



Città della Spezia
 Medaglia d'oro al Merito Civile
 Medaglia d'argento al Valor Militare

Studio idrologico e idraulico per la definizione delle fasce di esondazione dei principali torrenti, fossi e canali ricadenti nel Comune della Spezia

Aggiornamento e integrazione con definizione di possibili interventi di mitigazione del rischio idraulico relativi ad alcune specifiche criticità puntuali



Relazione idraulica e di analisi della pericolosità

Bacino 03: Pagliari

 **ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI GENOVA**
 A1721 *Luca Aldo Remo Dutto*
 Dott. Ing. Luca Aldo Remo Dutto

3636 - 0 4 - 0 0 2 0 0 . DOC

Hydrodata S.p.A.
 via Pomba, 23
 10123 Torino - Italia
 Tel. +39 11 55 92 811
 Fax +39 11 56 20 620
 e-mail: hydrodata@hydrodata.it
 sito web: www.hydrodata.it

00	GIU.21	M.SIMBOLA	L. DUTTO	L. DUTTO	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE

INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	STATO DI RISCHIO DA PIANIFICAZIONE IDRAULICA VIGENTE	4
3.	ALLESTIMENTO DEI MODELLI NUMERICI	5
3.1	Approccio metodologico modellistico	5
3.2	Schema del modello	6
3.2.1	Modello MIKE11	6
3.2.2	Modello MIKE21	10
4.	CONDIZIONI AL CONTORNO	12
5.	RISULTATI	17
5.1	Risultati delle simulazioni	17
5.1.1	Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)	17
5.1.2	Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)	26
5.1.3	Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)	33
5.1.4	Analisi delle dinamiche di esondazione	40
5.1.5	Analisi idraulica del tratto terminale	43
5.1.6	Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti	48
6.	ANALISI DEI RISULTATI E PROPOSTA DI MODIFICA DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ	49

ALLEGATI

ALLEGATO 1 – Descrizione del codice di calcolo MIKE11 - HD

ALLEGATO 2 – Descrizione del codice di calcolo MIKE21 - HD

ALLEGATO 3 – Sezioni trasversali inserite nel modello idraulico, con indicato il livello massimo di piena duecentennale

1. PREMESSA

Il Comune della Spezia ha affidato nel maggio 2019 all'Associazione Temporanea di Imprese (nel seguito ATI) tra Hydrodata S.p.A. (capogruppo mandataria) e ART Ambiente Risorse e Territorio S.r.l. (mandante) il servizio di *redazione di uno studio idrologico e idraulico per la definizione delle fasce di esondazione dei principali torrenti, fossi e canali ricadenti nel Comune della Spezia, con particolare riferimento all'area del levante cittadino, a supporto delle attività di protezione civile e del Piano Urbanistico Comunale* (CIG 7515291652 - CUP G44C18000080001).

A seguito della consegna dello studio (dicembre 2019) e del successivo iter di revisione, è emersa l'opportunità di aggiornare l'analisi di stato attuale per alcuni corpi idrici in relazione alla disponibilità di nuove informazioni e rilievi di dettaglio, oltre a predisporre una proposta di nuova perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica sull'area di studio. In relazione al generale ampliamento di queste ultime rispetto a quanto precedentemente perimetrato nel Piano di Bacino vigente, a causa delle analisi condotte su tratti di reticolo idrografico precedentemente non studiati dal punto di vista dell'assetto idraulico, è apparso inoltre opportuno identificare già da subito possibili interventi di mitigazione del rischio idraulico relativi a specifiche criticità puntuali.

È stato dunque conferito incarico dal Comune alla scrivente Hydrodata S.p.A. (CIG ZC92FBBB86 – CUP G44C18000080001) per il presente studio integrativo con le finalità sopra descritte.

Per omogeneità e semplicità di consultazione si è provveduto a una riemissione completa dello studio pregresso, anche nelle parti che non hanno subito modifiche; il presente aggiornamento sostituisce quindi integralmente lo studio pregresso.

Lo studio è strutturato in 4 fasi operative principali:

1. caratterizzazione dell'assetto attuale dei corsi d'acqua;
2. analisi idrologica;
3. analisi idrauliche e definizione delle fasce di esondabilità attuali;
4. sintesi dello studio e indicazione di possibili interventi per la mitigazione del rischio.

Il presente documento, relativo alla fase 3, descrive l'assetto idraulico di stato attuale e l'estensione delle aree di possibile esondazione delle portate di piena di riferimento per il bacino 03 – Pagliari, comprendente il suo affluente in destra Valle Oscura (cfr. relazione 3636-02-00100, *Caratterizzazione dell'assetto attuale dei corsi d'acqua*, per l'inquadramento dei corpi idrici in studio e la relativa numerazione).

Nei capitoli che seguono si descrivono le attività svolte e i risultati ottenuti per la rappresentazione delle dinamiche di propagazione degli eventi di piena nel bacino del Pagliari, mediante allestimento di modellistica numerica con schema bidimensionale.

In funzione delle aree di esondazione risultanti dall'analisi idraulica è stata tracciata una proposta di ripermimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica A, B e C (rispettivamente pericolosità molto elevata, media e bassa) come definite all'art.12, comma 2 delle Norme di Attuazione (NTA) del vigente Piano di Bacino.

Contestualmente sono stati anche definiti gli ambiti normativi di fascia B, con riferimento alle *aree individuate a minor pericolosità in relazione a modesti tiranti idrici e a ridotte velocità di scorrimento* di cui all'art.15 delle

NTA, delimitando in particolare gli ambiti "B0" e "BB" ai sensi della DGR 91/2013, aggiornamento normativo della precedente DGR 250/2005.

Le fasce così definite sono restituite su base cartografica in scala 1:2.500 nell'elaborato grafico annesso 3636-04-01100.

Si evidenzia come nel presente studio le analisi idrodinamiche per la definizione delle aree potenzialmente esondabili siano state condotte a scala di intero ambito idrografico (ambito 20 – Golfo della Spezia).

Pertanto, nonostante l'approccio scrupoloso, l'elevato dettaglio spaziale della modellistica e l'attenzione posta nella corretta ricostruzione della geometria dei corsi d'acqua, particolarmente per gli elementi individuati come maggiormente critici nell'ambito dei sopralluoghi eseguiti, per l'allestimento dei modelli idraulici si è necessariamente fatto riferimento a basi topografiche estese sull'intero territorio, prevalentemente il DTM da rilievo LiDAR del MATTM per la descrizione delle aree esterne all'alveo inciso, e a documentazione pregressa (studi precedenti, disegni di progetto anche "storici") per la ricostruzione dei tratti di accesso difficoltoso o non possibile (prevalentemente tombinature, ma anche alcuni tratti ubicati in aree industriali, portuali, ferroviarie, ecc.). Si rimanda all'elaborato 3636-02-00100 per la descrizione della documentazione acquisita e utilizzata per ciascun corso d'acqua.

Il DTM LiDAR in particolare è riferibile all'assetto del territorio degli anni 2007-2008; esso è stato aggiornato nella batimetria dei modelli per alcune aree direttamente interferenti o limitrofe agli alvei dei corpi idrici in esame, sulla base di disegni di progetto e/o rilievi in campo, ma nelle spesso ampie aree di propagazione delle esondazioni potrebbero sussistere delle (limitate) discrepanze tra il modello del terreno e lo stato effettivo attuale dei luoghi.

Sulla base della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 e della Carta Tecnica Comunale in scala 1:2.000 sono state inserite nel modello le sagome degli edifici o fabbricati esistenti, con alcuni aggiornamenti conseguenti ai sopralluoghi o all'esame di foto aeree recenti. Non si può escludere tuttavia la presenza di eventuali elementi sul territorio non descritti correttamente dal LiDAR (muri, locali variazioni delle quote del piano campagna) che potrebbero parzialmente influenzare le modalità di propagazione dell'esondazione, soprattutto nelle aree in cui le altezze d'acqua si riducono a valori modesti (dell'ordine della decina di cm), peraltro meno significativi dal punto di vista dell'effettiva pericolosità idraulica.

Si precisa tuttavia come la normativa vigente richieda di evitare, per quanto possibile, ripermetrazioni delle aree esondabili che dipendano esclusivamente da fattori urbanistico-edilizi, ossia da opere (quali muretti, recinzioni, manufatti edilizi, ecc.) la cui eventuale modifica non sia direttamente vincolata da espressione di parere idraulici.

Per maggior chiarezza si riporta quanto indicato a tal proposito dalla DGR 16/2007.

"In particolare quando il moto ed il deflusso risulti condizionato da situazioni non rappresentate da opere idrauliche (quali ad esempio allagamento tramite sottopassi, aperture o discontinuità nelle opere esistenti, ovvero presenza di "muretti" o recinzioni, etc.), e pertanto legato a situazioni che possono rivelarsi contingenti, in quanto derivanti da motivi e condizioni di tipo urbanistico-edilizio, deve essere garantito che le ipotesi poste a base dello studio non abbiano a venir meno né siano influenzate e modificate da eventuali interventi antropici, in quanto questi interventi non risultano soggetti a pareri ed autorizzazioni da parte delle autorità idrauliche competenti.

In assenza delle garanzie suddette devono essere assunte perimetrazioni che prendano contemporaneamente in considerazione le diverse ipotesi di dinamica dell'evento di esondazione, attraverso l'involuppo dei diversi possibili scenari di pericolosità idraulica o una loro opportuna combinazione sulla base della loro probabilità di evenienza.

In tal senso vanno evitate, di norma, ripermetrazioni che dipendono esclusivamente da fattori urbanistico-edilizi.

Le fasce di inondabilità sono infatti delle zone a valenza normativa derivanti dalle aree inondabili e non possono presentare morfologie a "isola" in corrispondenza di manufatti edilizi o blocchi di manufatti o interi isolati. A meno che tale morfologia non risulti suffragata da particolari conformazioni topografiche, evidenziate dalla planimetria e dai transetti, tale morfologia non è consentita anche qualora la tipologia e conformazione degli edifici, dei blocchi o degli isolati li renda protetti da barriere impermeabili.

Le eventuali protezioni edilizie corrispondono, infatti, non ad una "messa in sicurezza" areale della zone, ma piuttosto ad accorgimenti tecnico-costruttivi, attivabili nelle zone a rischio, al fine di proteggere passivamente gli insediamenti dagli allagamenti e di non aumentare il rischio attuale. Proprio perché tali interventi non rappresentano opere idrauliche con obbligo di controllo e manutenzione, né sono soggetti a polizia idraulica né sono di proprietà demaniale, essi non sono soggetti ad alcuna autorizzazione di tipo idraulico in occasione di modifiche degli elementi edilizi in questione. Di conseguenza, le aree protette da strumenti di difesa passiva a scala locale non possono essere tenuti in considerazione ai fini della perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica di cui si tratta".

Nel presente studio, visto l'elevato grado di antropizzazione delle aree esterne ai corsi d'acqua e dei corsi d'acqua stessi, per la rappresentazione delle aree allagabili si è ritenuto opportuno tenere in considerazione alcuni elementi fisici di particolare rilevanza, quali ad esempio muri di cinta continui in calcestruzzo o in pietra di rilevante altezza, talora costituenti per lunghi tratti la sponda di un corpo idrico, considerando però alla stregua di "varchi" completamente aperti eventuali cancellate o vie di accesso, per quanto chiusi da portoni o pannelli amovibili. Sono invece stati generalmente trascurati gli elementi di rilevanza secondaria (muretti, marciapiedi, recinzioni, ecc.).

In conclusione, i risultati del presente studio, esposti nel seguito del documento, costituiscono un aggiornamento e affinamento di maggior dettaglio delle valutazioni di pericolosità idraulica contenute nel vigente Piano di Bacino, e potranno fungere da base per la ridefinizione delle stesse alla scala territoriale d'ambito, a supporto delle attività di protezione civile e del Piano Urbanistico Comunale.

Per quanto sopra osservato, non si può tuttavia escludere la possibilità di ulteriori affinamenti/aggiustamenti a scala locale a seguito di studi di maggiore dettaglio, congruamente con quanto previsto dalle Norme di Piano all'art.15, comma 7bis. Tali studi dovranno ottemperare a quanto indicato dalla DGR n.16/2007 (allegato 2); per il caso specifico si evidenzia come essi dovranno soddisfare i seguenti requisiti minimi:

- basarsi su un rilievo topografico celerimetrico (piano quotato) in grado di descrivere in dettaglio l'effettiva morfologia del territorio, che come detto potrebbe differire localmente dal DTM LiDAR adottato nel presente studio;
- adottare una schematizzazione idraulica di tipo bidimensionale per la valutazione della propagazione delle portate di esondazione sulle aree esterne all'alveo inciso;
- fare riferimento a valori di portata congruenti con l'analisi idrologica presentata nel presente studio, o svilupparne un ulteriore aggiornamento sulla base di nuovi dati.

Approfondimenti potenzialmente meritevoli di nuove analisi idrauliche per verificare l'eventuale necessità di un affinamento della perimetrazione possono essere costituiti dal rilievo, videoispezione o comunque dalla definizione su base certa della geometria di tratti di corso d'acqua risultati inaccessibili per il presente studio, e ricostruiti per le finalità di quest'ultimo sulla base del DTM LiDAR o di documentazione pregressa. L'eventuale diversa definizione del tracciato di tratti tombati potrebbe modificare anche la ripartizione di aree di bacino contribuente tra diversi rami di uno stesso corso d'acqua.

In virtù delle analisi svolte tuttavia si ritiene che gli eventuali studi di cui sopra non possano apportare modifiche macroscopiche alla caratterizzazione dell'assetto di vulnerabilità idraulica derivante dal presente studio, da ritenersi affidabile per l'impostazione della pianificazione territoriale a livello comunale.

2. STATO DI RISCHIO DA PIANIFICAZIONE IDRAULICA VIGENTE

Il vigente Piano di Bacino identifica sul torrente Pagliari un'area di pericolosità idraulica alta (fascia A), perfettamente sovrapposta alle fasce B e C, come rappresentato in Figura 1 (estratto dalla cartografia di Piano: *Carta delle fasce di inondabilità, tavola 5 di 6*).

Un unico attraversamento è indicato come oggetto di verifica idraulica, quello in corrispondenza di viale S. Bartolomeo. Tale verifica dà esito negativo (manufatto inadeguato al deflusso di tutte le portate di piena di riferimento); si precisa tuttavia come allo stato attuale l'area sia stata oggetto di sistemazione conseguente alla realizzazione della nuova darsena, per cui la configurazione è mutata rispetto a quella considerata nel Piano di Bacino.

Il rio di Valle Oscura non è oggetto di definizione di aree di pericolosità idraulica da parte del vigente PdB.

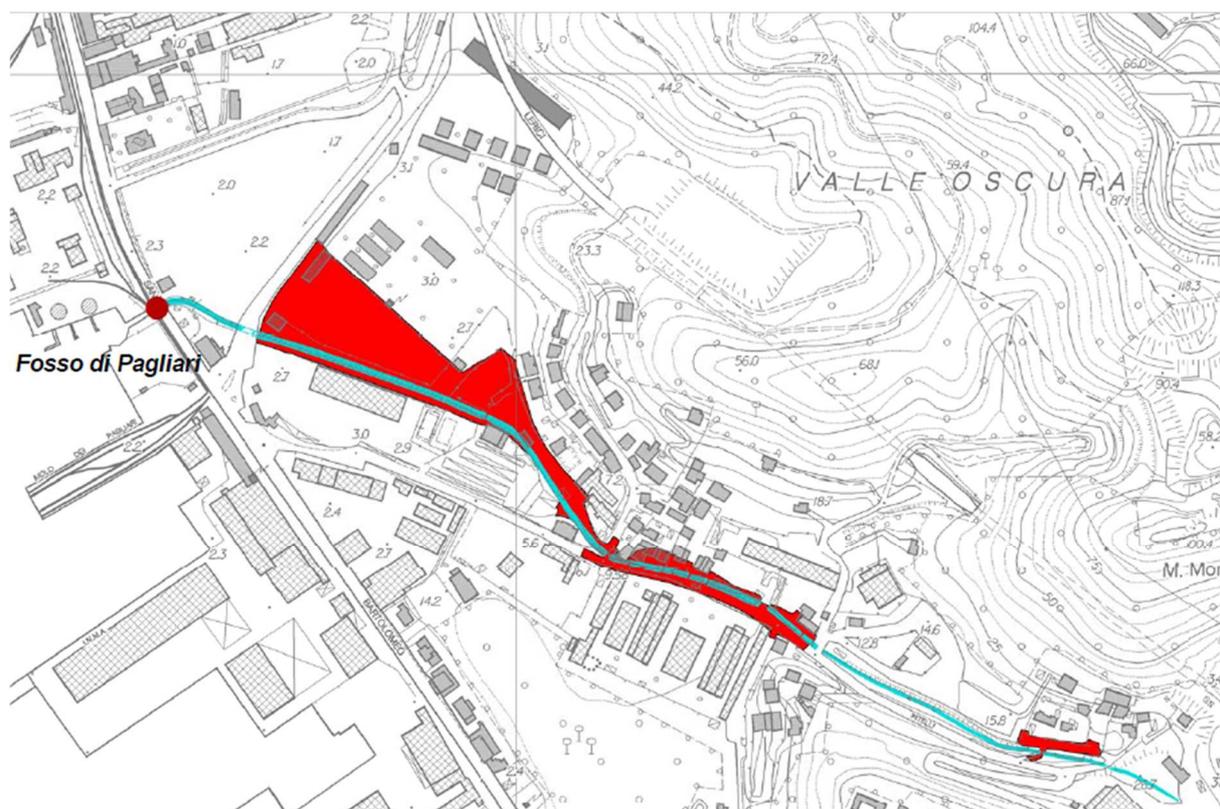


Figura 1 – Aree di pericolosità idraulica da Piano di Bacino vigente.

3. ALLESTIMENTO DEI MODELLI NUMERICI

Le analisi idrauliche per la caratterizzazione dell'idrodinamica di piena dei corsi d'acqua in esame sono state condotte mediante la messa a punto e applicazione di un modello numerico idrodinamico bidimensionale in moto vario, dinamicamente accoppiato a modelli monodimensionali descrittivi del deflusso all'interno degli alvei incisi.

Per descrivere la morfologia del terreno nelle aree di esondazione e propagazione dell'onda di piena è stato utilizzato il modello digitale del terreno (DTM) da volo LiDAR acquisito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Al fine della caratterizzazione geometrica dell'alveo inciso e delle opere di attraversamento presenti si è fatto riferimento, unitamente alle informazioni geometriche derivanti dal DTM citato, anche ai rilievi in campo eseguiti per il presente studio (che coprono in particolare tutti gli attraversamenti del tratto urbano), alle indicazioni geometriche riportate nel vigente Piano di Bacino per gli attraversamenti oggetto di verifica puntuale e allo studio¹ pregresso dell'Autorità Portuale del 2018.

Per maggiori dettagli in merito all'assetto attuale dei corsi d'acqua e alle informazioni disponibili si rimanda allo specifico elaborato 3636-02-00100.

3.1 Approccio metodologico modellistico

A partire dalle informazioni topografiche precedentemente citate è stato allestito un modello numerico idraulico utilizzato per l'analisi di stato attuale delle dinamiche di propagazione della piena nell'area oggetto di studio.

In particolare è stato utilizzato il codice di calcolo MIKE Flood del DHI, che combina l'approccio monodimensionale e quello bidimensionale, eseguendo simulazioni con scenari relativi a diversi tempi di ritorno (50, 200 e 500 anni), con riferimento agli idrogrammi di piena di progetto definiti nell'ambito dell'analisi idrologica (v. elaborato 3636-03-00100).

MIKE Flood è uno strumento modellistico integrato che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, il codice monodimensionale MIKE11 e quello bidimensionale MIKE21 (per una descrizione sintetica dei codici si vedano rispettivamente ALLEGATO 1 e ALLEGATO 2). Esso consente di sfruttare al massimo le potenzialità di MIKE11 e di MIKE21, facendo intervenire nell'ambito di uno stesso modello l'uno o l'altro codice in funzione delle specifiche esigenze di rappresentazione geometrica e di simulazione necessarie: MIKE11 per la simulazione monodimensionale di tratti di alveo incisi e per il deflusso idrodinamico attraverso ponti, tombini, salti di fondo, ecc; MIKE21 per il deflusso nelle aree golenali o di esondazione e di invaso coperte dal DTM (modello digitale del terreno).

MIKE Flood è caratterizzato dal fatto che MIKE11 e MIKE21 rimangono singoli codici indipendenti l'un l'altro nella messa a punto e nell'input-output, mentre una specifica interfaccia grafica consente di definire i collegamenti reciproci e biunivoci per gli interscambi di portata e di quantità di moto e per la congruenza dei livelli idrici di calcolo.

¹ Autorità Portuale - *Studio idraulico del Fosso di Pagliari volto alla revisione delle Aree Inondabili e delle Fasce di Inondabilità dell'area denominata "Casermette" in località Pagliari* (marzo 2018, ProGIS Studio).

Il modello MIKE Flood è stato messo a punto nel modo seguente:

- modello MIKE21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree allagabili esterne alle aree fluviali;
- modello MIKE11 monodimensionale dell'alveo inciso dei corsi d'acqua;
- connessione dinamica dei modelli MIKE21 e MIKE11.

Le restituzioni dei risultati ottenuti con i diversi modelli allestiti, presentate nei capitoli che seguono, sono esposte:

- per le parti di modello monodimensionale sotto forma di profili longitudinali di livello e tabelle contenenti i principali parametri idraulici sezione per sezione, riferiti al valore massimo registrato nel corso dell'evento simulato;
- per le parti di modello bidimensionale (aree allagate), sotto forma di mappe dei tiranti idrici e velocità di scorrimento massime rilevate in ciascuna cella nel corso dell'evento simulato.

In allegato si fornisce rappresentazione di tutte le sezioni implementate nel modello monodimensionale, con indicazione del massimo livello di piena risultante per l'evento di piena associato a TR=200 anni.

3.2 Schema del modello

3.2.1 Modello MIKE11

Il modello monodimensionale complessivo schematizzato con il codice MIKE11 HD (modulo idrodinamico) è costituito da 50 sezioni trasversali, che rappresentano la geometria degli alvei incisi del torrente Pagliari e dell'affluente Valle Oscura.

Le sezioni trasversali inserite nel modello sono frutto del confronto e dell'integrazione delle geometrie rilevate durante i sopralluoghi, di quelle disponibili dagli studi pregressi citati (rif. elaborato 3636-02-00100) e dalla base dati fornita dal DTM ministeriale (LiDAR), al fine di rappresentare in maniera più realistica possibile lo stato attuale dell'alveo e delle aree circostanti.

Il ramo del torrente Pagliari è caratterizzato da una lunghezza pari a 945 m ed è descritto da 33 sezioni trasversali. La prima sezione di monte è collocata subito a valle della confluenza dei due rami tombati di testata. Nel tratto indagato sono presenti 12 attraversamenti e 2 salti di fondo, rappresentati con strutture di tipo "culvert" e "weir" nel modello.

Il tratto in studio del rio di Valle Oscura, affluente in destra del torrente Pagliari, presenta uno sviluppo longitudinale pari a 777 m, di cui 327 m a cielo aperto (parte di monte) e 450 m a sezione chiusa fino alla confluenza. Le sezioni trasversali che descrivono il modello sono 17, di cui 11 descrivono il tratto a cielo aperto di monte e 6 descrivono il restante tratto tombato. La sezione finale, indicata come Sez. 17, risulta coincidente con la Sez. 30 del torrente Pagliari in cui confluisce.

La tombinatura è rappresentata da tre strutture di tipo "culvert", ognuna delle quali è inserita tra due sezioni che descrivono la geometria di imbocco e di sbocco di ciascun tratto. Il primo tratto, di lunghezza pari a circa 94 m, presenta una geometria rettangolare con dimensioni (b x h) 1,70 x 0,70 m, allo sbocco del quale si è riscontrata la presenza di un'ostruzione che impedisce la (quasi) totalità del deflusso verso valle. Il secondo tratto, che prosegue subito a valle dell'ostruzione, presenta uno sviluppo di circa 28 m e una sezione

trasversale ad arco (v. Figura 2). Il terzo e ultimo tratto si sviluppa per 328 m, a partire dalla progressiva 449 m, con geometria circolare e diametro pari a 1,20 m.

A monte della tombinatura, al di sotto della S.S.331, è presente un muro in calcestruzzo che sbarra trasversalmente la vallecola, dotato di una luce di fondo rettangolare di dimensioni $b \times h = 1,0 \text{ m} \times 0,70 \text{ m}$ a valle della quale si ha un salto di fondo; tale manufatto è rappresentato nel modello con una struttura composita formata da un *culvert* e un *weir*. Per maggiori dettagli in merito all'assetto attuale del rio si rimanda all'elaborato 3636-02-00100.

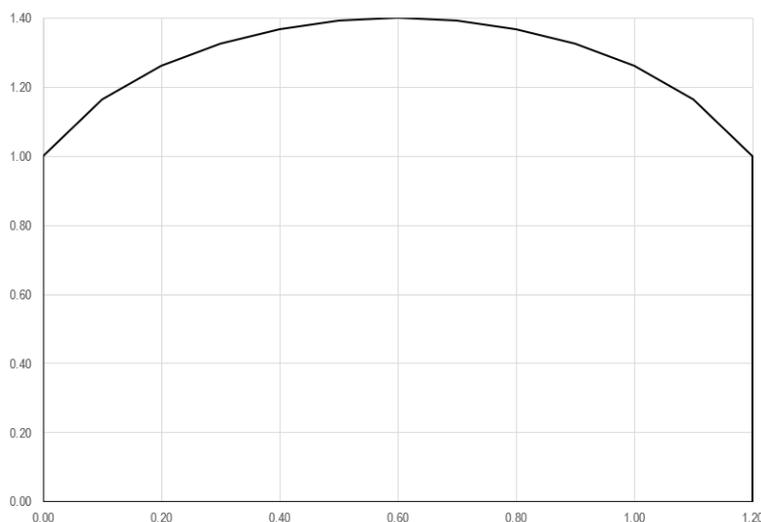


Figura 2 - Sezione trasversale tombinatura Valle Oscura, da progressiva 421 m a 449 m.

