



**INTERVENTI EMERGENZIALI DI RIDUZIONE DEL  
RISCHIO RESIDUO AI SENSI DELL'ART. 25 LETT. D)  
DEL D.LGS. 1/2018 E DELL'ART. 3 C. 1 DELL'  
O.C.D.P.C. 616/2019 – RIFACIMENTO DEI  
FRANGIONDE E DARSENA STRADA CORTE  
COMARE (PRESSO PONTE LONGO) E DARSENA  
F.TA DELLE CAPPUCINE (CUP J77H21001570001)**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**IN21.0270-REL-E050.0**

**Studio meteo-marino**

Venezia, 27 dicembre 2022

Progettista  
InTeA Srl  
*ing. Andrea Bondi*  
(atto firmato digitalmente)

Consulenza specialistica  
Ipros Srl

Responsabile Unico del Procedimento  
*Dott. Arch. Roberto Megera*  
(atto firmato digitalmente)

## Indice

1	Premessa.....	2
2	Inquadramento geografico.....	3
3	Calcolo delle altezze d'onda col metodo SMB .....	5
3.1.	Regime anemologico locale .....	5
3.2	Livelli di marea.....	9
3.3	Fetch geografici ed efficaci.....	11
3.4	Calcolo delle altezze d'onda di progetto.....	13
4	Calcolo delle altezze d'onda con il modello WWTM.....	17
4.1	Descrizione del modello .....	17
4.2	Dataset utilizzato .....	18
4.3	Risultati .....	18
5	Onde generate da natanti.....	22
6	Bibliografia .....	26

## 1 Premessa

La presente relazione riporta i risultati dello studio meteo-marino finalizzato all'esame delle condizioni di moto ondoso previste nella laguna di Venezia in corrispondenza della darsena Fondamenta delle Cappuccine nell'isola di Burano (Fig. 1.1).

Lo studio è stato svolto a supporto del progetto di rifacimento del frangionde che delimita la darsena, che svolge la funzione di protezione dello specchio d'acqua dal moto ondoso oltre che di banchina di ormeggio.

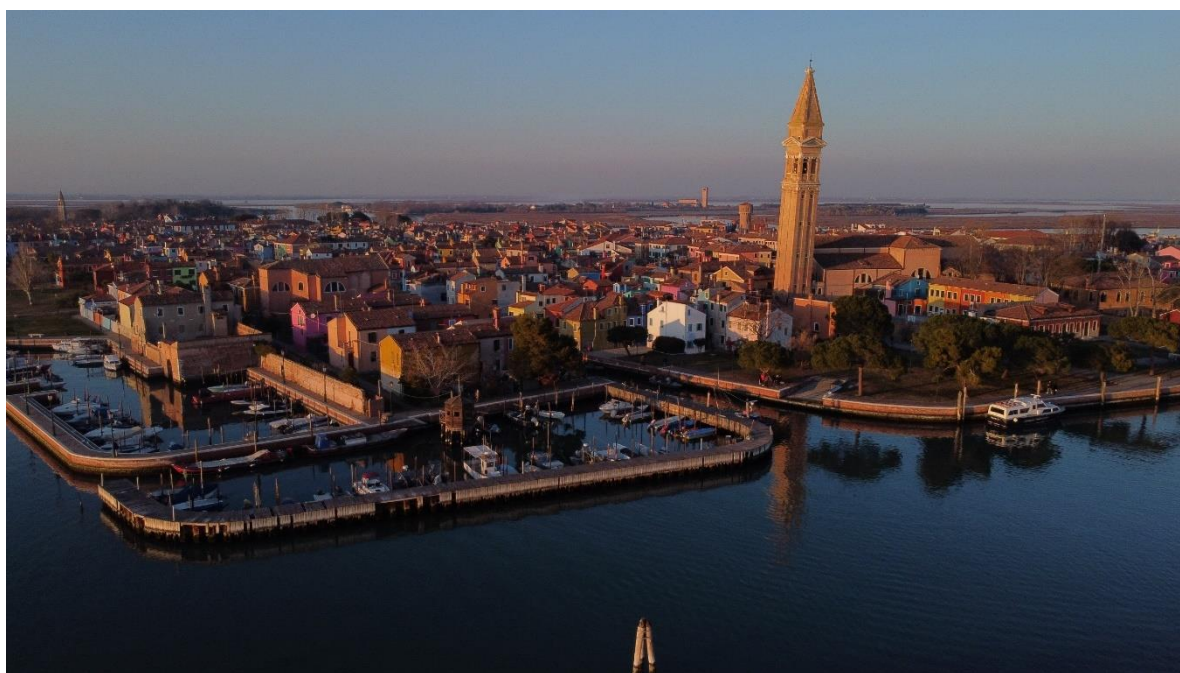


Fig. 1.1 – Vista della darsena esistente a Burano, Venezia.

## **2 Inquadramento geografico**

L'area interessata dalla realizzazione della nuova darsena è ubicata all'estremità meridionale dell'isola di Burano (Fig. 2.1).

La zona di intervento si affaccia sulla laguna, in corrispondenza dell'intersezione tra i canali che circondano l'isola di Burano (Canale Esterno Est e Canale Esterno Sud Ovest) e il cosiddetto Canale di Raccordo. Quest'ultimo costituisce la via navigabile che collega l'isola con il Canale S. Francesco e il Canale di Crevan.

Il paraggio risulta esposto alle onde provenienti dal II e dal III quadrante (Scirocco, Libeccio, Ponente), mentre risulta sostanzialmente ridossato rispetto ai venti provenienti dal I e dal IV quadrante (Bora, Maestrale e Tramontana).

Ad eccezione dei canali sopra menzionati, la cui profondità è dell'ordine di 2.5÷3.5 m, lo specchio d'acqua antistante la darsena è caratterizzato dalla presenza di bassi fondali, con profondità inferiori ad 1 m rispetto al livello medio del mare (IGM) i quali limitano, di fatto, la possibilità che in esso si possa sviluppare moto ondoso forte intensità (Fig. 2.2).

Nel complesso, il paraggio risulta maggiormente protetto, rispetto al passato, dal moto ondoso proveniente dai quadranti occidentali, a causa della presenza, a circa 0.8÷1.3 km a SW dell'isola, di alcune strutture morfologiche (barene) realizzate nei primi anni 2000 nell'ambito degli interventi di recupero morfologico attuati nella Laguna Nord.

Meno rilevanti, rispetto al moto ondoso incidente, sono gli analoghi interventi effettuati, sempre nei primi anni 2000, lungo il margine del Canale di Burano a est dell'isola, poiché questi sono consistiti essenzialmente nel ripristino di aree di barena già esistenti.



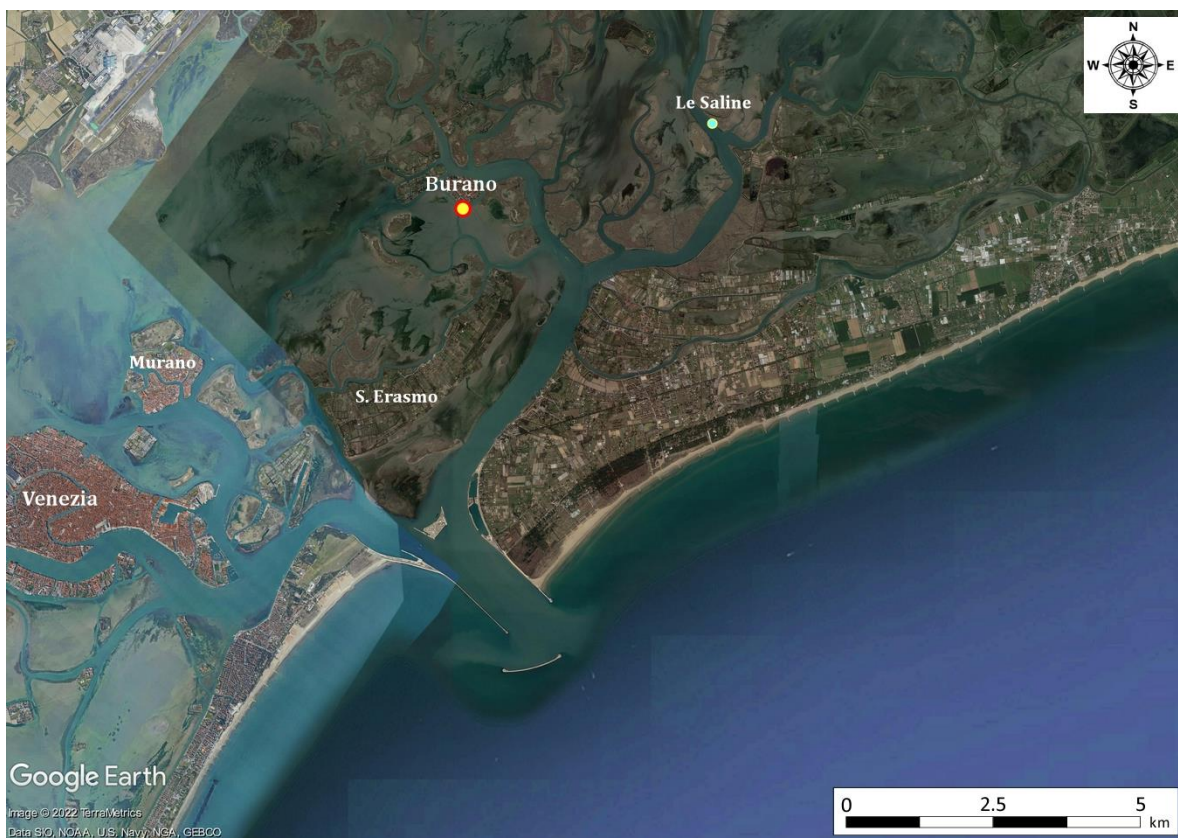


Fig. 2.1 – Inquadramento geografico dell'area di studio. Nell'immagine è indicata anche la posizione della stazione anemometrica Le Saline, utilizzata nello studio.

