



**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 12: Caporacca**

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

3636	-	0	4	-	0	0	9	0	0	.	DOC		3.9
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----	--	-----

00	LUG.21	R. LUCHI	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 DEL MODELLO NUMERICO	4
3.1 Approccio metodologico modellistico	5
3.2 Schema del modello	6
3.2.1 Modello MIKE11	6
3.2.2 Modello MIKE21	8
4. CONDIZIONI AL CONTORNO	9
5. RISULTATI	13
5.1 Risultati delle simulazioni	14
5.1.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)	14
5.1.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)	18
5.1.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)	23
5.1.4 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti	27
6. ANALISI DEI RISULTATI E PROPOSTA DI MODIFICA DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ	29

## 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 ZC92FB886 – 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.

Tale 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 12 – Torrente Caporacca (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 nei bacini considerati, 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, congruentemente 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

Per il Torrente Caporacca sono state effettuate nel vigente Piano di Bacino solo alcune verifiche puntuali di attraversamenti. In particolare in Figura 1 (estratto dalla cartografia di Piano: *Carta delle fasce di inondabilità, tavola 2 di 6*) sono rappresentati in colore rosso gli attraversamenti indicati come non adeguati al deflusso della piena cinquantennale, in colore arancio quelli inadeguati per la piena duecentennale ed in colore verde quelli non adeguati per la piena cinquecentennale. I tre attraversamenti più a monte sono esterni al tratto oggetto di analisi nel presente studio.

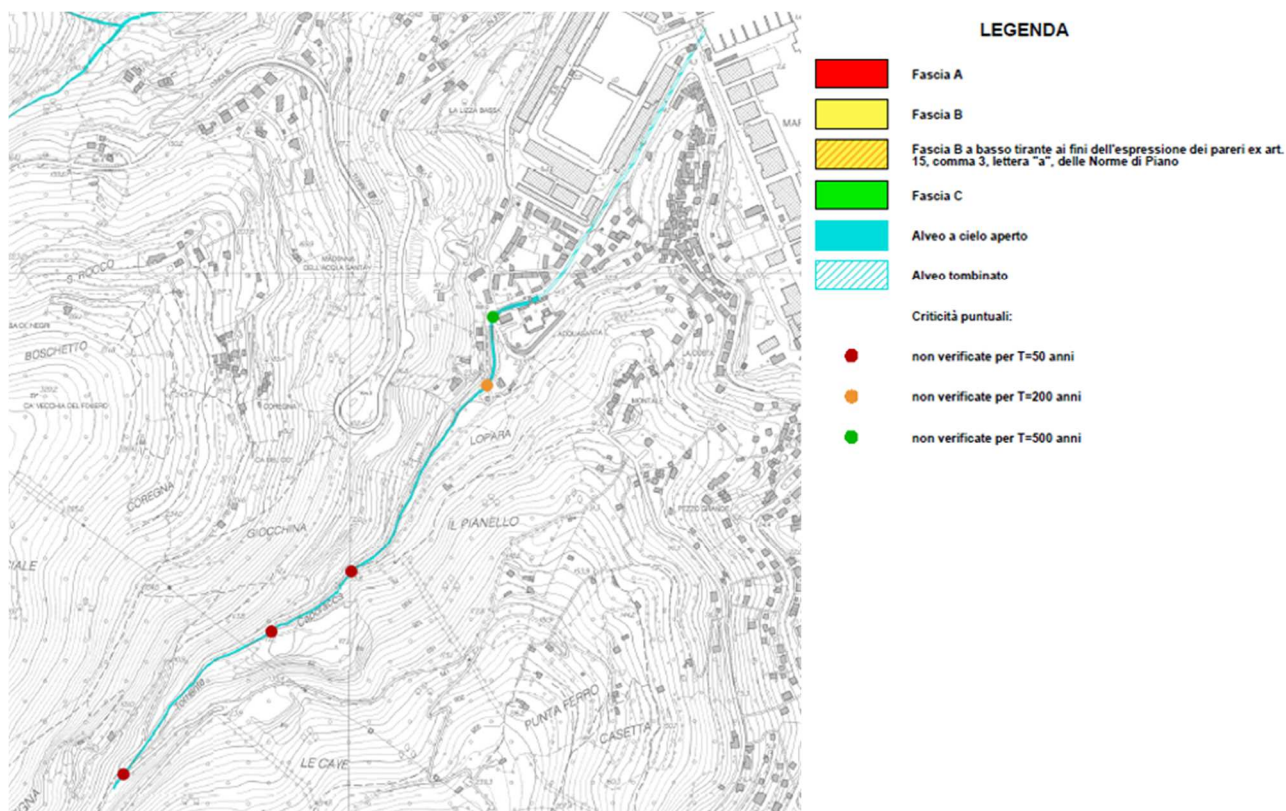


Figura 1 – Aree di pericolosità idraulica da Piano di Bacino vigente.

## 3. ALLESTIMENTO DEL MODELLO NUMERICO

Le analisi idrauliche per la caratterizzazione dell'idrodinamica di piena del Torrente Caporacca sono state condotte mediante la messa a punto e applicazione di un modello numerico idrodinamico bidimensionale in moto vario, dinamicamente accoppiato a un modello monodimensionale descrittivo del deflusso all'interno dell'alveo inciso.



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, agli elaborati grafici dei progetti di copertura del tratto terminale e alle indicazioni geometriche riportate nel vigente Piano di Bacino per gli attraversamenti oggetto di verifica puntuale.

Per maggiori dettagli in merito all'assetto attuale del corso d'acqua e alla documentazione acquisita 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 condotte per 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.

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 il modello allestito, 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 schematizzato nel codice MIKE11 HD (modulo idrodinamico) è costituito da 25 sezioni trasversali, che rappresentano la geometria del torrente Caporacca nella sua parte incisa per un tratto di circa 826 m fino allo sbocco a mare nel Golfo di La Spezia presso il porticciolo di San Vito a Marola (SEZ\_25). Per aumentare il dettaglio della rappresentazione idrodinamica, le sezioni sono state infittite tramite interpolazione.

Il modello è stato esteso più a valle dell'area di diretto interesse per evitare che le modalità di assegnazione delle condizioni al contorno di mare possano influenzare i risultati ottenuti (sono state introdotte in particolare due sezioni fittizie di geometria rettangolare larga per estendere di un centinaio di metri il modello a valle dello sbocco).

In Figura 2 e Tabella 1 si riporta l'estensione del modello (traccia dell'asse e delle sezioni utilizzate) su base foto aerea Google (2018), in coordinate UTM 32 WGS84, e l'anagrafica delle sezioni trasversali inserite.

Queste ultime sono frutto del confronto e dell'integrazione delle geometrie rilevate durante i sopralluoghi, di quelle derivate dai disegni dei progetti pregressi e della 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.

In corrispondenza degli attraversamenti, delle tombinature e dei salti di fondo sono state 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 opportunamente le perdite di carico che si manifestano. Per la localizzazione e descrizione delle caratteristiche dei manufatti esistenti nel tratto in esame e riprodotti nel modello numerico si rimanda alla relazione descrittiva d'insieme (cfr. elaborato 3636-02-00100).

