4.11, Fig. 3.4.16 e Fig. 3.4.21. Nei grafici, la traccia blu indica l'andamento del livello

originale registrato a Diga Sud Chioggia, la traccia rossa indica l'andamento a D.S.C. corretto mediante funzione additiva lineare a tratti e utilizzato come condizione al contorno per il modello. Il livello corretto è stato inoltre elaborato mediante una media mobile a 7 valori (30 min) e ricampionato ogni quarto d'ora. L'andamento del livello registrato è rappresentato nelle figure seguenti in modo da comprendere un intervallo temporale più ampio di quello della simulazione, così da visualizzare lo stato del mare prima e dopo l'evento.

Sul margine del dominio di calcolo in mare aperto sono state applicate le condizioni al contorno per il moto ondoso, con un'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) di 2 m, un periodo di picco ( $T_p$ ) di 6 secondi e una direzione delle onde ( $Dir$ ) di 210° N. Questi parametri sono compatibili con lo sviluppo del moto ondoso al largo. Essi non sono correlati ad un evento specifico, ma rappresentano una condizione al contorno ragionevole vista la scarsa influenza dell'onda a largo per lo sviluppo del moto ondoso interno.

Dalle simulazioni risulta che l'altezza d'onda tende a crescere per effetto dell'intensità del vento, per poi smorzarsi o annullarsi nella propagazione verso riva. L'onda proveniente da largo penetra all'interno della bocca di Porto Caleri con altezza d'onda quasi nulla o molto ridotta ( $H_s < 50\text{ cm}$ ), ne consegue che lo sviluppo del moto ondoso all'interno della laguna sia forzato principalmente dal vento locale.

Nei grafici sottostanti viene messo a confronto l'andamento dei livelli simulati con quelli misurati dalle stazioni mareografiche di Moceniga e Porto Caleri, la cui posizione è indicata in Fig. 1.3.1. Gli eventi simulati corrispondono a quelli descritti nel par. 1.3.4, relativi alle condizioni ondometriche più significative registrate nella Laguna di Caleri. Nello specifico vengono descritti gli eventi del 17/09/2022 (Fig. 3.4.12, Fig. 3.4.13), del 22/11/22 (Fig. 3.4.17, Fig. 3.4.18) e del 23/01/23 (Fig. 3.4.22, Fig. 3.4.23). Il modello riproduce con precisione sia lo sfasamento temporale tra il segnale in mare e quello nei vari punti interni della laguna, sia l'ampiezza di oscillazione della marea. Vengono inoltre riprodotti in modo soddisfacente i valori estremi (colmi e cavi) registrati durante gli eventi.

Nei grafici di Fig. 3.4.14, Fig. 3.4.19 e Fig. 3.4.24 viene messo a confronto l'andamento dell'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) registrata con quella calcolata durante gli eventi presso il mareografo di Moceniga. Il modello riproduce correttamente l'andamento temporale di  $H_s$  per gli eventi, viene riprodotto in modo accettabile il valore di massima  $H_s$  registrata. In ogni grafico è riportata la differenza fra  $\max(H_{s,reg})$  e  $\max(H_{s,calc})$ , l'accordo risulta essere soddisfacente per tutti e tre i casi.

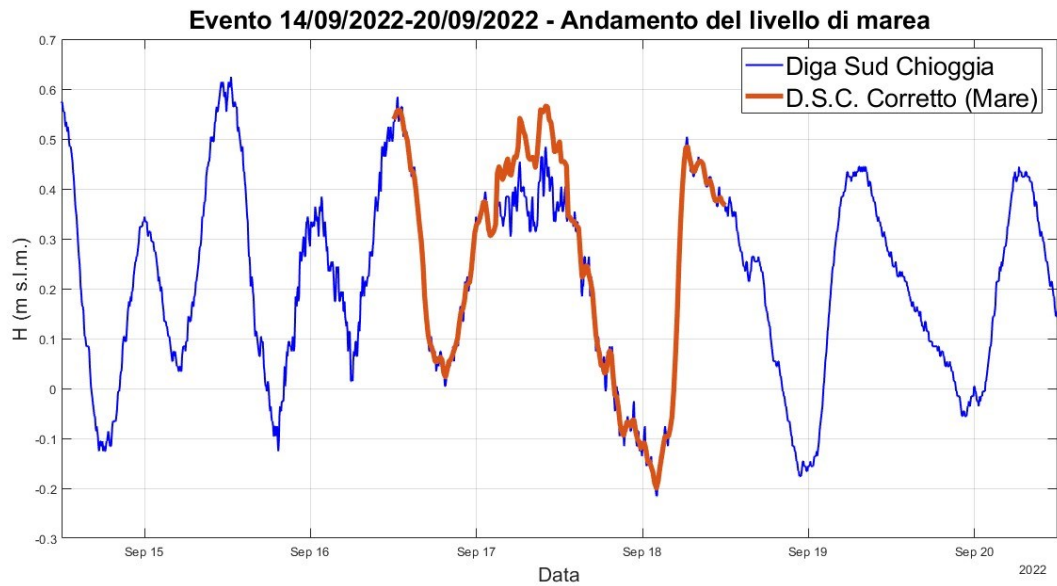


Fig. 3.4.11 – Andamento del livello di marea, riferimento IGM (14/09/2022 – 20/09/2022)

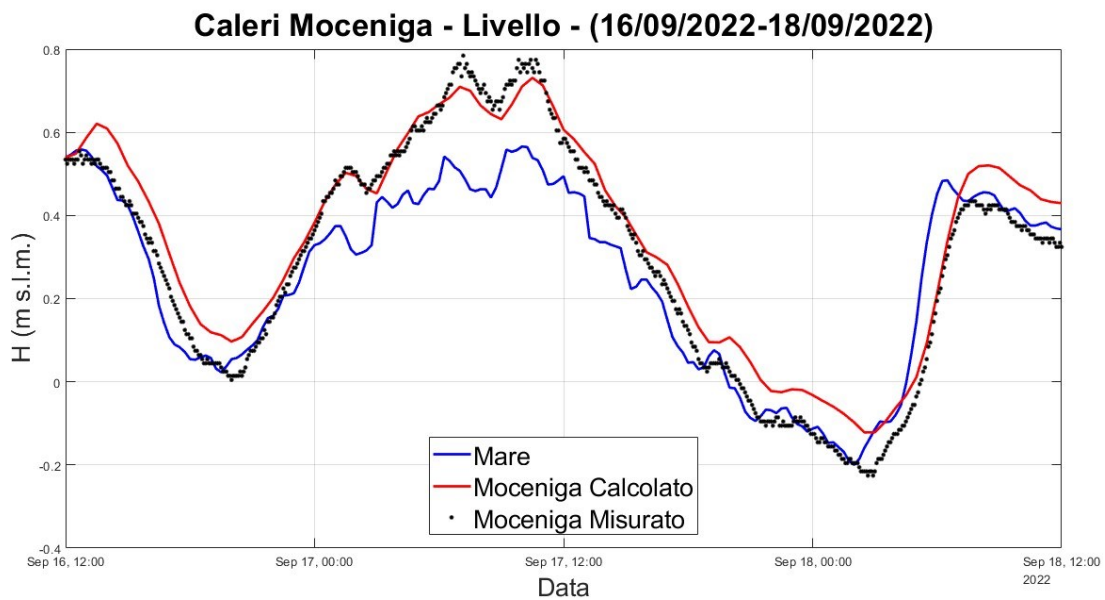
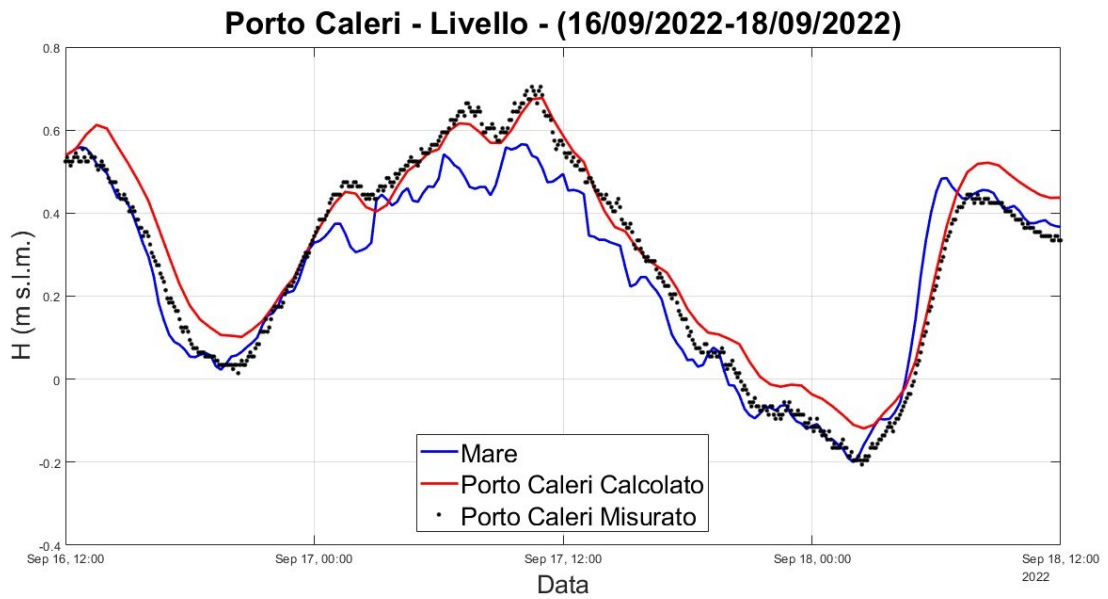
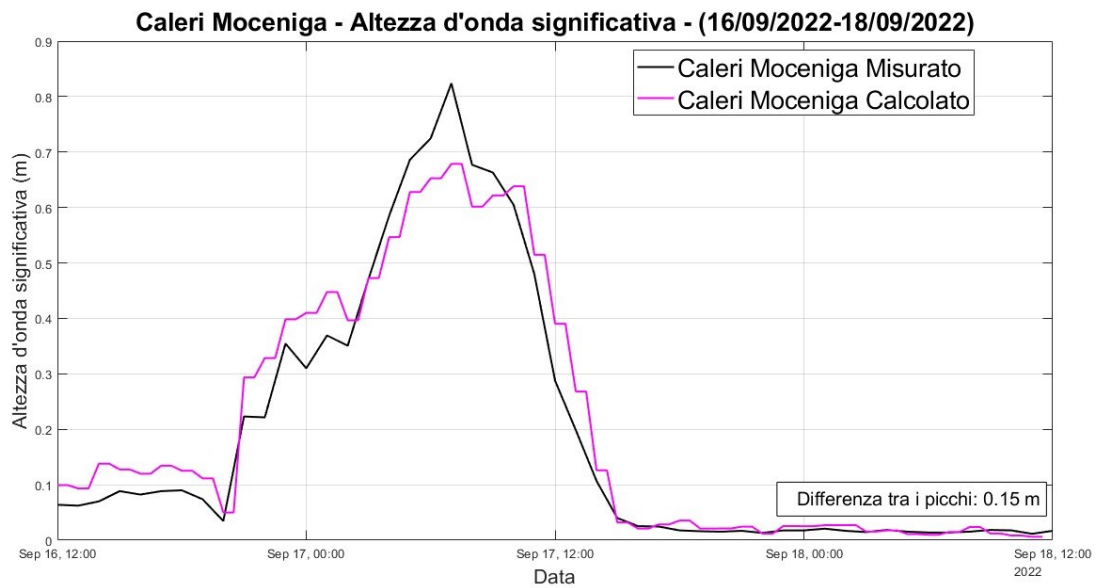


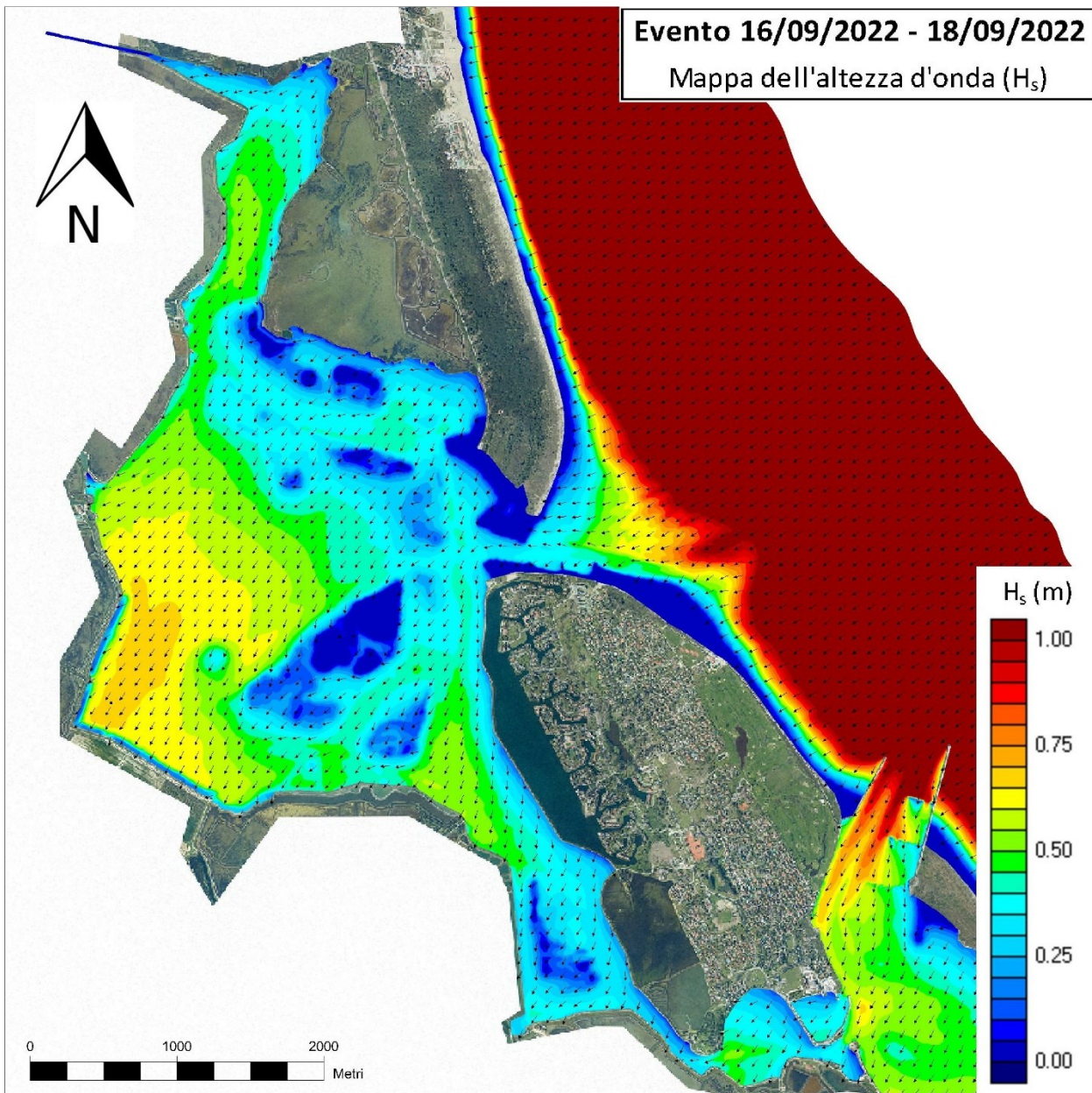
Fig. 3.4.12 - Confronto tra livelli idrometrici misurati e calcolati con il modello accoppiato in corrispondenza di Moceniga. (Ora legale)