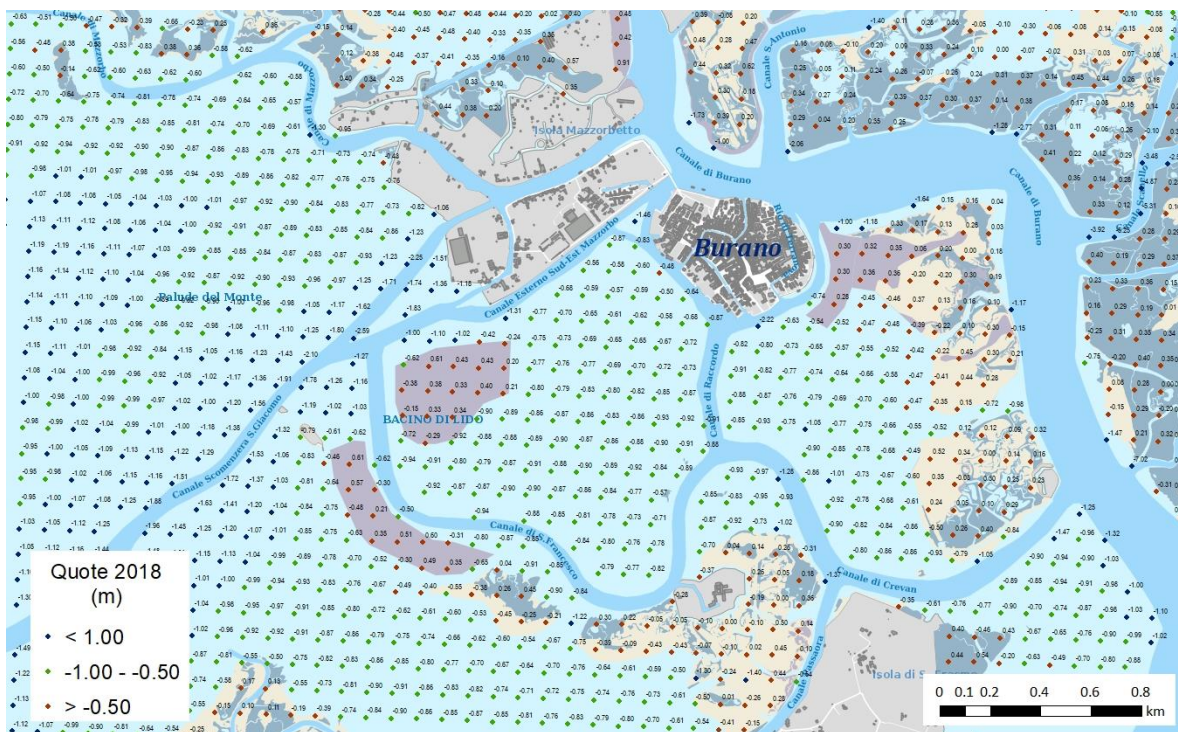


Fig. 2.2 – Batimetria in prossimità della zona di intervento. Rilievo 2018. Rif. IGM.

### **3 Calcolo delle altezze d'onda col metodo SMB**

#### **3.1. Regime anemologico locale**

Per l'analisi del regime dei venti che insistono sull'area di progetto si è fatto riferimento alla serie storica dei dati registrati dalla stazione anemometrica Le Saline, inserita nella rete telemareografica del Comune di Venezia (CPSM), i cui dati sono reperibili presso lo stesso Ente.

Sono state analizzate le registrazioni dal 2000 al 2021, disponibili a passo orario. La completezza della serie è buona, dal momento che per tutti gli anni dopo il 2007 è disponibile oltre il 98% dei dati annuali, con 12 anni in cui si hanno a disposizione tutti i dati orari. Tra il 2000 e il 2006 gli anni con il maggior numero di dati mancanti sono il 2000, 2002 e 2005 di cui sono disponibili rispettivamente il 17%, 85% e 84% dei dati complessivi. Nei rimanenti casi si ha una percentuale di completezza variabile tra il 94% e il 96%.

Le seguenti tabelle riportano i risultati numerici ottenuti.

La Tab. 3.1 riporta il clima anemologico ottenuto raggruppando i dati orari in classi omogenee per intensità e direzione di provenienza.

Le successive Tab. 3.2 e Tab. 3.3 riportano l'incidenza dei venti con diversa direzione e velocità, in termini di frequenza di accadimento. La Tab. 3.2 riporta anche la velocità massima del vento per ciascuna direzione considerata.

I successivi grafici di Fig. 3.1 sintetizzano i risultati delle elaborazioni mediante le consuete rappresentazioni polari.

Si osserva (Tab. 3.3) che i venti di maggiore frequenza hanno velocità comprese tra 2 e 4 m/s (regime di brezza), mentre i venti di una certa intensità, superiore a 8 m/s, sono pari a circa il 4.2% del totale.

L'analisi della direzione di provenienza (Tab. 3.2) conferma che per la zona di Burano i venti più frequenti sono gli stessi che sono maggiormente persistenti sull'Adriatico settentrionale, ossia quelli provenienti dal I quadrante (Bora). Meno frequenti sono i venti provenienti dal settore sud-orientale (Scirocco) mentre più rari sono i venti provenienti dal settore occidentale (Libeccio, Ponente e Maestrale).

Le rose dei venti riportate nelle figure seguenti, indicano che i venti provenienti dal I quadrante sono generalmente anche quelli più intensi. In effetti anche nel sito di Burano gli eventi più gravosi sono quelli generati dal vento di Bora che, come è noto, è il vento tipicamente più intenso nel Golfo di Venezia.

Tuttavia, come è esplicitato dalla Tab. 3.2, venti di intensità massima paragonabile ai più intensi venti provenienti dal I quadrante si possono verificare anche dalle altre direzioni, in particolare dal settore occidentale. In questi casi si tratta prevalentemente di episodi di durata limitata, che tuttavia ai fini della generazione del moto ondoso locale possono essere comunque molto significativi, soprattutto se essi si verificano in concomitanza con episodi di "acqua alta" in cui la presenza di un elevato tirante d'acqua può consentire lo sviluppo di onde di una certa altezza.

Le Saline		Velocità del vento (m/s)											
DIR		0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	>20.0	Totale Registrazioni
(°N)		2.0	4.0	6.0	8.0	10.	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0		
0	10	2520	3743	1520	438	154	84	59	14	5	0	0	8537
10	20	2260	4168	2326	781	295	105	28	10	2	0	0	9975
20	30	2181	4530	3098	1253	457	211	77	26	8	5	0	11846
30	40	2079	4681	3557	1684	726	339	123	45	15	1	0	13250
40	50	1761	4243	3281	1873	798	375	149	46	18	4	0	12548
50	60	1634	3327	2694	1499	720	289	112	32	6	2	0	10315
60	70	1334	2293	1608	964	475	215	58	21	7	0	0	6975
70	80	1284	1501	901	494	343	128	48	9	1	0	1	4710
80	90	1173	1163	620	344	170	64	27	7	2	0	0	3570
90	100	1103	1095	533	191	90	34	5	4	0	0	0	3055
100	110	1051	1084	434	139	29	19	1	0	0	0	0	2757
110	120	1043	1238	408	77	26	6	0	0	0	0	0	2798
120	130	1149	1601	521	125	22	8	3	0	0	0	0	3429
130	140	1254	1913	671	175	54	23	6	0	0	0	0	4096
140	150	1435	2408	912	239	84	20	5	2	0	0	0	5105
150	160	1657	2947	1100	301	104	29	4	2	0	0	0	6144
160	170	1803	2951	1042	252	88	29	7	0	0	0	0	6172
170	180	1796	2379	821	230	52	16	0	2	0	0	0	5296
180	190	1601	1709	500	128	25	7	1	1	0	0	0	3972
190	200	1413	1210	318	85	23	10	3	0	0	0	0	3062
200	210	1436	1157	327	88	37	5	0	0	0	0	0	3050
210	220	1336	1129	300	82	26	5	1	0	1	0	0	2880
220	230	1265	1065	304	95	23	4	1	0	0	0	0	2757
230	240	1315	964	261	87	27	6	2	1	0	0	0	2663
240	250	1272	837	203	73	18	7	2	1	0	0	0	2413
250	260	1235	747	191	47	10	5	0	0	0	0	0	2235
260	270	1332	840	184	45	16	2	2	1	0	0	0	2422
270	280	1376	869	206	49	13	4	0	1	0	0	0	2518
280	290	1427	966	169	34	11	2	2	1	1	0	0	2613
290	300	1505	1053	208	50	13	6	3	0	0	0	0	2838
300	310	1550	1124	204	49	21	9	0	1	0	0	0	2958
310	320	1561	1359	185	42	13	4	2	0	1	1	0	3168
320	330	1762	1591	210	44	15	3	4	2	0	0	0	3631
330	340	2030	1986	276	71	22	13	0	0	1	0	0	4399
340	350	2179	2527	496	77	25	13	2	3	0	0	0	5322
350	360	2447	3363	904	193	43	31	10	3	2	0	0	6996
Totale Reg.		56559	71761	31493	12398	5068	2130	747	235	70	13	1	180475

Tab. 3.1 – Registrazioni del vento a Le Saline (2000-2021) ordinate per velocità e direzione