In Figura 3 e Tabella 1 si riporta l'estensione del modello (traccia dell'asse e delle sezioni utilizzate) su base foto aerea recente (Google 2018), in coordinate UTM 32 WGS84, e l'anagrafica delle sezioni trasversali (nel caso delle sezioni chiuse proprie delle tombinature la quota di sommità spondale è unica e rappresenta l'intradosso dell'attraversamento).

Per ragioni di carattere computazionale, le sezioni di monte degli attraversamenti sono state duplicate ai fini di rappresentare correttamente il deflusso entro la struttura.

In corrispondenza dei tombini e dei salti di fondo sono state infatti inserite nel modello specifiche strutture di tipo "culvert" e "weir" che riproducono le reali condizioni di deflusso di tali manufatti in condizioni di moto a pelo libero, a pressione e di sormonto dell'impalcato, calcolando correttamente le perdite di carico che si manifestano. Per la localizzazione e descrizione delle caratteristiche dei manufatti riprodotti nel modello numerico si rimanda alla relazione descrittiva dell'assetto attuale del corso d'acqua (cfr. elaborato 3636-02-00100).

Nel tratto tombato di rio Valle Oscura che risulta ostruito, per continuità dell'alveo modellizzato invece di rappresentare una completa interruzione è stato inserito un tratto fittizio di *culvert* circolare con dimensione 100 mm, che consente il deflusso della sola portata di base (qualche decina di l/s); al deflusso dell'evento di piena la presenza di questo collegamento risulta trascurabile e la quasi totalità della portata esonda sul piano campagna.

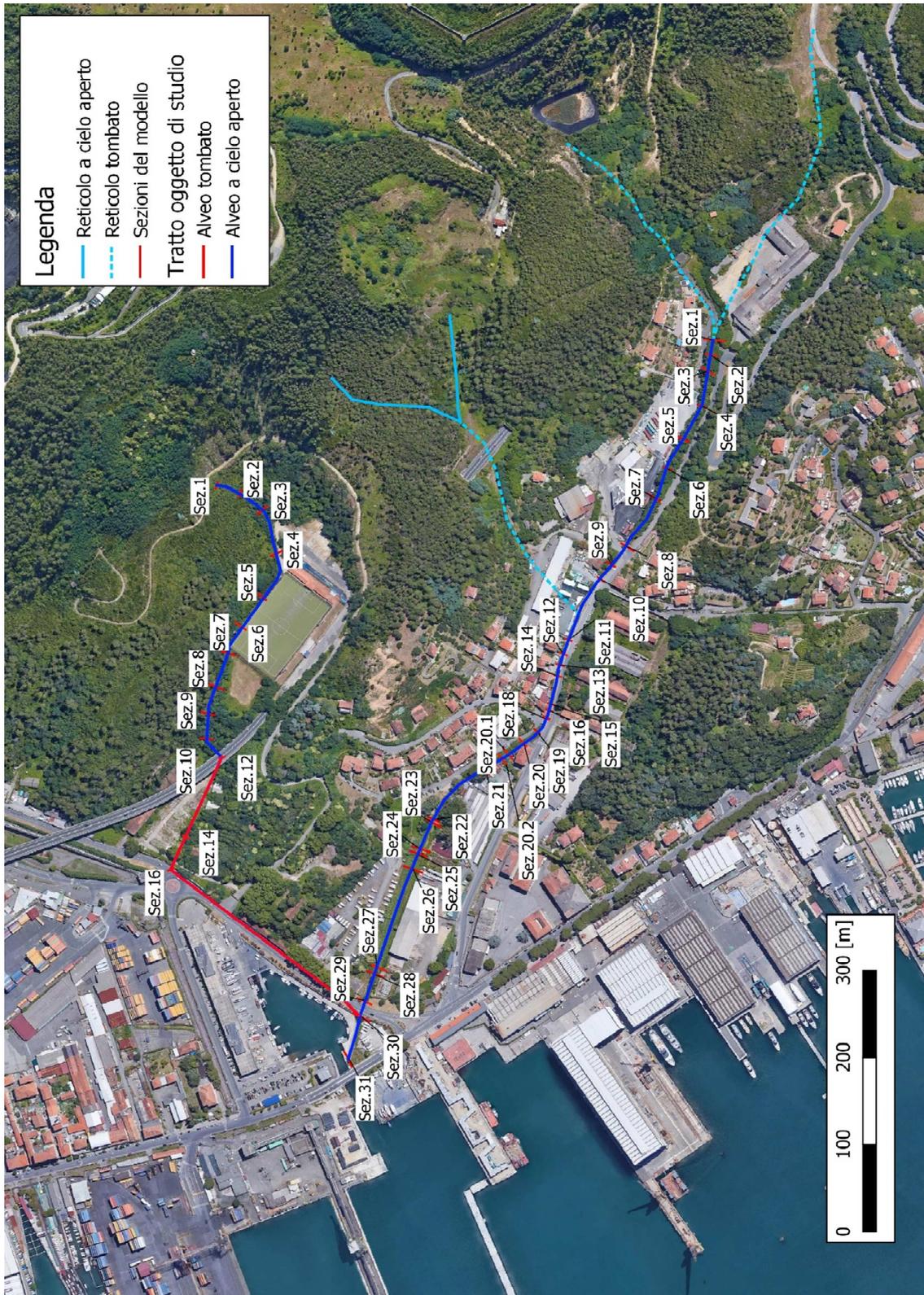


Figura 3 – Network del modello MIKE11 allestito per il torrente Pagliari.

ID Sezioni	ID Ramo	Progressiva [m]	Quota Fondo [m s.m.]	Quota Sponda/Intradosso		Descrizione
				SX [m s.m.]	DX [m s.m.]	
Sez.1	PAGLIARI	0,00	18,50	20,50	20,50	
Sez.2	PAGLIARI	17,45	17,59	18,45	18,79	
Sez.3	PAGLIARI	36,07	17,10	18,35	18,35	Imbocco attraversamento PA_P1
Sez.4	PAGLIARI	77,04	14,84	17,56	16,15	
Sez.5	PAGLIARI	120,26	13,29	15,35	15,28	
Sez.6	PAGLIARI	158,89	12,97	14,82	14,68	
Sez.7	PAGLIARI	196,20	11,80	15,10	13,29	
Sez.8	PAGLIARI	260,73	10,24	12,34	12,34	Imbocco attraversamento PA_P2
Sez.9	PAGLIARI	287,67	9,57	11,17	11,17	Imbocco attraversamento PA_P3
Sez.10	PAGLIARI	308,67	8,90	10,50	10,50	Imbocco attraversamento PA_P4
Sez.11	PAGLIARI	387,80	6,87	8,48	8,48	Imbocco attraversamento PA_P5
Sez.12	PAGLIARI	405,26	6,57	8,17	8,17	Imbocco attraversamento PA_P6
Sez.13	PAGLIARI	418,27	6,40	7,95	7,95	Imbocco attraversamento PA_P7
Sez.14	PAGLIARI	431,16	6,16	7,66	7,66	Imbocco attraversamento PA_P8
Sez.15	PAGLIARI	464,26	5,36	6,96	6,96	Imbocco attraversamento PA_P9
Sez.16	PAGLIARI	471,50	5,05	7,55	7,50	
Sez.17	PAGLIARI	481,70	4,80	7,30	7,30	
Sez.18	PAGLIARI	482,70	4,78	5,88	5,88	Imbocco attraversamento PA_P10
Sez.19	PAGLIARI	500,51	4,50	6,64	6,43	
Sez.20	PAGLIARI	521,01	4,30	6,50	5,25	
Sez.20.1	PAGLIARI	542,10	3,70	5,90	4,50	Salto di fondo
Sez.20.2	PAGLIARI	551,51	2,88	4,38	4,28	
Sez.21	PAGLIARI	573,29	2,32	3,66	3,61	
Sez.22	PAGLIARI	658,05	1,05	2,70	2,70	Imbocco attraversamento PA_P11
Sez.23	PAGLIARI	662,15	1,00	2,40	2,70	
Sez.24	PAGLIARI	695,31	0,50	2,20	2,00	Traversa
Sez.25	PAGLIARI	700,99	0,50	2,20	2,00	
Sez.26	PAGLIARI	719,90	0,40	2,10	2,20	
Sez.27	PAGLIARI	839,31	0,25	1,60	1,60	
Sez.28	PAGLIARI	847,44	0,00	2,32	2,32	
Sez.29	PAGLIARI	881,25	-0,30	2,30	2,30	
Sez.30	PAGLIARI	899,36	-0,30	2,70	2,70	Imbocco attraversamento PA_P12
Sez.31	PAGLIARI	949,36	-0,70	2,50	2,50	
Sez.1	VALLE OSCURA	0,00	53,72	55,17	55,56	
Sez.2	VALLE OSCURA	28,80	42,48	45,81	46,73	
Sez.3	VALLE OSCURA	60,07	34,69	35,79	36,08	
Sez.4	VALLE OSCURA	113,30	29,48	30,05	30,42	
Sez.5	VALLE OSCURA	147,36	25,69	27,29	25,99	
Sez.6	VALLE OSCURA	170,72	25,40	27,00	25,70	
Sez.7	VALLE OSCURA	212,03	25,30	26,90	25,60	
Sez.8	VALLE OSCURA	247,51	23,44	25,45	26,01	
Sez.9	VALLE OSCURA	288,05	19,74	23,14	23,11	
Sez.10	VALLE OSCURA	305,48	6,22	6,92	6,92	"briglia" con luce di deflusso
Sez.11	VALLE OSCURA	326,83	2,63	3,33	3,33	
Sez.12	VALLE OSCURA	327,00	2,63	3,33	3,33	Imbocco tombinatura VO_C1
Sez.13	VALLE OSCURA	421,00	2,00	2,70	2,70	
Sez.14	VALLE OSCURA	422,00	1,43	2,43	2,43	
Sez.15	VALLE OSCURA	449,00	0,86	1,86	1,86	
Sez.16	VALLE OSCURA	449,50	0,86	2,06	2,06	
Sez.17	VALLE OSCURA	776,92	0,62	1,82	1,82	

Tabella 1 – Anagrafica delle sezioni inserite nel modello numerico (escludendo quelle interpolate o fittizie).

3.2.2 Modello MIKE21

Come già anticipato, per l'analisi della propagazione della piena dei corsi d'acqua esaminati è stato allestito un modello MIKE Flood che accoppia dinamicamente il modello monodimensionale MIKE11 (descritto nel capitolo precedente e utilizzato per rappresentare la geometria dell'alveo) con il modello bidimensionale MIKE21, rappresentante le aree esterne di esondazione.

Nel modello bidimensionale alle differenze finite MIKE21 la descrizione geometrica del terreno è rappresentata definendo la quota media del terreno in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato mediante tecniche di interpolazione stabilendo una dimensione di cella a partire dalle basi topografiche disponibili. Nel caso in esame, ai fini di ottenere una più adeguata risoluzione spaziale del modello, è stata eseguita una rielaborazione dei dati LiDAR (circa 1,0 x 1,0 m).

La definizione della dimensione del passo spaziale della griglia rettangolare, da utilizzare per la messa a punto del modello, è un passaggio fondamentale nella sua realizzazione ed influenza direttamente i tempi di calcolo e l'accuratezza spaziale della soluzione. Aumentando le dimensioni del passo della griglia diminuiscono infatti i tempi di calcolo, ma si riduce anche l'accuratezza dei risultati. La scelta deve quindi essere un compromesso tra le due esigenze.

Nel caso in esame la scelta è condizionata dalla necessità di rappresentare con sufficiente dettaglio la geometria delle aree allagabili, degli edifici, delle strade e delle possibili vie di deflusso conseguenti a fenomeni di esondazione.

Si è deciso pertanto di adottare una griglia di calcolo a maglia 2,0 x 2,0 m, composta da 409 righe e 366 colonne (149.694 punti di calcolo).

Nella Figura 4 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello 2D. In bianco sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quote superiori ai 40 m s.m.) o perché ricadenti all'interno dell'alveo inciso dei due corsi d'acqua, il cui contributo al deflusso della piena di riferimento è già simulato e considerato tramite il modello monodimensionale MIKE11.

Per la costruzione della batimetria è stato necessario modificare il modello geometrico estratto dal LiDAR per prendere in conto la realizzazione della Darsena portuale e la modifica dell'attraversamento PA_P12 con profilo sopraelevato rispetto ai piani spondali; tali interventi sono infatti successivi alla data di rilievo del volo LiDAR. A tal fine si è fatto riferimento agli elaborati di progetto² forniti dall'Autorità Portuale (Figura 5).

Inoltre, nel modello è stata inserita la geometria dei fabbricati presenti all'esterno all'alveo modificando la quota delle celle della batimetria che ricadono all'interno dell'impronta degli edifici. Per poter rappresentare un quadro il più possibile aggiornato quest'ultima è stata perimetrata sulla base delle foto aeree più recenti disponibili per l'area di studio (base foto aerea Google – aggiornamento 2018).

² *Darsena Pagliari – Planimetria di variante dicembre 2004 e Darsena Pagliari – Rilievo aggiornato 20 aprile 2009* – rif. elab. 3636-02-00100.

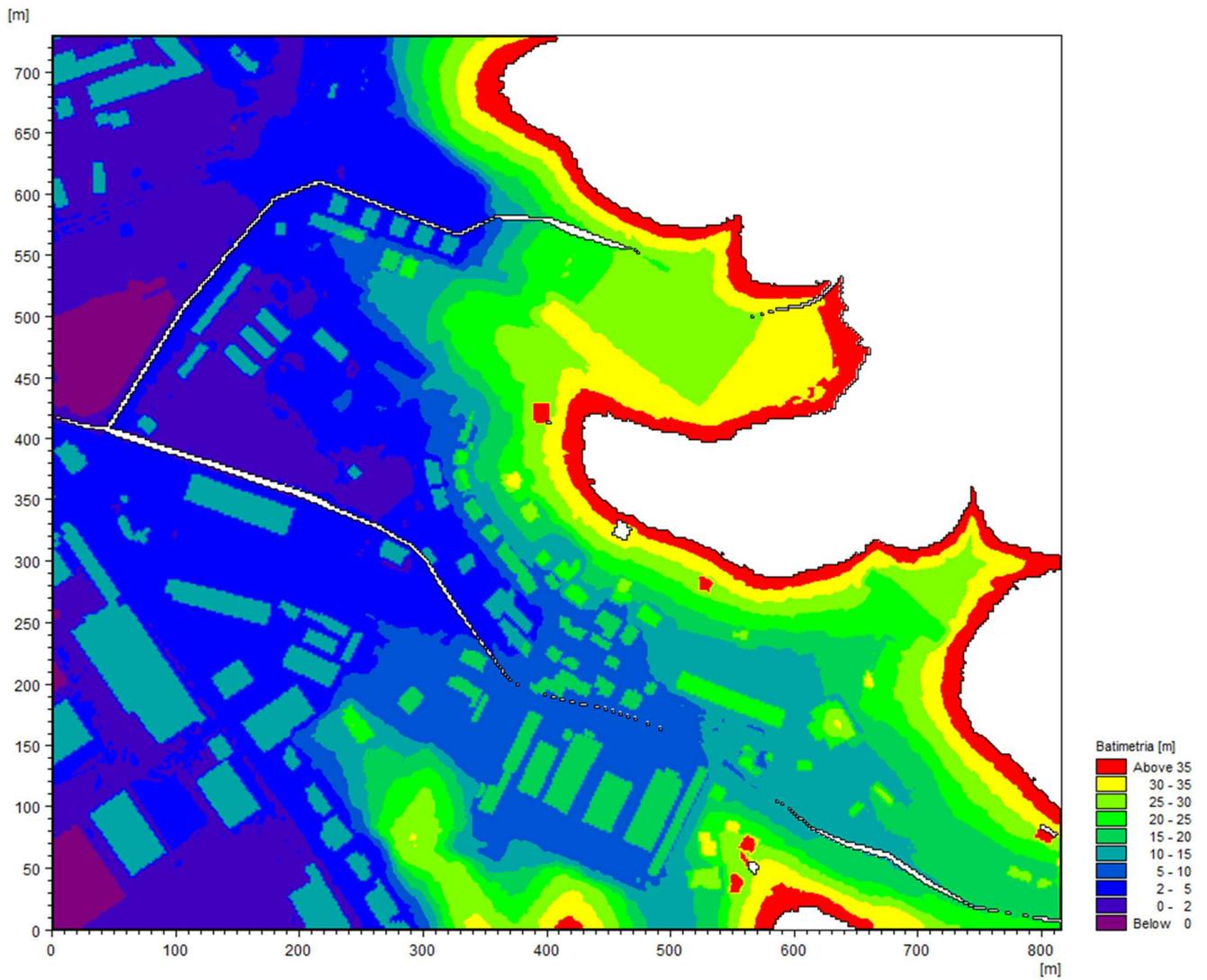


Figura 4 – Batimetria del modello 2D del torrente Pagliari a maglia 2,0x2,0 m (dominio di calcolo complessivo).



Figura 5 – Stralcio della planimetria di progetto della Darsena Pagliari fornita dall'Autorità Portuale e utilizzata per la costruzione della batimetria del modello 2D.

4. CONDIZIONI AL CONTORNO

I modelli di simulazione, oltre alla descrizione geometrica, necessitano della definizione delle condizioni al contorno idrodinamiche e di una serie di parametri quali: passo temporale di integrazione del sistema, coefficiente di resistenza distribuita (scabrezza) e coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity").

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni di moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento e sulle sponde dei canali di deflusso.

In particolare, la scabrezza applicata ai modelli è stata differenziata tra alveo inciso (e quindi modellazione monodimensionale) e aree golenali (modellazione bidimensionale).

I sopralluoghi effettuati ripercorrendo l'asta dei corsi d'acqua e la documentazione fotografica a disposizione hanno fornito gli elementi necessari per la definizione dei valori di scabrezza da associare al tratto oggetto di studio. Tali valori sono stati definiti considerando in primis le Norme di Attuazione (NTA) del vigente Piano di Bacino (Tabella 3), e successivamente, come riscontro, valori tipici di riferimento riscontrabili in letteratura tecnica (Tabella 2).

In accordo con i valori prescritti dalle NTA (allegato 3) si è adottato per i modelli monodimensionali un valore del coefficiente di scabrezza K_s di Gauckler-Strickler pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ lungo i tratti di alveo naturale e di $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ lungo i tratti rivestiti, sia coperti che a cielo aperto. In particolare, un K_s pari a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ è stato adottato nel tratto di valle del torrente Pagliari, tra la Sez.28 e la Sez.31.

Per quanto riguarda l'area esterna all'alveo, modellata con schema bidimensionale, si è provveduto alla differenziazione su due classi di scabrezza in modo da tenere in considerazione la presenza dei principali elementi che possono influenzare la propagazione della piena: linee di deflusso principali (strade) e aree urbane pavimentate; aree vegetate. In particolare alle aree vegetate è stato applicato un coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler di $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, mentre a quelle pavimentate un coefficiente di $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Si precisa a tal proposito come in un modello bidimensionale i coefficienti di scabrezza da considerare siano tipicamente maggiori di circa un 20÷30% di quelli comunemente impiegati nei modelli monodimensionali, per tenere conto del fatto che in un modello 2D sono già in tutto, o almeno in gran parte, direttamente considerati nelle equazioni del moto gli effetti di resistenza secondari indotti dalle condizioni di moto non-monodimensionali (moti trasversali e vorticosi, sinuosità dell'alveo), che nel modello 1D sono invece da includere forfettariamente nel coefficiente di scabrezza.

Natura della superficie	Scabrezza omogenea equivalente ϵ (mm) [mm]	Bazin γ [$\text{m}^{1/2}$]	Kutter m [$\text{m}^{1/2}$]	Manning n [$\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$]	Gauckler Strickler K_s [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]
Pareti di cemento perfettamente liscio. Pareti di legno piallato. Pareti metalliche, senza risalti nei giunti	0,15 ÷ 0,2	0,06	0,12	0,011	100 ÷ 90
Idem, ma con curve	0,2 ÷ 0,4	0,1	0,18	0,012	90 ÷ 85
Pareti di cemento non perfettamente liscio. Muratura di mattoni molto regolare. Pareti metalliche con chiodatura ordinaria	0,4 ÷ 1,0	0,16	0,20 ÷ 0,25	0,013	85 ÷ 75
Pareti di cemento in non perfette condizioni. Muratura ordinaria più o meno accurata. Pareti di legno grezzo, eventualmente con fessure.	2 ÷ 5	0,23 ÷ 0,36	0,35 ÷ 0,55	0,014 ÷ 0,015	70 ÷ 65
Pareti di cemento solo in parte intonacate; qualche deposito sul fondo. Muratura irregolare (o di pietrame). Terra regolarissima senza vegetazione.	8	0,46	0,55 ÷ 0,75	0,018	60
Terra abbastanza regolare. Muratura vecchia, in condizione non buone, con depositi di limo al fondo.	15 ÷ 30	0,60 ÷ 0,85	0,75 ÷ 1,25	0,020 ÷ 0,022	50
Terra con erba sul fondo. Corsi d'acqua naturali regolari.	70	1,30	1,50	0,025	40
Terra in cattive condizioni. Corsi d'acqua naturale con ciottoli e ghiaia.	120 ÷ 200	1,75	2,00	0,030	35
Canali in abbandono con grande vegetazione. Corsi d'acqua con alveo in ghiaia e movimento di materiale sul fondo, oppure scavati in roccia con sporgenze.	300 ÷ 400	2,0 ÷ 2,3	3,00	0,035	30

Tabella 2 – Valori tipici di riferimento da letteratura tecnica dei coefficienti di scabrezza per l'alveo inciso.

Descrizione corso d'acqua	Coeff. di scabrezza di Gauckler Strickler Ks [m ^{1/3} /s]
Tratti di corso d'acqua naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo	25 ÷ 30
Corsi d'acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo	30 ÷ 35
Tratti urbanizzati di corso d'acqua naturali con argini cementati (e/o platee) in buono stato	35 ÷ 40
Corsi d'acqua con fondo ed argini totalmente cementati in ottimo stato ed assenza di manufatti (tubi, cavi, ecc.) o discontinuità interferenti con le acque	40 ÷ 45

Tabella 3 – Coefficienti di scabrezza per l'alveo inciso indicati nelle NTA del vigente Piano di Bacino.

Come passo temporale di integrazione è stato necessario utilizzare, per ragioni di stabilità numerica legate al numero di Courant della corrente, un valore pari a 0,25 secondi.

La viscosità turbolenta è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e viene simulata nel modello tramite il coefficiente di eddy viscosity. Nel caso in esame, al coefficiente è stato assegnato un valore costante pari a 0,5 m²/s sull'intera estensione del modello; tale parametro risulta comunque di minore rilevanza in quanto simulando deflussi di esondazione con scorrimento superficiale gli aspetti legati alla formazione di vortici sono senza dubbio trascurabili rispetto ai prevalenti termini di resistenza idraulica al moto per attrito sul fondo e presenza di ostacoli.

Le condizioni al contorno imposte sono costituite da input di portata a monte e internamente al modello, e da una condizione di valle rappresentata dal livello di mare.

L'analisi idraulica è stata svolta in funzione di tre scenari idrologici caratterizzati da tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni. Nell'ambito dell'analisi idrologica (v. elaborato 3636-03-00100) sono stati definiti i relativi idrogrammi di piena riferiti:

- alla sezione idrologica dell'estremità di monte del tratto di studio (PA-B);
- alla sezione di foce del Pagliari (a monte del contributo del rio di Valle Oscura – PA-A – rappresentati in Figura 6);
- al bacino complessivo del rio di Valle oscura (VO-A).

Nella sezione di monte del modello è stata inserita l'onda di piena relativa al bacino PA-B. Per le finalità della rappresentazione modellistica è necessario far incrementare tale portata verso valle in modo da ottenere alla foce un idrogramma teorico congruente con quello definito per la sezione PA-A (considerando i tempi di traslazione dell'onda e al netto di eventuali volumi fuoriusciti per esondazione laterale). È stato pertanto definito un idrogramma caratterizzante il bacino residuo che sommato a PA-B potesse restituire quello calcolato per PA-A (v. esempio in Figura 7 per TR=200 anni). Tale idrogramma è stato inserito nel modello come apporto distribuito nel tratto di valle, andando pertanto a incrementare man mano le portate defluenti in alveo.

