



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**

hic sunt futura

**DIPARTIMENTO POLITECNICO
DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**
Laboratorio di Idraulica



**STUDIO IDRAULICO SUGLI EFFETTI INDOTTI DAL DEFLUSSO DI UNA
PORTATA DI 2400 MC/S NEL TRATTO DI FIUME TAGLIAMENTO COM-
PRESO TRA CESAROLO E LA FOCE**



Responsabile scientifico:

PROF. ING. MARCO PETTI

Collaboratori:

**PROF. AGGR. SILVIA BOSA
DOTT. ING. SARA PASCOLO**

RELAZIONE TECNICA

DPIA

<https://dpi.uniud.it>

Via delle Scienze 206, 33100 UD – tel. 0432 558712 – email: marco.petti@uniud.it

Indice

1	Premessa	4
2	Il fiume Tagliamento	5
2.1	Portate di piena	5
2.1.1	Piena di progetto PAI 1997	12
2.1.2	Piena di progetto PGRA 2021	15
2.2	Maree in foce	16
3	Tratto Cesarolo-foce: insediamenti in golena	20
4	Scelta del modello idraulico	24
4.1	Modello idraulico 2DH utilizzato	24
4.1.1	Modello morfodinamico	25
4.1.2	Modello spettrale	27
5	Creazione della mesh	28
5.1	Quotatura della mesh	28
5.2	Attribuzione dei coefficienti di scabrezza alle celle	33
5.3	Condizioni al contorno	33
6	Validazione del modello idraulico	35
6.1	La tempesta Vaia	35
6.1.1	Simulazione dell'evento di piena Vaia	39
6.2	Evento di piena ottobre-novembre 2023	48
6.2.1	Simulazione dell'evento di ottobre-novembre 2023	49
7	Possibili scenari futuri	58
8	Piena con portata di picco a Latisana di 4000 m³/s nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997	59
8.1	Evento di piena di progetto con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea di progetto	61
8.2	Evento di piena di progetto con il picco di piena in foce in opposizione di fase con il picco di marea di progetto	71
9	Piena con portata di picco a Latisana di 3600 m³/s nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021	78
9.1	Opere di difesa presenti in foce Tagliamento	79
9.2	Piena in assenza della scogliera in sinistra foce	80
9.3	Piena in presenza della scogliera in sinistra foce	90
9.4	Sormonti degli argini principali	95
10	Piena con portata di picco a Volta di 1500 m³/s nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021	97



11 Piena con portata di picco a Volta di $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021	100
12 Sintesi dei risultati e conclusioni	102



1 Premessa

L'aggiornamento del Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA 2021-2027) del bacino idrografico del fiume Tagliamento è stato adottato con delibera n. 3 del 21.12.2021 e approvato con DPCM 1.12.2022 (G.U. n. 31 del 7.2.2023). Gli interventi di mitigazione del rischio e di difesa previsti dal PGRA 2021-2027 sono indicati nell'allegato III-B "Proposta di nuovi interventi".

Nell'ambito della misura M3 Protezione, al punto M33_1 è stato previsto l'intervento di "Adeguamento e rinforzo sistema arginale tratto terminale del Tagliamento dall'incile del Cavrato alla foce". Riguardo agli interventi indicati nell'allegato III-B, la Conferenza Operativa in data 30.11.2023 ha espresso, all'unanimità dei presenti, parere favorevole alla modifica delle tabelle relative alla UOM ITN009 Tagliamento, inserendo nell'allegato III-B la specifica misura di "Intervento di adeguamento argine sinistro (diaframmatura e rialzo) da Cesarolo alla foce finalizzato a garantire il transito nel tratto terminale del Tagliamento di una portata di 2400 m³/s. Tale intervento è stato approvato con decreto del Segretario Generale dell'Autorità di Bacino Distrettuale n. 137 del 22.12.2023, ai sensi dell'art. 6 comma 7 delle NTA del PGRA.

In data 24 gennaio 2024, l'Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali e la Regione Friuli Venezia Giulia hanno iniziato a presentare agli *stakeholders* l'aggiornamento del PGRA 2021-2027, riferendo, tra le altre cose, sulla riduzione della portata centenaria di deflusso a Latisana da 4000 m³/s a 3600 m³/s e sulla necessità di portare da 1500 m³/s a 2400 m³/s la portata di deflusso tra il nodo dello scolmatore Cavrato e la foce del fiume Tagliamento. La motivazione principale di quest'ultimo cambiamento è stata quella di una limitazione a 1200 m³/s della portata lungo il Cavrato, in quanto sia le arginature di quest'ultimo che la laguna di Caorle, per ragioni di sicurezza, non consentirebbero di smaltire portate superiori. Da notare che il vecchio Piano stralcio di assetto idrogeologico adottato nel 1997 (PAI 1997) prevedeva che il Cavrato dovesse scolmare una portata di 2500 m³/s e che a tal fine si dovesse procedere con un adeguato rialzo e rinforzo delle sue arginature. Non solo, era prevista anche la realizzazione di opere nella laguna di Caorle che dovevano portare in sicurezza e a mare la portata scolmata. Riguardo a quest'ultimo aspetto, alla fine degli anni novanta il prof. Luigi D'Alpaos dell'Università degli Studi di Padova fu incaricato di procedere con uno studio di fattibilità delle opere più appropriate.

Nell'apprendere che l'Autorità di Bacino aveva già approvato di portare a 2400 m³/s la portata nel tratto Cesarolo-foce, le società: Lignano Pineta spa, Europa Group spa, Società Imprese Lignano spa, Parco Zoo Punta Verde srl e Tiliment Company srl (di seguito chiamate "Società"), che esercitano le proprie attività lungo il tratto terminale del fiume Tagliamento, hanno manifestato forti preoccupazioni, consapevoli che nel PAI 1997, e fino al PGRA 2015-2021 compreso, pur sottolineando le criticità idrauliche presentate dallo scolmatore Cavrato e dal tratto di fiume Tagliamento che va dal nodo da Cesarolo alla foce, la portata massima di deflusso nel tratto terminale del Tagliamento era stata fissata in 1500 m³/s, mentre la portata massima scolmabile dal Cavrato era stata fissata in 2500 m³/s. Per altro, nelle condizioni attuali, la calibratura della soglia dell'incile dello scolmatore Cavrato suddivide più o meno in queste proporzioni le due portate.

L'incremento del 60% della portata massima di deflusso prevista dalla modifica del PGRA 2021-2027 nel tratto terminale del fiume Tagliamento ha preoccupato le Società a tal punto che queste hanno deciso di chiedere al Laboratorio di Idraulica del Dipartimento

Politecnico di Ingegneria e Architettura dell'Università degli Studi di Udine uno studio idraulico sugli effetti indotti dal deflusso di una portata di $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ nel tratto di fiume Tagliamento compreso tra Cesarolo e la foce.

La richiesta delle Società si è concretizzata con il contratto di ricerca dal titolo "Studio idraulico sugli effetti indotti dal deflusso di una portata di $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ nel tratto di fiume Tagliamento compreso tra Cesarolo e la foce", sottoscritto tra le Società e il Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura dell'Università degli Studi di Udine in data 18 giugno 2024.

Di seguito si riferisce sui risultati ottenuti con lo studio.

2 Il fiume Tagliamento

Il fiume Tagliamento, corso d'acqua più importante della Regione Friuli Venezia Giulia, nasce nei pressi del Passo della Mauria a quota 1195 m s.l.m. , tra le provincie di Udine e Pordenone, e sfocia nel mare Adriatico tra le località Lignano Sabbiadoro (UD) e Bibione (VE). Le sue principali caratteristiche idrauliche sono:

- superficie del bacino montano circa 2433 km^2 , di cui: 1870 km^2 fino alla confluenza con il Fella e altri 563 km^2 fino alla confluenza con il torrente Cosa;
- lunghezza complessiva dell'asta fluviale circa 178 km ;
- pendenza media dell'alveo 6.7‰ ;
- dislivello tra la sorgente e la foce 1195 m ;
- pendenza media dell'alveo da Latisana alla foce 0.1‰ ;
- portata media annua $70\text{--}90 \text{ m}^3/\text{s}$;
- tempo di corrivazione del bacino montano riferito alla sezione di chiusura di Pinzano $t_c \simeq 20 \text{ ore}$, stimato con la formula di Giandotti.

La piovosità, piuttosto elevata nel bacino, può generare piene caratterizzate da alcune centinaia di milioni di metri cubi d'acqua, piene che si muovono da Venzone a Latisana in un tempo medio di circa 12 ore .

2.1 Portate di piena

Il Laboratorio di Idraulica UniUd in passato si era già occupato del fiume Tagliamento, con uno studio, svolto per conto della Regione Friuli Venezia Giulia (RFVG) (Petti 2007), all'interno del quale era stato preso in considerazione anche il deflusso delle portate di piena tra Venzone e la foce del Tagliamento. Già allora, il Laboratorio di Idraulica era pervenuto ad una serie di risultati piuttosto interessanti, alcuni dei quali, aggiornati al 2023, risultano ancora molto utili.

Il primo risultato riguarda la frequenza relativa delle durate delle piene misurate a Venzone nel periodo di osservazione 1886-2023. Ricordando che il livello di guardia per l'idrometro di Venzone è pari a 1.90 m , cui corrisponde una portata di $360 \text{ m}^3/\text{s}$, definiamo qui "durata della piena" la distanza temporale tra il primo attraversamento della soglia di guardia con gradiente di livello, o portata, positivo e il successivo attraversamento con gradiente negativo. Una simile definizione consente di tenere conto di tutti gli eventi

passati, soprattutto di quelli in cui si procedeva alla registrazione delle piene tutte le volte che queste superavano il livello di guardia.

Analizzando le durate delle piene massime annuali così definite si perviene alla distribuzione in frequenza riportata in Figura 1. Come si può vedere, la durata media più frequente, chiamata anche moda, è quella di 15 ore; esistono comunque casi di durate di 90 ore ed eccezionalmente di 130 e 160 ore.

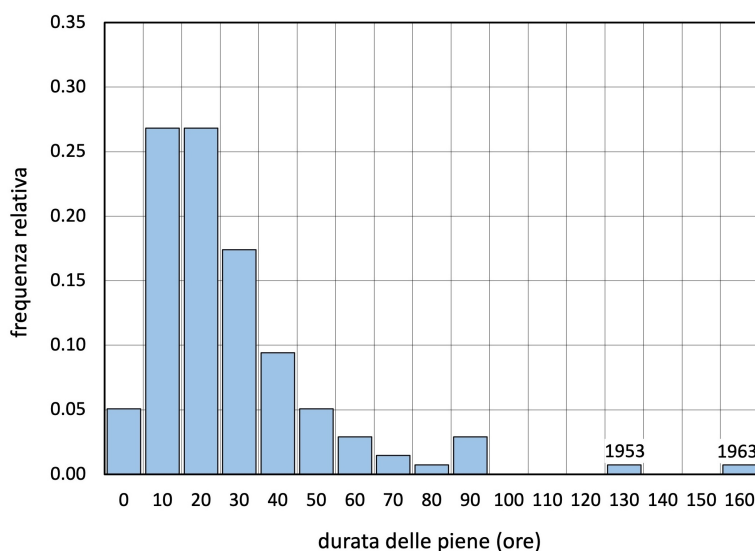


Figura 1. Frequenza relativa delle durate delle piene a Venzone (periodo di osservazione 1886-2023; Petti 2007 aggiornato al 2023).

Il secondo risultato utile è quello dei tempi di traslazione del colmo di piena da Venzone a Latisana (Figura 2). Come si può osservare, il tempo di traslazione più frequente è quello di 12 ore, in un intervallo compreso tra le 7 e le 19 ore. Eccezionalmente esistono casi di 23 ore. E' importante tenere presente che il tempo di traslazione del picco di piena da Latisana a Volta è di circa 2 ore, mentre quello da Volta alla foce si può stimare essere di circa 3 ore. Ne consegue che il tempo di traslazione da Venzone alla foce risulta compreso tra le 12 e le 24 ore. Questo risultato è molto importante, soprattutto in un'ottica di tempi di preavviso inerenti l'arrivo del colmo dell'onda di piena in foce.

Come già evidenziato anche nello studio del Laboratorio di Idraulica del 2007 (Petti 2007), la variabilità dei tempi di traslazione dipende da diversi fattori e forse il più importante è quello delle aree golenali. Infatti, via via che queste vengono interessate dalla piena, il deflusso subisce un ritardo a causa delle resistenze via via maggiori dovute alla presenza della vegetazione in golenale. Aggiungiamo a tutto ciò anche la capacità di laminazione offerta dalle aree golenali, la cui funzione è proprio quella di abbattere e ritardare il picco di piena. Un secondo fattore, non meno importante, che incide sui tempi di traslazione è quello del tirante d'acqua presente in alveo prima della piena.

Nello studio condotto da Petti nel 2007 fu fatta anche un'analisi della correlazione tra le portate di picco massime annuali transitate da Venzone e le loro durate nel periodo 1886-2001. Aggiornando i dati al 2023, emerge che la durata media dei massimi eventi di piena annuali a Venzone dal 1886 al 2023, è di circa 28 ore e che le piene che hanno una durata più lunga non sono necessariamente quelle più gravose. La media delle durate delle piene più alte, cioè $\geq 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ a Venzone, risulta di circa 37 ore (Figura 3). Un altro

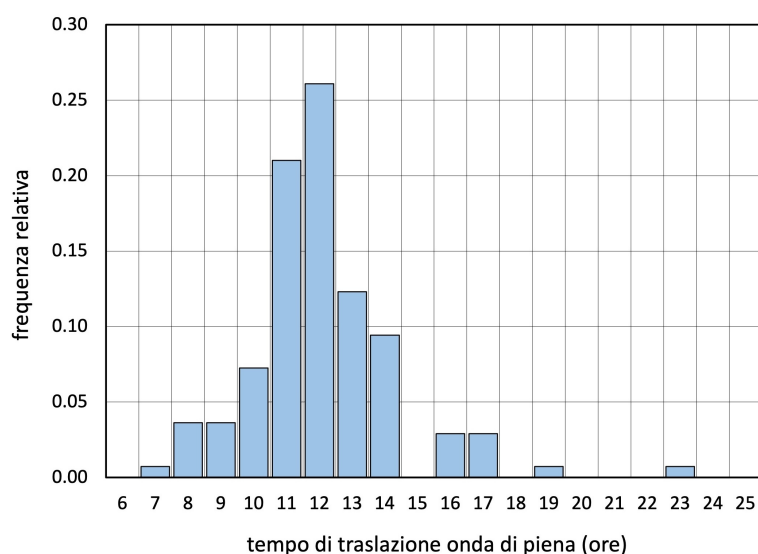


Figura 2. Frequenza relativa dei tempi di traslazione dei picchi delle onde di piena da Venzone a Latisana (periodo di osservazione 1886-2023; Petti 2007 aggiornato al 2023).

aspetto osservato è che gli eventi più lunghi sono spesso caratterizzati da un idrogramma con due o più massimi relativi separati da ore di stanca.

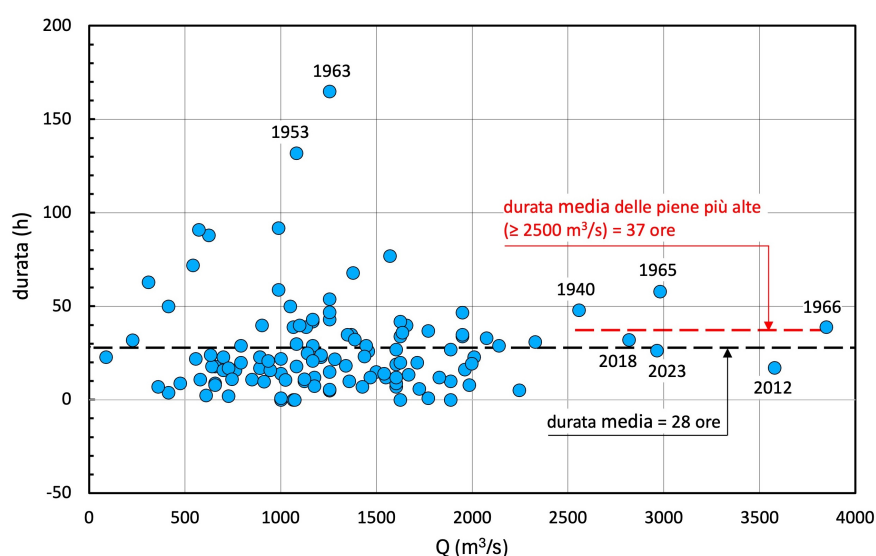


Figura 3. Correlazione tra le portate di picco delle massime piene annuali rilevate a Venzone e le loro durate (periodo di osservazione 1886-2023; Petti 2007 aggiornato al 2023).

Quando si considera un'onda di piena si è soliti pensare ad una singolo evento, in realtà spesso le piene si presentano come un treno d'onde con più picchi. Sempre nello studio del Laboratorio di Idraulica UniUd (Petti 2007), relativamente al periodo 1980-2005 è stata osservata la frequenza delle successioni dei picchi riportata in Figura 4.

In particolare, su tutti gli eventi che presentavano almeno un picco di piena (100%), il 28% era costituito da due picchi, il 9% da tre ed il 7% almeno da quattro. Analizzando i dati relativi al periodo 2000-2005, è stato riscontrato che queste percentuali aumentano e salgono al 43% per i picchi doppi, al 36% per quelli tripli ed al 28% per gli eventi con almeno quattro picchi consecutivi.

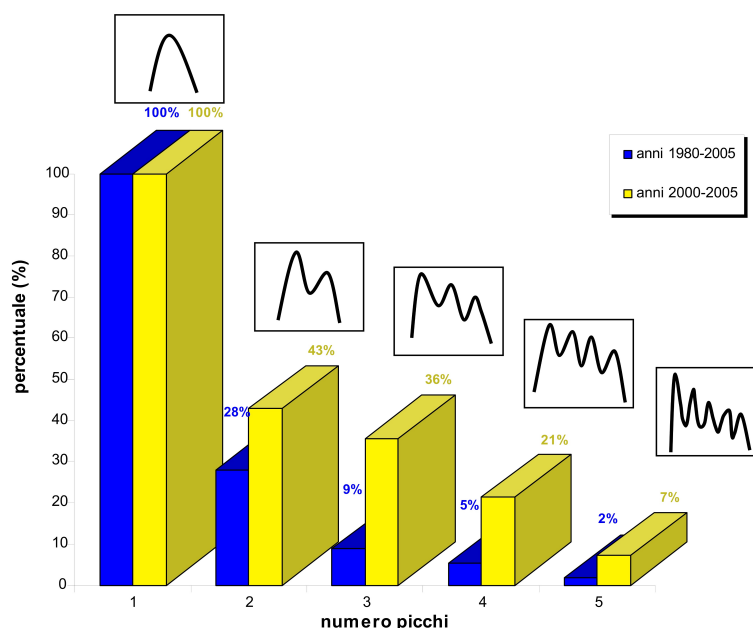


Figura 4. Frequenza di eventi di piena a picco multiplo (periodo di osservazione 1980-2005; Petti 2007).

Relativamente ai tempi di traslazione delle onde di piena, è interessante aggiungere anche un altro dato. Con riferimento al tempo di traslazione più frequente tra Venzone e Latisana (Figura 2), cioè 12 ore, si stima che i tempi medi di traslazione delle onde di piena tra Venzone ed alcune sezioni lungo il fiume Tagliamento (Figura 5) siano quelli riportati in Tabella 1.

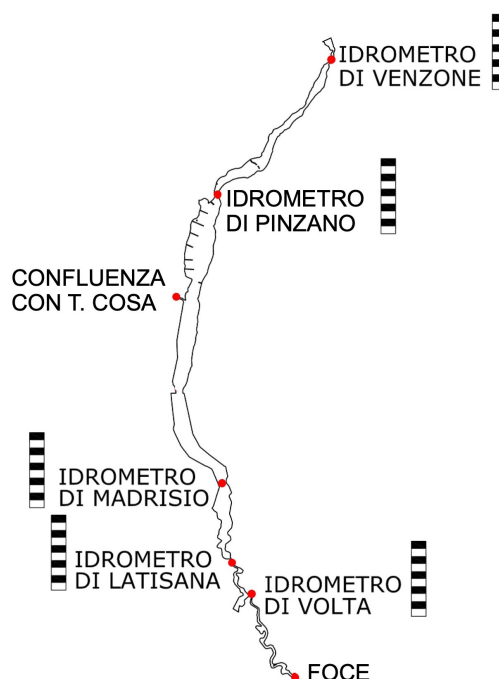


Figura 5. Disposizione di alcuni idrometri storici e punti notevoli lungo il fiume Tagliamento da Venzone alla foce.

Terminata questa breve sintesi di alcuni risultati, aggiornati ad oggi, relativi ad un precedente studio del Laboratorio di Idraulica UniUd (Petti 2007), proseguiamo con un'a-

Tabella 1. Tempi medi stimati di traslazione dell'onda di piena da Venzone fino alla foce del fiume Tagliamento.

da:	Venzone	Venzone	Venzone	Venzone	Venzone	Venzone
a:	Pinzano	Cosa	Madrizio	Latisana	Volta	foce
ore	3	4.5	7	12	14	17

analisi statistica delle massime piene annuali. Per fare questo, procediamo prima di tutto con un'analisi, aggiornata al 2023, degli eventi estremi delle altezze idrometriche massime annuali h_v misurate dall'idrometro di Venzone nel periodo **1886-2023**, per complessivi **138 anni** (Figura 6).

Ciò che emerge osservando Figura 6 è un trend, quasi impercettibile, d'incremento delle altezze dei picchi delle piene massime annuali, pari a circa **1 mm/anno**. Questo risultato evidenzia come il bacino del Tagliamento, in termini di portata massima annuale, risenta poco delle variazioni climatiche e questo si può attribuire alla sua grande inerzia, confermata anche dall'entità del tempo di corrivazione. Si osservi che, dal punto di vista della teoria dei sistemi, il tempo di corrivazione è strettamente legato a quella che viene definita *risposta del bacino* ad una sollecitazione piovosa. Al contrario, invece, le variazioni climatiche sembrano influenzare le frequenze degli eventi di piena più alti, ma questo non incide sugli obiettivi di questo studio.

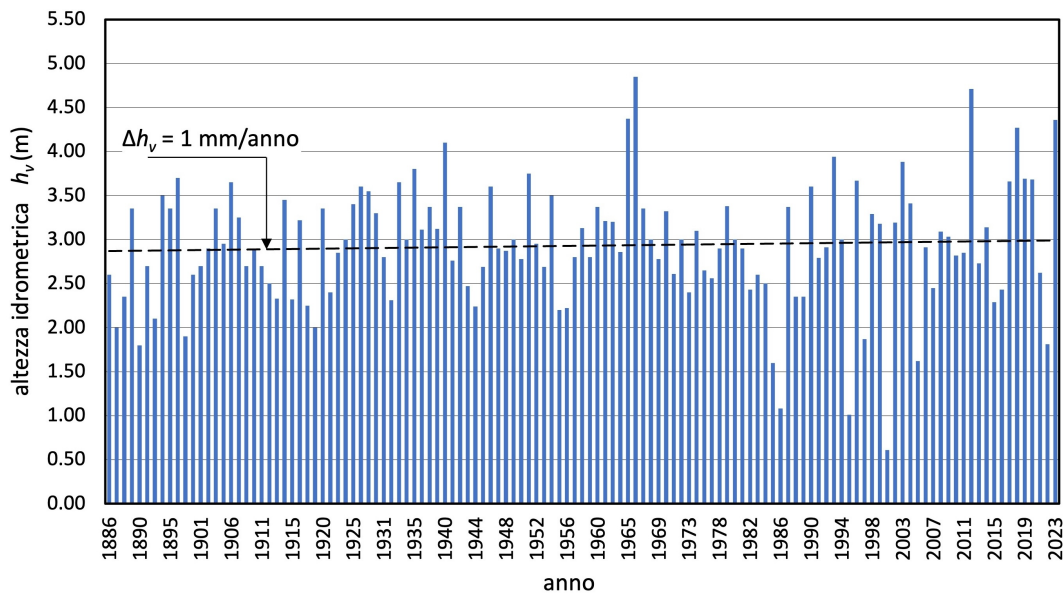


Figura 6. Altezze idrometriche massime annuali misurate a Venzone nel periodo 1886-2023.

Le altezze idrometriche massime annuali h_v , rilevate a Venzone, sono state elaborate statisticamente utilizzando la distribuzione asintotica di Gumbel

$$P(h) = \exp \left\{ -\exp \left[-\frac{h_v - \epsilon}{\theta} \right] \right\}, \quad (1)$$

dove ϵ è detto parametro di locazione e θ parametro di scala. Per la stima dei parametri ϵ e θ è stato utilizzato il metodo dei momenti che, a differenza del metodo dei minimi quadrati, non risulta condizionato da problemi statistici di *plotting position*.

Per stimare le portate massime annuali è stata utilizzata la scala di deflusso di Pioverno proposta da Machne e Maione (1982)

$$\begin{aligned} Q &= 82.54 h_p^{2.6177} & \text{per} & & Q \leq 1000 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q &= 182.03 h_p^{1.789} & \text{per} & & Q > 1000 \text{ m}^3/\text{s}, \end{aligned} \quad (2)$$

ritenuta ancora molto efficiente. Nelle relazioni (2) h_p è l'altezza idrometrica misurata a Pioverno, legata all'altezza idrometrica h_v misurata a Venzone tramite la relazione sperimentale, sempre suggerita da Machne e Maione (1982)

$$h_p = 0.2889 + 0.5759 h_v + 0.10297 h_v^2. \quad (3)$$

In Figura 7 è riportata, in forma grafica, la scala di deflusso di Machne e Maione riferita alla sezione di Venzone. Per completezza d'informazione, in Figura 8 viene riportata la collocazione geografica delle sezioni di Venzone e Pioverno.

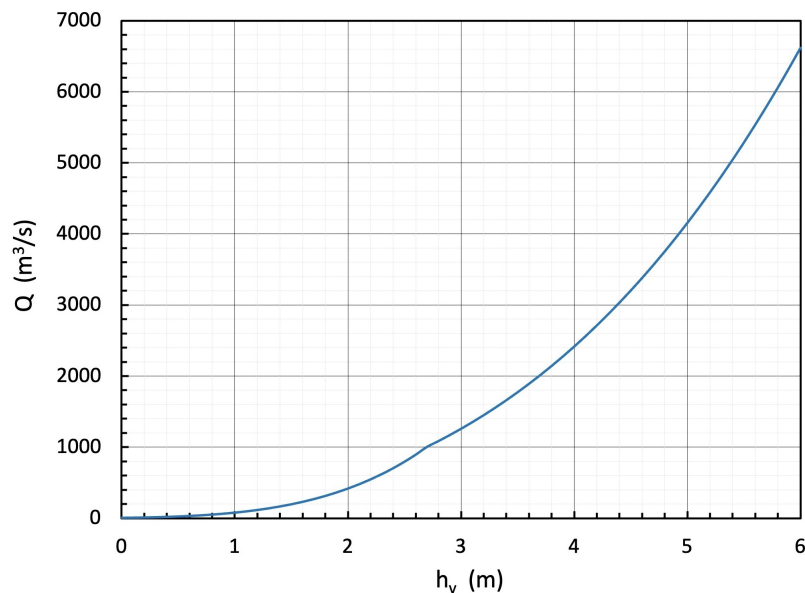


Figura 7. Scala di deflusso di Machne e Maione (2) riferita alle altezze idrometriche di Venzone.

Si osservi che la correlazione parabolica (3) tiene intrinsecamente conto dell'apporto d'acqua dovuto al torrente Venzonassa (Figura 8).

Vale la pena osservare che la doppia scala trovata da Machne e Maione (eq.2) è coerente con la realtà e non sarebbe concettualmente corretto rappresentare tutto il fenomeno con un'unica scala, valevole solo quando la scabrezza di un alveo è unica e costante. Infatti, fino a che il livello idrometrico interessa solo l'alveo di magra la scabrezza è dovuta prevalentemente alla granulometria dei sedimenti, quando invece il livello sale e vengono interessate le forme di fondo e le golene, la scabrezza aumenta. Ne consegue che, volendo utilizzare una scabrezza equivalente della sezione complessiva, nella realtà dovremmo farla dipendere dal livello idrometrico e quindi non sarebbe più costante.

In Tabella 2 sono riportate le altezze idrometriche massime annuali h_v misurate a Venzone, le relative portate massime annuali Q_v , le portate massime annuali Q_p stimate a Pinzano e le portate massime stimate a valle del torrente Cosa Q_c , in funzione di vari

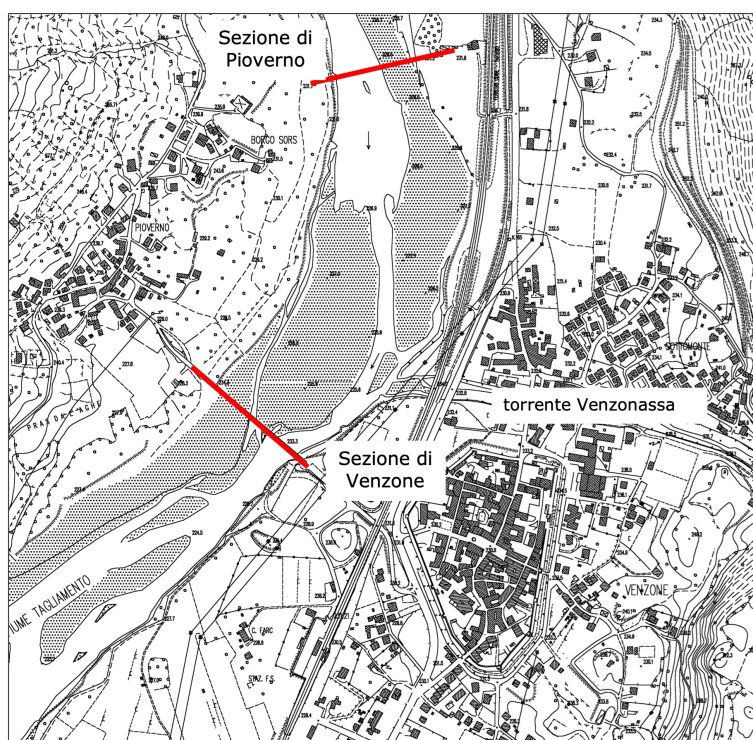


Figura 8. Localizzazione della sezione di Venzone, dove vengono misurati i livelli idrometrici, e della sezione di Pioverno, dove normalmente, almeno in un passato recente, venivano misurate le portate (Petti 2007).

periodi di ritorno T . Le portate a Pinzano e nella sezione a valle del torrente Cosa (Figura 9), sono state stimate ipotizzando una similitudine idrologica tra i bacini del torrente Arzino, del torrente Cosa e del bacino del Tagliamento a monte di Venzone. In una simile ipotesi, rapportando la superficie del bacino del torrente Arzino a quella del Tagliamento a monte di Venzone, si trova che l'incremento delle portate a Pinzano rispetto a quelle di Venzone deve essere di circa il 5%. Questo risultato coincide con la percentuale d'incremento suggerita anche da Machne and Maione (1982).

Allo stesso modo, rapportando la superficie del bacino del torrente Cosa, praticamente uguale a quella dell'Arzino, alla superficie del Tagliamento a monte di Venzone, si trova che l'apporto alle portate dovute al bacino del Cosa rispetto a quelle di Venzone sono ancora di circa il 5%.

In sintesi si ha che: $Q_p = 1.05 Q_v$ e $Q_c = 1.1 Q_v$.

Tabella 2. Altezze idrometriche massime annuali h_v riferite a Venzone e portate massime annuali stimate a Venzone (Q_v), Pinzano (Q_p) e nella sezione a valle del Cosa (Q_c) per vari periodi di ritorno T .

T	(anni)	2	5	10	20	30	50	100	140	200	300
h_v	(m)	2.86	3.42	3.79	4.15	4.35	4.61	4.95	5.12	5.30	5.50
Q_v	(m ³ /s)	1134	1681	2130	2631	2954	3395	4059	4410	4805	5283
Q_p	(m ³ /s)	1190	1766	2236	2763	3102	3564	4262	4630	5046	5547
Q_c	(m ³ /s)	1247	1849	2343	2894	3249	3735	4465	4851	5286	5811

In Figura 10 è riportata, su carta probabilistica, la distribuzione di Gumbel (eq.1)

stimata con il metodo dei momenti.

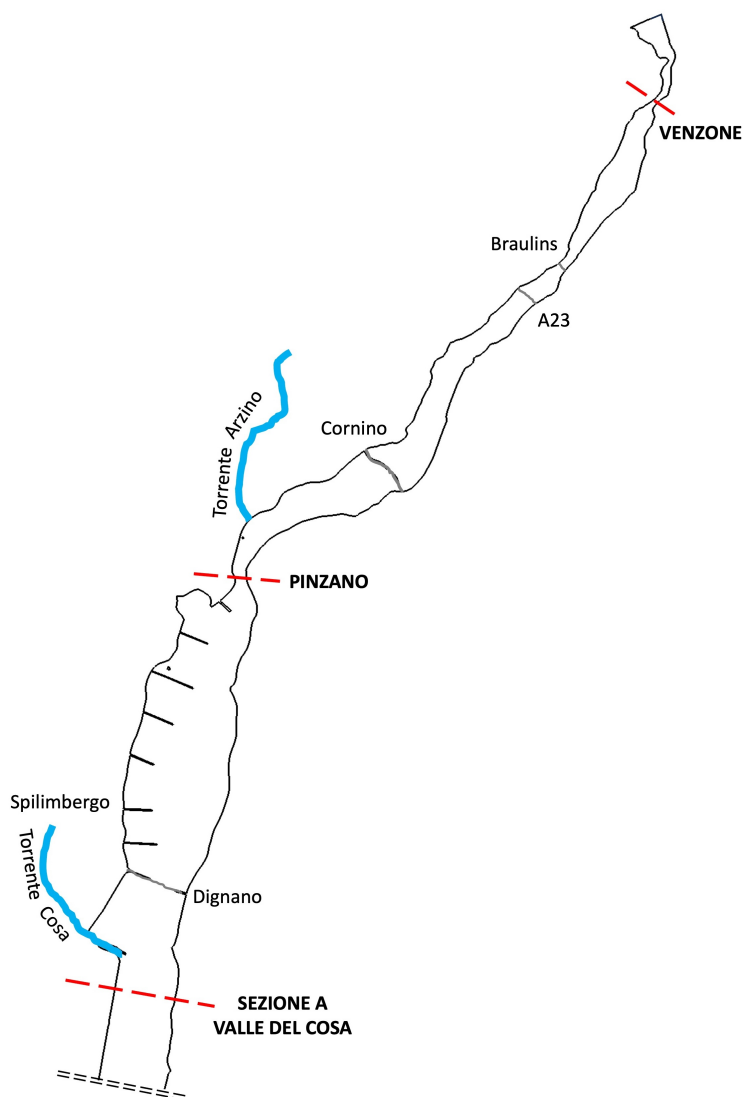


Figura 9. Localizzazione schematica delle sezioni di Venzone e Pinzano e della sezione a valle del torrente Cosa.

Per una lettura più agevole, in Figura 11 è riportato l'andamento delle portate massime annuali Q , stimate con la distribuzione di Gumbel e con la scala di deflusso di Machne e Maione (eq.2), in funzione del periodo (o tempo) di ritorno T . In Figura 12, invece, è riportato un dettaglio di tali portate massime annuali Q in funzione di un periodo di ritorno più contenuto.

2.1.1 Piena di progetto PAI 1997

La piena di progetto del fiume Tagliamento generalmente è riferita alla sezione di chiusura del bacino montano, ovvero alla stretta di Pinzano. Una delle prime piene di progetto del fiume Tagliamento è stata definita nel piano stralcio del PAI 1997; è importante osservare che la stessa non è stata individuata attraverso un'analisi statistica degli eventi estremi, bensì incrementando del 20% l'idrogramma di piena stimato a Venzone durante l'evento

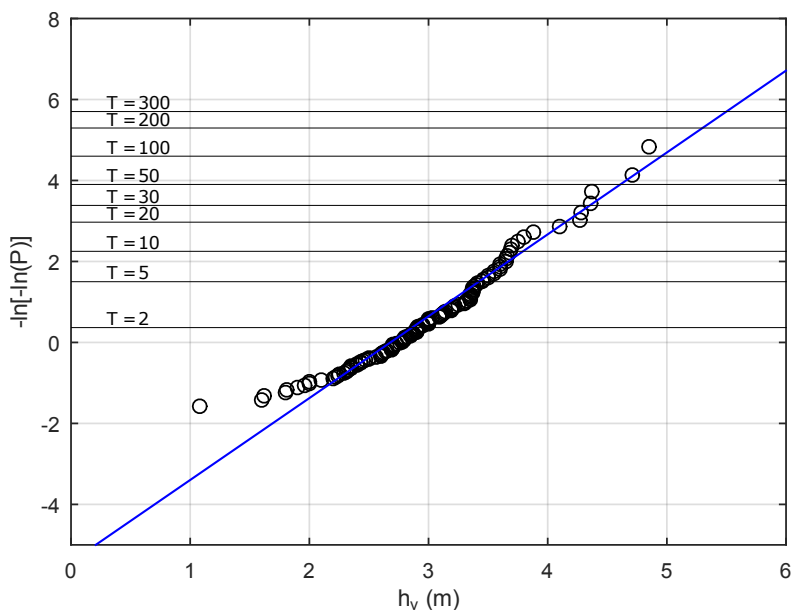


Figura 10. Distribuzione di Gumbel delle altezze idrometriche massime annuali h_v rilevate dall'idrometro di Venzone nel periodo 1886-2023. P è la probabilità cumulata stimata, i marker circolari rappresentano i dati rilevati, mentre la retta rappresenta la distribuzione cumulata di Gumbel stimata con il metodo dei momenti. T è il periodo (o tempo) di ritorno.

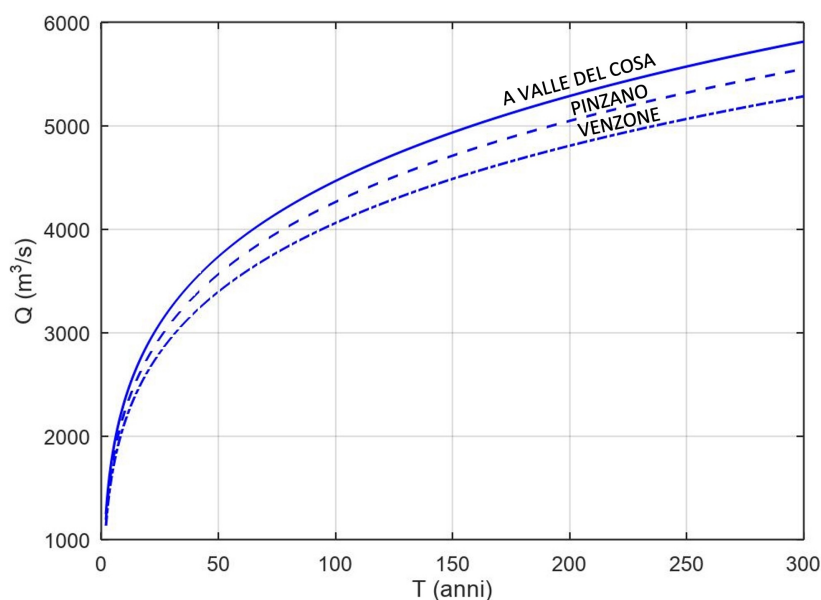


Figura 11. Portate massime annuali Q a Venzone (linea tratto-punto), Pinzano (linea tratteggiata) e a valle del torrente Cosa (linea continua) stimate con la distribuzione di Gumbel (eq.1) e con la scala di deflusso di Machne e Maione (eq.2), in funzione del periodo (o tempo) di ritorno T .

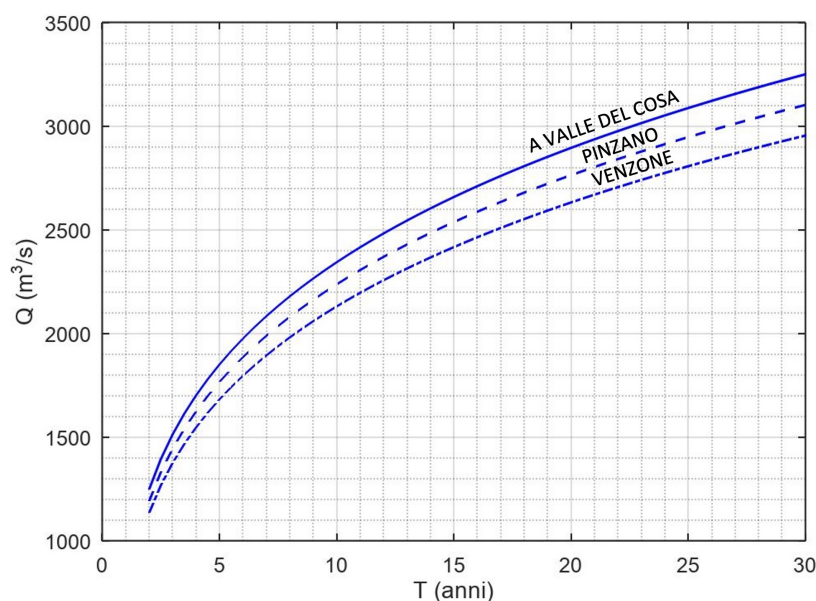


Figura 12. Dettaglio delle portate massime annuali Q a Venzone (linea tratto-punto), Pinzano (linea tratteggiata) e a valle del Cosa (linea continua), stimate con la distribuzione di Gumbel (eq.1) e con la scala di deflusso di Machne e Maione (eq.2), in funzione del tempo di ritorno T .

del 4 novembre 1966. L'entità del 20% è stata motivata genericamente dall'allora Autorità di Bacino affermando che in tal modo si sarebbe tenuto conto dell'ulteriore contributo alla piena dovuto al bacino residuo compreso tra Venzone e Pinzano (bacino del torrente Arzino) e per una non meglio precisata tendenza alla crescita delle piogge sul bacino. In particolare, partendo dai livelli idrometrici registrati a Venzone nel 1966, utilizzando la scala di Machne e Maione è stato dapprima ricavato l'idrogramma di piena a Venzone e poi, incrementandolo del 20%, è stato ricavato l'idrogramma di piena a Pinzano (Figura 13). Per regolarizzare il tutto, in numerosi studi (tra cui Petti 2007) è stato fatto riferimento ad una modellazione afflussi-deflussi alla Clark proposta da Machne and Maione (1982) (Figura 13), assumendo una durata delle piogge pari a 24 ore. Poiché il livello massimo registrato a Venzone nel 1966 era di 4.85 m, utilizzando la scala di deflusso proposta da Machne e Maione (1982), incrementando del 20% la portata si trova che il picco della piena di progetto (eq.2) risulta **4618 m^3/s** .

Molto spesso, la piena di progetto così definita viene chiamata piena centenaria. È utile sapere, tuttavia, che anche considerando gli apporti dovuti ai bacini del torrente Arzino e del torrente Cosa (che si trova a valle della stretta di Pinzano), il picco della piena centenaria a valle del torrente Cosa risulta **4465 m^3/s** (Tabella 12), mentre alla portata di picco di **4618 m^3/s** , a rigore, corrisponderebbe un periodo di ritorno T di **115 anni**.

Osservando Figura 13, si vede come il picco di piena si verifichi dopo circa **22 ore** dal superamento del livello di guardia (1.9 m), tempo che risulta coerente con il tempo di corrivazione del bacino $t_c \simeq 20$ ore calcolato con la formula di Giandotti. Inoltre, si osservi come la durata della piena di progetto PAI 1997, pari a circa 41 ore, risulti coerente anche con la durata di 37 ore stimata come valore medio delle portate di piena più alte verificatesi in Tagliamento dal 1886 al 2023 (Figura 3).