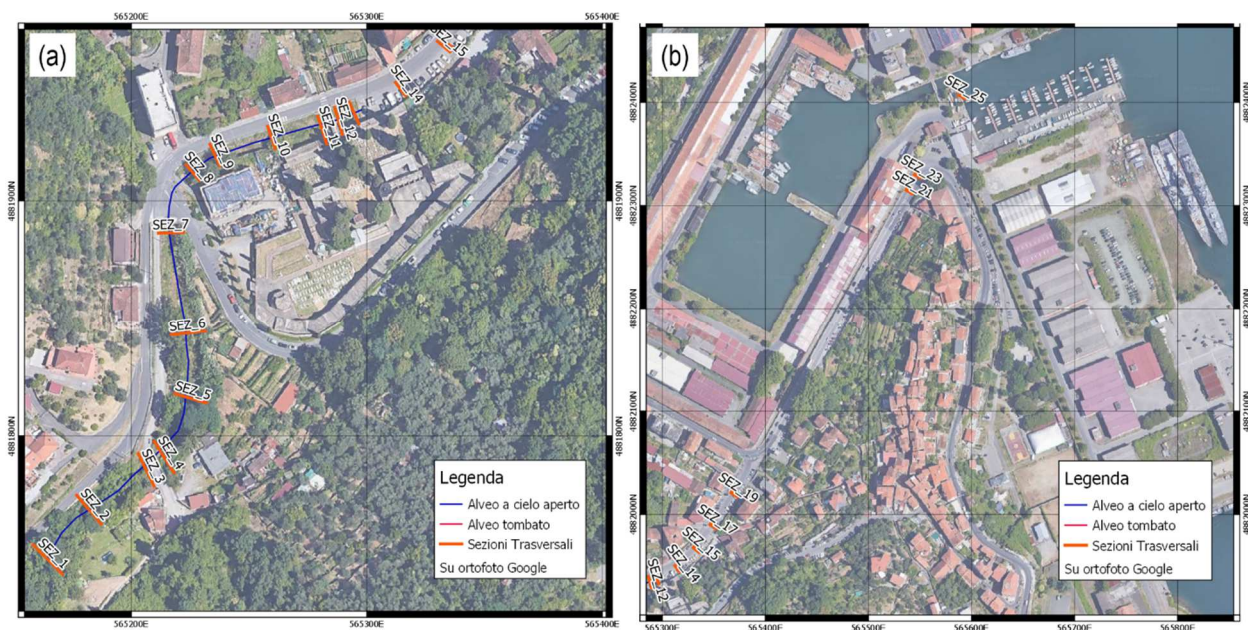


Figura 2 – Network del modello MIKE11 allestito per il Torrente Caporacca ((a) tratto monte; (b) tratto valle).

Ramo	Descrizione	Sezione	Progressiva [m]	Fondo alveo [m s.m.]	Quota intradosso manufatto [m s.m.]
Caporacca		SEZ_1	0,00	19,68	
Caporacca		SEZ_2	27,90	19,53	
Caporacca	Monte ponte CP_P1	SEZ_3	58,00	18,64	21,64
Caporacca	Valle ponte CP_P1	SEZ_4	67,30	17,73	
Caporacca		SEZ_5	93,50	16,68	
Caporacca		SEZ_6	120,70	15,72	
Caporacca	Monte ponte CP_P2	SEZ_7	164,20	15,20	18,2
Caporacca	Valle ponte CP_P2	SEZ_8	193,80	14,76	
Caporacca		SEZ_9	206,80	14,59	
Caporacca		SEZ_10	230,90	13,76	
Caporacca	Monte ponte CP_P3	SEZ_11	252,40	13,19	14,79
Caporacca	Valle ponte CP_P3	SEZ_12	260,30	11,65	
Caporacca	Inizio copertura CP_C1	SEZ_13	267,60	10,90	
Caporacca	CP_C1	SEZ_14	289,90	10,23	13,2
Caporacca	CP_C1 – Monte salto di fondo	SEZ_15	315,70	9,67	
Caporacca	CP_C1– Valle salto di fondo	SEZ_16	317,70	9,02	
Caporacca	CP_C1– Monte salto di fondo	SEZ_17	343,70	8,47	
Caporacca	CP_C1– Valle salto di fondo	SEZ_18	345,70	7,87	
Caporacca	CP_C1– Monte salto di fondo	SEZ_19	380,70	7,12	
Caporacca	CP_C1– Valle salto di fondo	SEZ_20	382,70	6,52	
Caporacca	CP_C1	SEZ_21	720,90	1,00	
Caporacca	CP_C1	SEZ_22	722,90	0,20	
Caporacca	CP_C1	SEZ_23	737,90	0,15	
Caporacca	CP_C1	SEZ_24	738,90	0,15	
Caporacca	CP_C1 - Sbocco a mare	SEZ_25	826,24	-0,30	

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

### 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 paragrafo precedente) 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 si è utilizzata come base topografica di partenza il modello digitale del terreno da volo LIDAR acquisito dal MATTM, ad una risoluzione spaziale di 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 i tempi di calcolo, ma diminuisce 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, delle strade, delle strutture interferenti e delle possibili vie di deflusso conseguenti a fenomeni di esondazione. Si è deciso pertanto di adottare una griglia di calcolo piuttosto fitta, a maglia 2,0 x 2,0 m, composta da 567 righe e 606 colonne (343.602 punti di calcolo).

Nella Figura 3 è riportata la batimetria complessiva del modello dove è stata inserita la geometria dei fabbricati presenti all'esterno all'alveo modificando la quota delle celle della batimetria che ricadono all'interno della loro impronta (per le finalità della modellazione la quota edifici è stata imposta a +3 m rispetto alla quota del terreno sottostante).

Per poter fornire una rappresentazione il più possibile aderente all'effettivo assetto di stato attuale dei luoghi, l'analisi dei fabbricati presenti è stata condotta sulla base della foto aerea più recente disponibile (Google, 2018).

Nella geometria di input del modello sono state inoltre rese inattive le celle ricadenti all'interno del ramo di alveo inciso appartenente al dominio del modello MIKE11. Il contributo di tali celle al deflusso della piena infatti viene già descritto da quest'ultimo modello.

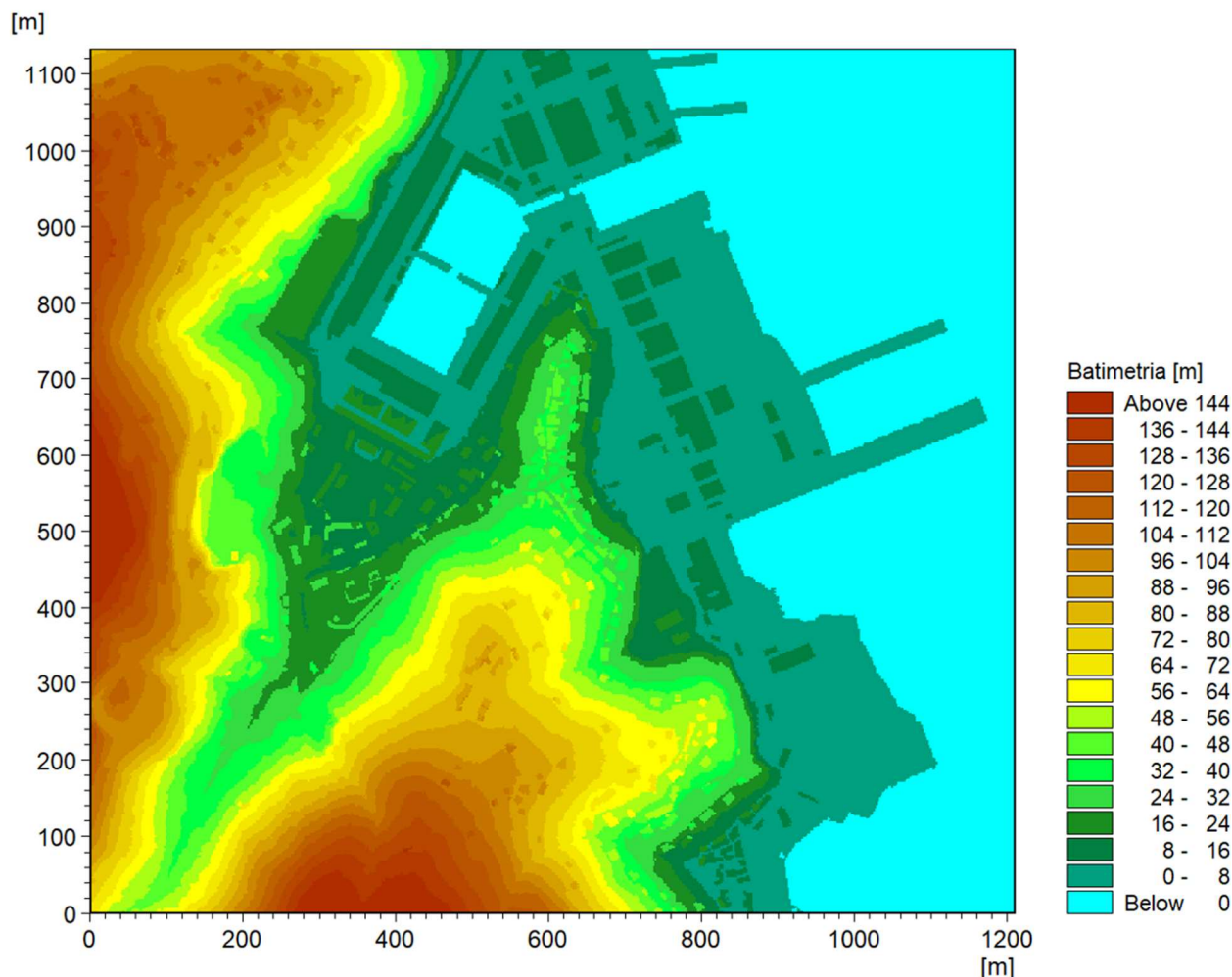


Figura 3 – Batimetria del modello 2D del Torrente Caporacca a maglia 2,0 x 2,0 m (dominio di calcolo complessivo).