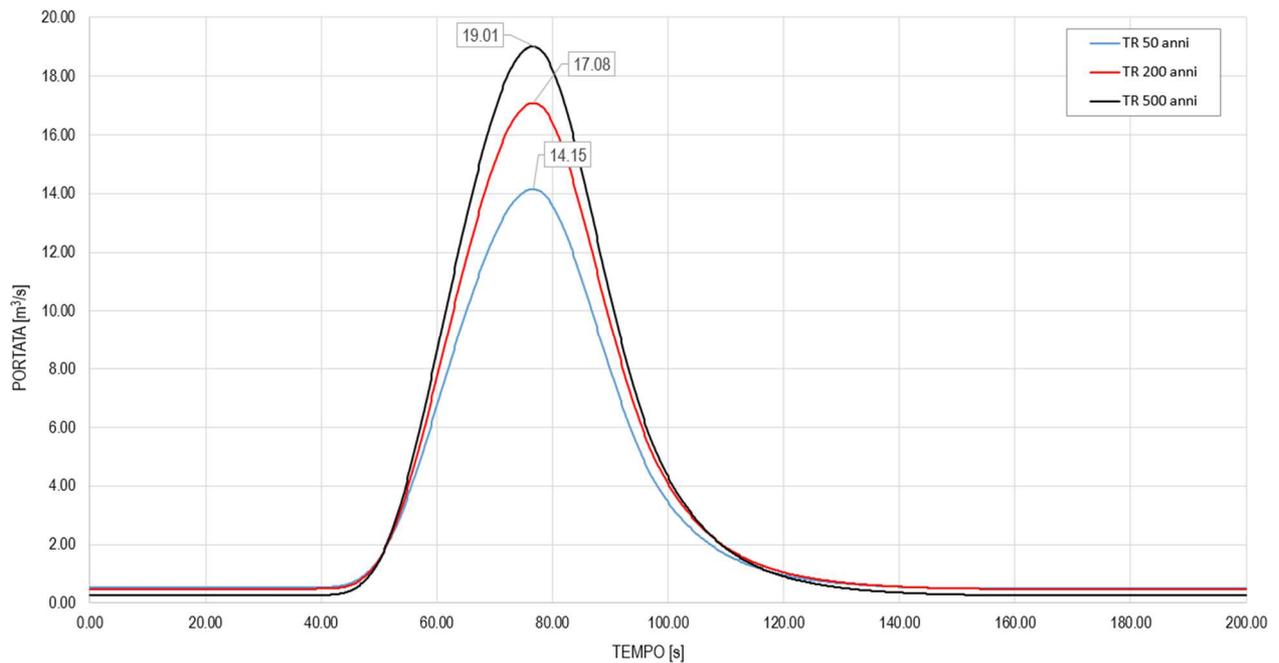


Figura 6 – Idrogrammi dei 3 scenari simulati (TR50, TR200 eTR500) definiti alla foce del torrente Pagliari (PA-A).

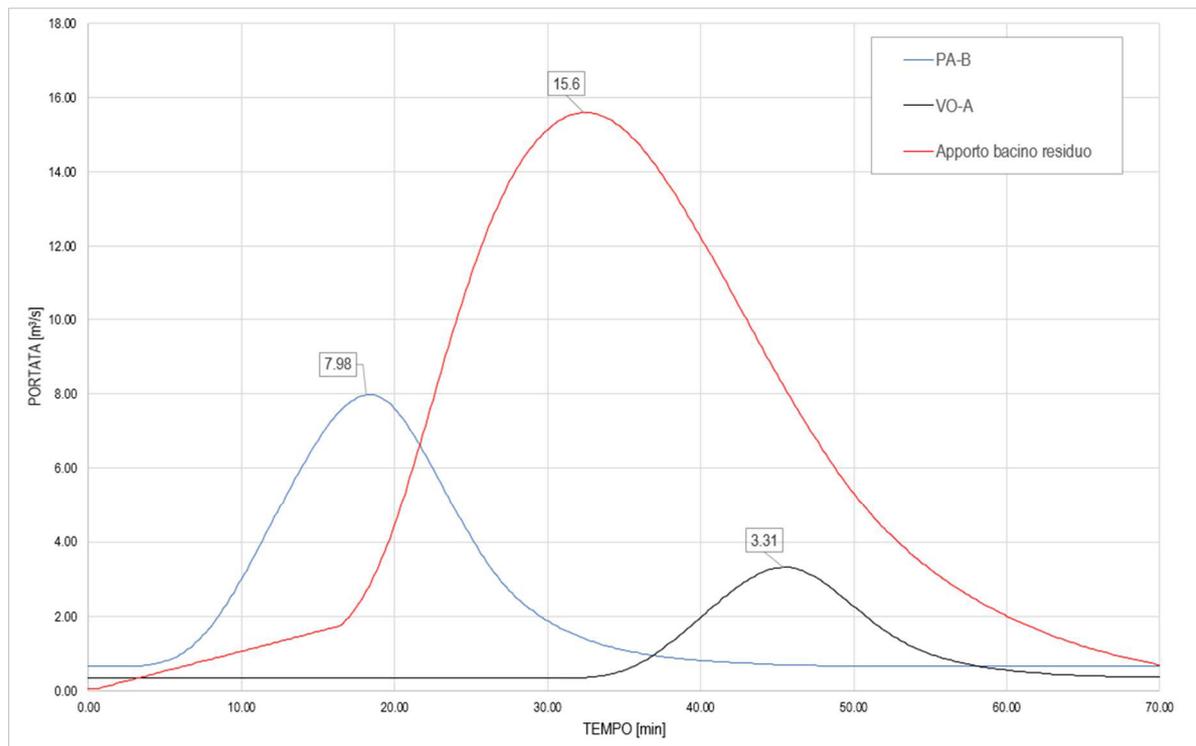


Figura 7 – Idrogrammi inseriti in input al modello (TR200) in diverse sezioni.

La condizione idrodinamica di valle è costituita dal livello idrico massimo di mare riferibile a un evento di mareggiata con determinato tempo di ritorno (generalmente inferiore a quello di verifica idraulica del corso

d'acqua, trattandosi di eventi non correlati, così da non sovrapporre eventi a bassa probabilità di accadimento).

L'effetto di sovralzo del livello di medio mare all'occorrere di un evento meteomarinico intenso è generalmente dato dalla somma dei seguenti fenomeni:

- la marea astronomica;
- la variazione del livello di medio mare dovuto alle condizioni di tempesta (storm surge), eventualmente suddivisibile tra la componente attribuibile al vento (wind set-up) e quella relativa alle variazioni di pressione atmosferica (barometro inverso);
- il sovralzo dovuto al frangimento (wave set-up).

I corsi d'acqua considerati nel presente studio presentano tutti sbocco a mare all'interno del Golfo di La Spezia, protetto all'imbocco da una diga foranea e con morfologia tale da modificare localmente (attutendolo) l'effetto di sovralzo.

Nella quasi totalità degli studi pregressi acquisiti per le finalità del presente studio, e particolarmente in quelli predisposti per l'Autorità Portuale, è definito un medesimo valore di riferimento per il livello idrico massimo da assumere all'interno del Golfo, che risulta pari a **0,50 m s.m.**. Tale valore (assunto costante per tutti i tempi di ritorno indagati) è stato anche adottato, per coerenza, nell'ambito del presente studio.

In sintesi, per tutti gli scenari simulati con il modello accoppiato 1D+2D sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno.

- Condizione al contorno di monte del torrente Pagliari (nel modello MIKE11): portate in ingresso nella sezione di monte (Sez.1) secondo l'idrogramma di riferimento specifico di ogni scenario simulato (diverse per ogni tempo di ritorno TR50, TR200 e TR500) del bacino afferente a monte (PA-B). Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 6,77 m³/s, 7,98 m³/s, 8,78 m³/s.
- Condizione al contorno di monte dell'affluente Valle Oscura (nel modello MIKE11): portate in ingresso nella sezione iniziale di monte (Sez.1) secondo l'idrogramma di riferimento specifico di ogni scenario simulato (tempi di ritorno TR50, TR200 e TR500) del bacino afferente (VO-A). Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 2,81 m³/s, 3,31 m³/s, 3,64 m³/s.
- Condizione al contorno interna al torrente Pagliari (nel modello MIKE11): immissione distribuita tra la Sez.2 e la Sez.19 (progressive 17,45 m e 500,51 m) definita come differenza -opportunamente traslata- tra gli idrogrammi associati ai bacini PA-B e PA-A. Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 12,65 m³/s, 15,60 m³/s, 17,53 m³/s.
- Condizione al contorno di valle del torrente Pagliari (nel modello MIKE11): livello idrico di valle (mare) pari a 0,50 m s.m.
- Condizioni al contorno "interne" di collegamento tra i due modelli MIKE11 e MIKE21: in corrispondenza di tutte le celle lungo la sponda destra e sinistra dei tratti scoperti del torrente Pagliari e del suo affluente in destra, Valle Oscura, vengono applicate le equazioni tipiche dello stramazzo a larga soglia, con le quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello bidimensionale e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni dell'alveo del modello monodimensionale opportunamente interpolate.

5. RISULTATI

I risultati delle simulazioni effettuate con il modello integrato mono-bidimensionale sono illustrati nei capitoli seguenti mediante l'ausilio di rappresentazioni grafiche esplicative quali:

- mappe delle aree di esondazione con rappresentazione delle altezze idriche massime sul piano campagna e dei vettori delle velocità;
- profili longitudinali di inviluppo dei massimi livelli idrici lungo l'alveo inciso dei fossi.

I valori numerici dei principali parametri idrodinamici caratterizzanti i valori massimi di inviluppo del profilo di piena sono indicati di seguito e riportati in specifiche tabelle:

- ID Sez. = identificativo sezione;
- Progr. = progressiva metrica lungo l'asta (m);
- Q = portata massima (m^3/s) – indicazione omessa per le simulazioni in moto permanente;
- P.L. = quota di pelo libero (m s.m.);
- h = altezza d'acqua sul fondo (m);
- v = velocità media della corrente (m/s);
- Fr = numero di Froude della corrente (-);
- H = carico idraulico totale (m s.m.).

Non sono restituiti i risultati sulle sezioni interpolate, che il modello definisce automaticamente per una migliore integrazione delle equazioni del moto in alcuni tratti in cui si ha un passo spaziale più ampio tra due sezioni consecutive.

I parametri idraulici non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno dei modelli numerici (quali attraversamenti, tombini o salti di fondo); per queste si fa riferimento alla sezione immediatamente a monte (ad esempio per la valutazione del franco idraulico).

Per entrambi i corsi d'acqua sono forniti nel seguito i risultati riferiti a 3 scenari di simulazione:

- TR50 : evento di piena con tempo di ritorno pari a 50 anni;
- TR200 : evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni;
- TR500 : evento di piena con tempo di ritorno pari a 500 anni.

5.1 Risultati delle simulazioni

5.1.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)

Nella Tabella 4 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso del torrente Pagliari e dell'affluente Valle Oscura (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 8 e Figura 9 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
PA - Sez.1	0,00	18,50	6,75	19,12	0,61	3,12	1,36	19,61
PA - Sez.2	17,45	17,59	6,79	18,55	0,96	2,51	1,04	18,87
PA - Sez.3	36,07	17,10	6,87	18,16	1,06	2,50	0,78	18,47
PA - Sez.4	77,04	14,84	7,17	15,72	0,88	3,49	1,40	16,34
PA - Sez.5	120,26	13,29	7,44	14,40	1,11	2,68	1,07	14,76
PA - Sez.6	158,89	12,97	7,74	13,70	0,73	3,18	1,39	14,22
PA - Sez.7	196,20	11,80	8,10	12,64	0,84	3,03	1,20	13,11
PA - Sez.8	260,73	10,24	8,78	11,42	1,18	2,65	0,78	11,78
PA - Sez.9	287,67	9,57	9,21	10,82	1,25	2,72	0,78	11,20
PA - Sez.10	308,67	8,90	9,83	10,28	1,38	2,85	0,78	10,69
PA - Sez.11	387,80	6,87	11,45	8,39	1,52	2,86	0,76	8,81
PA - Sez.12	405,26	6,57	12,15	7,88	1,31	2,73	0,76	8,26
PA - Sez.13	418,27	6,40	12,23	7,74	1,34	2,73	0,75	8,12
PA - Sez.14	431,16	6,16	12,57	7,58	1,42	2,90	0,78	8,01
PA - Sez.15	464,26	5,36	13,40	6,93	1,57	2,58	0,66	7,27
PA - Sez.16	471,50	5,05	13,71	6,84	1,79	2,89	0,78	7,27
PA - Sez.17	481,70	4,80	13,85	6,66	1,86	2,40	0,59	6,96
PA - Sez.18	482,70	4,78	13,93	6,66	1,88	2,99	0,70	7,11
PA - Sez.19	500,51	4,50	14,33	5,98	1,48	3,80	1,19	6,72
PA - Sez.20	521,01	4,30	13,86	5,49	1,19	4,20	1,30	6,39
PA - Sez.20.1	542,10	3,70	7,99	4,86	1,16	2,34	0,74	5,13
PA - Sez.20.2	551,51	2,88	8,43	3,84	0,96	3,41	1,29	4,44
PA - Sez.21	573,29	2,32	8,83	3,23	0,91	2,44	0,94	3,53
PA - Sez.22	658,05	1,05	9,46	2,43	1,38	1,83	0,59	2,60
PA - Sez.23	662,15	1,00	9,50	2,27	1,27	2,11	0,72	2,50
PA - Sez.24	695,31	0,50	8,99	2,23	1,73	1,02	0,28	2,28
PA - Sez.25	700,99	0,50	8,94	1,60	1,10	1,81	0,61	1,77
PA - Sez.26	719,90	0,40	8,93	1,55	1,15	1,46	0,49	1,66
PA - Sez.27	839,31	0,25	8,93	0,89	0,64	2,45	1,01	1,20
PA - Sez.28	847,44	0,00	8,93	0,77	0,77	1,53	0,56	0,89
PA - Sez.29	881,25	-0,30	9,06	0,74	1,04	1,12	0,35	0,80
PA - Sez.30	899,36	-0,30	9,32	0,66	0,96	1,50	0,49	0,77
PA - Sez.31	949,36	-0,70	8,94	0,50	1,20	2,13	0,62	0,73
VO - Sez.1	0,00	53,72	2,80	54,13	0,41	6,85	4,20	56,52
VO - Sez.2	28,80	42,48	2,80	42,82	0,34	5,71	3,46	44,48
VO - Sez.3	60,07	34,69	2,81	35,03	0,34	3,50	2,26	35,65
VO - Sez.4	113,30	29,48	2,81	29,98	0,50	3,84	2,31	30,73
VO - Sez.5	147,36	25,69	2,23	26,56	0,87	3,97	1,46	27,36
VO - Sez.6	170,72	25,40	1,07	25,71	0,31	7,46	5,13	28,55
VO - Sez.7	212,03	25,30	0,27	25,78	0,48	1,01	0,54	25,83
VO - Sez.8	247,51	23,44	0,40	23,57	0,13	2,45	2,29	23,88
VO - Sez.9	288,05	19,74	0,33	19,79	0,05	2,85	2,95	20,20
VO - Sez.10	305,48	6,22	0,33	6,35	0,13	2,49	2,19	6,67
VO - Sez.11	326,83	2,63	2,21	3,65	1,02	2,13	0,67	3,88
VO - Sez.12	327,00	2,63	2,22	3,71	1,08	1,21	0,37	3,79
VO - Sez.13	421,00	2,00	1,15	3,60	1,60	0,42	0,11	3,61
VO - Sez.14	422,00	1,43	1,11	3,60	2,17	0,43	0,09	3,61
VO - Sez.15	449,00	0,86	0,00	0,87	0,01	0,00	0,00	0,87
VO - Sez.16	449,50	0,86	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,86
VO - Sez.17	776,92	0,62	0,01	0,66	0,04	0,12	0,11	0,66

Tabella 4 – Risultati di sintesi per lo scenario TR50.

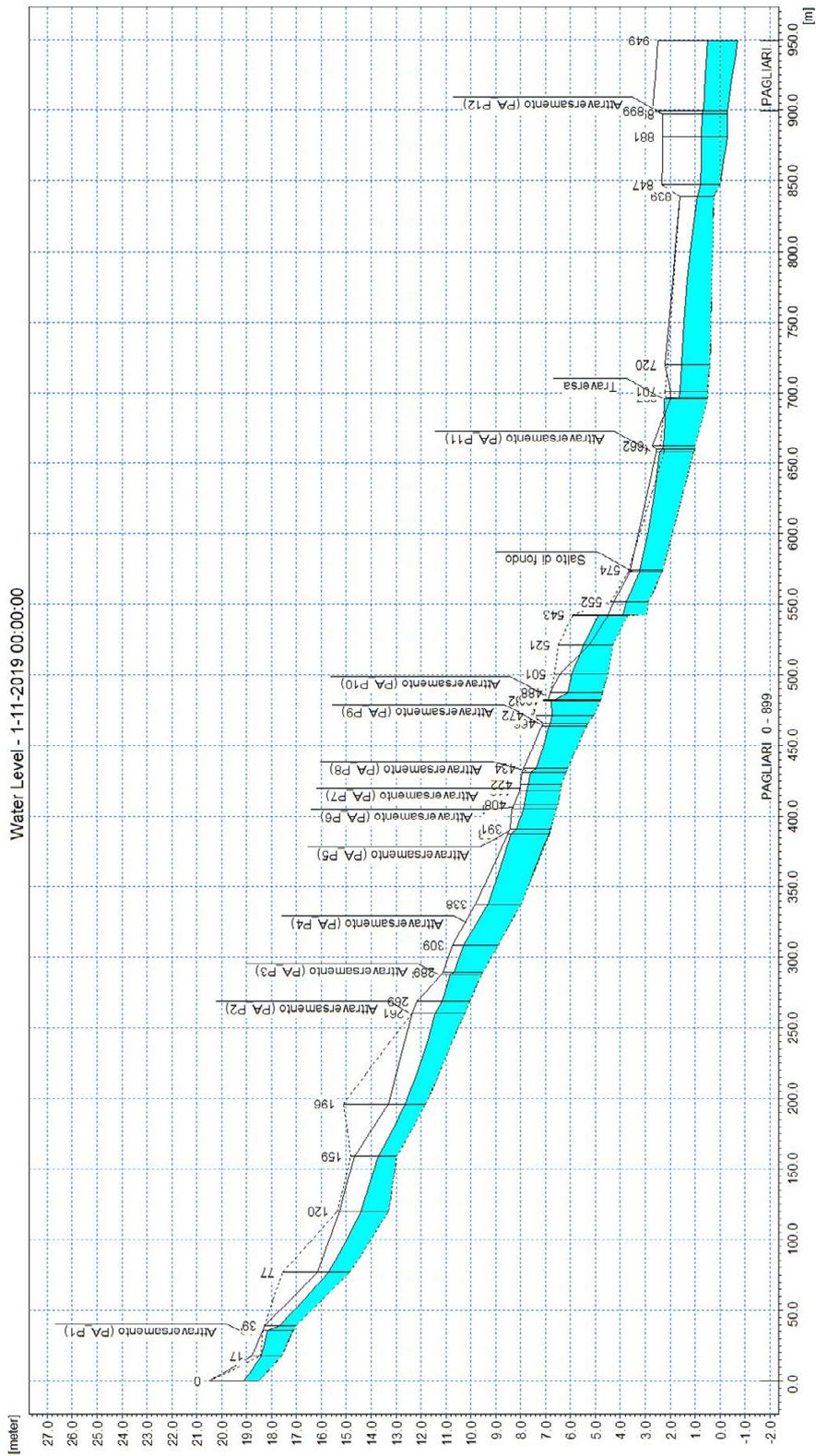


Figura 8 – Profilo longitudinale di corrente del torrente Pagliari, scenario TR50.

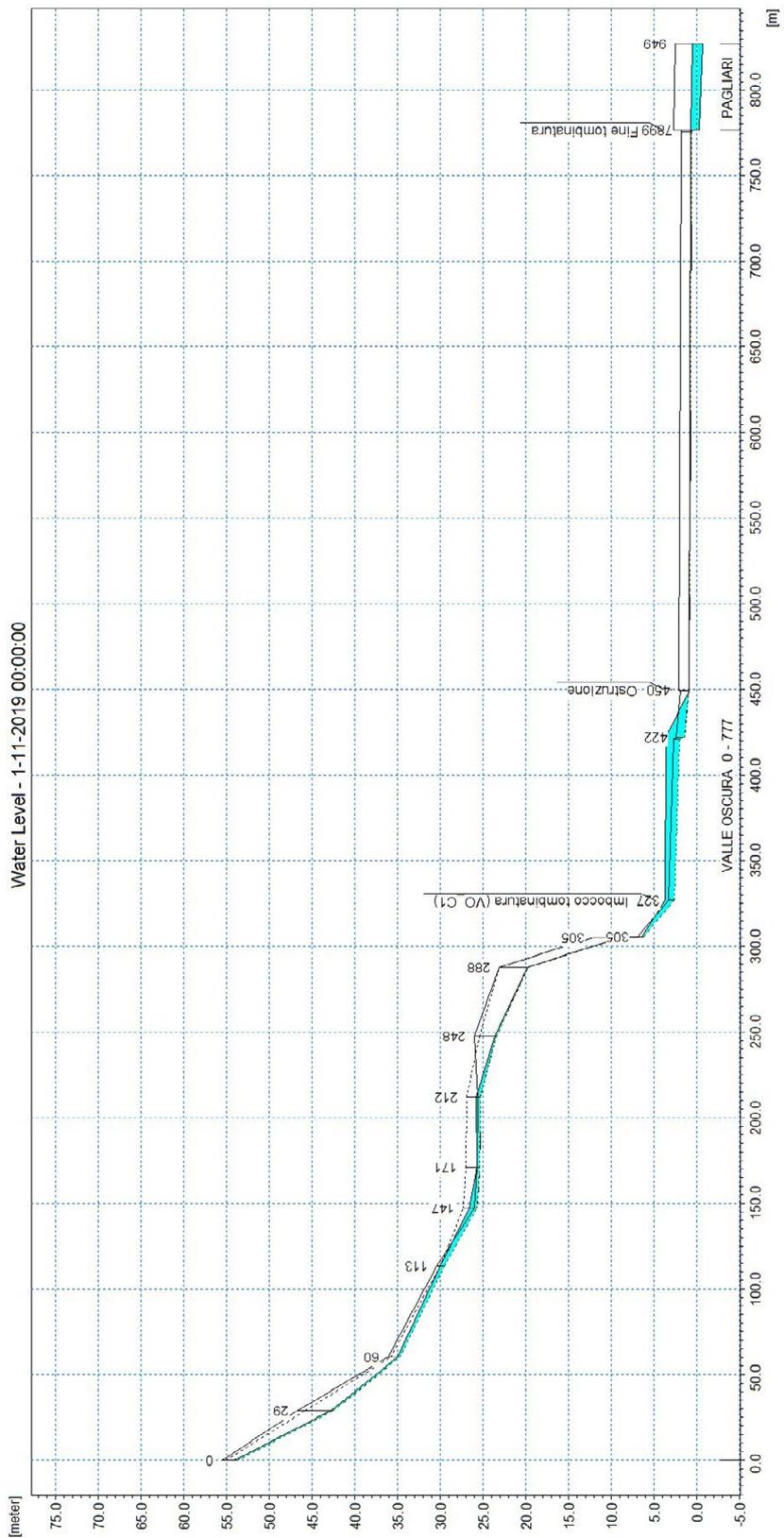


Figura 9 – Profilo longitudinale di corrente del Valle Oscura, scenario TR50.

Dall'analisi dei risultati ottenuti dal modello monodimensionale del torrente Pagliari si evince quanto segue.

- Le portate massime sono contenute in alveo per tutto il tratto di monte in affiancamento a via Pitelli, con franchi idraulici rispetto alle sommità spondali generalmente superiori a 0,5 m, tranne che a monte del ponte PA_P5 e nel tratto tra questo e PA_P10, dove il franco si riduce a valori minimi di 15-20 cm.
- L'attraversamento PA_P10, che causa un rilevante restringimento della sezione d'alveo, presenta un comportamento in pressione ma non è causa di sormonto delle sponde.
- Il livello idrico massimo in alveo supera la sommità spondale destra nel tratto subito a valle, in corrispondenza della Sez.20 e della Sez.20.1, di circa $0,25 \div 0,35$ m. In questo tratto la sponda destra risulta in effetti posta solo circa 1 m al di sopra del fondo alveo.
- Le sommità spondali, sia destra che sinistra, vengono sormontate nel tratto compreso tra la passerella pedonale PA_P11 e la briglia più a valle (tratto tra la Sez.22 e la Sez.24); tale sormonto è principalmente dovuto al restringimento della sezione d'alveo, e secondariamente alla presenza della briglia; la passerella non provocherebbe di per sé interferenza con il deflusso della piena, ma la sezione è rigurgitata da valle.
- Il tratto terminale del corso d'acqua (tra la Sez.28 e la Sez.31), oggetto di recenti adeguamenti contestuali alla realizzazione della Darsena, presenta un comportamento adeguato al transito della portata simulata, garantendo un franco idraulico rispetto alle sponde sempre superiore al metro.

Dall'analisi dei risultati ottenuti dal modello monodimensionale del rio di Valle Oscura, si evince quanto segue.

- Il livello idrico massimo in alveo supera la sommità della sponda destra lungo il tratto compreso tra la Sez.5 e la Sez.7 (in affiancamento al campo da calcio);
- Il muro al di sotto della S.S.331 crea un effetto di invaso a monte, in quanto il deflusso a valle è limitato dalla luce sotto battente; il battente idrico che si viene a creare a monte è tale da vedere il sormonto del muro e l'allagamento diffuso delle aree a valle esterne all'alveo.
- Il tratto tombinato compreso la Sez.11 e la Sez.31 (di sbocco sul torrente Pagliari) denota un comportamento in pressione sino all'imbocco della sezione ad arco. In corrispondenza di quest'ultima, si è tenuto conto dell'ostruzione riscontrata dalla documentazione di rilievo fornita dal Comune, per cui la portata in ingresso defluisce pressochè interamente all'esterno dell'alveo, ruscellando sul piano campagna.