Classi di direzione	Frequenza (%)	Velocità max (m/s)	Classi di velocità	Registrazioni	Frequenza (%)
0 - 10	4.7%	17.8	0 - 2	56559	29.3%
10 - 20	5.5%	16.5	2 - 4	71761	37.2%
20 - 30	6.6%	19.6	4 - 6	31493	16.3%
30 - 40	7.3%	18.4	6 - 8	12398	6.4%
40 - 50	7.0%	18.6	8 - 10	5068	2.6%
50 - 60	5.7%	18.6	10 - 12	2130	1.1%
60 - 70	3.9%	17.3	12 - 14	747	0.4%
70 - 80	2.6%	20.7	14 - 16	235	0.1%
80 - 90	2.0%	17.8	16 - 18	70	0.0%
90 - 100	1.7%	15.9	18 - 20	13	0.0%
100 - 110	1.5%	12.0	>20	1	0.0%
110 - 120	1.6%	11.6	Tot. registrazioni	180475	93.6%
120 - 130	1.9%	13.1	Reg. mancanti	12389	6.4%
130 - 140	2.3%	13.0	Totale periodo	192864	100%
140 - 150	2.8%	15.0			
150 - 160	3.4%	15.4			
160 - 170	3.4%	13.8			
170 - 180	2.9%	14.5			
180 - 190	2.2%	14.3			
190 - 200	1.7%	13.8			
200 - 210	1.7%	11.8			
210 - 220	1.6%	16.9			
220 - 230	1.5%	13.9			
230 - 240	1.5%	14.0			
240 - 250	1.3%	15.2			
250 - 260	1.2%	11.3			
260 - 270	1.3%	14.3			
270 - 280	1.4%	14.1			
280 - 290	1.4%	17.1			
290 - 300	1.6%	13.1			
300 - 310	1.6%	14.7			
310 - 320	1.8%	19.0			
320 - 330	2.0%	15.0			
330 - 340	2.4%	16.5			
340 - 350	2.9%	15.9			
350 - 360	3.9%	16.4			
Tot. registrazioni	93.6%	-			
Reg. mancanti	6.4%	-			
Totale periodo	100%	-			

Tab. 3.3 – Registrazioni del vento suddivise per classi di velocità a Le Saline (2000-2021)

Tab. 3.2 – Frequenze e velocità massime suddivise per direzione a Le Saline (2000-2021)



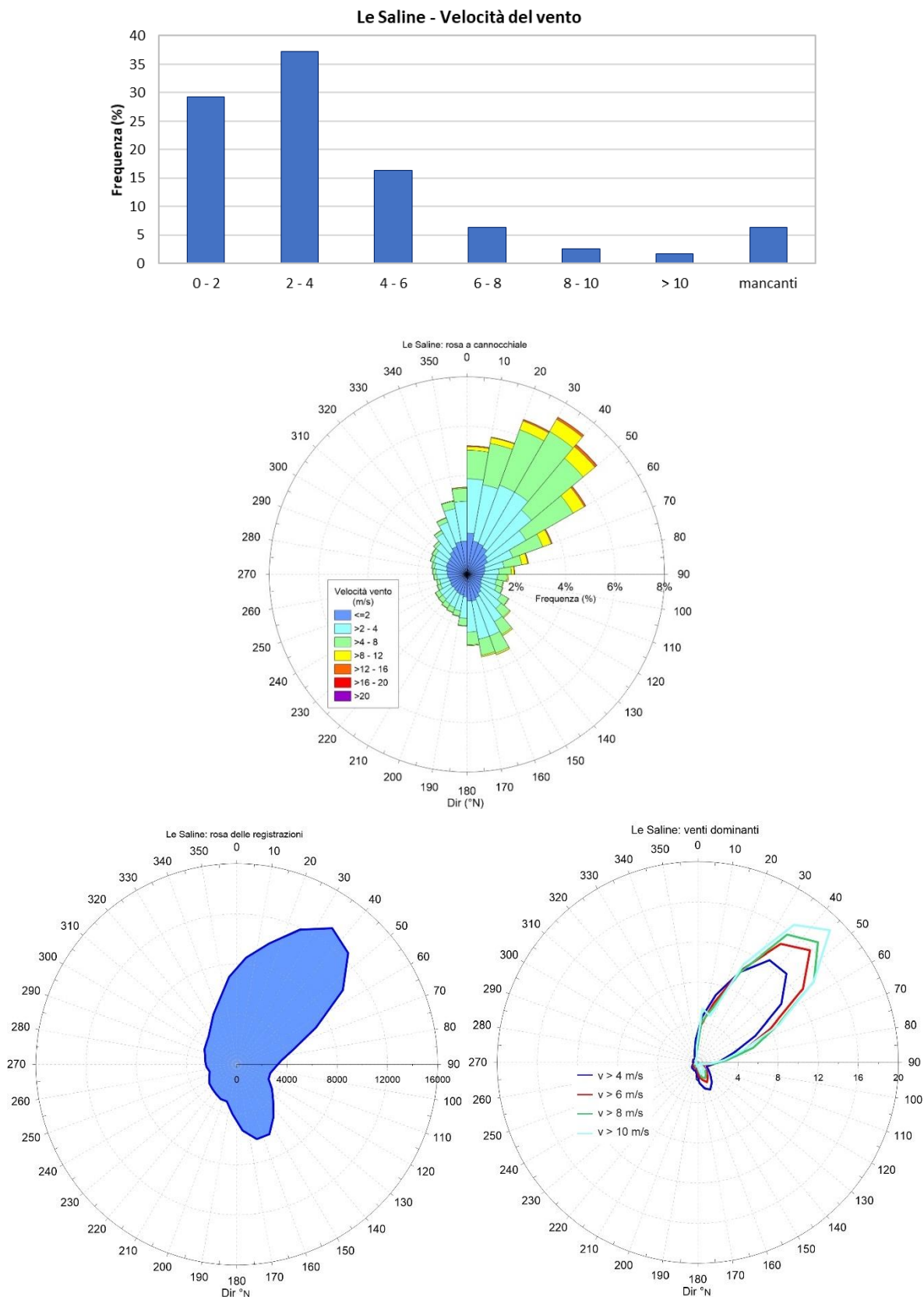


Fig. 3.1 – Registrazioni del vento suddivise per velocità (in alto). Rosa a cannocchiale delle velocità (al centro). Rosa delle registrazioni anemometriche (in basso, a sx). Rosa dei venti dominanti (in basso, a dx).

### 3.2 Livelli di marea

L'andamento della marea a Burano, come accade in tutte le località costiere dell'Adriatico settentrionale, è di tipo semi-diurno e, nel mese astronomico tipico, alterna fasi caratterizzate da ampiezze di circa 1 m (sizigie) a fasi con ampiezze di qualche decina di centimetri (quadrature). In modo analogo a quanto si verifica in altri punti della Laguna di Venezia, le oscillazioni di marea risentono sia dell'azione del vento locale, che modifica l'assetto dei livelli idrometrici all'interno del bacino, sia dell'effetto delle perturbazioni meteorologiche, che si somma ai normali valori di marea astronomica (storm surge).

Per l'analisi dei livelli di marea che si verificano nell'area di progetto è stata reperita la serie storica del mareografo di Burano, dal 2000 al 2021. La serie è costituita per lo più dai dati registrati dalla rete telemareografica del Comune di Venezia (CPSM), disponibili a passo orario sul sito dell'Ente. Fanno eccezione i dati degli anni 2000, 2001, 2003, 2004 e 2005 che sono stati reperiti presso ISPRA allo scopo di ridurre il numero di dati mancanti della serie CPSM. I *dataset* forniti dai due Enti possono differire di qualche cm ma sono sostanzialmente analoghi, tant'è vero che dal 2019 il Comune di Venezia ha installato i propri strumenti all'interno della stazione ISPRA, fornendo il dato misurato per entrambi gli Enti.

La completezza della serie è buona, con 16 anni in cui si hanno almeno il 98% di dati misurati, di cui la metà senza alcun dato mancante. Gli anni con il maggior numero di dati mancanti sono il 2010 e il 2019, in cui sono disponibili rispettivamente l'88% e l'87% dei dati annuali.

In Fig. 3.2 è riportato l'andamento della serie oraria dal 1/1/2000 al 31/12/2021, in cui i livelli sono stati traslati dal sistema di riferimento originale (ZMPS, Venezia 1897) al sistema nazione della rete IGM (Genova 1942), correggendoli mediante sottrazione di 23.5 cm.

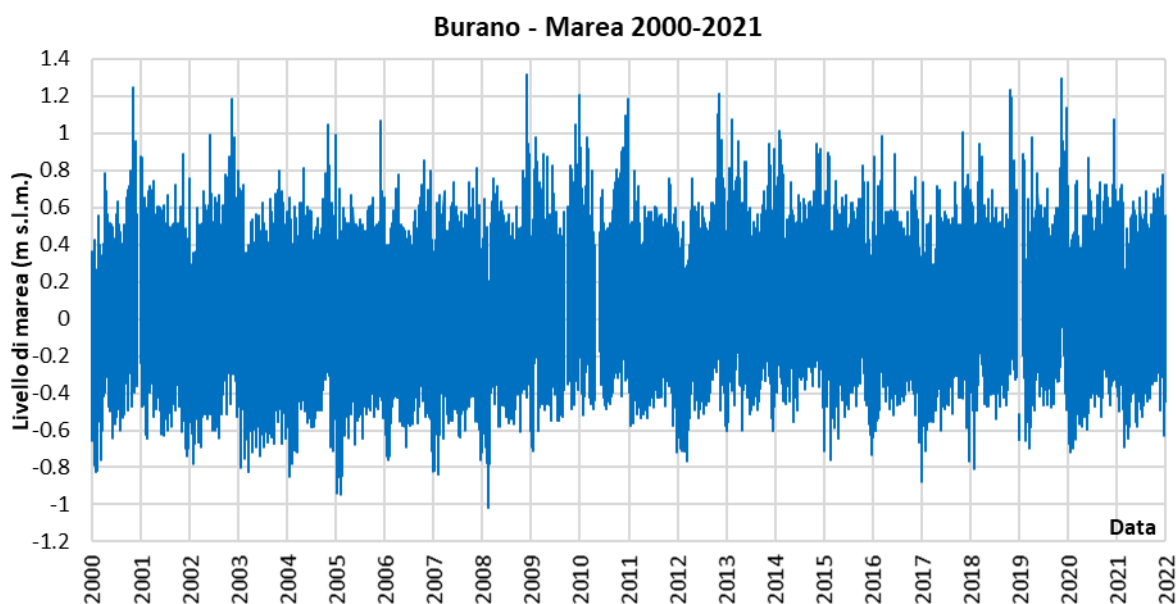


Fig. 3.2 – Marea registrata a Burano dal 1/1/2000 al 31/12/2021. Fonte dati: CPSM-Comune di Venezia, ad eccezione degli anni 2000-2001, 2003-2005 forniti da ISPRA-Venezia. Riferimento IGM.