#### 4. CONDIZIONI AL CONTORNO

Il modello di simulazione, oltre alla descrizione geometrica, necessita 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 sull’asta del corso d’acqua e la documentazione progettuale disponibile 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).

Natura della superficie	Scabrezza omogenea equivalente $\epsilon$ (mm) [mm]	Bazin $\gamma$ [ $m^{1/2}$ ]	Kutter $m$ [ $m^{1/2}$ ]	Manning $n$ [ $m^{-1/3}\cdot s$ ]	Gauckler Strickler $K_s$ [ $m^{1/3}\cdot s^{-1}$ ]
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 $K_s$ [ $m^{1/3}\cdot s^{-1}$ ]
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.**

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 coperti rivestiti.

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), aree urbane pavimentate e 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 risultino normalmente 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.

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 0,2 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. A tale coefficiente è stato assegnato un valore costante pari a  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  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. Per le sezioni di interesse (sezioni di chiusura di bacini e sottobacini contribuenti significativi in relazione all'estensione dei tratti di corso d'acqua simulati) sono stati definiti nell'ambito dell'analisi idrologica (v. elaborato 3636-03-00100) i relativi idrogrammi di piena.

Per quanto riguarda il torrente Caporacca, vista la limitata estensione del tratto in studio, è stato definito un unico bacino di riferimento chiuso alla foce in mare (CP-A). Gli idrogrammi definiti per tale bacino per i vari tempi di ritorno sono rappresentati in Figura 4.

Cautelativamente tali idrogrammi sono stati inseriti in input nella sezione di monte del modello, analizzando quindi l'intero tratto con riferimento alle portate massime definite alla foce.



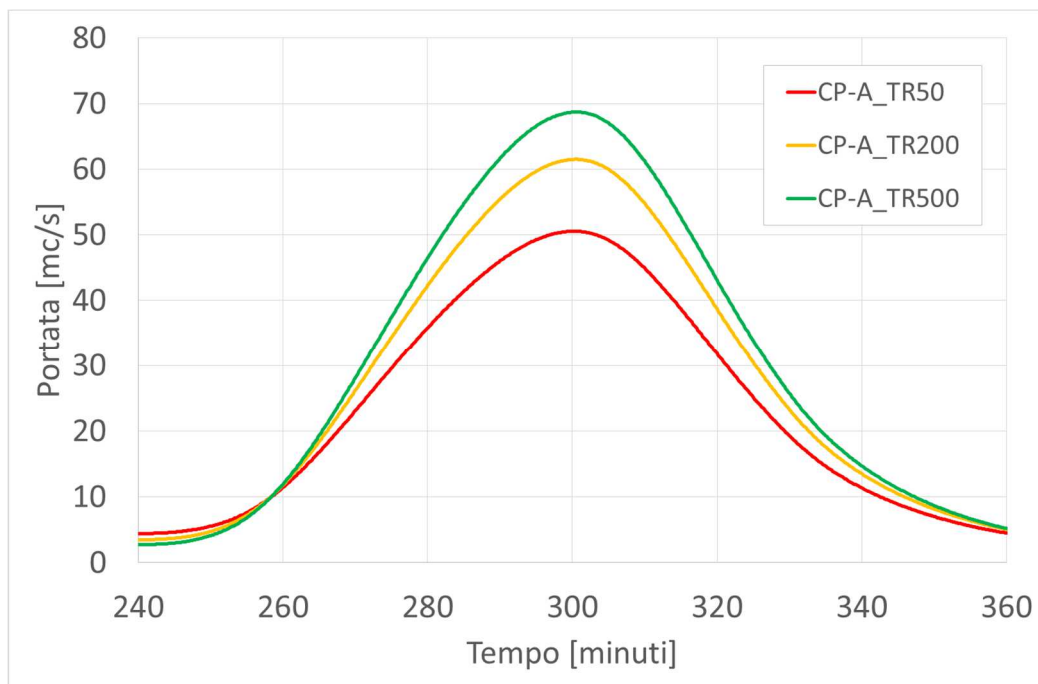


Figura 4 – Idrogrammi dei 3 scenari simulati (TR50, TR200 e TR500) concentrati nella prima sezione (SEZ\_1) del Torrente Caporacca come condizione al contorno di monte.

La condizione idrodinamica di valle dei modelli 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 sovrizzo 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 sovrizzo 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 sovrizzo.

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 Caporacca (nel modello MIKE11): portate in ingresso nella sezione di monte (SEZ\_1) secondo l'idrogramma di riferimento specifico di ogni scenario simulato (differente per ogni tempo di ritorno TR50, TR200 e TR500) del bacino afferente a monte (CP-A); Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 50,55 m<sup>3</sup>/s, 61,50 m<sup>3</sup>/s, 68,71 m<sup>3</sup>/s.
- Condizione al contorno di valle del Torrente Caporacca (nel modello MIKE11): livello idrico costante (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 Caporacca 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 i modelli integrati mono-bidimensionali 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 delle massime velocità di flusso;
- 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<sup>3</sup>/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 (introdotte unicamente per migliorare l'integrazione delle equazioni del moto ottimizzando il passo spaziale). Inoltre i parametri idraulici non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno del modello (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).

I risultati esposti fanno riferimento ai seguenti 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 Caporacca (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 6 è rappresentato graficamente il profilo di corrente del medesimo scenario.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P.L. (m s.m.)	H (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
SEZ_1	0,00	19,68	50,55	22,90	3,22	4,09	1,11	23,75
SEZ_2	27,90	19,53	50,54	22,42	2,89	4,48	1,26	23,44
SEZ_3	58,00	18,64	49,84	22,07	3,43	1,80	0,40	22,24
SEZ_4	67,30	17,73	49,42	19,56	1,83	5,53	1,46	21,12
SEZ_5	93,50	16,68	50,16	18,73	2,05	4,57	1,45	19,80
SEZ_6	120,70	15,72	50,18	18,09	2,37	3,20	0,87	18,61
SEZ_7	164,20	15,20	50,37	17,88	2,68	2,40	0,50	18,17
SEZ_8	193,80	14,76	50,49	16,30	1,54	4,65	1,25	17,40
SEZ_9	206,80	14,59	50,49	16,03	1,44	5,13	1,45	17,37
SEZ_10	230,90	13,76	50,49	15,38	1,62	4,44	1,26	16,39
SEZ_11	252,40	13,19	50,48	15,06	1,87	2,61	0,61	15,41
SEZ_12	260,30	11,65	50,48	13,88	2,23	2,27	0,49	14,14
SEZ_13	267,60	10,90	50,48	13,88	2,98	1,69	0,31	14,03
SEZ_14	289,90	10,23	50,47	11,93	1,70	4,25	1,04	12,85
SEZ_15	315,70	9,67	50,47	11,73	2,06	3,50	0,78	12,35
SEZ_16	317,70	9,02	50,47	10,72	1,70	4,23	1,03	11,63
SEZ_17	343,70	8,47	50,48	10,53	2,06	3,50	0,78	11,15
SEZ_18	345,70	7,87	50,48	9,45	1,58	4,56	1,16	10,51
SEZ_19	380,70	7,12	50,48	9,18	2,06	3,50	0,78	9,80
SEZ_20	382,70	6,52	50,48	7,82	1,30	5,54	1,55	9,38
SEZ_21	720,90	1,00	50,50	3,06	2,06	3,49	0,78	3,68
SEZ_22	722,90	0,20	50,50	1,93	1,73	4,16	1,01	2,81
SEZ_23	737,90	0,15	50,51	1,83	1,68	4,30	1,06	2,77
SEZ_24	738,90	0,15	50,52	1,82	1,67	4,32	1,07	2,77
SEZ_25	826,24	-0,30	50,45	0,99	1,29	5,60	1,58	2,59