In Figura 10 sono rappresentati gli idrogrammi di portata di alcune sezioni significative del modello monodimensionale del torrente Pagliari. Dall'osservazione di tali diagrammi si evidenzia l'effetto di incremento del picco dalla Sez.1 ($6,75 \text{ m}^3/\text{s}$) alla Sez.20 ($13,80 \text{ m}^3/\text{s}$ – leggermente ridotto rispetto al valore teorico per gli effetti di rigurgito a monte che provocano un minimo di laminazione), dovuto alla condizione al contorno di immissione distribuita tra la Sez.2 e la Sez.19 (vedi capitolo 4).

Conseguentemente ai fenomeni di esondazione che si verificano a partire dalla Sez.20, l'idrogramma estratto più a valle, all'inizio del tratto sistemato (Sez.25 a valle briglia), mostra un valore al colmo fortemente ridotto, fino a un valore di $4,19 \text{ m}^3/\text{s}$ (che corrisponde a una portata massima di esondazione pari a quasi $10 \text{ m}^3/\text{s}$). La portata esodata rientra poi gradualmente in alveo una volta defluito il picco, nel tratto a monte di via Privata ENEL (o via delle Casermette), "asciugando" le aree allagate, con portate nella coda dell'idrogramma che si mantengono su valori di circa $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ a fronte di circa $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ in ingresso.

In Figura 11 sono rappresentati gli idrogrammi di portata di due sezioni significative del modello monodimensionale del rio di Valle Oscura. Si evidenzia una riduzione del picco da monte verso valle, conseguente alle esondazioni laterali.

Discharge
 - Sez.1 - 0,00 m
 - Sez.8 - 260,73 m
 - Sez.20 - 521,01 m
 - Sez.25 - 700,98 m
 - Sez.31 - 949,36 m

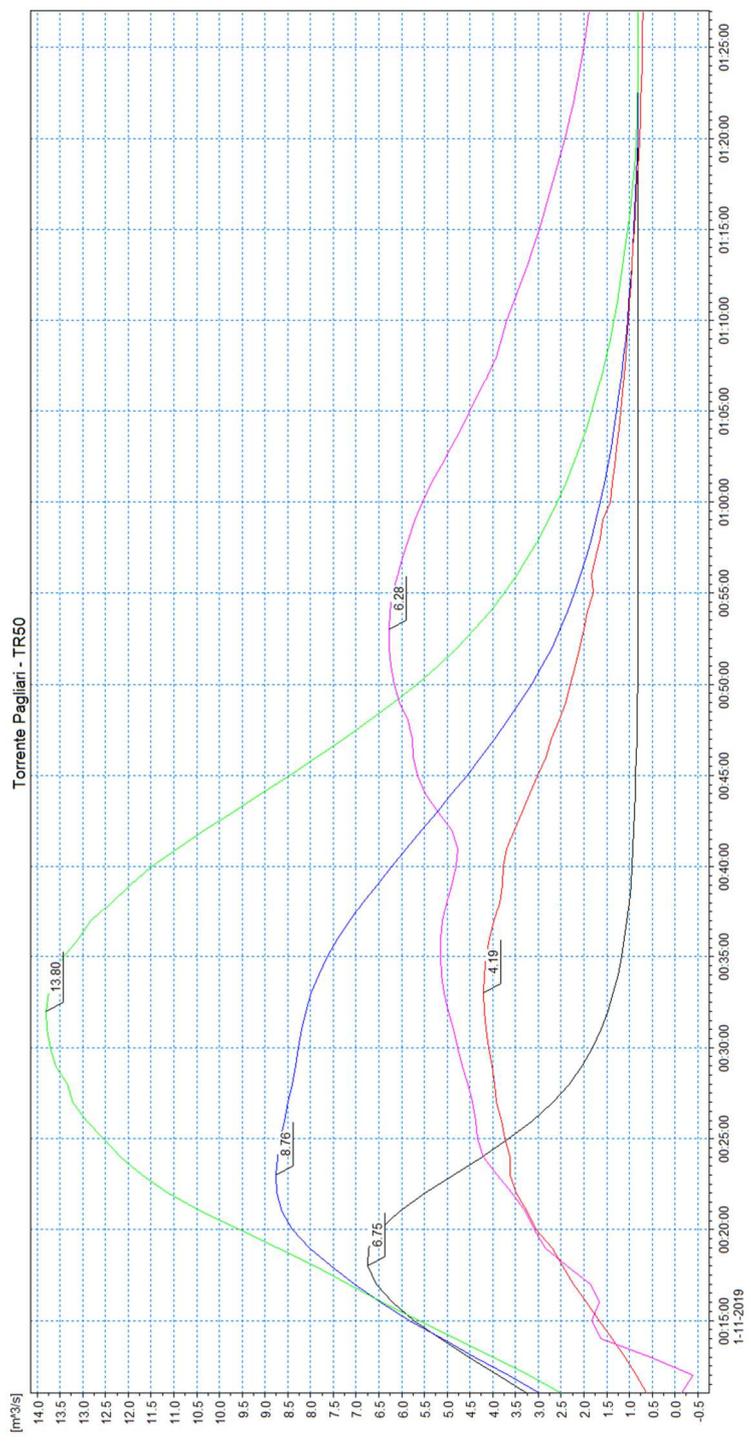


Figura 10 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale del torrente Pagliari.

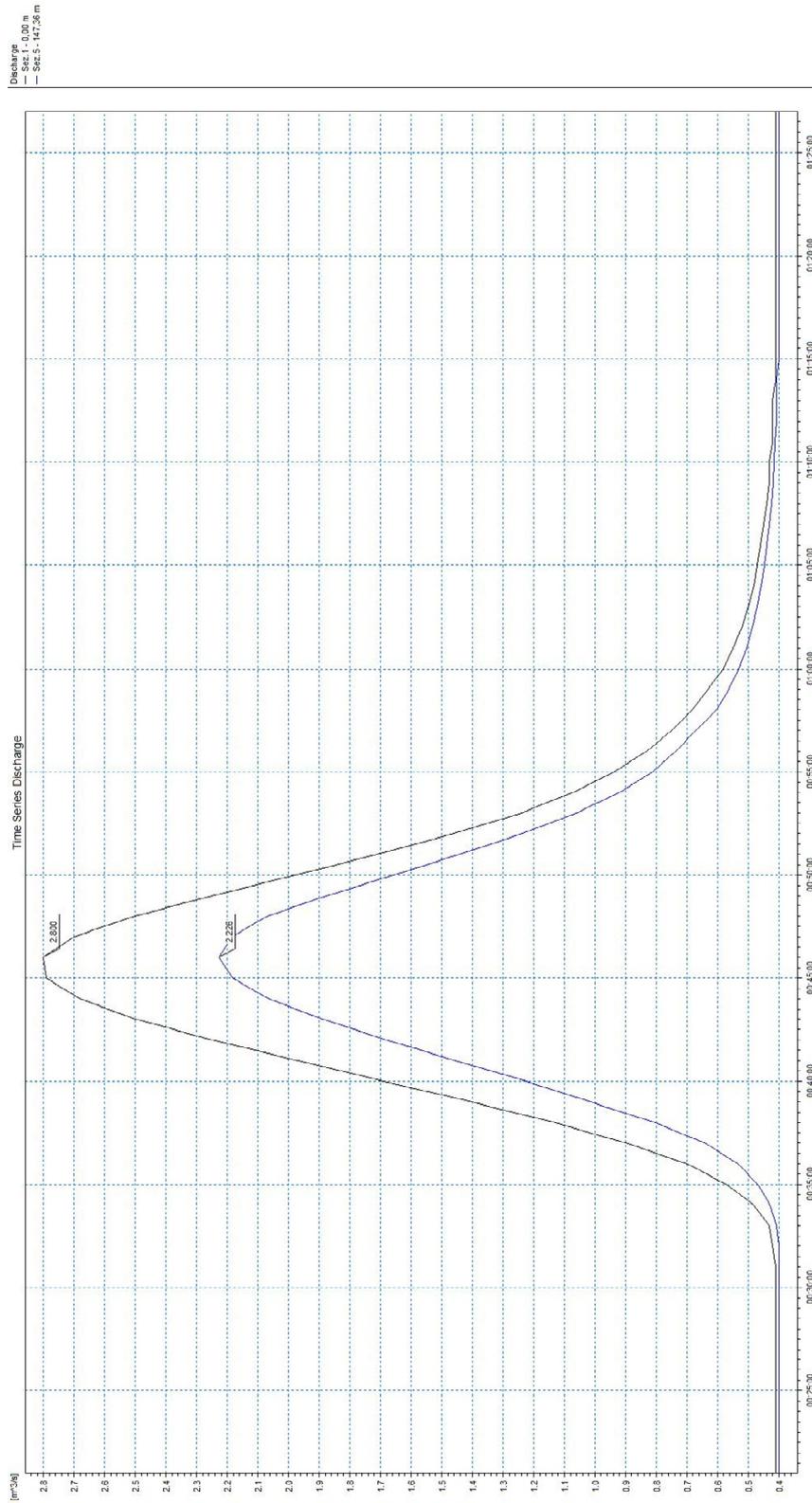


Figura 11 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale del rio Valle Oscura.

In Figura 12 e Figura 13 sono riportate le distribuzioni delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno cinquantennale (output del modello MIKE21).

In Figura 12 le sfumature di colorazione blu evidenziano le aree di esondazione con minori tiranti idrici, quelle rosse con i maggiori. In Figura 13 la colorazione blu indica le velocità minori mentre quella rossa le maggiori. Le aree interne all'alveo inciso non sono rappresentate perché, come già detto, il loro contributo al deflusso viene considerato nell'ambito del modello MIKE11.

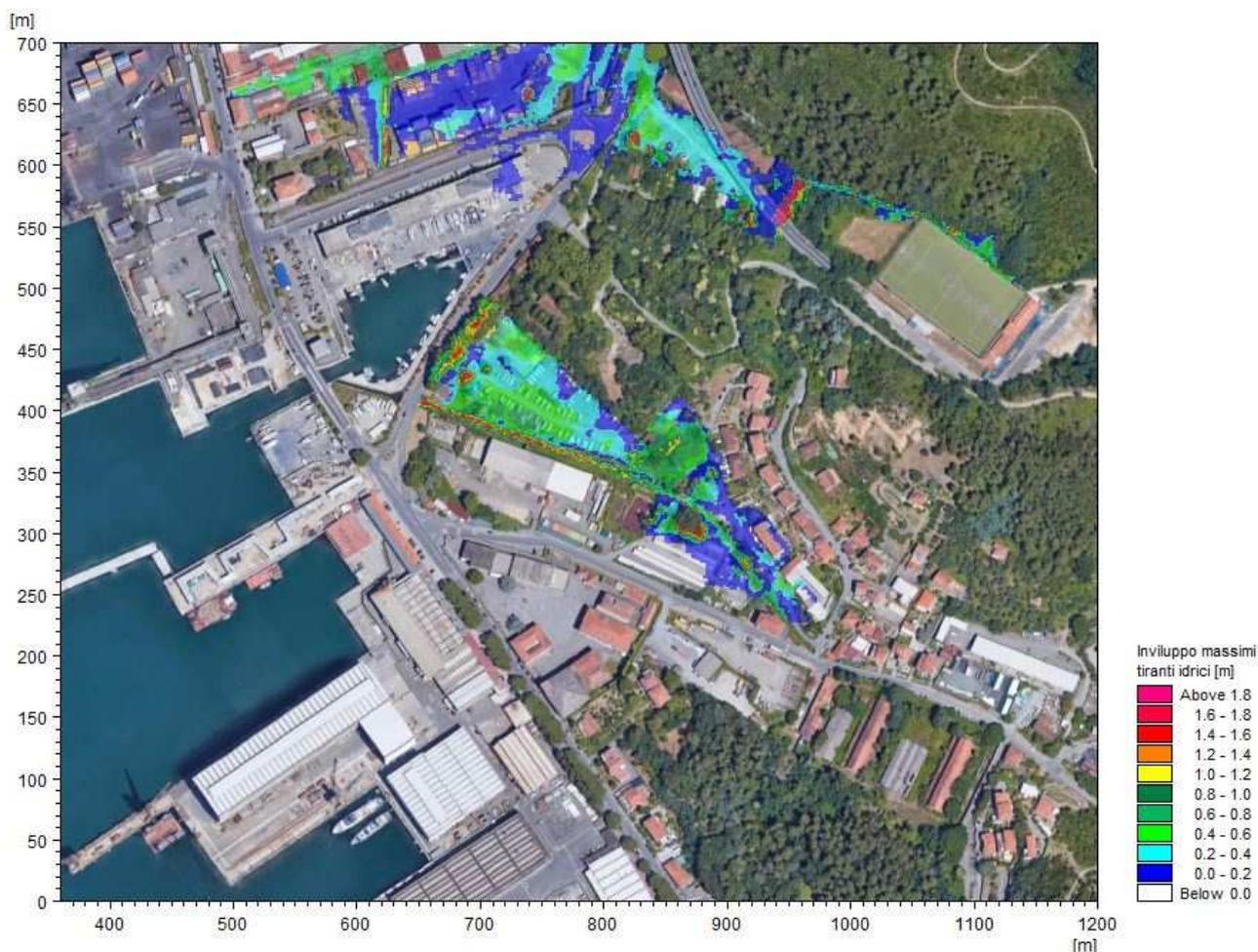


Figura 12 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna, TR=50 anni.

Come già descritto in precedenza, l'onda di piena cinquantennale che transita nel torrente Pagliari è causa di esondazione in due diversi tratti del corso d'acqua.

- Nel tratto compreso tra la Sez.22 e la Sez.24 (tra la passerella e la briglia, poco a monte del tratto sistemato di valle), in sponda destra, si verifica la prima esondazione in senso cronologico, al superamento della portata massima che l'alveo è in grado di contenere pari a circa 4,0 m³/s. Le portate esondate, subito a valle dell'attraversamento PA_P11, si propagano verso valle allagando l'area di sosta/rimessaggio ubicata tra il corso d'acqua e via delle Casermette. L'area di esondazione

è contenuta a Nord-Est dal muro perimetrale del sito delle Casermette, mentre a nord-Ovest allaga, senza sormontarlo, il fosso presente a lato strada. Si riscontrano tiranti idrici compresi tra 0,50 m e 1,80 m e velocità ovunque inferiori a 1,6 m/s. Soltanto in alcune aree limitate, prevalentemente coincidenti con il fosso in terra a lato di via delle Casermette, i tiranti idrici risultano superiori a 1,25 m (fino a circa 2 m).

In sinistra, le aree allagate sono assai modeste e i maggiori tiranti idrici riguardano unicamente un'area depressa adiacente al campo da tennis.

- In corrispondenza della Sez.20 (a valle del ponte PA_P10) si verifica un'esondazione in destra al superamento della portata di 10,5-11,0 m³/s, in ragione delle basse quote di sponda in questo tratto. Le portate di esondazione si espandono lungo via Pagliari propagandosi verso valle. I tiranti idrici che si osservano sono prevalentemente inferiori a 0,25 m.

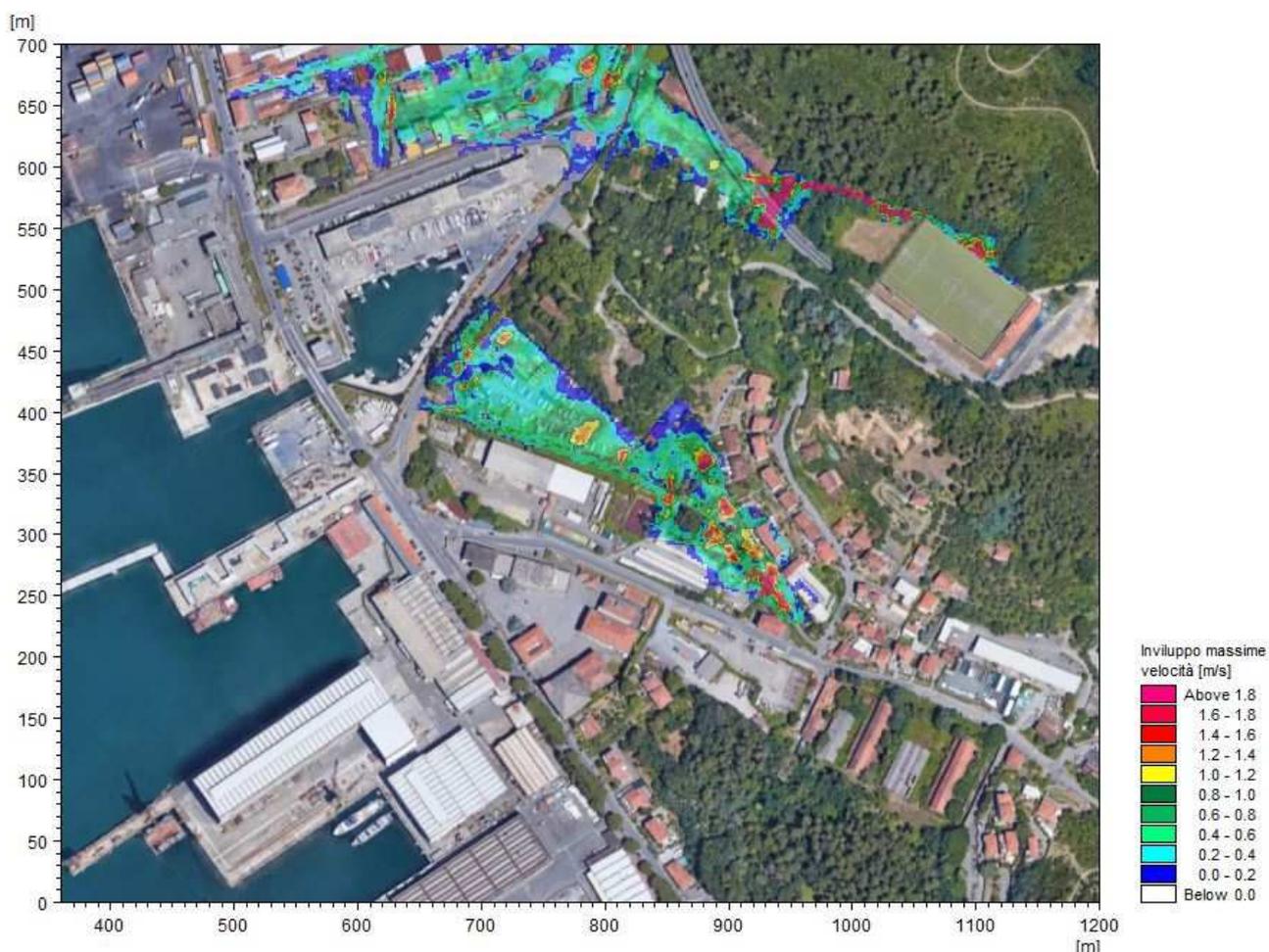


Figura 13 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di flusso, TR=50 anni.

Per quanto concerne l'affluente di destra del torrente Pagliari, il rio di Valle Oscura, la prima esondazione è legata al sormonto della sponda destra lungo il tratto compreso tra la Sez.5 e la Sez.7, in prossimità del campo da calcio. Quest'ultimo, in posizione rialzata, non è soggetto ad allagamenti, così come i fabbricati collegati.

Le portate si propagano verso valle lungo l'incisione naturale del versante fino a raggiungere il muro ubicato al di sotto della S.S.331, che si comporta in modo analogo a una briglia selettiva o a una piccola vasca di laminazione, creando a monte un'area di invaso con tiranti idrici dell'ordine dei 2 m. La portata massima che defluisce verso valle attraverso la luce di passaggio è pari a circa 1,1 m³/s, ma le altezze d'acqua che si instaurano a monte sono tali da provocare il sormonto del muro, con deflusso che si propaga a valle distribuito nella piana esterna all'alveo.

Un'ulteriore esondazione si verifica a causa dell'ostruzione della tombinatura in prossimità dell'imbocco della sezione ad arco, che provoca sostanzialmente la fuoriuscita della totalità del deflusso in ingresso. Tale allagamento (sovrapposto a quello derivante dallo sfioro sopra al muro) raggiunge Via delle Casermette e Via Privata Enel, propagandosi poi nell'area urbanizzata a valle verso viale S.Bartolomeo, che non viene tuttavia raggiunto dagli allagamenti. I tiranti idrici risultano compresi tra 0,20 m e 1,40 m, mentre le velocità di deflusso sono generalmente stabili su un valore medio di 0,50 m/s.

5.1.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)

Nella Tabella 5 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso del torrente Pagliari e dell'affluente Valle Oscura (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 14 e Figura 15 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

Le dinamiche di deflusso della piena sono del tutto analoghe a quelle descritte per lo scenario TR=50 anni, ma con maggiore intensità (valori massimi più elevati di altezze d'acqua e velocità di flusso) in ragione delle maggiori portate in gioco.

Si riscontra a monte del ponte PA_P5 un leggero sormonto delle sponde (alcuni centimetri), che si traduce in un modestissimo allagamento (Figura 18) in quanto le quote del modello del terreno circostanti risultano maggiori del livello idrico già a breve distanza.

A monte del ponte PA_P10 il livello idrico massimo risulta prossimo alle quote di sponda, ma continuano a non verificarsi esondazioni in questo tratto. Si confermano invece i tratti critici già evidenziati per TR=50 anni, ovvero il tratto subito a valle di PA_P10 (sormonto della sponda destra di circa 0,20÷0,40 m) e il tratto a valle della passerella PA_P11.

Il tratto terminale di valle, oggetto di sistemazione recente, mostra franchi idraulici ampi (superiori al metro) considerando però che la portata massima effettiva che defluisce a mare è pari a circa 9,0 m³/s (a fronte del colmo idrologico duecentennale del solo Pagliari di 15,6 m³/s), in relazione alle esondazioni precedentemente descritte. A valle della briglia la portata massima in alveo è pari a poco meno di 5,0 m³/s, ai quali si sommano poi i rientri di portata dalle aree allagate e il contributo del rio di Valle Oscura.

Per quanto riguarda quest'ultimo le dinamiche di deflusso e esondazione dell'evento con TR=200 anni sono del tutto analoghe a quelle descritte per TR=50 anni.

In Figura 16 e in Figura 17 sono rappresentati gli idrogrammi di portata presso alcune sezioni significative del modello monodimensionale del torrente Pagliari e del rio di Valle Oscura.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m³/s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
PA - Sez.1	0,00	18,50	7,96	19,18	0,68	3,29	1,35	19,73
PA - Sez.2	17,45	17,59	8,00	18,62	1,03	2,63	1,04	18,97
PA - Sez.3	36,07	17,10	7,75	18,24	1,14	2,62	0,78	18,59
PA - Sez.4	77,04	14,84	8,05	15,77	0,93	3,61	1,40	16,44
PA - Sez.5	120,26	13,29	8,41	14,45	1,16	2,78	1,08	14,85
PA - Sez.6	158,89	12,97	8,83	13,75	0,78	3,30	1,39	14,31
PA - Sez.7	196,20	11,80	9,36	12,72	0,92	3,11	1,19	13,21
PA - Sez.8	260,73	10,24	10,38	11,56	1,32	2,80	0,78	11,96
PA - Sez.9	287,67	9,57	10,97	10,98	1,41	2,89	0,78	11,40
PA - Sez.10	308,67	8,90	11,76	10,45	1,55	3,04	0,78	10,92
PA - Sez.11	387,80	6,87	13,62	8,57	1,70	3,04	0,76	9,04
PA - Sez.12	405,26	6,57	14,15	8,07	1,50	2,77	0,72	8,46
PA - Sez.13	418,27	6,40	14,57	7,92	1,52	2,87	0,74	8,34
PA - Sez.14	431,16	6,16	14,98	7,76	1,60	3,08	0,78	8,24
PA - Sez.15	464,26	5,36	15,82	7,22	1,86	2,57	0,60	7,56
PA - Sez.16	471,50	5,05	16,16	7,13	2,08	3,03	0,77	7,59
PA - Sez.17	481,70	4,80	16,33	6,94	2,14	2,48	0,57	7,25
PA - Sez.18	482,70	4,78	16,42	6,93	2,15	3,07	0,67	7,41
PA - Sez.19	500,51	4,50	16,92	6,09	1,59	4,05	1,23	6,93
PA - Sez.20	521,01	4,30	16,15	5,57	1,27	4,55	1,36	6,62
PA - Sez.20.1	542,10	3,70	8,50	4,90	1,20	2,39	0,74	5,19
PA - Sez.20.2	551,51	2,88	9,00	3,89	1,01	3,42	1,28	4,48
PA - Sez.21	573,29	2,32	9,83	3,29	0,97	2,48	0,93	3,61
PA - Sez.22	658,05	1,05	10,76	2,53	1,48	1,89	0,59	2,71
PA - Sez.23	662,15	1,00	10,96	2,36	1,36	2,22	0,73	2,61
PA - Sez.24	695,31	0,50	10,31	2,31	1,81	1,10	0,29	2,37
PA - Sez.25	700,99	0,50	10,29	1,71	1,21	1,85	0,60	1,89
PA - Sez.26	719,90	0,40	10,59	1,66	1,26	1,54	0,50	1,78
PA - Sez.27	839,31	0,25	10,71	0,96	0,71	2,64	1,05	1,31
PA - Sez.28	847,44	0,00	10,73	0,83	0,83	1,71	0,60	0,98
PA - Sez.29	881,25	-0,30	10,86	0,78	1,08	1,29	0,39	0,87
PA - Sez.30	899,36	-0,30	11,12	0,67	0,97	1,76	0,57	0,83
PA - Sez.31	949,36	-0,70	10,71	0,50	1,20	2,55	0,74	0,83
VO - Sez.1	0,00	53,72	3,30	54,17	0,45	7,19	4,23	56,80
VO - Sez.2	28,80	42,48	3,30	42,86	0,38	5,98	3,49	44,68
VO - Sez.3	60,07	34,69	3,31	35,06	0,37	3,69	2,28	35,75
VO - Sez.4	113,30	29,48	3,31	30,02	0,54	3,87	2,23	30,79
VO - Sez.5	147,36	25,69	2,58	26,91	1,22	3,14	0,96	27,41
VO - Sez.6	170,72	25,40	1,78	26,37	0,97	2,79	0,97	26,77
VO - Sez.7	212,03	25,30	0,80	25,68	0,38	4,11	2,58	26,54
VO - Sez.8	247,51	23,44	1,28	23,83	0,39	2,10	1,24	24,06
VO - Sez.9	288,05	19,74	2,28	19,97	0,23	7,36	5,40	22,73
VO - Sez.10	305,48	6,22	2,22	6,80	0,58	3,70	1,53	7,50
VO - Sez.11	326,83	2,63	3,47	4,15	1,52	2,29	0,59	4,41
VO - Sez.12	327,00	2,63	3,48	4,13	1,50	1,37	0,36	4,22
VO - Sez.13	421,00	2,00	2,01	3,76	1,76	0,67	0,16	3,78
VO - Sez.14	422,00	1,43	1,94	3,76	2,33	0,69	0,15	3,78
VO - Sez.15	449,00	0,86	0,00	0,87	0,01	0,00	0,00	0,87
VO - Sez.16	449,50	0,86	0,00	0,87	0,01	0,00	0,00	0,87
VO - Sez.17	776,92	0,62	0,02	0,67	0,05	0,18	0,17	0,67

Tabella 5 – Risultati di sintesi per lo scenario TR200.