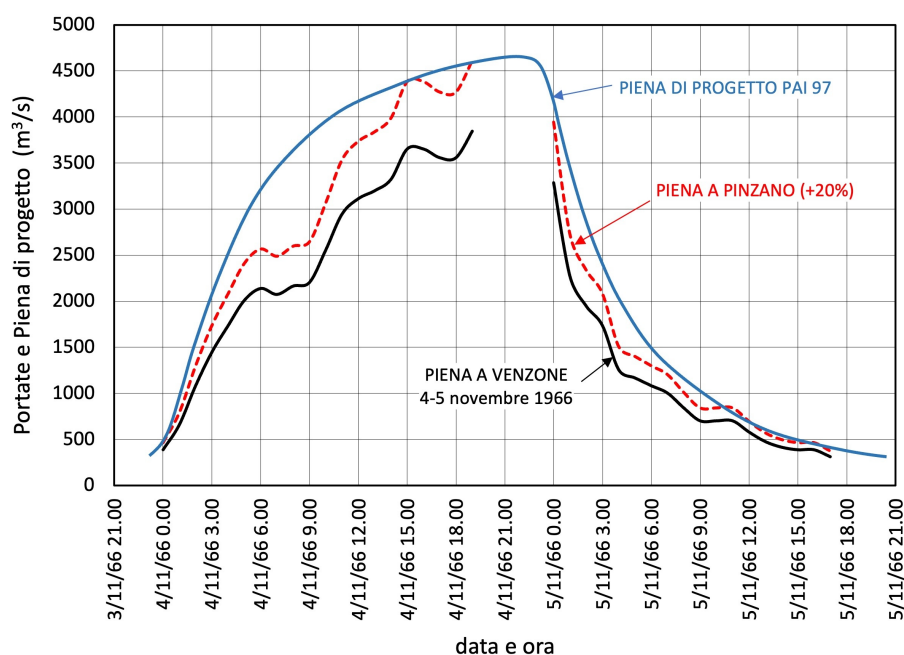


Figura 13. Piena di Venzone relativa all'evento del 4-5 novembre 1966, piena di Pinzano ottenuta incrementando del 20% la piena di Venzone e piena di progetto PAI 1997.

2.1.2 Piena di progetto PGRA 2021

L'Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali, nel PGRA 2021 ha sostituito l'idrogramma della portata di progetto fornito dal PAI 1997 con un nuovo idrogramma, basato sull'utilizzo di un modello idrologico di tipo geomorfoclimatico. Purtroppo, non è dato sapere di quale modello specifico si tratti, tuttavia simili modelli che nascono, almeno in linea teorica, per tenere conto di tutte le componenti idrologiche che concorrono alla formazione di un'onda di piena, nelle applicazioni reali presentano non pochi problemi. Per esempio, un problema reale in cui ci si imbatte spesso quando si utilizzano simili modelli è quello della calibrazione dei suoi numerosi parametri, spesso basati su conoscenze sperimentali non disponibili o su ipotesi di omogeneità e isotropia del dominio difficilmente riscontrabili nella realtà. Normalmente, questi modelli vengono utilizzati nei bacini, o sottobacini, in cui non sono disponibili dati idrometrici, ma questo non sarebbe il caso del bacino montano del fiume Tagliamento, per il quale si hanno a disposizione ben 138 anni di registrazioni.

La portata di progetto imposta dal PGRA 2021, ricavata con un modello geomorfoclimatico di cui non è molto chiaro il processo di calibrazione, è indicata in Figura 14. Nella stessa figura è riportata anche la vecchia portata di progetto suggerita dal PAI 1997.

Come si può osservare (Figura 14), il tempo di formazione del picco della piena di progetto indicata dal PGRA 2021 è pari a circa 30 ore, ovvero circa un 50% in più del tempo di formazione suggerito dal PAI 1997. Altro dettaglio che emerge è la durata della piena, pari a circa 80-90 ore, ovvero circa 2.3 volte la durata media rilevata per le piene più alte registrate nel periodo 1886-2023 (Figura 3), pari a 37 ore. Aggiungiamo, infine, che dalle misure idrometriche rilevate a Venzone nel periodo 1886-2023, risulta che le durate di 80-90 ore sono tipiche di piene più piccole, aventi un picco generalmente compreso tra 500 e 1500 m³/s (Figura 3).

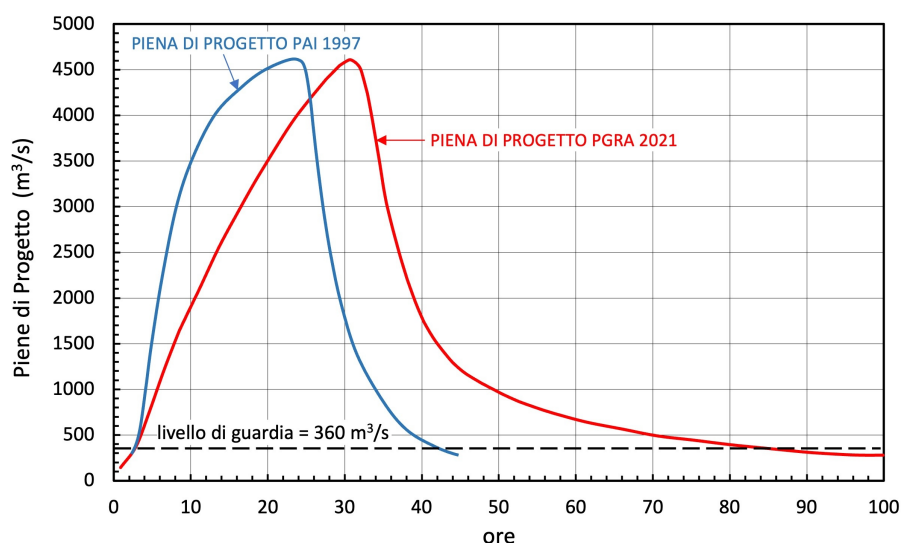


Figura 14. Confronto tra le piene di progetto PAI 1997 e PGRA 2021 stimate nella stretta di Pinzano.

2.2 Maree in foce

Durante una piena, l'oscillazione di marea, somma di una componente astronomica e di una componente meteorologica, può condizionare fortemente il deflusso nel tratto terminale di un fiume, tanto più per un fiume come il Tagliamento che ha una pendenza media nel tratto terminale pari a circa 0.1‰. Per comprendere ciò, è sufficiente osservare come, durante i periodi di magra, l'idrometro di Latisana registri praticamente le stesse oscillazioni di marea che si verificano in foce.

Lo studio delle maree alla foce del fiume Tagliamento presuppone la disponibilità di una serie storica significativa di dati di marea e poiché, ad oggi, tali dati non sono ancora fruibili direttamente in foce, è necessario scegliere un mareografo vicino che meglio rappresenti le oscillazioni in foce. I mareografi più accreditati, tra quelli più vicini alla foce del fiume, per numerosità di dati e continuità di funzionamento, sono quelli di Lignano, Grado e Trieste (Figura 15). Le registrazioni di tali mareografi sono state già oggetto di una valutazione durante un precedente studio fatto per la Regione Friuli Venezia Giulia (Fontolan and Petti 2017). In tale studio, il Laboratorio di Idraulica UniUd ha confrontato le registrazioni dei tre mareografi con quelle dei mareografi di Venezia Punta della Salute e Piattaforma Acqua Alta di Venezia.

Per quanto riguarda il mareografo di Lignano sono emerse forti anomalie nel periodo 2008-2014, mentre per i mareografi di Venezia e Grado sono emersi in maniera evidente i fenomeni di subsidenza che ne condizionano, in qualche modo, la misura. Poiché nelle analisi sul lungo periodo è molto importante conoscere anche la variazione del livello medio mare, è evidente la necessità di fare riferimento ad un mareografo che abbia una serie storica sufficientemente lunga e che non sia affetto da fenomeni di subsidenza o bradisismo, per questo motivo per le analisi sul lungo periodo faremo riferimento al mareografo di Trieste. Nel caso di analisi sul breve periodo, invece, faremo riferimento al mareografo di Grado, perché più vicino alla foce del Tagliamento. Naturalmente, in quest'ultimo caso sarà necessario sottrarre gli effetti dovuti alla subsidenza.

I dati di marea utilizzati per stimare le variazioni del livello medio mare sono quelli



Figura 15. Collocazione dei mareografi di Lignano, Grado e Trieste.

rilevati dal mareografo di Trieste nel periodo 1905-2021, per un totale di 117 anni. Per evitare qualsiasi ambiguità, precisiamo che da adesso e nel seguito, anche se non esplicitato, faremo sempre riferimento a misure mareografiche riferite allo zero IGM42. Qualora risulti necessario, preciseremo di volta in volta eventuali altri riferimenti.

Per ciascun anno n -esimo è stato valutato prima di tutto il livello medio mare annuo $\bar{\eta}_n$ (*l.m.m.*) attraverso la media

$$\bar{\eta}_n = \frac{1}{T_a} \int_{T_a} \eta_n(t) dt, \quad (4)$$

essendo T_a la durata di un anno e $\eta_n(t)$ la registrazione di marea di ciascun anno n -esimo riferita allo zero IGM42. I risultati in forma grafica sono riportati in Figura 16.

Come si può vedere (Figura 16) dal 1905 al 1988 il trend di crescita del livello medio mare risulta di 1.33 mm/anno, negli ultimi 33 anni (1989-2021), invece, il trend di crescita è aumentato di circa 2.8 volte e risulta pari a 3.74 mm/anno. In particolare, nell'anno 2021 il mareografo di Trieste ha registrato un livello medio mare di 0.049 m (riferimento zero IGM42).

Il tasso di crescita di 3.74 mm/anno trovato (1989-2021) è in linea con le previsioni fatte dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) che ha stimato per il 2100, nel caso più favorevole, un tasso di crescita medio di 4 (2-6) mm/anno e un incremento del livello medio mare di 43 (0.29-0.59) cm rispetto al periodo 1986-2005. Da notare che nel caso più sfavorevole, invece, l'IPCC ha stimato un tasso di crescita medio di 15 (10-20) mm/anno e un incremento del livello medio mare di 84 (61-110) cm, sempre rispetto al periodo 1986-2005 (IPCC 2019; Oppenheimer et al. 2019).

Dalla serie storica delle maree misurate a Trieste nel periodo 1905-2021 sono stati estratti i massimi livelli di marea annuali η_{cr} , riferiti al *l.m.m.*, ed è stata condotta un'analisi degli eventi estremi utilizzando la distribuzione asintotica di Gumbel

$$P(\eta_{cr}) = \exp \left\{ -\exp \left[-\frac{\eta_{cr} - \epsilon}{\theta} \right] \right\}. \quad (5)$$

Per la stima dei parametri ϵ e θ è stato utilizzato ancora il metodo dei momenti, metodo che, come già osservato, non risulta condizionato da problemi di *plotting position*.

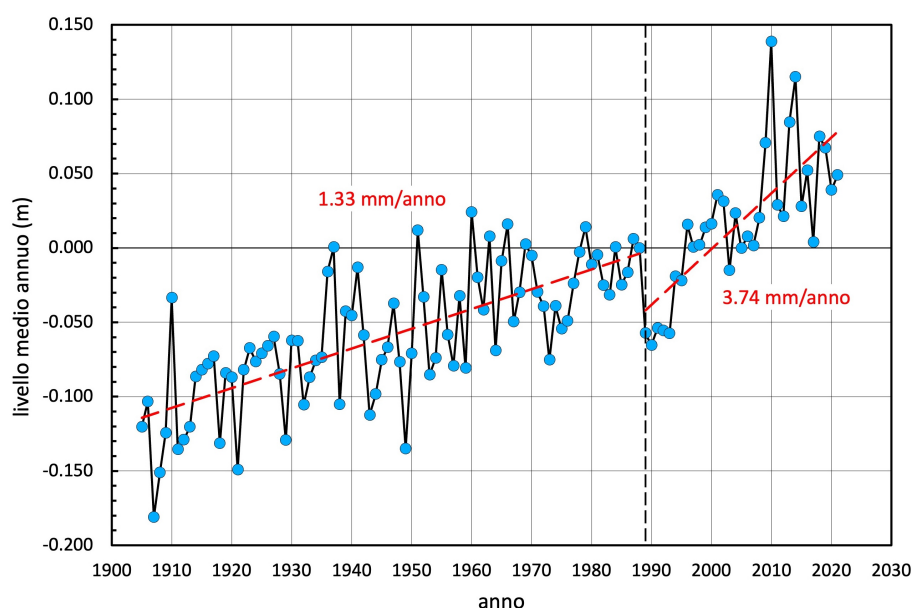


Figura 16. Andamento del livello medio mare annuo, riferito allo zero IGM42, determinato con le misure mareografiche di Trieste (Molo Sartorio) nel periodo 1905-2021.

In Figura 17 è riportata la distribuzione di Gumbel (5) delle creste di marea massime annuali η_{cr} , stimate con il metodo dei momenti, per il mareografo di Trieste nel periodo 1905-2021. In Figura 18, invece, è riportato lo stesso andamento in funzione del periodo di ritorno T .

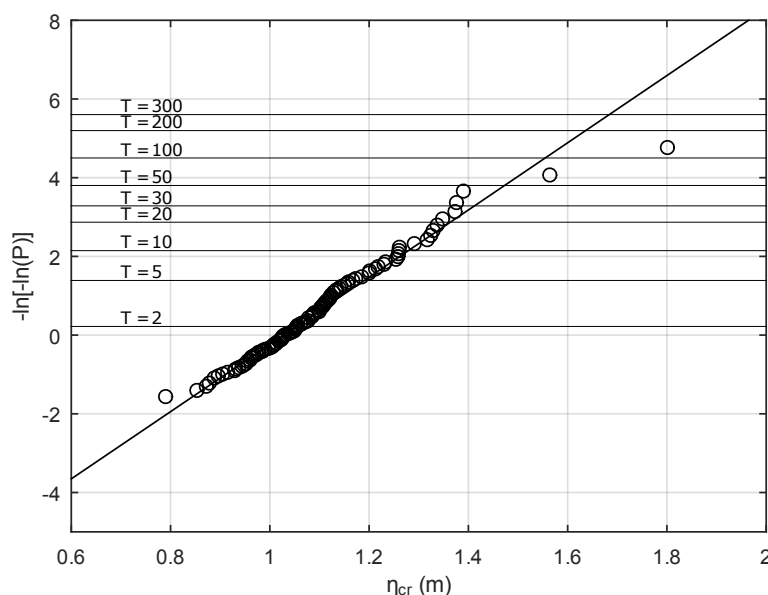


Figura 17. Mareografo di Trieste: creste di marea massime annuali η_{cr} , riferite al *l.m.m.*, in funzione della probabilità di non superamento P e del periodo di ritorno T .

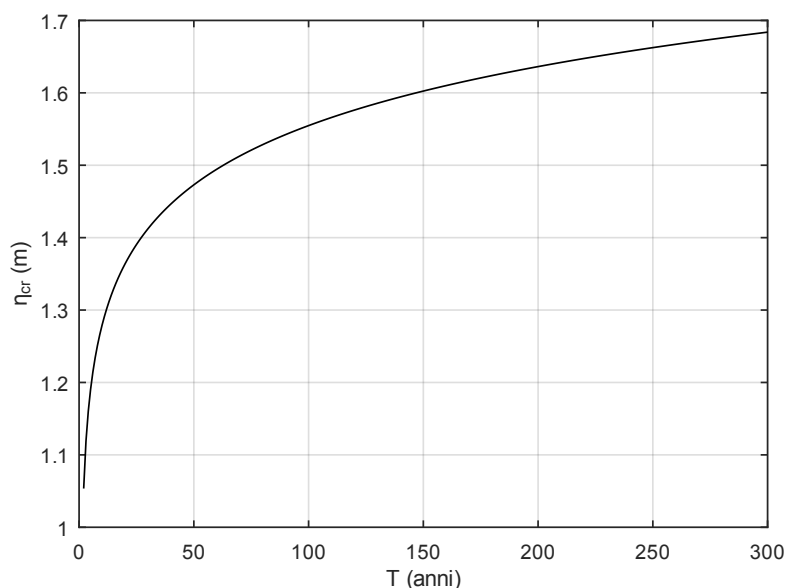


Figura 18. Mareografo di Trieste: creste di marea massime annuali η_{cr} , riferite al *l.m.m.*, in funzione del periodo di ritorno T .

Si tenga presente che tutti i valori di η_{cr} sono relativi al *l.m.m.*, pertanto per ottenere il valore della marea massima annuale riferita allo zero IGM42 è necessario sommarvi l'entità del *l.m.m.* relativa all'anno di interesse.

Per avere un conforto sulle stime di marea fatte, soprattutto per quanto riguarda la loro significatività in prossimità della foce del Tagliamento, si è deciso di condurre un'analisi degli eventi estremi anche sulle maree massime annuali, decurtate dei fenomeni di subsidenza, registrate dal mareografo di Grado nel periodo 1991-2021. In Figura 19 è riportata la distribuzione di Gumbel (5) delle creste di marea massime annuali η_{cr} stimate con il metodo dei momenti.

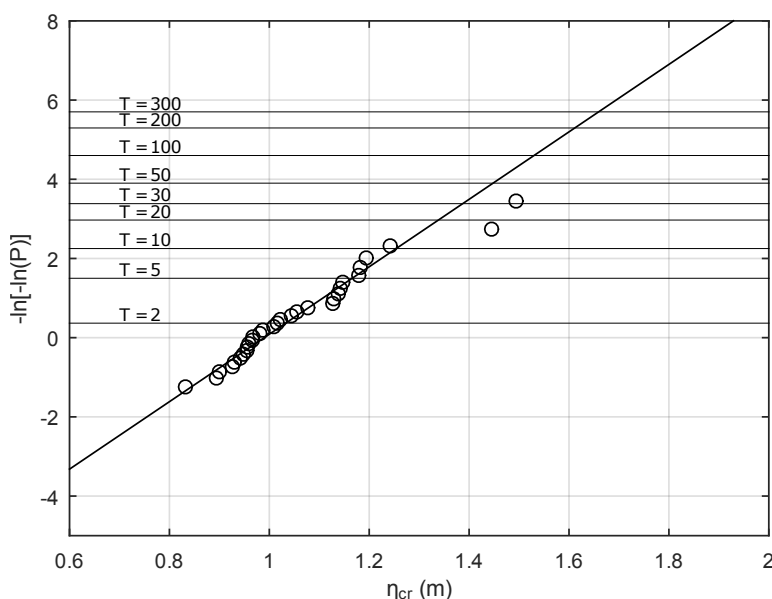


Figura 19. Mareografo di Grado: creste di marea massime annuali η_{cr} , riferite al *l.m.m.*, in funzione della probabilità di non superamento P e del periodo di ritorno T .

In Tabella 3 sono riportati i risultati delle maree massime annuali η_{cr} in funzione di vari periodi di ritorno T , stimate sia per il mareografo di Trieste che per il mareografo di Grado.

Tabella 3. Mareografo di Trieste (1905-2021) e mareografo di Grado (1991-2021): maree massime annuali η_{cr} riferite al *l.m.m.*, stimate assumendo una distribuzione asintotica di Gumbel, in funzione di vari periodi di ritorno T .

Mareografo	T	(anni)	2	5	10	20	30	50	100	140	200	300
Trieste	η_{cr}	(m)	1.05	1.19	1.28	1.36	1.41	1.47	1.55	1.59	1.64	1.68
Grado	η_{cr}	(m)	1.03	1.17	1.25	1.34	1.39	1.45	1.53	1.57	1.61	1.66

Come si può vedere (Tabella 3), i valori ottenuti sono sostanzialmente gli stessi. Questo risultato è confortante e, per quanto riguarda le maree massime, consolida la scelta del mareografo di Trieste quale mareografo di riferimento per le analisi degli eventi estremi. Il motivo di questa scelta, squisitamente statistico, risiede nella disponibilità di una serie storica più lunga che riduce la varianza dei risultati stimati. Vale la pena osservare che, per come sono stati ottenuti, i valori riportati in Tabella 3 tengono conto sia della componente di marea astronomica che meteorologica, mentre, come già detto, non tengono conto del livello medio mare che deve essere stimato e aggiunto separatamente.

Al riguardo, se ammettiamo che permanga un tasso di incremento medio mare pari a 3.74 mm/anno (Figura 16), aggiungendo il livello medio mare ai dati riportati in Tabella 3 si ottengono le maree massime annuali, riferite allo zero IGM42, riportate in Tabella 4.

Tabella 4. Mareografo di Trieste (1905-2021) e mareografo di Grado (1991-2021): maree massime annuali η_{cr} riferite allo zero IGM42, stimate per vari periodi di ritorno T e comprensive delle variazioni del *l.m.m.* stimato assumendo un tasso d'incremento di 3.74 mm/anno (Figura 16).

Mareografo	T	(anni)	2	5	10	20	30	50	100	140	200	300
Trieste	η_{cr}	(m)	1.06	1.21	1.32	1.43	1.52	1.66	1.92	2.11	2.39	2.80
Grado	η_{cr}	(m)	1.04	1.19	1.29	1.41	1.50	1.64	1.90	2.09	2.36	2.78

3 Tratto Cesarolo-foce: insediamenti in golena

Lungo le golene del fiume Tagliamento, nel tratto Cesarolo-foce sono presenti diversi insediamenti. In particolare, partendo dal nodo con lo scolmatore Cavrato e procedendo verso la foce, subito dopo lo scolmatore Cavrato troviamo in sinistra Tagliamento l'azienda agricola dei fratelli Simeoni, all'interno della quale sono presenti un capannone e diversi edifici, alcuni dei quali sembrano unità residenziali (Figura 20a).

Un po' più a Sud, in prossimità di Pertegada e sempre in golena, esiste un insediamento costituito da circa undici unità abitative (Figura 20b). Successivamente, poco prima dell'isola Picchi, sono presenti in golena sinistra altre due unità abitative (Figura 20c). Scendendo ancora, all'interno dell'isola Picchi si osserva la presenza di un altro insediamento costituito da più unità abitative, verosimilmente connesse all'attività agricola presente sull'isola (Figura 20d). Sempre procedendo verso la foce, a nord del canale

di Bevazzana troviamo un insediamento costituito da quattro o cinque edifici, alcuni dei quali sembrano abbandonati (Figura 20e).

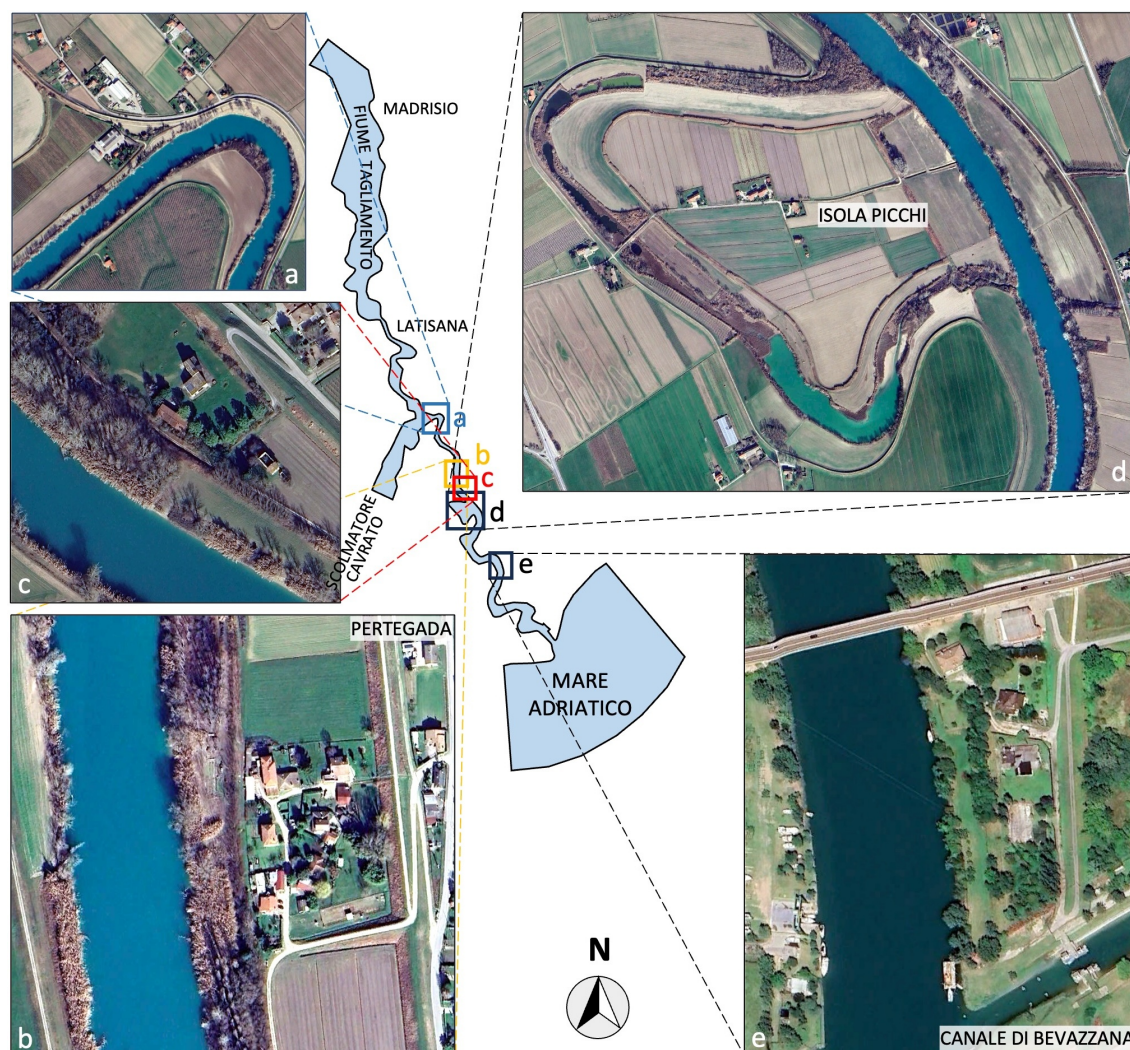


Figura 20. Insediamenti presenti nelle golene del fiume Tagliamento tra Cesarolo e il canale di Bevazzana.

A sud del canale di Bevazzana sono presenti le attività svolte dalle società che hanno commissionato questo studio ovvero: Marina Azzurra, Parco Zoo Punta Verde, Marina Punta Verde (Figura 21), Marina Uno e Camping Village Pino Mare (Figura 22).

A seguito della decisione dell'Autorità di Bacino di portare a 2400 m³/s la portata che dovrebbe essere smaltita dal tratto di fiume Tagliamento che va da Cesarolo alla foce, per tutti gli insediamenti che si trovano in golenale, o a cavallo della stessa, a sud del nodo con lo scolmatore Cavrato, la pericolosità associata ad una loro inondazione potrebbe trasformarsi da **media** a **molto alta**. Naturalmente, siamo consapevoli che gli insediamenti si trovano su un'area di pertinenza fluviale, ma ciò non toglie che si possa associare loro una pericolosità di inondazione. Tra l'altro, è interessante osservare che gli insediamenti in questione non sono gli unici ad essere presenti lungo il Tagliamento, per esempio, in prossimità di Spilimbergo, in golenale destra ne sono presenti altri, tra cui una scuola.

Di seguito, sempre procedendo da Nord verso Sud, forniamo una descrizione molto sintetica delle attività svolte lungo il Tagliamento dalle società che hanno commissionato il presente studio.

Marina Azzurra è un resort nato nell'ultimo decennio che gestisce circa 89 strutture, costituite da *bungalows* e *house boats*, disposte lungo la golena sinistra del Tagliamento (Figura 21). All'interno del resort sono presenti diversi servizi distribuiti su tutta l'area, tra i quali un parco piscine, campi sportivi e un'area barbecue, tutti disposti in golena sinistra.

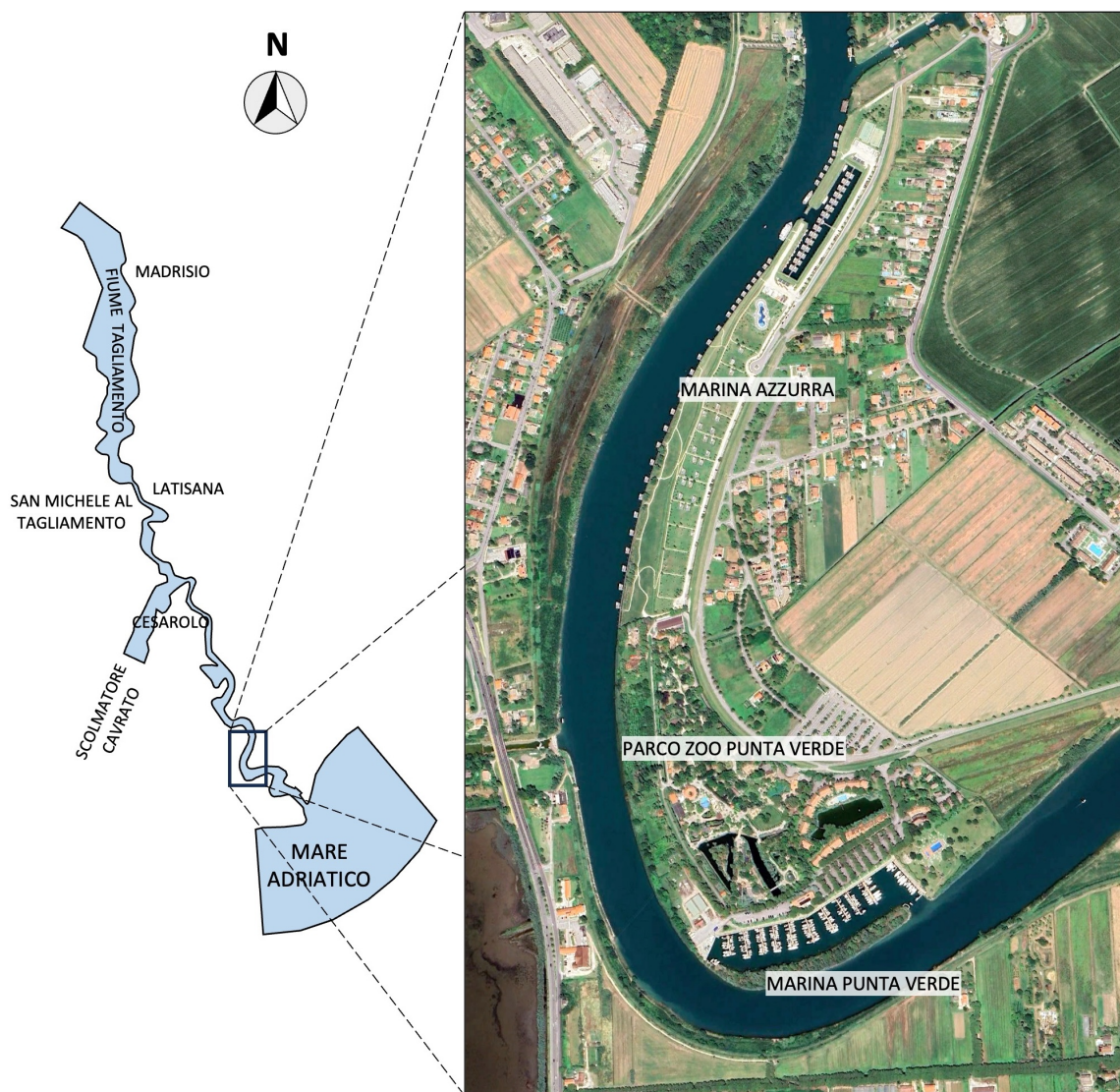


Figura 21. Localizzazione di Marina Azzurra, del Parco Zoo Punta Verde e di Marina Punta Verde.

Parco Zoo Punta Verde è un giardino zoologico nato nel 1979 e occupa uno spazio di circa 100 000 m² lungo la golena sinistra del Tagliamento (Figura 21). Ospita approssimativamente un migliaio di animali appartenenti a circa ottanta specie diverse ed è membro di associazioni europee e internazionali. Gestisce programmi di educazione ambientale, rivolti a tutti ed in particolare alle scuole, finalizzati a far conoscere ed apprezzare la biodiversità. Collabora con varie università, musei e istituti scientifici.

Marina Punta Verde è collocata lungo la golena sinistra del fiume Tagliamento, ha uno specchio acqueo di circa 25 000 m² e dispone di 270 posti barca, perlopiù su pontili galleggianti (Figura 21). All'interno di Marina Punta Verde sono presenti diversi servizi, distribuiti sempre in golena, tra i quali un ristorante, un bar, un minimarket, una piscina e un capannone per il rimessaggio invernale.

Marina Uno è nata nel 1960 ed è collocata in sinistra Tagliamento, a circa 700 m dalla foce. Ha uno specchio acqueo di circa 32 000 m² e dispone di 400 posti barca, realizzati, perlopiù, su pontili galleggianti (Figura 22). All'interno di Marina Uno sono presenti diversi servizi, tra i quali due bar, un ristorante, una piscina, un albergo e un capannone per il rimessaggio invernale.

Camping Village Pino Mare è nato nel 1960 ed è uno dei primi campeggi nati a Lignano. Conta circa 300 case mobili e 351 piazzole attrezzate. All'interno del camping sono presenti diversi servizi, tra i quali una piscina grande, un supermercato, un ristorante e una spiaggia in sinistra foce Tagliamento.

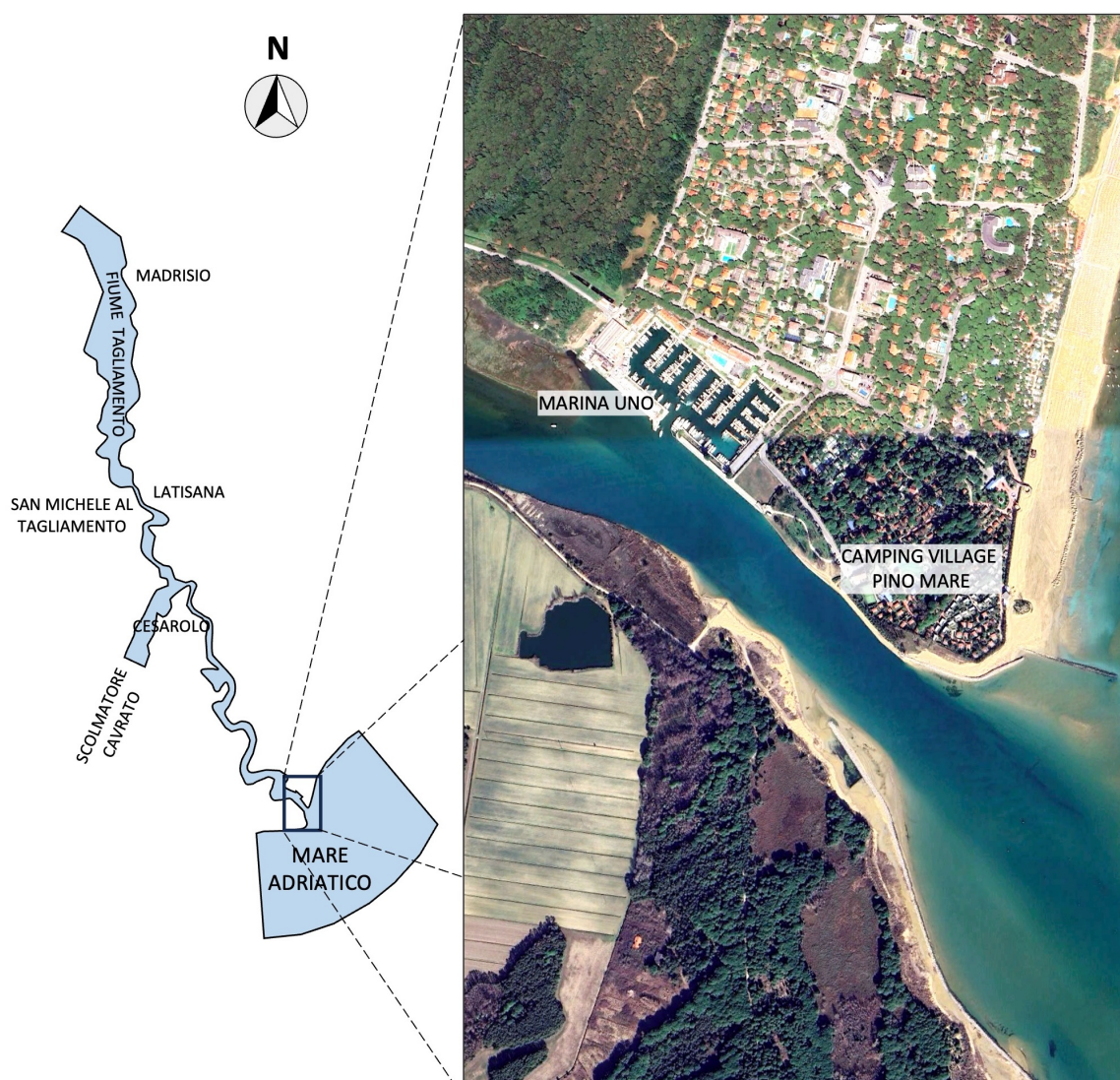


Figura 22. Localizzazione di Marina Uno e del Camping Village Pino Mare.

4 Scelta del modello idraulico

Nell'ambito della modellistica idraulica è possibile operare con diversi modelli, raggruppati nelle tre tipologie: unidimensionali (o monodimensionali), detti brevemente 1D, bidimensionali, detti 2DH, e tridimensionali, detti 3D.

Prima di procedere con la scelta del modello più appropriato, è necessario conoscere, almeno nelle sue linee essenziali, il percorso che porta alla stesura di un modello idraulico. Tutto nasce dall'osservazione di un certo fenomeno fisico: la prima fase è quella di una sua descrizione con equazioni matematiche, basate sulle leggi fisiche che lo governano, ricavate con metodo Galileiano (modello matematico). La seconda fase è quella della cosiddetta integrazione numerica delle equazioni matematiche, fatta con tecniche proprie dell'analisi numerica (modello numerico). E' fondamentale sapere che in tutte e due le fasi si introducono inevitabilmente degli errori, per cui una modellazione numerica, alla fine, non rappresenta mai una verità assoluta ma un'approssimazione, più o meno accurata, della stessa. Ne consegue che la scelta più appropriata è sempre rappresentata dal modello matematico-numerico che minimizza gli inevitabili errori commessi nel rappresentare il fenomeno fisico.

4.1 Modello idraulico 2DH utilizzato

Il modello idraulico 2DH normalmente utilizzato dal Laboratorio di Idraulica per studi come quello presente è composto da due parti: un modello morfodinamico (idrodinamico più trasporto solido) (*DAM-SED*), realizzato *in house*, e un modello spettrale di generazione del moto ondoso (*SWAN*). I due modelli vengono governati da un *main* (*DAM-SWAN*), sempre realizzato *in house*, che ne sincronizza l'esecuzione e provvede all'aggiornamento delle reciproche variabili di input (Figura 23).

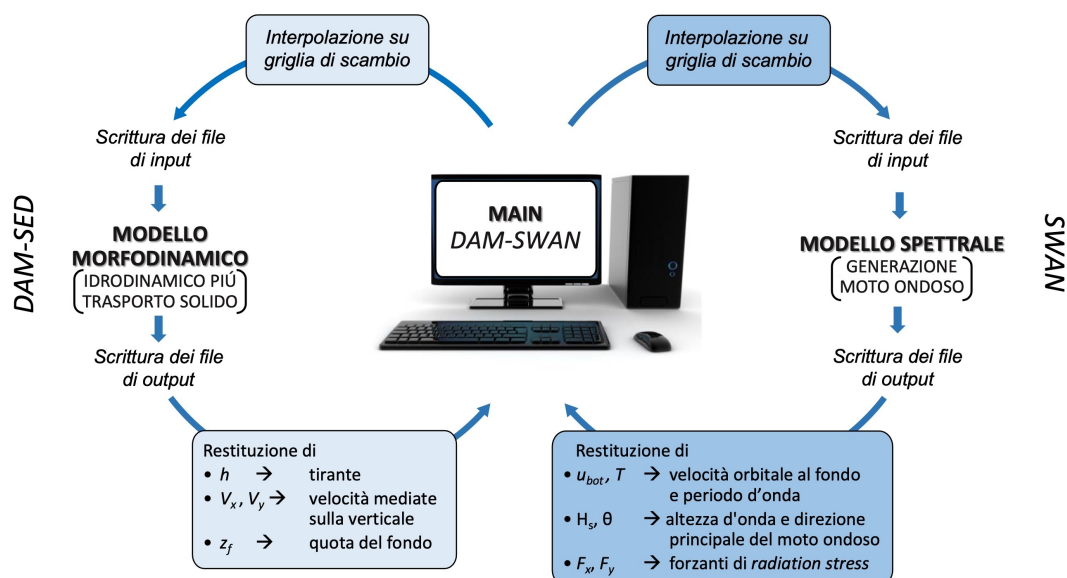


Figura 23. Flowchart del modello idraulico completo del Laboratorio di Idraulica UniUd.

Pur utilizzandone solo una parte per lo studio in oggetto, di seguito diamo una descrizione del modello completo.

4.1.1 Modello morfodinamico

Il modello morfodinamico (*DAM-SED*) è costituito da un codice di calcolo bidimensionale (2DH) messo a punto, a partire dai primi anni 2000, dal gruppo di ricerca di Idraulica dell'Università degli Studi di Udine coordinato dal prof. Petti. L'esperienza pluridecennale maturata dal gruppo ha consentito di sviluppare un modello *in house*, costantemente aggiornato, calibrato e validato con molteplici casi studio che spaziano dall'ambiente montano a quello fluviale e marittimo.

Nelle sue linee essenziali, il modulo idrodinamico è basato sul principio di conservazione della massa e sul bilancio della quantità di moto, traducibili nel sistema di equazioni differenziali

$$\frac{\partial (h + \bar{\eta})}{\partial t} + \frac{\partial V_x (h + \bar{\eta})}{\partial x} + \frac{\partial V_y (h + \bar{\eta})}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_x (h + \bar{\eta})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[V_x^2 (h + \bar{\eta}) + \frac{g}{2} (h + \bar{\eta})^2 \right] + \frac{\partial V_x V_y (h + \bar{\eta})}{\partial y} = \\ & g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{yx}}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + f V_y (h + \bar{\eta}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_y (h + \bar{\eta})}{\partial t} + \frac{\partial V_x V_y (h + \bar{\eta})}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[V_y^2 (h + \bar{\eta}) + \frac{g}{2} (h + \bar{\eta})^2 \right] = \\ & g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} - f V_x (h + \bar{\eta}) \end{aligned} \quad (8)$$

dove t è il tempo, (x, y) le coordinate cartesiane di un piano giacente sullo SWL (*still water level*), h la profondità d'acqua riferita allo SWL, $\bar{\eta}$ il livello della superficie libera (riferito allo SWL) mediato sulla scala temporale dei periodi d'onda, (V_x, V_y) le componenti di velocità mediate lungo la verticale, g l'accelerazione di gravità, (τ_{bx}, τ_{by}) gli stress al fondo, ρ la densità dell'acqua, (τ_{sx}, τ_{sy}) gli stress trasmessi dal vento alla superficie libera, $\partial S_{xx}/\partial x$, $\partial S_{yx}/\partial x$, $\partial S_{yy}/\partial y$, $\partial S_{xy}/\partial y$ i gradienti di radiation stress, $\partial T_{xx}/\partial x$, $\partial T_{yx}/\partial x$, $\partial T_{yy}/\partial y$, $\partial T_{xy}/\partial y$ i gradienti degli stress laminari e turbolenti integrati lungo la verticale. $f = 2\omega_g \sin \phi$, con ω_g velocità di rotazione terrestre e ϕ la latitudine terrestre, consente di tenere conto della non inerzialità del sistema terrestre.

Tutte le variabili, anche se non esplicitamente indicato, sono da ritenersi mediate sulla scala temporale dei periodi d'onda marina.

Per quanto riguarda lo stress al fondo τ_b , si tiene conto dell'interazione moto ondoso - correnti (da vento e di marea) in accordo con il metodo proposto da Soulsby (1995):

$$\tau_b = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (9)$$

dove τ_c è lo stress indotto dalla corrente e τ_w quello indotto dal moto ondoso.

Per ciò che concerne il modulo di stima del trasporto solido, bisogna distinguere tra trasporto solido al fondo e trasporto solido in sospensione. Per il trasporto solido al fondo, la portata solida q_b viene calcolata con la relazione proposta da van Rijn (1993):

$$q_b = 0.25 \alpha D_{50} \left(\frac{\tau'_b}{\rho} \right)^{0.5} D_g^{-0.3} \left(\frac{\tau'_b - \tau_{bcr}}{\tau_{bcr}} \right)^{1.5} \quad (10)$$

dove α è un coefficiente che dipende dall'altezza d'onda e dal tirante, D_{50} è il diametro mediano dei sedimenti, τ'_b è la tensione media al fondo che agisce sul grano di sabbia, calcolata secondo la teoria di Soulsby (1995), D_g la variabile adimensionale nota come diametro del grano e $\tau_{b_{cr}}$ è la tensione critica relativa al trasporto solido al fondo, calcolata secondo Soulsby (1997) e corretta per tener conto della pendenza del fondo.