**Fig. 3.4.13 - Confronto tra livelli idrometrici misurati e calcolati con il modello accoppiato in corrispondenza di Porto Caleri. (Ora legale)**



**Fig. 3.4.14 - Confronto tra  $H_s$  misurata e calcolata con il modello accoppiato in corrispondenza di Moceniga. (Ora legale)**



**Fig. 3.4.15 - Simulazione con il modello accoppiato 2DEF+SWAN. Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nella laguna di Caleri, istante di onda massima per Moceniga (17/9/22 7:30).**

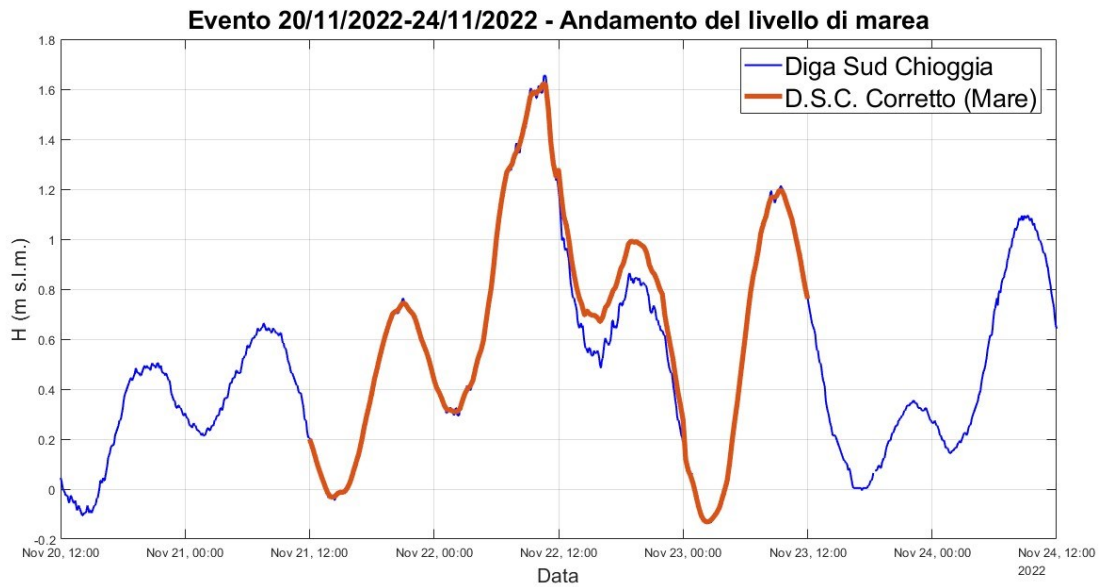


Fig. 3.4.16 - Andamento del livello di marea, riferimento IGM (20/11/2022 - 24/11/22)

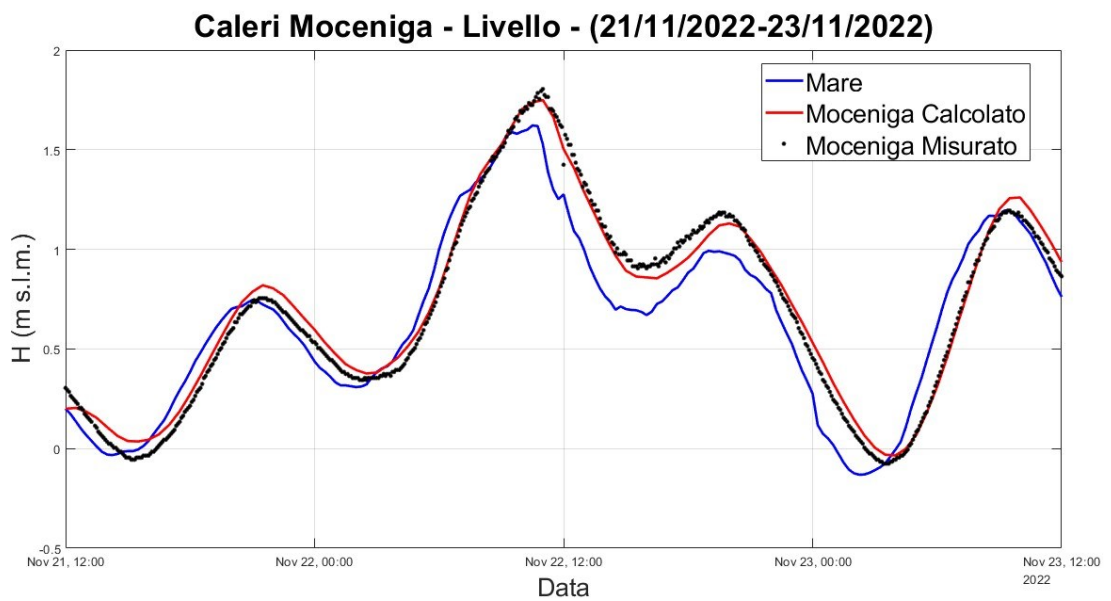
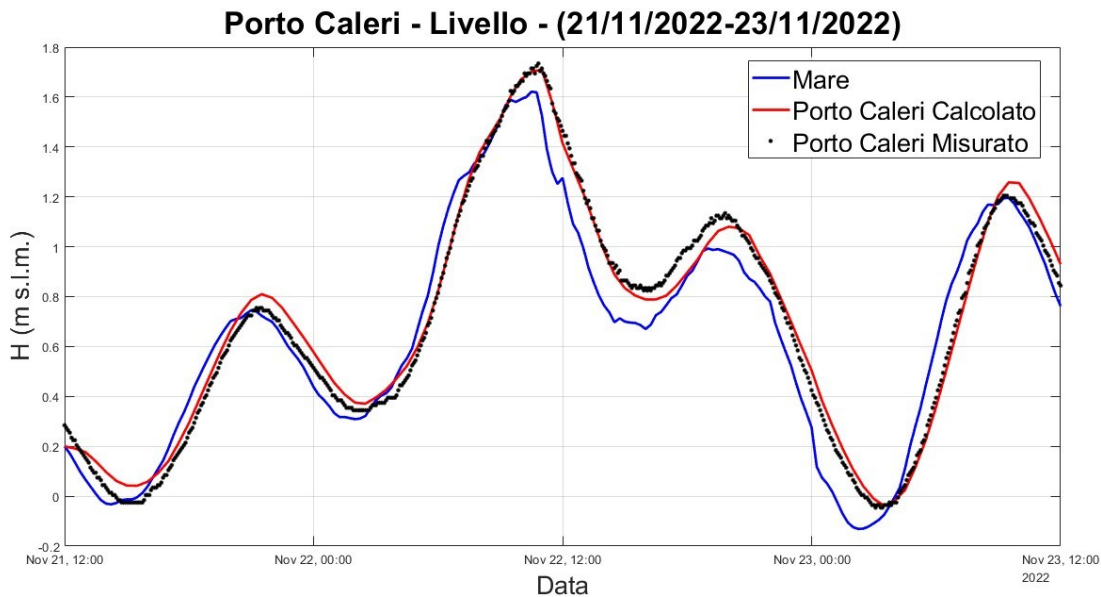
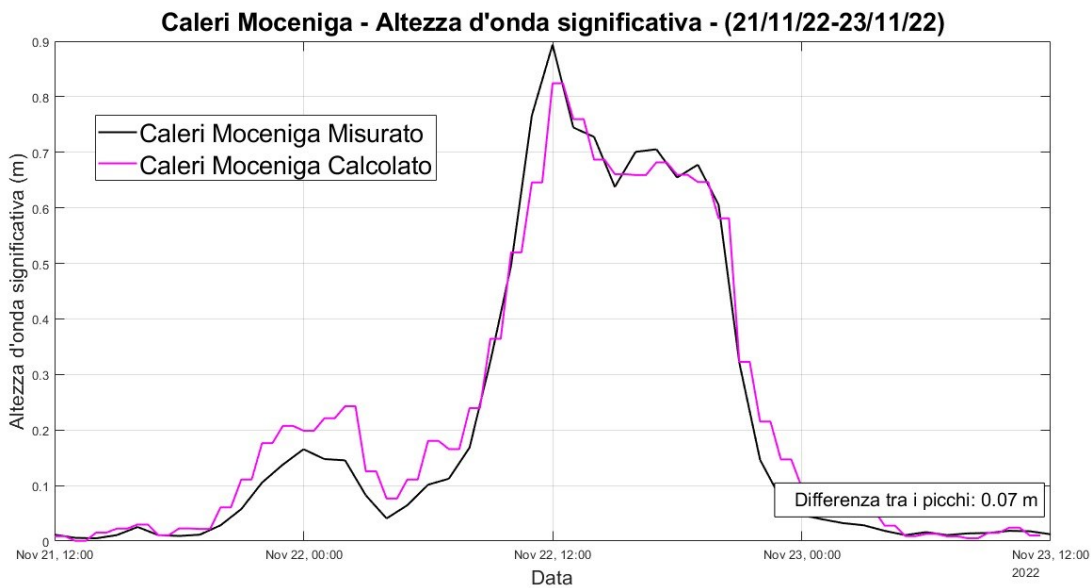


Fig. 3.4.17 - Confronto tra livelli idrometrici misurati e calcolati con il modello accoppiato in corrispondenza di Moceniga. (Ora legale)



**Fig. 3.4.18 - Confronto tra livelli idrometrici misurati e calcolati con il modello accoppiato in corrispondenza di Porto Caleri. (Ora legale)**



**Fig. 3.4.19 - Confronto tra Hs misurata e calcolata con il modello accoppiato in corrispondenza di Moceniga. (Ora legale)**



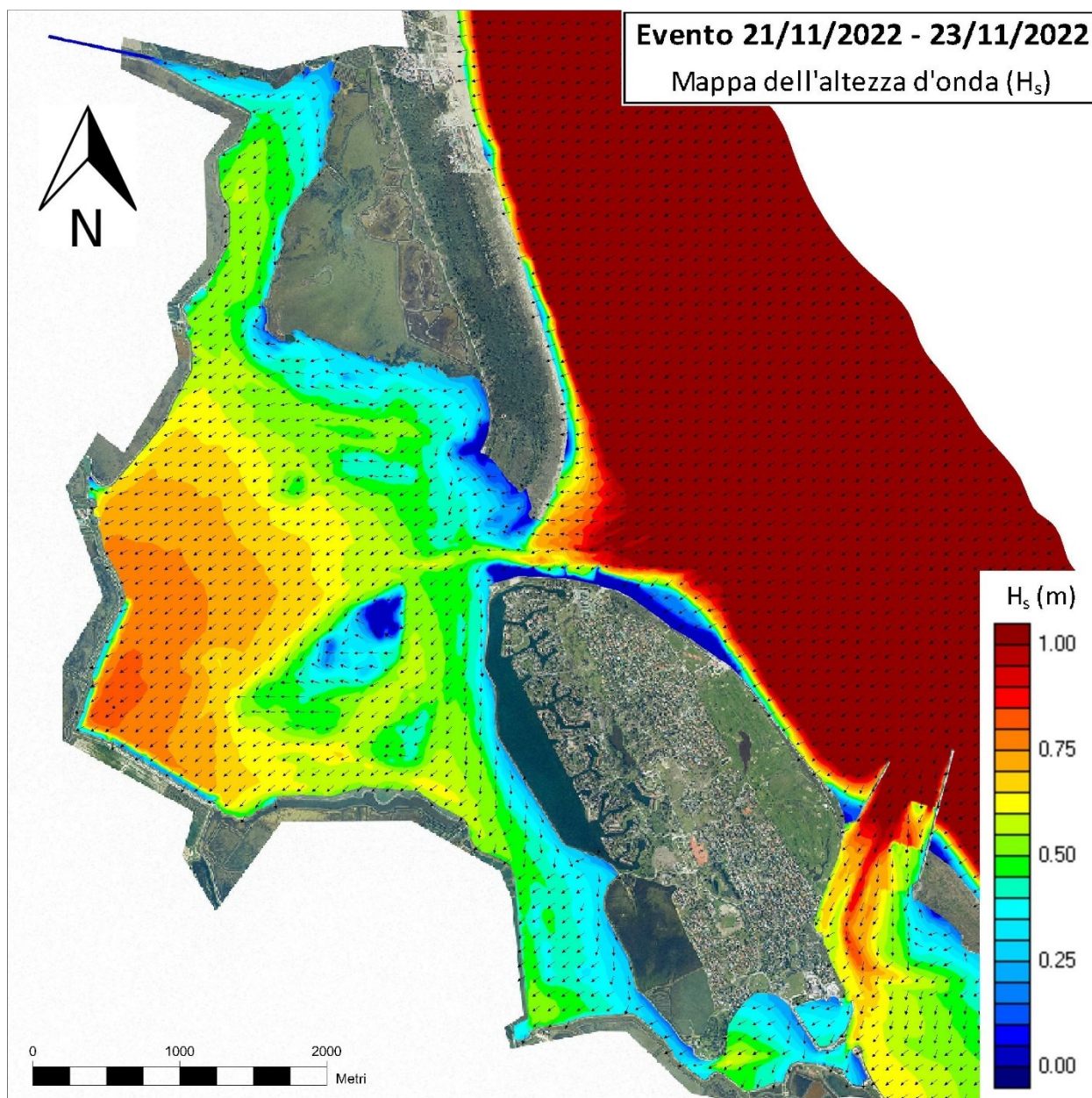


Fig. 3.4.20 - Simulazione con il modello accoppiato 2DEF+SWAN. Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nella laguna di Caleri, istante di onda massima per Moceniga (22/11/22 13:00).