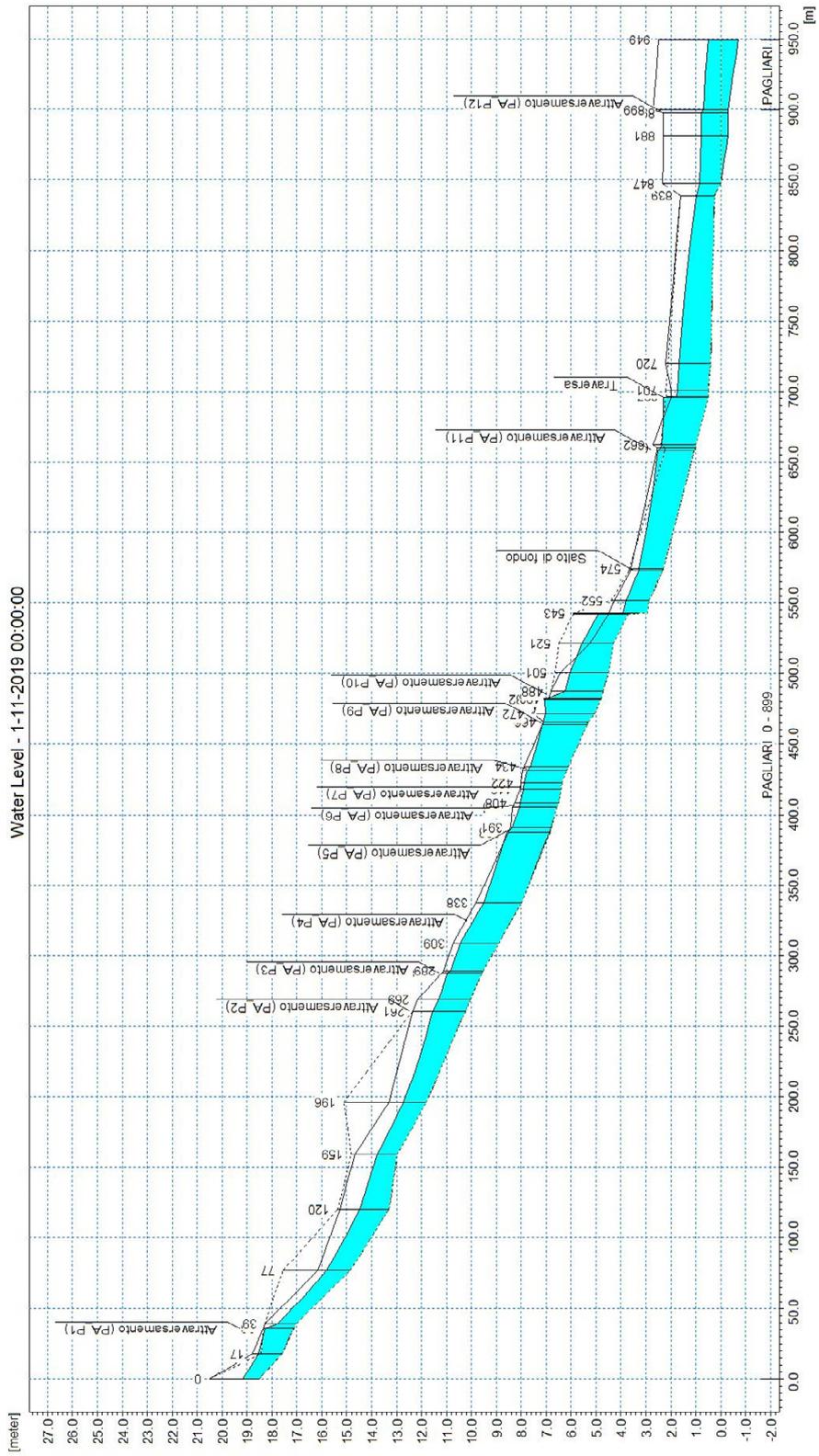


Figura 14 – Profilo longitudinale di corrente del torrente Pagliari, scenario TR200.

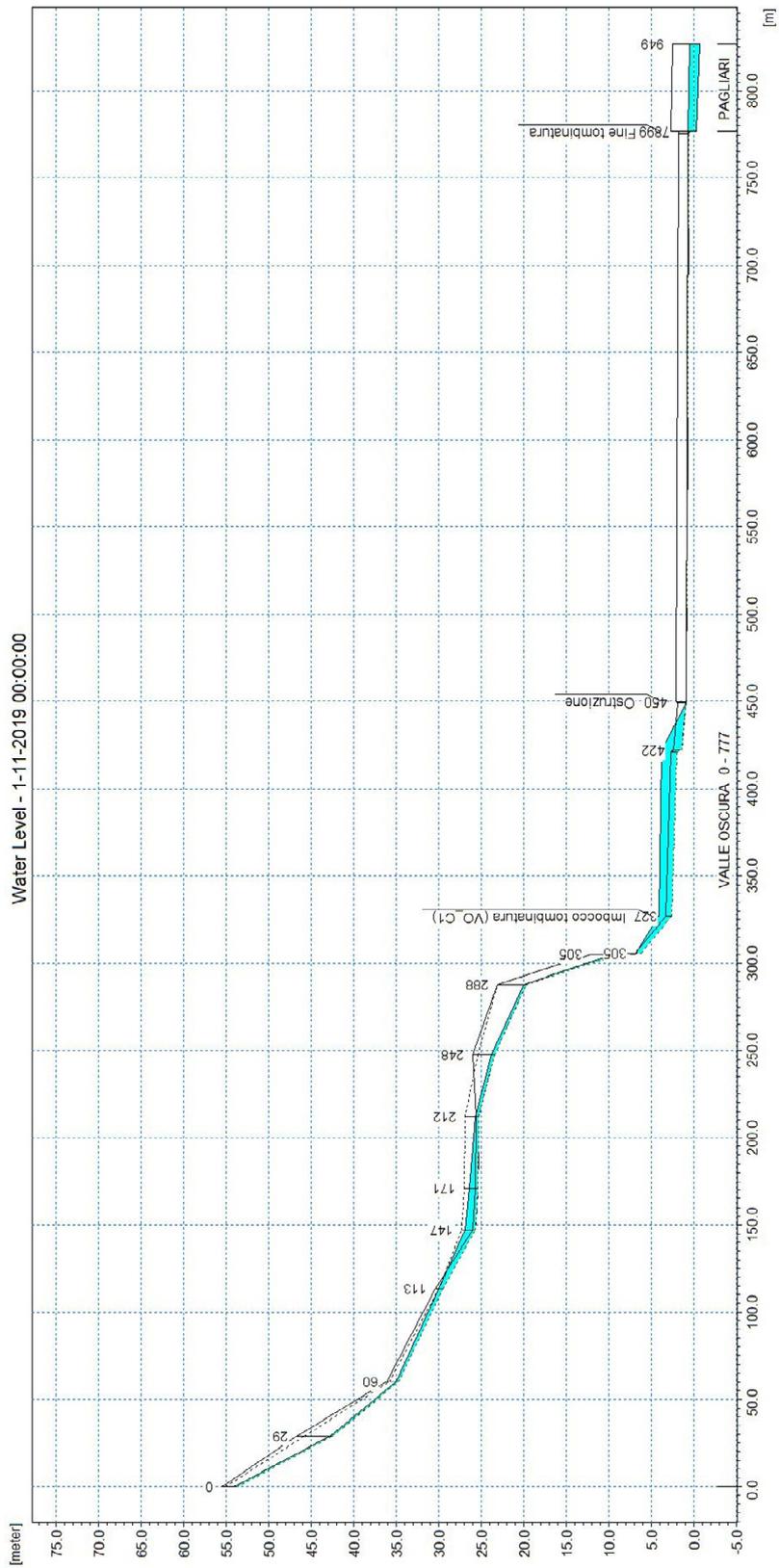


Figura 15 – Profilo longitudinale di corrente del rio Valle Oscura, scenario TR200.

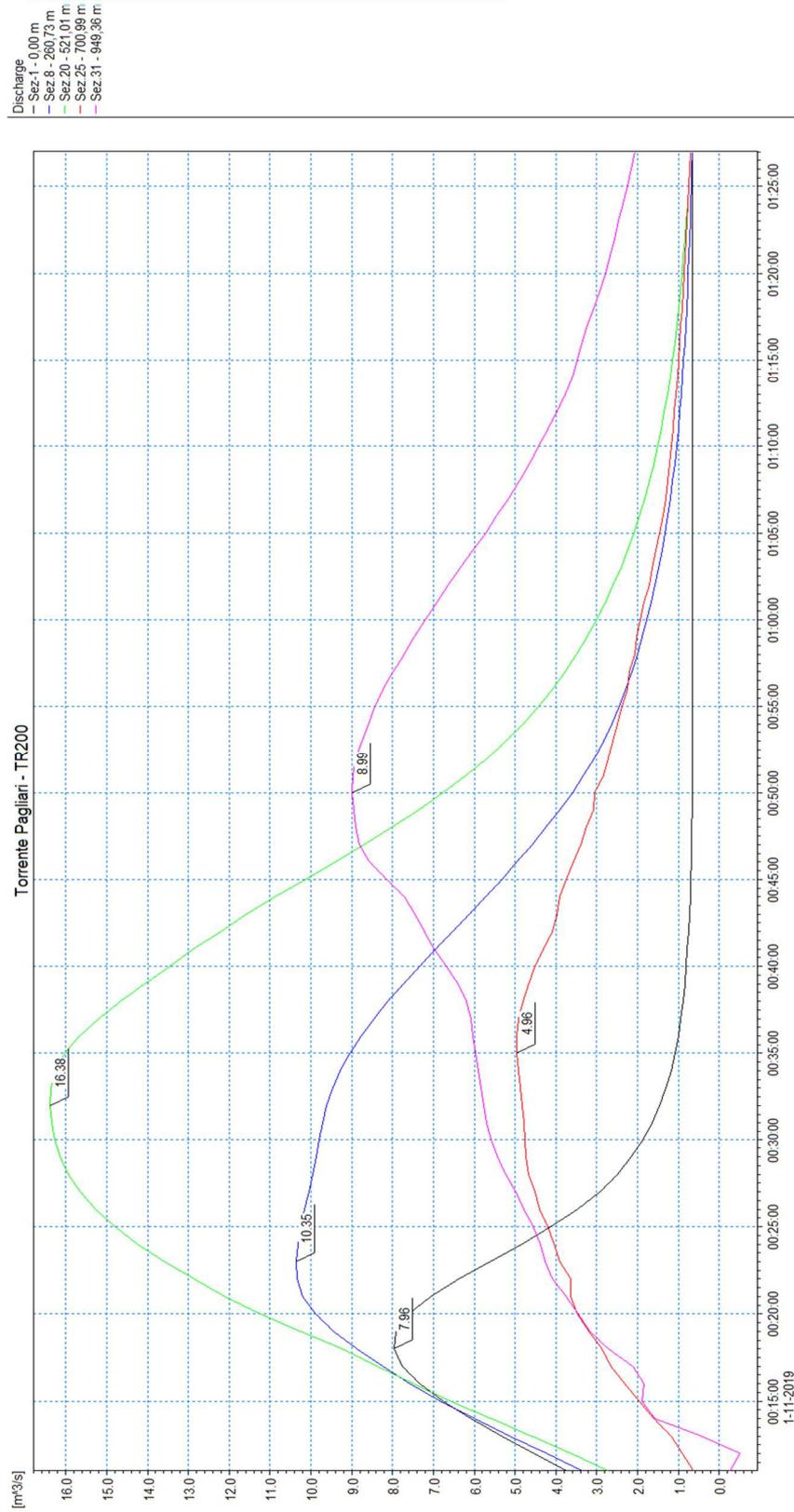


Figura 16 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale del torrente Pagliari.

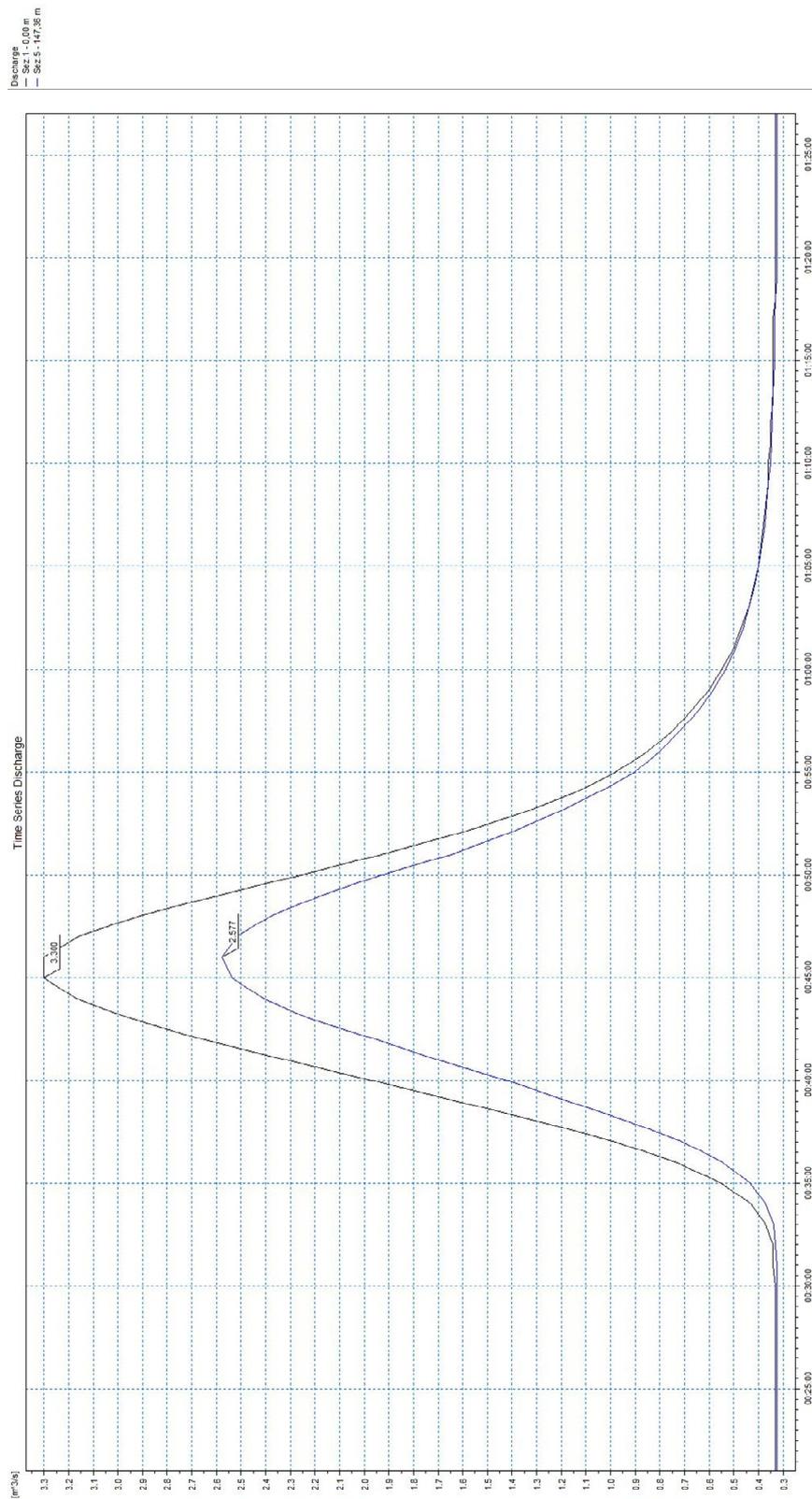


Figura 17 - Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale del rio di Valle Oscura.

In Figura 18 e Figura 19 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno duecentennale. Le dinamiche di esondazione sono analoghe a quelle già descritte per l'evento con tempo di ritorno cinquantennale.

Rispetto a quest'ultimo per il torrente Pagliari le aree allagate risultano maggiormente estese sia lungo Via delle Casermette che lungo Via Pitelli. Tiranti idrici e velocità risultano mediamente superiori rispetto allo scenario TR50 ma ricadono comunque entro gli stessi intervalli rappresentati in mappa.

Anche per il rio di Valle Oscura si riscontra un modesto incremento delle aree allagate nei tratti pianeggianti in prossimità del campo da calcio e all'imbocco della tombinatura.

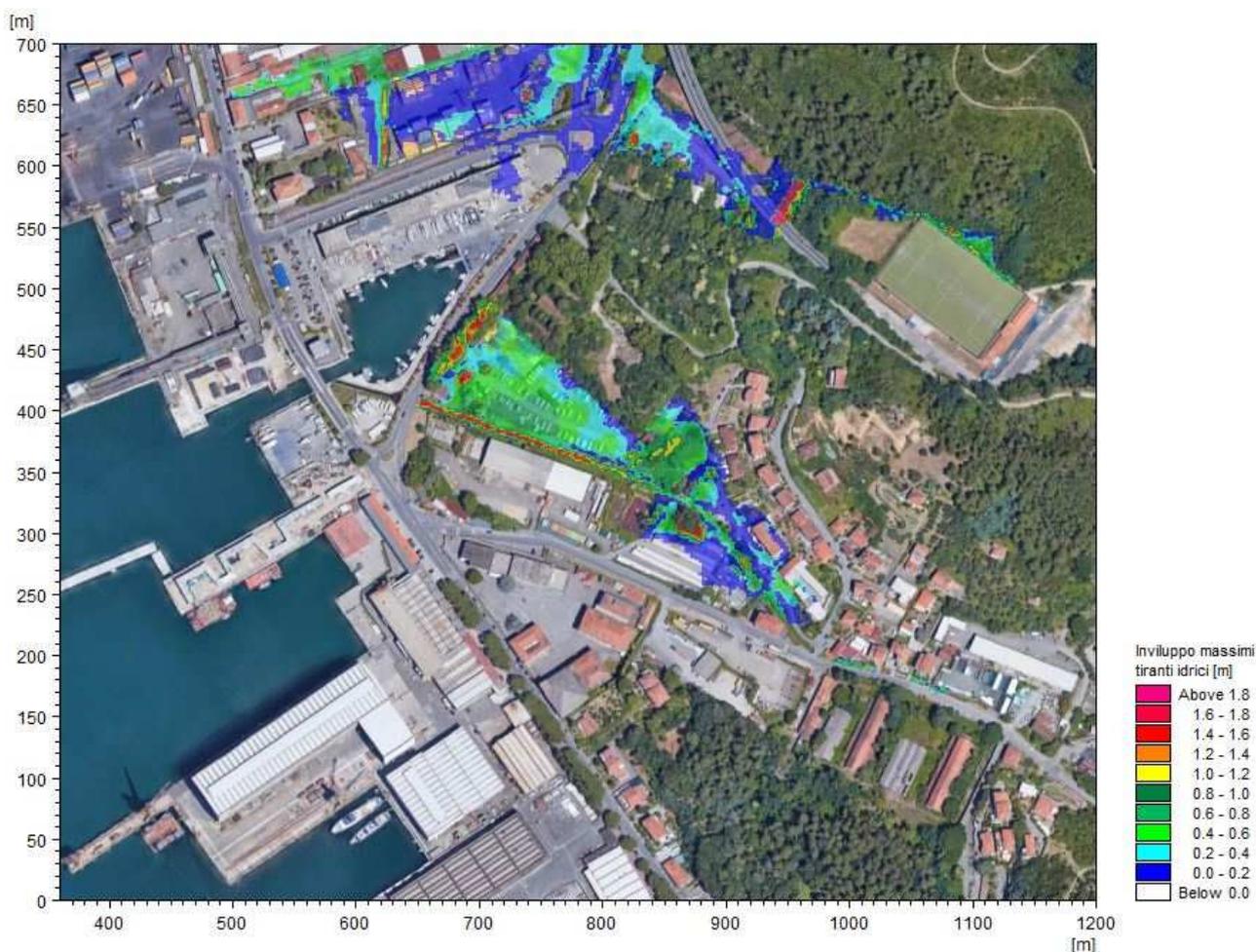


Figura 18 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna. TR=200 anni.

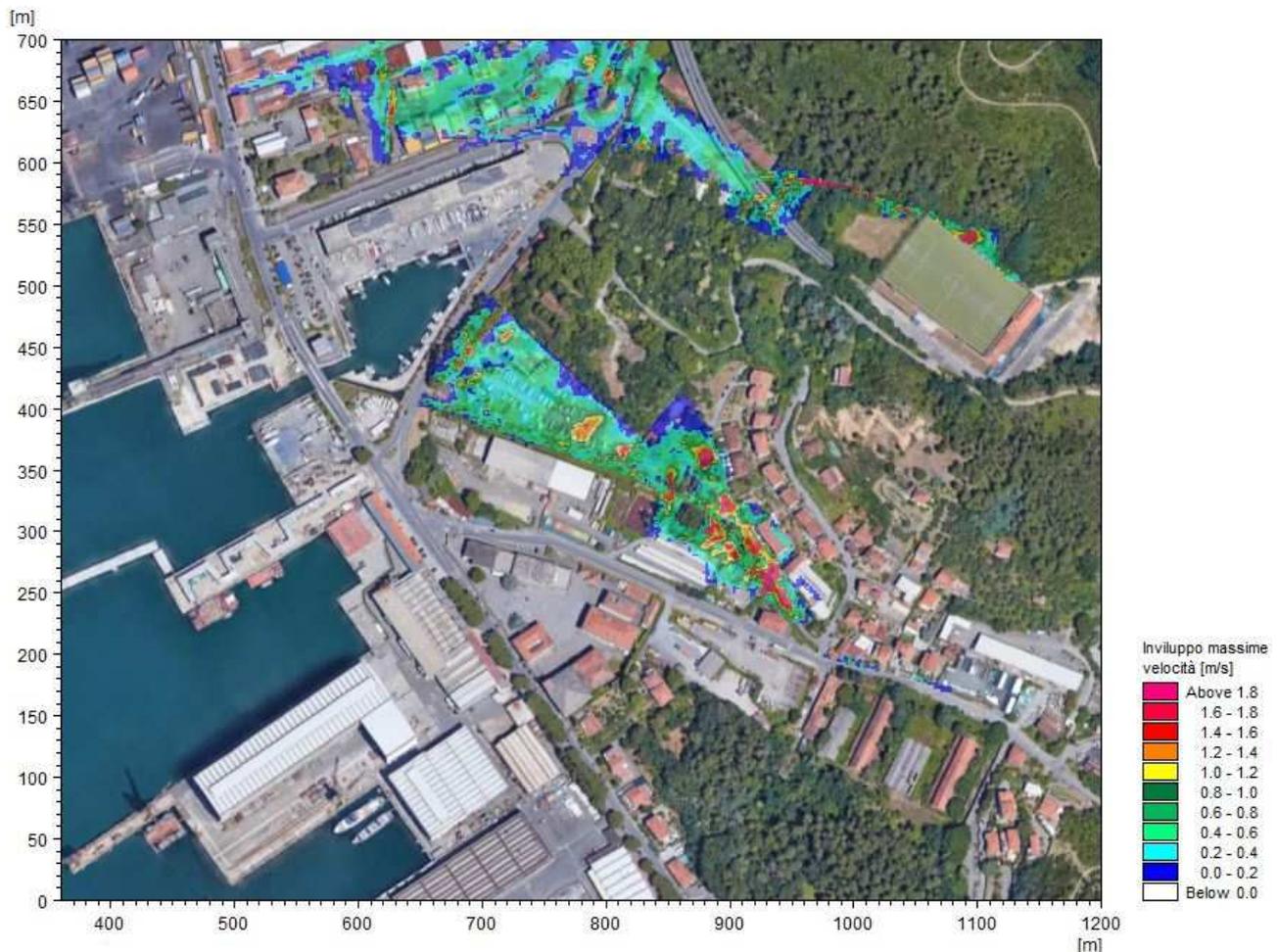


Figura 19 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità. TR=200 anni.