Per il trasporto solido in sospensione, nel caso di un approccio di equilibrio, la portata solida q_s viene calcolata con la relazione proposta da van Rijn (2001):

$$q_s = F \sqrt{V_x^2 + V_y^2} h c_a \quad (11)$$

dove c_a è nota con il nome di concentrazione di riferimento e F è un fattore correttivo che tiene conto dei profili di concentrazione e di velocità lungo la verticale, considerando la presenza combinata di moto ondoso e corrente.

Nel caso di approccio di non equilibrio, per la stima del trasporto solido in sospensione del materiale incoerente viene utilizzata l'equazione avvettiva-diffusiva basata sul principio di conservazione della massa solida:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_g (h + \bar{\eta})}{\partial t} + \frac{\partial V_x C_g (h + \bar{\eta})}{\partial x} + \frac{\partial V_y C_g (h + \bar{\eta})}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_{ts} (h + \bar{\eta}) \frac{\partial C_g}{\partial x} \right] + \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_{ts} (h + \bar{\eta}) \frac{\partial C_g}{\partial y} \right] = E_g - D_g \end{aligned} \quad (12)$$

in cui C_g è la concentrazione volumetrica dei sedimenti granulari mediata sulla verticale, ν_{ts} rappresenta il coefficiente di diffusione mentre, al secondo membro, E_g rappresenta il tasso di erosione volumetrico e D_g quello di deposizione volumetrico, valutati come in Petti et al. (2018).

Per la stima della concentrazione mediata sulla verticale C_g viene assunto un profilo di concentrazione lungo la verticale proposto da Soulsby (1997).

Nel caso di materiale coerente, sempre con un approccio di non equilibrio, per la stima del trasporto solido in sospensione viene utilizzata l'equazione avvettiva-diffusiva:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_c (h + \bar{\eta})}{\partial t} + \frac{\partial V_x C_c (h + \bar{\eta})}{\partial x} + \frac{\partial V_y C_c (h + \bar{\eta})}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_{ts} (h + \bar{\eta}) \frac{\partial C_c}{\partial x} \right] + \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_{ts} (h + \bar{\eta}) \frac{\partial C_c}{\partial y} \right] = \frac{E_{cm} - D_{cm}}{\rho_s} \end{aligned} \quad (13)$$

in cui C_c è la concentrazione dei sedimenti coesivi mediata sulla verticale, E_{cm} e D_{cm} sono i tassi di erosione e di deposizione in massa dei sedimenti coesivi e ρ_s la densità dei sedimenti stessi.

Le eqq. (6-8), nonché le eqq. (12) e (13) vengono integrate numericamente con un metodo ai volumi finiti (FVM) del secondo ordine, metodo conservativo capace di cogliere al meglio le discontinuità idrauliche. Naturalmente viene assicurata la *C-property*, ossia la conservazione di uno stato di quiete, sia in condizioni di fondo bagnato che in situazioni di asciutto-bagnato, come ad esempio su una spiaggia. Per maggiori dettagli si rimanda a Toro (2001), Petti (2007), Audusse et al. (2004), Liang e Marche (2009).

Infine, per stimare la variazione della quota del fondo z_f , dovuta al movimento del materiale solido, viene utilizzata l'equazione di Exner basata sul principio di conservazione della massa solida.

Nel caso di materiale incoerente, se l'approccio è di equilibrio viene utilizzata l'equazione di Exner:

$$(1 - n) \frac{\partial z_f}{\partial t} + \frac{\partial q_{tx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{ty}}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

dove q_t è il trasporto solido totale, somma del trasporto al fondo q_b e di quello in sospensione q_s . Nel caso di approccio di non equilibrio, invece, viene utilizzata la relazione:

$$(1 - n) \frac{\partial z_f}{\partial t} + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + E_g - D_g = 0 \quad (15)$$

Nel caso di materiale coerente, invece, viene utilizzata sempre la relazione:

$$\frac{\partial z_f}{\partial t} + \frac{E_{c_m} - D_{c_m}}{\rho_d} = 0 \quad (16)$$

dove z_f è la quota del fondo e ρ_d la *dry density* del materiale coesivo al fondo.

4.1.2 Modello spettrale

Il modello di generazione del moto ondoso abbinato al modello morfodinamico è SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). SWAN è un modello spettrale di terza generazione, basato sull'equazione di bilancio della *wave action*, sviluppato a partire dalla fine degli anni '90 (Booij et al. 1999). In un contesto costiero, più che altrove, è molto importante lavorare con un modello spettrale di terza generazione e questo per descrivere correttamente la generazione del moto ondoso in presenza di correnti e per tenere conto adeguatamente dell'influenza che le dissipazioni al fondo esercitano sugli spettri di energia.

L'equazione matematica che esprime il bilancio della *wave action* è:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{gx} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{gy} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial y} + \\ & + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}(\sigma, \theta, x, y, t)}{\sigma} \end{aligned} \quad (17)$$

dove N è la *wave action*, definita dal rapporto S/σ con S densità spettrale di energia e σ pulsazione relativa, (c_{gx}, c_{gy}) sono le velocità di propagazione dell'energia nello spazio cartesiano (x, y) e (c_{σ}, c_{θ}) sono le velocità di propagazione dell'energia nello spazio spettrale (σ, θ) . $S_{tot}(\omega, \theta, x, y, t)$ è il termine sorgente:

$$\begin{aligned} S_{tot}(\sigma, \theta, x, y, t) = & S^{(Phillips)}(\sigma, \theta, x, y, t) + S^{(Miles)}(\sigma, \theta, x, y, t) + \\ & + S^{(frang)}(\sigma, \theta, x, y, t) + S^{(fondo)}(\sigma, \theta, x, y, t) + S^{(nl)}(\sigma, \theta, x, y, t) \end{aligned} \quad (18)$$

e comprende i contributi di energia legati alla generazione da vento $S^{(Phillips)}$ e $S^{(Miles)}$, alle dissipazioni per frangimento in acque profonde e basse $S^{(frang)}$, all'attrito al fondo $S^{(fondo)}$ e ai trasferimenti di energia dovuti alle interazioni non lineari, sia orizzontali (*quadruplet*) che verticali (*triad*), fra componenti d'onda a diversa frequenza $S^{(nl)}$.

L'eq.(18) viene risolta numericamente alle differenze finite utilizzando uno schema di Eulero implicito al secondo ordine. Per maggiori dettagli si rimanda a SWAN Team (2013).

5 Creazione della mesh

Nello studio fatto per conto della Regione FVG nel 2007, dove fu utilizzato un modello 2DH ai volumi finiti (Petti 2007) già all'epoca considerato molto avanzato, è stato dimostrato che le piene più alte, che hanno una durata di circa 40 ore, come per esempio quella di progetto definita dal PAI 1997, nel tratto Pinzano - Madrisio subiscono una laminazione pressoché trascurabile. In particolare, è stato dimostrato come per queste piene il picco a Madrisio si riduca solo di qualche punto percentuale rispetto a quello di Pinzano, mentre la forma della piena, pur subendo un ritardo, rimane pressoché invariata. Per questi motivi si è deciso di limitare il dominio di studio al tratto di Tagliamento che va da Madrisio alla foce, optando, a parità di tempi di simulazione, per una definizione più dettagliata, e quindi più accurata, del dominio. Ne è scaturita la mesh indicata in Figura 24 che conta circa 143 000 celle.

Come si può vedere, il tratto di Tagliamento che va da Madrisio alla foce è stato rappresentato nella sua interezza, mentre lo scolmatore Cavrato è stato rappresentato solo nel primo tratto e per una lunghezza di circa 2.3 Km, non essendo di interesse, ai fini del presente studio, ciò che succede a valle dello stesso. Inoltre, per rendere più accurata la quantificazione dell'interazione tra le maree e le portate di deflusso del fiume, di particolare interesse per la società che gestisce il Camping Village Pino Mare, alla foce del Tagliamento è stata modellata una parte di mare costituita da una superficie di circa 44 km².

Per quanto riguarda i canali Lugugnana e Bevazzana, parti della Litoranea veneta che attraversa il fiume Tagliamento, in ogni simulazione si suppone che durante il deflusso delle portate di piena le relative porte siano sempre chiuse.

5.1 Quotatura della mesh

Per la quotatura della mesh siamo partiti dalle stesse quote assegnate alla mesh utilizzata nello studio del 2007 (Petti 2007), integrate/aggiornate con i seguenti rilievi:

- Regione Veneto e Regione Friuli-Venezia Giulia, 2000. Progetto generale definitivo per il riequilibrio della linea di costa dei litorali adiacenti la foce del fiume Tagliamento nei comuni di S. Michele al T. e Lignano Sabbiadoro. All. 8;
- Autorità di bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta - Bacchiglione: sezioni topografiche del fiume Tagliamento da Dignano a Latisana (Campagna 2003);
- Autorità di bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta - Bacchiglione: sezioni topografiche fiume Tagliamento da Pertegada alla foce Distretto Alpi Orientali (Campagna 2004);
- Rilievi nel tratto terminale del fiume Tagliamento fatti nell'ambito dello studio commissionato da Lignano Pineta S.p.A. "Evoluzione morfologica del fiume Tagliamento

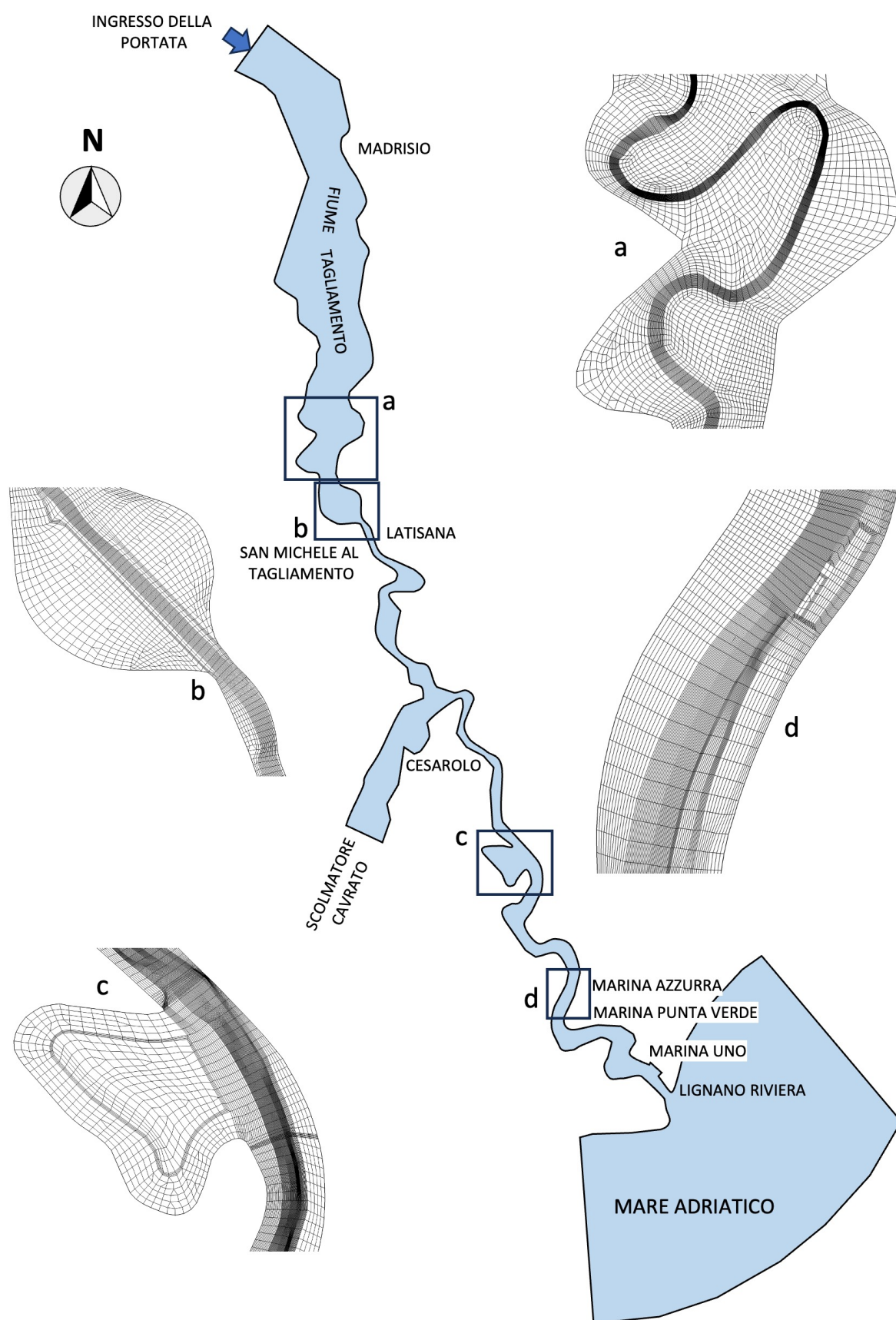


Figura 24. Dettagli della mesh del dominio utilizzato per le simulazioni (143 000 celle).

in corrispondenza dell'imbocco del porto turistico di Marina Uno di Lignano: analisi delle cause d'interrimento e proposte d'intervento per attenuare lo stesso" (Petti 2016);

- HS marine S.r.l., 2017: rilievo topo-batimetrico dell'ansa del fiume Tagliamento e delle imboccature di Marina Punta Verde e del porto turistico Marina Uno;
- Rilievi fatti dall'ing. Zanin (2017) nell'ambito del progetto per la realizzazione di una difesa spondale in destra Tagliamento località Bibione;
- Rilievo fatto dall'ing. Causero (2018) da Marina Uno alla foce;
- HS marine S.r.l., 2018: rilievo topo-batimetrico dell'imboccatura di Marina Uno;
- LIDAR LAS Ortometrico RFVG 2017-2020, ottenibili dalla piattaforma Web Gis Eagle FVG all'indirizzo <https://eaglefvg.regione.fvg.it>;
- DTM 0.5m Ortometrico Lotto Unico 2018-2020, ottenibili dalla piattaforma Web Gis Eagle FVG all'indirizzo <https://eaglefvg.regione.fvg.it>;
- GlobaRT S.r.l., 2020: rilievo topo batimetrico dell'ansa del fiume Tagliamento, della darsena di Marina Punta Verde e del porto turistico di Marina Uno;
- Rilievi alla foce del fiume Tagliamento (lato mare) utilizzati nell'accordo di collaborazione con la Regione Friuli Venezia Giulia per l'approfondimento tematico della dinamica sedimentaria laguna-mare ai fini della gestione degli interventi da attuare alle bocche lagunari della Laguna di Marano e Grado e della valutazione della loro sostenibilità e successiva Integrazione per l'approfondimento tematico della dinamica sedimentaria del porto di Marano Lagunare (Petti 2021b);
- Rilievo del canale di foce e della barra a mare, seguito dall'ing. Gianpaolo Guaran (2024).

Durante le simulazioni preliminari, fatte con il modello idraulico 2DH descritto al § 4.1, ci siamo accorti che le quote degli argini secondari (o interni) relativi a Marina Azzurra, lo Zoo e Punta Verde non erano state colte bene dai rilievi LIDAR RFVG 2017-2020. Il motivo, abbastanza ricorrente, è legato fondamentalmente alla presenza di vegetazione fitta proprio sopra gli argini secondari, circostanza che rende poco accurati i rilievi fatti con tecniche LIDAR. Per questo motivo è stata organizzata un'apposita campagna topografica, in sinistra Tagliamento, finalizzata a rilevare da terra le quote degli argini secondari incriminati. Tale campagna, resa possibile dalla disponibilità del dott. Emanuele Rodeano presidente del Parco Zoo Punta Verde e della società Tiliment Company, è stata condotta con la collaborazione del sig. Denis Sclauzero, capodarsena di Marina Punta Verde, e del prof. Alberto Beinat, docente di "Modelli digitali del terreno" e "Tecniche topografiche di controllo del territorio" del Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura dell'Università degli Studi di Udine. In Figura 23 sono riportate alcune immagini che mostrano alcuni momenti del rilievo.

Utilizzando i nuovi rilievi è stato possibile quotare correttamente, nell'area oggetto di studio, anche gli argini secondari coperti da vegetazione.

In Figura 26 sono riportati, a titolo indicativo, i contour di alcune parti del dominio utilizzato nel presente studio.



Figura 25. Immagini relative al rilievo da terra delle quote degli argini secondari, in sinistra Tagliamento, nel tratto compreso tra Marina Azzurra e Marina Punta Verde (30 luglio 2024).

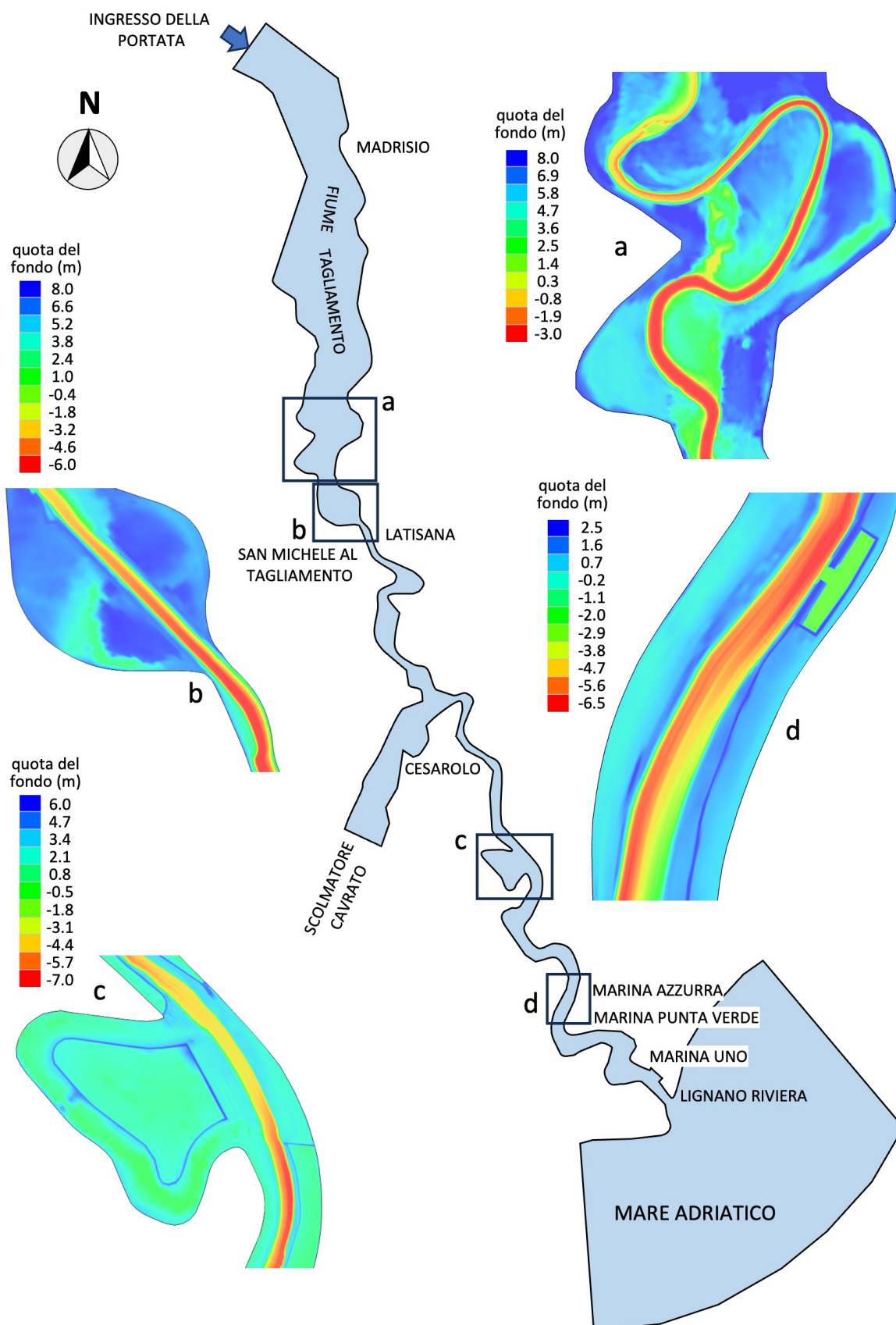


Figura 26. Contour delle quote del fondo di alcune parti del fiume Tagliamento ottenute dopo il processo di quotatura.

5.2 Attribuzione dei coefficienti di scabrezza alle celle

A differenza di un modello 1D, uno dei vantaggi offerti da un modello 2DH è la possibilità di assegnare ad ogni cella della mesh una scabrezza. L'applicazione di un modello 1D (come ad esempio HEC-RAS 1D) in un contesto come il fiume Tagliamento risulta poco appropriato e uno dei motivi è che un modello 1D lavora per sezioni, rendendo obbligatoria l'assegnazione di un'unica scabrezza equivalente alle stesse. Una diretta conseguenza di ciò è che mano a mano che il livello della piena cresce e passa dall'alveo di magra alle golene, coinvolgendo ambienti le cui scabrezze possono essere sensibilmente diverse, l'assegnazione di una sola scabrezza equivalente porta a una sovrastima dei livelli per le portate più piccole e a una sottostima dei livelli per le portate più grandi. Utilizzando un modello 2DH, invece, questo problema viene superato perché lavorando per celle è possibile assegnare alle singole celle le giuste resistenze d'alveo.

E' interessante osservare che, a parità di portata, un errore relativo $\epsilon_{r_{k_s}}$ commesso nella stima o nell'attribuzione di una scabrezza di Gauckler-Strickler k_s , si traduce in un errore relativo ϵ_{r_y} nel calcolo dei livelli pari a

$$\epsilon_{r_y} = 0.6 \epsilon_{r_{k_s}}. \quad (19)$$

Ad esempio, nel caso di un coefficiente di scabrezza reale pari a $k_s = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, se noi gli attribuiamo il valore $k_s = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, con il modello troveremo un risultato che sottostima del 60% il livello reale in alveo. Naturalmente, la stessa cosa succede se utilizziamo i coefficienti di scabrezza di Manning. E' evidente, quindi, come un modello 1D, che vede una sola scabrezza equivalente nella sezione, nel caso quest'ultima presenti parti con scabrezze sensibilmente diverse, sia candidato a fornire risultati meno accurati di un modello 2DH.

Nello studio del 2007 (Petti 2007) il Laboratorio di Idraulica UniUd aveva messo a punto un procedimento di attribuzione dei coefficienti di scabrezza basato su un metodo *predictor-corrector*, procedimento che si era rivelato molto efficace e che aveva portato a risultati coerenti sia con le piene utilizzate per la calibrazione, sia con i dati di letteratura. In ragione di ciò abbiamo deciso di utilizzare anche nel presente modello le stesse classi di scabrezza individuate nel 2007, basate per lo più sulla tipologia del fondo, forme di fondo comprese, e sulla densità della vegetazione e, soprattutto, coerenti con i dati di letteratura (Choow 1988). In Figura 27 è riportata, a titolo indicativo, la mappatura delle classi dei coefficienti di scabrezza attribuiti alle celle di alcune parti del dominio.

5.3 Condizioni al contorno

Come condizioni al contorno abbiamo assegnato (Figura 24):

- idrogramma di piena nella sezione di ingresso, poco più a nord di Madrisio, che per comodità nel seguito chiameremo semplicemente sezione di Madrisio;
- condizione di parete lungo tutti gli argini principali;
- condizione di trasparenza nella sezione d'uscita dello scolmatore Cavrato;
- condizione di marea nello specchio di mare adiacente alla foce del fiume Tagliamento.

Come vedremo tra poco, la corretta rappresentazione della marea è di fondamentale importanza, soprattutto per i livelli e le velocità nel tratto di Tagliamento prossimo alla foce.

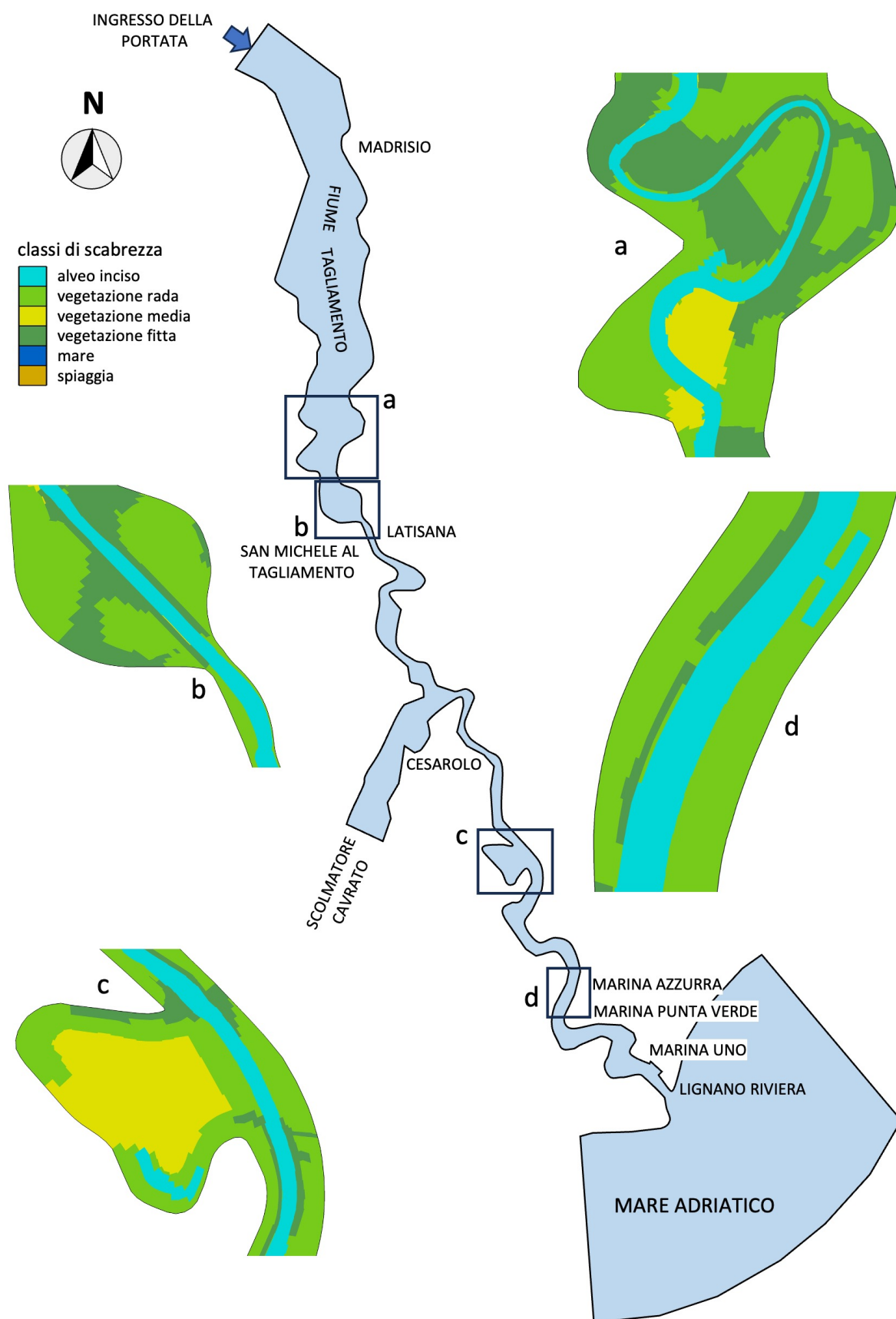


Figura 27. Esempio di mappatura delle classi di scabrezza di alcune parti del dominio di studio.

6 Validazione del modello idraulico

Il modello 2DH del Laboratorio di Idraulica UniUd, qui utilizzato nella sola modalità di deflusso delle portate di piena, come calibrazione richiede solo la definizione dei coefficienti di scabrezza. Abbiamo già detto che come coefficienti di scabrezza utilizziamo gli stessi coefficienti adoperati nello studio del 2007, già ampiamente validati con più eventi antecedenti il 2007, incluso quello dei primi di novembre 1966 (Petti 2007). A titolo di esempio si riporta il confronto tra i livelli simulati con il modello 2DH in oggetto e i livelli misurati a Latisana durante tale evento (Figura 28). Il mancato accordo con i valori misurati dopo la 22^a ora è dovuto ai volumi d'acqua che fuoriuscirono dall'alveo a monte di Latisana a seguito delle rotte arginali che si verificarono in sinistra a Varmo, Ronchis e Latisanotta e in destra a Morsano. Per maggiori dettagli si rimanda a Petti (2007).

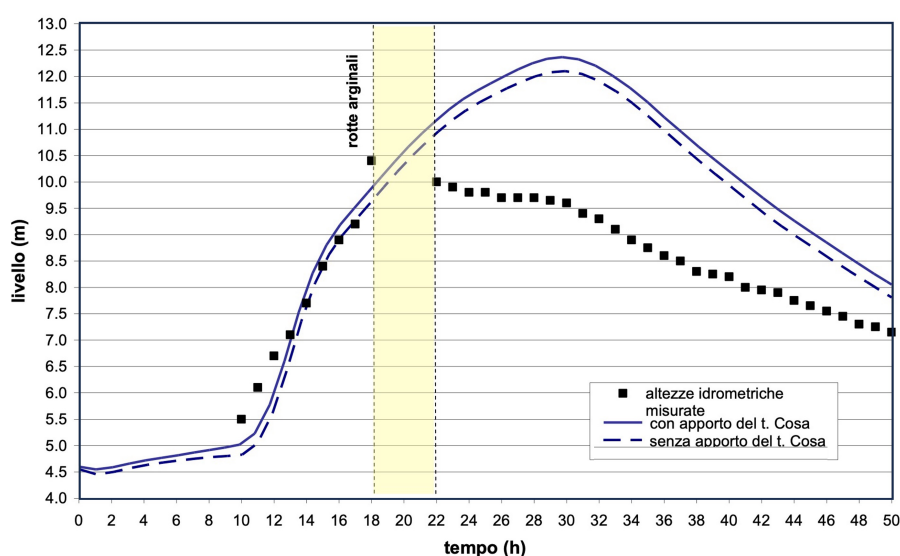


Figura 28. Piena del 4 novembre 1966: confronto tra le altezze idrometriche simulate e misurate in corrispondenza dell'idrometro di Latisana con e senza l'apporto del torrente Cosa (Petti 2007).

In questa sezione vogliamo mostrare ulteriori validazioni del modello, successive al 2007, e lo facciamo con due nuovi eventi: la piena generata dalla tempesta Vaia nel 2018 e la piena che si è verificata nel recente ottobre-novembre 2023.

In seguito, la variabile tempo sarà sempre riferita al sistema coordinato universale (UTC - *Coordinated Universal Time*), mentre i livelli saranno riferiti allo zero IGM42. Qualora, per una maggiore comprensione, fosse necessario fare riferimento anche allo zero mareografico di Punta della Salute di Venezia, lo indicheremo con l'acronimo ZMPS.

6.1 La tempesta Vaia

Vaia è il nome che è stato dato ad una tempesta molto intensa, occorsa tra la fine di ottobre e i primi di novembre 2018. È stata una tempesta, generata dall'interazione di un ciclone atlantico in movimento verso Est e un vento di Scirocco, che ha generato piogge intense e persistenti e, localmente, venti molto intensi. Colpì la Sardegna e tutto il centro nord e interessò, in particolare, le regioni Friuli Venezia Giulia, Veneto e Trentino Alto

Adige. La zona friulana maggiormente colpita fu la Carnia, cuore del bacino montano del fiume Tagliamento.

I livelli idrometrici misurati a Venzone e le maree misurate dal mareografo di Grado a cavallo della tempesta Vaia sono riportati, rispettivamente, nelle Figure 29 e 30.

Come si può vedere, mentre la marea astronomica è risultata pressoché nella norma (Figura 30b), il forte vento di Scirocco e il ciclone di passaggio nel Nord Adriatico, hanno originato una marea meteorologica con un picco di circa 1 m (Figura 30c). Ricordiamo che una marea meteorologica è dovuta all'azione radente del vento, che accumula volumi d'acqua marina sottovento, e alla presenza di aree con bassa pressione atmosferica in alto Adriatico.

Se consideriamo che il picco di piena per muoversi da Venzone alla foce impiega mediamente circa 17 ore, 12 ore da Venzone a Latisana (Figura 2) più 5 ore da Latisana alla foce, possiamo dire che il picco di piena, registrato a Venzone alle ore 0:00 del 30 ottobre 2018 (Figura 29), è arrivato in foce alle ore 17 del 30 ottobre 2018. In tale istante il livello di marea in foce era di circa 32.5 cm (Figura 30), valore che, in un certo senso, ha aiutato il deflusso della portata massima. Infatti, se il picco di piena fosse arrivato in foce quando la marea raggiungeva il suo valore massimo (**123 cm**, Figura 30a) sicuramente il livello massimo in prossimità della foce sarebbe aumentato sensibilmente. Per inciso, il picco di marea, pari a **123 cm**, è stato rilevato alle ore 22:50 del 29 ottobre 2018 ed era composto da un livello astronomico di 30 cm e un livello meteorologico di 93 cm (Figure 30b e 30c).

A partire dall'idrogramma dei livelli idrometrici registrati a Venzone, utilizzando la scala di deflusso di Machne e Maione (eq.2) si è ricavato l'idrogramma delle portate di piena mostrato in Figura 31. Il picco di piena, pari a 2772 m³/s, è stato raggiunto a Venzone la notte del 30 ottobre 2018 alle ore 00 (Figura 31).

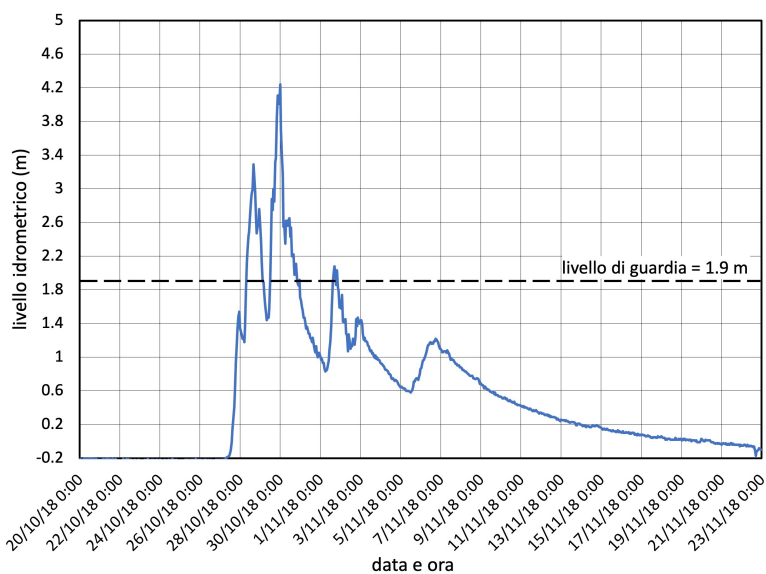


Figura 29. Livelli registrati dall'idrometro di Venzone nel periodo 20 ottobre - 23 novembre 2018.

Per stimare l'idrogramma di piena alla stretta di Pinzano, seguendo il suggerimento di Machne e Maione abbiamo incrementato del 5% l'idrogramma di Venzone (Figura 31), ottenendo il risultato mostrato in Figura 32. I tempi sono stati sfasati di 3 ore rispetto a Venzone (Tabella 1).

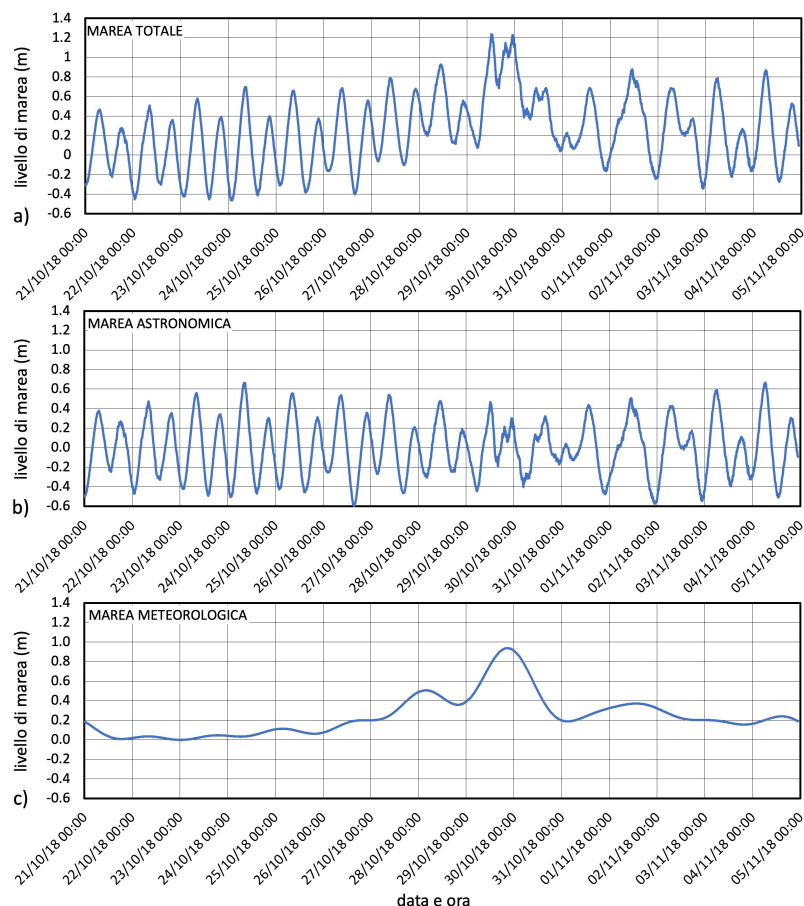


Figura 30. a) Livelli di marea registrati dal mareografo di Grado nel periodo 20 ottobre - 5 novembre 2018; b) componente di marea astronomica; c) componente di marea meteorologica. La somma di b) + c) restituisce a).

Per stimare, invece, l'idrogramma di piena alla confluenza con il torrente Cosa, abbiamo incrementato del 10% l'idrogramma di Venzone (Figura 31), ottenendo il risultato mostrato in Figura 33.

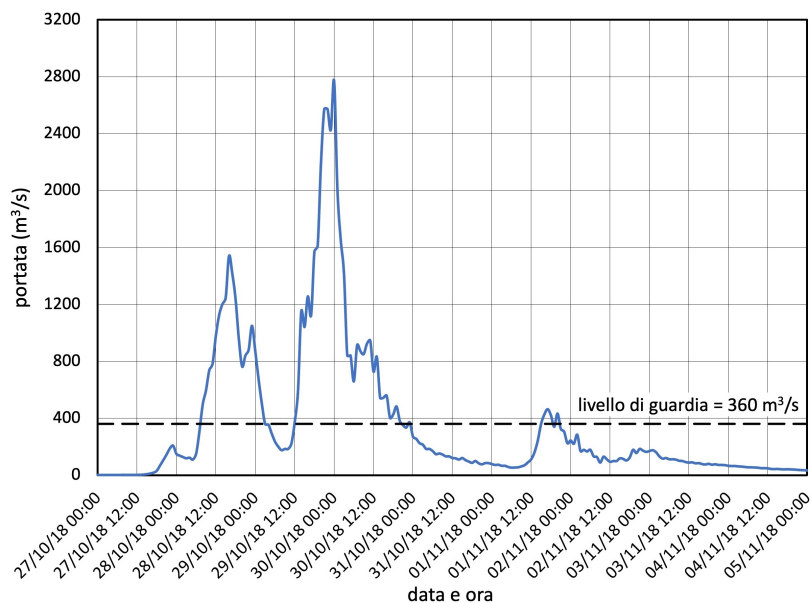


Figura 31. Idrogramma delle portate a Venzone relativo al periodo 27 ottobre - 5 novembre 2018, calcolato con la scala di Machne e Maione (eq.2). L'entità del picco di piena è pari a $2772 \text{ m}^3/\text{s}$.

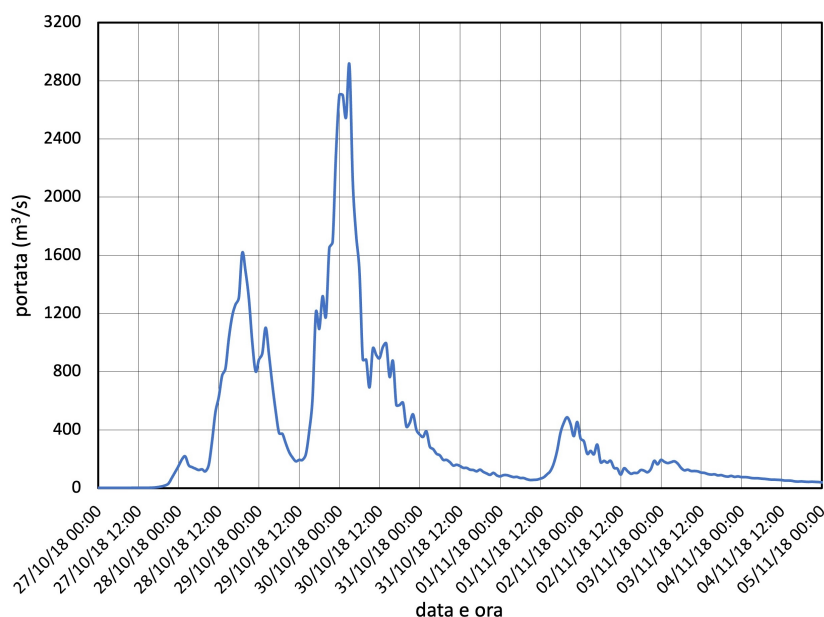


Figura 32. Idrogramma delle portate a Pinzano relativo al periodo 27 ottobre - 5 novembre 2018, ottenuto incrementando del 5% l'idrogramma delle portate di Venzone (Machne and Maione 1982) e ritardando i tempi di 3 ore rispetto a Venzone (Tabella 1). L'entità del picco di piena è pari a **2910** m³/s.

I tempi, in questo caso, sono stati sfasati di 4.5 ore rispetto a Venzone (Tabella 1).

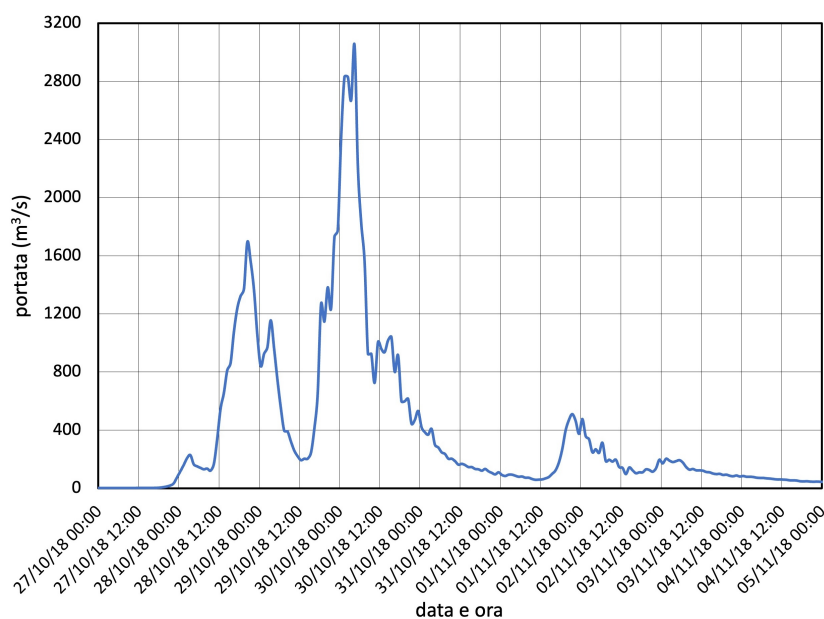


Figura 33. Idrogramma delle portate alla confluenza con il torrente Cosa relativo al periodo 27 ottobre - 5 novembre 2018, ottenuto incrementando del 10% l'idrogramma delle portate di Venzone (Machne and Maione 1982) e ritardando i tempi di 4.5 ore rispetto a Venzone (Tabella 1). L'entità del picco di piena è pari a **3050** m³/s.

Per l'evento in questione è stato stimato un tempo di ritorno **T = 24 anni**.

E' interessante osservare come, sostanzialmente, in data 27 ottobre 2018 inizino sia la piena (Figura 31) che la marea meteorologica (Figura 30c). Questa coincidenza, che non

deve stupire, accade spesso per il Tagliamento perché entrambi i fenomeni sono legati ai venti di Scirocco. Tali venti, infatti, sono all'origine sia delle piogge più significative sul bacino che degli incrementi di marea in alto Adriatico, rendendo in qualche modo i due fenomeni correlati tra loro.