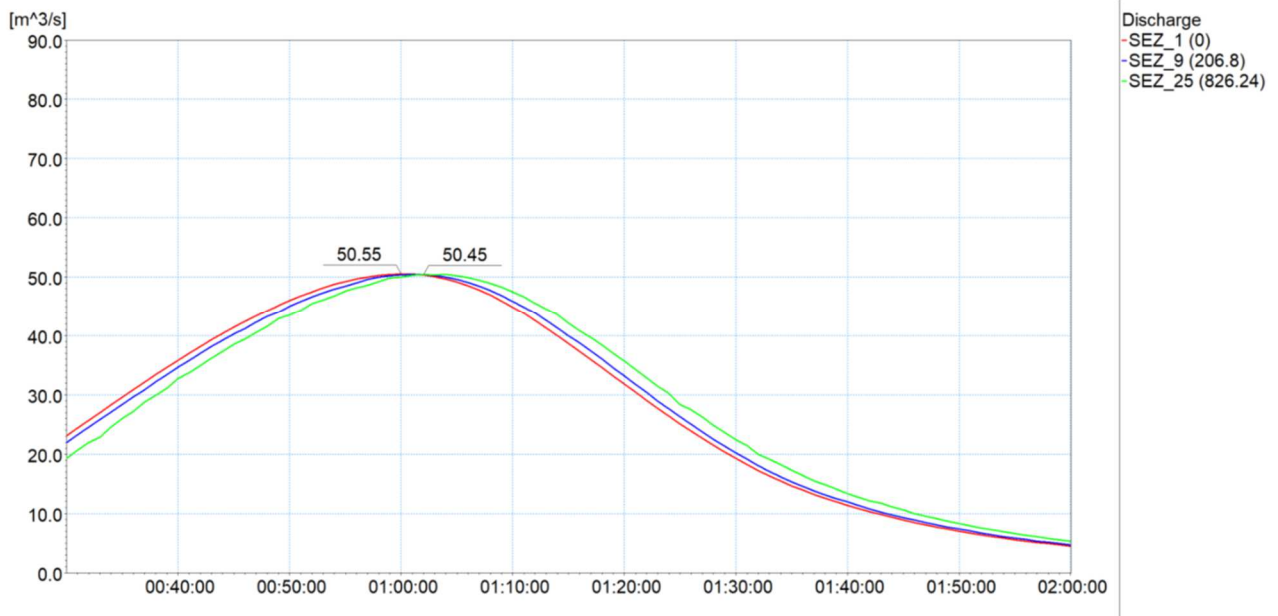
Tabella 4 – Risultati di sintesi per lo scenario TR50.

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

- Tutti gli attraversamenti tranne il CP-P2 mostrano un funzionamento in pressione. Presso CP-P2 il franco è comunque modesto, dell'ordine dei 30 cm.
- Esondazioni localizzate si riscontrano a monte dell'attraversamento di via Castellana (CP-P1) in corrispondenza della SEZ\_3.
- Un innalzamento dei livelli si verifica a monte della passerella pedonale di accesso al cimitero (CP-P3, SEZ\_11); tale innalzamento resta però contenuto al di sotto della quota della strada in sponda sinistra (via Caporacca) e le mura del cimitero in sponda destra, non provocando esondazioni.
- Un innalzamento significativo del livello idrico si verifica all'imbocco della tombinatura (CP-C1), provocandone il funzionamento in pressione. Anche in questo caso comunque i livelli non superano la quota delle sponde del corso d'acqua.

- Nella tombinatura a valle della sezione d'ingresso il deflusso della corrente durante l'evento di piena avviene invece in condizioni di moto a superficie libera, con franco prevalentemente dell'ordine del metro; in corrispondenza del salto di fondo presso la SEZ\_22 si riscontra invece un innalzamento (anche per effetto dei livelli di valle che rigurgitano parzialmente la soglia) che riduce il franco a una ventina di centimetri.

In Figura 5 sono rappresentati gli idrogrammi di portata in alcune sezioni significative del modello monodimensionale. Il confronto tra l'idrogramma di ingresso al modello (SEZ\_1) e quello nella sezione terminale in corrispondenza dello sbocco a mare (SEZ\_25) evidenzia la trascurabilità degli effetti di laminazione o comunque modificazione dell'onda nella propagazione lungo il tratto in studio, conseguente ai limitati effetti di rigurgito e esondazione.



**Figura 5 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale.**

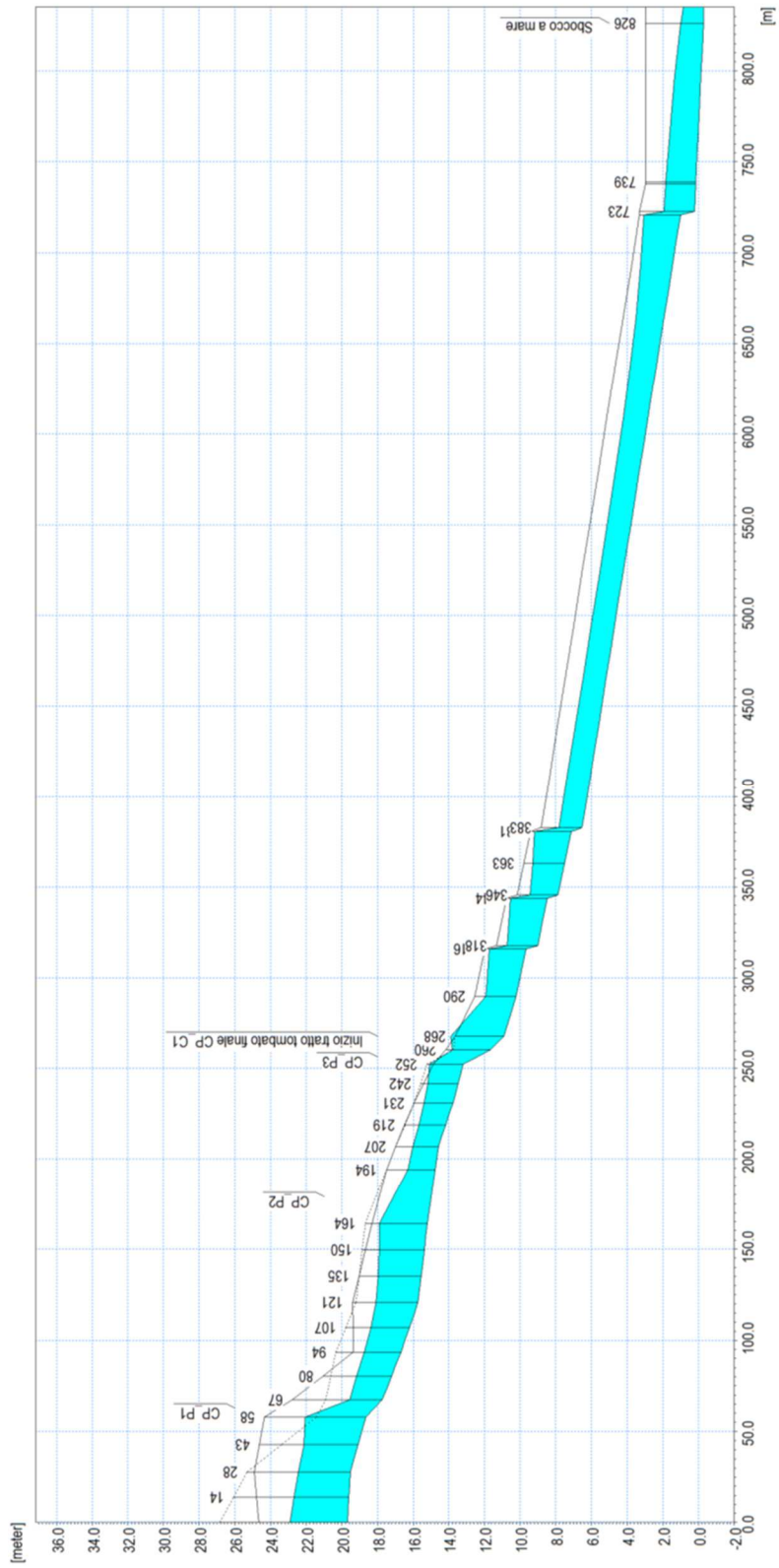


Figura 6 – Profilo longitudinale di corrente del Torrente Caporacca, scenario TR50.

In Figura 7 e Figura 8 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) rispettivamente 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.

In Figura 7 le sfumature di colorazione blu evidenziano le aree di esondazione con minori tiranti idrici, quelle rosse con i maggiori. In Figura 8 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.