5.1.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)

Nella Tabella 6 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso del torrente Pagliari e del rio di Valle Oscura (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 500 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 20 e Figura 21 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

Anche per lo scenario in esame valgono le stesse considerazioni espresse per l'evento TR=200 anni.

Rispetto a quest'ultimo si osserva il sormonto dell'attraversamento PA_P5, che comporta l'allagamento dell'area edificata in sponda destra, e un modesto sormonto delle quote spondali a monte dell'attraversamento PA_P10.

In Figura 22 e in Figura 23 sono rappresentati gli idrogrammi di portata su alcune sezioni significative del modello monodimensionale del torrente Pagliari e del rio di Valle Oscura.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
PA - Sez.1	0,00	18,50	8,76	19,23	0,73	3,35	1,32	19,80
PA - Sez.2	17,45	17,59	8,81	18,69	1,10	2,60	1,00	19,03
PA - Sez.3	36,07	17,10	8,90	18,36	1,26	2,73	0,78	18,73
PA - Sez.4	77,04	14,84	9,31	15,85	1,01	3,76	1,41	16,57
PA - Sez.5	120,26	13,29	9,67	14,52	1,23	2,90	1,09	14,95
PA - Sez.6	158,89	12,97	10,08	13,81	0,84	3,42	1,39	14,41
PA - Sez.7	196,20	11,80	10,56	12,79	0,99	3,21	1,18	13,31
PA - Sez.8	260,73	10,24	11,49	11,66	1,42	2,90	0,78	12,08
PA - Sez.9	287,67	9,57	12,01	11,06	1,49	2,98	0,78	11,52
PA - Sez.10	308,67	8,90	12,96	10,56	1,66	3,13	0,78	11,06
PA - Sez.11	387,80	6,87	14,16	8,60	1,73	3,10	0,77	9,09
PA - Sez.12	405,26	6,57	14,51	8,12	1,55	2,75	0,70	8,51
PA - Sez.13	418,27	6,40	15,17	7,98	1,58	2,87	0,73	8,40
PA - Sez.14	431,16	6,16	15,69	7,82	1,66	3,10	0,77	8,31
PA - Sez.15	464,26	5,36	16,81	7,33	1,97	2,59	0,59	7,67
PA - Sez.16	471,50	5,05	17,19	7,23	2,18	3,11	0,78	7,73
PA - Sez.17	481,70	4,80	17,31	7,04	2,24	2,52	0,57	7,36
PA - Sez.18	482,70	4,78	17,40	7,03	2,25	3,11	0,66	7,52
PA - Sez.19	500,51	4,50	17,49	6,12	1,62	4,10	1,24	6,97
PA - Sez.20	521,01	4,30	16,65	5,58	1,28	4,63	1,37	6,67
PA - Sez.20.1	542,10	3,70	8,59	4,90	1,20	2,40	0,74	5,20
PA - Sez.20.2	551,51	2,88	9,10	3,90	1,02	3,42	1,27	4,49
PA - Sez.21	573,29	2,32	10,06	3,31	0,99	2,49	0,92	3,62
PA - Sez.22	658,05	1,05	11,08	2,55	1,50	1,90	0,59	2,74
PA - Sez.23	662,15	1,00	11,14	2,37	1,37	2,22	0,73	2,62
PA - Sez.24	695,31	0,50	10,54	2,32	1,82	1,12	0,30	2,39
PA - Sez.25	700,99	0,50	10,55	1,77	1,27	1,79	0,57	1,93
PA - Sez.26	719,90	0,40	11,20	1,71	1,31	1,54	0,50	1,83
PA - Sez.27	839,31	0,25	11,55	0,98	0,73	2,74	1,07	1,37
PA - Sez.28	847,44	0,00	11,56	0,85	0,85	1,79	0,62	1,01
PA - Sez.29	881,25	-0,30	11,42	0,80	1,10	1,33	0,40	0,89
PA - Sez.30	899,36	-0,30	12,02	0,69	0,99	1,87	0,60	0,87
PA - Sez.31	949,36	-0,70	11,63	0,50	1,20	2,77	0,81	0,89
VO - Sez.1	0,00	53,72	3,62	54,19	0,47	7,37	4,23	56,96
VO - Sez.2	28,80	42,48	3,62	42,88	0,40	6,15	3,51	44,80
VO - Sez.3	60,07	34,69	3,63	35,07	0,38	3,81	2,30	35,81
VO - Sez.4	113,30	29,48	3,64	30,05	0,57	3,97	2,24	30,85
VO - Sez.5	147,36	25,69	2,81	26,95	1,26	3,29	0,99	27,50
VO - Sez.6	170,72	25,40	1,89	26,38	0,98	2,93	1,01	26,82
VO - Sez.7	212,03	25,30	0,83	25,70	0,40	3,94	2,37	26,49
VO - Sez.8	247,51	23,44	1,44	23,86	0,42	2,18	1,25	24,10
VO - Sez.9	288,05	19,74	2,56	19,99	0,25	7,61	5,42	22,94
VO - Sez.10	305,48	6,22	2,69	6,80	0,58	4,60	1,92	7,88
VO - Sez.11	326,83	2,63	3,70	4,15	1,52	2,41	0,62	4,44
VO - Sez.12	327,00	2,63	3,71	4,18	1,55	1,40	0,36	4,28
VO - Sez.13	421,00	2,00	2,10	3,77	1,77	0,70	0,17	3,79
VO - Sez.14	422,00	1,43	2,02	3,77	2,34	0,72	0,15	3,79
VO - Sez.15	449,00	0,86	0,00	0,87	0,01	0,00	0,00	0,87
VO - Sez.16	449,50	0,86	0,00	0,87	0,01	0,00	0,00	0,87
VO - Sez.17	776,92	0,62	0,03	0,69	0,07	0,21	0,21	0,69

Tabella 6 – Risultati di sintesi della simulazione TR500.

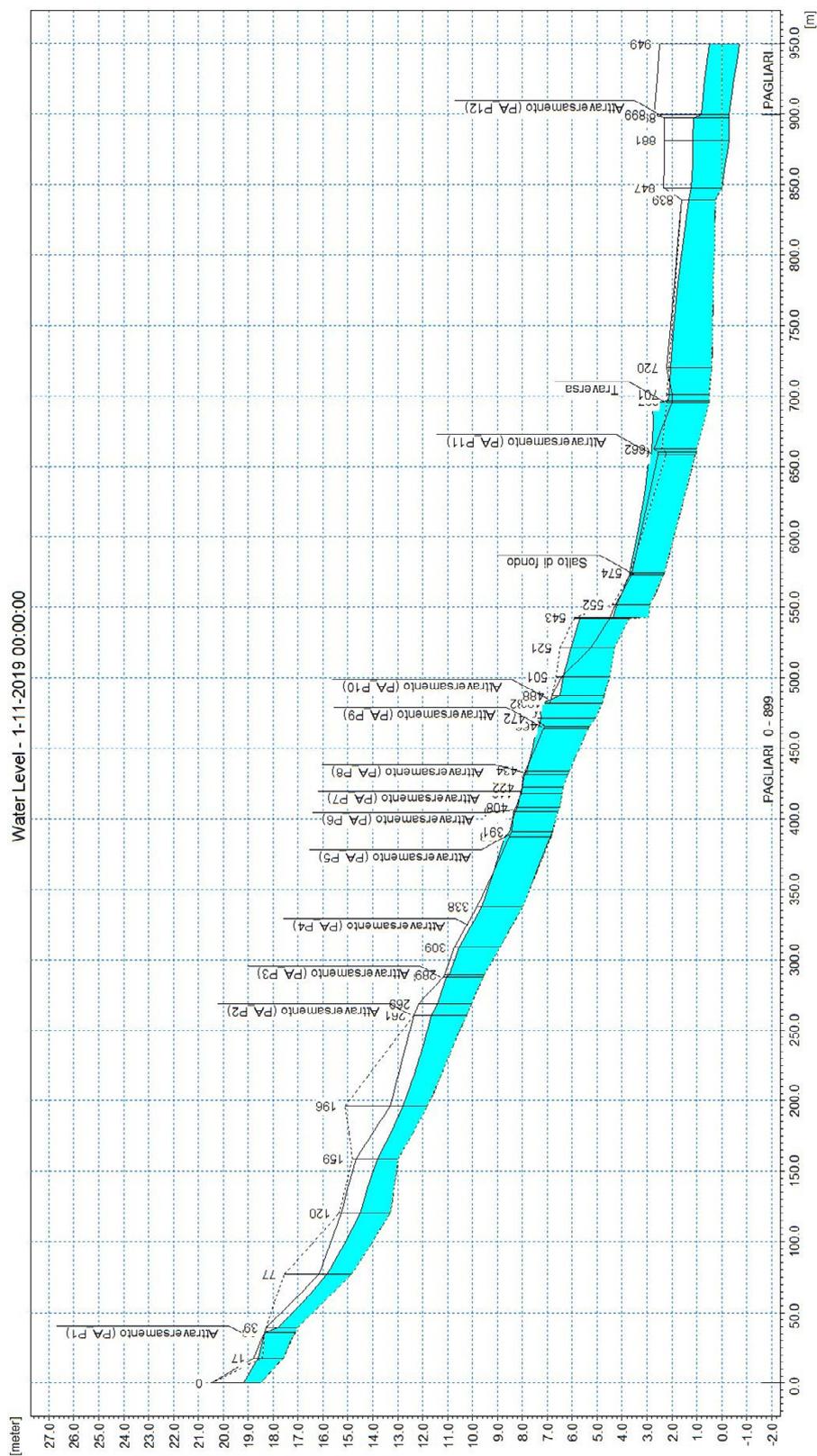


Figura 20 – Profilo longitudinale di corrente del torrente Pagliari, scenario TR500.

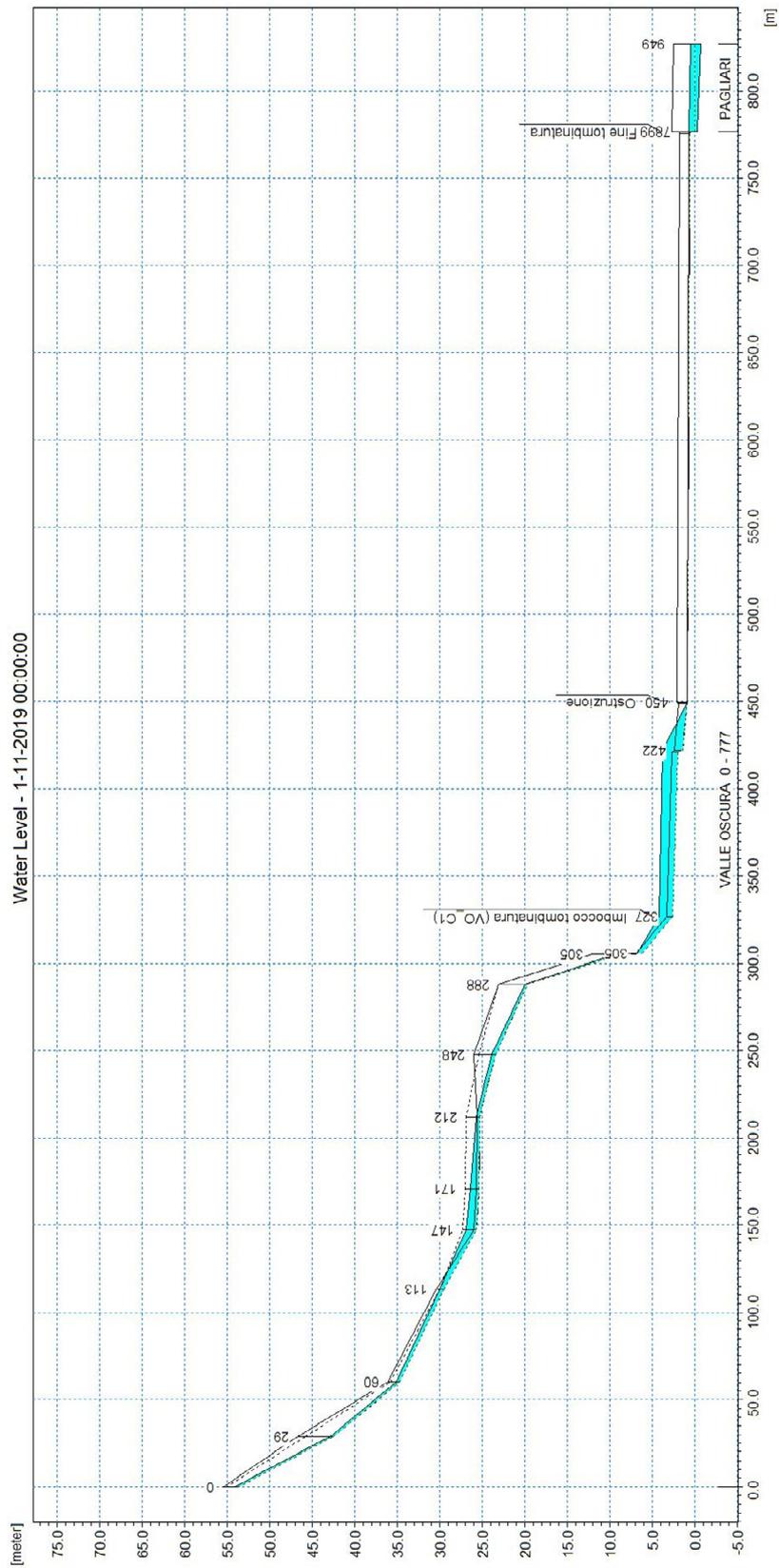


Figura 21 – Profilo longitudinale di corrente del rio di Valle Oscura, scenario TR500.

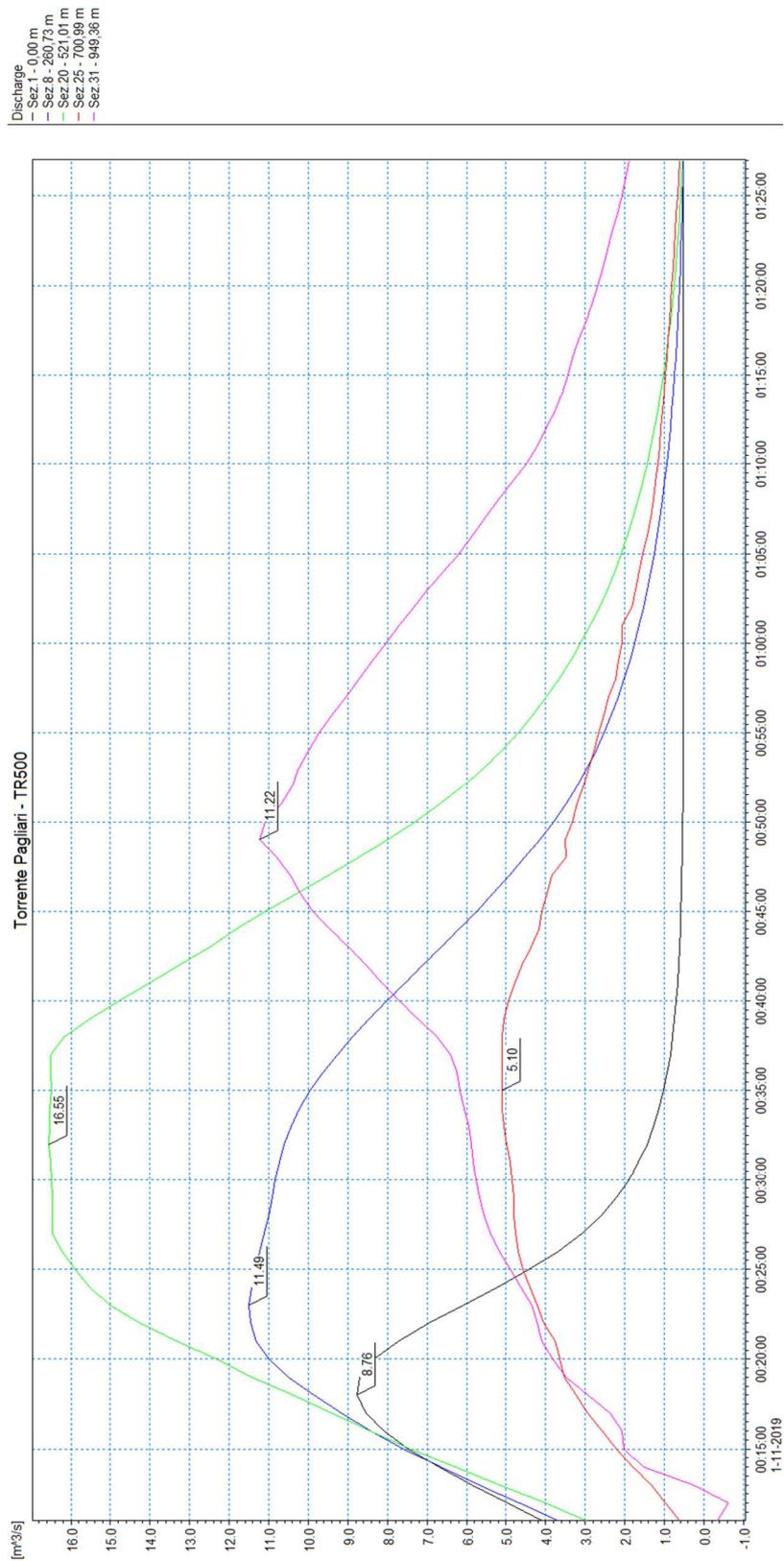


Figura 22 - Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale del torrente Pagliari.

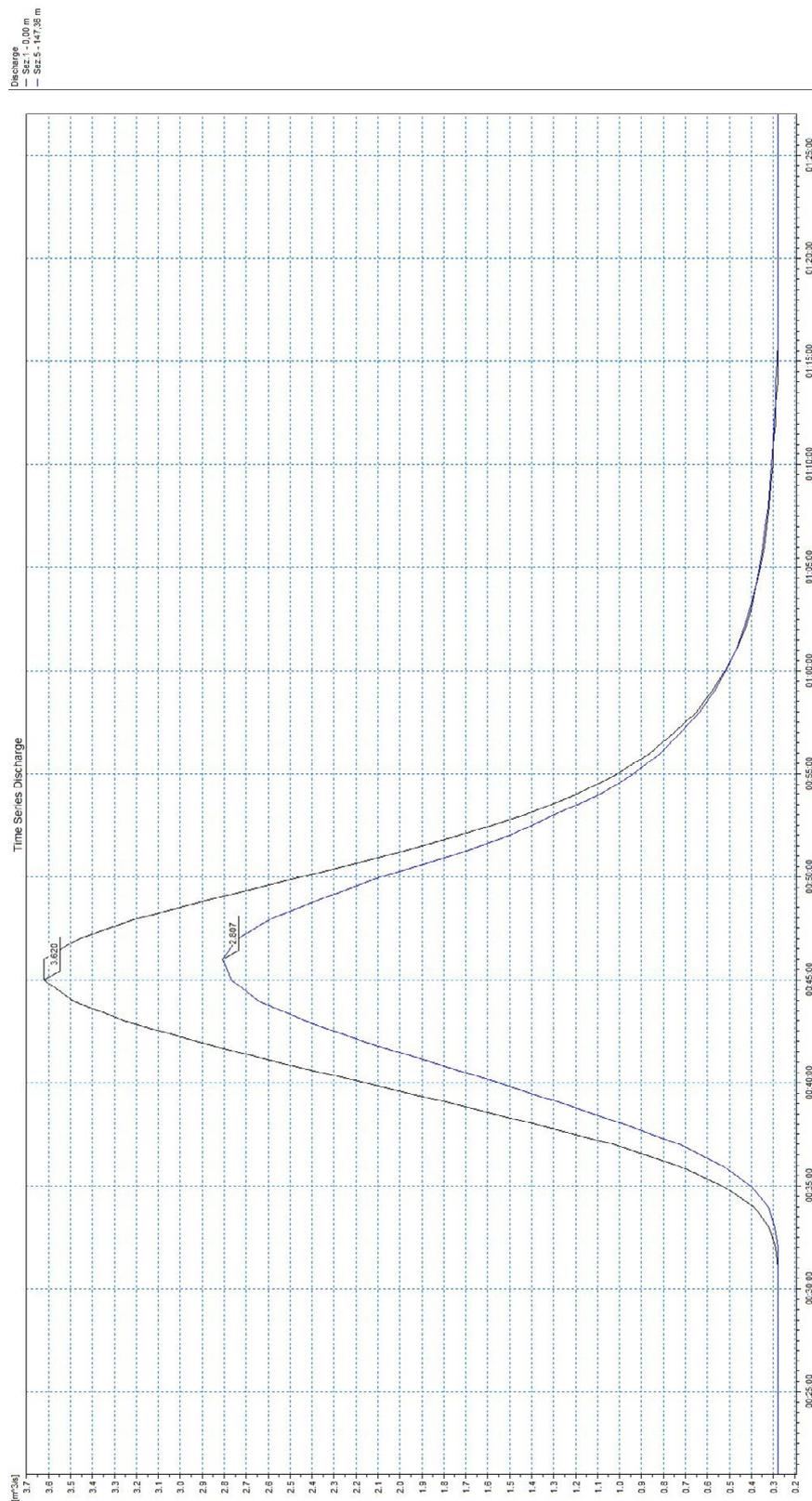


Figura 23 - Idrografi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale del rio di Valle Oscura.

In Figura 24 e Figura 25 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno cinquecentennale.

Come per gli scenari precedenti, i principali allagamenti sono associati al sormonto delle sponde presso la Sez.20 e nel tratto subito a valle della passerella PA_P11, compreso tra la Sez.22 e la Sez.24. La dinamica di propagazione degli allagamenti è pressoché identica a quanto già descritto.

Si riscontra come già anticipato un allagamento nell'area urbana compresa tra Via Pagliari e Via Pitelli, conseguente al sormonto dell'attraversamento PA_P5, collocato in corrispondenza della Sez.11; i tiranti idrici sono prevalentemente inferiori a 0,25 m, con l'eccezione di un'area depressa nella porzione più a Nord dove si riscontrano altezze d'acqua anche superiori a 0,75 m.

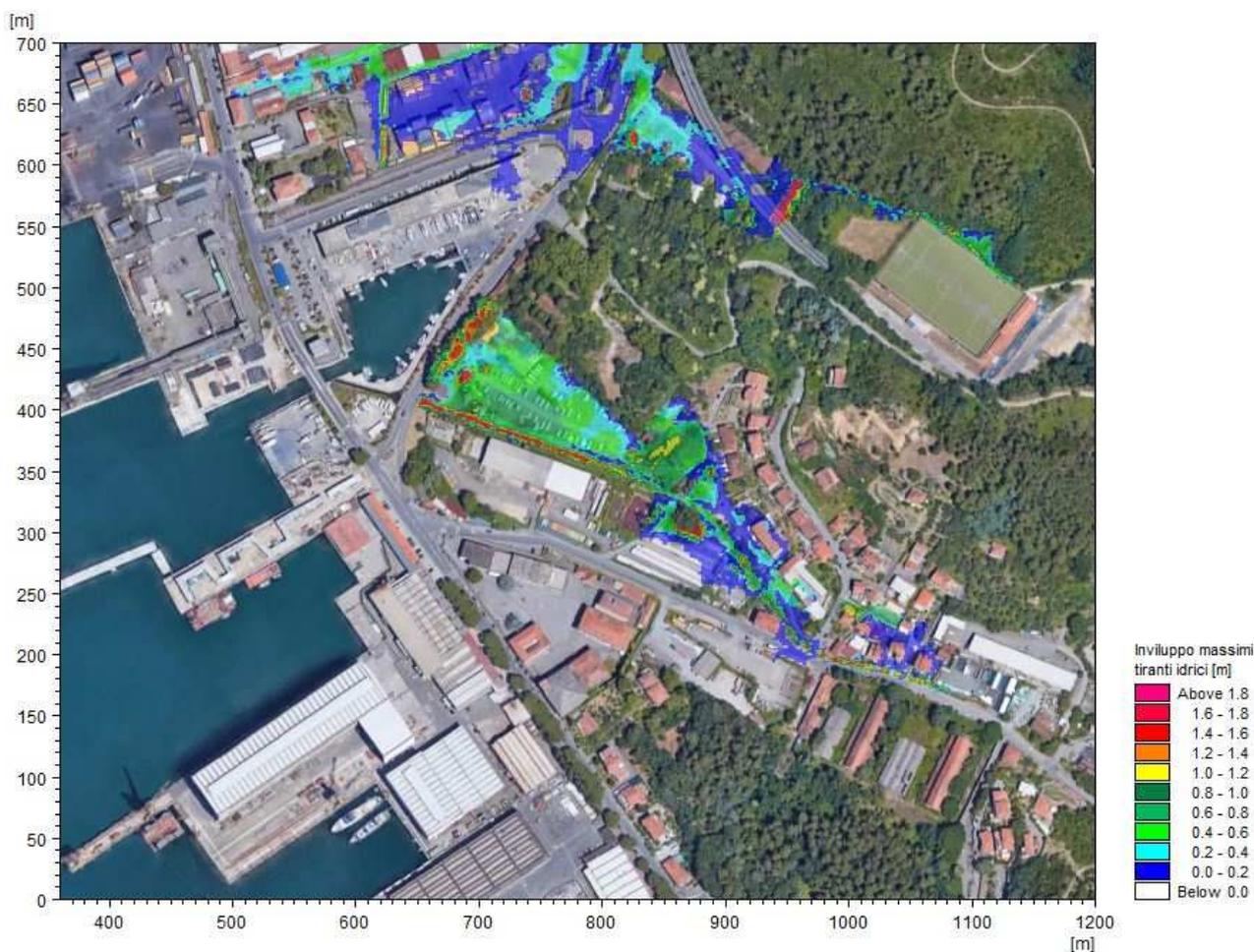


Figura 24 – Distribuzione involucro dei massimi tiranti idrici rispetto al piano campagna. TR=500 anni.