6.1.1 Simulazione dell'evento di piena Vaia

Abbiamo già osservato (§ 5) che le piene più alte **fino a Madrisio** presentano un fenomeno di laminazione sostanzialmente trascurabile e che la forma dell'idrogramma rimane pressoché invariata (Petti 2007). Per questi motivi, nelle simulazioni che seguono applichiamo nella sezione di Madrisio l'idrogramma di piena subito a valle della confluenza con il torrente Cosa, ritardato di 7 ore rispetto a Venzona. Tale ritardo medio è stato desunto dalle registrazioni dei rispettivi idrometri, valore che per altro coincide con i ritardi medi già stimati e riportati in Tabella 1. Poiché la parte più significativa dell'evento è quella limitata all'arco temporale 28 ottobre - 1 novembre 2018, si è deciso di limitare la simulazione a questo intervallo di tempo (Figura 34).

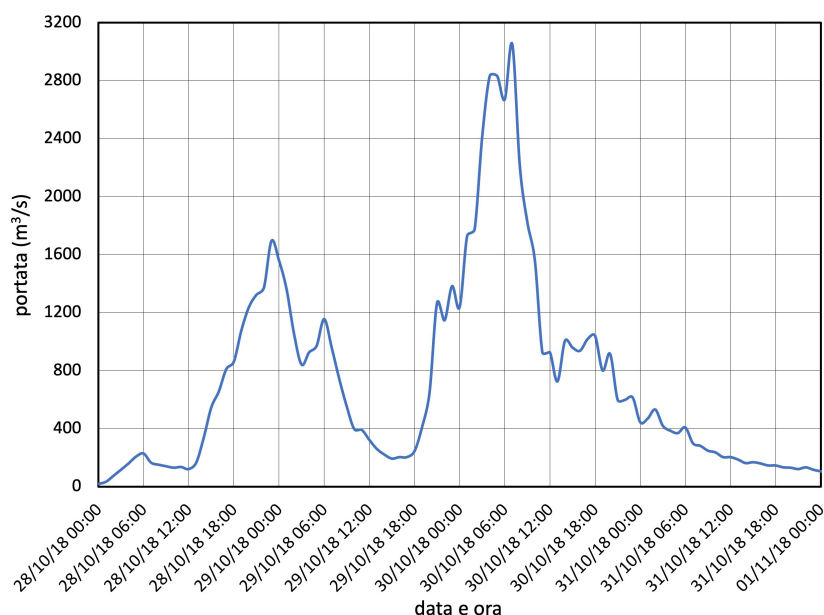


Figura 34. Idrogramma delle portate di piena a Madrisio relativo al periodo 28 ottobre - 1 novembre 2018.

In merito alla marea in foce, vale la pena osservare che normalmente la marea astronomica, che in Adriatico si muove in senso antiorario, tra Grado e la foce del Tagliamento presenta un ritardo di fase di circa 25 minuti. Quando, però, alla marea astronomica si sovrappone una marea meteorologica, tendenzialmente questo ritardo diminuisce. Il motivo è abbastanza semplice e risiede nel fatto che le cause generatrici di una marea meteorologica sono: venti di scirocco e aree cicloniche che transitano nel nord Adriatico; entrambi i fenomeni generano correnti dirette da sud a nord che tendono a ridurre il ritardo di fase. Per questi motivi alla fine, trattandosi di un ritardo che potrebbe essere limitato a poco più di una decina di minuti, si è ritenuto opportuno assumere come marea alla foce del fiume Tagliamento la stessa marea registrata dal mareografo di Grado (Figure 30a e 35).

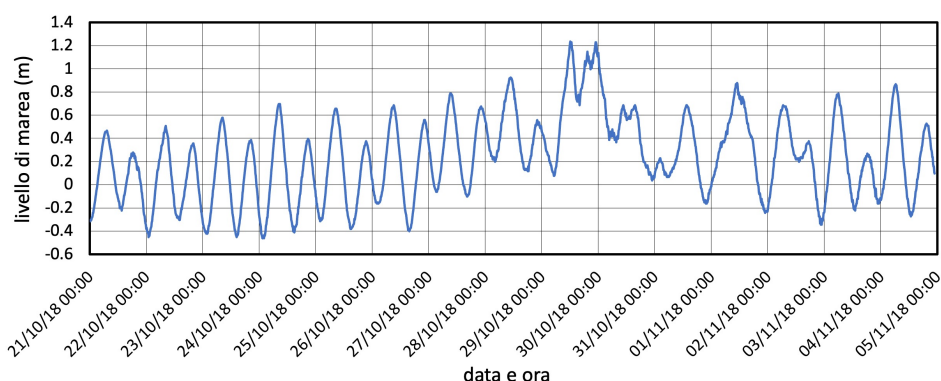


Figura 35. Livello di marea alla foce del fiume Tagliamento relativo al periodo 21 ottobre - 5 novembre 2018.

In Figura 36 è riportata una foto scattata nella direzione della banchina fissa di Marina Punta Verde durante l'evento di piena. La foto mostra che l'acqua ha sommerso il primo dei gradini che collegano il parcheggio alla banchina fissa. L'entità del livello, pari a 1.66 m, è stata stimata durante la campagna topografica descritta al § 5.1.



Figura 36. 30 ottobre 2018: il livello d'acqua all'interno di Marina Punta Verde raggiunge il primo gradino della scala che collega il parcheggio auto alla banchina fissa. In questa immagine la banchina fissa risulta sommersa.

Di seguito si riferisce sui risultati ottenuti con le simulazioni, confrontati, per quanto riguarda i livelli, con il livello idrometrico misurato a Latisana e con il livello rilevato all'interno di Marina Punta Verde (Figura 36).

In Figura 37 sono riportati i livelli simulati e registrati in corrispondenza dell'idrometro di Latisana durante la piena Vaia. Si osservi come il modello idraulico 2DH utilizzato colga piuttosto bene le oscillazioni di marea a Latisana prima della piena, cosa non comune ad altri modelli. Come si può vedere, a Latisana l'accordo in corrispondenza dei picchi relativi di piena è molto buono, mentre per quanto riguarda le fasi di stanca (minimi relativi) le differenze risultano più consistenti.

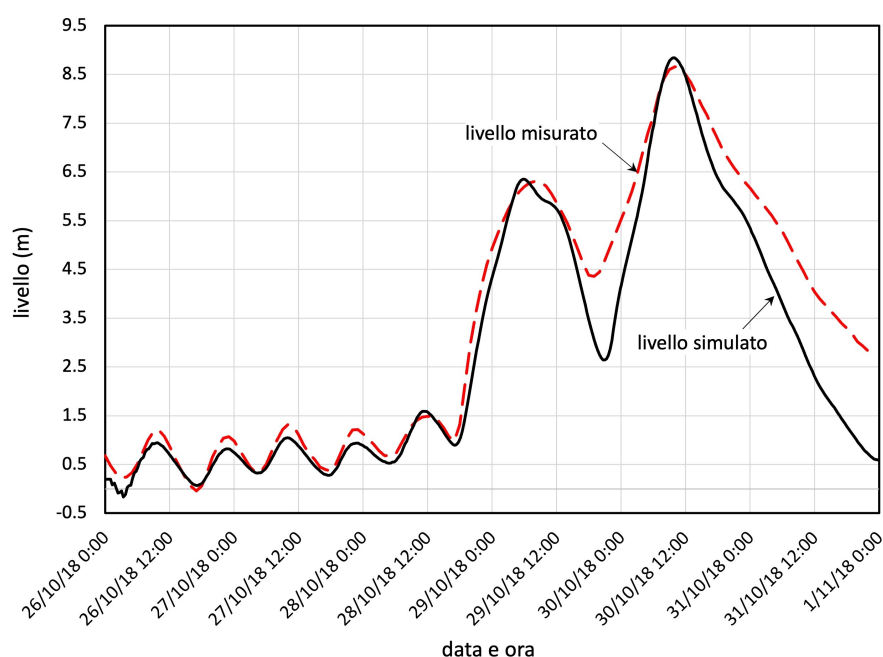


Figura 37. Confronto dei livelli di piena misurati (linea tratteggiata) e simulati (linea continua) in corrispondenza dell'idrometro di Latisana (ponte ferroviario).



Figura 38. Idrometro di Latisana (ponte ferroviario).

Premesso che ciò che interessa veramente sono i picchi di piena, le cause che portano alle differenze di livello nelle fasi di stanca sono almeno due. La prima è legata alla posizione non proprio felice dell'idrometro (radar) di Latisana a monte del ponte e in prossimità delle pile (Figura 38), posizione che, nelle fasi di stanca, a seguito dell'accumulo di legname davanti alla pila tende a sovrastimare il livello reale. La seconda, forse più influente, è legata alla modellazione delle resistenze in alveo. Tutti i modelli basati sulla legge di parete di Manning rappresentano le scabrezze con un coefficiente di Gauckler-

Strickler (o di Manning), e questo vale per tutte le celle d'alveo. Nelle golene, questa legge va ancora bene nel caso di vegetazione sommersa, ma quando si è in presenza di vegetazione emersa, come per esempio gli alberi, i tronchi di questi ultimi danno luogo ad una resistenza aggiuntiva che non è più di parete ma d'ostacolo. In questi casi sarebbe opportuno passare ad una rappresentazione delle resistenze con leggi proprie degli ostacoli in alveo o, meglio ancora, a leggi miste. Tutto ciò, però, complica non poco il modello e l'argomento è tutt'oggi oggetto di dibattito scientifico. Poiché, come già detto, ciò che realmente interessa in questo studio è cogliere bene i picchi di piena, riteniamo che i risultati ottenuti, sebbene sottostimino le fasi di stanca, siano ampiamente soddisfacenti.

Verificata la coerenza dei livelli, si può passare alla stima delle portate d'acqua derivate dallo scolmatore Cavrato e transitate nel tratto di Tagliamento Cesarolo-foce. Le sezioni prese come riferimento sono quelle indicate con '1' e '2' in Figura 39.

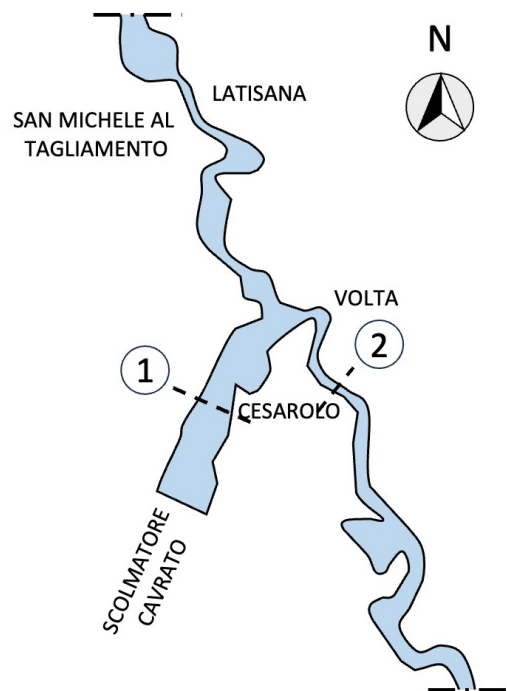


Figura 39. Sezioni di riferimento '1' e '2' utilizzate per le stime delle portate derivate dal Cavrato e transitate nel tratto terminale del fiume Tagliamento.

Avvalendosi dei risultati delle simulazioni, le portate $Q(t)$ nelle sezioni indicate in Figura 39 sono state ricavate utilizzando la classica definizione di portata volumetrica in una sezione

$$Q(t) = \int_{\Omega} \vec{v} \cdot \vec{n} d\Omega, \quad (20)$$

dove $\vec{v}$ è la velocità in un generico punto della sezione, $\vec{n}$ la normale alla sezione in quel punto e Ω la superficie della sezione.

In Figura 40 è riportato l'andamento delle portate, in funzione del tempo, a Madrisio, Latisana, all'incile del Cavrato (sez. 1 di Figura 39) e a Volta (sez. 2 di Figura 39). Osservando la figura si coglie un aspetto molto interessante: a monte della stretta di Latisana si verifica un invaso che dà origine a una laminazione. Questo fenomeno naturale era già

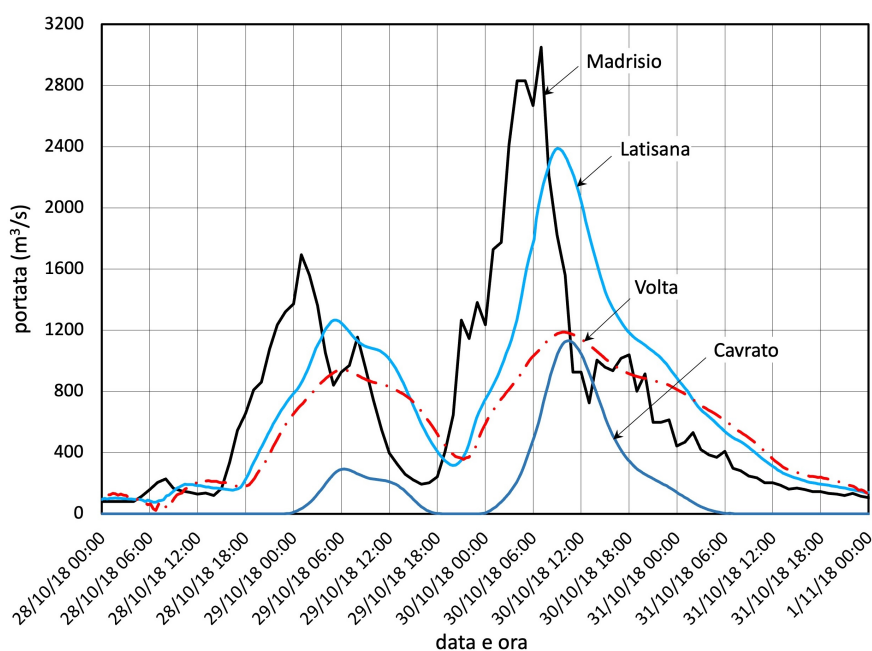


Figura 40. Evento Vaia: andamento delle portate a Madrisio (linea nera continua), a Latisana (linea azzurra continua), a Volta (linea rossa tratto-punto) e all'incile del Cavrato (linea blu continua).

stato osservato e messo in evidenza da Petti (2007), unitamente ad un comportamento analogo che si verifica a monte della stretta di Pinzano.

Mentre i volumi sottesi dagli idrogrammi di piena a Madrisio e Latisana sono gli stessi, nel pieno rispetto del principio di conservazione della massa, il volume invasato a monte di Latisana durante la tempesta Vaia, nel caso del primo picco risulta $21.0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, nel caso del secondo picco $39.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Sono proprio questi volumi invasati che abbattano le portate di picco a Latisana, nel rispetto di un processo di laminazione naturale d'alveo.

Per quanto riguarda le portate, durante l'evento Vaia la portata massima transitata a Latisana è risultata di $2389 \text{ m}^3/\text{s}$, quella massima scolmata dal Cavrato è stata di $1131 \text{ m}^3/\text{s}$ mentre quella massima che ha proseguito verso la foce è risultata di $1186 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 40). Si può osservare come il picco di piena a Latisana risulti inferiore al picco di Madrisio ($3050 \text{ m}^3/\text{s}$) e questo, come già detto, a seguito della laminazione che si verifica nel tratto di fiume a monte della stretta di Latisana. L'abbattimento del picco di piena da $3050 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2389 \text{ m}^3/\text{s}$ comporta una laminazione naturale del **21.7%**.

Il confronto 'livelli misurati - livelli simulati' a Latisana risulta molto confortante ai fini dell'accuratezza di previsione del modello, così come il confronto del livello d'acqua raggiunto sulla banchina fissa di Marina Punta Verde durante l'evento (Figura 36). Tale livello, che a seguito del rilievo topografico fatto con la campagna del 30 luglio 2024 è risultato essere di **1.66 m**, risulta, a meno di un errore del **2.4%**, praticamente coincidente con il livello massimo di **1.70 m** raggiunto sulla banchina con la simulazione. Questi due risultati, decisamente positivi, si aggiungono alle numerose validazioni già fatte per il modello idraulico 2DH nel 2007 (Petti 2007).

Nelle Figure 41 e 42 sono riportati i tiranti d'acqua raggiunti dalla piena durante la fase di picco in prossimità di Marina Azzurra, lo Zoo, Marina Punta Verde, Marina Uno e il Camping Village Pino Mare. Nelle Figure 43 e 44, invece, sono riportati i contour delle velocità massime raggiunte nelle medesime aree.



Figura 41. Evento di piena Vaia: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde. La linea gialla indica il contorno della mesh.



Figura 42. Evento di piena Vaia: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Uno e del Camping Village Pino Mare. La linea gialla indica il contorno della mesh.



Figura 43. Evento di piena Vaia: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde. La linea gialla indica il contorno della mesh.

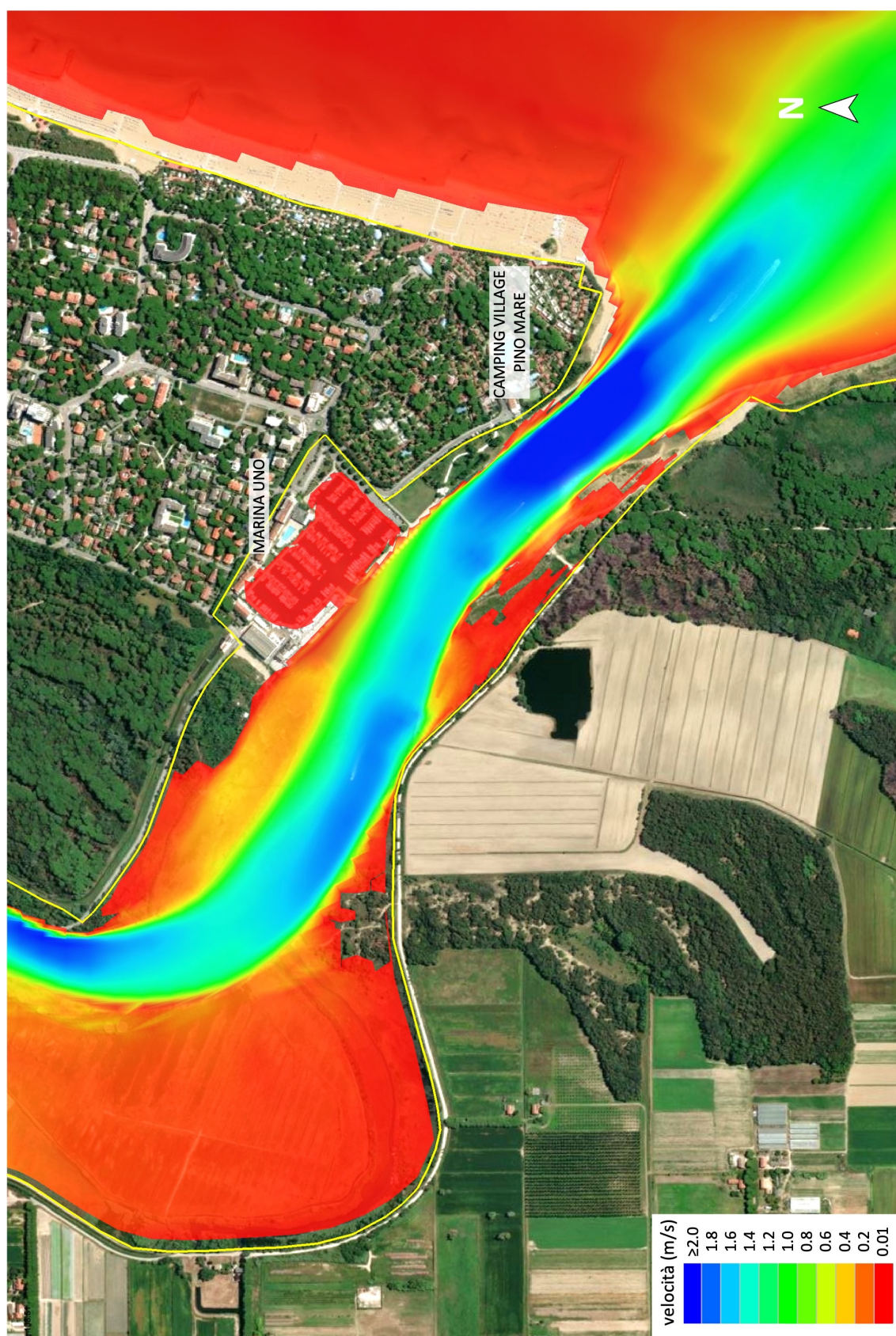


Figura 44. Evento di piena Vaia: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Uno e del Camping Village Pino Mare. La linea gialla indica il contorno della mesh.

6.2 Evento di piena ottobre-novembre 2023

Tra il 24 ottobre 2023 e il 9 novembre 2023 in Tagliamento si verificarono 5 piene consecutive: le prime due e l'ultima di modesta entità, la terza e la quarta, invece, più significative. La quarta piena, quella più alta, raggiunse a Venzone il picco di **2964 m³/s** alle ore 00:00 (UTC) del 3 novembre 2023. A tale picco corrisponde un periodo di ritorno **T = 30 anni** (Figura 45).

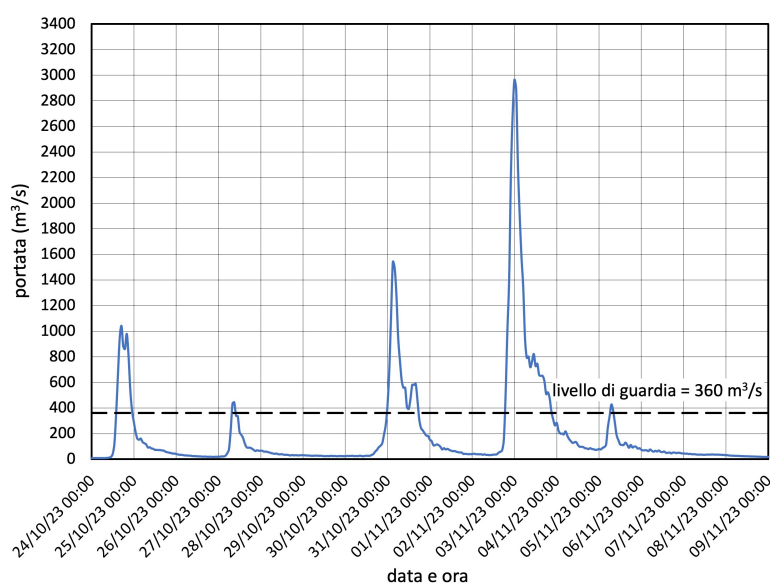


Figura 45. Idrogramma delle portate di piena a Venzone relativo al periodo 24 ottobre - 9 novembre 2023.

Applicando alle portate di Venzone un incremento del 5%, come suggerito da Machne and Maione (1982), nella sezione di chiusura di Pinzano si ha l'idrogramma delle portate, sempre ritardato di 3 ore, riportato in Figura 46.

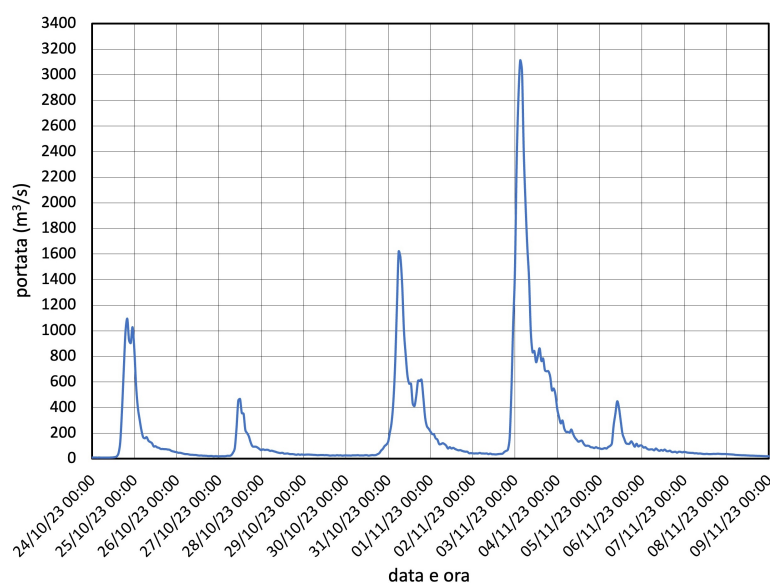


Figura 46. Idrogramma delle portate a Pinzano relativo al periodo 24 ottobre - 9 novembre 2023, ottenuto incrementando del 5% l'idrogramma delle portate di Venzone e ritardando i tempi di 3 ore rispetto a Venzone (Tabella 1). L'entità del picco assoluto di piena è pari a **3112 m³/s**.

Per stimare, invece, l'idrogramma di piena alla confluenza con il torrente Cosa, abbiamo incrementato del 10% l'idrogramma di Venzone (Figura 45), ottenendo il risultato mostrato in Figura 47.

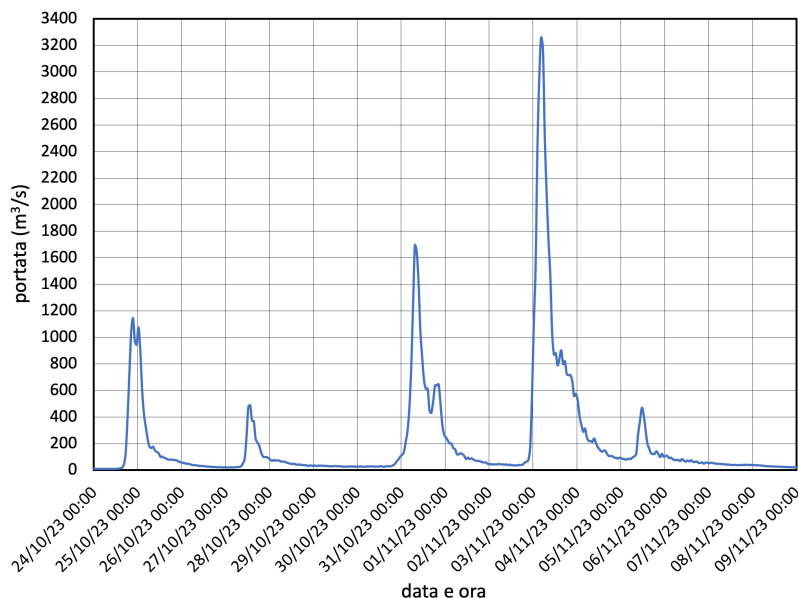


Figura 47. Idrogramma delle portate alla confluenza con il torrente Cosa relativo al periodo 24 ottobre - 9 novembre 2023, ottenuto incrementando del 10% l'idrogramma delle portate di Venzone e ritardando i tempi di 4.5 ore rispetto a Venzone (Tabella 1). L'entità del picco assoluto di piena è pari a **3260 m³/s**.

Per quanto riguarda le maree in foce, il 18 ottobre iniziò in alto Adriatico una lunga marea meteorologica che raggiunse il suo culmine di **80 cm** alle 1:45 del 3 novembre 2023 (Figura 48c). Per quanto riguarda la marea astronomica, invece, il culmine di **83 cm** fu raggiunto nella fase di sizigia alle ore 9:45 del 27 ottobre 2023 (Figura 48b). La marea complessiva, somma della marea astronomica più quella meteorologica, raggiunse il picco di **143 cm** alle ore 9:45 del 27 ottobre 2017 (Figura 48a).

Fortunatamente, il picco di marea astronomica non ha coinciso con il picco di marea meteorologica e, soprattutto, quando il picco di piena arrivò in foce non erano presenti né l'uno né l'altro.

6.2.1 Simulazione dell'evento di ottobre-novembre 2023

Come al solito, anche per questa simulazione applichiamo come condizione al contorno nella sezione di Madrisio l'idrogramma di piena ricavato alla confluenza con il Torrente Cosa, ritardato di 7 ore rispetto a Venzone (Tabella 1).

Poiché la parte più significativa dell'evento è limitata al periodo 30 ottobre - 5 novembre 2024, abbiamo deciso di limitare la simulazione a questo intervallo di tempo (Figura 49).

Per quanto riguarda la marea in foce, sempre per le ragioni esposte al § 6.1.1, si è assunta la marea registrata dal mareografo di Grado (Figura 50).

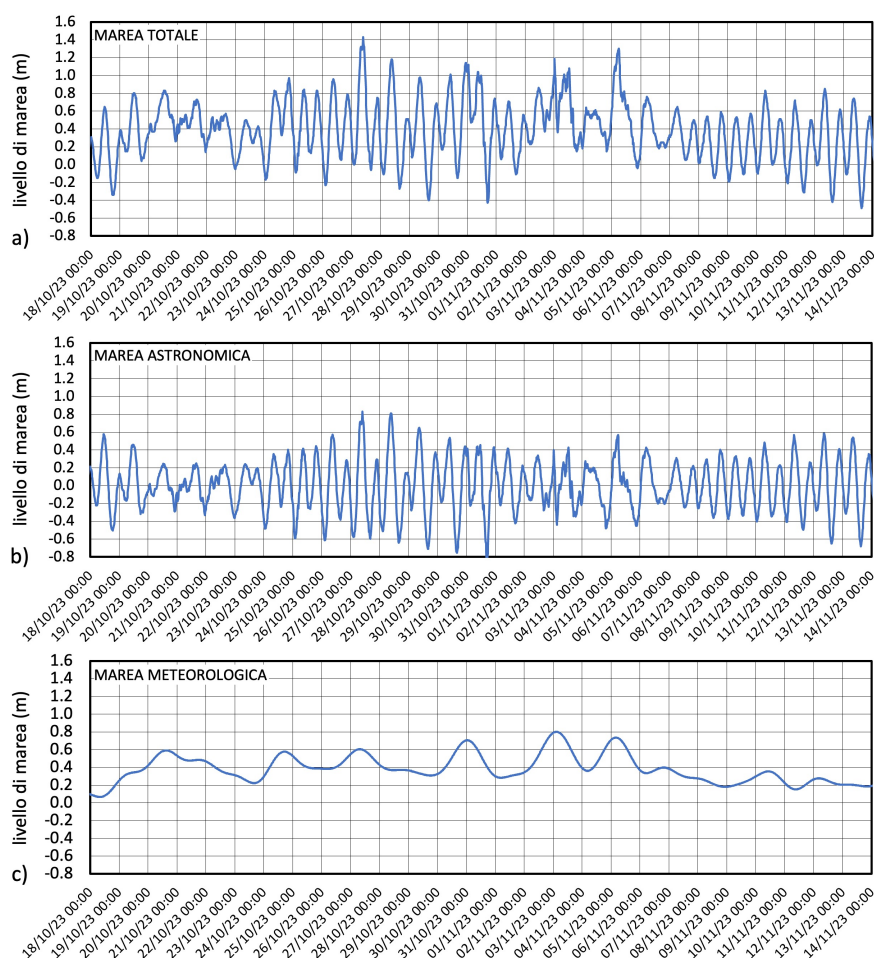


Figura 48. a) Livelli di marea registrati dal mareografo di Grado nel periodo 18 ottobre - 14 novembre 2023; b) componente di marea astronomica; c) componente di marea meteorologica. La somma di b) + c) restituisce a).

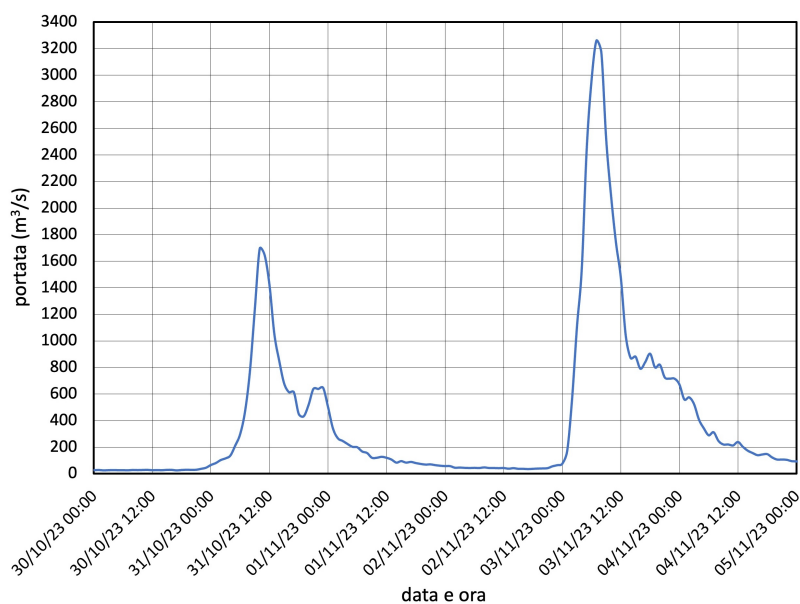


Figura 49. Idrogramma delle portate di piena a Madrisio relativo al periodo 30 ottobre - 5 novembre 2023.

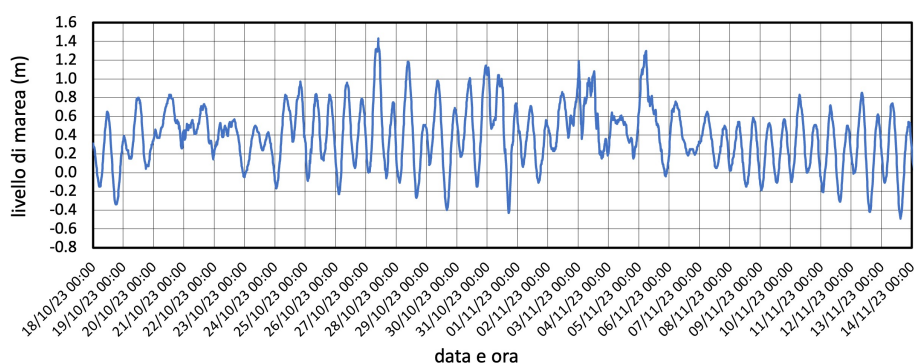


Figura 50. Livello di marea alla foce del fiume Tagliamento relativo al periodo 18 ottobre - 14 novembre 2023.

In Figura 51 è riportata una foto che mostra il livello massimo raggiunto dall'acqua all'interno di Marina Punta Verde durante l'evento di marea di ottobre - novembre 2023. L'entità del livello, pari a **1.63 m**, è stata stimata durante la campagna topografica descritta al § 5.1



Figura 51. Livello massimo raggiunto dall'acqua all'interno di Marina Punta Verde durante l'evento di piena di ottobre - novembre 2023.

Nella Figura 52 sono riportati i livelli simulati e registrati dall'idrometro di Latisana durante l'evento di ottobre - novembre 2023. Come si può vedere, l'accordo in corrispondenza dei picchi relativi di piena risulta ottimo nel caso del primo picco e buono nel caso del secondo picco.

Si tenga conto di quanto detto all'inizio a proposito del fatto che "tutti i modelli numerici forniscono solo un'approssimazione più o meno accurata della realtà". In questi termini, premesso che tutti i modelli, compreso il nostro, lavorano sui tiranti e non sui livelli, la sottostima del secondo picco fornita dal modello a fronte del picco misurato (Figura 52) si traduce in un errore del **3.3%** nella stima del tirante massimo, errore piccolo e più che accettabile in un contesto complesso come quello del fiume Tagliamento. Naturalmente, in fase progettuale si dovrà tenere conto di simili errori di approssimazione, ma questo fa parte della normalità quando si opera con la modellistica numerica.

Sempre in merito all'approssimazione fornita dai modelli, nelle fasi di stanca (minimi relativi), si presentano le solite differenze, già motivate in precedenza.

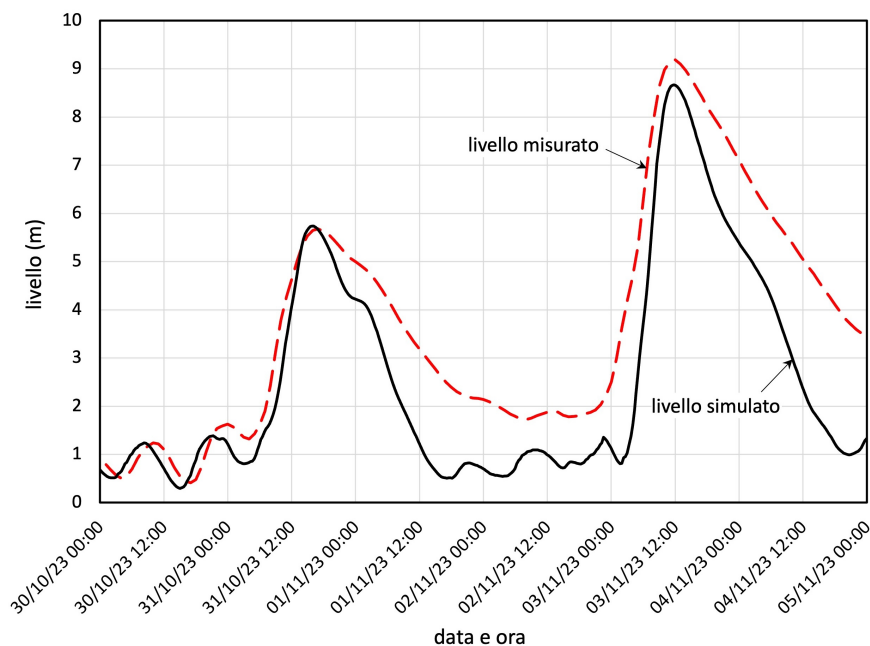


Figura 52. Confronto dei livelli di piena misurati (linea tratteggiata) e simulati (linea continua) in corrispondenza dell'idrometro di Latisana (ponte ferroviario).

Anche in questo caso sono state stimate le portate d'acqua derivate dallo scolmatore Cavrato e transitate nel tratto di Tagliamento Cesarolo-foce. Le sezioni prese come riferimento sono sempre quelle indicate con '1' e '2' in Figura 39.

In Figura 53 è riportato l'andamento delle portate, in funzione del tempo, a Madrisio, Latisana, all'incile del Cavrato (sez. 1 di Figura 39) e a Volta (sez. 2 di Figura 39).

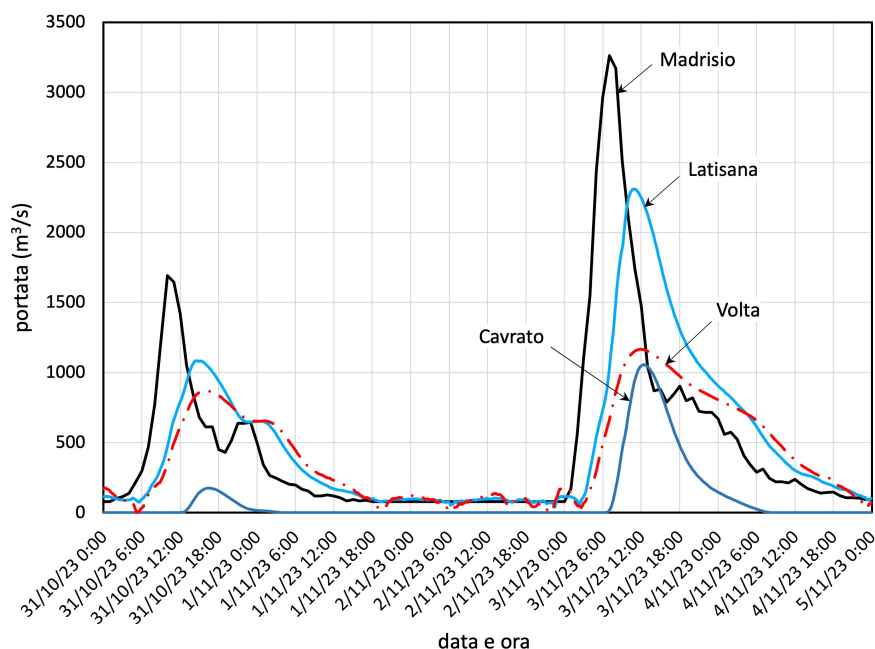


Figura 53. Evento di ottobre - novembre 2023: andamento delle portate a Madrisio (linea nera continua), a Latisana (linea azzurra continua), a Volta (linea rossa tratto-punto) e all'incile del Cavrato (linea blu continua).

Per quanto riguarda il volume invasato a monte di Latisana durante l'evento di ottobre - novembre 2023, nel caso del primo picco risulta $18.31 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, nel caso del secondo

picco $40.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Incidentalmente osserviamo che questi volumi sono molto simili a quelli invasati durante l'evento Vaia.

In merito alle portate, durante l'evento di ottobre - novembre 2023 la portata massima transitata a Latisana è risultata essere di $2311 \text{ m}^3/\text{s}$, quella massima scolmata dal Cavrato è stata di $1057 \text{ m}^3/\text{s}$ mentre quella massima che ha proseguito verso la foce è risultata di $1166 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 53). Si può osservare, ancora una volta, come il picco di piena a Latisana risulti inferiore al picco di Madrisio ($3261 \text{ m}^3/\text{s}$) e questo, come già detto, a seguito della laminazione che si verifica nel tratto di fiume a monte della stretta di Latisana. L'abbattimento del picco di piena da $3261 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2311 \text{ m}^3/\text{s}$ comporta una laminazione naturale del **29.1%**.

Anche per questo evento, il confronto 'livelli misurati - livelli simulati' a Latisana risulta essere confortante, con un errore massimo nel tirante del secondo picco del 3.3%. Per quanto riguarda il confronto del livello d'acqua raggiunto sulla banchina fissa di Marina Punta Verde durante l'evento (Figura 51), con il rilievo topografico fatto durante la campagna del 30 luglio 2024 si è misurato un valore di **1.63 m**, che, a meno di un errore del **1.8%**, risulta praticamente coincidente con il livello massimo di **1.66 m** raggiunto sulla banchina con la simulazione.

Nelle Figure 55 e 56 sono riportati i tiranti d'acqua raggiunti dalla piena durante la fase di picco in prossimità di Marina Azzurra, lo Zoo, Marina Punta Verde, Marina Uno e il Camping Village Pino Mare. Nelle Figure 57 e 58, invece, sono riportati i contour delle velocità massime raggiunte nelle medesime aree.

Riepilogando, quest'ultimo risultato, assieme a quello dell'evento Vaia del 2018 e alle validazioni già fatte per il modello idraulico 2DH nel 2007 (Petti 2007), confermano la qualità e la bontà del modello, rendendo possibili, a questo punto, simulazioni sufficientemente accurate di ipotetici scenari futuri. A tal proposito, ricordiamo che l'interesse primario di questo studio è l'allagabilità delle aree in cui operano le aziende che lo hanno commissionato.



Figura 54. 3 novembre 2024 - fase di esaurimento della piena: la banchina fissa di Marina Punta Verde si sta prosciugando.



Figura 55. Evento di ottobre - novembre 2023: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde.



Figura 56. Evento di ottobre - novembre 2023: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Uno e il Camping Village Pino Mare.



Figura 57. Evento di ottobre - novembre 2023: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde. La linea gialla indica il contorno della mesh.

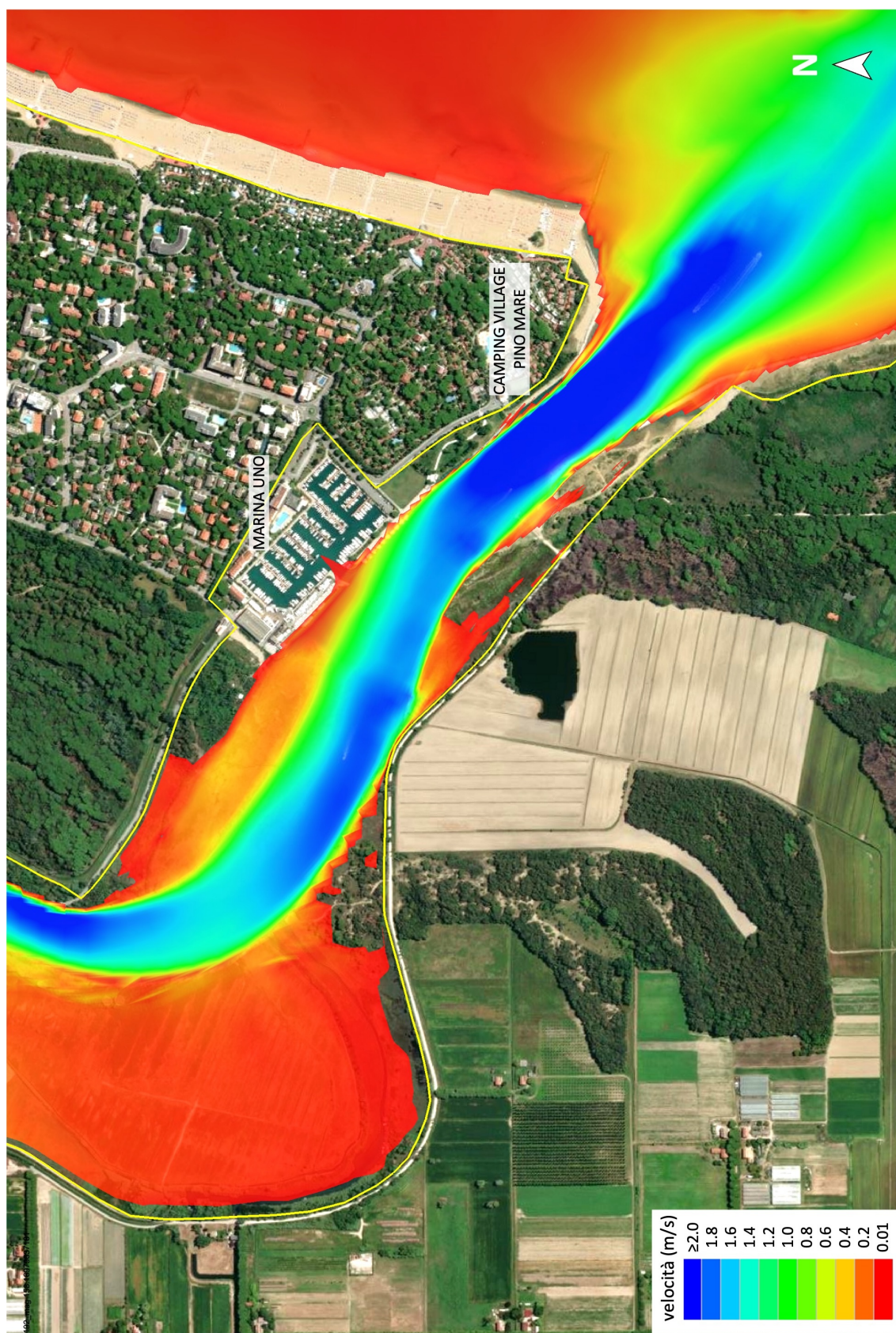


Figura 58. Evento di ottobre - novembre 2023: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Uno e del Camping Village Pino Mare. La linea gialla indica il contorno della mesh.