In Tab. 3.4 sono riportati gli eventi storici di “*acqua alta*” per il mareografo di Burano e, per completezza, anche per quello di Venezia-Punta della Salute rispettivamente dal 1990 e dal 1872. L’elaborazione è fornita da ISPRA ed è disponibile sul sito istituzionale dell’Ente ([www.venezia.isprambiente.it](http://www.venezia.isprambiente.it)).

A Burano l’evento caratterizzato dal livello di marea più alto è stato quello del 12/11/2019, con un livello registrato di 1.325 m s.l.m.. A Punta della Salute per lo stesso evento è stato registrato un livello di 33 cm più alto, che è risultato inferiore solo a quello storico del 1966. Come si vedrà nel successivo par. 0 l’evento del 12/11/2019 è stato caratterizzato, nell’intorno del colmo di marea, da vento proveniente dal settore di Libeccio.

Punta della Salute (dal 1872)			Burano (dal 1990)		
data	Liv. ZMPS (m)	Liv. IGM (m)	data	Liv. ZMPS (m)	Liv. IGM (m)
04/11/1966	1.94	1.705	12/11/2019	1.56	1.325
12/11/2019	1.89	1.655	01/12/2008	1.54	1.305
22/12/1979	1.66	1.425	15/11/2019	1.53	1.295
01/02/1986	1.58	1.345	29/10/2018	1.52	1.285
01/12/2008	1.56	1.325	06/11/2000	1.48	1.245
29/10/2018	1.56	1.325	29/10/2018	1.48	1.245
15/11/2019	1.56	1.325	11/11/2012	1.47	1.235
12/11/1951	1.51	1.275	17/11/2019	1.47	1.235
17/11/2019	1.51	1.275	25/12/2009	1.45	1.215
11/11/2012	1.48	1.245	16/11/2002	1.43	1.195
29/10/2018	1.48	1.245	23/12/2009	1.4	1.165
16/04/1936	1.47	1.235	24/12/2010	1.4	1.165
16/11/2002	1.47	1.235	13/11/2019	1.39	1.155
15/10/1960	1.45	1.215	23/12/2019	1.38	1.145
25/12/2009	1.45	1.215	01/11/2012	1.34	1.105
13/11/2019	1.45	1.215	24/12/2019	1.34	1.105
03/11/1968	1.44	1.205	03/12/2005	1.33	1.095
06/11/2000	1.44	1.205	08/12/1992	1.31	1.075
23/12/2009	1.44	1.205	03/12/2010	1.31	1.075
24/12/2010	1.44	1.205	12/02/2013	1.31	1.075
23/12/2019	1.44	1.205	09/12/1992	1.29	1.055

Tab. 3.4 – Eventi storici di acqua alta sulla base dei valori massimi di marea registrati a Venezia-Punta della Salute e a Burano dall’inizio delle serie storiche digitalizzate. Fonte elaborazione: ISPRA-Venezia.

### **3.3 Fetch geografici ed efficaci**

I fetch geografici (ossia le cosiddette “lunghezze di mare libero”) sono stati determinati mediante costruzione geometrica sulla base cartografica costituita dalla più recente ortofoto disponibile, tracciando una serie di raggi ad angoli successivi di 3°, di lunghezza pari all'esposizione del paraggio, ossia estesi fino ad intercettare la più vicina linea di costa.

Per quanto riguarda invece la determinazione dei fetch efficaci, è stata utilizzata la procedura proposta nello “Shore Protection Manual” (CERC, 1984), che consiste nel determinare, per ciascuna direzione, una media delle lunghezze dei raggi del fetch geografico nell'intorno della direzione stessa. In questo modo si riduce la possibile sovrastima delle onde provenienti da alcune direzioni in casi in cui il relativo fetch risulti allungato e assottigliato in modo anomalo.

Si può notare che, nel caso in esame, le massime lunghezze di fetch, sia geografico che efficace, sono quelle relative alle direzioni di Ponente e Libeccio (Fig. 3.3).

Come illustrato dalle immagini, nel settore di Ponente il fetch geografico si estende, anche se con ampiezza molto modesta, fino all'altezza di Campalto (circa 9 km). Nel settore di Libeccio esso si estende fino al già menzionato cordone di barene artificiali di recente realizzazione, per un'estesa di circa 1.3 km. Si individua tuttavia una porzione di settore di ampiezza limitata entro la quale il fetch si prolunga fino alle barene davanti all'isola di S. Erasmo, per una lunghezza di circa 3 km.

Molto meno esteso risulta il fetch geografico nella direzione di SE, ossia di Scirocco, essendo in questo caso la lunghezza libera limitata dalla parte settentrionale dell'isola di S. Erasmo e dalle barene adiacenti (circa 1 km). Anche in questo caso resta individuata tuttavia un settore ristretto in cui il fetch si prolunga fino a raggiungere le barene che delimitano il lato nord del Canale di S. Erasmo (circa 2 km).

Come è illustrato nel seguito (cap. 0), le valutazioni sulla distribuzione del fetch rispetto alla posizione della darsena sono state utilizzate per il calcolo delle altezze d'onda generate dal vento mediante le formulazioni proposte dallo Shore Protection Manual.

Si è ritenuto preferibile, perché più cautelativo ai fini della valutazione del moto ondoso, fare riferimento ai fetch geografici e non a quelli efficaci.





Fig. 3.3 – Fetch geografici (sopra) ed efficaci (sotto) per il paraggio in esame.

### 3.4 Calcolo delle altezze d'onda di progetto

Per la determinazione delle caratteristiche delle onde generate dal vento sono stati utilizzati i dati anemometrici registrati dalla stazione Le Saline del Comune di Venezia descritti nel par. 3. L'analisi è stata condotta con riferimento ai valori massimi di velocità registrati a partire dal 2000 (da gennaio 2000 a dicembre 2021) per i 3 settori di maggior interesse in base all'esposizione del paraggio. Ai valori massimi di velocità del vento sono stati associati i dati di livello idrometrico registrati a Burano nel medesimo istante (si veda il par. 0).

Per la valutazione delle onde generate da vento sono disponibili in letteratura numerose formulazioni teoriche. Nel caso specifico (generazione da vento in acque basse) si è scelto di adottare l'approccio proposto nello "Shore Protection Manual" e nel più recente "Coastal Engineering Manual". Tale approccio permette di calcolare le caratteristiche dell'onda generata dal vento (altezza significativa e periodo di picco) tenendo conto della profondità dello specchio acqueo, della velocità del vento e del fetch geografico.

Il metodo descritto nello "Shore Protection Manual" (CERC, 1984) per la determinazione delle onde generate da vento in acque basse si basa su successive approssimazioni nelle quali il contributo dell'energia del moto ondoso dovuta all'azione del vento viene aggiunto, mentre quello dovuto all'attrito al fondo viene sottratto. Questo metodo usa le relazioni proposte per la generazione in acque profonde per determinare il contributo dell'energia del moto ondoso dovuta all'azione del vento; l'energia persa a causa dell'attrito al fondo viene invece calcolata utilizzando le formulazioni sviluppate da Bretschneider e Reid (1953). Le altezze significative e i periodi risultanti si ottengono combinando numericamente le due formulazioni.

Implementando questo metodo si ottengono una serie di abachi che permettono di calcolare l'altezza significativa e il periodo di picco di onde generate da vento in acque basse, a partire dai seguenti dati di base:

- velocità e direzione del vento
- fetch geografico
- profondità del fondale.

In via analitica le caratteristiche delle onde generate da vento si possono determinare utilizzando le seguenti espressioni:

$$\frac{gH}{U_A^2} = 0.283 \tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left\{ \frac{0.00565 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right\}$$
$$\frac{gT}{U_A} = 7.54 \tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \tanh \left\{ \frac{0.0379 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\}$$

dove:



- $g$  è l'accelerazione di gravità (pari a  $9.806 \text{ m/s}^2$ );
- $H$  è l'altezza d'onda significativa generata (m);
- $T$  è il periodo di picco dell'onda generata (s);
- $U_A$  è la velocità di attrito del vento riferita alla direzione di generazione prescelta (m/s);
- $F$  è il fetch geografico relativo alla direzione di generazione prescelta (m);
- $d$  è la profondità nell'area di generazione (m).

La velocità di attrito del vento  $U_A$ , in corrispondenza della superficie dello specchio liquido, viene ottenuta a partire dalla velocità del vento ( $U$ ) secondo la relazione:

$$U_A = 0.71U^{1.23}$$

La presenza dei bassi fondali prospicienti alla zona di intervento, caratterizzati da profondità comprese tra 0.5 e 1.0 m, risulta un fattore limitante per la generazione del moto ondoso, in quanto limita per attrito e frangimento l'altezza dell'onda in grado di generarsi sotto l'azione del vento. Infatti, gli eventi ondosi che si generano sui bassi fondali possono assumere valori di altezza d'onda di un certo rilievo solo in occasione di eventi di marea eccezionale. Conseguentemente, le agitazioni ondose più sfavorevoli per il paraggio in esame sono quelle in grado di generarsi lungo i fetches caratterizzati, in condizioni di alta marea ordinaria, da profondità tali da permettere lo sviluppo completo del moto ondoso.