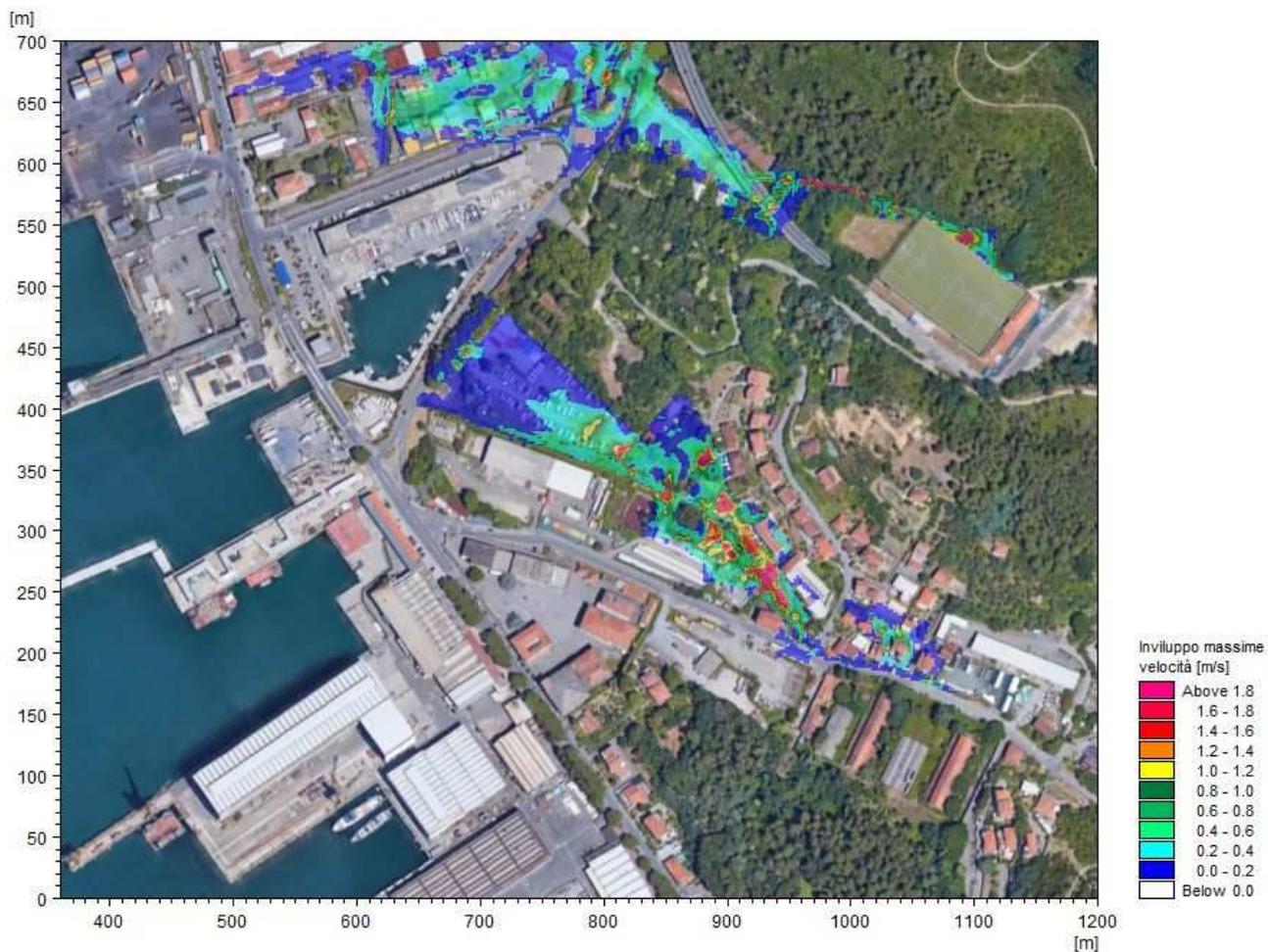


Figura 25 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità. TR=500 anni.

5.1.4 Analisi delle dinamiche di esondazione

A integrazione di quanto descritto nei capitoli precedenti, per meglio rappresentare le dinamiche di esondazione relative agli eventi simulati si forniscono di seguito le mappe di distribuzione dei tiranti idrici in diversi istanti temporali dell'evento (a titolo di esempio per il solo scenario TR200).

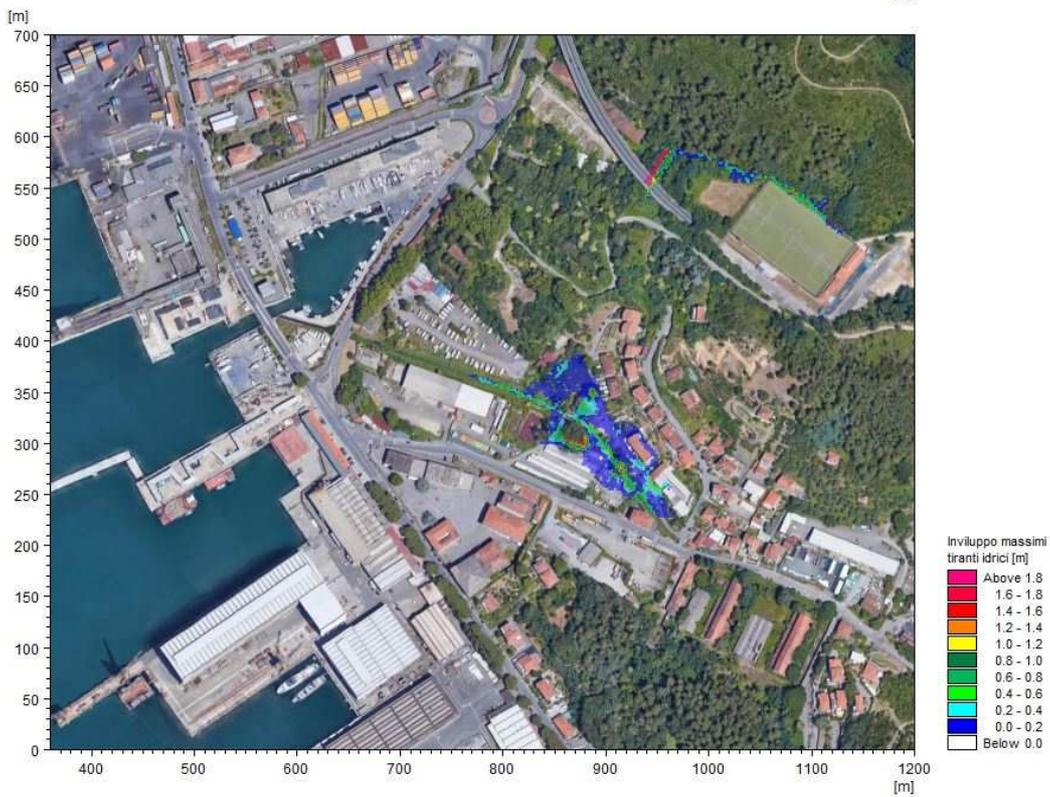
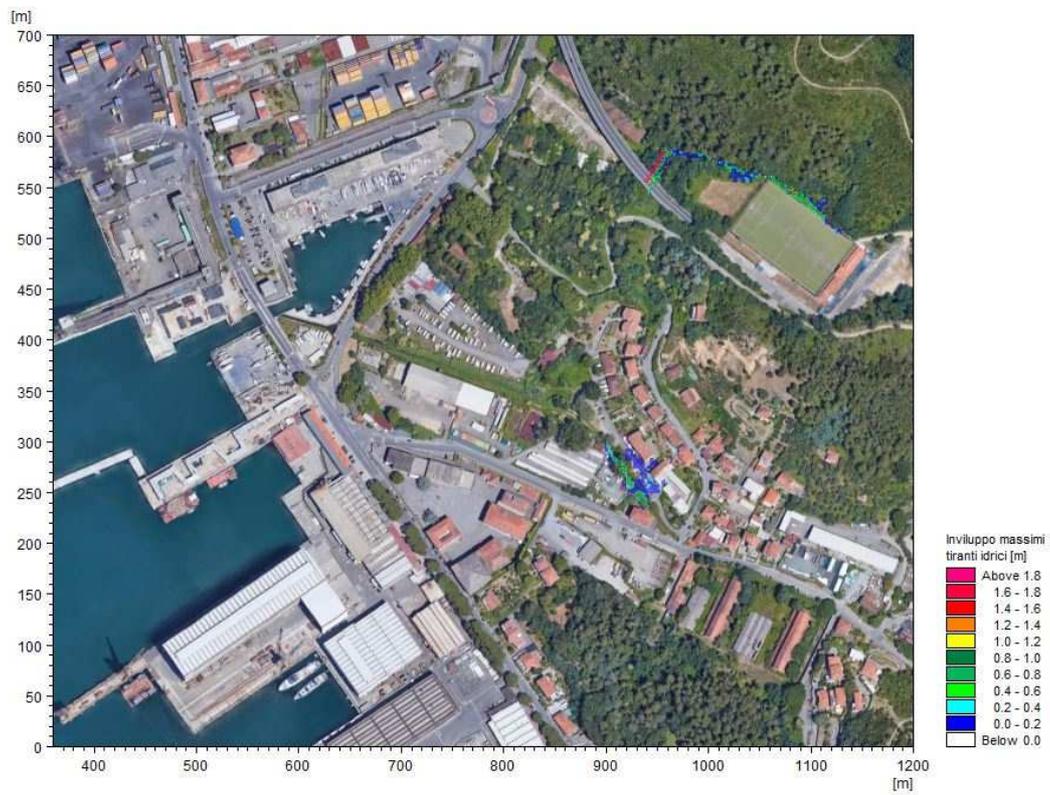


Figura 26 – Distribuzione delle massime altezze d'acqua su istanti di simulazione successivi. TR=200 anni.

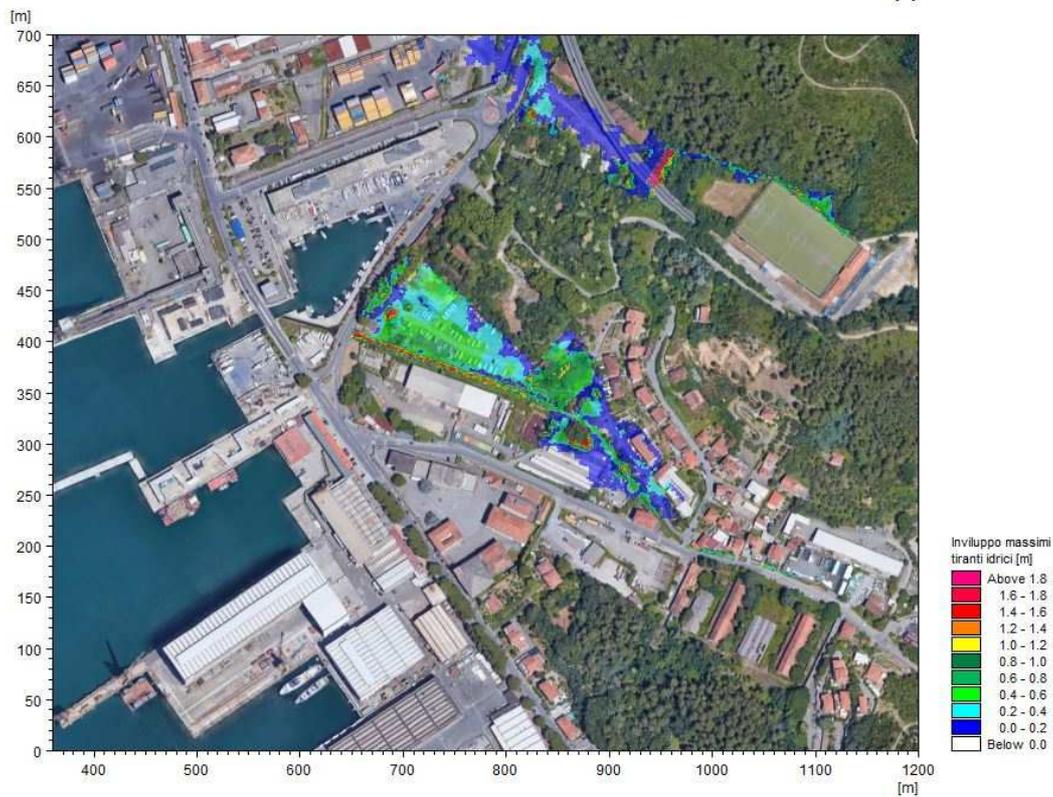
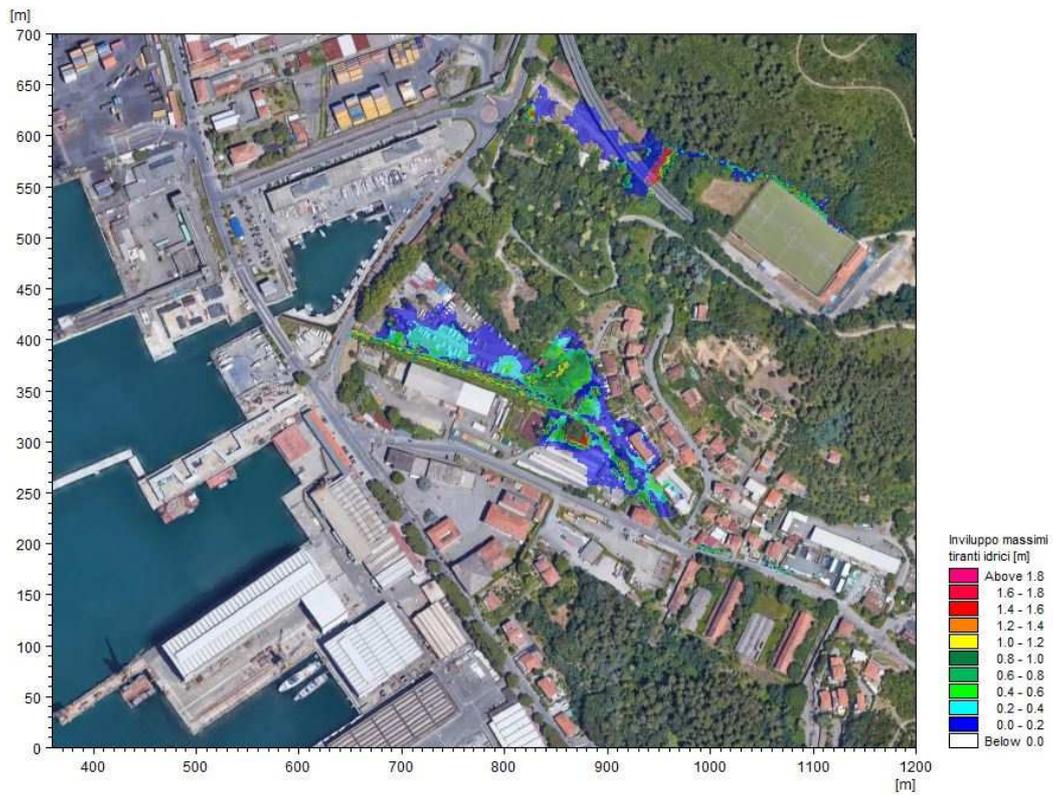


Figura 27 – Distribuzione delle massime altezze d'acqua su istanti di simulazione successivi. TR=200 anni.

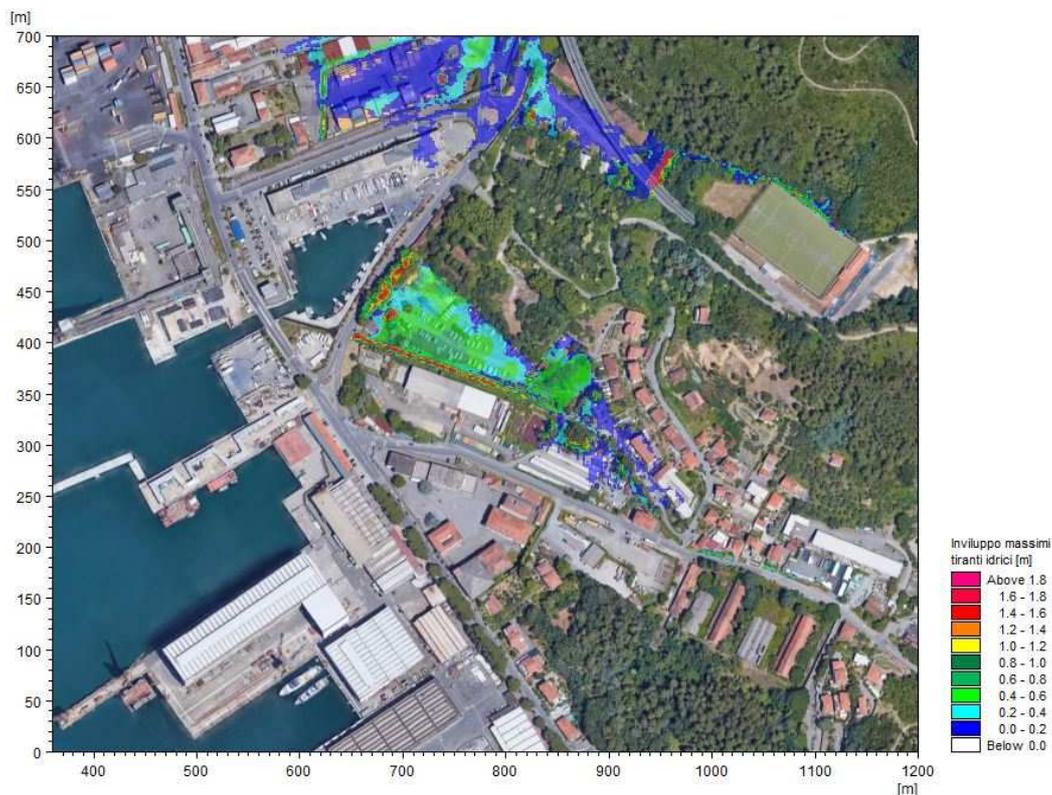


Figura 28 – Distribuzione delle massime altezze d’acqua su istanti di simulazione successivi. TR=200 anni.

5.1.5 Analisi idraulica del tratto terminale

Poiché le simulazioni precedentemente descritte sono caratterizzate dalla presenza di rilevanti esondazioni nel tratto a monte di quello oggetto di sistemazione nell’ambito dei lavori di realizzazione della Darsena, in quest’ultimo si riscontra la presenza di una portata massima significativamente inferiore a quella teorica di progetto; le valutazioni effettuate in termini di franchi idraulici sono relative a queste ultime.

Per analizzare l’assetto idraulico della porzione terminale del corso d’acqua, indipendentemente dall’adeguatezza o meno del tratto più a monte, sono state condotte ulteriori simulazioni con riferimento ai medesimi scenari ma con il solo modello monodimensionale, escludendo quindi la possibilità di esondazioni laterali. In questo modo risulta possibile verificare questo tratto con riferimento alla portata massima idrologica per i vari tempi di ritorno.

I profili involuppo dei massimi livelli idrici relativi a queste simulazioni sono rappresentati (con dettaglio del solo tratto terminale) nelle immagini da Figura 29 a Figura 31. Essi sono significativi solo a valle della briglia, mentre nel tratto di monte (dove nelle simulazioni descritte nei capitoli precedenti si verificano le esondazioni principali) i livelli idrici rappresentati sono del tutto teorici (relativi a una geometria in cui le estremità delle sezioni corrispondono a “muri” che non consentono la fuoriuscita laterale di portata).

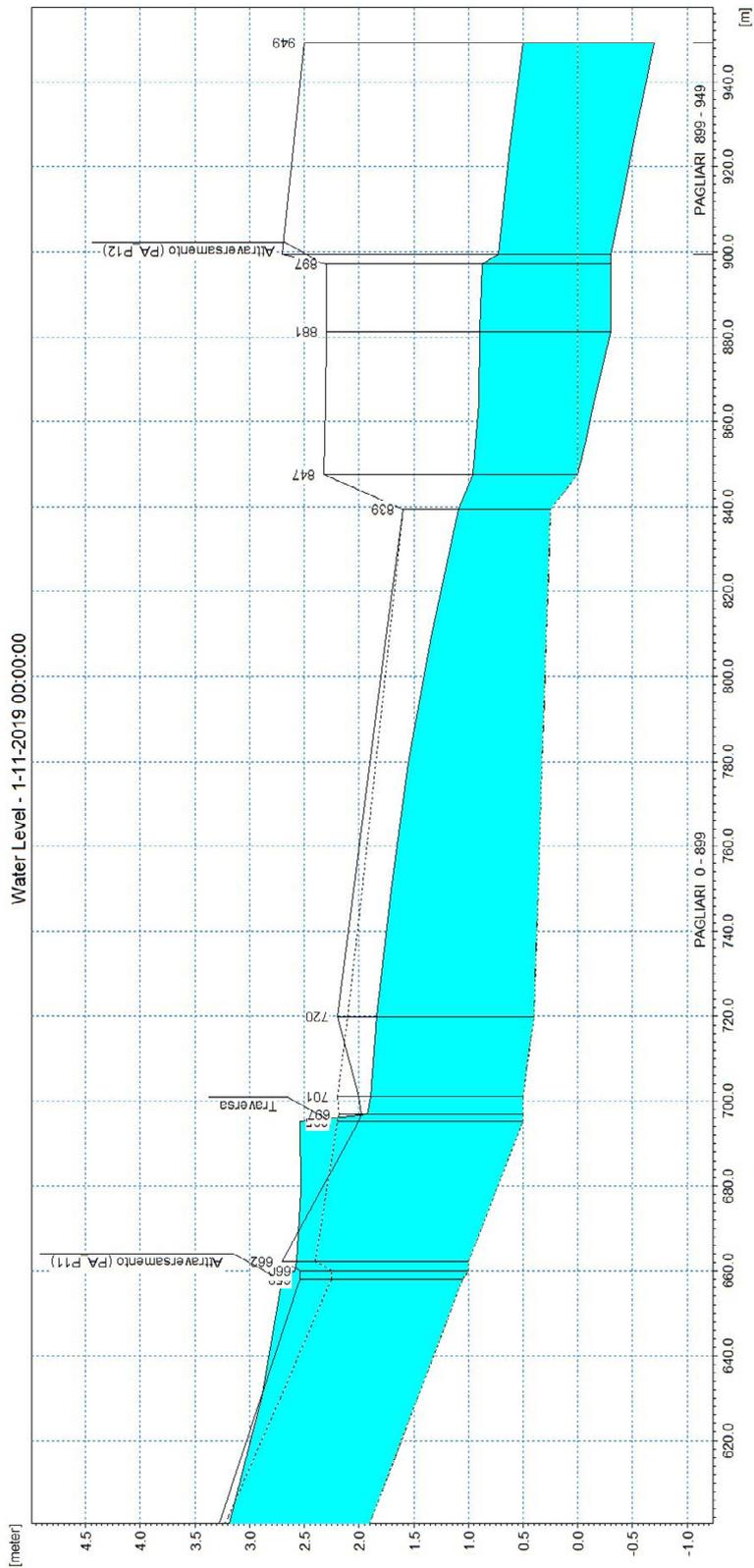


Figura 29 – Profilo longitudinale di corrente del torrente Pagliari, scenario TR50 senza esondazioni laterali.