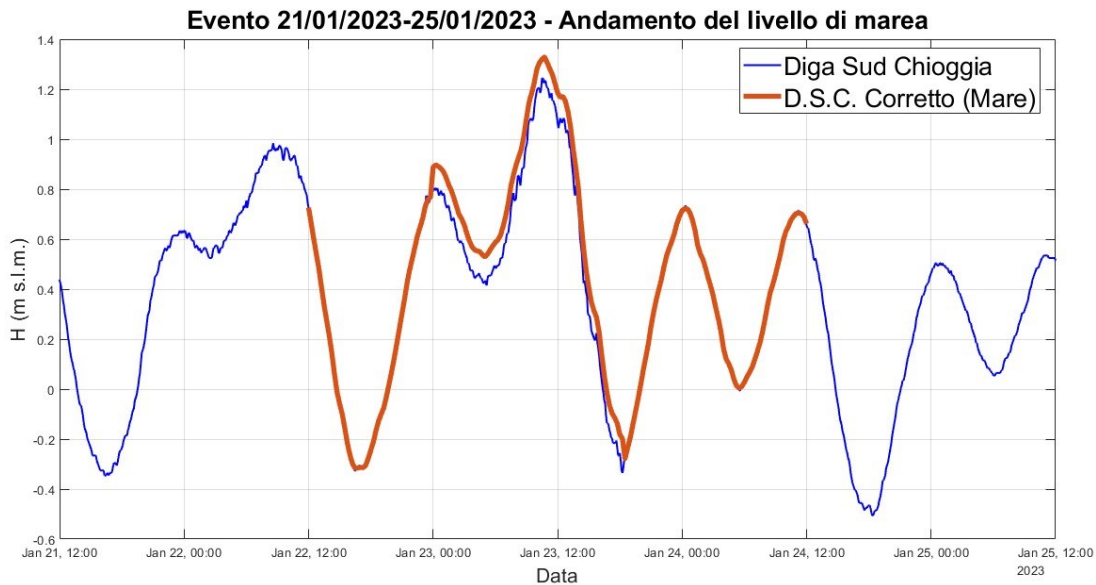


Fig. 3.4.21 - Andamento del livello di marea, riferimento IGM (16/09/2022 - 18/09/2022)

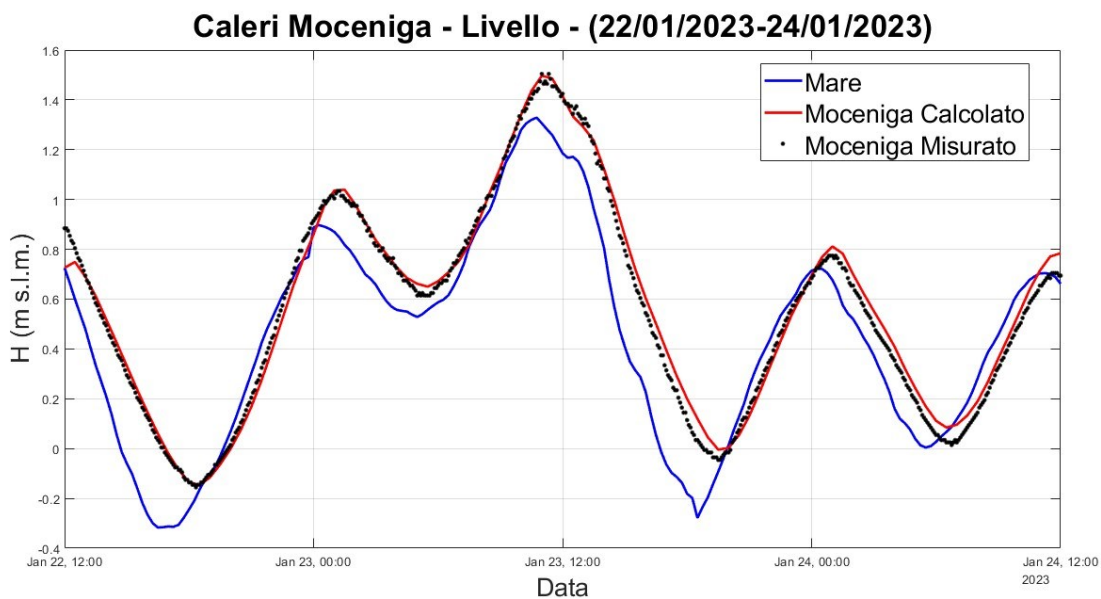
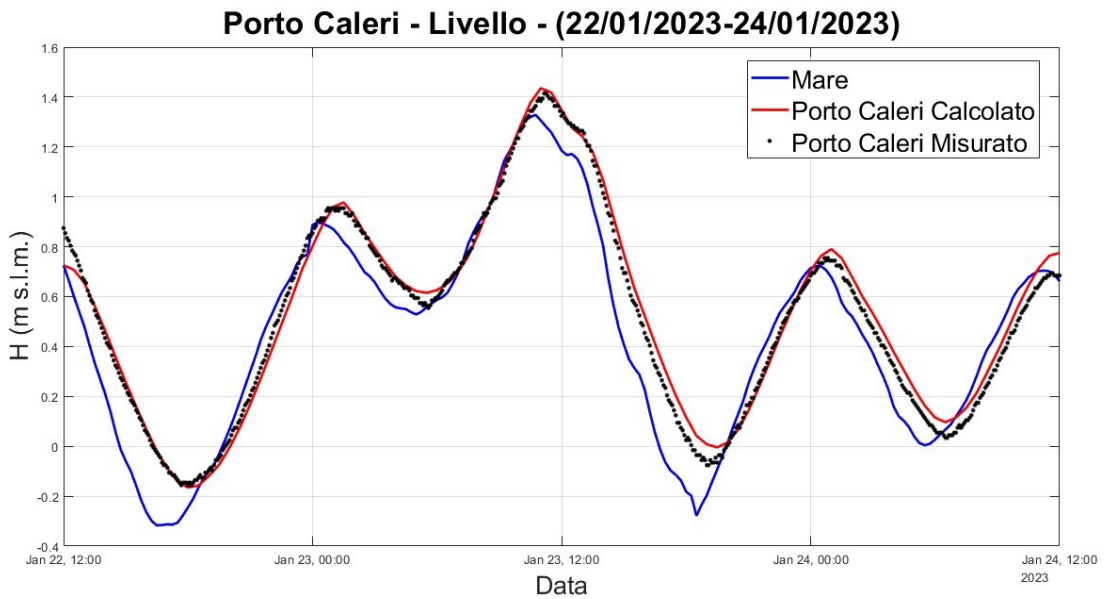
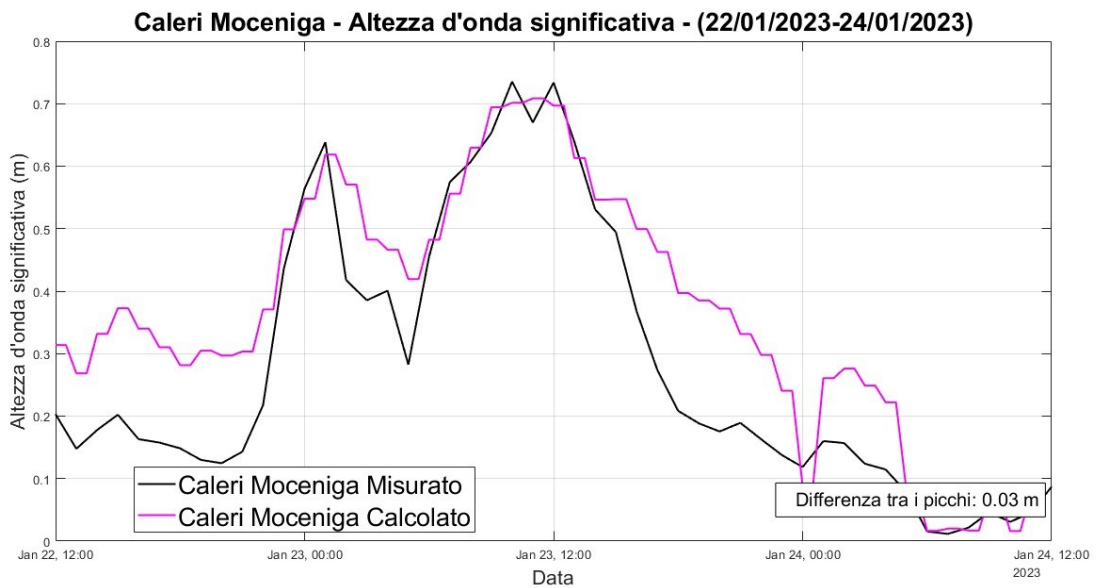


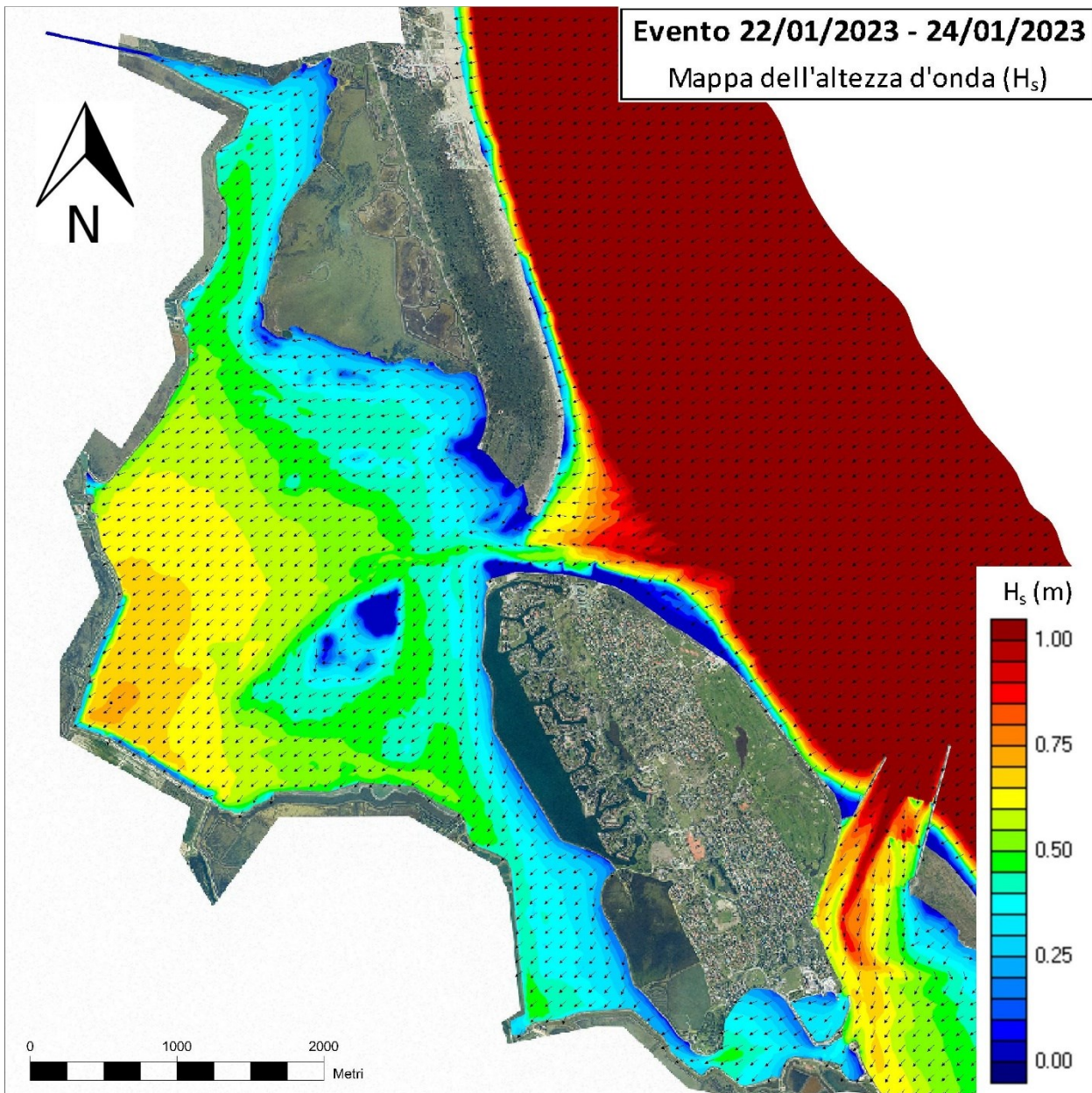
Fig. 3.4.22 - Confronto tra livelli idrometrici misurati e calcolati con il modello accoppiato in corrispondenza di Moceniga. (Ora legale)



**Fig. 3.4.23 - Confronto tra livelli idrometrici misurati e calcolati con il modello accoppiato in corrispondenza di Porto Caleri. (Ora legale)**



**Fig. 3.4.24 - Confronto tra Hs misurata e calcolata con il modello accoppiato in corrispondenza di Moceniga. (Ora legale)**



**Fig. 3.4.25 - Simulazione con il modello accoppiato 2DEF+SWAN. Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nella laguna di Caleri, istante di onda massima per Moceniga (23/1/23 11:30).**