Pertanto, con riferimento alla conformazione geografica del paraggio e sulla base delle valutazioni sul regime dei venti e della distribuzione dei fetch, sono state individuate le 3 direzioni di provenienza del vento in grado di generare gli eventi ondosi maggiormente significativi.

Per la loro determinazione sono stati innanzitutto considerati i soli quadranti meridionali e all'interno di essi sono stati individuati 3 settori di indagine: 130-180°N (Scirocco), 180-230°N (Libeccio) e 230-280°N (Ponente).

All'interno di ciascun settore sono state determinate le 3 direzioni di provenienza del vento più significative sulla base dei seguenti criteri:

- 165°N per il settore di Scirocco: direzione caratterizzata da velocità e frequenza massime;
- 215°N per il settore di Libeccio: direzione caratterizzata dalla velocità massima;
- 265°N per il settore di Ponente: direzione caratterizzata dal fetch massimo.

In Fig. 3.4 sono riportati graficamente i fetch geografici per le 3 direzioni considerate, pari a 1164 m per la direzione 165°N, 2992 m per la direzione 215°N e 9176 m per la direzione 265°N.

Nella successiva Fig. 3.5 è riportata la profondità media calcolata lungo le 3 direzioni considerate, che risulta pari a 0.85 m per le direzioni 165°N e 215°N e a 1.0 m per la direzione 265°N. Per il calcolo della profondità sono stati rielaborati i dati del rilievo lagunare riportato in Fig. 3.5. I dati batimetrici sono quelli utilizzati per la messa a punto del modello idrodinamico della laguna di Venezia (Laguna Nord) nell'ambito del progetto LIFE Lagoon Refresh 2017-2022 (rif. IPROS Srl).



Fig. 3.4 – Individuazione dei fetch geografici per le direzioni 165°N (Scirocco), 215°N (Libeccio) e 265°N (Ponente).

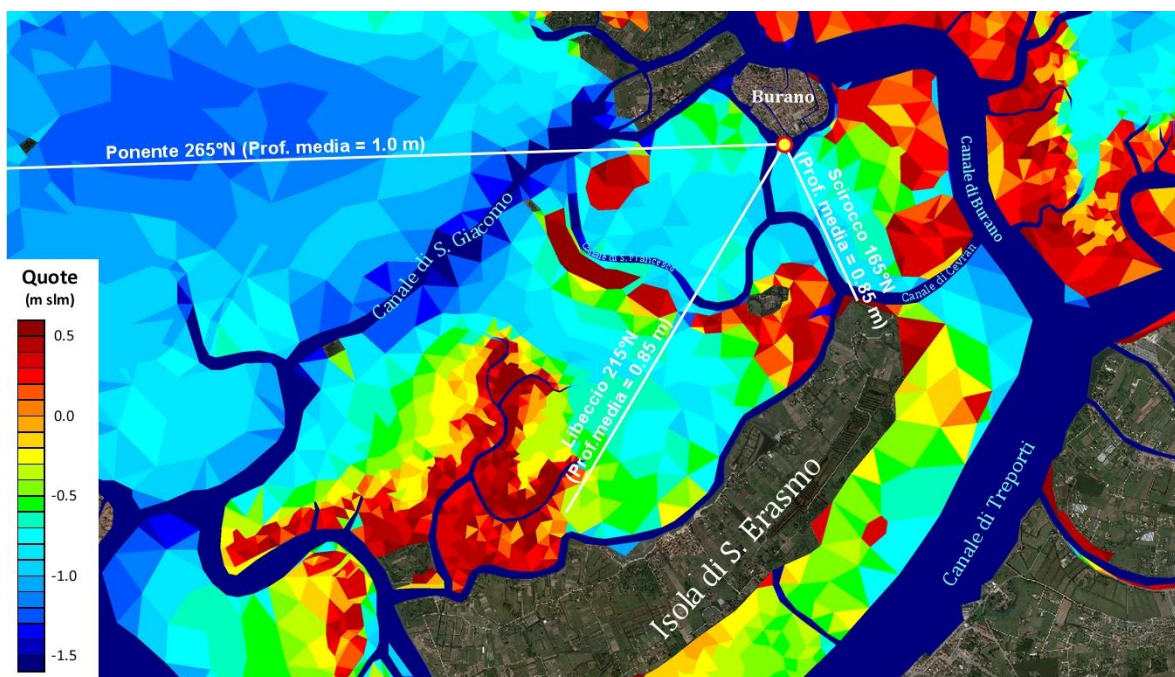


Fig. 3.5 – Batimetria in prossimità della zona di intervento, secondo la schematizzazione inserita nel modello idrodinamico della laguna sviluppato da IPROS nell'ambito del Progetto LIFE Lagoon Refresh.

Utilizzando le formulazioni proposte nello “Shore Protection Manual” (CERC, 1984), si riportano nella successiva Tab. 3.5 le caratteristiche delle onde generate dal vento calcolate per le 3 direzioni considerate, in termini di altezza d'onda significativa e periodo di picco, con la relativa data in cui si è manifestato l'episodio di vento nel dataset considerato.

In base al calcolo i valori massimi dell'altezza d'onda significativa sono di circa 50 cm, mentre i relativi periodi di sono inferiori a 2.5 s.

La direzione maggiormente esposta risulta essere quella del settore di Libeccio (215°N), con un valore di altezza d'onda pari a 51 cm ed un periodo di picco di 2.3 s, a causa dell'evento meteorologico eccezionale del 12/11/2019. Il livello di marea registrato nell'istante in cui il calcolo fornisce la massima altezza d'onda è di 1.295 m s.l.m..

Le altre direzioni forniscono valori di altezza d'onda più contenuti, dell'ordine dei 35 cm. Il livello di marea con cui si sviluppa la massima onda Scirocco (6/11/2000) è di 1.175 m s.l.m. mentre quello con cui si forma la massima onda di Ponente (25/9/2020) è di 0.575 m s.l.m.

<b>Settore di provenienza</b>	<b>Direzione [°N]</b>	<b>U [m/s]</b>	<b>U<sub>A</sub> [m/s]</b>	<b>F [km]</b>	<b>d [m]</b>	<b>H<sub>s</sub> [m]</b>	<b>T<sub>p</sub> [s]</b>	<b>Data</b>
<b>Scirocco</b>	155	15.4	20.5	1.16	0.85	0.33	1.72	06/11/2000 20:00
<b>Libeccio</b>	215	16.9	23.0	2.99	0.85	0.51	2.33	12/11/2019 23:00
<b>Ponente</b>	265	10.1	12.2	9.18	1.0	0.37	2.40	25/09/2020 17:00

Tab. 3.5 – Caratteristiche delle onde generate dal vento calcolate con il metodo SMB.

Si deve tener presente che i valori suindicati si riferiscono all'altezza d'onda significativa ( $H_s$  o  $H_{1/3}$ ), definita come l'altezza media del terzo di onde più alto. Si tratta, come è noto, della misura tipicamente utilizzata per la valutazione dell'intensità del moto ondoso, che ha il vantaggio di essere molto vicina all'altezza che un osservatore esperto rileva ad occhio nudo dal ponte di una barca. Inoltre, si tratta di una valutazione statisticamente stabile ovvero è confrontabile con i dati degli strumenti, non presentando grosse variazioni spazio-temporali (a differenza, ad esempio, dell'altezza massima che è molto discontinua).

In prima approssimazione, l'altezza d'onda massima e le altezze d'onda  $H_{1/100}$ ,  $H_{1/10}$  (pari, rispettivamente alla media del 1% e del 10% delle onde più alte) si possono stimare a partire dall'altezza significativa mediante le formule seguenti:

- $H_{\max} = 2 \times H_s$
- $H_{1/100} = 1,67 \times H_s$
- $H_{1/10} = 1,27 \times H_s$

## **4 Calcolo delle altezze d'onda con il modello WWTM**

### **4.1 Descrizione del modello**

Il modello WWTM (Wind Wave Tidal Model), sviluppato dai ricercatori del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, è un modello accoppiato che risolve sulla stessa griglia numerica il campo di moto idrodinamico e la generazione e propagazione delle onde da vento. La capacità del modello di descrivere correttamente l'idrodinamica ed il campo di moto ondoso è stata ampiamente testata confrontando risultati numerici e dati sperimentali raccolti sia in laguna di Venezia (e.g. Carniello et al. 2011) che in altre lagune (e.g. Mariotti et al. 2010, Zarzuelo et al., 2018).

Il modulo idrodinamico risolve le equazioni bidimensionali di propagazione delle onde lunghe in acque basse, opportunamente modificate al fine di descrivere correttamente la transizione asciutto-bagnato in ambienti poco profondi ed irregolari (Defina, 2000, D'Alpaos and Defina, 2007). Il modulo idrodinamico restituisce la velocità della corrente mediata sulla verticale e i livelli idrici, utilizzati dal modulo per la modellazione delle onde da vento al fine di calcolare la celerità di gruppo e valutare l'effetto del fondale sulla propagazione delle onde.

Il modulo di generazione e propagazione delle onde da vento si basa sulla soluzione dell'equazione di conservazione dell'azione d'onda, definita come rapporto tra energia e pulsazione dell'onda, opportunamente semplificata per l'applicazione a domini di calcolo caratterizzati da bassi fondali e forte irregolarità (Carniello et al., 2005, 2011), come la laguna di Venezia. In particolare, il modello assume che la direzione dell'onda coincida con la direzione del vento, trascurando implicitamente la rifrazione, processo che per essere descritto in modo accurato richiede una dettagliata caratterizzazione della batimetria che non è possibile garantire considerando l'irregolarità del fondale e la risoluzione della griglia numerica.