7 Possibili scenari futuri

Terminata la fase di validazione, ci occupiamo adesso di ciò che potrebbe succedere nel tratto di Tagliamento Cesarolo-foce se la ripartizione delle portate al nodo con il Cavrato fosse:

- a) quella vecchia prevista dal PAI 1997;
- b) quella nuova prevista dal PGRA 2021.

Per studiare questi scenari dobbiamo scegliere sia l'idrogramma di piena di progetto che la marea di progetto.

Per quanto riguarda l'idrogramma di piena di progetto faremo riferimento a quello stabilito dall'Autorità di bacino nel PGRA 2021 (Figura 59), osservando che in termini di portata massima, che poi è il dato più importante, presenta lo stesso valore della portata massima stabilita dal PAI 1997.

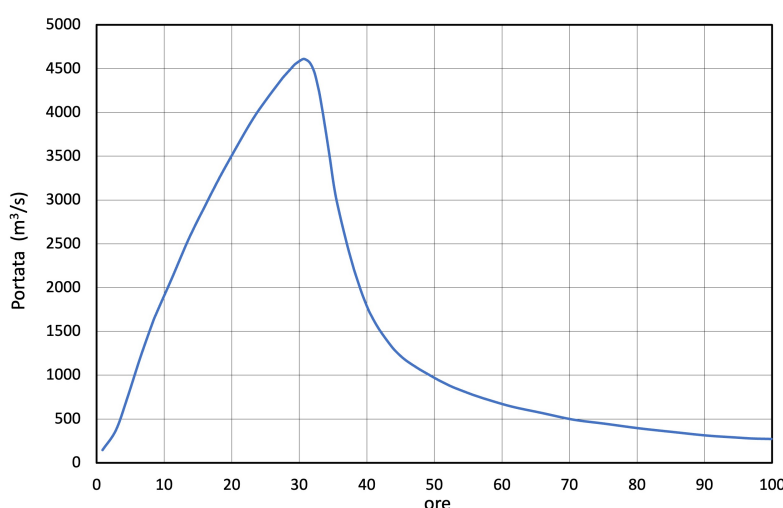


Figura 59. Idrogramma di piena di progetto stabilito dal PGRA 2021.

Per quanto riguarda la marea di progetto sono necessarie ulteriori considerazioni rispetto a quanto detto fino ad adesso.

Al §2.2 abbiamo trovato i massimi di marea $\eta_{cr}(T)$ per ogni periodo di ritorno T , tuttavia, per imporre la condizione al contorno di marea è necessario conoscerne anche l'evoluzione temporale. Inoltre, è necessario tenere conto del fatto che il livello medio mare sta crescendo.

Per quanto riguarda l'evoluzione temporale si può ricorrere ad una rappresentazione sinusoidale, tenendo però presente che non sarebbe corretto imporre un'oscillazione sinusoidale di ampiezza $\pm\eta_{cr}(T)$, perché se da un lato questa rappresenta bene il massimo di marea, per il minimo fornisce un valore eccessivamente basso. Poiché, come visto, i massimi di marea si verificano durante le fasi di sizigie, se conoscessimo l'ampiezza di marea di sizigie potremmo risolvere il problema abbastanza agevolmente.

In uno studio svolto dal Laboratorio di Idraulica UniUd per la Regione FVG (Petti 2023) è stata fatta un'analisi accurata delle maree di sizigie in alto Adriatico presenti nel periodo 1991-2021. In particolare, rispetto al livello medio mare di ogni anno, è stato trovato che la media dei 31 massimi assoluti annuali era di 83 cm, mentre la media dei

31 minimi assoluti era 84 cm. Assumendo che il procedimento di media su più anni individui solo l'ampiezza di marea astronomica di sizigie $\pm a_{max}^{(sizigie)}$ e assumendo di poter rappresentare l'oscillazione temporale di marea con un'onda sinusoidale, fissata l'ampiezza di marea astronomica di sizigie $a_{max}^{(sizigie)} = 83$ cm, l'evoluzione temporale $\eta(t)$ della marea risulta (Figura 60)

$$\eta(t) = a_{max}^{(sizigie)} \sin\left(\frac{2\pi}{T_m}t\right) + \eta_{cr}(T) - a_{max}^{(sizigie)}, \quad (21)$$

dove $T_m = 12$ ore è il periodo della marea semidiurna presente in Adriatico. La quantità $\eta_{cr}(T) - a_{max}^{(sizigie)}$ rappresenta il contributo meteorologico alla marea astronomica di sizigie. Il valore di η_{cr} dipende da T e per trovarlo possiamo usare sia il grafico di Figura 18, sia i dati riportati in Tabella 3.

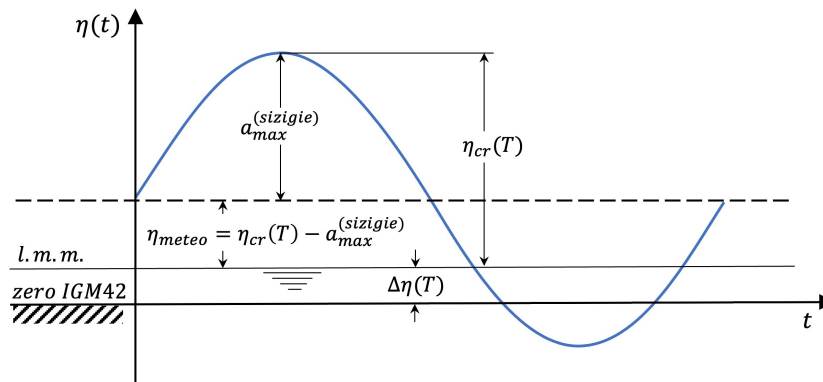


Figura 60. Evoluzione temporale della marea di progetto, riferita al *l.m.m.*, da associare alla portata di progetto.

Al livello di marea individuato con la (21), riferito al livello medio mare, deve essere aggiunto il livello medio mare $\Delta\eta(T)$ (Figura 60), riferito allo zero IGM42, presente nell'anno di riferimento, livello che può essere stimato con la relazione

$$\Delta\eta(T) = 3.74 \cdot 10^{-3} T \quad (m), \quad (22)$$

dove $3.74 \cdot 10^{-3}$ m/anno è il tasso di crescita del livello medio mare stimato negli ultimi 33 anni in alto Adriatico (Figura 16).

8 Piena con portata di picco a Latisana di 4000 m³/s nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997

Come da PAI 1997, in questa simulazione ammettiamo che a monte della sezione di Madrisio esistano una o più opere di laminazione tali da abbattere il picco della piena di progetto dai 4600 m³/s ai 4000 m³/s ammessi nella sezione di Latisana. Naturalmente, la forma dell'idrogramma di piena a valle delle opere di laminazione dipende da come viene gestita la regolazione temporale degli invasi, tuttavia, è opportuno ricordare che ciò che interessa in questo studio è l'abbattimento del picco di piena, dal momento che i fenomeni di esondazione si verificano proprio in corrispondenza di quest'ultimo. In tal senso, anche una legge di laminazione come quella ipotizzata in Figura 61 (linea continua), scelta per le simulazioni successive, può essere ritenuta accettabile.

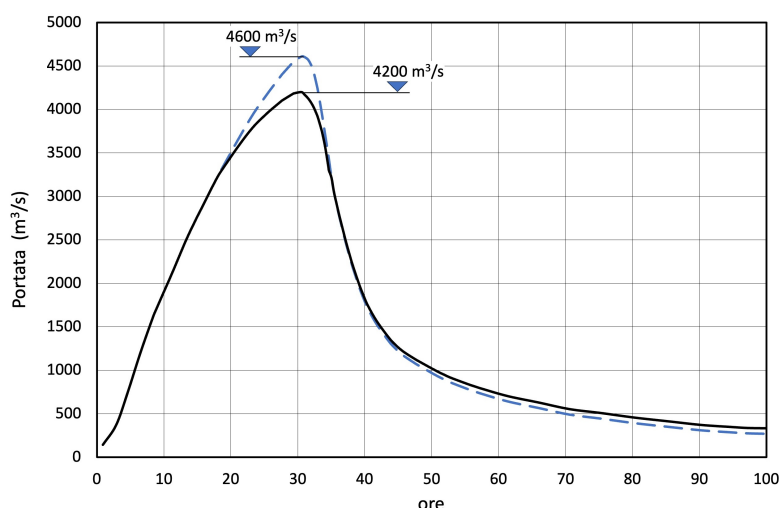


Figura 61. Idrogramma di piena di progetto stabilito dal PGRA 2021 nella sezione di Pinzano (linea tratteggiata) e dopo una laminazione a monte di Madrisio tale da ridurne il picco a 4200 m³/s (linea continua).

Si osservi che il picco di 4200 m³/s ipotizzato a Madrisio è più alto del picco di 4000 m³/s voluto a Latisana, ma questo non è un controsenso dal momento che a seguito della laminazione naturale che si verifica tra Madrisio e Latisana, nella sezione di Latisana alla fine il picco si riduce a 4000 m³/s. È interessante osservare che per portare il picco della piena di progetto da 4600 m³/s a 4200 m³/s, con la legge di laminazione evidenziata in Figura 61 è sufficiente trattenere, tra Pinzano e Madrisio, un volume d'acqua di circa **15 · 10⁶ m³**. Naturalmente, è necessario verificare che anche le quote arginali interessate dall'invaso che si crea prima di Latisana siano sufficienti a contenere il volume invasato, ma questo esula dagli scopi del presente studio.

Abbiamo già osservato che i picchi delle piene massime annuali del fiume Tagliamento risentono in maniera quasi impercettibile delle variazioni climatiche e questo grazie all'inerzia del bacino. La variabile influenzata dalle variazioni climatiche, invece, è la frequenza delle piene, ma questo non incide sui fenomeni di esondazione, legati ai picchi di piena massimi annuali. Per quanto riguarda le maree, invece, il discorso è diverso, perché purtroppo le variazioni climatiche influiscono pesantemente sul livello medio mare; basti pensare come negli ultimi 30 anni il suo trend di crescita sia quasi triplicato.

Poiché, da un punto di vista squisitamente statistico, una piena centenaria potrebbe verificarsi sia "domani", cioè con un livello medio mare come quello attuale, sia a lungo termine, cioè con un livello medio mare stimabile tra 100 anni, in linea di principio dovremmo tenerne conto. A tutto ciò, si aggiunge l'incognita dello sfasamento in foce tra la portata della piena di progetto e il livello della marea di progetto: se i due eventi fossero in fase, caso più gravoso, i livelli si sommerebbero, mentre se i due eventi fossero in opposizione di fase, caso più favorevole, i livelli si sottrarrebbero.

Per quanto riguarda il livello medio mare da abbinare alla piena centenaria, cioè quello di oggi o quello tra 100 anni, riteniamo che sia interesse delle Società sapere cosa accade loro oggi e non quello che accadrebbe tra cento anni, di interesse solo per una progettazione di opere o interventi in grado di far fronte all'innalzamento del livello medio mare, progettazione che non è certo di competenza delle Società. Di conseguenza, nel seguito prenderemo in considerazione solo il livello medio mare attuale, stimato in $\Delta\eta = 5$

cm al 2021 (Figura 16).

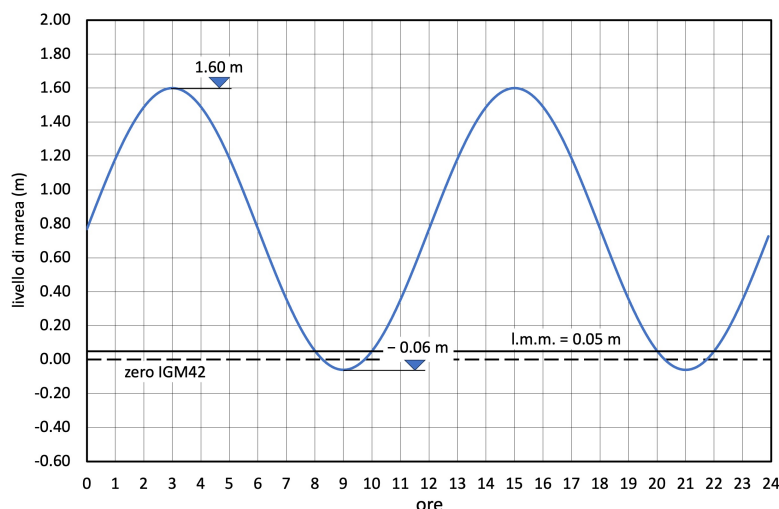


Figura 62. Marea alla foce del fiume Tagliamento con tempo di ritorno $T = 100$ anni e livello medio mare $\Delta\eta = 5$ cm (marea di progetto).

Per quanto riguarda lo sfasamento in foce tra il picco della piena di progetto e il livello della marea di progetto, prenderemo in considerazione due situazioni estreme: quella di un picco di piena in foce in fase con il picco di marea e quella di un picco di piena in foce in opposizione di fase con il picco di marea, consapevoli che ogni altra condizione cadrà all'interno di questo intervallo.

Ricordiamo, inoltre, che il PAI 1997 prevedeva che il picco di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ transitante a Latisana, fosse ripartito a valle in: $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ sullo scolmatore Cavrato e $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ sul tratto finale del Tagliamento Cesarolo-foce. Per mantenere queste proporzioni, se necessario, nelle simulazioni verrà modificata la quota dell'incile del Cavrato. In ogni caso, comunque, in questa e in tutte le simulazioni successive ammettiamo che la ripartizione voluta avvenga tramite un'opportuna scelta della quota dell'incile e non attraverso organi di regolazione.

Infine, poiché cosa accade oltre gli argini principali in caso di esondazione non rientra negli obiettivi di questo studio, seppure nelle potenzialità del modello 2DH Uniud in questa e nelle simulazioni successive tali argini saranno modellati come pareti infinitamente alte. Per quanto riguarda gli argini secondari, invece, questi verranno modellati tutti con le loro quote reali.

8.1 Evento di piena di progetto con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea di progetto

Questa prima serie di simulazioni riguarda l'evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ e marea in foce con tempo di ritorno $T = 100$ anni (Figura 62) in fase con il picco di piena in foce. Per ottenere la portata di picco di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ a Latisana, come già detto, è stata applicata alla sezione di Madrisio una piena con portata di picco uguale a $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 61).

In Figura 63 è riportato l'andamento delle portate in funzione del tempo, a Madrisio, Latisana, all'incile del Cavrato (sez. 1 di Figura 39) e a Volta (sez. 2 di Figura 39).

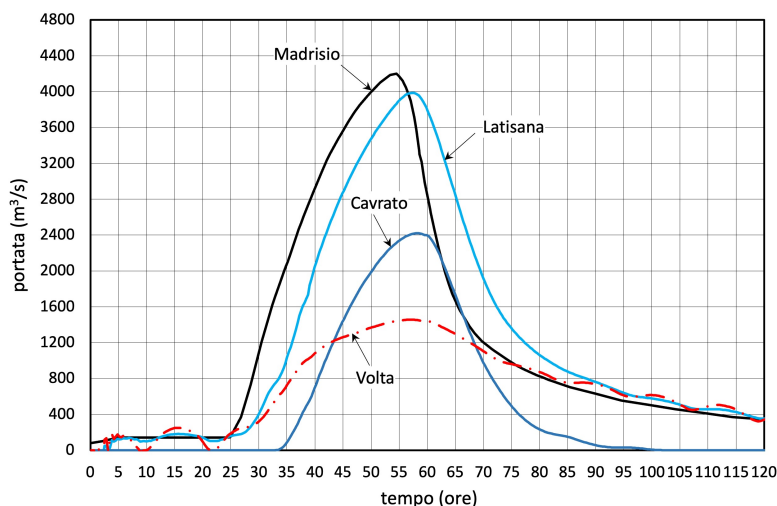


Figura 63. Andamento delle portate a Madrisio (linea nera continua), a Latisana (linea azzurra continua), a Volta (linea rossa tratto-punto) e all'incile del Cavrato (linea blu continua).

Come si può vedere, la laminazione generata dall'invaso naturale prima della stretta di Latisana è molto evidente, con un significativo volume d'invaso pari a $73.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. È proprio grazie a questo invaso che il picco di piena passa da $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ a Madrisio a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ a Latisana (Figura 63), con una laminazione naturale di circa il 4.8%. La portata scolmata dal Cavrato ha un picco di $2420 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre la portata che prosegue verso la foce (Volta) ha un picco di $1460 \text{ m}^3/\text{s}$. La somma dei due picchi restituisce un valore leggermente inferiore a 4000, dobbiamo però tenere presente che tra Latisana e il nodo del Cavrato esiste una, seppur piccola, laminazione d'alveo. È importante osservare che questa ripartizione delle portate è stata ottenuta con le quote attualmente presenti all'incile del Cavrato.

In Figura 64 è riportato l'andamento dei livelli in corrispondenza dell'idrometro di Latisana (ponte ferroviario).

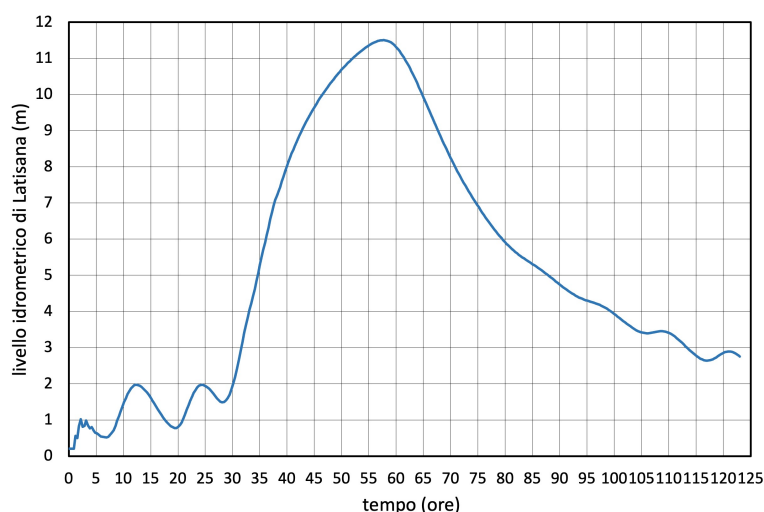


Figura 64. Andamento dei livelli in corrispondenza dell'idrometro di Latisana (ponte ferroviario).

Come evidenziato (Figura 64), il livello massimo raggiunto in prossimità dell'idrometro di Latisana è pari a **11.5 m**.

In Figura 65 è riportato l'andamento della marea assegnata in foce, delle portate totali in foce e delle portate in foce decurtate dall'effetto della marea.

Si osservi lo sfasamento pressoché nullo tra la marea e le portate in foce decurtate dall'effetto di marea, come desiderato.

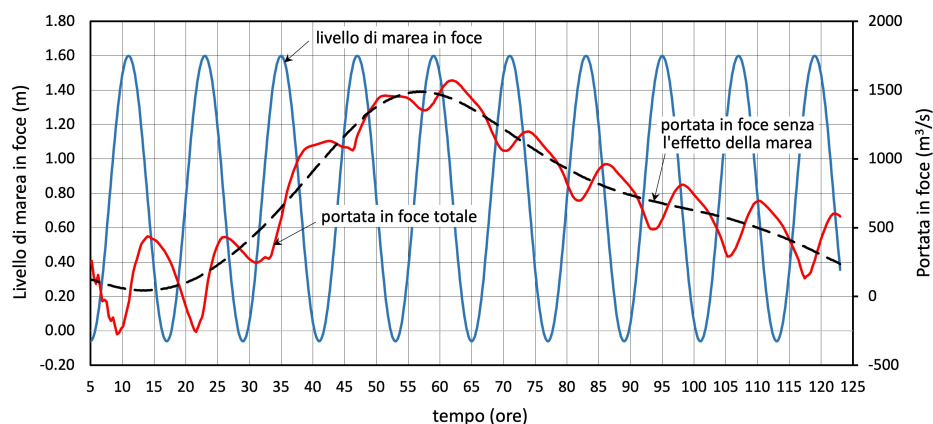


Figura 65. Foce del Tagliamento: andamento della marea assegnata (linea azzurra continua), delle portate totali (linea rossa continua) e delle portate decurtate dall'effetto della marea (linea tratteggiata nera).

Per avere un'idea dei livelli raggiunti all'interno delle darsene di Marina Azzurra, Marina Punta Verde e Marina Uno durante la piena, abbiamo posto tre idrometri virtuali all'interno delle stesse, uno per ciascuna darsena. In Figura 66 è riportato l'andamento dei livelli rilevati da tali idrometri. I livelli massimi raggiunti all'interno delle darsene sono riportati anche in Tabella 5.

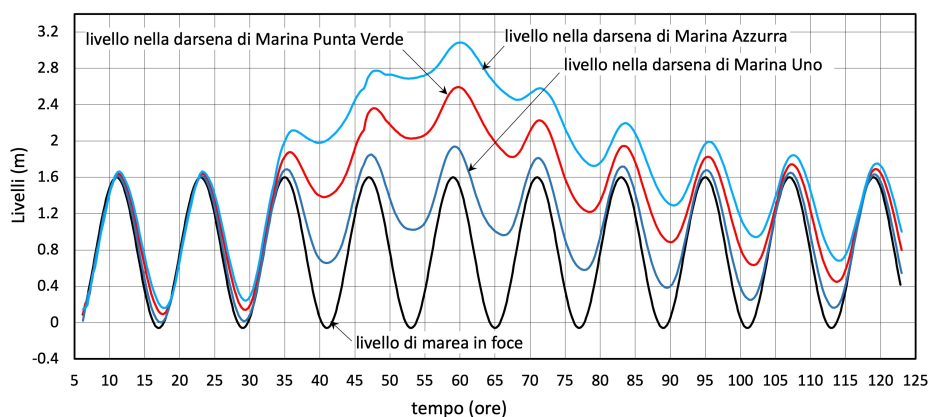


Figura 66. Andamento del livello di marea in foce (linea nera) e dei livelli all'interno delle darsene di Marina Uno (linea blu), Marina Punta Verde (linea rossa) e Marina Azzurra (linea azzurra).

Tabella 5. Livelli massimi raggiunti nelle darsene delle Marine. N.B. I livelli sono riferiti allo zero IGM42.

	Marina Azzurra	Marina Punta Verde	Marina Uno
Livello (m)	3.09	2.59	1.94

Nelle Figure 67 e 68 sono riportati i tiranti d'acqua massimi raggiunti dall'azione combinata piena-marea in prossimità di Marina Azzurra, lo Zoo, Marina Punta Verde, Marina Uno e il Camping Village Pino Mare. Nelle Figure 69 e 70, invece, sono riportati i contour delle velocità massime raggiunte nelle medesime aree.

Come si può vedere, con il picco di portata a Volta di $1460 \text{ m}^3/\text{s}$ le golene in sinistra Tagliamento vengono inondate, con un tirante medio di circa **2.02 m** in corrispondenza dei bungalow di Marina Azzurra, **2.12 m** nello Zoo, **1.08 m** sopra le banchine fisse di Marina Punta Verde. Vale comunque la pena ricordare che si tratta di una piena con tempo di ritorno di 115 anni e di una marea con tempo di ritorno di 100 anni, e che le quote dell'incile del Cavrato sono quelle attuali.

Per quanto riguarda le velocità nelle golene dove si trovano Marina Azzurra, il Parco Zoo e Marina Punta Verde (Figura 69), queste mediamente risultano inferiori a circa 30-40 cm/s, ben al di sotto delle velocità della corrente lungo il canale principale, dove vengono raggiunti valori di 2 m/s e più.

Nelle Figure 71-75 sono riportati i tiranti d'acqua massimi raggiunti con l'azione combinata piena-marea in corrispondenza del nodo con il Cavrato, dell'insediamento in golena all'altezza di Pertegada, dell'insediamento in golena all'altezza di Duranti, dell'insediamento dell'Isola Picchi e dell'insediamento in golena di Bevazzana. Come si può vedere, con il picco di portata a Volta di $1460 \text{ m}^3/\text{s}$ gli insediamenti che vengono inondati sono: l'azienda agricola dei fratelli Simeoni (in corrispondenza del nodo con il Cavrato), Bevazzana, Marina Azzurra, il Parco Zoo Punta Verde e Marina Punta Verde, con i tiranti indicati in Tabella 6. Marina Uno e il Camping Village Pino Mare non subiscono inondazioni.

Tabella 6. Tiranti massimi in aree golenali sensibili nel tratto di Tagliamento che va da Cesarolo alla foce, nel caso di una portata massima a Volta di $1460 \text{ m}^3/\text{s}$. Ogni tirante è riferito alla quota del terreno o ad altro manufatto specificato in tabella.

PAI 1997^(*) $Q_{max} = 1460 \text{ m}^3/\text{s}$ T = 100 anni Portata massima a Volta: Tempo di ritorno:	
Località	tirante (m)
Azienda agricola dei fratelli Simeoni	2.67
Insedimento all'altezza di Pertegada	-
Insedimento all'altezza di Duranti	-
Isola Picchi	-
Bevazzana	2.18
Marina Azzurra ⁽¹⁾	2.02
Parco Zoo	2.12
Marina Punta Verde ⁽²⁾	1.08
Marina Uno ⁽³⁾	-
Camping Village Pino Mare ⁽⁴⁾	-

(*) Incile del Cavrato con la quota attuale.

(1) Tirante riferito all'area dove sono collocati i bungalow.

(2) Tirante riferito alla banchina fissa interna.

(3) Tirante riferito al parcheggio Est.

(4) Tirante riferito alla rotatoria del ristorante "Alla Vecchia Finanza".



Figura 67. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde.

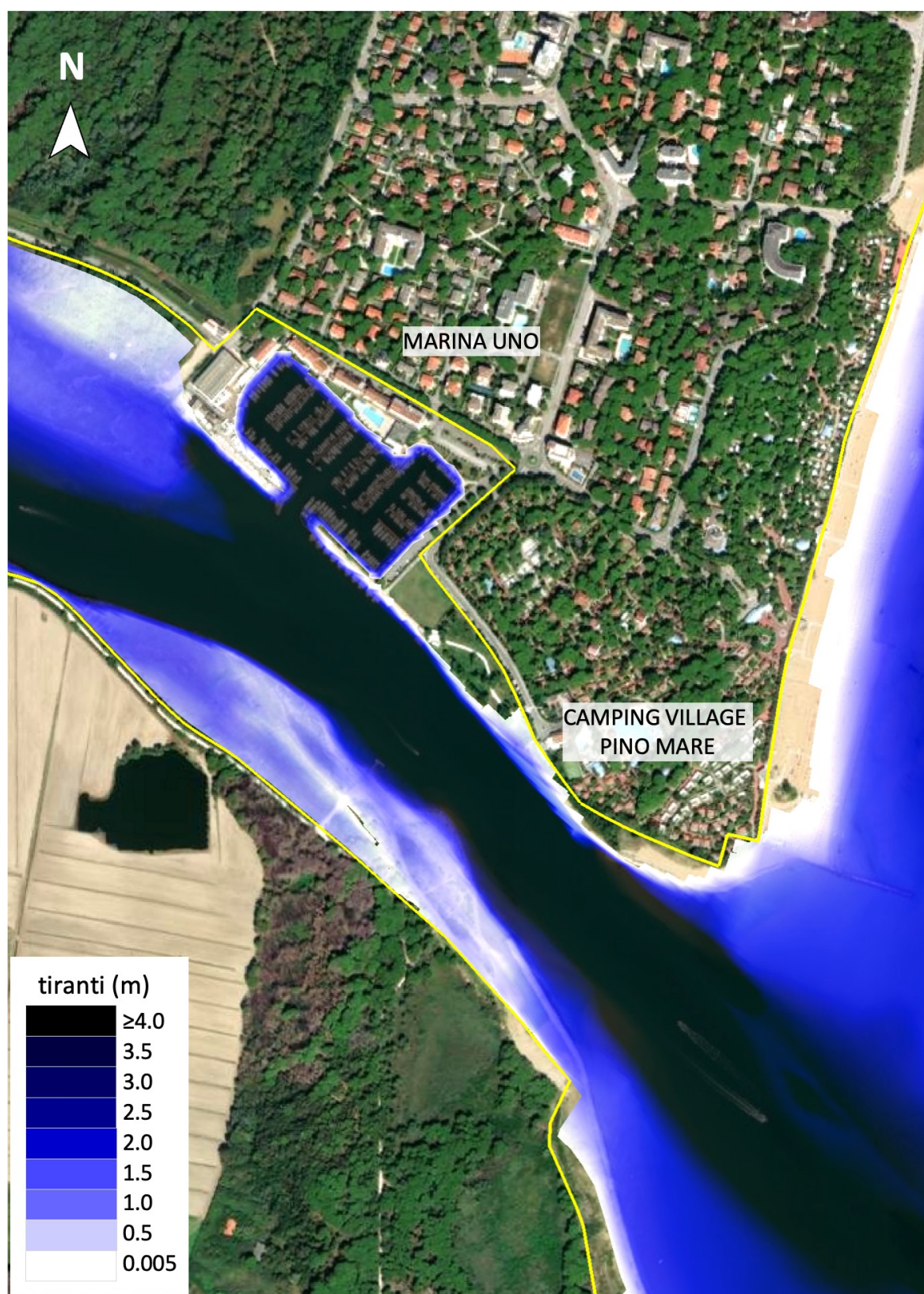


Figura 68. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Uno e il Camping Village Pino Mare.

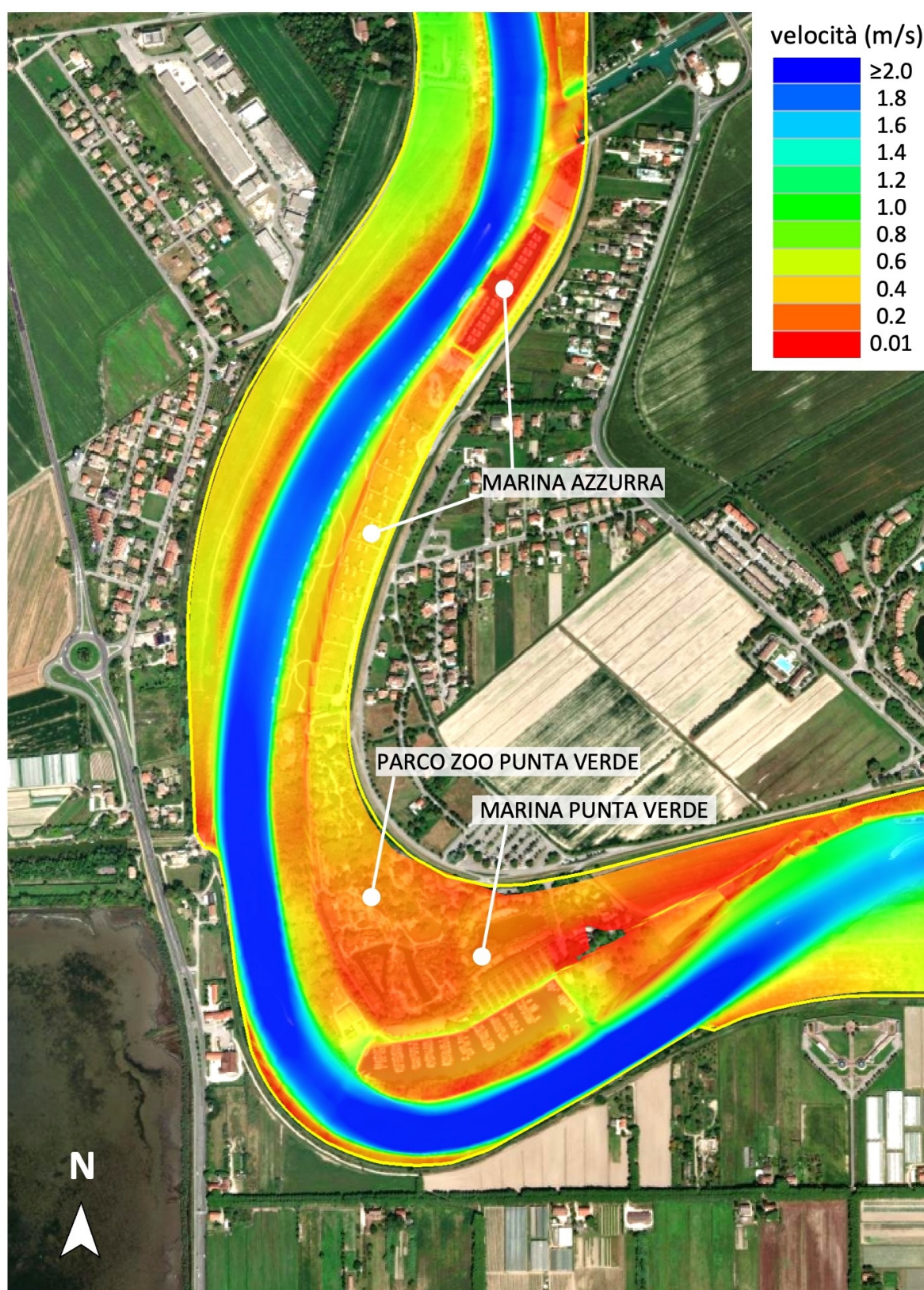


Figura 69. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde. La linea gialla indica il contorno della mesh.

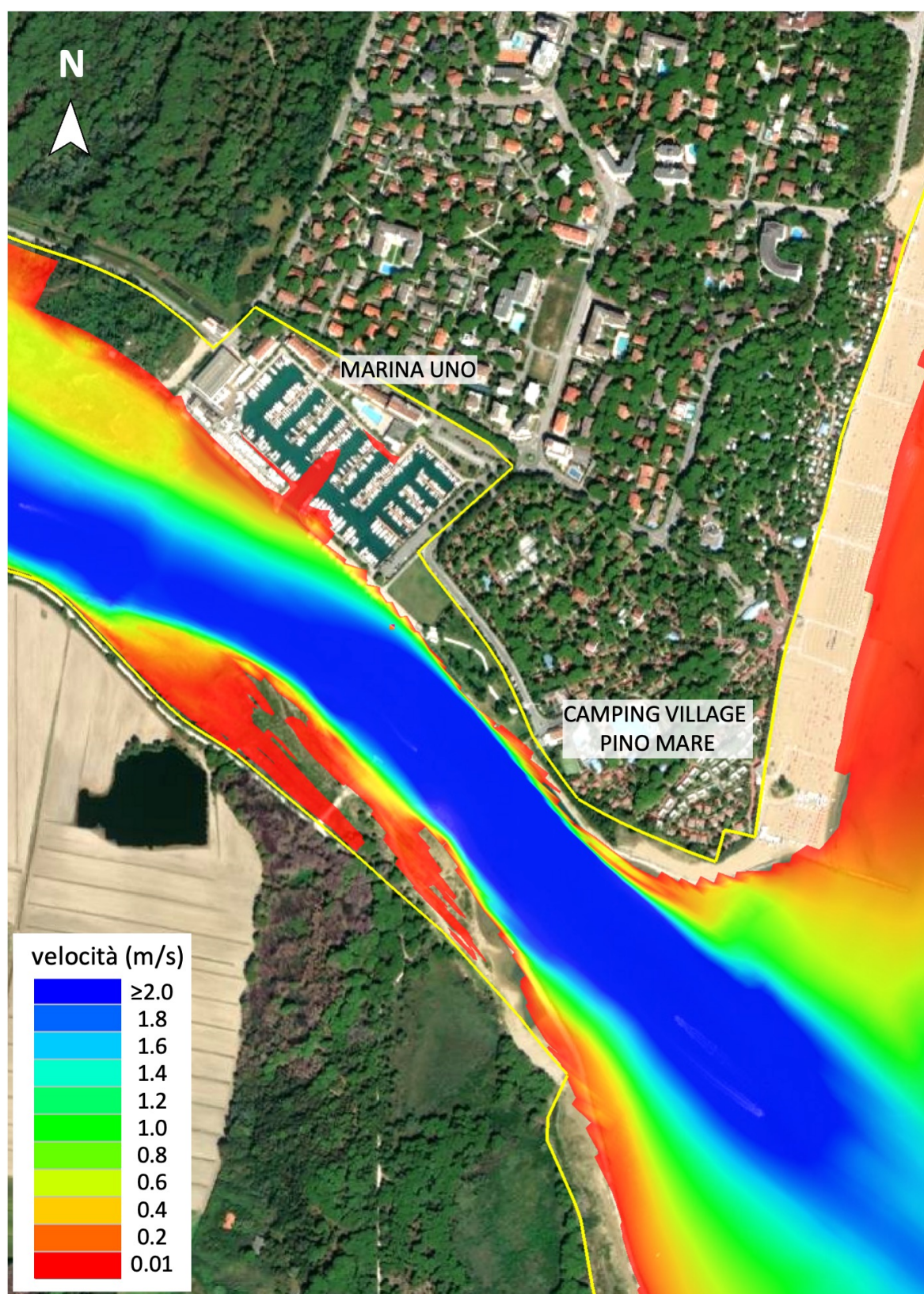


Figura 70. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Uno e del Camping Village Pino Mare. La linea gialla indica il contorno della mesh.

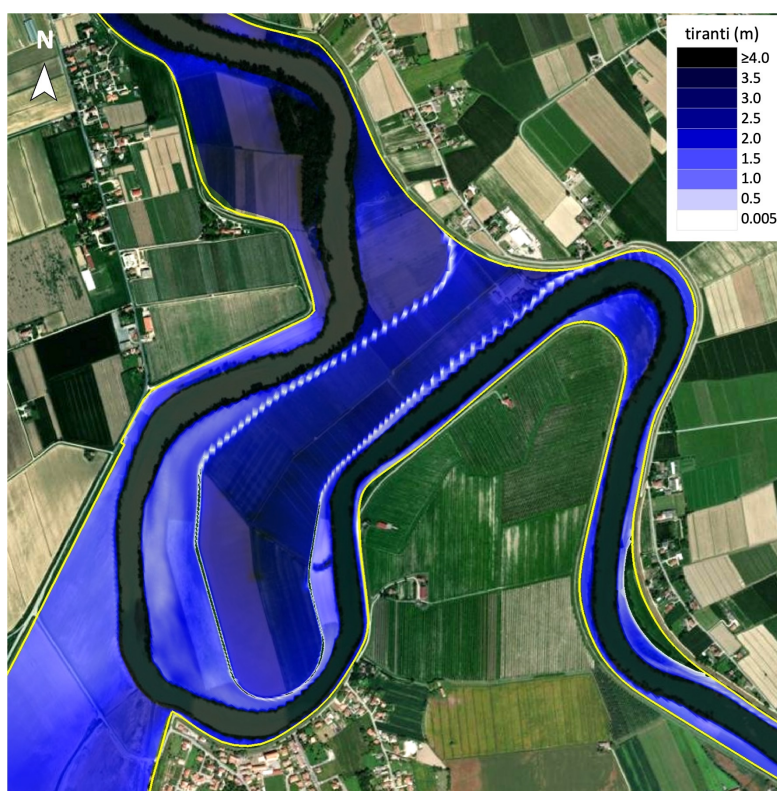


Figura 71. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza del nodo con il Cavrato.

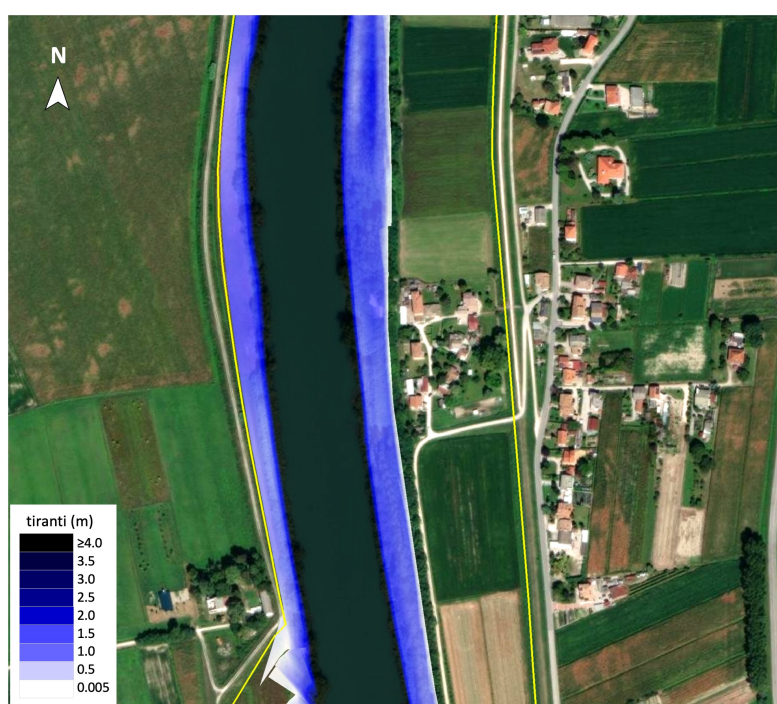


Figura 72. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza dell'insediamento in golena all'altezza di Pertegada.

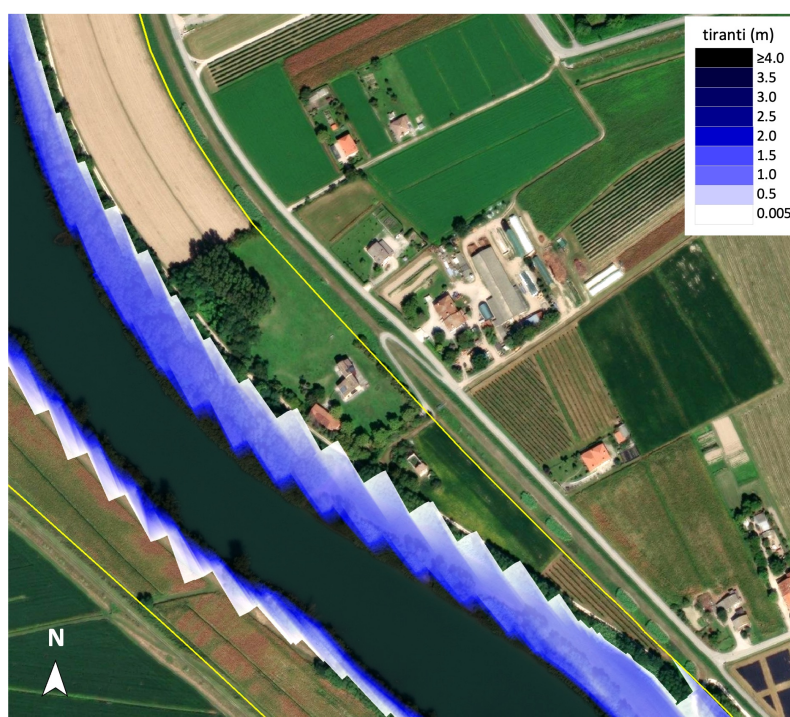


Figura 73. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza dell'insediamento in golena all'altezza di Duranti.



Figura 74. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza dell'insediamento dell'Isola Picchi.