## 4 Applicazioni del modello accoppiato onde-correnti

### 4.1 Simulazione della propagazione del moto ondoso durante un evento estremo

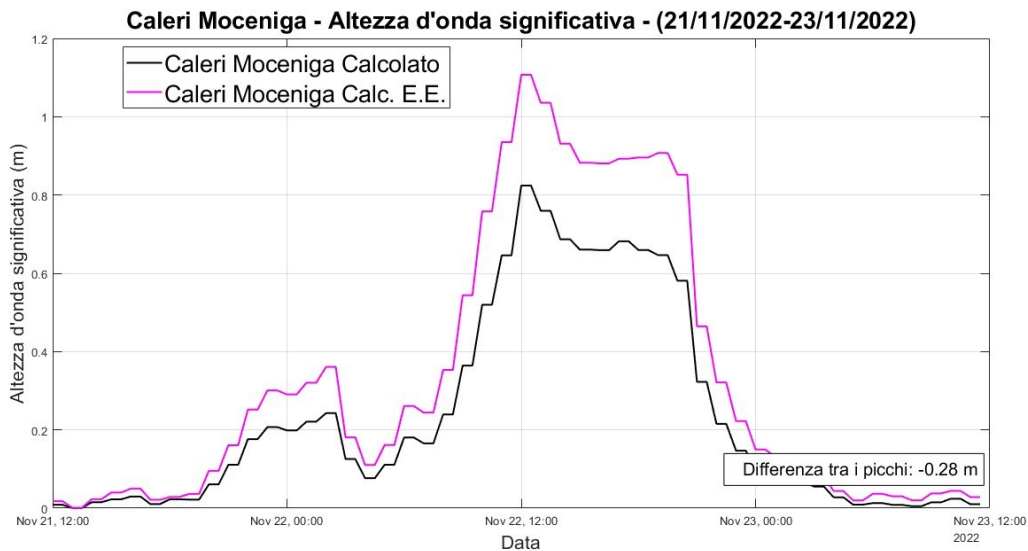
Il modello accoppiato 2DEF+SWAN, descritto nei par. 3.1 e 3.4, è stato applicato per simulare gli effetti sulla superficie lagunare causati da un evento meteomarinico estremo caratterizzato da venti provenienti in prevalenza dal settore di bora. L'evento estremo simulato è stato ricostruito a partire dall'evento meteomarinico significativo del 22/11/2022, riportato in dettaglio nel par. 1.3.4 e utilizzato per la taratura del modello (par. 3.4.2). L'unica forzante modificata rispetto alla registrazione originale è la velocità del vento, che è stata incrementata del 33.18% rispetto al valore originale ( $U_{10}$ ) ed è stata applicata alla superficie di tutto il dominio di calcolo. Al largo è stata assegnata una condizione di moto ondoso incidente con altezza significativa pari a 2.0 m e periodo medio di 6 s. I parametri di attivazione del modello SWAN sono quelli elencati nel precedente par. 3.3.

L'intensità del vento, durante l'evento del 22/11/2022, è stata incrementata fino a raggiungere il valore massimo di 25 m/s. Questo valore è prossimo alla massima intensità di vento registrata in mare aperto durante l'evento del 12/11/2019, uno degli eventi meteomarinici più significativi registrati negli ultimi anni, durante il quale si è verificato un evento eccezionale di acqua alta che ha raggiunto un massimo di 1.87 m ZMPS, registrato alle ore 22:50 al mareografo di Punta della Salute. Il regime anemometrico caratterizzante questo evento è costituito da forti venti di Bora nell'alto Adriatico, con intensità che hanno superato i 25 m/s in mare aperto. Si sottolinea, come menzionato al termine del par. 1.3.2, come l'intensità del regime anemometrico in mare aperto sia superiore a quella in corrispondenza della Laguna di Caleri. Ne consegue che la forzante anemologica considerata per simulare l'evento estremo corrisponda ad una situazione più critica rispetto all'evento del 12/11/2019.

La simulazione per l'evento estremo (22/11/2022 - E.E.) realizzata con il modello accoppiato è stata effettuata a moto vario, assegnando sul bordo libero del modello in mare un livello variabile, pari a quello registrato presso il mareografo di Diga Sud Chioggia opportunamente corretto. In mare aperto è stata assegnata, come condizione al contorno, un'altezza d'onda pari a 2 m sul bordo del dominio al largo. La durata della simulazione è di 48 ore, con un passo di calcolo, per il modello 2DEF, di 2.5 s.

In Fig. 4.1.1 viene rappresentato il confronto fra l'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) calcolata durante l'evento estremo (E.E.) con quella calcolata in precedenza, relativa all'evento reale (par. 3.4.2), presso

il mareografo di Moceniga. Il modello riproduce correttamente lo sviluppo di altezza d’onda per l’evento estremo, che presenta lo stesso andamento dell’evento reale con un notevole incremento del valore di  $H_s$ . Il massimo valore di altezza d’onda calcolato per l’E.E. è pari a 1.10 m, registrato alle ore 12:00, superiore di 0.28 m al massimo valore di  $H_s$  calcolato (0.82 m) per l’evento reale alla stessa ora.

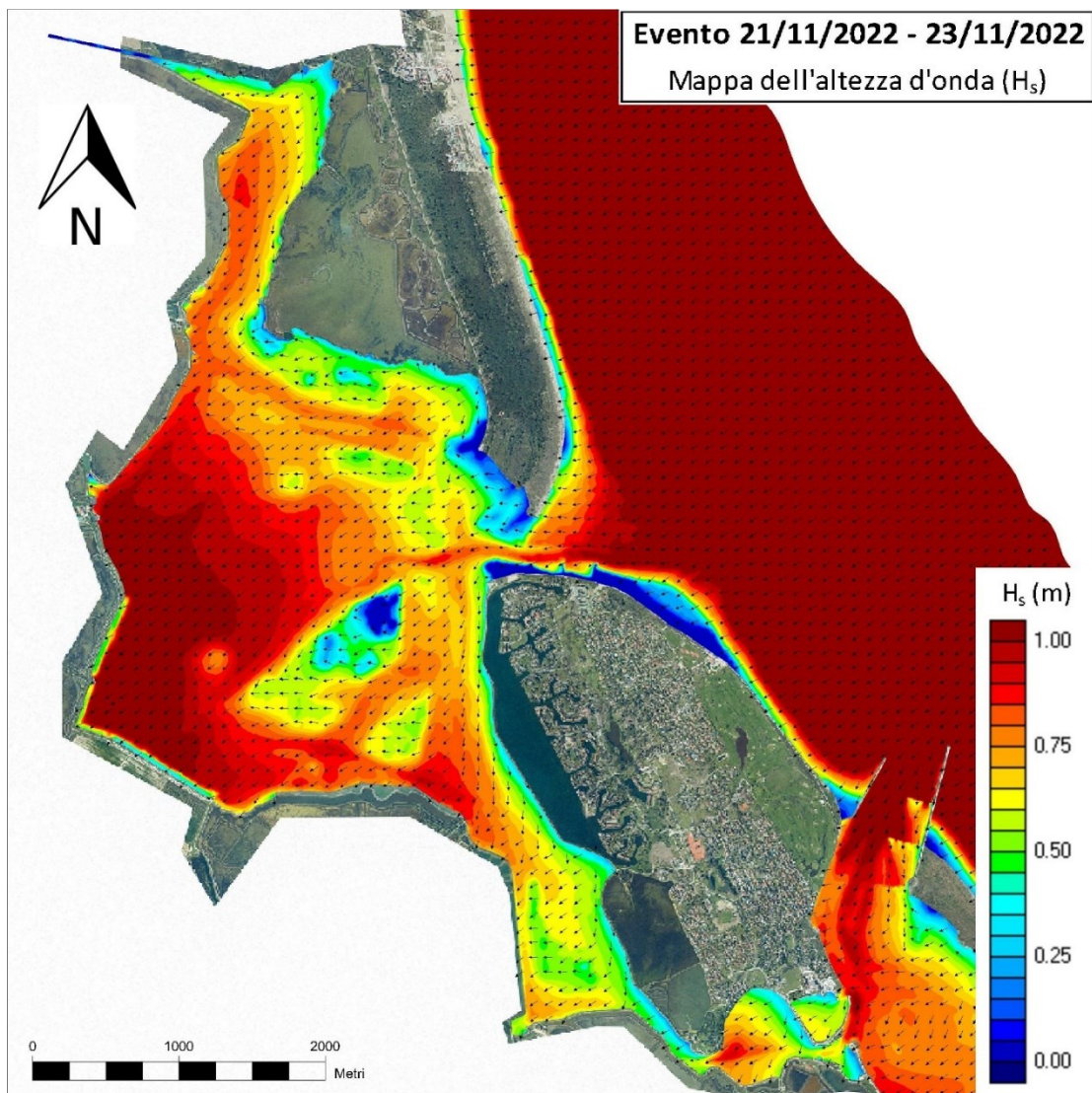


**Fig. 4.1.1 - Confronto tra  $H_s$  misurata e calcolata con il modello accoppiato in corrispondenza di Moceniga durante l’evento del 22/11/2022. (Ora legale)**

La mappa di Fig. 4.1.2 rappresenta il campo d’onda ottenuto dal calcolo, ossia la distribuzione planimetrica di altezza significativa ( $H_s$ ) e direzione del moto ondoso calcolata con il modello all’istante in cui è stata registrata l’altezza d’onda massima durante l’evento estremo.

In mare aperto, l’altezza d’onda tende a crescere per effetto dell’intensità del vento. Tuttavia, nella propagazione verso riva l’onda tende successivamente a smorzarsi e a penetrare con altezza ridotta ( $H_s \cong 1\text{ m}$ ) all’interno della bocca.

All’interno della laguna, nella parte orientale (sopravento), il moto ondoso che si instaura ha altezza molto modesta ( $H_s$  di poche decine di cm), ma tende a crescere progressivamente lungo la direzione di propagazione del vento, fino al raggiungimento di altezze d’onda massime dell’ordine di circa 110 cm nell’angolo sud-occidentale della laguna.



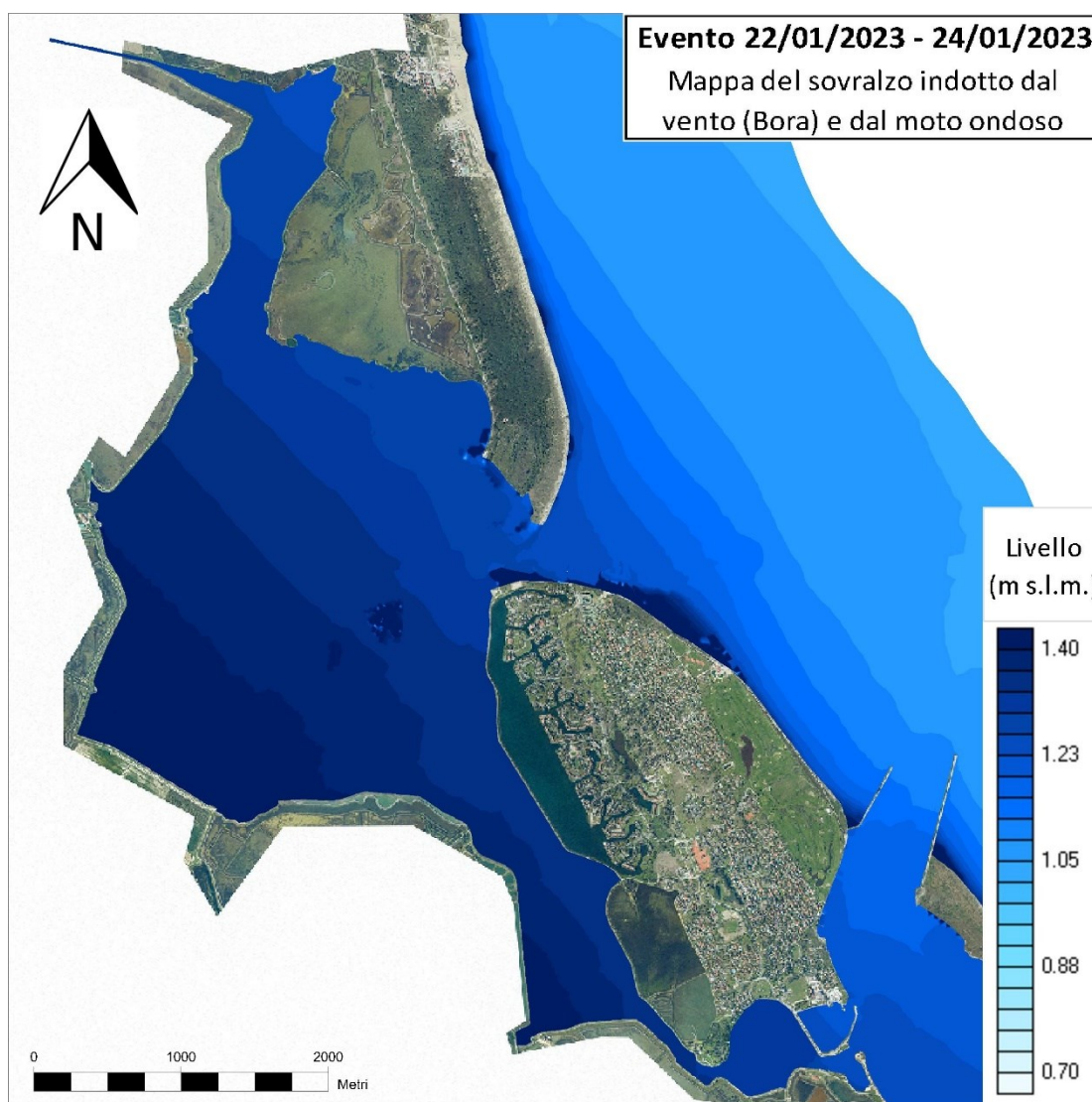
**Fig. 4.1.2 - Simulazione con il modello accoppiato 2DEF+SWAN. Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nella laguna di Caleri, istante di onda massima per Moceniga (22/11/22 12:30).**

Le tre barriere realizzate nella Bocca di Porto Levante riducono significativamente il moto ondoso nella fascia orientale del canale di bocca, smorzandone la propagazione all'interno del canale. Tuttavia, l'onda penetra profondamente nella parte non protetta della bocca, investendo l'imboccatura della darsena di Albarella con altezze d'onda di circa 80 cm.