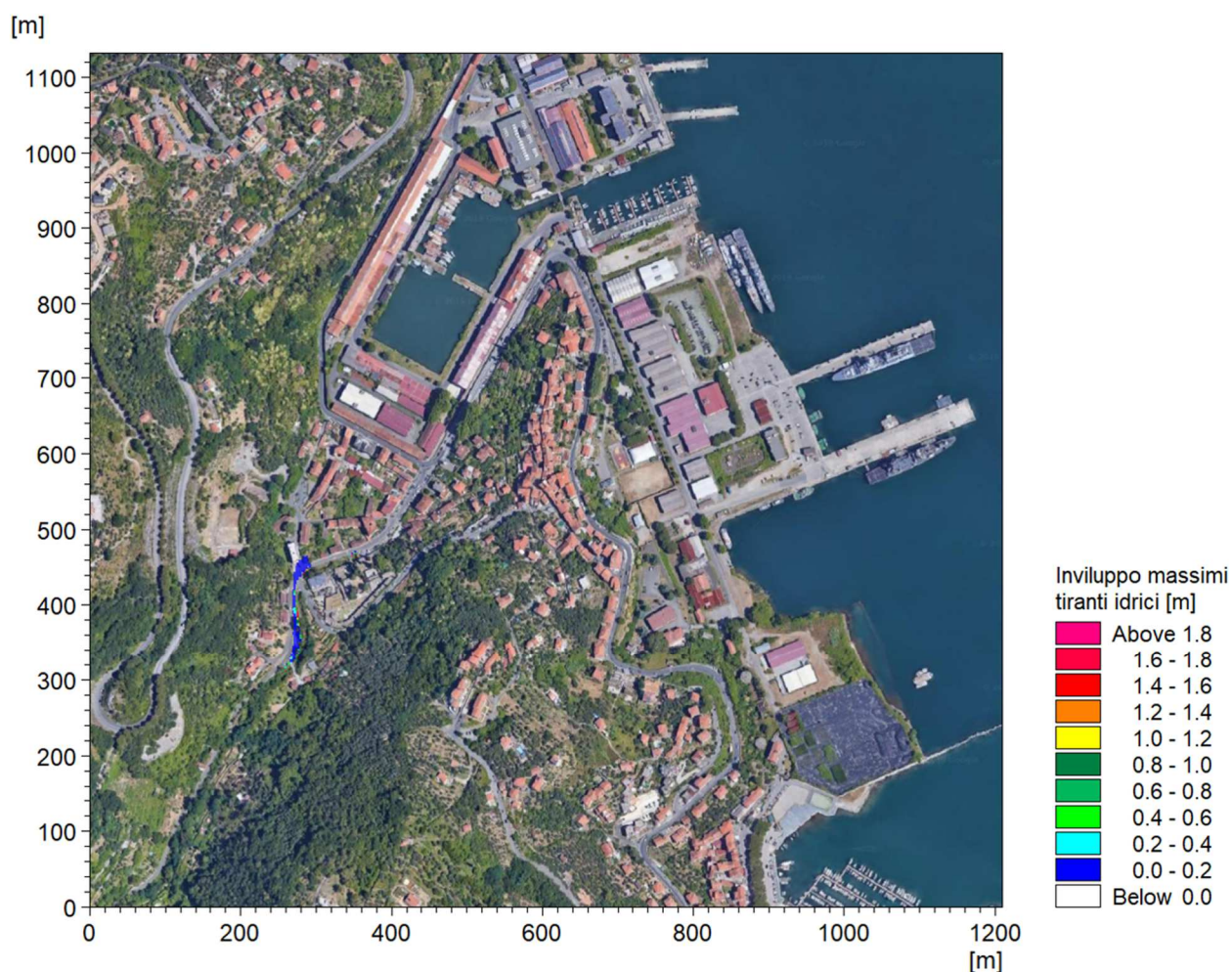


Figura 7 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna. TR=50 anni.



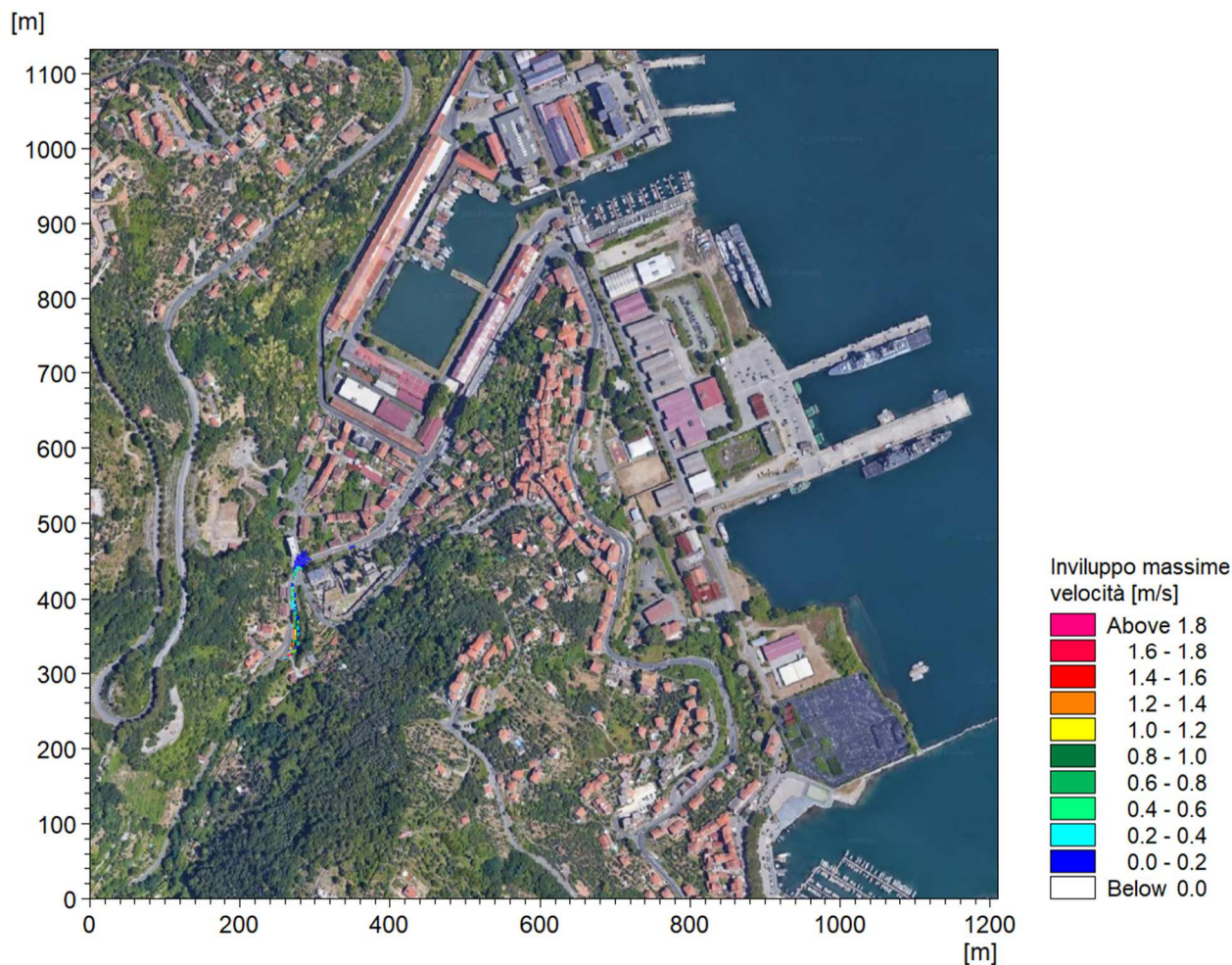


Figura 8 – Distribuzione involucro delle massime velocità di flusso. TR=50 anni.

Il passaggio dell'onda di piena cinquantennale provoca una modesta esondazione in corrispondenza dell'attraversamento di Via Castellana. La portata fuoriuscita si propaga lungo via Castellana e prosegue per ruscellamento superficiale fino all'incrocio con via Caporacca, dove si ha un parziale invaso e il rientro in alveo.

Le altezze idriche massime sono localizzate in prossimità del corso d'acqua, nel tratto vegetato che si trova tra la strada e la sponda sinistra, con valori anche dell'ordine di 1 m. Lungo la strada i valori delle altezze idriche massime sono inferiori ai 30 cm.

Le velocità massime sono generalmente inferiori a 0,5 m/s, con valori di picco di 1,8 m/s in corrispondenza dell'area di esondazione prossima al ponte di Via Castellana.