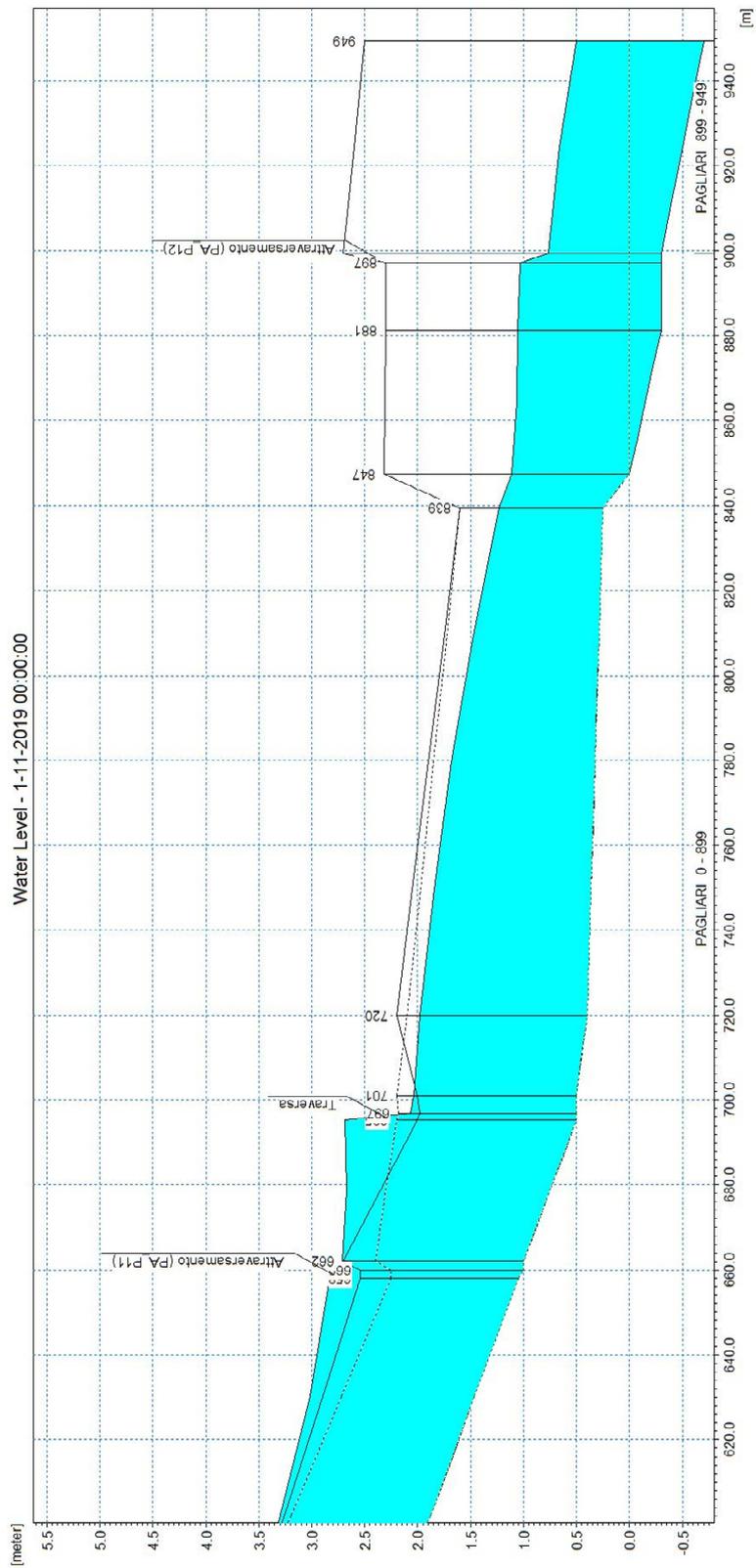


Figura 30 – Profilo longitudinale di corrente del torrente Pagliari, scenario TR200 senza esondazioni laterali.

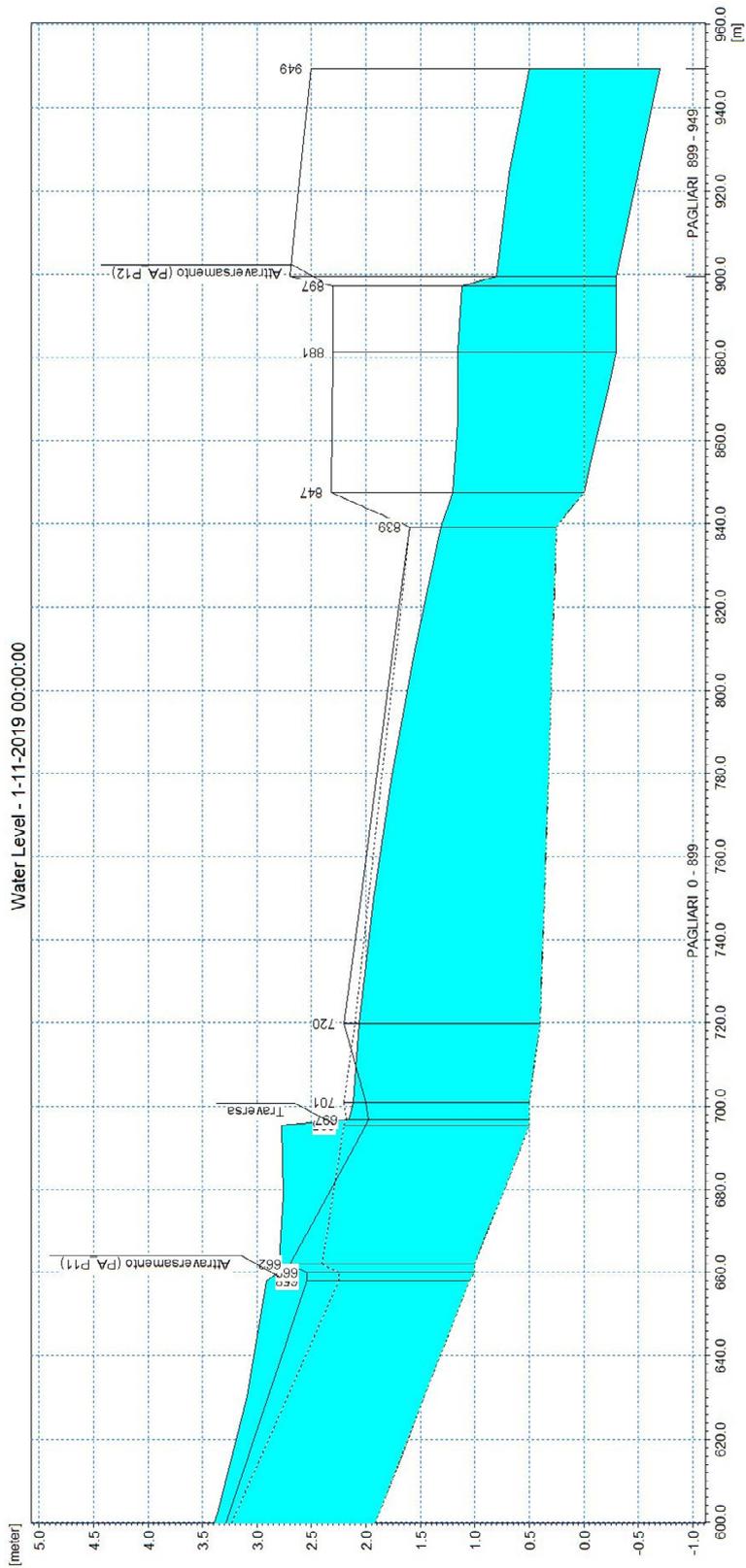


Figura 31 – Profilo longitudinale di corrente del torrente Pagliari, scenario TR500 senza esondazioni laterali.

La Tabella 7 fornisce una sintesi dei principali parametri idrodinamici per le medesime simulazioni, relative al solo tratto terminale del torrente Pagliari (da Sez.25 a Sez.31).

Oltre ai parametri già descritti, viene anche riportato il franco idraulico rispetto alle quote delle due sponde. I valori di portata nelle varie sezioni presentano minime variazioni dovute prevalentemente all'approssimazione modellistica.

Si osserva come nel tratto a valle di via delle Casermette (a lato della Darsena) i franchi risultino sempre superiori a 1 m, mentre nel tratto di monte con sezione trapezia in terra i franchi siano invece ridotti, pur senza esondazioni (ad eccezione di un minimo sormonto nella Sez.25 dovuto alla presenza nelle sezioni inserite nel modello di una "corda molle" della quota di sponda destra).

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Franco sx (m s.m.)	Franco dx (m s.m.)
PA - Sez.25	700,99	0,50	14,33	1,89	1,39	2,17	0,31	0,11
PA - Sez.26	719,90	0,40	14,33	1,84	1,44	1,74	0,26	0,36
PA - Sez.27	839,31	0,25	14,39	1,09	0,84	2,93	0,51	0,51
PA - Sez.28	847,44	0,00	14,41	0,96	0,96	1,97	1,36	1,36
PA - Sez.29	881,25	-0,30	14,55	0,90	1,20	1,55	1,40	1,40
PA - Sez.30	899,36	-0,30	15,62	0,73	1,03	2,33	1,97	1,97
PA - Sez.31	949,36	-0,70	14,61	0,50	1,20	3,48	2,00	2,00

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Franco sx (m s.m.)	Franco dx (m s.m.)
PA - Sez.25	700,99	0,50	17,28	2,03	1,53	2,32	0,17	-0,03
PA - Sez.26	719,90	0,40	17,28	1,98	1,58	1,86	0,12	0,22
PA - Sez.27	839,31	0,25	17,26	1,23	0,98	2,98	0,37	0,37
PA - Sez.28	847,44	0,00	17,27	1,11	1,11	2,04	1,21	1,21
PA - Sez.29	881,25	-0,30	17,62	1,06	1,36	1,67	1,24	1,24
PA - Sez.30	899,36	-0,30	17,31	0,76	1,06	2,51	1,94	1,94
PA - Sez.31	949,36	-0,70	17,27	0,50	1,20	4,11	2,00	2,00

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Franco sx (m s.m.)	Franco dx (m s.m.)
PA - Sez.25	700,99	0,50	19,21	2,12	1,62	2,41	0,08	-0,12
PA - Sez.26	719,90	0,40	19,20	2,06	1,66	1,92	0,04	0,14
PA - Sez.27	839,31	0,25	19,17	1,31	1,06	3,01	0,29	0,29
PA - Sez.28	847,44	0,00	19,17	1,21	1,21	2,09	1,11	1,11
PA - Sez.29	881,25	-0,30	19,00	1,15	1,45	1,68	1,15	1,15
PA - Sez.30	899,36	-0,30	19,09	0,80	1,10	2,66	1,90	1,90
PA - Sez.31	949,36	-0,70	19,09	0,50	1,20	4,64	2,00	2,00

Tabella 7 – Risultati di sintesi, relativi al solo tratto terminale, delle simulazioni eseguite senza consentire le esondazioni laterali. Dall'alto verso il basso: TR50, TR200, TR500.

5.1.6 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti

In Tabella 8 sono riassunti i franchi minimi di sicurezza rispetto alle quote di intradosso degli attraversamenti, estratti dai risultati dei tre scenari simulati.

Essi sono indicati con valore negativo nel caso in cui il moto sia in pressione e identificano la differenza tra le altezze del cielo manufatto (intradosso) e le altezze piezometriche del tratto.

Il livello idrico nel modello non è definito in corrispondenza delle strutture (*culvert*) che rappresentano gli attraversamenti, si fa pertanto riferimento alla sezione posta immediatamente a monte.

Il ponte ad arco posto alla progressiva 482,70 m (PA_P10), che restringe significativamente la sezione d'alveo, denota un comportamento in pressione su tutti gli scenari simulati. In corrispondenza dell'evento cinquantennale nessuno degli altri attraversamenti risulta funzionare in pressione, pur con diversi casi di franco minimo (circa 10 cm).

Per l'evento duecentennale quasi tutti i ponti (tranne il PA_P2 e il PA_P12 presso la foce) risultano funzionare in pressione o comunque con franco esiguo. Solo il ponte PA_P12 mostra franchi prossimi al metro, risultando sostanzialmente in linea con i criteri definiti dalle NTA del vigente Piano di Bacino. Tale attraversamento risulterebbe rispettare anche i dettami delle NTC2018 risultando assimilabile ad un tombino, ai sensi di quanto indicato dalla Circolare esplicativa del C.S.LL.PP. n.7/2019.

ID Sezione	ID Struttura	Geometria	Quota Intradosso [m s.m.]	Franco Intradosso		
				TR50 [m]	TR200 [m]	TR500 [m]
PA - Sez.3	PA_P1	2,60 x 1,25	18,35	0,20	0,11	0,00
PA - Sez.8	PA_P2	2,80 x 2,10	12,34	0,92	0,78	0,68
PA - Sez.9	PA_P3	2,70 x 1,60	11,17	0,35	0,19	0,11
PA - Sez.10	PA_P4	2,50 x 1,60	10,50	0,22	0,05	-0,05
PA - Sez.11	PA_P5	2,75 x 1,63	8,48	0,09	-0,08	-0,12
PA - Sez.12	PA_P6	3,40 x 1,60	8,17	0,29	0,10	0,05
PA - Sez.13	PA_P7	3,35 x 1,55	7,95	0,21	0,03	-0,03
PA - Sez.14	PA_P8	3,05 x 1,50	7,66	0,08	-0,10	-0,16
PA - Sez.15	PA_P9	3,30 x 1,60	6,96	0,03	-0,26	-0,37
PA - Sez.18	PA_P10	2,50 x 1,10	5,88	-0,78	-1,05	-1,15
PA - Sez.22	PA_P11	1,97 x 1,70	2,70	0,27	0,17	0,15
PA - Sez.30	PA_P12	7,80 x 2,00	1,70	1,04	1,03	1,01

Tabella 8 – Franco idraulico rispetto al massimo livello idrico simulato per gli scenari TR50, TR200 e TR500 degli attraversamenti del torrente Pagliari e del rio di Valle Oscura.

6. ANALISI DEI RISULTATI E PROPOSTA DI MODIFICA DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ

Lo studio idraulico di dettaglio descritto nel presente documento ha consentito di ricostruire con accuratezza l'effettiva estensione degli allagamenti attesi in relazione al deflusso delle piene associate a un tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni dei corsi d'acqua esaminati.

In funzione dei risultati ottenuti è stata effettuata una proposta di nuova perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica definite nel vigente Piano di Bacino (cfr. capitolo 2), considerando l'involuppo delle aree allagate nei tre scenari simulati.

La pianificazione vigente, in riferimento al torrente Pagliari (v. Figura 1), definisce un'area di pericolosità alta (fascia A), coincidente con le fasce B e C, estesa dal ponte PA_P2 fino a via delle Casermette, con estensione trasversale limitata su entrambe le sponde, andando a interessare in sinistra il sedime di via Pitelli, fino alla porzione più valliva dove si ha una maggiore estensione in destra, nell'area di sosta / rimessaggio mezzi a monte della Darsena. È presente anche una piccola area di pericolosità alta nel tratto di monte, subito a valle dello sbocco dei due rami tombati di testata.

Tale tracciamento delle aree di pericolosità è antecedente la realizzazione della Darsena e della sistemazione del tratto di torrente di monte. Nonostante quest'ultima, i risultati del presente studio mostrano una discreta affinità con le perimetrazioni del PdB, particolarmente nella porzione più valliva.

Nonostante il tratto fluviale sistemato risulti nella sostanza adeguato a contenere il deflusso di piena, le esondazioni provengono da più a monte, particolarmente dal tratto subito a valle della passerella pedonale (PA_P11), dove la sezione in terra è assai più stretta rispetto al tratto sistemato e il deflusso è condizionato dalla presenza di una briglia (Figura 32). Un altro tratto critico è quello subito a valle del ponte PA_P10, dove la sponda destra si abbassa fino a quote circa 1 m superiori al fondo alveo.



Figura 32 – Sx: alveo a valle del ponte PA_P10, con sponda destra che scende a quote prossime al fondo. Dx: passerella pedonale PA_P11.

La portata di esondazione si propaga da questi tratti verso valle, determinando l'allagamento delle aree depresse a valle di via delle Casermette, provocando anche il sormonto di quest'ultima (per eventi pari o superiori a TR=200 anni). Le acque rientrano poi gradualmente in alveo a monte di via delle Casermette,

defluendo a mare attraverso il canale a lato della Darsena. Le aree allagate dall'evento duecentennale (che definiscono la perimetrazione della fascia B) sono pressoché coincidenti con le aree interessate dagli allagamenti rispetto alla simulazione TR50 (fascia A), a meno di una modesta estensione compresa tra gli attraversamenti PA_P6 e PA_P10. L'evento cinquecentennale (fascia C) denota una maggiore estensione, interessando parzialmente le abitazioni tra Via Pagliari e Via Pitelli.

Il vigente Piano di Bacino non fornisce alcuna informazione sul rio Valle Oscura. Dai risultati del presente studio, la Fascia A interessa la totalità delle aree allagate mentre la fascia B e la fascia C risultano quasi perfettamente sovrapposte ad essa.



Figura 33 – Estensione delle nuove fasce A, B e C proposte per il torrente Pagliari e il rio di Valle Oscura.

Come mostrato nel capitolo 5.1.6, quasi tutti gli attraversamenti nel tratto in studio presentano dei franchi di sicurezza nettamente inferiori a 1,0 m rispetto ai livelli massimi dell'evento di piena duecentennale, risultando quindi idraulicamente inadeguati ai sensi del vigente Piano di Bacino (oltre che delle NTC2018).

Fanno eccezione il ponte PA_P2, con franco sull'evento duecentennale di circa 0,8 m, prossimo quindi a condizioni di accettabile sicurezza idraulica, e il ponte PA_P12 presso la foce, il quale risulta sostanzialmente in linea con i criteri definiti dalle NTA del vigente Piano di Bacino. Tale attraversamento risulterebbe rispettare

anche i dettami delle NTC2018 essendo assimilabile ad un tombino, ai sensi di quanto indicato dalla Circolare esplicativa del C.S.LL.PP. n.7/2019.

Sono state infine determinate le *aree individuate a minor pericolosità* degli ambiti normativi di fascia B, facendo riferimento a quanto previsto dalla DGR 91/2013, evoluzione della precedente DGR 250/2005 con la quale erano *“stati approvati dalla giunta regionale, nella sua qualità di organo dell’autorità di bacino regionale, i criteri per la definizione dei cosiddetti “ambiti normativi delle fasce di inondabilità in funzione di tiranti idrici e velocità di scorrimento”, finalizzati in particolare ad individuare, nell’ambito delle fasce di inondabilità ad assegnati tempi di ritorno (fasce a e b) aree a “minor pericolosità relativa” tali da consentire diverse possibilità edificatorie”*.

L’aggiornamento normativo effettuato con la DGR 91/2013 riporta che: *“A seguito degli eventi alluvionali dell’autunno 2010 e 2011, per alcuni aspetti più intensi e frequenti degli eventi precedentemente occorsi, si è resa opportuna una valutazione dell’adeguatezza e dell’attualità dei criteri ex DGR 250/2005, con analisi di eventuali modifiche od integrazioni da apportare agli stessi. In particolare, è stato ritenuto necessario che per la fascia A, corrispondente alle aree a più alta pericolosità idraulica in quanto inondabili a TR=50 anni, debba essere sempre applicata la normativa ordinaria di fascia A, di cui al testo integrato dei criteri ex DGR 265/2011. È stata pertanto prevista l’eliminazione della possibilità di individuazione di aree a minor pericolosità nella fascia A, tali da consentire una riclassificazione della stessa a fascia B, come previsto dalla DGR 250/2005.*

Si è ritenuto inoltre necessario aggiornare il criterio tecnico di “minor pericolosità” da applicarsi in fascia B, sulla base dei criteri vigenti dal 2001, nell’obiettivo di privilegiare gli studi di dettaglio a scala di bacino o riguardanti tratti significativi di corso d’acqua, in quanto maggiormente affidabili rispetto a studi locali finalizzati alle singole edificazioni. Il presente documento rappresenta l’aggiornamento dei criteri ex DGR 250/2005, che si intendono pertanto superati”.

In continuità con quanto previsto nei criteri ex DGR 250/2005, le aree B0 (a minor pericolosità relativa) e BB sono individuate con il criterio di cui alla Figura 34.

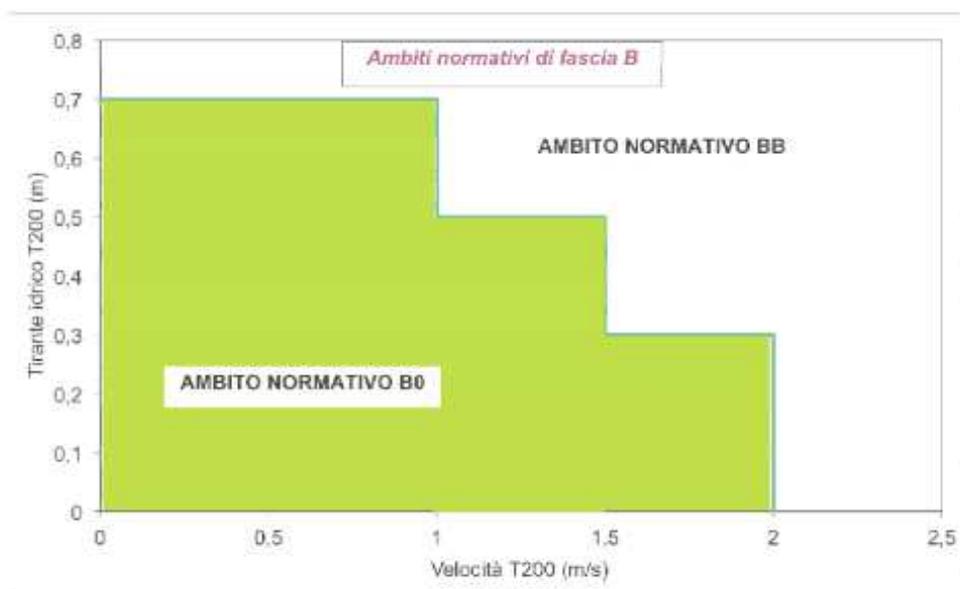


Figura 34 – Definizione delle fasce fluviali BB e B0 ai sensi della DGR 91/2013.

Gli ambiti "B0" e "BB" per il tratto di studio del torrente Pagliari e del rio di Valle Oscura sono rappresentati in Figura 35.

Lungo il torrente Pagliari, in relazione alla presenza di velocità di propagazione non basse, le aree perimetrate in fascia B risultano prevalentemente associabili a un ambito BB.

Viceversa, la fascia B associata al rio Valle Oscura risulta prevalentemente ricadente nell'ambito B0. L'ambito BB è riscontrato nel tratto a monte del muro ubicato al di sotto della S.S.331, dove si genera un piccolo invaso temporaneo, e nella porzione tra via Privata ENEL e Viale S. Bartolomeo per la presenza di maggiori valori di livello idrico in alcune aree.



Figura 35 – Definizione delle aree B0 e BB all'interno della fascia B per il torrente Pagliari e il rio Valle Oscura.

ALLEGATO 1 – Descrizione del codice di calcolo MIKE11 - HD

PREMESSA

Il programma MIKE 11 è stato realizzato dal DHI (Danish Hydraulic Institute) a partire dal programma SYSTEM 11 che dal 1972, anno della sua messa a punto, ad oggi, è stato usato in un grande numero di applicazioni in tutto il mondo con ottimi risultati e riconoscimenti.

MIKE 11 è un programma generale per la simulazione del flusso idrico a pelo libero in estuari, fiumi, sistemi di irrigazione e simili corpi idrici. MIKE 11 simula il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. E' possibile tenere conto di:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenti).

L'adozione del programma di simulazione DHI\MIKE 11, consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

2. DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.

Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle, cioè simulare i fenomeni di rigurgito.

Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati sia reti idrauliche con maglie chiuse.

3. EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE 11 mediante il terzo tipo di formulazione risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- a) Il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità.
- b) La pendenza del fondo è piccola.

- c) Le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

dove:

A = area della sezione bagnata (m²);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m^{1/2}s⁻¹);

g = accelerazione di gravità (m s⁻²);

h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);

Q = portata (m³/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta (m²/s).

4. SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

5. APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare tutti i termini legati alla quantità di moto nelle equazioni generali di De Saint Venant:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ |Q|}{C^2 AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine $\partial h/\partial x$. Per ragioni di stabilità questo termine nella soluzione viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

6. DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. In MIKE 11 la descrizione di ogni struttura viene effettuata in un segmento di corso d'acqua.

Tipi di strutture simulate

Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

Tipo 2. Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

Tipo 3. Tombino

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso. Deve essere inserita una relazione Q-h che contempli tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

Tipo 4. Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_{j1}) \cdot Z_{j2}$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

Tipo 6. Strutture mobili

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

7. RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler.

Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQ |Q|}{C^2 AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQ |Q|}{M^2 AR^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a $1/n$, essendo n il coefficiente di Manning.

8. CONDIZIONI INIZIALI

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

9. METODO DI SOLUZIONE

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).

La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

10. CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne, attrito indotto dal vento. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

11. DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perché questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione.

Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d + V}}{Dx} \cdot Dt$$

dove:

- Cr = numero di Courant;
- d = altezza d'acqua media;
- V = velocità media della corrente;
- g = accelerazione di gravità;
- Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti Dx vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo Dt unitario.

Per correnti lente ($Fr < 1$), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

2) Criterio della velocità.

Il criterio della velocità stabilisce che i passi Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt, e cioè:

$$V *Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo Dt, Dx deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia Dt che Dx devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame.

Il modello DHI/MIKE 11 genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di Dx, vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro Dx o meno.

In osservanza ai sovracitati criteri è possibile definire unicamente intervalli di valori per Dx e Dt e non valori univoci per ogni simulazione.

ALLEGATO 2 – Descrizione del codice di calcolo MIKE21 - HD

Il codice di calcolo MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile approssimare il comportamento con l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei: il numero "21" che contraddistingue il codice sta proprio ad indicare la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il modulo idrodinamico risolve le equazioni complete del moto di de St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema di de St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

- $h(x,y,t)$ = profondità dell'acqua;
- $\zeta(x,y,t)$ = quota del pelo libero;
- $p,q(x,y,t)$ = portate unitarie nelle direzioni x e y;
- $C(x,y)$ = coefficiente di scabrezza di Chezy;
- g = accelerazione di gravità;
- $f(V)$ = fattore d'attrito del vento;
- $V, V_x, V_y(x,y,t)$ = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;
- $\Omega(x,y)$ = parametro di Coriolis;
- $p_a(x,y,t)$ = pressione atmosferica;

ρ_w	= densità dell'acqua;
x,y	= coordinate spaziali;
t	= tempo;
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	= componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;
S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}	= componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y . La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hE \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

tali due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} hE \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ($m^3/s/m$) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m^3/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizioni iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore

assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" si verifica che la situazione ottenuta sia di effettiva stazionarietà.

Le equazioni del modello sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).

ALLEGATO 3 – Sezioni trasversali inserite nel modello idraulico, con indicato il livello massimo di piena duecentennale