Nella Fig. 4.1.4 viene riportato un profilo (traccia nera) che quantifica la variazione dell'altezza d'onda significativa e del livello idrometrico. Nel grafico viene rappresentata la propagazione di  $H_s$  dal punto A, situato nel margine sud-occidentale della laguna in prossimità del mareografo di Moceniga e il punto B, posizionato in mare aperto davanti alla bocca di Porto Caleri. Inoltre, il profilo evidenzia la progressiva crescita del livello lungo la stessa direttrice, legata ai fenomeni di "wind set-up" combinato

con quello del “wave set-up”. Il livello nel margine sud-occidentale (A) risulta essere maggiore di circa 40 cm rispetto a quello riscontrato in mare aperto (B).

In Fig. 4.1.3 è riportata una mappa che rappresenta la distribuzione del livello idrometrico ottenuto sulla base della simulazione, con lo scopo di visualizzare in modo più chiaro gli effetti combinati di “wind set-up” e “wave set-up”. La superficie libera si dispone inclinandosi secondo la direzione in cui soffia il vento, il valore del livello è descritto mediante una mappa a colori che variano dall’azzurro al blu scuro.



**Fig. 4.1.3 - Simulazione con il modello accoppiato 2DEF+SWAN. Distribuzione del livello idrometrico nella laguna di Caleri, istante di onda massima per Moceniga (22/11/22 12:30).**



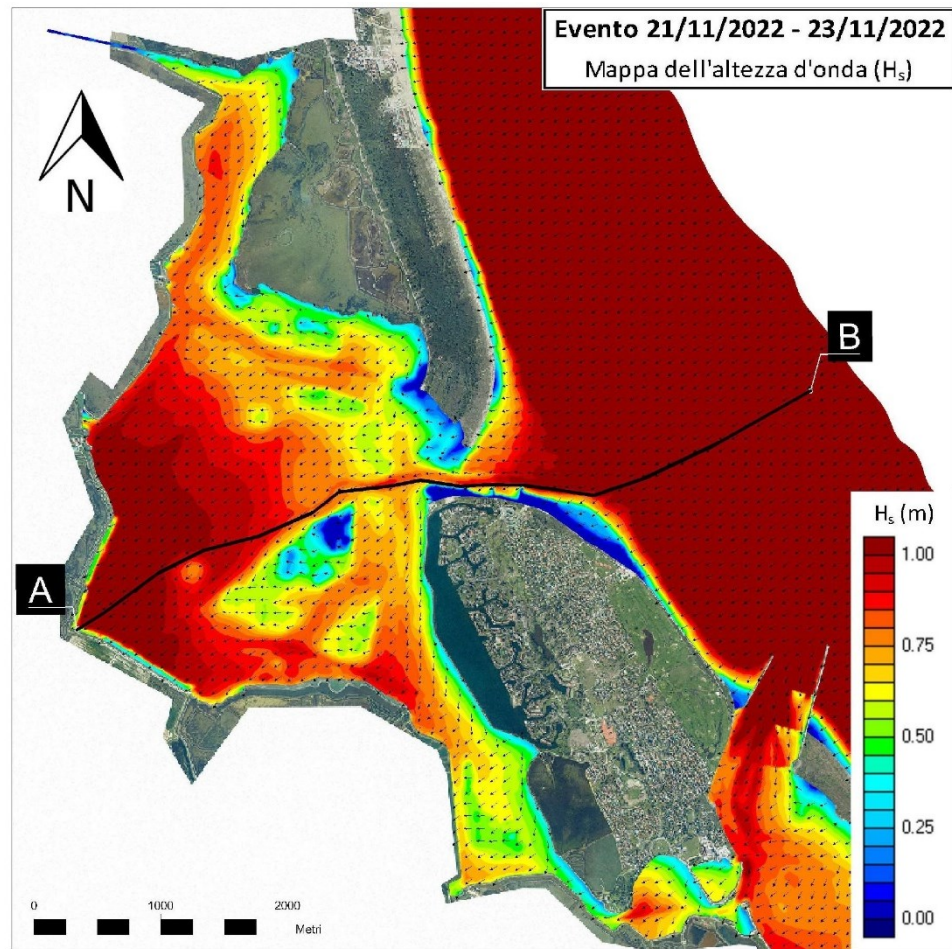


Fig. 4.1.4 - Profilo dell'altezza d'onda significativa e del livello idrometrico indotto dal vento di Bora nella laguna di Caleri lungo il transetto A-B, istante di onda massima per Moceniga (22/11/22 12:30).

Nella mappa di Fig. 4.1.5 viene rappresentata la distribuzione della velocità della corrente, ottenuta dalla simulazione nelle ipotesi assunte. Come menzionato in precedenza, lo scenario simulato corrisponde all'evento del 22/11/2022 in cui è stata incrementata la forzante relativa all'intensità del vento in modo da simulare un evento estremo di Bora. Nella mappa viene riportata la distribuzione delle velocità della corrente nella laguna, realizzata all'ora 26/48 della simulazione, durante la quale il modello è stato forzato da un forte vento (23.01 m/s) proveniente dal settore di Bora. A partire da questo scenario è possibile evidenziare alcuni aspetti d'interesse relativi all'idrodinamica locale.

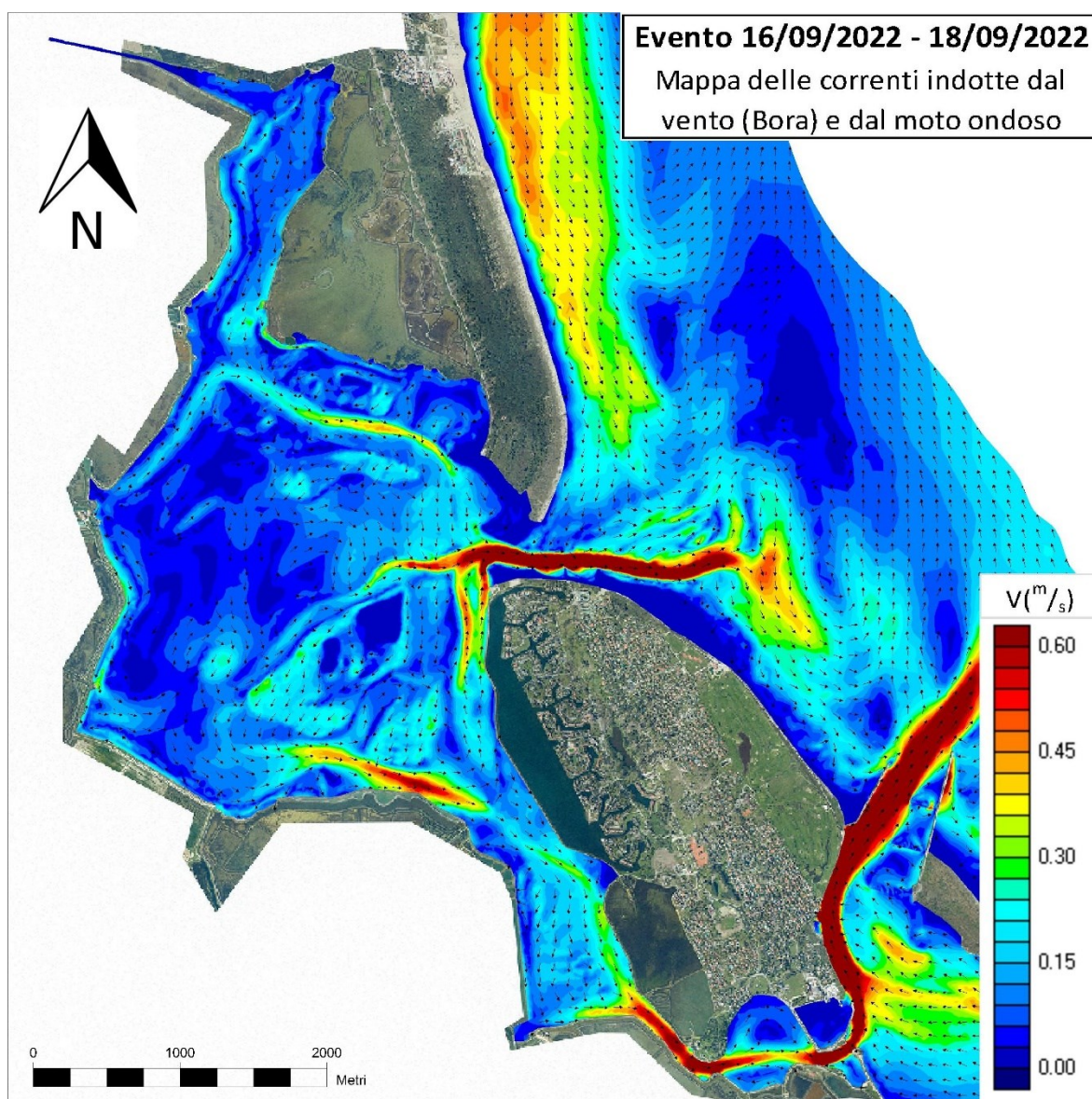


Fig. 4.1.5 - Simulazione con il modello accoppiato 2DEF+SWAN. Distribuzione della velocità della corrente nella laguna di Caleri, istante di onda massima per Moceniga (22/11/22 13:30).

È possibile notare come il tratto di litorale, compreso fra la foce di Porto Levante e il litorale di Rosolina, si configuri come punto di convergenza delle correnti litoranee indotte dal moto ondoso. Ciò è attribuibile al fatto che nel braccio di mare esterno alla laguna, nella sua porzione meridionale, le correnti che attraversano la bocca di Porto Levante sono orientate verso Nord-Ovest, mentre nell'estremità settentrionale del dominio illustrato, le correnti sono dirette verso Sud-Est.

All'interno della laguna di Caleri, risultano evidenti e ben definite le correnti indotte dal vento e dal moto ondoso, attive sia nei principali canali lagunari che nelle aree di barena sormontate dal livello sostenuto dal vento.

Si osserva una circolazione di considerevole intensità nella porzione meridionale della laguna, che genera un flusso significativo diretto verso sud. Questo flusso, attraverso il Varco Pozzatini, confluisce nella laguna Marinetta prima di immettersi in mare attraverso la Bocca di Porto Levante.

Sulla base delle dinamiche sopraindicate è possibile trarre alcune interessanti considerazioni.

- la simulazione per l'evento estremo è stata realizzata utilizzando il modello SWAN opportunamente tarato. Come riportato nel par. 3.4.2, la forzante generativa è legata all'intensità del vento, mentre quella dissipativa, all'azione del fondale e, in seconda misura, ai fenomeni di whitecapping e frangimento. Dal grafico di Fig. 4.1.1, confrontando i picchi, risulta che il valore di altezza d'onda significativa calcolato durante l'evento estremo sia del 34.15% maggiore rispetto a quello calcolato durante l'evento reale. L'aumento di  $H_s$  è dovuto principalmente all'aumento di intensità della forzante anemometrica, che, per riprodurre un evento estremo è stata incrementata del 33.18% rispetto al valore originale. Ne consegue, che in seguito all'aumento significativo del termine lineare  $A$ , come descritto nel par. 3.4.2, si è avuto un incremento sostanzialmente lineare anche dell'altezza d'onda all'interno della laguna rispetto all'aumento dell'intensità di vento.
- I fenomeni di interrimento che avvengono nella fascia costiera antistante la bocca di Porto Caleri e nel tratto di litorale compreso fra questa e Porto Levante, sono causati dallo sviluppo delle correnti costiere che si generano durante le mareggiate, stabilendo in questo tratto una zona di convergenza dove viene favorita la sedimentazione delle particelle trasportate lungo costa.
- All'interno della laguna di Caleri, sia il moto ondoso che l'innalzamento locale del livello idrometrico ("set-up") risultano essere critici lungo il margine occidentale e sud-

occidentale della laguna. Questi fenomeni potrebbero essere attenuati realizzando ulteriori isole (barene), limitando in questo modo l'ampiezza delle superfici d'acqua libere (il cosiddetto "fetch"). La presenza di barene potrebbe anche favorire la generazione di correnti locali legate al vento, che potrebbero a loro volta attivare un maggiore ricambio delle acque, specialmente nelle parti più interne della laguna dove l'azione di ricambio delle correnti mareali è meno significativa.

## 4.2 Simulazione evento con scenario S.L.R.

L'aumento del livello medio globale del mare (GMSL) è una conseguenza del riscaldamento globale e rappresenta una minaccia significativa per le comunità costiere e gli ecosistemi marini. Questo aumento ha subito un'accelerazione negli ultimi decenni, causata principalmente dall'aumento dei tassi di perdita di ghiaccio dalle calotte glaciali della Groenlandia e dell'Antartide, dalla continua perdita di massa dei ghiacciai e dall'espansione termica dell'oceano (par. 1.3.5).

Per la quantificazione degli scenari d'innalzamento del livello medio del mare a causa del cambiamento climatico, si fa riferimento alle proiezioni del Sesto rapporto di valutazione (AR6, 2022) dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Lo scenario considerato per le simulazioni realizzate in questo capitolo corrisponde all' SSP2–4.5, che prevede un incremento del livello medio del mare di 57 cm nel mediterraneo entro il 2100.

Nello scenario descritto, il primo termine (SSP2) definisce uno “scenario socioeconomico condiviso” in cui viene mantenuta una situazione di continuità rispetto al presente. In questo scenario, le politiche climatiche rimangono grossomodo quelle attuali e lo scenario mondiale mantiene una tendenza evolutiva simile a quella passata. Il secondo termine ( $4.5 W/m^2$ ) definisce uno “scenario rappresentativo di concentrazione” (RCP) in cui viene descritta l'entità dei gas serra o altri fattori radiativi che potrebbero verificarsi in futuro.