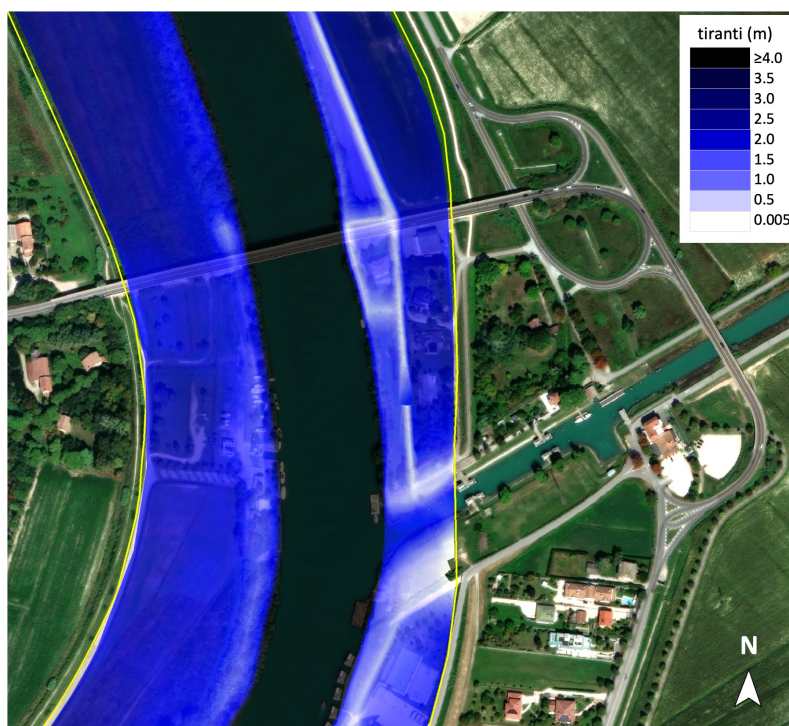


Figura 75. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza dell'insediamento in golenia di Bevazzana.

8.2 Evento di piena di progetto con il picco di piena in foce in opposizione di fase con il picco di marea di progetto

Questa seconda serie di simulazioni riguarda l'evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ e marea in foce, sempre con tempo di ritorno $T = 100$ anni (Figura 62), in opposizione di fase con il picco di piena in foce.

In Figura 76 è riportato l'andamento delle portate in funzione del tempo, a Madrisio, Latisana, all'incile del Cavrato (sez. 1 di Figura 39) e a Volta (sez. 2 di 39). Come si può vedere, a parte le prime ore dove si coglie un diverso sfasamento della marea, gli andamenti delle portate mostrati in Figura 63 e 76 sono pressoché identici, così come risultano identici i picchi di piena a Latisana ($4000 \text{ m}^3/\text{s}$), sul Cavrato ($2420 \text{ m}^3/\text{s}$) e verso la foce (Volta) ($1460 \text{ m}^3/\text{s}$). Anche gli andamenti dei livelli a Latisana (Figura 77), a parte le prime ore dove anche qui si coglie un diverso sfasamento della marea rispetto al caso precedente (Figura 64), risultano identici, con il livello massimo che permane sempre di **11.5 m**.

In Figura 78 è riportato l'andamento della marea assegnata in foce, delle portate totali in foce e delle portate in foce decurtate dall'effetto della marea. Si osservi lo sfasamento di circa 180° tra la marea e le portate in foce decurtate dall'effetto della marea, come desiderato.

Questi risultati evidenziano un aspetto molto importante, ovvero che lo sfasamento della marea rispetto all'idrogramma di piena non incide né sulle portate di deflusso di Latisana, dello scolmatore Cavrato e di Volta, né sui livelli idrometrici di Latisana.

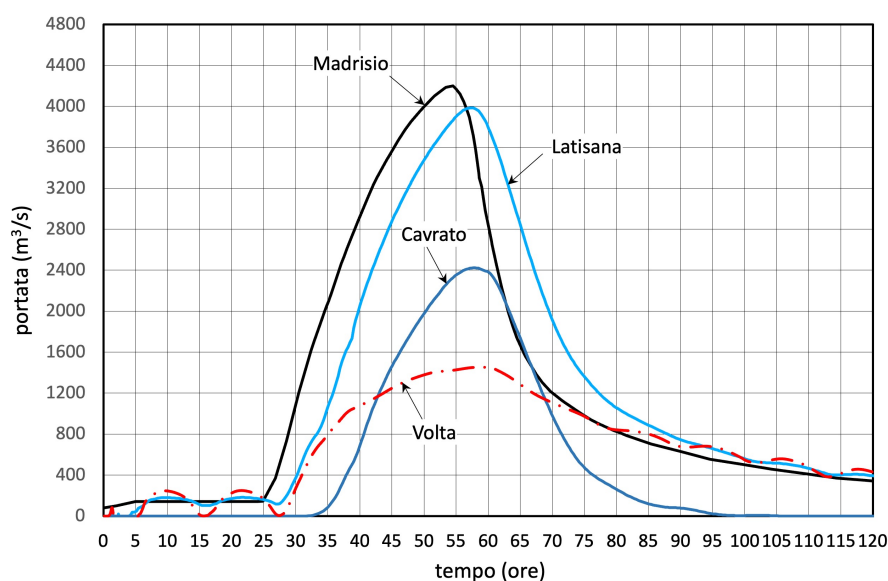


Figura 76. Andamento delle portate a Madrisio (linea nera continua), a Latisana (linea azzurra continua), a Volta (linea rossa tratto-punto) e all'incile del Cavrato (linea blu continua).

In Figura 79 è riportato l'andamento dei livelli rilevati dagli idrometri virtuali nelle darsene. I livelli massimi raggiunti all'interno delle darsene sono riportati in Tabella 7.

Tabella 7. Livelli massimi raggiunti nelle darsene delle Marine. N.B. I livelli sono riferiti allo zero IGM42.

	Marina Azzurra	Marina Punta Verde	Marina Uno
Livello (m)	3.02	2.54	1.91

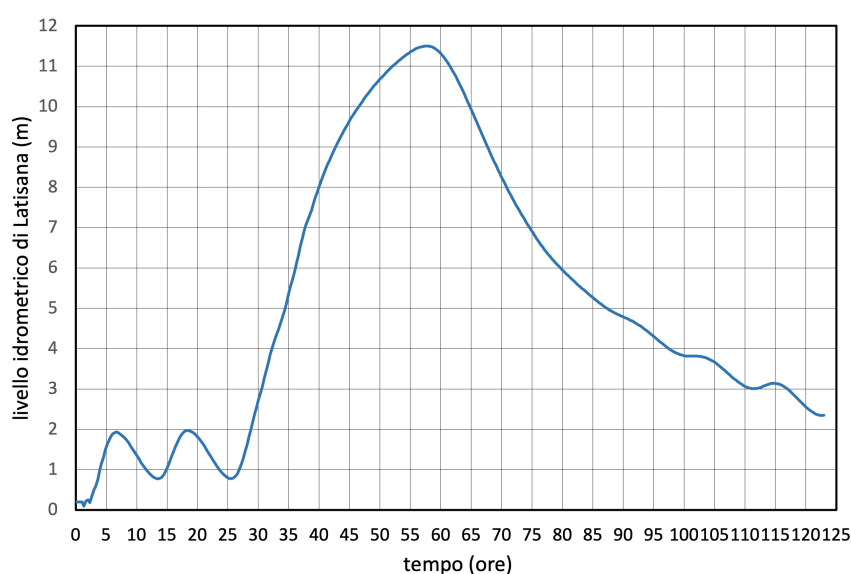


Figura 77. Andamento dei livelli in corrispondenza dell'idrometro di Latisana (ponte ferroviario).

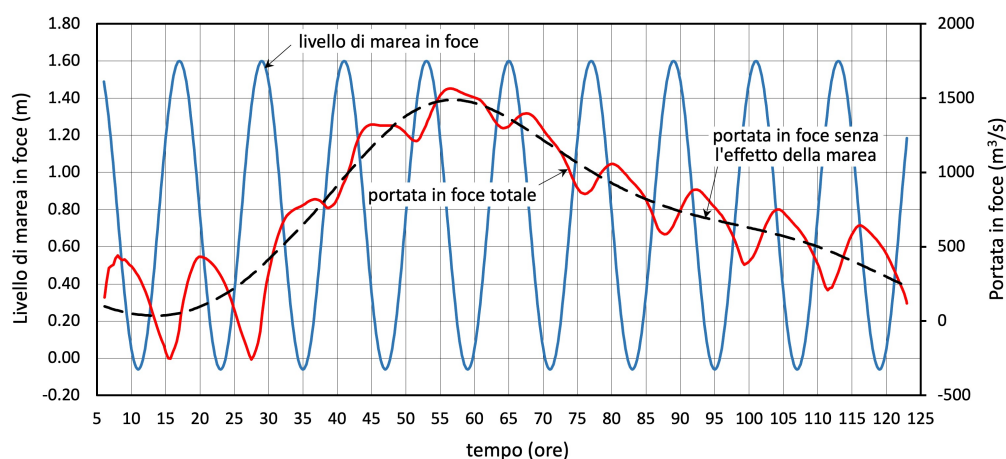


Figura 78. Foce del Tagliamento: andamento della marea assegnata (linea azzurra continua), delle portate totali (linea rossa continua) e delle portate decurtate dall'effetto della marea (linea tratteggiata nera).

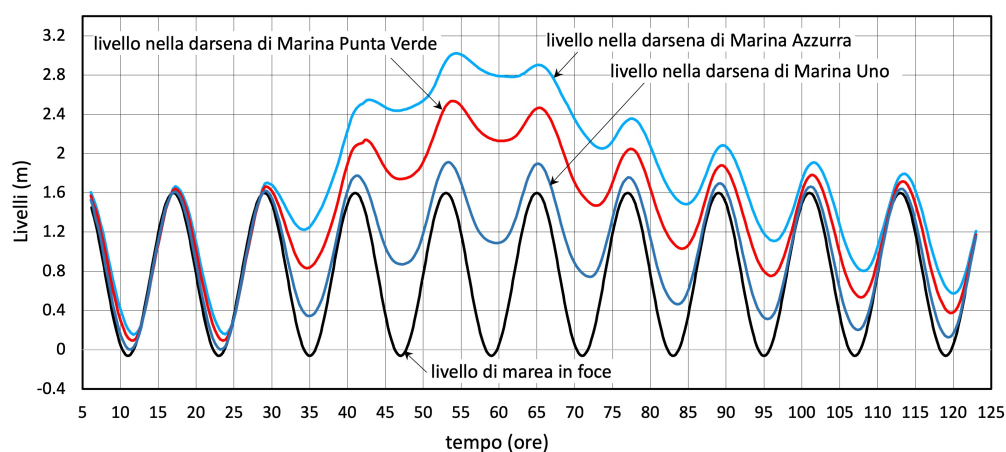


Figura 79. Andamento del livello di marea in foce (linea nera) e dei livelli all'interno delle darsene di Marina Uno (linea blu), Marina Punta Verde (linea rossa) e Marina Azzurra (linea azzurra).

Anche per i livelli in foce, che differiscono solo per pochi centimetri, si conferma che lo sfasamento della marea rispetto all'idrogramma di piena risulta sostanzialmente ininfluenza. Nelle simulazioni successive, quindi, studieremo solo il caso, leggermente più gravoso, di una marea in foce in fase con il picco di piena in foce.

Nelle Figure 80 e 81 sono riportati i tiranti d'acqua massimi raggiunti dall'azione combinata piena-marea in prossimità di Marina Azzurra, lo Zoo, Marina Punta Verde, Marina Uno e il Camping Village Pino Mare. Nelle Figure 82 e 83, invece, sono riportati i contour delle velocità massime raggiunte nelle medesime aree.

Come si può vedere, con il picco di portata a Volta di $1460 \text{ m}^3/\text{s}$ e la marea in opposizione di fase, sia per i tiranti che per le velocità massime si presenta una situazione sostanzialmente identica a quella con il picco di portata e marea in fase (Figure 67-70). Forse, una sottile differenza si può cogliere nei tiranti di Marina Uno e in quelli del Camping Village Pino Mare (Figura 81), ma si tratta solo di pochi centimetri.



Figura 80. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in opposizione di fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde.

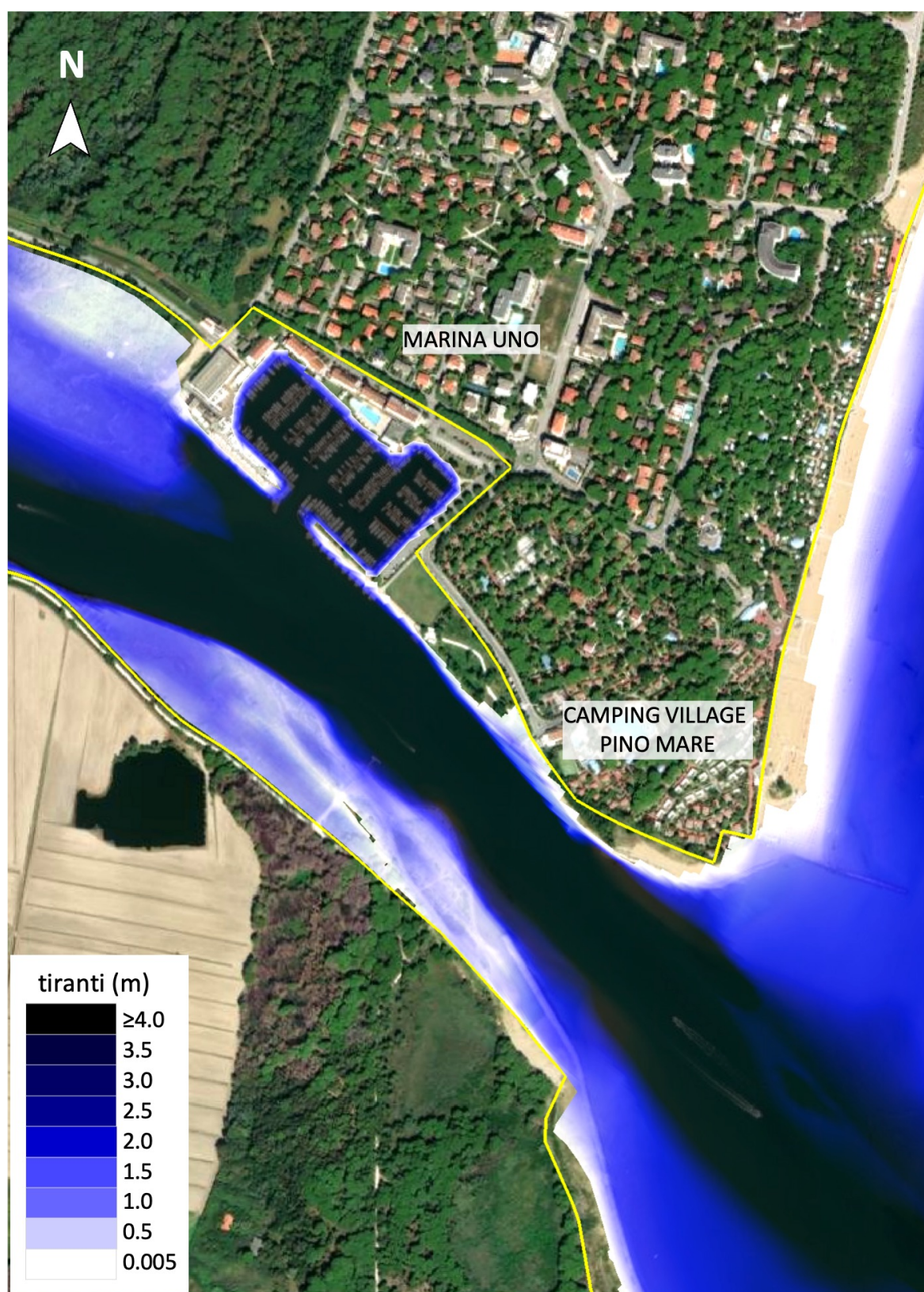


Figura 81. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in opposizione di fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Uno e il Camping Village Pino Mare.

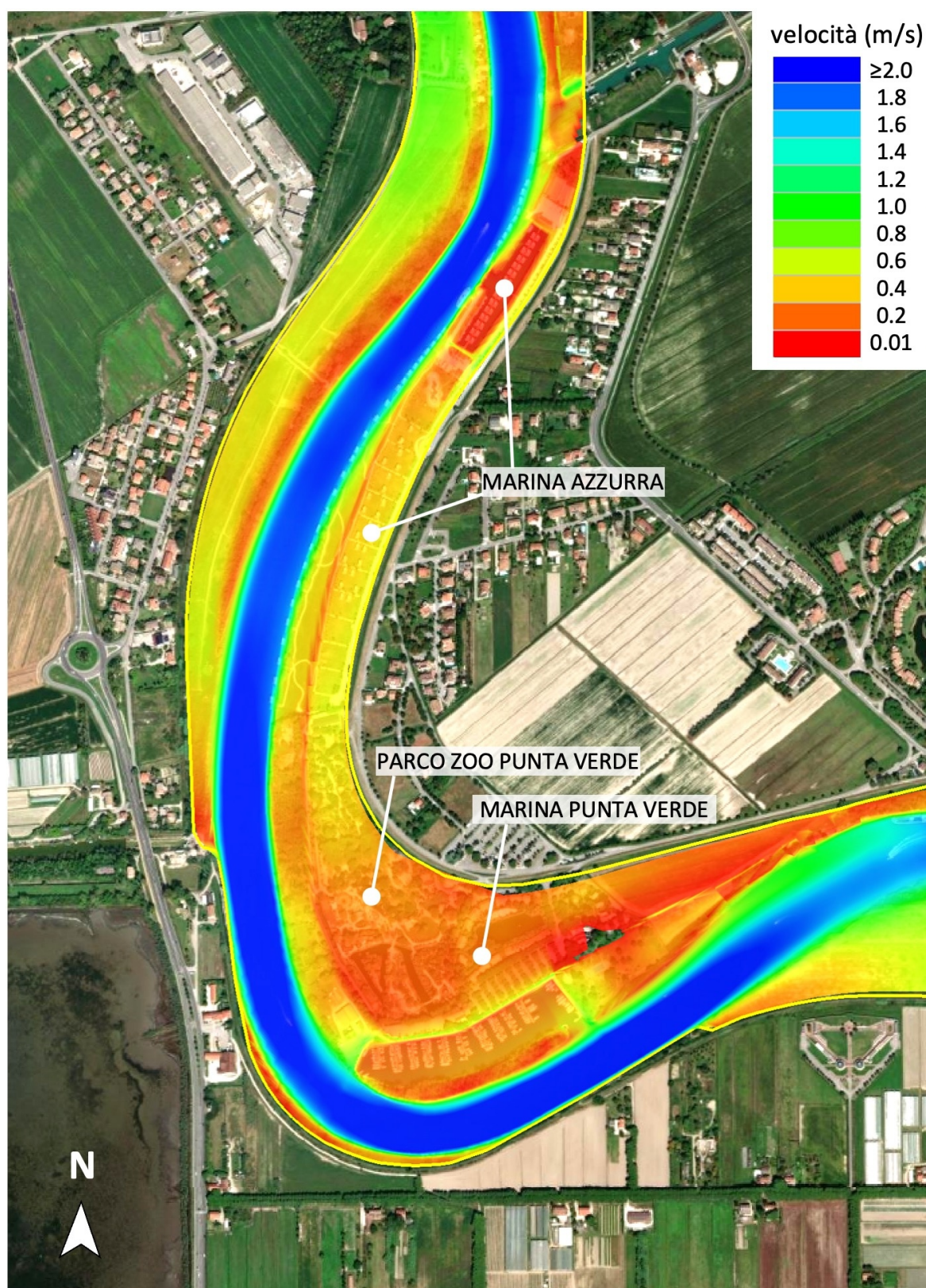


Figura 82. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in opposizione di fase con il picco di marea: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde. La linea gialla indica il contorno della mesh.

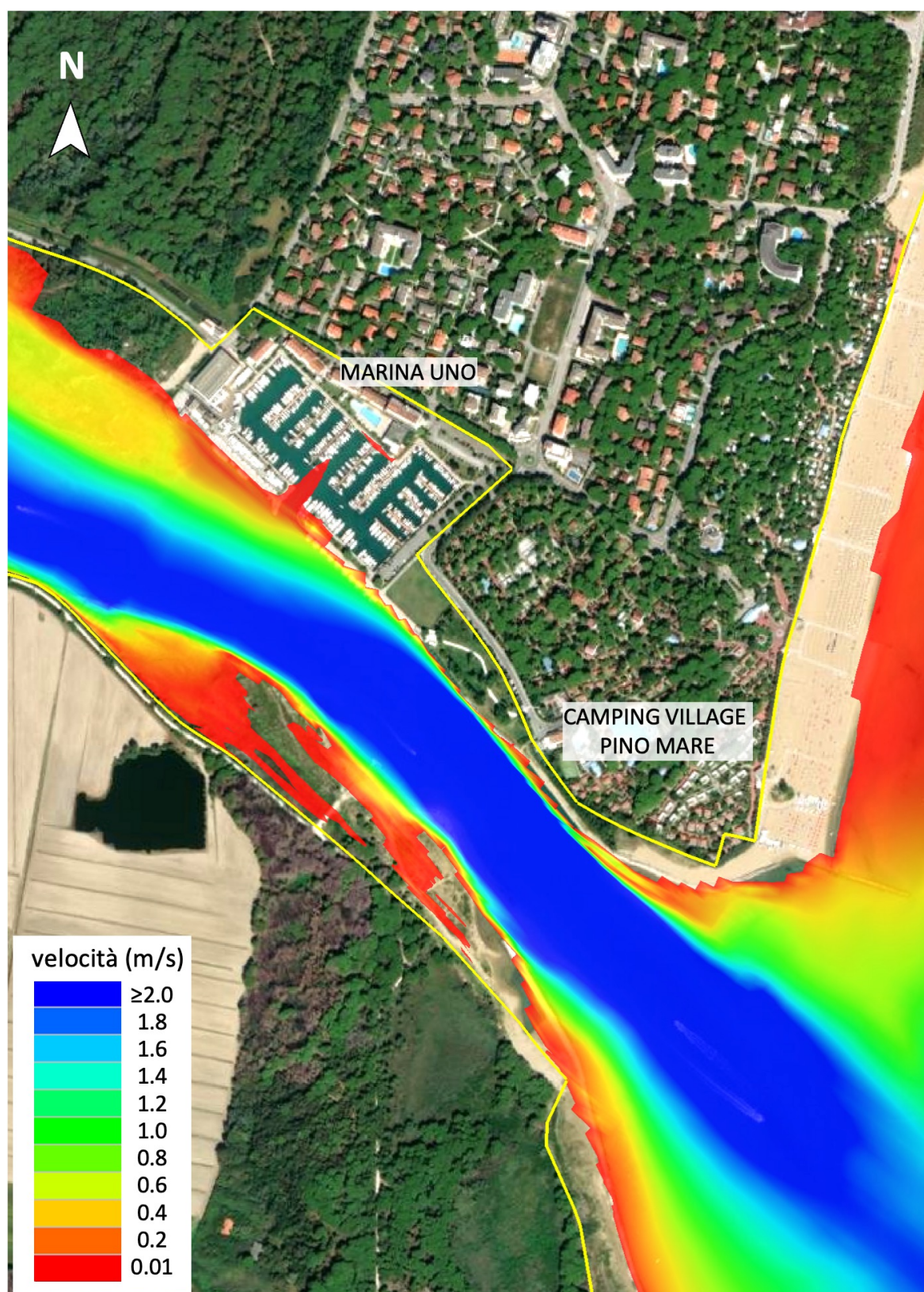


Figura 83. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PAI 1997, con il picco di piena in foce in opposizione di fase con il picco di marea: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Uno e del Camping Village Pino Mare. La linea gialla indica il contorno della mesh.

9 Piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021

Come da PGRA 2021, anche in questa serie di simulazioni ammettiamo che a monte della sezione di Madrisio esistano una o più opere di laminazione tali da abbattere il picco della piena di progetto dai $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ ai $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ ammessi nella sezione di Latisana. Come già detto, la forma dell'idrogramma di piena a valle delle opere di laminazione dipende da come viene gestita la regolazione temporale degli invasi, tuttavia, ciò che è importante è l'abbattimento del picco di piena, dal momento che, come già osservato, i fenomeni di esondazione si verificano proprio in corrispondenza di quest'ultimo. In questi termini, la legge di laminazione ipotizzata in Figura 84 (linea continua), si ritiene accettabile e viene utilizzata nelle simulazioni successive.

Il picco di $3740 \text{ m}^3/\text{s}$ ipotizzato a Madrisio garantisce, per effetto della laminazione naturale che si verifica tra Madrisio e Latisana, la portata massima a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$. È interessante osservare che, anche qui, per portare il picco della piena di progetto da $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ a $3740 \text{ m}^3/\text{s}$, con la legge di laminazione evidenziata in Figura 84, è sufficiente trattenere, tra Pinzano e Madrisio, un volume d'acqua di circa $35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Naturalmente, anche in questo caso è necessario verificare che le quote arginali interessate dall'invaso che si crea prima della stretta di Latisana, siano sufficienti a contenere il volume invasato, ma questo, come già detto, esula dagli scopi del presente studio.

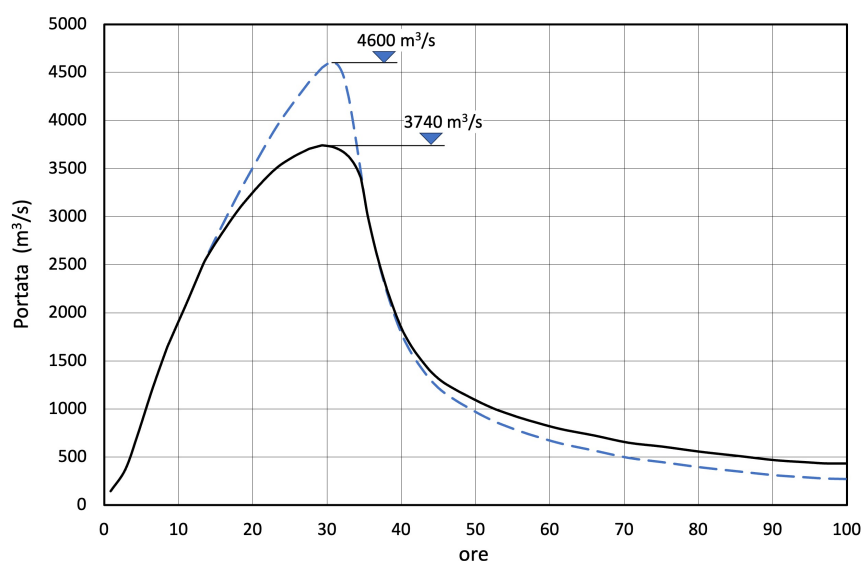


Figura 84. Idrogramma di piena di progetto stabilito dal PGRA 2021 nella sezione di Pinzano (linea tratteggiata) e dopo una laminazione a monte di Madrisio tale da ridurne il picco a $3740 \text{ m}^3/\text{s}$ (linea continua).

Alla piena da simulare (Figura 84) viene abbinata in foce la marea centenaria illustrata in Figura 62, con il livello medio mare attuale di 0.05 m .

Ricordiamo che il PGRA 2021 prevede che il picco di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ transitante a Latisana, venga ripartito a valle in: $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ sullo scolmatore Cavrato e $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ sul tratto finale del Tagliamento Cesarolo-foce. Ovviamente, per garantire una simile distribuzione risulta necessario modificare la quota dell'incile del Cavrato; per trovare la quota più appropriata si è proceduto in maniera iterativa con più simulazioni.

9.1 Opere di difesa presenti in foce Tagliamento

In foce Tagliamento, sia in sinistra che in destra fiume, sono presenti delle scogliere. Tali opere hanno la funzione primaria di dissipare l'energia del moto ondoso che incide sulla foce, proveniente dalle mareggiate di Bora, Levante e Scirocco. Tali mareggiate, causa il frangimento delle onde e l'azione combinata delle correnti ortogonali (*cross-shore currents*) e parallele alla costa (*long-shore currents*), sono la causa primaria dell'erosione delle spiagge e della coste in genere.

Da un punto di vista squisitamente tecnico (Petti 2021a), la realizzazione della scogliera in sinistra foce (Figura 85) risulta la soluzione più adatta e per capire ciò è sufficiente riflettere su ciò che è successo in destra foce (Figura 86), situazione speculare a quella in sinistra foce.



Figura 85. Foce del Tagliamento: scogliera presente in sinistra foce a difesa del Camping Village Pino Mare di Lignano Riviera. Confronto tra la situazione relativa all'anno 2015 e all'anno 2023.

Osservando Figura 86, si vede come nel 2003 in destra foce esisteva una situazione piuttosto drammatica, con una spiaggia pressoché scomparsa e una costa in continua erosione sotto l'azione delle mareggiate di Bora e Levante. A seguito della costruzione delle scogliere e di alcuni ripascimenti fatti per ricostituire un minimo di spiaggia, si vede che nel 2023 la situazione è decisamente migliorata e, soprattutto, si è stabilizzata.

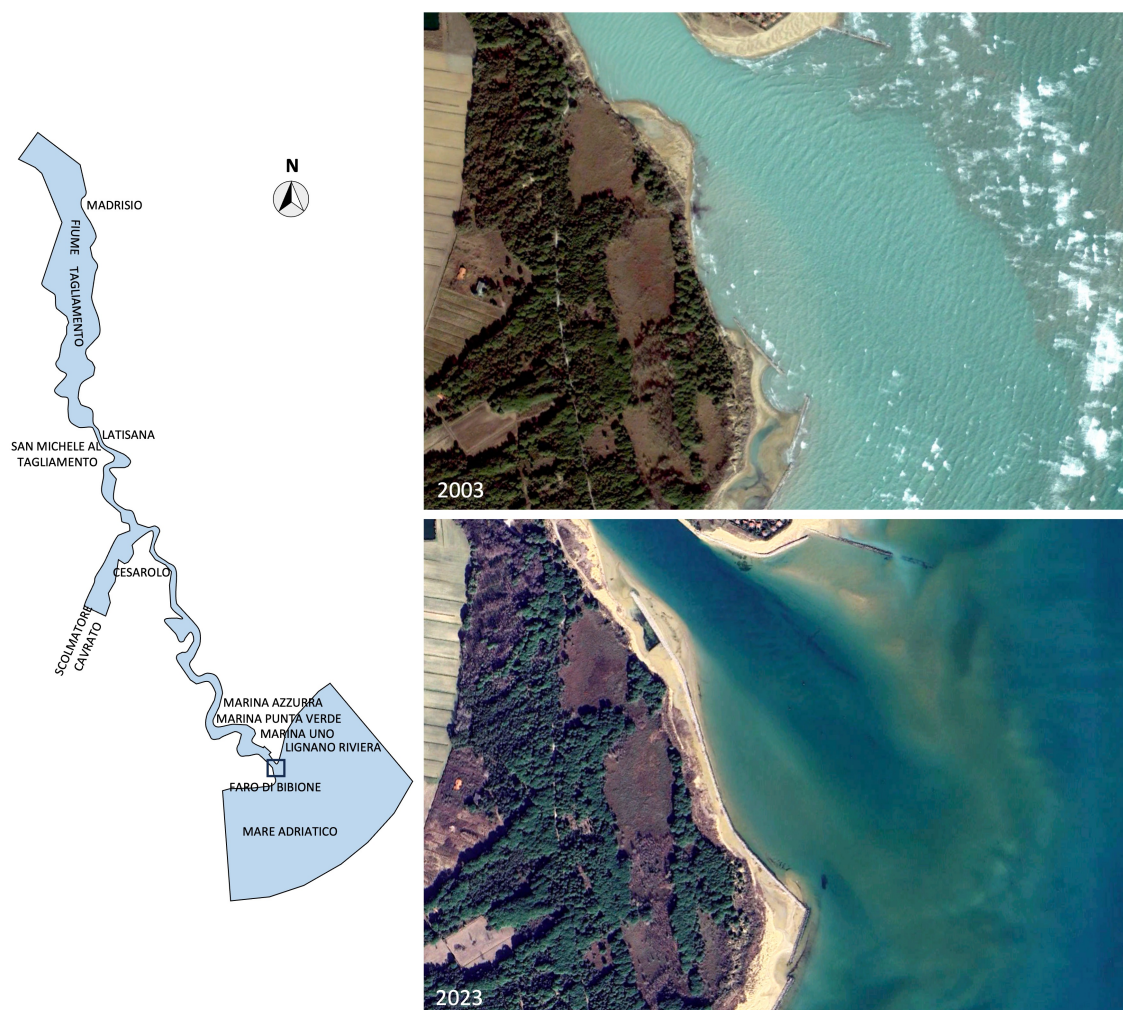


Figura 86. Foce del Tagliamento: scogliera presente in destra foce a protezione della spiaggia del Faro di Bibione. Confronto tra la situazione relativa all'anno 2003 e all'anno 2023.

Tornando in sinistra foce, e osservando la situazione al 2023 (Figura 85), la scogliera in essere sembra aver soddisfatto appieno il proprio scopo. In assenza di scogliera, le mareggiate di Scirocco e Levante avrebbero eroso tutta la spiaggia, come successo in destra foce nel 2003 (Figura 86), e messo in serio pericolo il Camping Village Pino Mare di Lignano Riviera.

Sono state sollevate questioni circa la possibilità che tale opera, cioè la scogliera in sinistra foce, possa compromettere il deflusso delle portate di piena del fiume Tagliamento, per questo motivo, di seguito, vengono realizzate delle simulazioni per capire se tutto ciò abbia un fondamento. Si procederà con un'analisi comparativa dei risultati ottenuti con due scenari diversi: il primo in assenza totale della scogliera, il secondo in presenza della scogliera. Per mettersi nelle condizioni più sfavorevoli per il deflusso delle portate di piena, assumeremo che la scogliera sia insormontabile.

9.2 Piena in assenza della scogliera in sinistra foce

Come anticipato, nelle simulazioni che seguono studiamo solo il caso dell'evento di piena di progetto con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea di progetto. In

particolare, in questa parte dello studio analizziamo il deflusso della portata di progetto immaginando di togliere completamente la scogliera in sinistra foce.

In Figura 87 è riportato l'andamento delle portate, in funzione del tempo, a Madrisio, Latisana, incile del Cavrato (sez. 1 di Figura 39) e Volta (sez. 2 di Figura 39). Come si può vedere, il picco di piena a Madrisio di $3740 \text{ m}^3/\text{s}$ è sufficiente a limitare a $3632 \text{ m}^3/\text{s}$ il picco di piena a Latisana, con una laminazione naturale di circa il 2.9%. Al nodo con il Cavrato, il picco di portata transitato a Latisana, a seguito di un leggero invaso d'alveo, dapprima perde circa $32 \text{ m}^3/\text{s}$ e poi si divide in $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ sul Cavrato e $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ che proseguono, passando per Volta, verso la foce. Il volume invasato a monte della stretta di Latisana, in questo caso risulta di $69.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

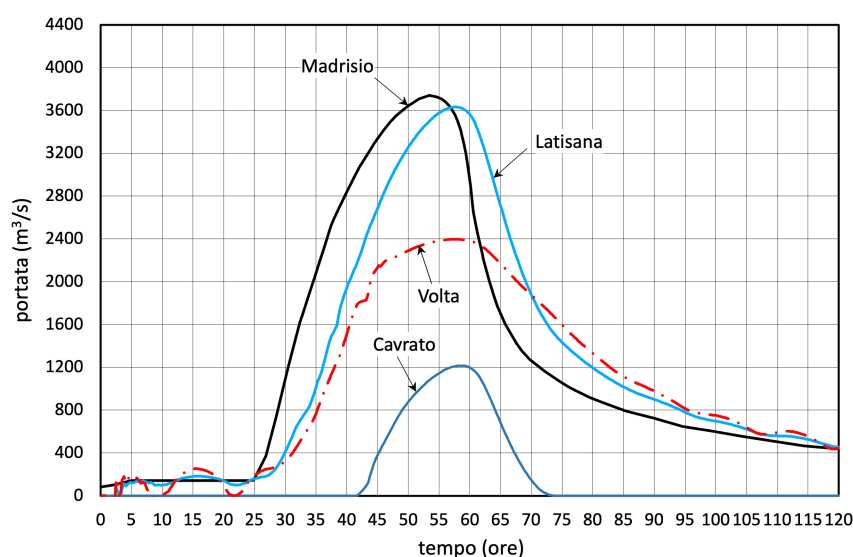


Figura 87. Andamento delle portate a Madrisio (linea nera continua), a Latisana (linea azzurra continua), a Volta (linea rossa tratto-punto) e all'incile del Cavrato (linea blu continua) in assenza di scogliera in sinistra foce.

In Figura 88 è riportato l'andamento dei livelli in corrispondenza dell'idrometro di Latisana (ponte ferroviario).

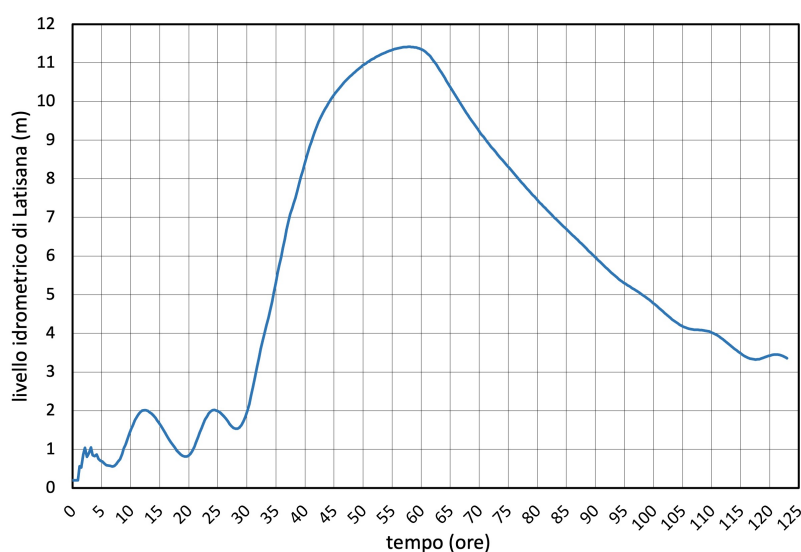


Figura 88. Andamento dei livelli in corrispondenza dell'idrometro di Latisana (ponte ferroviario) in assenza di scogliera in sinistra foce.

E' interessante osservare come (Figura 88) il livello massimo raggiunto in prossimità dell'idrometro di Latisana risulti **11.4 m**, ovvero solo **10 cm** in meno rispetto al transito della piena con picco di $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 77).

In Figura 89 è riportato l'andamento della marea assegnata in foce, delle portate totali in foce e delle portate decurtate dall'effetto della marea. Si osservi come il picco delle portate in foce, come voluto, risulti in fase con la marea massima.

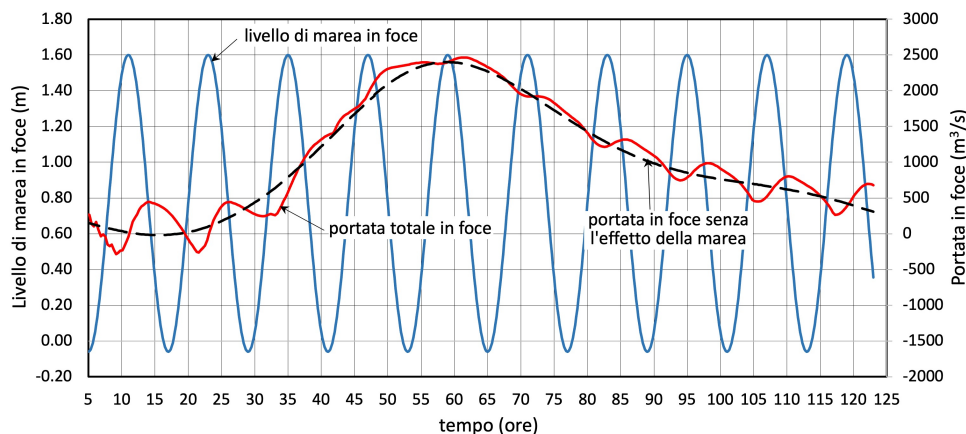


Figura 89. Foce del Tagliamento: andamento della marea assegnata (linea azzurra continua), delle portate totali (linea rossa continua) e delle portate decurtate dall'effetto della marea (linea tratteggiata nera) in assenza di scogliera in sinistra foce.

Per quantificare i livelli massimi raggiunti all'interno delle darsene di Marina Azzurra, Marina Punta Verde e Marina Uno durante la piena, facciamo riferimento ai soliti tre idrometri virtuali posti all'interno delle stesse, uno per ciascuna darsena. In Figura 90 è riportato l'andamento dei livelli rilevati da tali idrometri. I livelli massimi raggiunti all'interno delle darsene sono riportati anche in Tabella 8.

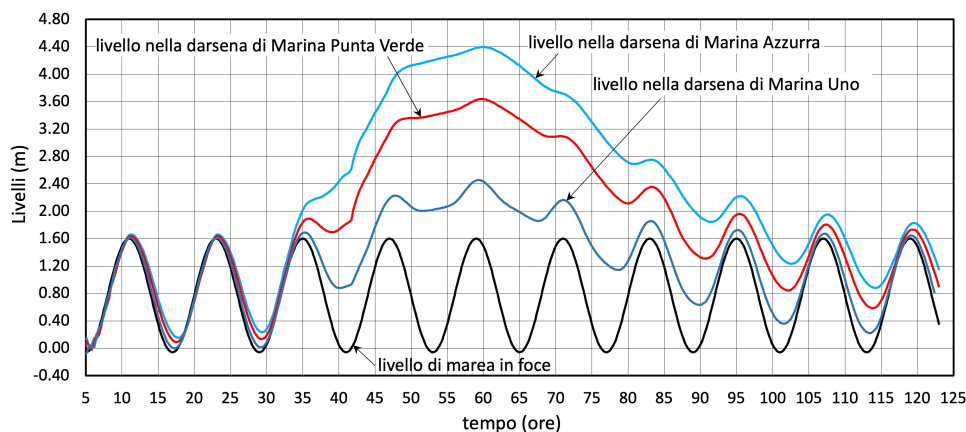


Figura 90. Andamento del livello di marea in foce (linea nera) e dei livelli all'interno delle darsene di Marina Uno (linea blu), Marina Punta Verde (linea rossa) e Marina Azzurra (linea azzurra) in assenza di scogliera in sinistra foce.

Tabella 8. Livelli massimi raggiunti nelle darsene delle Marine. N.B. I livelli sono riferiti allo zero IGM42.

	Marina Azzurra	Marina Punta Verde	Marina Uno
Livello (m)	4.40	3.64	2.46

Nelle Figure 91-92 sono riportati i tiranti d'acqua massimi raggiunti dall'azione combinata piena-marea in prossimità di Marina Azzurra, lo Zoo, Marina Punta Verde, Marina Uno e il Camping Village Pino Mare. Nelle Figure 93-94, invece, sono riportati i contour delle velocità massime raggiunte nelle medesime aree. Come si può vedere, con il picco di portata a Volta di $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ le golene in sinistra Tagliamento vengono inondate, con tiranti medi di circa **3.29 m** in corrispondenza dei bungalow di Marina Azzurra, **3.22 m** nello Zoo, **2.16 m** sopra le banchine fisse di Marina Punta Verde e **0.22 m** in corrispondenza del parcheggio Est di Marina Uno (Tabella 9).

Tabella 9. Tiranti massimi in aree golenali sensibili nel tratto di Tagliamento che va da Cesarolo alla foce, nel caso di una portata massima a Volta di $2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Ogni tirante è riferito alla quota del terreno o ad altro manufatto specificato in tabella.

Portata massima a Volta: Tempo di ritorno: PGRA 2021^(*) $Q_{max} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$ $T = 100 \text{ anni}$	
Località	tirante (m)
Azienda agricola dei fratelli Simeoni	4.48
Insedimento all'altezza di Pertegada	4.35
Insedimento all'altezza di Duranti	4.26
Isola Picchi	4.41
Bevazzana	3.51
Marina Azzurra ⁽¹⁾	3.29
Parco Zoo	3.22
Marina Punta Verde ⁽²⁾	2.16
Marina Uno ⁽³⁾	0.22
Camping Village Pino Mare ⁽⁴⁾	0.11

(*) Incile del Cavrato rialzato a quota $+7.30 \text{ m}$ sopra lo zero IGM42

(1) Tirante riferito all'area dove sono collocati i bungalow.

(2) Tirante riferito alla banchina fissa interna.

(3) Tirante riferito al parcheggio Est.