#### 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 Caporacca (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, intesi come involucro dei valori massimi. In Figura 9 è rappresentato graficamente il profilo di corrente del medesimo scenario.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
SEZ_1	0,00	19,68	61,49	23,12	3,44	4,28	1,11	24,05
SEZ_2	27,90	19,53	61,49	22,66	3,13	4,58	1,22	23,73
SEZ_3	58,00	18,64	59,22	22,34	3,70	1,89	0,39	22,52
SEZ_4	67,30	17,73	59,22	19,76	2,03	5,81	1,46	21,48
SEZ_5	93,50	16,68	60,93	18,95	2,27	4,56	1,33	20,01
SEZ_6	120,70	15,72	60,94	18,43	2,71	3,09	0,77	18,92
SEZ_7	164,20	15,20	61,42	18,29	3,09	2,48	0,49	18,60
SEZ_8	193,80	14,76	61,41	16,50	1,74	4,94	1,26	17,74
SEZ_9	206,80	14,59	61,47	16,23	1,64	5,38	1,43	17,71
SEZ_10	230,90	13,76	61,46	15,62	1,86	4,55	1,21	16,67
SEZ_11	252,40	13,19	61,21	15,34	2,15	2,76	0,60	15,73
SEZ_12	260,30	11,65	61,24	14,23	2,58	2,30	0,46	14,50
SEZ_13	267,60	10,90	61,44	14,30	3,40	1,81	0,31	14,47
SEZ_14	289,90	10,23	61,45	12,17	1,94	4,53	1,04	13,21
SEZ_15	315,70	9,67	61,45	11,98	2,31	3,82	0,80	12,72
SEZ_16	317,70	9,02	61,45	10,97	1,95	4,50	1,03	12,00
SEZ_17	343,70	8,47	61,45	10,78	2,31	3,82	0,80	11,52
SEZ_18	345,70	7,87	61,43	9,70	1,83	4,80	1,13	10,88
SEZ_19	380,70	7,12	61,40	9,43	2,31	3,81	0,80	10,17
SEZ_20	382,70	6,52	61,36	8,00	1,48	5,91	1,55	9,78
SEZ_21	720,90	1,00	61,71	3,29	2,29	3,84	0,81	4,04
SEZ_22	722,90	0,20	61,70	2,14	1,94	4,55	1,04	3,20
SEZ_23	737,90	0,15	61,62	2,02	1,87	4,71	1,10	3,15
SEZ_24	738,90	0,15	61,55	2,01	1,86	4,72	1,11	3,15
SEZ_25	826,24	-0,30	61,85	1,09	1,39	6,36	1,72	3,15

**Tabella 5 – Risultati di sintesi per lo scenario TR200.**

I risultati in termini di dinamiche di deflusso in alveo sono analoghi a quelli commentati per lo scenario TR50, a meno di un incremento delle altezze d'acqua conseguente alle maggiori portate.

In questo scenario il livello idrico a monte della passerella pedonale di accesso al cimitero raggiunge la quota stradale di Via Caporacca, provocando un'esonazione che si estende verso valle lungo la strada.

Relativamente alla tombinatura si conferma il funzionamento in pressione dell'imbocco (che comporta anche un effetto di rigurgito verso monte - passerella pedonale), mentre più a valle si riscontrano condizioni di moto a superficie libera con franchi dell'ordine degli 0,80 m. Nel tratto terminale in corrispondenza del salto di fondo il deflusso risulta nuovamente in pressione (comportando verosimilmente, nella realtà, l'innescò di moti in pressione, anche solo "a impulsi", ovvero con oscillazioni, nell'intero tratto tombato).

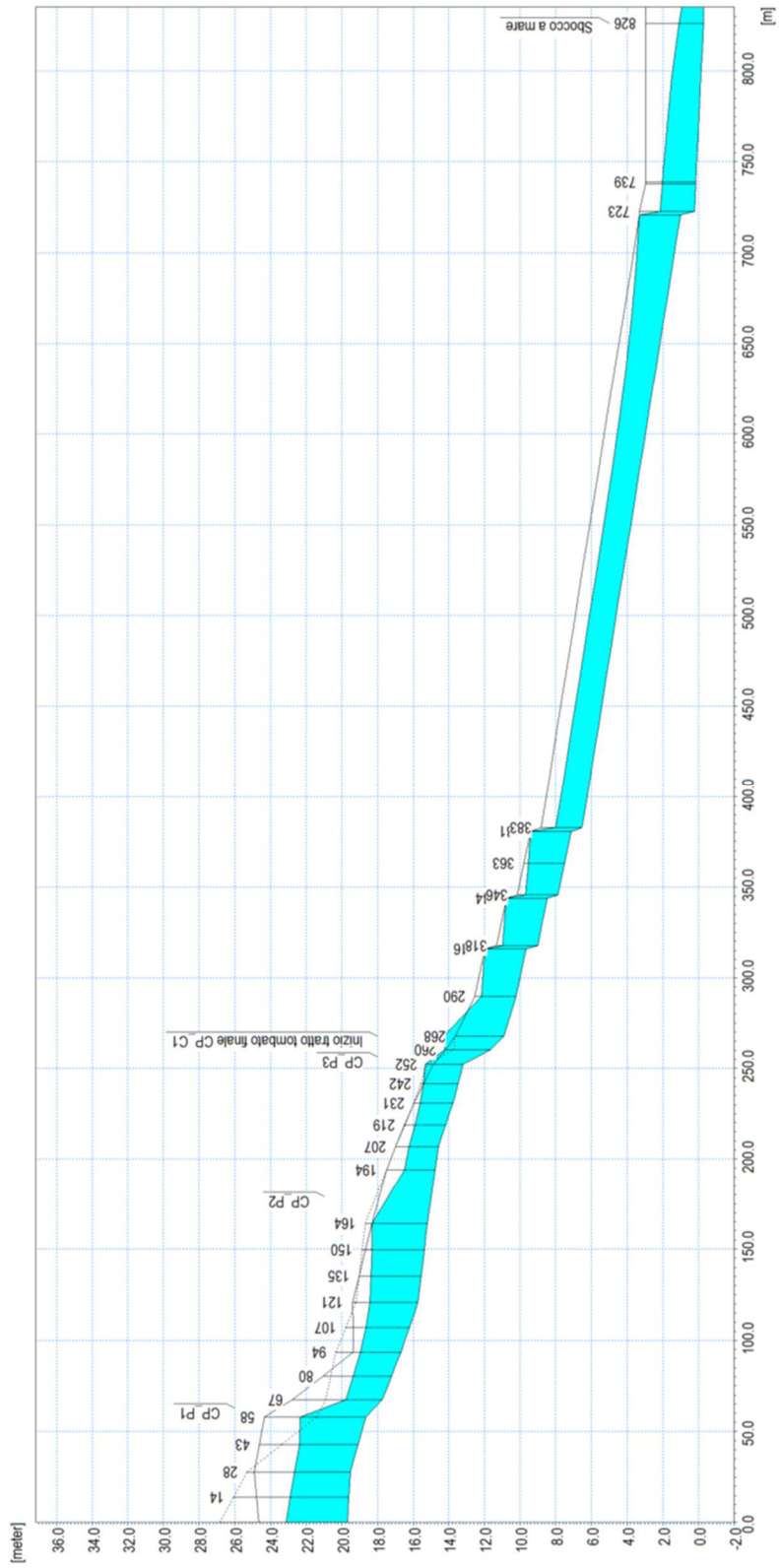
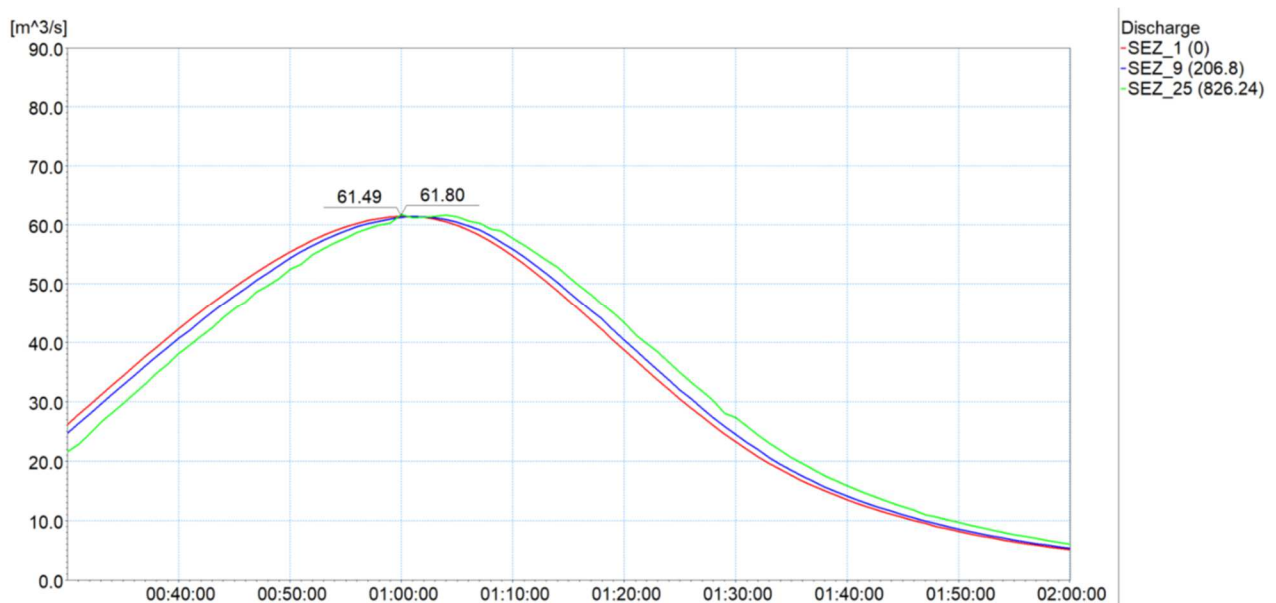