### 4.2.1 Effetti sulle correnti di marea

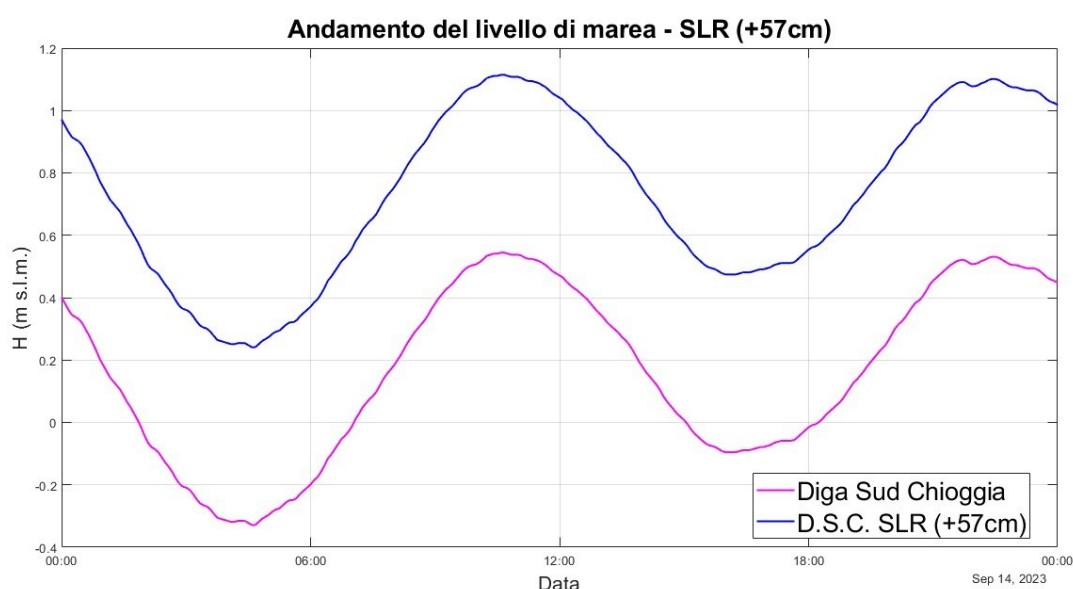
In questo paragrafo vengono analizzati i flussi di portata scambiati dalla bocca di Porto Caleri e da Varco Pozzadini, indotti da un andamento di marea che considera l'evoluzione del livello del mare, confrontando lo stato attuale (2023) con una previsione d'incremento futura (SSP2–4.5, 2100).

L'obiettivo delle simulazioni eseguite in questo paragrafo è di comprendere l'evoluzione degli scambi mareali forzati dall'aumento di livello. L'analisi è stata effettuata assumendo come marea di confronto quella registrata durante le campagne di misura correntometriche del 14/09/2023. Questa marea è stata utilizzata per tarare il modello aggiornato 2023 (descritto nel par. 3.4.1). Nella simulazione di confronto è stato assunto un incremento di 57 cm del livello del mare, in base alle previsioni dell'IPCC di incremento del GMSL per il mediterraneo (par. 1.3.5). La marea registrata durante le campagne di misura è stata traslata ed imposta come condizione al contorno al modello, in modo da poter effettuare delle valutazioni di confronto fra i due scenari.

Le simulazioni sono state effettuate in assenza di vento, in modo che, come per le simulazioni di taratura, l'unica forzante significativa per l'evoluzione delle dinamiche mareali sia il livello.

Nelle simulazioni effettuate in questo paragrafo, relative allo scenario attuale e allo scenario futuro (+57 cm), vengono quantificate le variazioni di portata e di volume che potrebbero avvenire in prossimità della bocca di Porto Caleri e al Varco Pozzadini.

In Fig. 4.2.1 è rappresentato l'andamento della marea reale, registrato durante le campagne di misura, e il dato traslato di 57 cm, assunto come condizione al contorno nella simulazione di innalzamento del livello del mare.

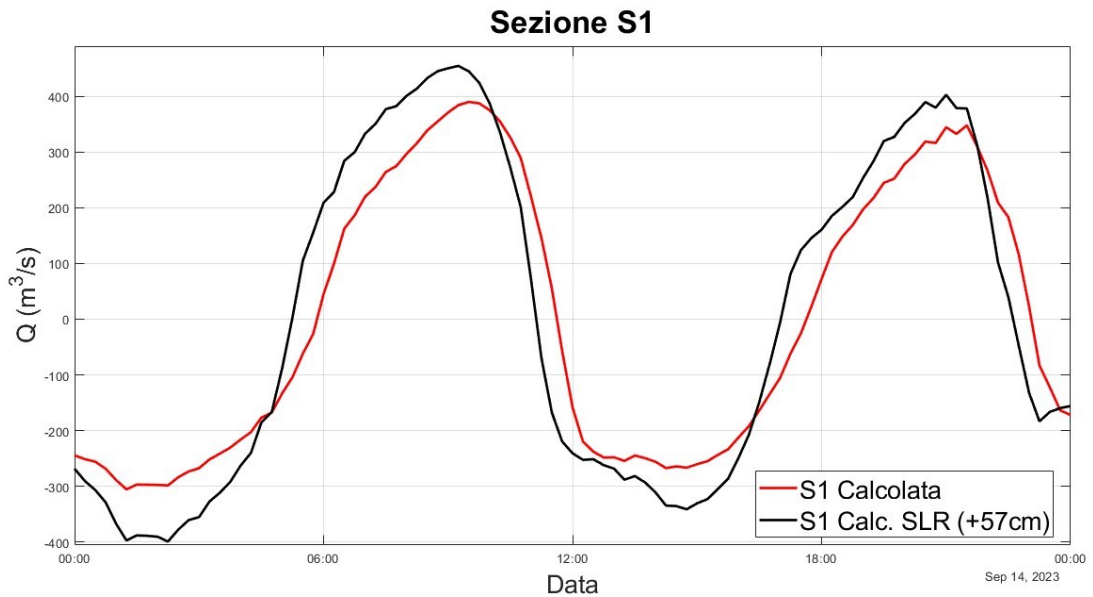


**Fig. 4.2.1 - Andamento del livello di marea, riferimento IGM (14/09/2023)**

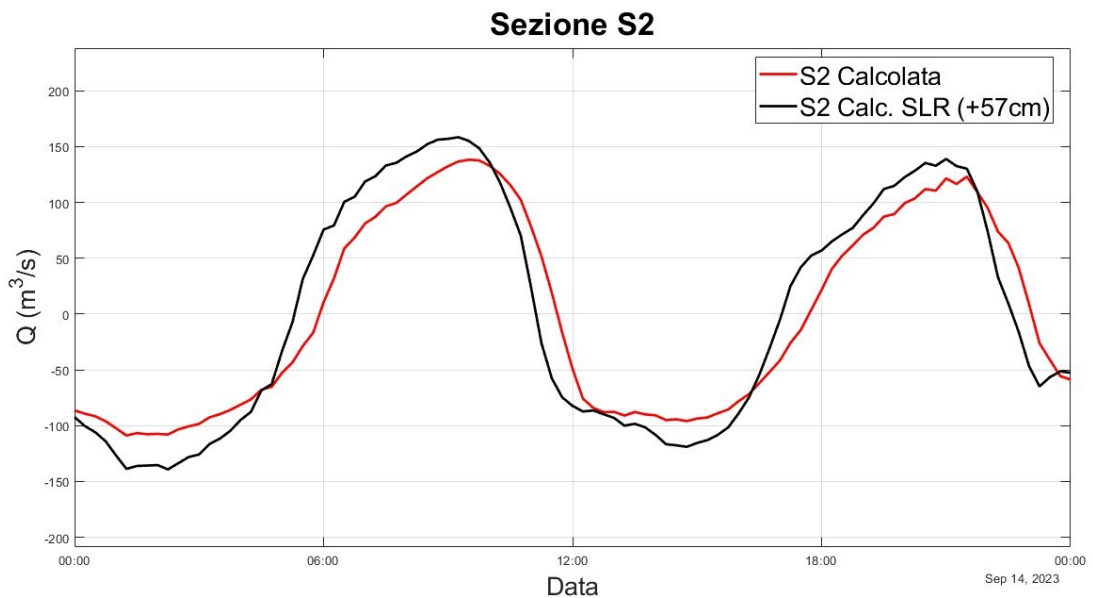
In seguito, si riportano i grafici che definiscono l'andamento delle portate, nella situazione attuale (2023) e con il livello del mare innalzato di 57 cm. In totale sono state considerate cinque sezioni (Fig. 4.2.10). Quattro si trovano in prossimità della bocca di Porto Caleri (S1, S2, S3, S4) mentre una è situata in corrispondenza del Varco Pozzadini (S5). Le portate di segno positivo sono in flusso entrante (marea crescente) e quelle di segno negativo in flusso uscente (marea calante).

Dai grafici è possibile individuare un incremento della portata che transita attraverso le sezioni; questo aumento risulta maggiore in corrispondenza della bocca di Porto Caleri (S1 e S2), sia in termini di flusso entrante che uscente. Nella sezione S3 l'incremento di portata risulta essere di minore entità, con un aumento maggiore per la portata massima in ingresso rispetto al massimo flusso in uscita. La sezione S4, presenta un flusso in ingresso sensibilmente minore di quello attuale, ma con un

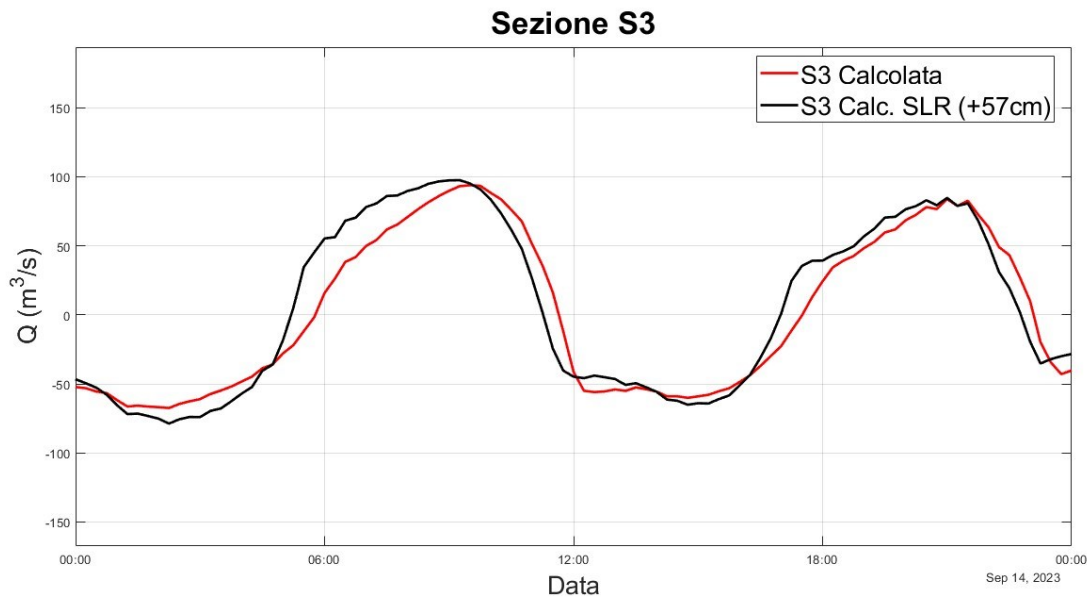
incremento in termini di portata massima scambiata per il flusso in uscita. Per quanto riguarda la sezione S5, si ha un aumento in termini di portata massima scambiata, sia in marea crescente che calante, per lo scenario futuro (+57 cm) rispetto alla situazione attuale.



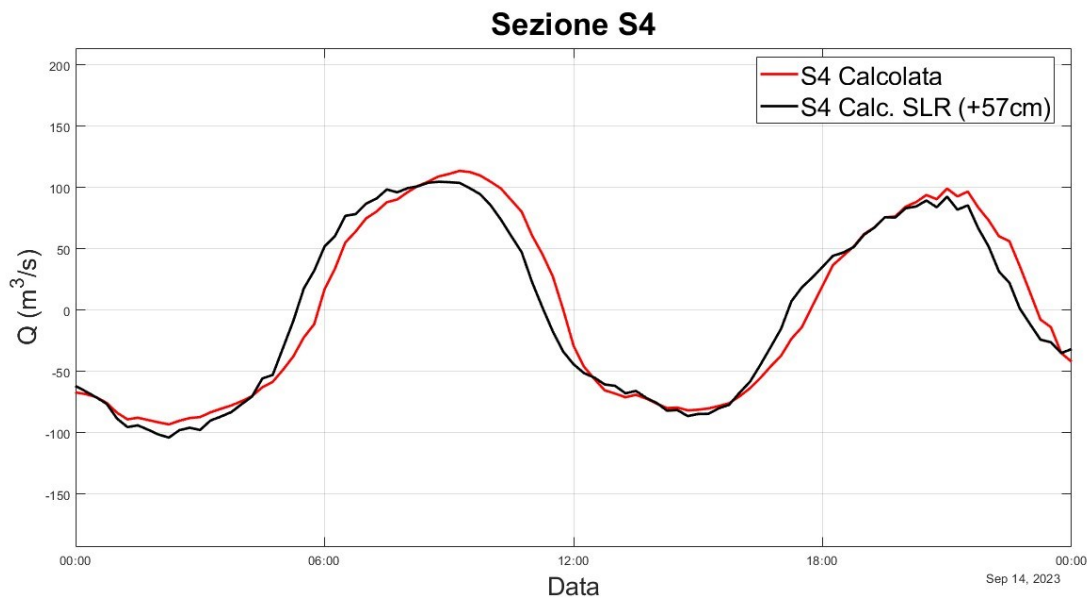
**Fig. 4.2.2 – Confronto tra portate calcolate con il modello accoppiato (Sezione S1) durante l’evento del 14/09/2023, considerando due situazioni: stato attuale e un incremento del livello del mare di 57 cm.**



**Fig. 4.2.3 – Confronto tra portate calcolate con il modello accoppiato (Sezione S2) durante l’evento del 14/09/2023, considerando due situazioni: stato attuale e un incremento del livello del mare di 57 cm.**