La laguna di Venezia è schematizzata mediante una griglia numerica non strutturata (Figura 4.1) costituita da 105841 elementi triangolari e 55690 nodi. Le quote assegnate agli elementi sono determinate sulla base dei dati batimetrici forniti del Provveditorato Interregionale OO.PP., ottenuti con il rilievo esteso all'intera Laguna, eseguito nel 2003. Tale rilievo batimetrico è stato effettuato utilizzando diverse tecniche (multi beam, single beam, GPS, ortofoto, rilievi topografici diretti), garantendo un'accuratezza pari a  $\pm 5$  cm sulle barene,  $\pm 5$  cm sui bassofondi e  $\pm 10$  cm nei canali a marea. Nel caso di Burano, la schematizzazione considera le barene che circondano il bassofondo posto a sud ovest dell'isola.

Il modello richiede come condizioni al contorno i livelli idrici al bordo esterno del dominio e il campo di vento agente sulla superficie della Laguna. Nell'imporre le condizioni al contorno, è possibile sia assumere il vento uniformemente distribuito sull'intero dominio che ricostruire la distribuzione spaziale di intensità e direzione del vento sulla base delle informazioni fornite da diverse stazioni di misura presenti in Laguna qualora queste informazioni siano disponibili per un congruo numero di punti.

## **4.2 Dataset utilizzato**

Il campo di moto ondoso agente sulla darsena a Burano è stato investigato utilizzando un dataset pubblicato dai ricercatori del Dipartimento ICEA in D'Alpaos et al. (2013) e Carniello et al. (2016) e successivamente esteso considerando gli anni più recenti per quanto riguarda le forzanti meteomarine. Nello specifico, sono stati utilizzati alcuni risultati numerici ottenuti eseguendo simulazioni della durata di un anno imponendo come condizioni al contorno le forzanti meteomarine registrate dalle stazioni si misura in Laguna nel corso del 2005, 2019 e 2020.

In tali simulazioni, il vento è stato assunto uniformemente distribuito sulla superficie lagunare, e sono stati utilizzati i dati registrati presso la stazione di misura di Chioggia Diga Sud. I livelli imposti al bordo esterno del dominio sono invece quelli registrati presso la Piattaforma CNR, collocata pochi km a largo della Laguna.

## **4.3 Risultati**

Il dataset analizzato ha consentito di individuare gli eventi meteo durante i quali, nel corso dei 3 anni analizzati, si è verificata la massima altezza d'onda significativa in prossimità della darsena di Burano.

In particolare, suddivisa la rosa dei venti in 8 direzioni principali di provenienza del vento, per ciascuna di esse è stato individuato l'evento meteo caratterizzato dal valore massimo di altezza d'onda significativa in prossimità della darsena (Tabella 1). I risultati mostrano che l'altezza d'onda significativa incidente la darsena è in genere contenuta ed inferiore ai 30 cm. Per via della sua posizione, la darsena risulta infatti protetta rispetto ai venti e alle mareggiate più intense che agiscono tipicamente sulla laguna di Venezia (vento di Bora). Inoltre, le barene che circondano il bassofondo posto a sud ovest di Burano (Figura 4.1) limitano il fetch efficace nelle direzioni direttamente incidenti la darsena (Ponente, Libeccio, Mezzogiorno e Scirocco) e di conseguenza l'entità delle onde generate. Le condizioni di moto ondoso più gravose si sono verificate in occasione della mareggiata avvenuta nel novembre 2019. Durante tale evento, condizioni di vento di Libeccio di rilevante intensità (velocità del vento prossima ai 15 m/s) hanno generato onde caratterizzate da altezza significativa pari a circa 50 cm, con periodo di picco dell'ordine dei 2 s.

I risultati ottenuti sono molto vicini a quelli determinati utilizzando l'approccio semplificato basato sul metodo SMB (par. 0)

Le mappe in Figura 2 mostrano la distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa determinata dal modello durante i 4 eventi caratterizzati dal valore massimo di altezza significativa calcolato in prossimità della darsena e da venti di Ponente, Libeccio, Mezzogiorno e Scirocco rispettivamente. Le mappe evidenziano chiaramente l'eccezionalità della mareggiata avvenuta nel novembre 2019 (Figura 2a), caratterizzata da un campo di moto ondoso di intensità decisamente maggiore rispetto agli altri eventi analizzati. Risulta inoltre evidente la protezione offerta dalle barene che circondano il bassofondo antistante la darsena (Figura 4.1), le quali, interrompendo il fetch efficace nelle direzioni direttamente incidenti la darsena stessa, limitano l'intensità del moto ondoso nell'area oggetto di studio.



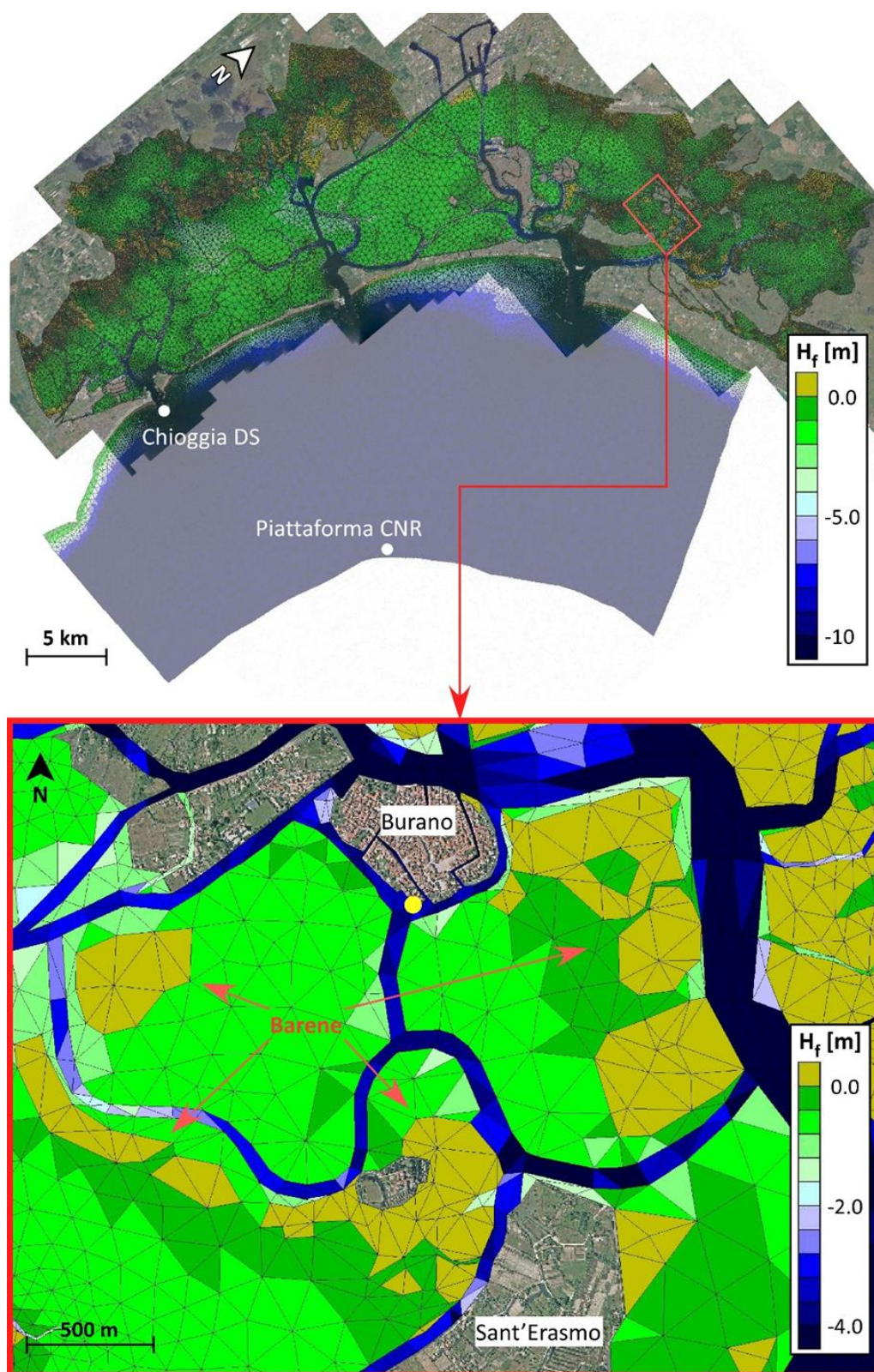


Fig. 4.1 – Griglia numerica che discretizza il dominio di calcolo e relativa ricostruzione della batimetria della laguna di Venezia. Sono evidenziate le posizioni delle stazioni di misura i cui dati sono stati utilizzati come condizioni al contorno. Nel riquadro rosso, un ingrandimento dell'area di interesse, corrispondente all'intorno dell'isola di Burano ed in particolare al bassofondo antistante la darsena.