Figura 9 – Profilo longitudinale di corrente del Torrente Caporacca, scenario TR200.



In Figura 10 sono rappresentati gli idrogrammi di portata in alcune sezioni significative del modello monodimensionale. Il confronto tra l'idrogramma di ingresso al modello (SEZ\_1) e quello nella sezione terminale in corrispondenza dello sbocco a mare (SEZ\_25) evidenzia, anche in questo caso, la sostanziale propagazione senza modificazioni dell'onda di piena; i volumi di esondazione sono assai contenuti. Il valore di picco dell'idrogramma in uscita, lievemente superiore a quello di ingresso (61,8 m<sup>3</sup>/s contro 61,5 m<sup>3</sup>/s) è associato a piccole oscillazioni numeriche nell'idrogramma in uscita, oltre che all'effetto di concentrazione delle modeste portate fuoriuscite e poi rientrate in alveo .



**Figura 10 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale.**

In Figura 11 e Figura 12 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.

Nel tratto di monte, l'estensione superficiale dell'esondazione provocata dal passaggio dell'onda di piena duecentennale risulta pressoché equivalente a quella della simulazione precedente (TR50), pur con un lieve incremento dei valori di altezze d'acqua (qualche cm) e velocità.

Nel tratto a valle della passerella pedonale di accesso al cimitero, l'esondazione provoca l'allagamento di via Caporacca per un tratto di circa 50 m.

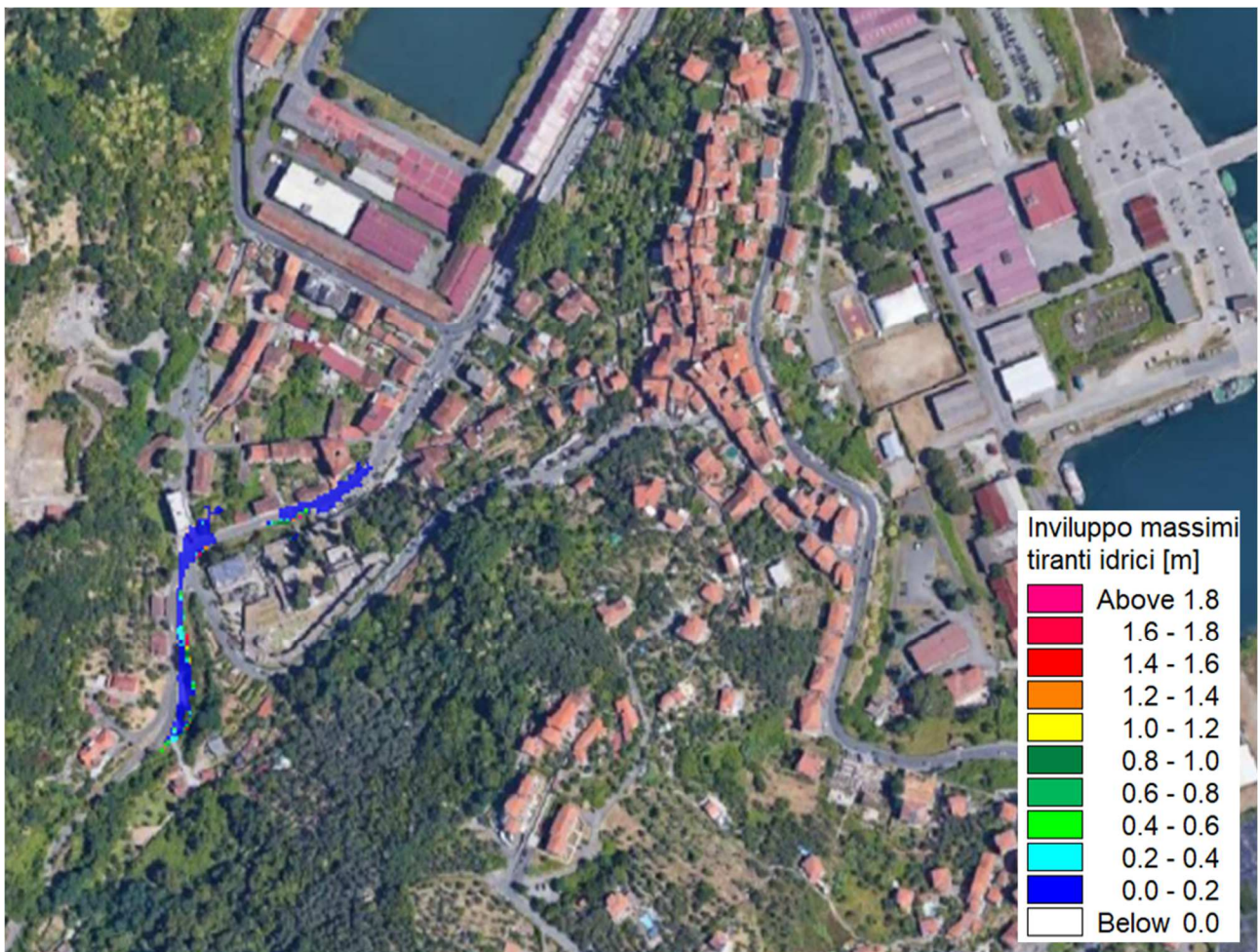


Figura 11 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna. TR=200 anni.

Anche in questo caso, escludendo le aree prossime al corso d'acqua, i valori delle altezze idriche massime lungo la strada sono inferiori ai 30 cm.

Le velocità massime sono generalmente inferiori a 0,5 m/s, con valori di picco di 2,8 m/s in corrispondenza dell'area di esondazione prossima al ponte di Via Castellana.





Figura 12 – 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 Caporacca (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 500 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 14 è rappresentato graficamente il profilo di corrente del medesimo scenario.

I risultati in termini di dinamiche di deflusso in alveo sono analoghi a quelli commentati per lo scenario TR200 con la differenza che l'incremento delle altezze d'acqua, conseguente alle maggiori portate, provoca un aumento delle portate e dei volumi di esondazione su via Caporacca.