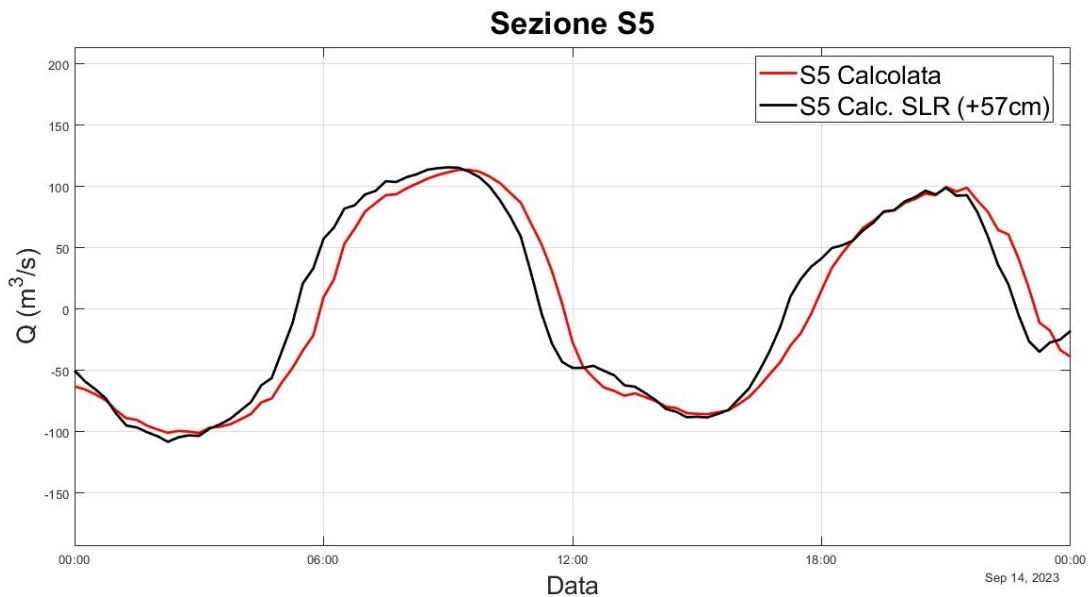


**Fig. 4.2.4 – Confronto tra portate calcolate con il modello accoppiato (Sezione S3) durante l’evento del 14/09/2023, considerando due situazioni: stato attuale e un incremento del livello del mare di 57 cm.**



**Fig. 4.2.5 – Confronto tra portate calcolate con il modello accoppiato (Sezione S4) durante l’evento del 14/09/2023, considerando due situazioni: stato attuale e un incremento del livello del mare di 57 cm.**





**Fig. 4.2.6 – Confronto tra portate calcolate con il modello accoppiato (Sezione S5) durante l’evento del 14/09/2023, considerando due situazioni: stato attuale e un incremento del livello del mare di 57 cm.**

In Tab. 4.2.1 sono riportati nel dettaglio i dati delle simulazioni in termini di volume mediato su 3 cicli di marea (entrante ed uscente). Si osserva, che nelle sezioni S1 e S2, si verificano variazioni percentuali notevoli fra la simulazione attuale e quella che riproduce uno scenario futuro con un incremento del livello del mare (+57cm). In entrambe le sezioni si assiste ad un incremento di oltre il 15% dei flussi in ingresso e in uscita; ciò comporta che l’incremento di volume d’acqua scambiato fra queste sezioni non sia trascurabile. Nella sezione S3 si registra un aumento del volume scambiato, anche se con entità minore rispetto alle sezioni precedenti, con un netto incremento del flusso entrante rispetto a quello uscente. Nelle sezioni S4 e S5 le variazioni di volume scambiato risultano essere trascurabili, fa eccezione il flusso entrante alla sezione S4, in cui si osserva una riduzione consistente (-7.06%) del volume scambiato nella simulazione con scenario di innalzamento del livello del mare rispetto allo stato attuale.

Sezioni	Volume (m <sup>3</sup> 10 <sup>6</sup> )			
	Flusso uscente		Flusso entrante	
	2023	SLR +57 cm	2023	SLR +57 cm
S1	4.47	5.41	4.69	5.58
	20.87%		18.90%	
S2	1.63	1.90	1.66	1.95
	16.84%		17.04%	
S3	1.00	1.01	1.15	1.27
	1.68%		10.82%	
S4	1.33	1.32	1.40	1.30
	-0.60%		-7.06%	
S5	1.43	1.35	1.45	1.44
	-5.64%		-0.73%	

Tab. 4.2.1 – Valore dei volumi scambiati nella laguna di Caleri, mediati su 3 cicli di marea, nella situazione attuale (2023) e con l’innalzamento di +57 cm, con variazioni percentuali dei volumi scambiati.

Nella Tab. 4.2.2 sono riportati i dati di sintesi delle simulazioni relativi alla massima portata estratta da 3 cicli di marea (entrante e uscente). In questo grafico viene confermato l’aumento di portata massima, come descritto all’inizio del paragrafo. Costituiscono un’eccezione le sezioni S3 e S5, in cui il flusso uscente non varia in modo significativo, e la sezione S4, in cui il flusso uscente si riduce del 7.82%.

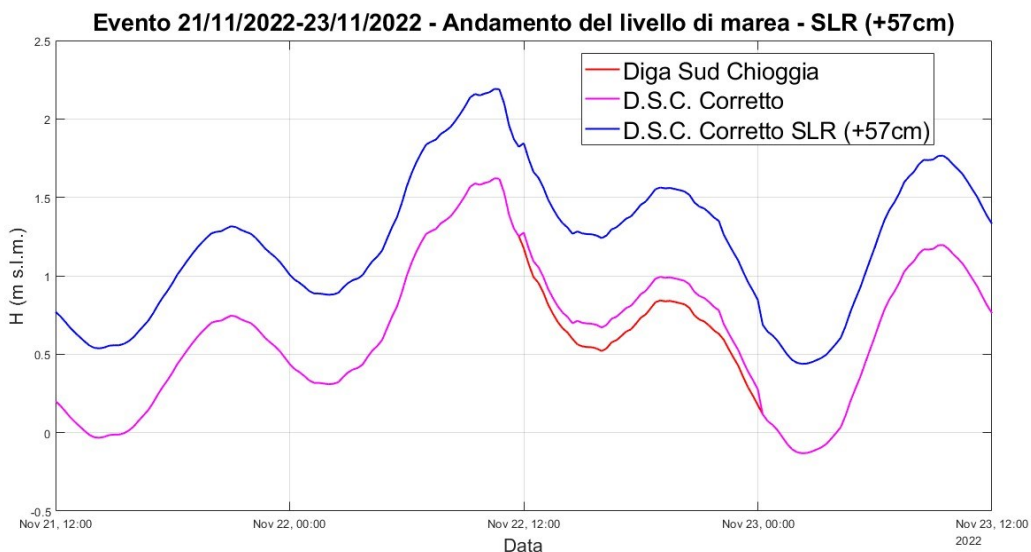
Sezioni	Portata max (m <sup>3</sup> /s)			
	Flusso uscente		Flusso entrante	
	2023	SLR +57 cm	2023	SLR +57 cm
S1	-305.19	-398.86	389.69	454.28
	30.69%		16.57%	
S2	-108.85	-139.19	138.31	158.49
	27.87%		14.60%	
S3	-67.49	-78.76	93.92	97.58
	16.70%		3.89%	
S4	-93.07	-103.85	113.52	104.64
	11.57%		-7.82%	
S5	-100.91	-108.10	113.60	115.58
	7.13%		1.74%	

Tab. 4.2.2 – Valori massimi di portata scambiati nella laguna di Caleri, mediati su 3 cicli di marea, nella situazione attuale (2023) e con l’innalzamento di +57 cm, con variazioni percentuali dei volumi scambiati.

#### 4.2.2 Effetti sul moto ondoso

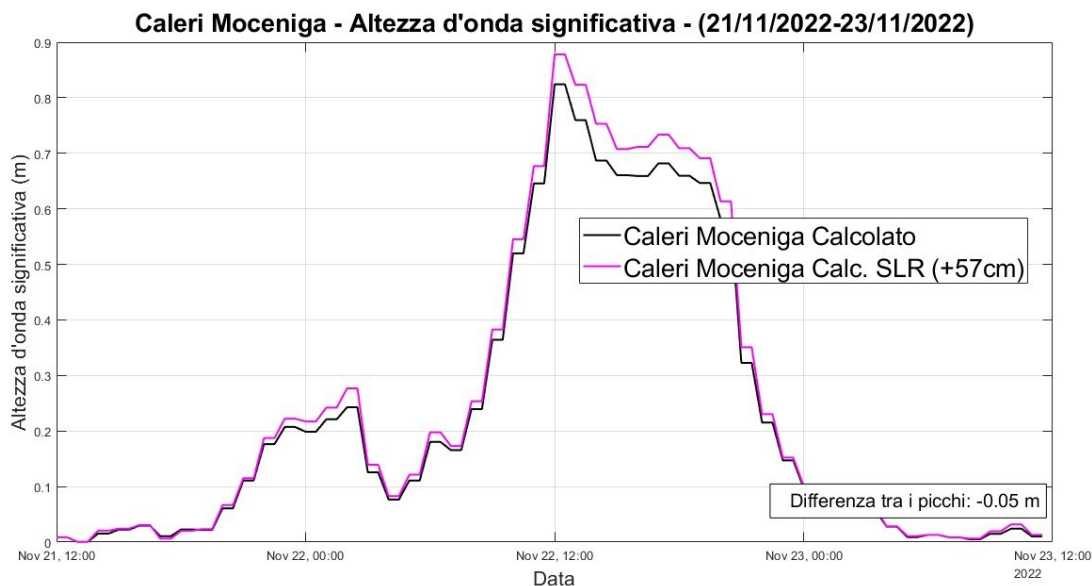
Con lo scopo di evidenziare eventuali effetti che l'innalzamento del livello medio del mare ha sul moto ondoso, è stata effettuata una simulazione con il modello accoppiato 2DEF+SWAN. Sono state applicate le medesime forzanti meteomarine (intensità del vento e moto ondoso a largo) per l'evento del 22/11/2022, con un incremento del livello del mare di 57 cm rispetto al livello originale (par. 1.3.4). L'incremento corrisponde all'aumento del livello medio del mare previsto dall'IPCC per il mediterraneo nel 2100, descritto all'inizio di questo capitolo. Si tratta del medesimo incremento con cui è stata forzata la simulazione idrodinamica, riportata nel paragrafo precedente.

In Fig. 4.2.7 viene rappresentato l'andamento della marea reale, registrata dal mareografo di Diga Sud Chioggia, il livello di D.S.C corretto per tenere conto del wave set-up e utilizzato nella simulazione per l'evento reale del 22/11/2022 (par. 3.4.2), e il medesimo traslato di 57 cm, considerato nella simulazione di innalzamento del livello del mare.



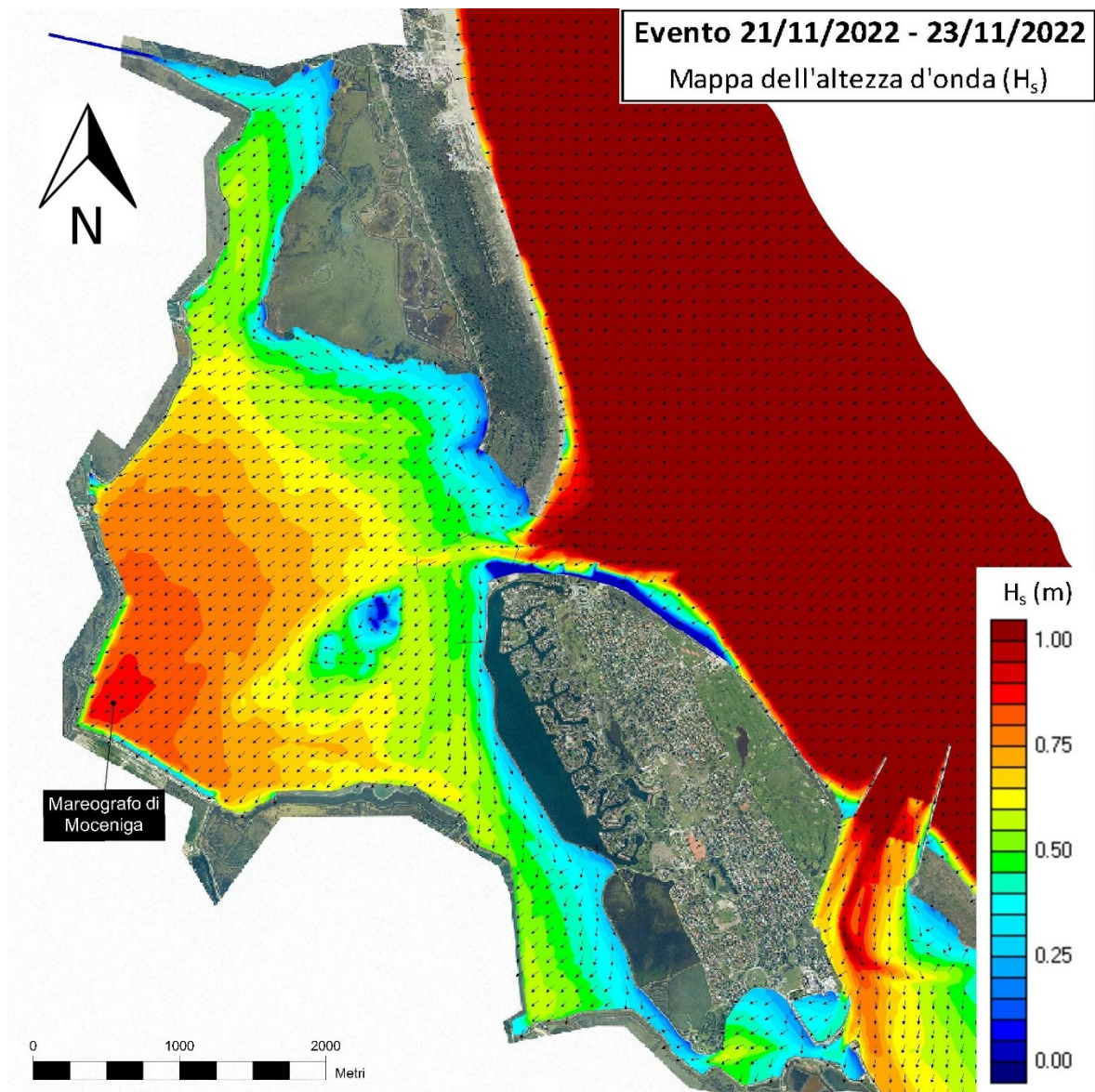
**Fig. 4.2.7 - Andamento del livello di marea, riferimento IGM (21/11/2022 - 23/11/22)**

In Fig. 4.2.8 è rappresentato il confronto fra l'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) calcolata durante l'evento con livello del mare incrementato e quella calcolata per l'evento reale (par. 3.4.2), presso il mareografo di Moceniga. Per l'evento di SLR, il modello riproduce uno sviluppo di altezza d'onda che presenta lo stesso andamento dell'evento reale, con un incremento del valore di  $H_s$ . Il massimo valore di altezza d'onda calcolato per l'evento di SLR è pari a 0.87 m, registrato alle ore 12:00, superiore di 0.05 m al massimo valore di  $H_s$  calcolato (0.82 m) per l'evento reale alla stessa ora.