Data-Ora	Altezza Onda [m]	Periodo Tp [s]	Velocità del Vento [m/s]	Direzione del Vento [°N]	
2005					
2005/10/20-17:00	0.10	1.06	11.70	20	N
2005/11/23-05:00	0.23	1.89	22.50	57	NE
2005/11/23-02:00	0.25	2.02	23.10	68	E
2005/05/08-19:00	0.25	1.58	9.80	131	SE
2005/12/28-19:00	0.20	1.38	8.80	202	S
2005/07/31-20:00	0.20	1.58	8.50	204	SO
2005/05/18-13:00	0.15	1.28	8.10	285	O
2005/08/03-09:00	0.14	1.16	4.80	293	NO
2019					
2019/05/12-10:00	0.12	1.22	14.58	22	N
2019/11/12-11:00	0.21	1.93	10.58	48	NE
2019/11/12-10:00	0.23	1.86	9.30	94	E
2019/04/04-14:00	0.27	1.62	12.29	124	SE
2019/10/15-20:00	0.19	1.39	11.83	161	S
2019/11/12-23:00	0.48	2.19	14.83	231	SO
2019/12/22-13:00	0.26	1.58	8.44	263	O
2019/05/11-23:00	0.22	1.63	11.45	304	NO
2020					
2020/07/24-09:00	0.09	1.26	7.70	338	N
2020/10/15-10:00	0.21	2.06	14.10	49	NE
2020/04/14-14:00	0.23	1.56	12.20	110	E
2020/12/04-20:00	0.26	1.63	11.50	139	SE
2020/09/25-13:00	0.27	1.69	11.10	199	S
2020/09/25-14:00	0.28	1.74	11.40	207	SO
2020/03/06-07:00	0.24	1.64	7.60	261	O
2020/02/05-00:00	0.14	1.28	8.80	307	NO

Tab. 4.1 - Valori massimi di altezza d'onda significativa determinati sulla base del dataset fornito dal dipartimento ICEA. Individuate le 8 principali direzioni di provenienza del vento, per ciascuna di esse è stato identificato l'evento durante il quale si è realizzato il valore massimo di altezza d'onda significativa per ciascuno dei tre anni analizzati. In rosso sono evidenziati gli eventi a cui corrispondono le altezze d'onda maggiori provenienti dalle direzioni direttamente incidenti la darsena oggetto di studio (venti di Ponente, Libeccio, Mezzogiorno e Scirocco).

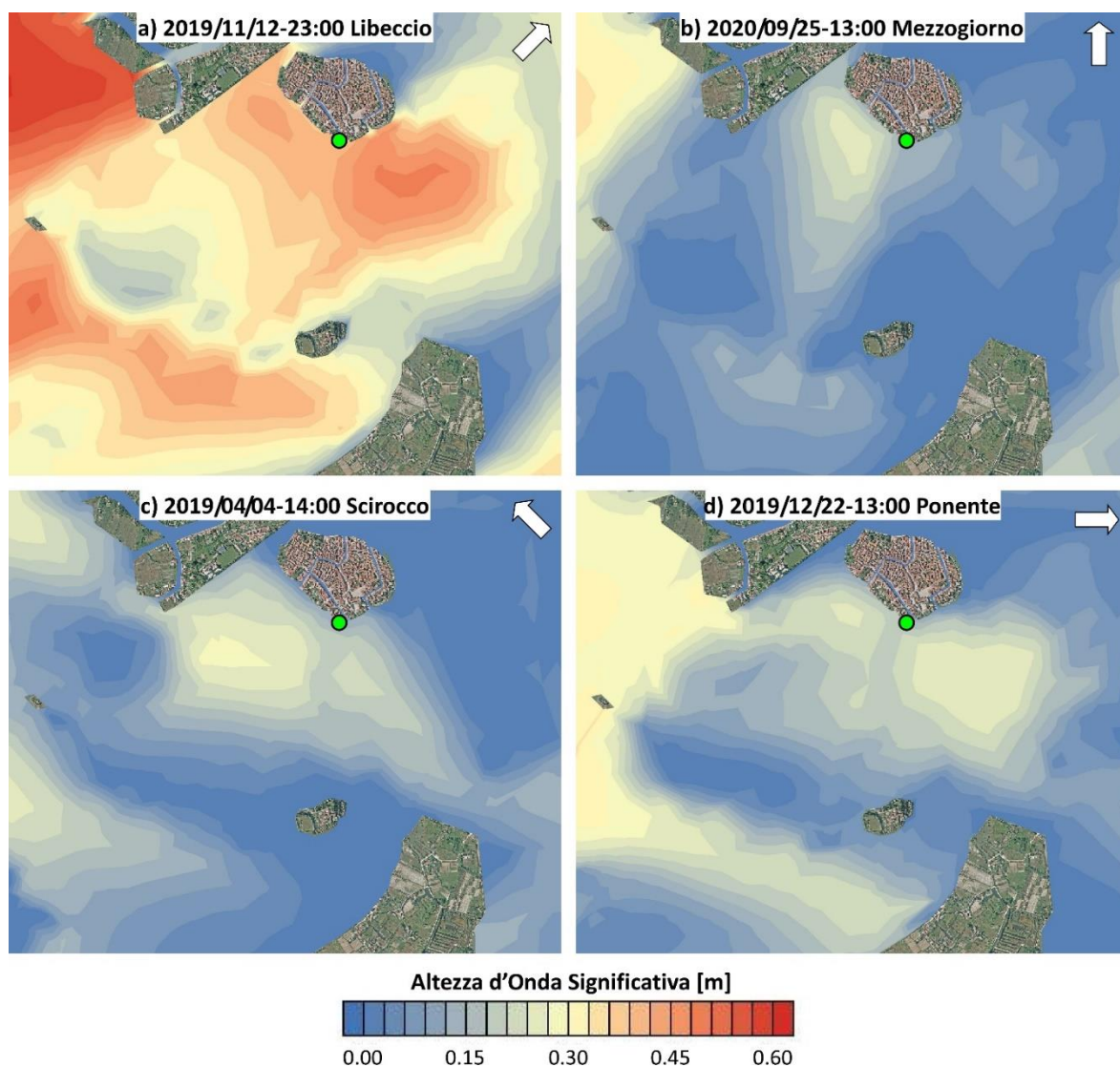


Fig. 4.2 – Mappe del campo di moto ondoso determinato dal modello WWTM in occasione dei 4 eventi evidenziati in Tab. 4.1. Ciascun evento rappresenta la situazione in cui, nei 3 anni analizzati, si è verificata la massima altezza d'onda significativa in prossimità della darsena oggetto di studio con vento rispettivamente di a) Libeccio, b) Mezzogiorno, c) Scirocco e d) Ponente. La posizione della darsena corrisponde al pallino verde. In ciascun pannello, la freccia in alto a destra indica la direzione del vento e dunque dell'onda.

## 5 Onde generate da natanti

I canali navigabili che afferiscono alla darsena (Canale Esterno Est, Canale Esterno Sud Ovest e Canale di Raccordo) hanno profondità variabili dai 2.5÷3.5 m e larghezza media pari a circa 30 m. Questi tratti di canale, pur non rappresentando vie di navigazione primarie nella laguna, risultano spesso interessati dal transito continuo di imbarcazioni. Per essi, il limite di velocità è fissato in 7 Km/h, come riportato nell'ordinanza n°93 del 2007 dell'Ufficio del Magistrato alle Acque di Venezia (ora Provveditorato Interregionale OO.PP. per il Veneto, Trentino Alto Adige e Friuli Venezia Giulia) e come rappresentato in Fig. 5.1.

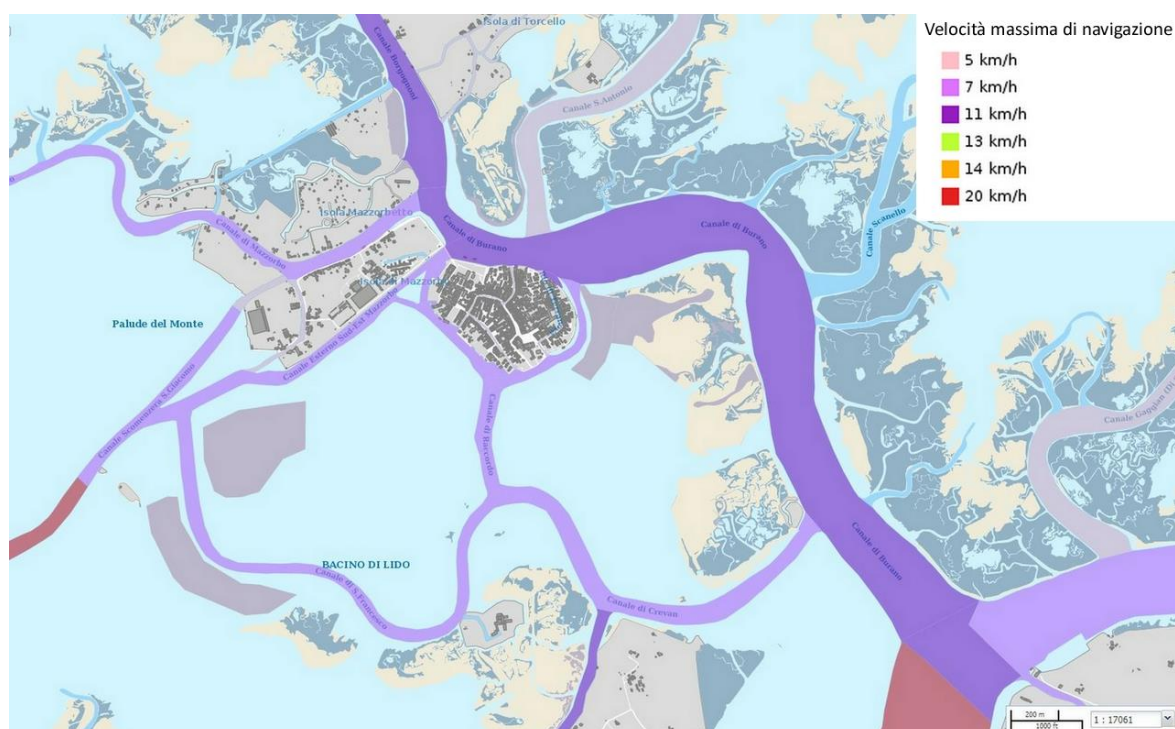


Fig. 5.1 – Limiti di velocità nei canali lagunari nell'intorno dell'area di interesse (ordinanza MAV 93/2007. Fonte: <http://www.atlantedellalaguna.it/>).