(4) Tirante riferito alla rotatoria del ristorante "Alla Vecchia Finanza".

Per ottenere la suddivisione delle portate previste dal PGRA 2021 in corrispondenza del nodo del Cavrato è stato necessario portare la quota dell'incile del Cavrato a **$+7.30 \text{ m}$** rispetto allo zero IGM42. Le velocità nelle golene (Figura 93) raggiungono valori di $1\text{-}1.2 \text{ m/s}$, valori decisamente più alti rispetto a quelli che si avevano con la ripartizione delle portate previste dal PAI 1997, mentre la velocità della corrente lungo il canale principale si mantiene intorno ai 2 m/s e più.

Nelle Figure 95-99 sono riportati i tiranti d'acqua massimi raggiunti dall'azione combinata piena-marea in corrispondenza del nodo con il Cavrato, dell'insediamento in golena all'altezza di Pertegada, dell'insediamento in golena all'altezza di Duranti, dell'insediamento dell'Isola Picchi e dell'insediamento in golena di Bevazzana.



Figura 91. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in assenza di scogliera in foce: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde.

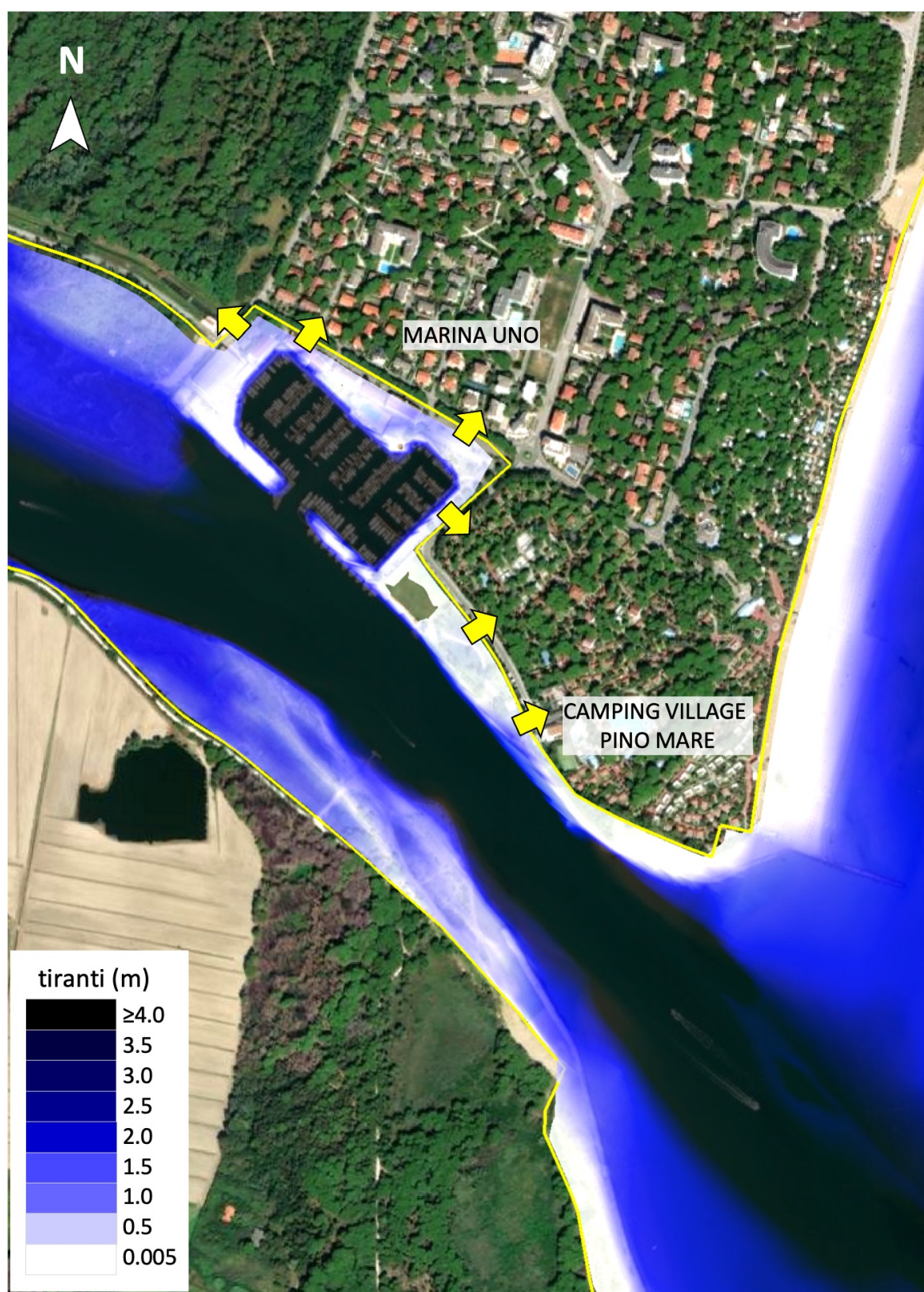


Figura 92. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in assenza di scogliera in foce: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Uno e il Camping Village Pino Mare.

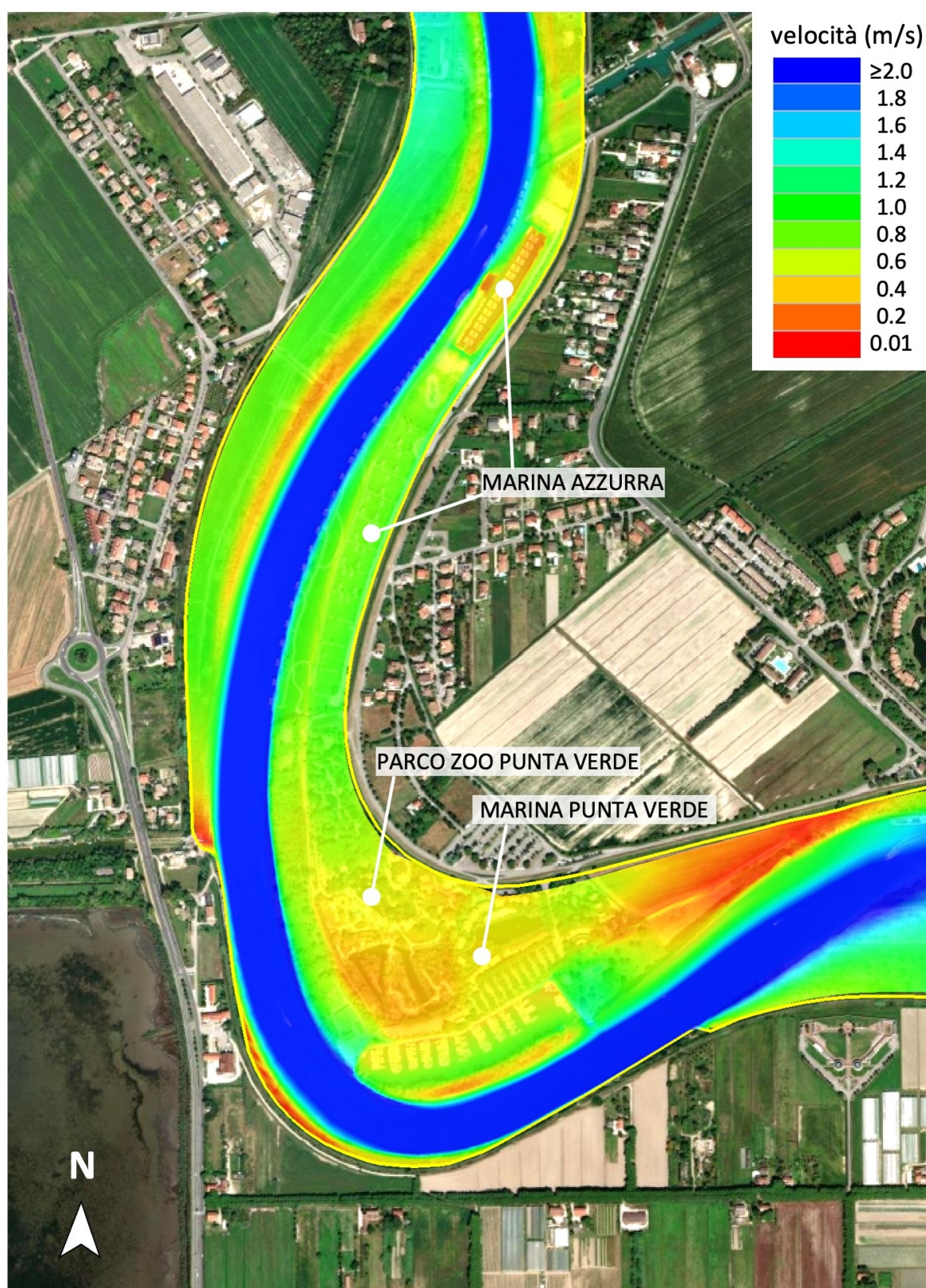


Figura 93. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in assenza di scogliera in foce: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Azzurra, lo Zoo e Marina Punta Verde. La linea gialla indica il contorno della mesh.

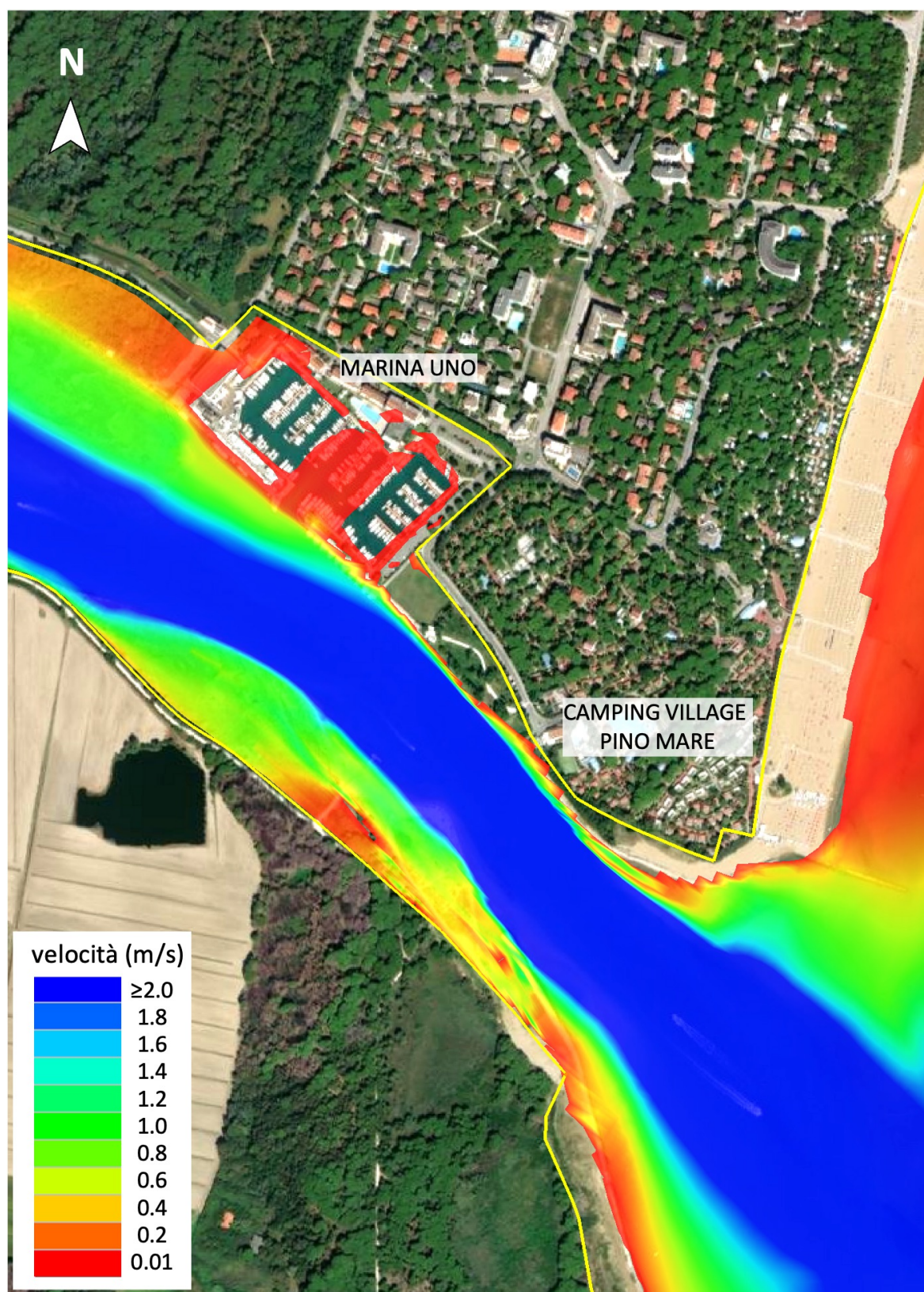


Figura 94. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in assenza di scogliera in foce: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Uno e del Camping Village Pino Mare. La linea gialla indica il contorno della mesh.

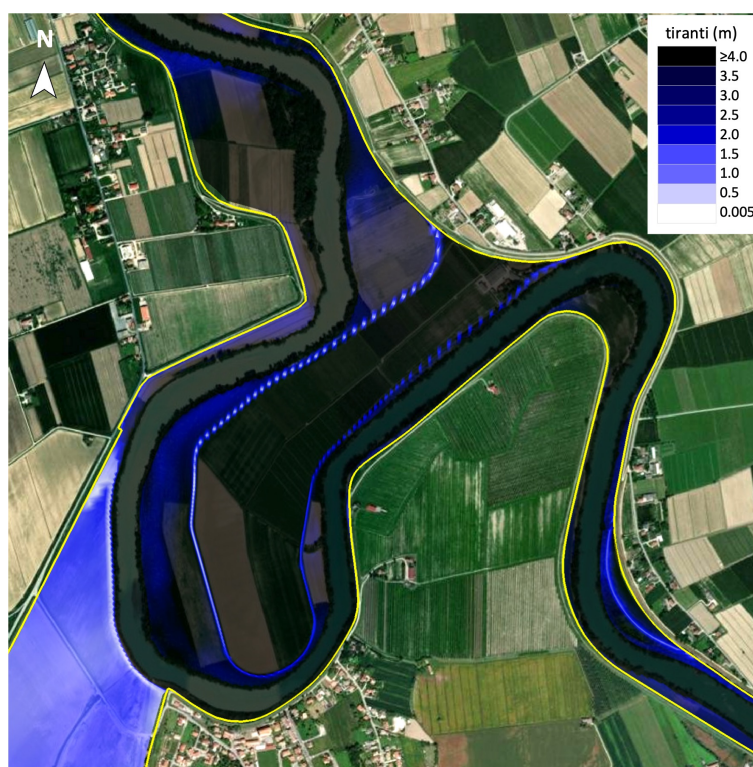


Figura 95. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in assenza di scogliera in foce: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza del nodo con il Cavrato.

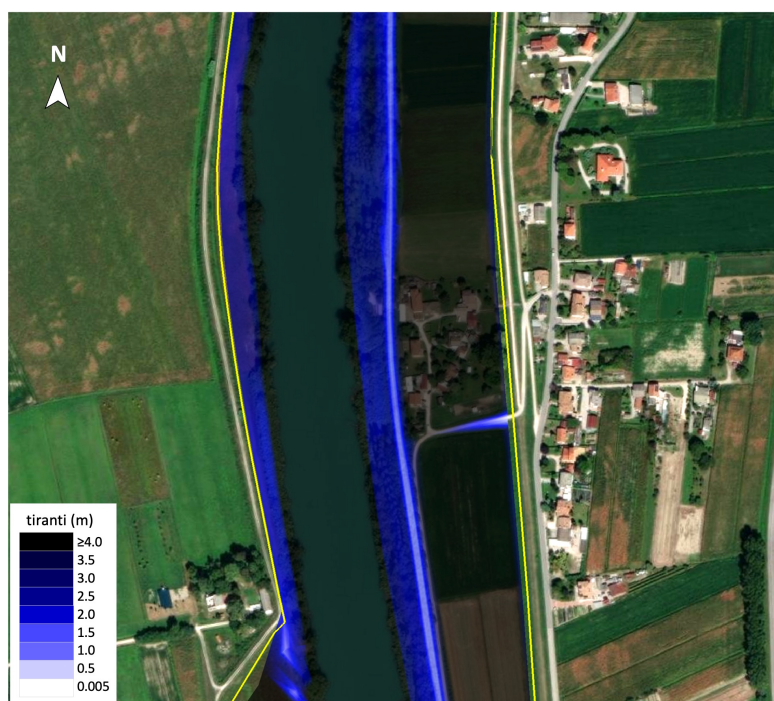


Figura 96. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in assenza di scogliera in foce: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza dell'insediamento in golena all'altezza di Pertegada.

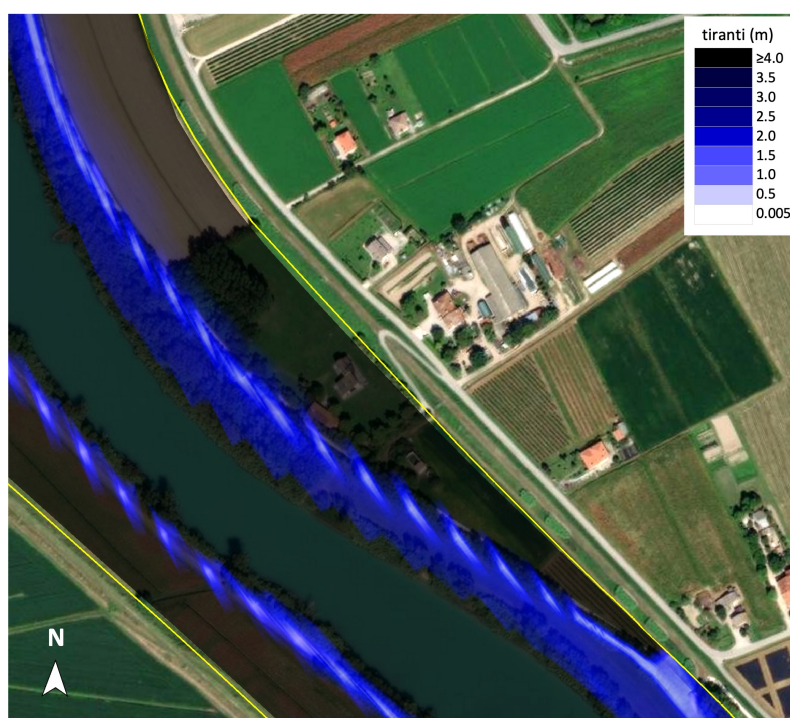


Figura 97. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in assenza di scogliera in foce: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza dell'insediamento in golenia all'altezza di Duranti.



Figura 98. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in assenza di scogliera in foce: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza dell'insediamento dell'Isola Picchi.

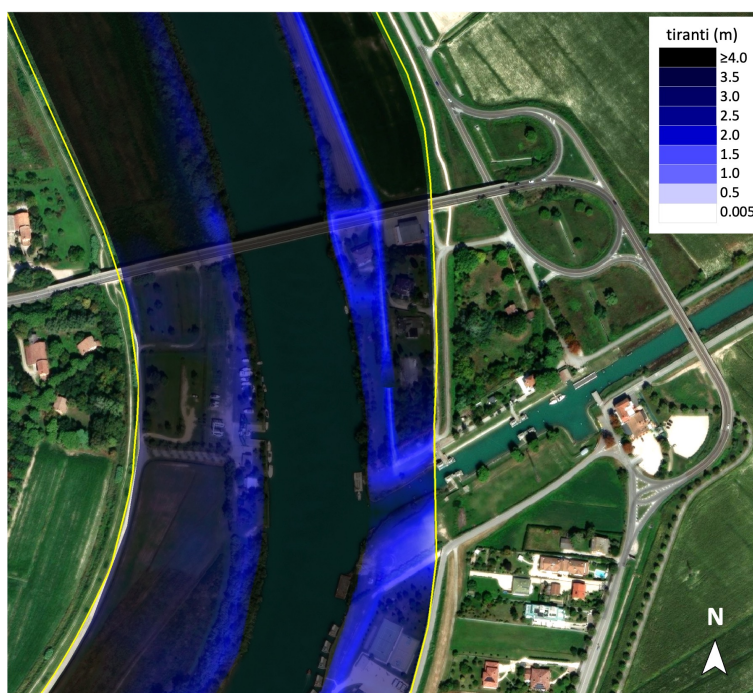


Figura 99. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in assenza di scogliera in foce: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza dell'insediamento in golena di Bevazzana.

Come si può vedere, con il picco di portata a Volta di $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ tutti gli insediamenti a Monte di Marina Azzurra vengono inondata (Tabella 9), con tiranti medi di: **4.48 m** nell'Azienda agricola dei fratelli Simeoni (Figura 95), **4.35 m** nell'insediamento in golena all'altezza di Pertegada (Figura 96), **4.26 m** nell'insediamento in golena all'altezza di Duranti (Figura 97), **4.41 m** nell'isola Picchi (Figura 98) e **3.51 m** nell'insediamento in golena di Bevazzana (Figura 99).

In assenza di protezioni, cioè nelle condizioni attuali, il confronto tra il livello massimo raggiunto durante la piena e le quote di Marina Uno, evidenzia un superamento di queste ultime su tutto il contorno di Marina Uno, con conseguente fuoriuscita d'acqua. La stessa cosa succede lungo la riva sinistra del Tagliamento in prossimità del Camping Village Pino Mare (Figura 92). In entrambi i casi, le quote del terreno vengono superate dal livello d'acqua per circa **10-20 cm**.

9.3 Piena in presenza della scogliera in sinistra foce

Analizziamo, adesso, gli effetti prodotti dall'evento di piena di progetto con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea di progetto, in presenza della scogliera in sinistra foce. Come già anticipato, qui studiamo il caso più sfavorevole al deflusso della portata di piena, ovvero quello di una scogliera insormontabile.

In Figura 100 è riportato l'andamento delle portate, in funzione del tempo, a Madrisio, Latisana, incile del Cavrato (sez. 1 di Figura 39) e Volta (sez. 2 di Figura 39). Come si può vedere, sia il picco di piena a Madrisio, di **$3740 \text{ m}^3/\text{s}$** , sia quello di Latisana, di **$3632 \text{ m}^3/\text{s}$** , sono uguali a quelli ottenuti in assenza di scogliera. Non solo, anche le forme degli idrogrammi sono perfettamente sovrapponibili a quelli ottenuti in assenza di

scogliera (Figura 87). La stessa cosa succede per la forma degli idrogrammi e per i picchi delle portate che transitano sul Cavrato, di $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, e per Volta, di $2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Il volume invasato a monte della stretta di Latisana, risulta sempre di $69.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

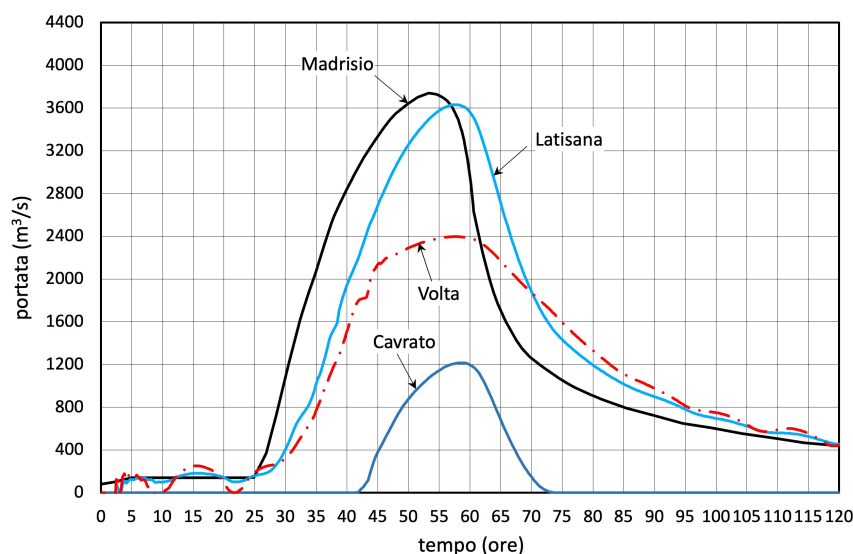


Figura 100. Andamento delle portate a Madrisio (linea nera continua), a Latisana (linea azzurra continua), a Volta (linea rossa tratto-punto) e all'incile del Cavrato (linea blu continua) in presenza di scogliera in sinistra foce.

In Figura 101 è riportato l'andamento dei livelli in corrispondenza dell'idrometro di Latisana (ponte ferroviario). Forma e livello massimo, di 11.4 m , sono identici a quelli ottenuti in assenza di scogliera. Anche l'andamento della marea assegnata in foce, delle portate totali in foce e delle portate in foce decurtate dall'effetto della marea, riportati in Figura 102, risultano identici e sovrapponibili a quelli trovati in assenza di scogliera (Figura 89).

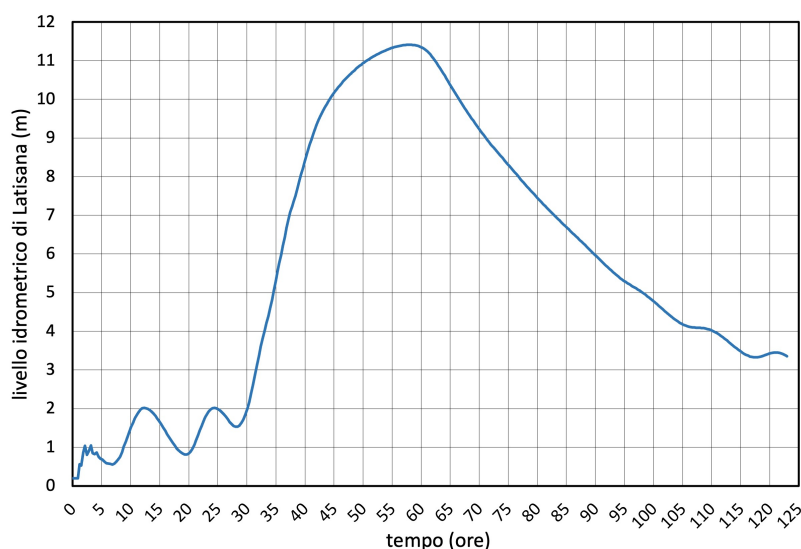


Figura 101. Andamento dei livelli in corrispondenza dell'idrometro di Latisana (ponte ferroviario) in presenza di scogliera in sinistra foce.

In Figura 103 è riportato l'andamento dei livelli rilevati dagli idrometri virtuali collocati all'interno delle darsene di Marina Azzurra, Marina Punta Verde e Marina Uno.

Anche in questo caso, gli andamenti dei livelli sono perfettamente sovrapponibili a quelli trovati in assenza della scogliera (Figura 90).

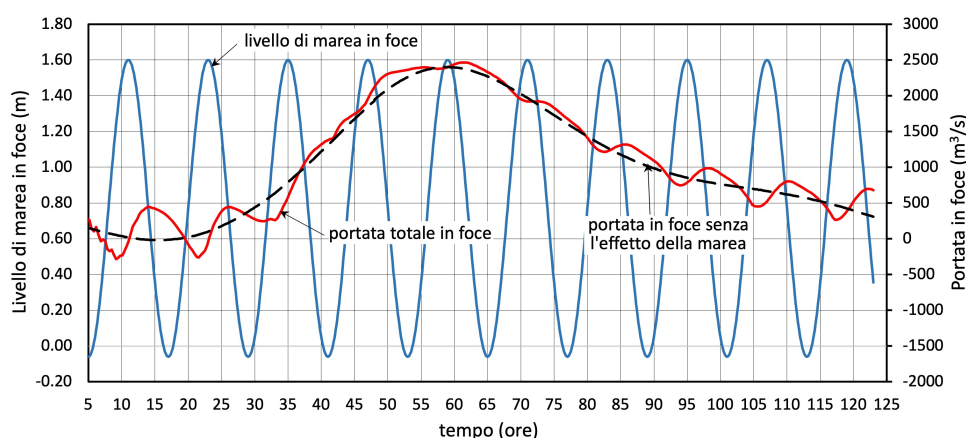


Figura 102. Foce del Tagliamento: andamento della marea assegnata (linea azzurra continua), delle portate totali (linea rossa continua) e delle portate decurtate dall'effetto della marea (linea tratteggiata nera) in presenza di scogliera in sinistra foce.

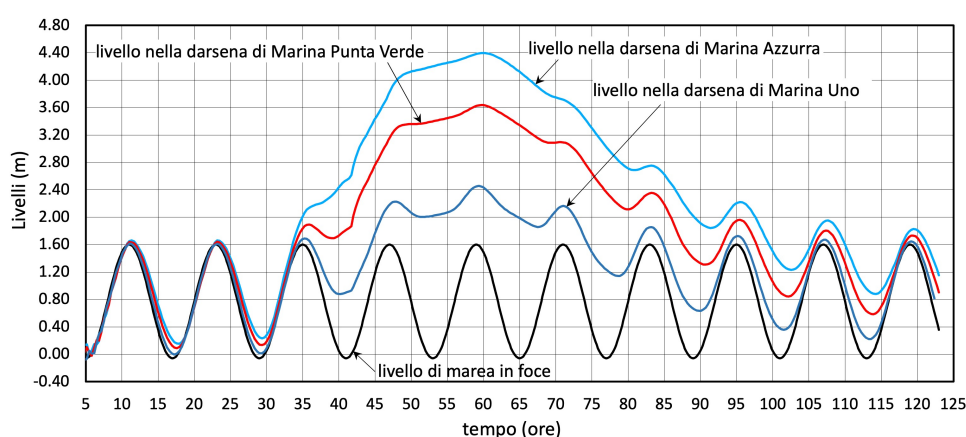


Figura 103. Andamento del livello di marea in foce (linea nera) e dei livelli all'interno delle darsene di Marina Uno (linea blu), Marina Punta Verde (linea rossa) e Marina Azzurra (linea azzurra) in presenza di scogliera in sinistra foce.

Nella Figura 104 sono riportati i tiranti d'acqua massimi raggiunti dall'azione combinata piena-marea in prossimità della foce, nella Figura 105, invece, sono riportati i contour delle velocità massime raggiunte nelle medesime aree. Il confronto di queste figure con quelle precedenti in assenza di scogliera mostra lo stesso identico andamento, a parte una piccolissima area a tergo della scogliera che non sembra influire in alcun modo sul deflusso delle portate di piena.

In assenza di protezioni, cioè nelle condizioni attuali, il confronto tra il livello massimo raggiunto durante la piena e le quote di Marina Uno, anche in presenza della scogliera evidenzia un identico superamento di queste ultime su tutto il contorno di Marina Uno, con conseguente fuoriuscita d'acqua. La stessa cosa succede lungo la riva sinistra del Tagliamento in prossimità del Camping Village Pino Mare (Figura 104). In entrambi i casi, le quote del terreno vengono superate dal livello d'acqua per circa 10-20 cm, valori identici a quelli ottenuti in assenza di scogliera.

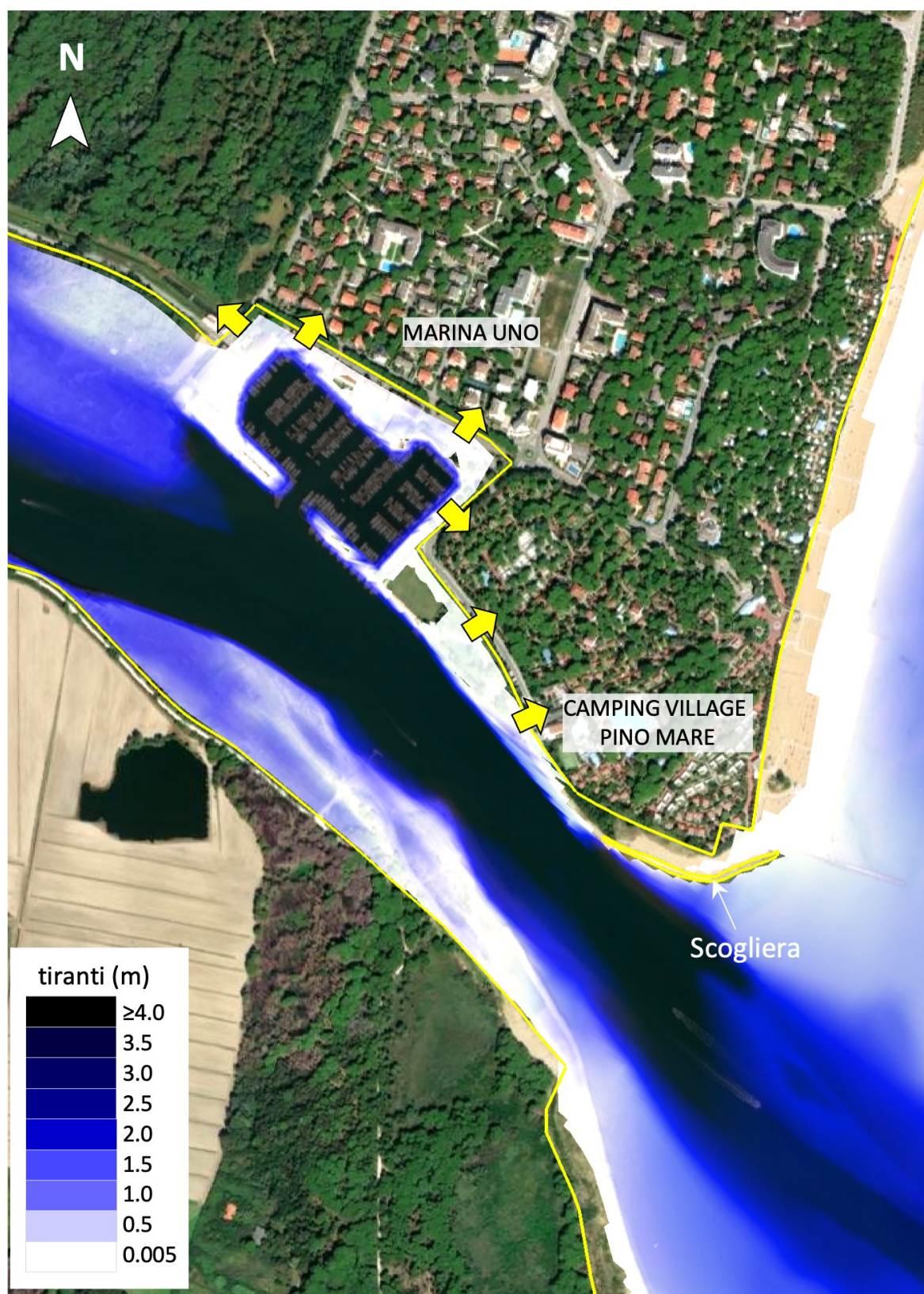


Figura 104. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in presenza di scogliera in sinistra foce: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti in corrispondenza di Marina Uno e il Camping Village Pino Mare.

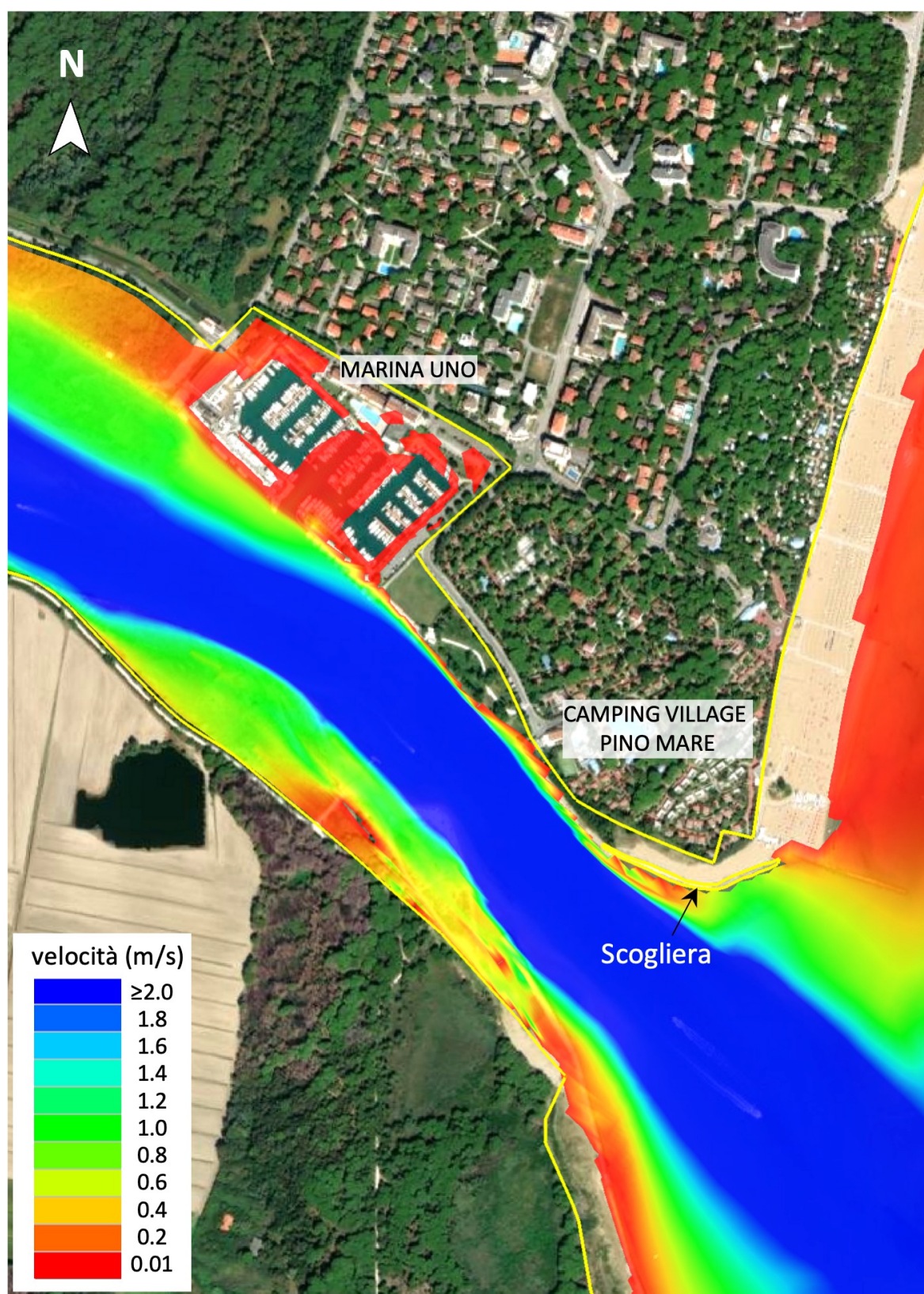


Figura 105. Evento di piena con portata di picco a Latisana di $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea in presenza di scogliera in sinistra foce: contour delle velocità massime raggiunte in corrispondenza di Marina Uno e del Camping Village Pino Mare. La linea gialla indica il contorno della mesh.

Omettiamo di aggiungere altre figure riguardanti i risultati di aree collocate a monte di Marina Uno perché comunque risulterebbero identiche a quelle mostrate nel caso di assenza di scogliera.

Alla luce dei risultati ottenuti, ci sembra di poter affermare senza ombra di dubbio che la presenza della scogliera in sinistra foce, anche se fosse innalzata ulteriormente non costituirebbe alcuna forma di ostacolo al deflusso delle portate di piena del fiume Tagliamento. In verità questo era un risultato più che prevedibile, dal momento che le dimensioni della scogliera rappresentano una frazione molto piccola dell'intera sezione di deflusso in foce. Al contrario, e lo dimostrano i fatti, la scogliera sembra portare un grande beneficio alla piccola spiaggia, il cui mantenimento salvaguarda anche l'entroterra dall'innesco di processi erosivi indotti dalle mareggiate che inevitabilmente si attiverebbero in sua assenza.

9.4 Sormonti degli argini principali

Come più volte ripetuto, nell'accordo sottoscritto non è previsto lo studio della propagazione dell'onda di tracimazione nelle aree esterne all'alveo, anche se un simile studio è fattibile con il modello 2DH descritto al §4.1. Un'informazione che però possiamo aggiungere, basata sui risultati ottenuti e mostrati finora, è quella dell'individuazione delle quote arginali più basse del livello massimo raggiunto in alveo durante la piena. Per le quote arginali si fa riferimento ai dati LIDAR LAS Ortometrico RFVG 2017-2020 e DTM 0.5 m Ortometrico Lotto Unico 2018-2020. In Figura 106 sono riportati i risultati di questa analisi, ovvero dei sormonti arginali Δh definiti come

$$\Delta h = \text{livello d'acqua massimo raggiunto in alveo} - \text{quota arginale}. \quad (23)$$

Come si può vedere, praticamente tutto l'argine principale in sinistra Tagliamento, da Cesarolo alla foce, è interessato da fenomeni di tracimazione e pertanto dovrà essere rialzato. A seconda della posizione, sarà richiesto un rialzo di almeno 0.20-1.00 m, che diventano, per esempio con un franco di sicurezza di 1 m, 1.20-2.00 m. Una zona arginale che appare particolarmente critica, sempre in sinistra fiume, è quella di fronte all'isola Pingherli (Figura 106), dove il livello d'acqua massimo supera di almeno 1 m le quote arginali. Questo dato è stato ricavato utilizzando i dati LIDAR LAS Ortometrico RFVG 2017-2020 e DTM 0.5 m Ortometrico Lotto Unico 2018-2020, per avere, comunque, un verifica di tutto ciò sarebbe opportuno fare anche un rilievo da terra.

Anche in destra fiume esistono tratti d'argine che devono essere rialzati, ma la quantificazione di queste quote esula dagli scopi del presente studio. Riportiamo, però, in via eccezionale, la zona di Cesarolo, il cui argine in certi punti richiede un innalzamento di circa 1 m più il franco di sicurezza. Questa criticità è innescata dall'innalzamento della quota dell'incile del Cavrato a +7 m sopra lo zero IGM42, innalzamento necessario per rispettare la decisione contenuta nel PGRA 2021 di limitare a 1200 m³/s la portata smaltita dallo scolmatore Cavrato.

Da evidenziare, poi, come in certe zone, ad esempio Cesarolo e Pertegada, un rialzo arginale risulterà tutt'altro che semplice, vista la presenza di edifici a ridosso dell'argine (Figura 106).

Chiudiamo questa parte segnalando che tutte le quote arginali prima del nodo dello scolmatore Cavrato non sono state controllate, perché fuori dagli scopi del presente studio.



Figura 106. Differenza di quota $\Delta h = \text{livello d'acqua massimo raggiunto in alveo} - \text{quota arginale}$ lungo la sponda sinistra del fiume Tagliamento dal nodo del Cavour fino alla foce. **N.B.** Sia in destra fiume che a Nord del nodo del Cavour non è stata fatta alcuna analisi, eccezionalmente si è riportato il Δh in corrispondenza della località di Cesarolo.

10 Piena con portata di picco a Volta di $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021

Con il PAI 1997, la portata di picco di $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ a Volta era possibile solo con un evento con tempo di ritorno $T = 100$ anni, con gli interventi previsti dal PGRA 2021, invece, un simile picco di piena può verificarsi con tempi di ritorno decisamente più bassi. Per stimare questo tempo, sono state fatte più simulazioni, aventi come obiettivo quello di trovare quale fosse la piena nella sezione di Madrisio che desse a Volta il picco di $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Dopo ripetute simulazioni è stata individuata la piena a Madrisio indicata in Figura 107, avente un picco di $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ e un tempo di ritorno $T \simeq 6$ anni.

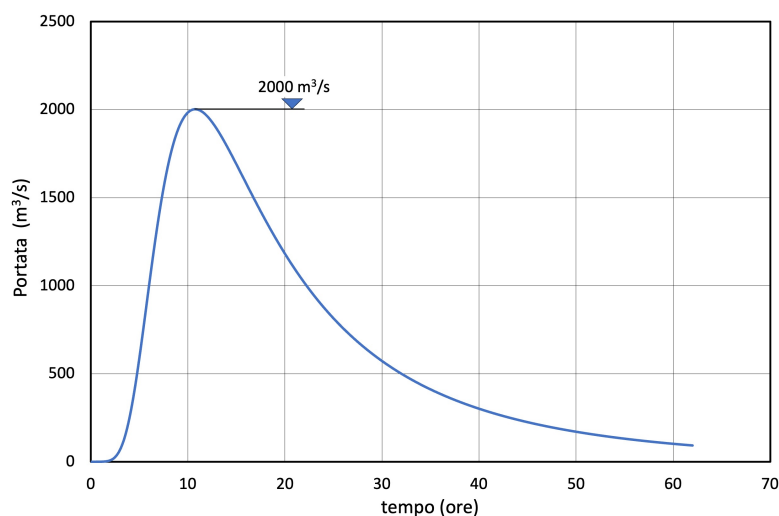


Figura 107. Idrogramma di piena con tempo di ritorno $T = 6$ anni a Madrisio.