**Fig. 4.2.8 - Confronto tra  $H_s$  misurata e calcolata con il modello accoppiato in corrispondenza di Moceniga durante l'evento del 22/11/2022. (Ora legale)**

Come è possibile notare dalla Fig. 4.2.9, da confrontarsi con la precedente Fig. 3.4.20, l'effetto dell'innalzamento del livello del mare produce un generalizzato incremento dell'altezza d'onda in laguna. Questo è dovuto al fatto che le onde si sviluppano con un tirante idrico di circa mezzo metro superiore a quello attuale. Nella zona più sfavorita (in corrispondenza del mareografo di Moceniga), questo si traduce nel suddetto incremento dell'altezza d'onda significativa di 5 cm. L'incremento di  $H_s$  in questo punto risulta perciò relativamente modesto (6.2% dell'altezza d'onda nella simulazione di SLR rispetto all'evento originale), nonostante questa sia la zona di sviluppo delle altezze d'onda maggiori. Questo incremento, seppur limitato, costituisce un peggioramento della sicurezza arginale rispetto ai rischi di inondazione costiera, situazione che allo stato attuale appare critica. Oltre all'esecuzione di interventi volti al ripristino della sicurezza arginale e al consolidamento delle barene già esistenti, risulta opportuna la realizzazione di ulteriori aree di barena nella parte occidentale del bacino, con lo scopo di limitare lo sviluppo del moto ondoso e i fenomeni di erosione ad esso collegati.



**Fig. 4.2.9 - Simulazione con il modello accoppiato 2DEF+SWAN. Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nella laguna di Caleri, istante di onda massima per Moceniga (22/11/22 12:30).**

Nella Fig. 4.2.10 viene riportato un profilo (traccia nera) che quantifica la variazione dell'altezza d'onda significativa e del sovralzso idrico. Nel grafico viene rappresenta la propagazione di  $H_s$  dal punto A, situato nel margine sud-occidentale della laguna in prossimità del mareografo di Moceniga e il punto B, posizionato in mare aperto davanti alla bocca di Porto Caleri. Il livello nel margine sud-occidentale (A) risulta essere maggiore di circa 20 cm rispetto a quello riscontrato in mare aperto (B).

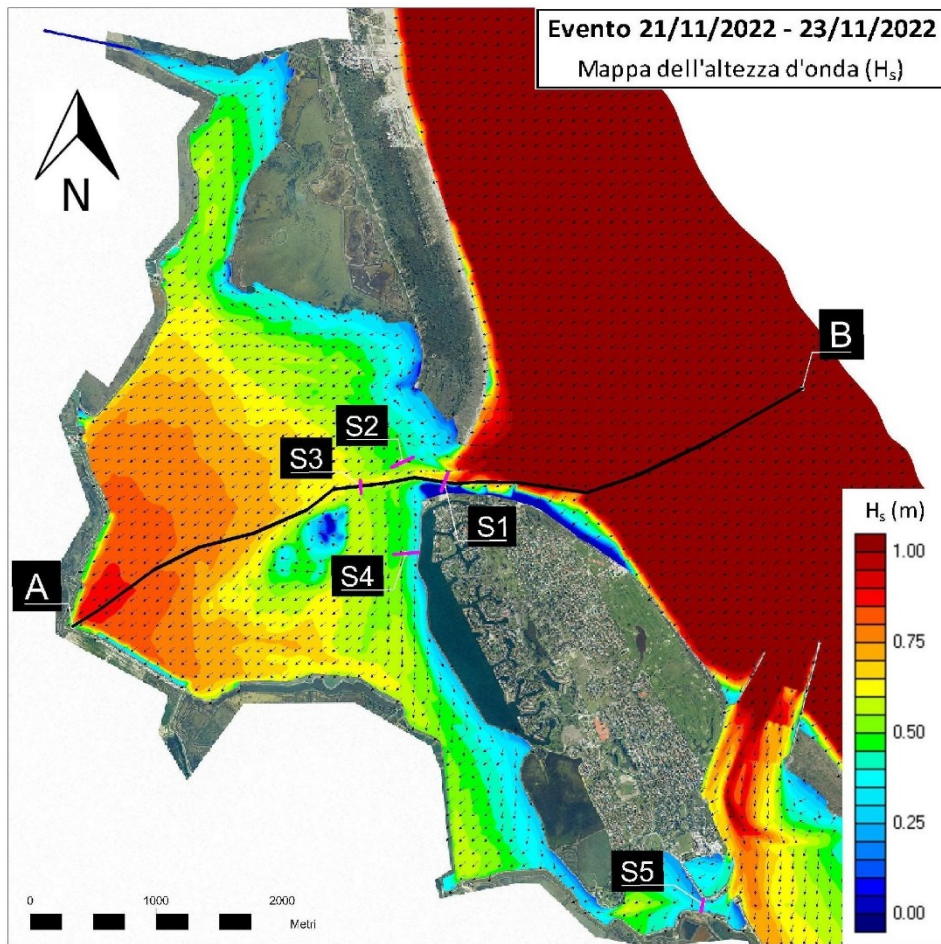


Fig. 4.2.10 - Profilo dell'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) e del livello idrometrico indotto dal vento di Bora nella laguna di Caleri lungo il transetto A-B con un livello in mare di +0.57 m s.l.m., istante di onda massima per Moceniga (22/11/22 12:30).

## 5 Conclusioni

Con riferimento alla laguna di Caleri, situata nella parte a Nord del Delta del Po, questo elaborato di tesi ha riguardato attività di monitoraggio e di modellistica relative all'idrodinamica e al moto ondoso che si instaurano nella laguna stessa. Nell'ambito del Progetto Caleri realizzato dall'Università di Ferrara sono state eseguite una serie di attività in campo per ottenere dati aggiornati funzionali alla ricostruzione dettagliata dell'ambiente lagunare: un rilievo batimetrico della bocca di Caleri e dei canali lagunari, rilievi topografici con drone e GPS delle barene, misure mareografiche e correntometriche in alcune sezioni significative in prossimità della bocca di Porto Caleri e di Varco Pozzatini. Sono stati anche raccolti ed analizzati i dati meteo-mareografici provenienti da diverse stazioni della Rete mareografica Alto Adriatico di ISPRA, tra cui quella di Moceniga, recentemente installata (agosto 2022) all'interno della laguna. I dati di queste stazioni sono stati elaborati e utilizzati come condizioni al contorno o come dati di controllo per le simulazioni numeriche. In particolare, data la sua posizione, la stazione di Moceniga è risultata di fondamentale importanza per la determinazione del regime mareografico, ondamentico e anemometrico all'interno della laguna.

Nella seconda parte del lavoro di tesi è stato applicato un modello matematico bidimensionale, composto dal modello idrodinamico 2DEF e dal modello di moto ondoso SWAN opportunamente accoppiati tra loro, per valutare la circolazione e i campi d'onda all'interno della laguna di Caleri in caso di eventi meteo-marini estremi. Per la simulazione delle dinamiche lagunari, il modello accoppiato 2DEF+SWAN è stato calibrato prima con riferimento alla parte idrodinamica. In questa fase, i parametri di resistenza del modello 2DEF sono stati scelti in modo che, in condizioni marine non perturbate, il modello fosse in grado di simulare correttamente i livelli idrometrici misurati all'interno della laguna e le portate misurate in una serie di sezioni nell'intorno della bocca. Per la calibrazione del modello di SWAN di moto ondoso, si sono invece determinati i valori di alcuni parametri di generazione delle onde in modo che il modello fosse in grado di riprodurre correttamente i livelli idrometrici e le altezze d'onda misurati nella stazione di Moceniga.

Il modello accoppiato onde-correnti, opportunamente calibrato, è stato infine applicato a due eventi significativi. Nel primo, è stata valutata la propagazione del moto ondoso nella laguna di Caleri durante un evento estremo, ricostruito a partire dall'evento meteomarinario significativo del 22/11/2022 incrementando opportunamente la forzante anemometrica. I risultati modellistici hanno permesso di trarre le seguenti considerazioni di sintesi sullo sviluppo del moto ondoso e sull'idrodinamica locale:

- il valore di altezza d'onda significativa,  $H_s$ , calcolato durante l'evento estremo è del 34.15% maggiore rispetto a quello calcolato durante l'evento reale. L'aumento di  $H_s$  è dovuto principalmente all'aumento di intensità della forzante anemometrica;
- i fenomeni di interrimento che avvengono nella fascia costiera antistante la bocca di Porto Caleri e nel tratto di litorale compreso fra questa e Porto Levante, sono causati dallo sviluppo delle correnti costiere che si generano durante le mareggiate, stabilendo in questo tratto una zona di convergenza dove viene favorita la sedimentazione delle particelle trasportate lungo costa;
- all'interno della laguna di Caleri, sia il moto ondoso che l'innalzamento locale del livello risultano essere critici lungo il margine occidentale e sud-occidentale della laguna. Questi fenomeni potrebbero essere attenuati realizzando ulteriori barene, limitando in questo modo l'ampiezza delle superfici d'acqua libere.

Nel secondo evento sono stati valutati gli effetti sulle correnti di marea e sul moto ondoso causati da uno scenario d'innalzamento del livello del mare generato dal cambiamento climatico. Si è considerato, a tale proposito, lo scenario SSP2-4.5 riferito all'anno 2100, al quale corrisponde un innalzamento del livello medio del mare di 57 cm. Le simulazioni hanno evidenziato che, in condizioni meteo-marine non perturbate, ci si può attendere un incremento di oltre il 15% degli scambi mare-laguna alla bocca di Porto Caleri e a Varco Pozzatini. Per quanto riguarda il moto ondoso, l'effetto dell'innalzamento del livello del mare è stato valutato applicando le stesse forzanti dell'evento del 22/11/2022 ma con livelli del mare opportunamente incrementati. I risultati della simulazione effettuata con il modello accoppiato onde-correnti hanno evidenziato come l'effetto dell'innalzamento del livello del mare produca un incremento di poco più del 6% dell'altezza d'onda significativa in laguna. Pur quantitativamente modesto, l'incremento di altezza d'onda contribuisce alla riduzione della sicurezza arginale rispetto ai rischi di inondazione costiera, situazione che allo stato attuale appare già critica.

Sulla base dei risultati modellistici ottenuti, sembra perciò confermata l'opportunità di realizzare interventi volti al ripristino della sicurezza arginale e al consolidamento o all'eventuale ampliamento delle aree di barena presenti in laguna. Quest'ultima tipologia di intervento, opportuna soprattutto nella parte occidentale del bacino, oltre a rappresentare un'azione di miglioramento ambientale nel sistema lagunare, potrebbe contribuire a limitare lo sviluppo del moto ondoso, dei fenomeni di erosione e del rischio di sormonto arginale a esso collegati.



In conclusione, questo lavoro ha consentito da una parte l'acquisizione di nuove competenze relativamente a diverse tecniche di misura in campo, dall'altra l'applicazione di differenti metodologie di analisi e di elaborazione dei dati raccolti, mediante la costruzione, la calibrazione e l'applicazione di modelli numerici avanzati per lo studio della circolazione e del moto ondoso in ambienti costieri e, in generale, di approfondire alcune tematiche di particolare interesse per la laguna di Caleri. I risultati del presente studio, opportunamente integrati, potranno servire come base per l'ideazione, la progettazione e la realizzazione di interventi di mitigazione del rischio costiero, volti anche a preservare il peculiare e delicato equilibrio ambientale che caratterizza la laguna di Caleri.



## 6 Bibliografia

- Ali, E. W. (2022). Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press.
- Carrasco, A. R. (2016). Coastal lagoons and rising sea level: A review. *Earth-Science Reviews*, 154, 356-368.
- Cavaleri, L. &. (1981). Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C11), 10961-10973.
- Corbau, C. Z. (2022). Secular diachronic analysis of coastal marshes and lagoons evolution: Study case of the Po River delta (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 268, 107781.
- Defina, A. (2000). Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water resources research*, 36(11), 3251-3264.
- Defina, A., & Bonetto, I. (1998). Rappresentazione dei termini di accelerazione convettiva in un modello bidimensionale della propagazione di onde lunghe in acque basse. In *XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche (Vol. 1, pp. 53-64)*.
- H.-O. Pörtner, D. R. (2022). *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Holthuijsen, L. H. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal engineering*, 13(1), 23-54.
- Hsu, S. A. (1994). Determining the power-law wind-profile exponent under near-neutral stability conditions at sea. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 33(6), 757-765.
- IPROS Ingegneria Ambientale S.r.l. (2021). *Interventi di ripristino e protezione della linea di costa nei paraggi dei litorali del delta del Po tra la foce del Po di Levante e la foce del Po di Goro a seguito dell'erosione delle spiagge nei comuni di Porto Viro, Porto Tolle e Ariano Polesine. Regione Veneto, Ufficio del Genio Civile di Rovigo*.

- IPROS Ingegneria Ambientale S.r.l. (2023). Servizio per la realizzazione di simulazioni numeriche per permettere di definire gli impatti dei cambiamenti climatici sulle attività di pesca e acquacoltura, in accordo con le possibili soluzioni identificate con la collaborazione dei pescatori ed altri stakeholder. Dipartimento di Scienze dell’Ambiente e della Prevenzione, Università degli studi di Ferrara.
- Ris, R. C. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7667-7681.
- SWAN, T. (2012). *SWAN User Manual*. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology. Technical Documentation.
- Zijlema, M., Van Vledder, G. P., & Holthuijsen, L. H. (2012). Bottom friction and wind drag for wave models. *Coastal Engineering*, 65, 19-26.