La valutazione dell'entità del moto ondoso generato dal passaggio delle imbarcazioni è stata effettuata ricorrendo a formulazioni teoriche di letteratura, che permettono di calcolare l'altezza d'onda massima generata tenendo conto della profondità dello specchio acqueo e della velocità del natante.

Il calcolo dell'onda generata è stato eseguito considerando le caratteristiche geometriche del canale. Si è ipotizzato, inoltre, che in condizioni di intenso traffico la generazione possa essere considerata continua. Per la formulazione teorica si è fatto riferimento a quanto riportato nello studio "Prove sperimentali di onde generate da natanti: elaborazione ed estensione a canali ristretti" (L. D'Alpaos e G. Liberatore, febbraio 1993), che si basa a sua volta sulla formulazione originaria di Havelock (1908).

Secondo quanto riportato nello studio suddetto, il sistema di onde generate dal passaggio di un'imbarcazione può essere genericamente rappresentato dallo schema di Fig. 4.7. Tali onde sono prodotte dall'interferenza tra un sistema di onde trasversali e di onde divergenti (secondarie), generate dalla distribuzione dinamica delle pressioni sullo scafo dell'imbarcazione. Come si può notare dallo schema grafico, il sistema di onde risultante è caratterizzato da una zona di interferenza (interference peaks, o ship waves) in cui l'altezza d'onda risulta essere massima; tale "fronte d'onda" si muove lungo una direzione di propagazione che risulta inclinato di  $35.3^\circ$  rispetto alla rotta di navigazione.

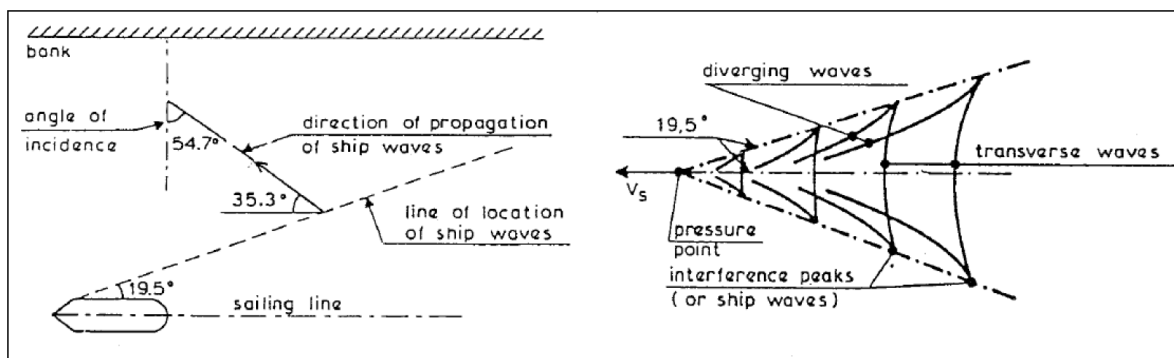


Fig. 5.2 – Caratteristiche del sistema di onde generate da natanti

Le espressioni che si ottengono dalla suddetta trattazione teorica sono le seguenti:

$$H = h \alpha_1 \left(\frac{s}{h}\right)^{-0.33} Fr^{\alpha_2} \quad \text{con} \quad Fr = \frac{V_s}{\sqrt{gh}}$$

In cui:

- $H$  : altezza d'onda generata dal natante (m);
- $h$  : profondità locale (m);
- $s$  : distanza della linea di navigazione dal punto di interesse (m);
- $V_s$  : velocità dell'imbarcazione (m/s);
- $g$  : accelerazione di gravità ( $m/s^2$ );
- $Fr$  : numero di Froude;
- $\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti di derivazione sperimentale, funzione del tipo di imbarcazione

La lunghezza ( $L$ ) e il periodo ( $T$ ) dell'onda possono essere determinati sulla base della teoria delle onde di piccola ampiezza in acque profonde:

$$L = 2\pi \cos^2(35.3) V_s^2 / g \quad T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}}$$

Le precedenti espressioni, che sono le medesime indicate anche dal "Permanent International Association of Navigation Congress" (PIANC) in "Guidelines for the Design and Construction of Flexible Revetments Incorporating Geotextiles for Inland Waterways" (1987), sono da ritenere valide purché il numero di Froude sia ampiamente inferiore ad 1 (per valori superiori lo scafo risulta "planante" e, a parità di velocità, produce onde di ampiezza molto inferiore ad uno scafo non planante; consigliato  $Fr < 0.7$ ) e in condizioni di assenza di frangimento ( $H/h < 0.6$ ).

I coefficienti sperimentali da impiegare nella formulazione teorica sono stati assunti pari ai valori consigliati nel menzionato studio “Prove sperimentali di onde generate da natanti: elaborazione ed estensione a canali ristretti” (a cura di L. D’Alpaos e G. Liberatore, 1993). Lo studio, effettuato su incarico del Comune di Venezia, riporta l’elaborazione delle registrazioni di moto ondoso generato da 25 natanti rappresentativi della flotta circolante nei canali di Venezia e della laguna. Nello studio viene inoltre riportato un confronto tra valori registrati e i valori ottenuti dalle formulazioni teoriche disponibili in letteratura. Per natanti a motore lo studio consiglia di assumere i seguenti valori:  $\alpha_1 = 0.35$  e  $\alpha_2 = 4$ .

Sulla base delle formule suddette, considerando una profondità di 2.5 m e una distanza dalla linea di navigazione pari a 5 m, e ipotizzando una velocità di transito dei natanti pari a 10 km/h, si ottiene un’altezza d’onda inferiore a 10 cm.

Ovviamente, data la natura della formula in cui il termine che dipende dalla velocità del natante ( $Fr$ ) è conteggiato con un esponente  $\alpha_2 = 4$ , l’altezza dell’onda prodotta è principalmente determinata dalla velocità stessa, e cresce rapidamente al crescere di quest’ultima.

La seguente Tab. 5.1 riporta le altezze d’onda che si ottengono per diversi valori della profondità del canale e per diversi valori della velocità del natante. Si osserva che, nel caso in cui il natante stesso rispetti il limite di velocità consentito, pari a 7 km/h, l’altezza d’onda che esso genera è assolutamente trascurabile.

Viceversa, se si verifica il passaggio di un’imbarcazione a velocità doppia (14 km/h), le onde che essa può determinare a ridosso dei pontili sono di altezza relativamente modesta ma non trascurabile (21÷26 cm).

La tabella riporta anche il caso in cui, su fondali di 3.5 m, il natante navighi a velocità molto elevata (20 km/h). In questo caso l’altezza d’onda che si ottiene è pari a 88 cm. Pur precisando che tali condizioni, in cui il numero di Froude è vicino all’unità, si pongono al di fuori del campo di applicazione delle formule stesse perché rappresentano una situazione in cui lo scafo entra in planata, si sottolinea il fatto che il risultato ottenuto non sembra inverosimile, con riferimento a situazioni che a volte si verificano in laguna di Venezia al passaggio di imbarcazioni ad uso sia pubblico che privato.

prof (m)	s (m)	Vs (km/h)	Fr	H (m)	L (m)	T (s)
2.5	5.0	7.0	0.39	<b>0.02</b>	1.6	1.0
2.5	5.0	14.0	0.79	<b>0.26</b>	6.5	2.0
3.0	5.0	7.0	0.36	<b>0.01</b>	1.6	1.0
3.0	5.0	14.0	0.72	<b>0.23</b>	6.5	2.0
3.5	5.0	7.0	0.33	<b>0.01</b>	1.6	1.0
3.5	5.0	14.0	0.66	<b>0.21</b>	6.5	2.0
3.5	5.0	20.0	0.95	<b>0.88</b>	13.2	2.9

Tab. 5.1 – Altezze del moto ondoso generate da natanti secondo le formule sopra riportate assumendo:  $\alpha_1 = 0.35$  e  $\alpha_2 = 4$  (L. D’Alpaos e G. Liberatore, 1993).

In definitiva l'analisi effettuata porta a concludere che, nel caso in cui le imbarcazioni in transito rispettino il locale limite di velocità, il moto ondoso che esse inducono è di entità molto limitata e poco significativo ai fini del dimensionamento delle opere.

Nel caso in cui, invece, la velocità di navigazione sia superiore a detto limite, le onde secondarie generate dai natanti possono essere di altezza molto elevata e possono indurre azioni molto rilevanti sui pontili e sugli ormeggi, soprattutto in ragione della minima distanza che intercorre tra la rotta dei natanti e i la darsena.



## 6 Bibliografia

D'Alpaos, L., Defina, A., 2007. *Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: a review of open issues and applications to the Venice lagoon*. *Computers and Geosciences* 33, 476-496. doi:10.1016/j.cageo.2006.07.009

Defina, A., 2000. *Two-dimensional shallow water equations for partially dry areas*. *Water Resources Research* 36, 11, 3251-3264

Carniello, L., A. Defina, S. Fagherazzi and L. D'Alpaos (2005). *A combined wind wave-tidal model for the Venice lagoon, Italy*. *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*, 110, F04007, doi:10.1029/2004JF000232.

Carniello, L., D'Alpaos, A., Defina, A., 2011. *Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 92, 2, 263-276. doi:10.1016/j.ecss.2011.01.001

Carniello, L., A. D'Alpaos, G. Botter, and A. Rinaldo (2016), *Statistical characterization of spatio-temporal sediment dynamics in the Venice lagoon*, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 121 (5), 1049-1064, doi:10.1002/2015JF003793

D'Alpaos, A., L. Carniello, and A. Rinaldo, (2013). *Statistical mechanics of wind wave-induced erosion in shallow tidal basins: Inferences from the Venice Lagoon*. *Geophysical Research Letters*, 40, doi:10.1002/grl.50666