Come marea in foce, utilizzando la tecnica illustrata al § 7, coerentemente con la piena è stata imposta una marea sinusoidale con un tempo di ritorno $T = 6$ anni, marea che ha un valore massimo di 1.21 m rispetto al livello medio mare e 1.26 m rispetto allo zero IGM42 (Figura 108).

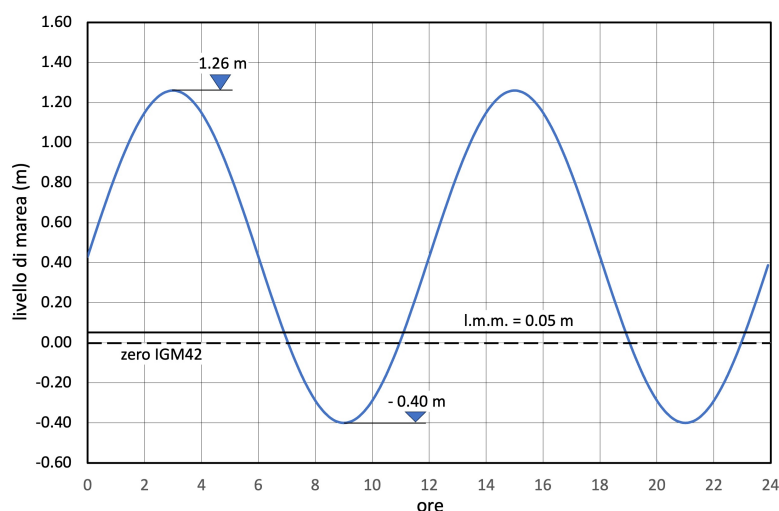


Figura 108. Marea alla foce del fiume Tagliamento con tempo di ritorno $T = 6$ anni e livello medio mare $\Delta\eta = 5 \text{ cm}$.

In Figura 109 è riportato l'andamento delle portate ottenute a Madrisio, Latisana e Volta, la portata lungo il Cavrato è nulla perché secondo il PGRA2021 lo scolmatore deve entrare in funzione solo per le portate che poco prima del nodo con il Cavrato risultano superiori a $2400 \text{ m}^3/\text{s}$.

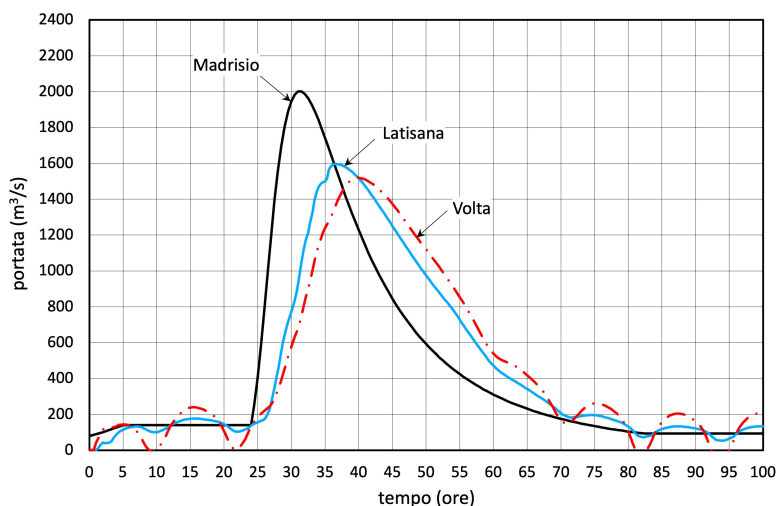


Figura 109. Andamento delle portate a Madrisio (linea nera continua), a Latisana (linea azzurra continua) e a Volta (linea rossa tratto-punto). La portata del Cavrato è nulla.

In Tabella 10 e Figura 110 sono riportati i tiranti massimi raggiunti nelle aree golenali sensibili individuate nel tratto di Tagliamento che va da Cesarolo alla Foce.

Tabella 10. Tiranti massimi in aree golenali sensibili nel tratto di Tagliamento che va da Cesarolo alla Foce, nel caso di una portata massima a Volta di $1522 \text{ m}^3/\text{s}$. Ogni tirante è riferito alla quota del terreno o ad altro manufatto specificato in tabella.

		PGRA 2021 ^(*)
Portata massima a Volta:		$Q_{max} = 1522 \text{ m}^3/\text{s}$
Tempo di ritorno:		T = 6 anni
Località	tirante (m)	
Azienda agricola dei fratelli Simeoni	-	
Insedimento all'altezza di Pertegada	-	
Insedimento all'altezza di Duranti	-	
Isola Picchi	-	
Bevazzana	2.07	
Marina Azzurra ⁽¹⁾	1.73	
Parco Zoo	1.77	
Marina Punta Verde ⁽²⁾	0.64	
Marina Uno ⁽³⁾	-	
Camping Village Pino Mare ⁽⁴⁾	-	

(*) Incile del Cavrato rialzato a +7.30 m sopra lo zero IGM42

(1) Tirante riferito all'area dove sono collocati i bungalow.

(2) Tirante riferito alla banchina fissa interna.

(3) Tirante riferito al parcheggio Est.

(4) Tirante riferito alla rotatoria del ristorante "Alla Vecchia Finanza".

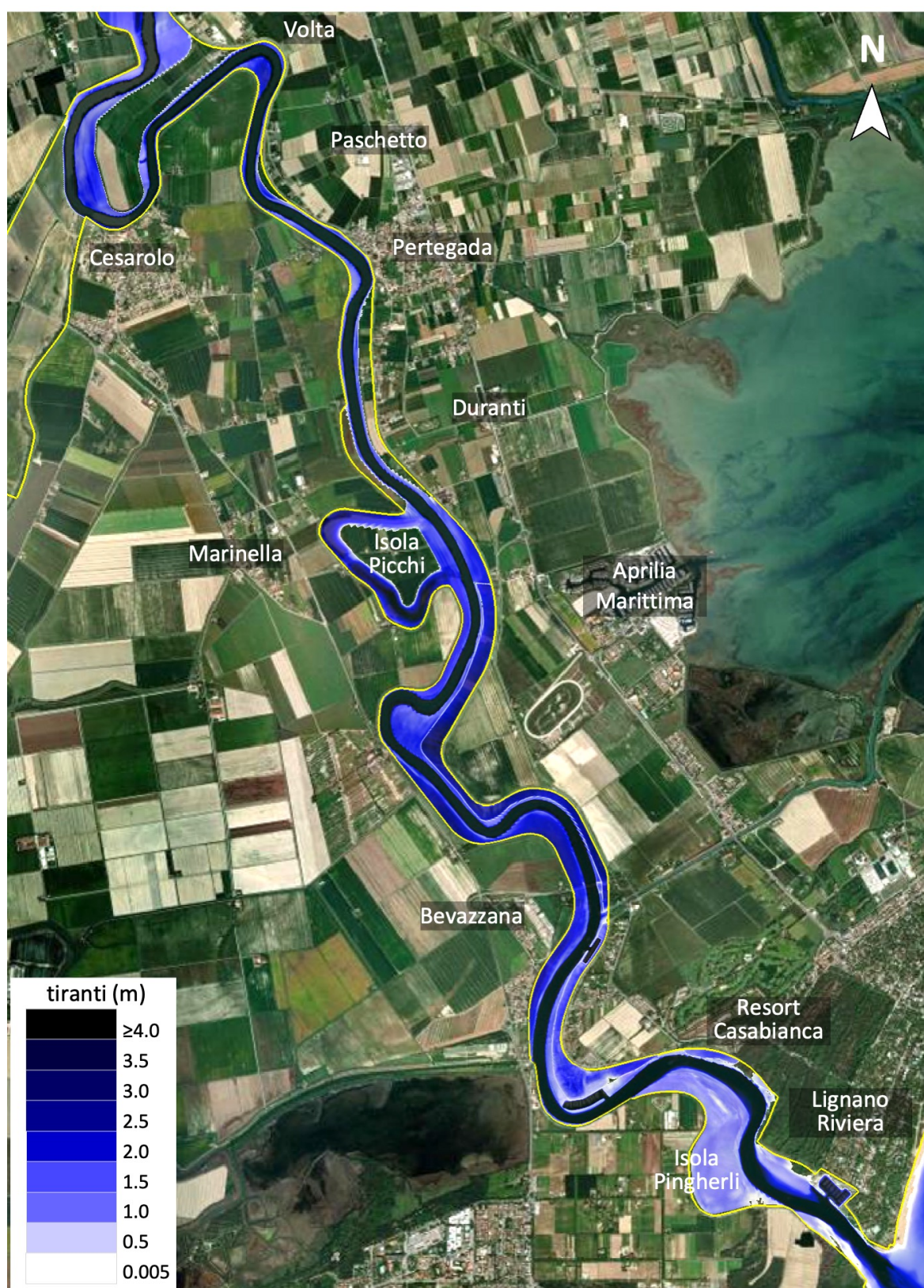


Figura 110. Evento di piena con portata di picco a Volta di $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti negli insediamenti in golena sinistra tra Cesarolo e la Foce.

Come si può vedere (Figura 109), a fronte di un picco di $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ a Madrisio, a Latisana si registra una portata massima di $1596 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre a Volta si registra una portata massima di $1522 \text{ m}^3/\text{s}$. La differenza di $74 \text{ m}^3/\text{s}$ si può attribuire alla laminazione d'alveo che si verifica tra Latisana e Volta. La laminazione a monte della stretta di Latisana risulta del **20.2%**.

Il picco di piena a Volta di $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, che con il PAI 1997 veniva raggiunto mediamente ogni 100 anni, con le prescrizioni del PGRA 2021 viene raggiunto mediamente ogni **6 anni**. In corrispondenza di tale portata, le aree golenali relative a Bevazzana, Marina Azzurra, Parco Zoo e Marina Punta Verde vengono inondate (Figura 110), mentre le altre aree risultano asciutte. I valori numerici dei tiranti sono riportati in Tabella 10.

11 Piena con portata di picco a Volta di $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021

Per avere un quadro più completo, abbiamo simulato anche una piena con picco intermedio a Volta compreso tra $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ e $2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Procedendo sempre in maniera iterativa è stata individuata la piena a Madrisio indicata in Figura 111, avente un picco di $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ e tempo di ritorno **$T = 12$ anni**.

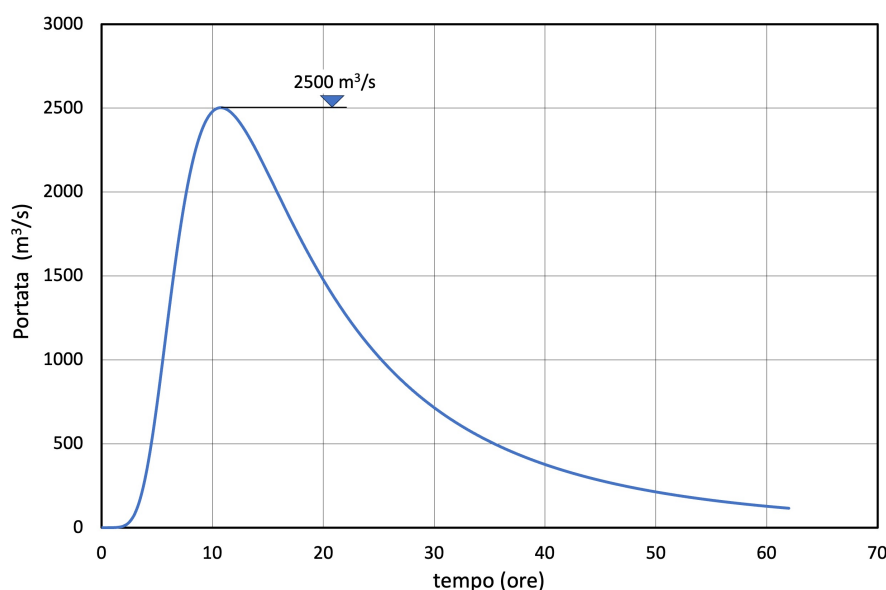


Figura 111. Idrogramma di piena con tempo di ritorno $T = 12$ anni a Madrisio.

Come marea in foce, sempre utilizzando la tecnica illustrata al § 7, coerentemente con la piena è stata imposta una marea sinusoidale con tempo di ritorno **$T = 12$ anni**, marea che è risultata avere un valore massimo pari a 1.30 m rispetto al livello medio mare e 1.35 m rispetto allo zero IGM42 (Figura 112).

In Figura 113 è riportato l'andamento delle portate ottenute a Madrisio, Latisana e Volta; la portata lungo il Cavrato è sempre nulla perché, come definito dal PGRA2021, lo scolmatore Cavrato entra in funzione solo quando le portate poco prima del nodo con il Cavrato sono superiori a $2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Come si può vedere, a fronte di un picco di

$2500 \text{ m}^3/\text{s}$ a Madrisio, a Latisana si registra una portata massima di $1966 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre a Volta si registra una portata massima di $1833 \text{ m}^3/\text{s}$. La differenza di $133 \text{ m}^3/\text{s}$ si può attribuire alla laminazione d'alveo che si verifica tra Latisana e Volta e al nodo del Cavrato stesso.

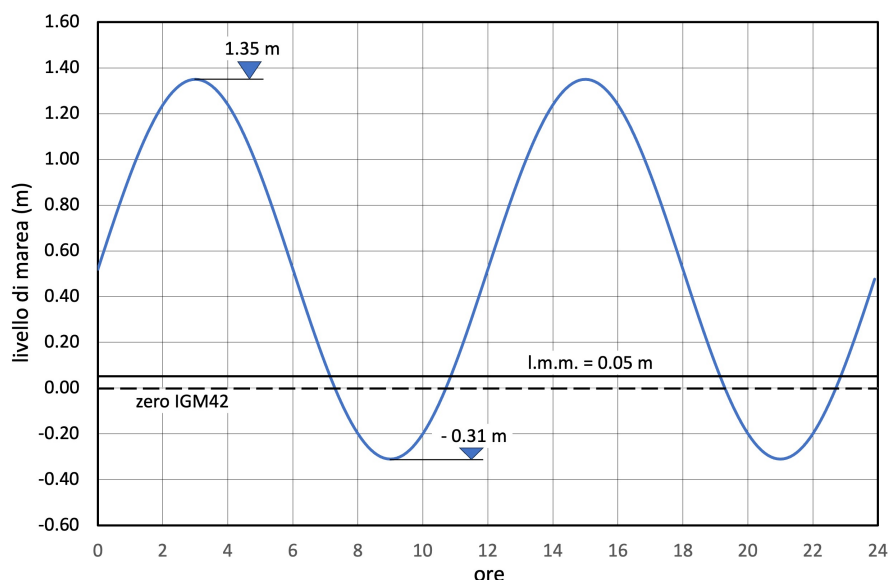


Figura 112. Marea alla foce del fiume Tagliamento con tempo di ritorno $T = 12$ anni e livello medio mare $\Delta\eta = 5$ cm.

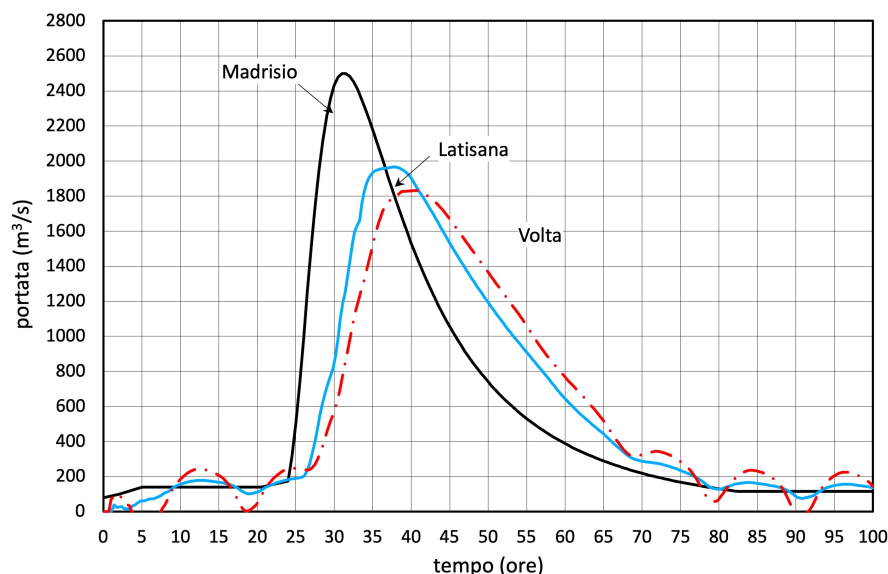


Figura 113. Andamento delle portate a Madrisio (linea nera continua), a Latisana (linea azzurra continua) e a Volta (linea rossa tratto-punto). La portata del Cavrato è nulla.

La laminazione a monte della stretta di Latisana risulta pari al **21.4%**.

Il picco di piena a Volta di $1833 \text{ m}^3/\text{s}$, che con il PAI 1997 non veniva mai raggiunto, con le prescrizioni del PGRA 2021 viene raggiunto mediamente ogni **12 anni**. In corrispondenza di tale portata, tutte le aree golenali sensibili tra Cesarolo e la foce, salvo Marina Uno e il Camping Village Pino Mare, vengono inondate (Figura 114) con i valori di tirante riportati in Tabella 11.

Tabella 11. Tiranti massimi in aree golenali sensibili nel tratto di Tagliamento che va da Cesarolo alla foce, nel caso di una portata massima a Volta di $1833 \text{ m}^3/\text{s}$. Ogni tirante è riferito alla quota del terreno o ad altro manufatto specificato in tabella.

<i>Portata massima a Volta:</i>		PGRA 2021 ^(*)
<i>Tempo di ritorno:</i>		$Q_{max} = 1833 \text{ m}^3/\text{s}$
		$T = 12 \text{ anni}$
<i>Località</i>	<i>tirante (m)</i>	
Azienda agricola dei fratelli Simeoni	2.99	
Insediamento all'altezza di Pertegada	2.12	
Insediamento all'altezza di Duranti	2.23	
Isola Picchi	2.29	
Bevazzana	2.50	
Marina Azzurra ⁽¹⁾	2.33	
Parco Zoo	2.37	
Marina Punta Verde ⁽²⁾	1.31	
Marina Uno ⁽³⁾	-	
Camping Village Pino Mare ⁽⁴⁾	-	

(*) Incile del Cavrato rialzato a +7.30 m sopra lo zero IGM42

(1) Tirante riferito all'area dove sono collocati i bungalow.

(2) Tirante riferito alla banchina fissa interna.

(3) Tirante riferito al parcheggio Est.

(4) Tirante riferito alla rotatoria del ristorante "Alla Vecchia Finanza".

12 Sintesi dei risultati e conclusioni

A seguito dell'approvazione del PGRA 2021, alcune Società che operano in sinistra Tagliamento nel tratto Cesarolo-foce, preoccupate, hanno commissionato uno studio al Laboratorio di Idraulica del Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura dell'Università degli Studi di Udine. Obiettivo dello stesso era capire cosa sarebbe successo alle attività delle Società quando, una volta rialzato l'incile del Cavrato, la portata della piena di progetto smaltita dal tratto terminale del fiume Tagliamento fosse passata da $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Lo studio, partendo da un'analisi dei livelli idrometrici misurati in 138 anni di osservazione a Venzone, ha evidenziato fin da subito come la durata della piena di progetto proposta dal PGRA 2021, ricavata con un modello geomorfoclimatico, non fosse del tutto coerente con i dati misurati a Venzone, a differenza della durata della piena di progetto proposta dal vecchio PAI 1997, che invece è risultata coerente. Per quanto riguarda la portata massima di progetto, sia il PAI 1997, sia il PGRA 2021, sia questo studio forniscono un valore pressoché identico, pari a $4600 \text{ m}^3/\text{s}$. Per inciso, il valore individuato con questo studio è stato ottenuto con una classica elaborazione statistica dei dati misurati dall'idrometro di Venzone.

Un risultato che può rivelarsi molto utile, emerso durante questo studio, riguarda il tempo di traslazione più frequente del picco delle onde di piena da Venzone a Latisana, risultato di **12 ore**, e da Venzone alla foce, risultato di **17 ore**.

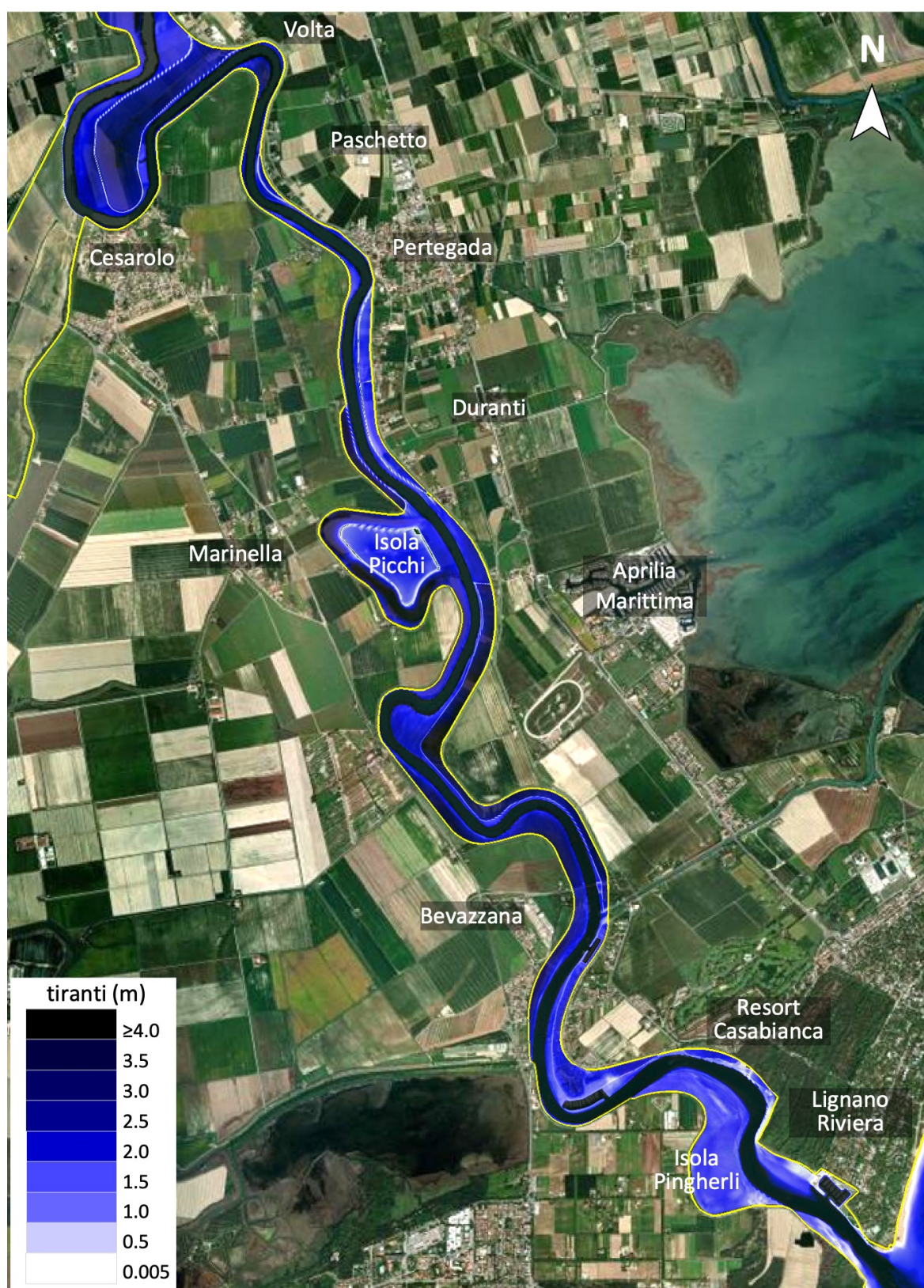


Figura 114. Evento di piena con portata di picco a Volta di $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle condizioni d'alveo previste dal PGRA 2021, con il picco di piena in foce in fase con il picco di marea: contour dei massimi tiranti d'acqua raggiunti negli insediamenti in golena sinistra tra Cesarolo e la Foce.

Analizzando i livelli idrometrici di Venzona, è stato osservato che l'intensità dei picchi di piena non risulta influenzata dalle variazioni climatiche, al contrario della frequenza degli eventi più alti che sembra essere aumentata.

Riguardo al livello medio mare, è emerso che negli ultimi 33 anni il tasso di crescita è aumentato sensibilmente, raggiungendo il valore di **3.74 mm/anno**, in linea con le previsioni fatte dall'IPCC. Inoltre, la marea massima centenaria, riferita al livello medio mare, è risultata di **1.55 m**.

Il modello idraulico bidimensionale utilizzato in questo studio, già applicato con successo in un altro lavoro fatto sul fiume Tagliamento per la Regione FVG (Petti 2007), è stato ulteriormente validato con la massima piena annuale del 2018 (tempesta Vaia) e la massima piena annuale del 2023, ottenendo dei risultati che, se confrontati con alcune misure sperimentali, appaiono del tutto lusinghieri. In entrambi i casi le simulazioni dei due eventi hanno rivelato, coerentemente con la realtà, che se il picco di piena che transita nel tratto Cesarolo-foce viene limitato a non più di **1200 m³/s**, nessun insediamento collocato in golenale sinistra nel tratto Cesarolo-foce, Società comprese, viene allagato. Purtroppo, il PGRA 2021, adducendo motivazioni di sicurezza riguardanti gli argini dello scolmatore Cavrato e la laguna di Caorle, ha innalzato a **2400 m³/s** questo limite, da cui il presente studio. Naturalmente, contrariamente a quanto si potrebbe pensare, questo innalzamento non condiziona solo l'evento centenario, perché tutti gli eventi, negli ultimi anni piuttosto frequenti, minori o uguali a **2400 m³/s**, venendo convogliati verso il tratto terminale Cesarolo-foce, aumentano sensibilmente la probabilità di allagamento degli insediamenti collocati in sinistra golenale.

Proprio per indagare questo aspetto, sono stati ipotizzati e simulati alcuni possibili scenari, tenendo conto anche delle maree, sia astronomiche che meteorologiche, fortemente influenti sui livelli del Tagliamento nelle aree prossime alla foce.

I primi due scenari simulati hanno riguardato la portata massima transitabile a Latisana e S. Michele al Tagliamento prevista dal PAI 1997 e PGRA 2021, la prima di **4000 m³/s**, la seconda di **3600 m³/s**. Contestualmente, per il PAI 1997, si è verificato che la ripartizione delle portate al nodo con il Cavrato fosse effettivamente di **2500 m³/s** sul Cavrato e **1500 m³/s** sul tratto Cesarolo-foce. Per il PGRA 2021, invece, si è fatto in modo che la ripartizione delle portate fosse di **1200 m³/s** sul Cavrato e **2400 m³/s** sul tratto Cesarolo-foce. Per ottenere ciò, è stato sufficiente mantenere la quota dell'incile del Cavrato attuale per il caso PAI 1997, mentre abbiamo dovuto innalzare la quota a **+7.30 m** (rispetto allo zero IGM42) nel caso del PGRA 2021.

In entrambi i casi, come piena di progetto è stata assunta quella centenaria proposta dal PGRA 2021, ipotizzando una laminazione a monte di Madrisio tale da portare il picco di piena a Latisana ai valori definiti dal PAI 1997 e dal PGRA 2021. Dopo alcune simulazioni preliminari, abbiamo trovato che nel primo caso era sufficiente trattenere a monte di Madrisio un volume d'acqua pari a **15 · 10⁶ m³**, nel secondo caso, invece, era necessario trattenere un volume d'acqua pari a **35 · 10⁶ m³**. È importante osservare che, se da un lato questi invasi garantiscono le portate massime stabilite per Latisana dal PAI 1997 e PGRA 2021, dall'altro non è detto che le quote arginali prima della stretta di Latisana siano in grado di contenere i livelli derivanti dal rigurgito, e quindi dall'invaso, che si crea prima della stretta. Tale verifica non è stata fatta perché non rientrante negli obiettivi del presente studio.

In Tabella 12 è riportata una sintesi dei tiranti ottenuti con le simulazioni. Come si

può vedere, durante una piena centenaria, mentre con le disposizioni del PAI 1997 solo una parte degli insediamenti vengono allagati, con le disposizioni del PGRA 2021 tutti gli insediamenti in golena sinistra vengono sommersi e, per la maggior parte, ciò si verifica con tiranti decisamente significativi (Tabella 12).

Tabella 12. Tiranti massimi nelle aree golenali sensibili del tratto di Tagliamento che va da Cesarolo alla Foce, generati dalla piena di progetto definita dal PGRA 2021. Ogni tirante è riferito alla quota del terreno o ad altro manufatto specificato in tabella.

	PAI 1997 ^(*)	PGRA 2021 ^(**)
<i>Portata massima sul Cavrato:</i>	$Q_{max} = 2420 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{max} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$
<i>Portata massima a Volta:</i>	$Q_{max} = 1460 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{max} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$
<i>Tempo di ritorno:</i>	T = 100 anni	T = 100 anni

<i>Località</i>	<i>tirante</i> (m)	<i>tirante</i> (m)
Azienda agricola dei fratelli Simeoni	2.67	4.48
Insediamento all'altezza di Pertegada	-	4.35
Insediamento all'altezza di Duranti	-	4.26
Isola Picchi	-	4.41
Bevazzana	2.18	3.51
Marina Azzurra ⁽¹⁾	2.02	3.29
Parco Zoo	2.12	3.22
Marina Punta Verde ⁽²⁾	1.08	2.16
Marina Uno ⁽³⁾	-	0.22
Camping Village Pino Mare ⁽⁴⁾	-	0.11

(*) Incile del Cavrato con la quota attuale

(**) Incile del Cavrato rialzato a quota +7.30 m sopra lo zero IGM42

(1) Tirante riferito all'area dove sono collocati i bungalow

(2) Tirante riferito alla banchina fissa interna

(3) Tirante riferito al parcheggio Est

(4) Tirante riferito alla rotatoria del ristorante "Alla Vecchia Finanza"

Ciò che si osserva (Tabella 12) è che seppure con le disposizioni PAI 1997 alcuni insediamenti vengano allagati, i tiranti massimi negli stessi risultano più contenuti e, soprattutto, questo avviene mediamente ogni 100 anni.

Come già osservato, con l'innalzamento della quota dell'incile del Cavrato, tutte le piene che in prossimità del Cavrato risultano inferiori a **2400 m³/s** vengono fatte proseguire lungo il tratto terminale del Tagliamento, con una conseguente sensibile riduzione del tempo di ritorno relativo agli allagamenti degli insediamenti.

Tanto per fare un esempio, l'evento Vaia del 2018 e l'evento di ottobre-novembre 2023, con un picco di portata a Latisana di **2389 m³/s** il primo e **2311 m³/s** il secondo, sarebbero transitati entrambi solo nel tratto di Tagliamento Cesarolo-foce, allagando tutti gli insediamenti in golena sinistra con tiranti sostanzialmente identici a quelli mostrati nell'ultima colonna della Tabella 12, e questo potrebbe verificarsi mediamente ogni **24-30 anni**.

L'innalzamento della quota del Cavrato, riduce il tempo di ritorno di una determinata portata massima che si muove lungo il tratto di Tagliamento Cesarolo-foce. Per vedere

questo, si pensi ad una portata di picco di **1500 m³/s** transitante per Volta. Nel caso del PAI 1997 tale portata ha un tempo di ritorno **T = 100 anni**, nel caso del PGRA 2021, che prevede l'innalzamento della quota dell'incile del Cavrato, invece, il tempo di ritorno si riduce. Per trovare tale valore, sono state simulate tutta una serie di piene sintetiche a picco variabile applicate nella sezione di Madrisio. Tale procedimento si è reso necessario perché era sconosciuto a priori l'invaso che ciascuna di queste piene avrebbe avuto a monte di Latisana. Al termine delle simulazioni, è stato trovato che la piena con picco a Madrisio di **2000 m³/s** restituiva a Volta una portata massima di **1522 m³/s**; tale piena ha rivelato un tempo di ritorno **T = 6 anni**, che corrisponde, nei fatti, a quello di una piena ordinaria. Questo significa che mediamente ogni 6 anni, le società riportate nella prima colonna della Tabella 13 si allagano, con i tiranti riportati nella medesima Tabella 13.

Per completezza, è stata analizzata anche una portata di picco transitante per Volta di **1800 m³/s**. Anche in questo caso, per trovare quale fosse la piena a Madrisio che generava a Volta un tale valore, si è proceduto con la simulazione di tutta una serie di piene sintetiche a picco variabile applicate nella sezione di Madrisio. Alla fine è stato trovato che la piena con picco a Madrisio di **2500 m³/s** restituiva a Volta una portata massima di **1833 m³/s**; tale piena ha rivelato un tempo di ritorno **T = 12 anni**. Con una simile piena tutte le società riportate nella seconda colonna della Tabella 13 si allagano, con i tiranti riportati nella medesima Tabella 13.

Tabella 13. PGRA 2021: tiranti massimi nelle aree golenali sensibili del tratto di Tagliamento che va da Cesarolo alla Foce per le portate massime a Volta di 1522 m³/s e 1833 m³/s. Ogni tirante è riferito alla quota del terreno o ad altro manufatto specificato in tabella.

	PGRA 2021 ^(**)	PGRA 2021 ^(**)
<i>Portata massima sul Cavrato:</i>	$Q_{max} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{max} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$
<i>Portata massima a Volta:</i>	$Q_{max} = 1522 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{max} = 1833 \text{ m}^3/\text{s}$
<i>Tempo di ritorno:</i>	T = 6 anni	T = 12 anni
<i>Località</i>	<i>tirante</i> (m)	<i>tirante</i> (m)
Azienda agricola dei fratelli Simeoni	-	2.99
Insedimento all'altezza di Pertegada	-	2.12
Insedimento all'altezza di Duranti	-	2.23
Isola Picchi	-	2.29
Bevazzana	2.07	2.50
Marina Azzurra ⁽¹⁾	1.73	2.33
Parco Zoo	1.77	2.37
Marina Punta Verde ⁽²⁾	0.64	1.31
Marina Uno ⁽³⁾	-	-
Camping Village Pino Mare ⁽⁴⁾	-	-

^(**) Incile del Cavrato rialzato a quota +7.30 m sopra lo zero IGM42

⁽¹⁾ Tirante riferito all'area dove sono collocati i bungalow

⁽²⁾ Tirante riferito alla banchina fissa interna

⁽³⁾ Tirante riferito al parcheggio Est

⁽⁴⁾ Tirante riferito alla rotatoria del ristorante "Alla Vecchia Finanza"

Per quantificare l'accresciuta pericolosità di queste aree, si può ricorrere al concetto di pericolosità idraulica.

Con riferimento ad un'opera generica, la probabilità E che l'intensità di un evento sia superata almeno una volta negli L anni di vita dell'opera si chiama "pericolosità idraulica" ed è definita come:

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^L, \quad (24)$$

dove T è il periodo di ritorno espresso in anni. In Figura 115 è riportato l'andamento della pericolosità idraulica E in funzione della vita di un'opera L e del tempo di ritorno T .

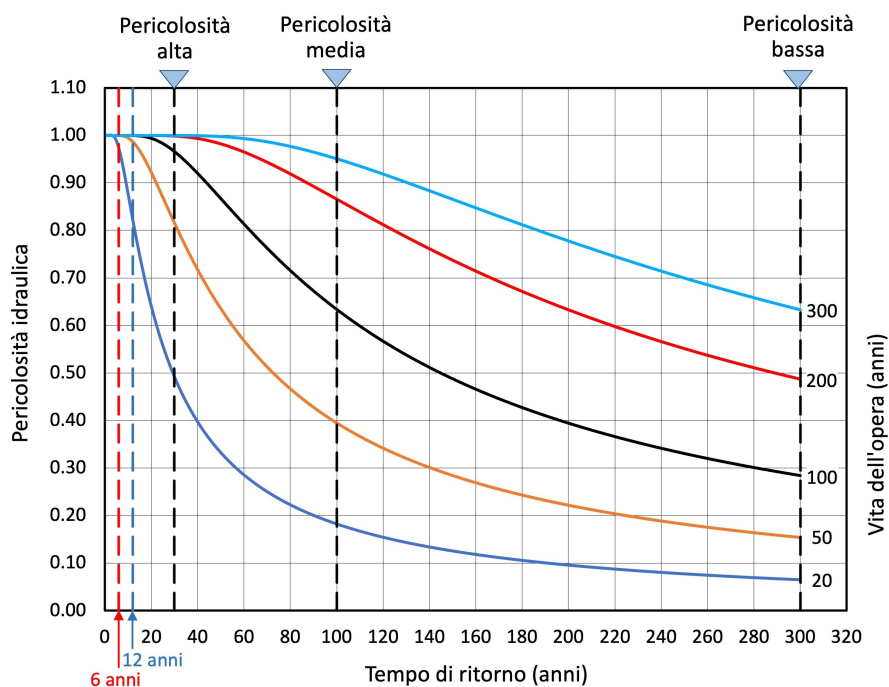


Figura 115. Andamento della pericolosità idraulica E in funzione della vita di un'opera L e del tempo di ritorno T .

A titolo di esempio, considerando un'opera per cui è prevista una vita $L = 50$ anni, un evento con tempo di ritorno uguale a 100 anni comporta una pericolosità uguale a 0.395, cioè del 39.5%. Per un evento con tempo di ritorno di 6 anni, però, per tutte le opere che hanno una vita maggiore o uguale a 50 anni la pericolosità risulta sostanzialmente unitaria, cioè del 100% (Figura 115). In questo senso sembrerebbe legittimo parlare di **altissima pericolosità**.

Per un evento con tempo di ritorno di 12 anni, invece, per tutte le opere che hanno una vita di 50 anni la pericolosità risulta del 98.7%, ma per quelle che hanno una vita di 100 anni e più la pericolosità risulta sempre del 100% (Figura 115). In questo senso sembra ancora legittimo parlare di **pericolosità molto alta**.

Si potrebbe obiettare che tutto ciò che si trova in golena è di pertinenza fluviale e come tale ha un'alta probabilità di essere inondato; situazioni simili, però, sono molto diffuse lungo il Tagliamento, e spesso si parla di opere realizzate 50-60 anni fa, come per esempio la scuola di Spilimbergo, costruita in golena destra con i fondi del terremoto del

1976. Rimane, comunque, il fatto che a valle di Cesarolo, un'opera esistente in golena che abbia un orizzonte di vita di 50 anni, passa da una pericolosità idraulica del 39.5%, con le quote dell'incile del Cavrato attuali, ad una pericolosità del 98.7-100% con le quote dell'incile rialzate a +7.30 m (rispetto allo zero IGM42).

Un altro aspetto che lo studio ha evidenziato è che praticamente tutto l'argine principale sinistro del Tagliamento, da Cesarolo alla foce, dovrà essere rialzato, con quote, ammettendo un franco di sicurezza di 1 m, variabili tra **1.20** e **2.00 m**. Anche l'argine principale destro dovrà essere rialzato in più parti, con quote che dovranno essere definite da un apposito studio. Solo a titolo di esempio, citiamo l'argine principale che difende il paese di Cesarolo, che dovrà essere rialzato di circa **1 m** più il franco di sicurezza.

Per concludere, lo studio aveva anche la finalità di vedere se la scogliera attualmente costruita in sinistra foce del Tagliamento fosse d'ostacolo al deflusso delle massime portate di piena del fiume. Per verificare ciò, sono state fatte due simulazioni con la piena di progetto: la prima senza scogliera, la seconda con scogliera; ponendosi nelle condizioni più sfavorevoli in termini di deflusso di portata, la scogliera è stata modellata come insormontabile. Il confronto dei risultati non ha rivelato alcuna differenza apprezzabile sia nei livelli che nelle portate, suggerendo che la scogliera attuale non è di alcun ostacolo al deflusso delle portate di piena. Al contrario, dal punto di vista marittimo, la scogliera risulta un'opera molto importante per salvaguardare la spiaggia residua ed evitare, di conseguenza, la possibilità che il moto ondoso attacchi direttamente il Camping Village Pino Mare.

Udine, 6 novembre 2024.



PROF. ING. MARCO PETTI, PhD
Responsabile Scientifico dello Studio

Docente ordinario di *Idraulica* e di *Idraulica Marittima e Costiera*

Riferimenti bibliografici

- Audusse, E., F. Bouchut, M.O. Bristeau, R. Klein and B. Perthame. 2004. "A fast and stable well-balanced scheme with hydrostatic reconstruction for shallow water flows." *SIAM Journal Sci. Comput.* 25(6):2050–65.
- Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijens. 1999. "A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation." *J. Geophys. Res.* C4(104):7649–7666.
- Choow, V.T. 1988. *Open-channel hydraulics*. MacGraw-Hill.
- Fontolan, G. and M. Petti. 2017. Regione Friuli Venezia Giulia: Accordo di collaborazione per attività di ricerca e per il supporto scientifico metodologico alle attività relative alla predisposizione dello studio di assetto morfologico ambientale della laguna di Marano e Grado. Technical report Dipartimento di Matematica e Geoscienze (TS) - Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura (UD).
- IPCC. 2019. Summary for Policymakers. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, ed. UK Cambridge University Press, Cambridge and USA New York, NY. pp. 3–35.
- ISPRA, CNR and ISMAR. 2019. Dinamica e anomalia dell'evento del 12 novembre 2019. Technical report ISPRA - CNR - ISMAR.
- Liang, Q. and F. Marche. 2009. "Numerical resolution of well-balanced shallow water equations with complex source terms." *Advances in Water Resources* 32:873–84.
- Machne, G. and U. Maione. 1982. Studio sulla formazione e sulla propagazione delle piene del fiume Tagliamento. Technical report Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia.
- Oppenheimer, M., B.C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, A.K. Magnan, A. Abd-Elgawad, R. Cai, M. Cifuentes-Jara, R.M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meyssignac and Z. Sebesvari. 2019. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, ed. UK Cambridge University Press, Cambridge and USA New York, NY. Vol. 321-445.
- Petti, M. 2007. Regione Friuli Venezia Giulia: Studio idraulico finalizzato ad una corretta pianificazione degli interventi e dei lavori di manutenzione in alveo del fiume Tagliamento. Technical report Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura. *Relazione delle Fasi 1, 2, 3, 4 e Relazione finale*.
- Petti, M. 2016. Lignano Pineta SpA: Evoluzione morfologica del fiume Tagliamento in corrispondenza del l'imbocco del porto turistico di Marina Uno di Lignano: analisi delle cause d'interrimento e proposte d'intervento per attenuare lo stesso. Technical report Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura.
- Petti, M. 2021a. *Fondamenti di Idraulica Marittima e Costiera*. FORUM Edizioni. 328 pagine.
- Petti, M. 2021b. Regione Friuli Venezia Giulia: Accordo di collaborazione per l'approfondimento tematico della dinamica sedimentaria laguna-mare ai fini della gestione degli interventi da attuare alle bocche lagunari della Laguna di Marano e Grado e della valutazione della loro sostenibilità e successiva Integrazione per l'approfondimento tematico della dinamica sedimentaria del porto di Marano Lagunare. Technical report Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura. *Relazione finale*.

- Petti, M. 2023. Regione Friuli Venezia Giulia: Accordo di collaborazione per attività di ricerca e per il supporto scientifico metodologico alle attività relative alla predisposizione dello “studio di tutela ambientale propedeutico al progetto integrato di infrastrutturazione industriale, capacità logistica e implementazione dell’accessibilità al porto di San Giorgio di Nogaro”. Technical report Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura. *Relazione delle Fasi 1, 2 e 3*.
- Petti, M., S. Bosa and S. Pascolo. 2018. “Lagoon Sediment Dynamics: A Coupled Model to Study a Medium-Term Silting of Tidal Channels.” *Water* 10:569. <https://doi.org/10.3390/w10050569>.
- Soulsby, R.L. 1995. *Bed shear-stresses due to combined waves and current*, *Advanced in Coastal Morphodynamics*. Delft Hydraulics, Delft NL. Eds: Stive MJF, De Vriend HJ, Fredsøe J, Hamm L, Soulsby RL, Teisson C and Winterwerp JC.
- Soulsby, R.L. 1997. *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications*. Thomas Telford.
- SWAN Team. 2013. *SWAN Scientific and Technical Documentation*. Delft University of Technology.
- Toro, E.F. 2001. *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. A practical introduction*. Springer.
- van Rijn, L.C. 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Vol. 1006 Aqua publications Amsterdam.
- van Rijn, L.C. 2001. *Approximation formulae for sand transport by currents and waves and implementation in DELFT-MOR*. Deltares (WL).