In Figura 13 sono rappresentati gli idrogrammi di portata in alcune sezioni significative del modello monodimensionale. Il confronto tra l'idrogramma di ingresso al modello (SEZ\_1) e quello nella sezione terminale in corrispondenza dello sbocco a mare (SEZ\_25) evidenzia, anche in questo caso, la trascurabilità degli effetti di modificazione della forma dell'onda di piena.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
SEZ_1	0,00	19,68	68,69	23,25	3,57	4,39	1,11	24,23
SEZ_2	27,90	19,53	68,70	22,79	3,26	4,66	1,21	23,90
SEZ_3	58,00	18,64	66,72	22,50	3,86	2,00	0,41	22,70
SEZ_4	67,30	17,73	65,48	19,89	2,16	5,93	1,45	21,68
SEZ_5	93,50	16,68	67,67	19,10	2,42	4,47	1,24	20,12
SEZ_6	120,70	15,72	67,88	18,67	2,95	2,99	0,72	19,13
SEZ_7	164,20	15,20	68,39	18,55	3,35	2,50	0,49	18,87
SEZ_8	193,80	14,76	68,60	16,63	1,87	5,10	1,26	17,95
SEZ_9	206,80	14,59	68,63	16,36	1,77	5,52	1,41	17,91
SEZ_10	230,90	13,76	68,66	15,76	2,00	4,59	1,18	16,84
SEZ_11	252,40	13,19	68,00	15,52	2,33	2,84	0,59	15,93
SEZ_12	260,30	11,65	67,41	14,48	2,83	2,31	0,44	14,75
SEZ_13	267,60	10,90	67,51	14,55	3,65	1,85	0,31	14,72
SEZ_14	289,90	10,23	68,04	12,22	1,99	4,89	1,11	13,44
SEZ_15	315,70	9,67	68,04	11,99	2,32	4,23	0,89	12,90
SEZ_16	317,70	9,02	68,04	11,02	2,00	4,87	1,10	12,23
SEZ_17	343,70	8,47	68,05	10,79	2,32	4,23	0,89	11,70
SEZ_18	345,70	7,87	68,05	9,75	1,88	5,16	1,20	11,11
SEZ_19	380,70	7,12	68,06	9,44	2,32	4,23	0,89	10,35
SEZ_20	382,70	6,52	68,06	8,11	1,59	6,10	1,54	10,01
SEZ_21	720,90	1,00	68,08	3,32	2,32	4,23	0,89	4,23
SEZ_22	722,90	0,20	68,08	2,24	2,04	4,76	1,06	3,39
SEZ_23	737,90	0,15	68,09	2,12	1,97	4,93	1,12	3,36
SEZ_24	738,90	0,15	68,09	2,11	1,96	4,95	1,13	3,36
SEZ_25	826,24	-0,30	68,11	1,20	1,50	6,49	1,69	3,34

Tabella 6 – Risultati di sintesi della simulazione TR500.

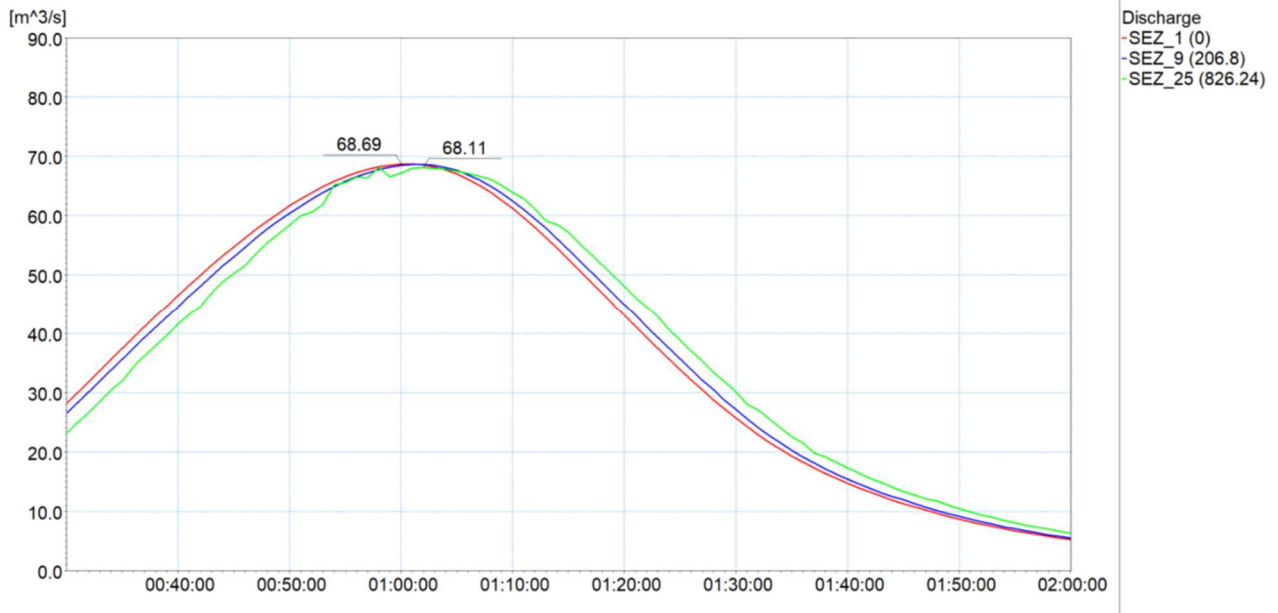


Figura 13 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale.

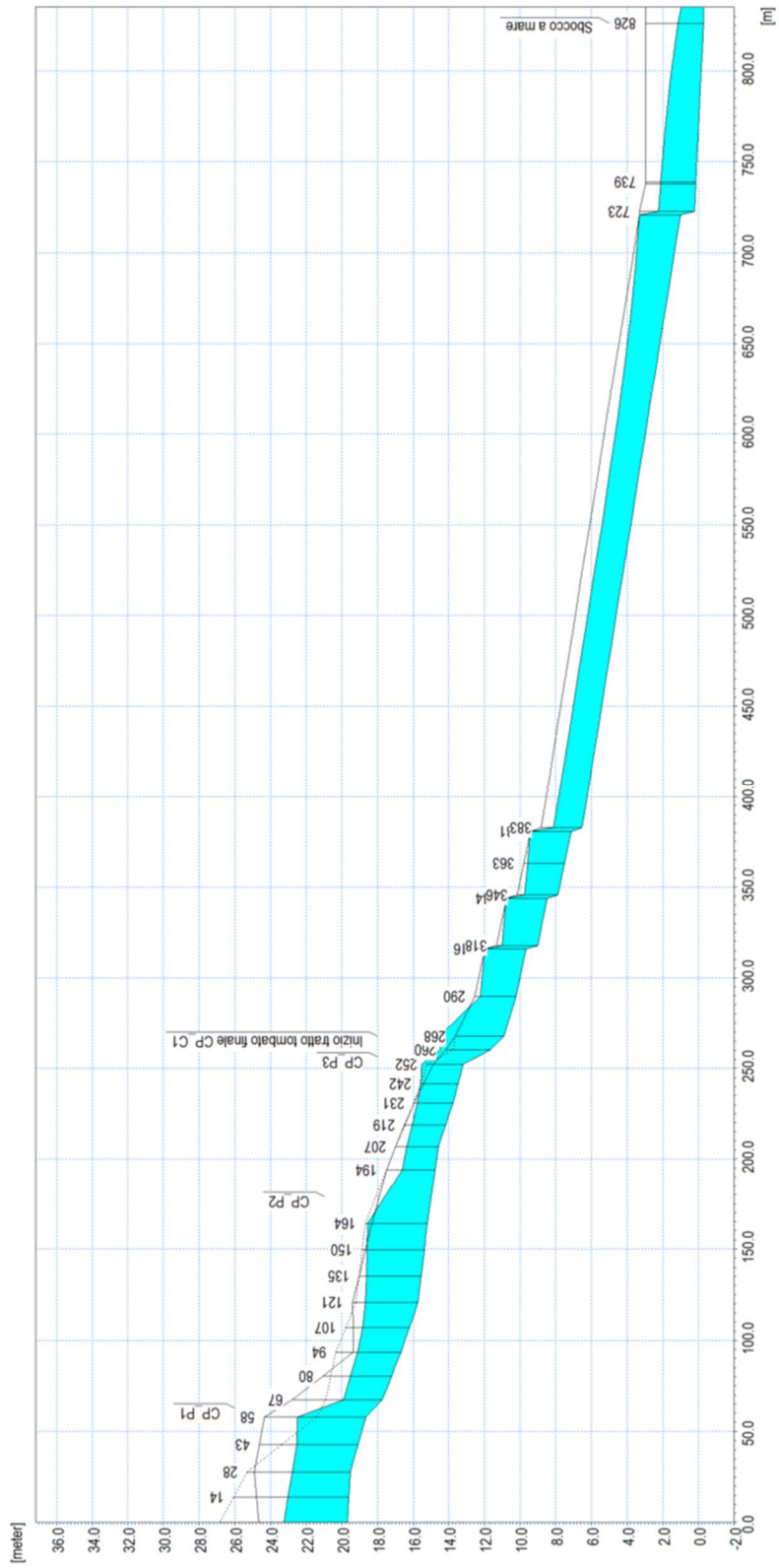


Figura 14 – Profilo longitudinale di corrente del Torrente Caporacca, scenario TR500.



In Figura 15 e Figura 16 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.

Si riscontra come la maggior portata esondata su via Caporacca nel tratto a monte della passerella di accesso al cimitero si propaghi a valle anche lungo via Fieschi, interessando l'intero tratto fino alla Porta Marola dell'Arsenale, dove i volumi residui si invasano nello spiazzo antistante.

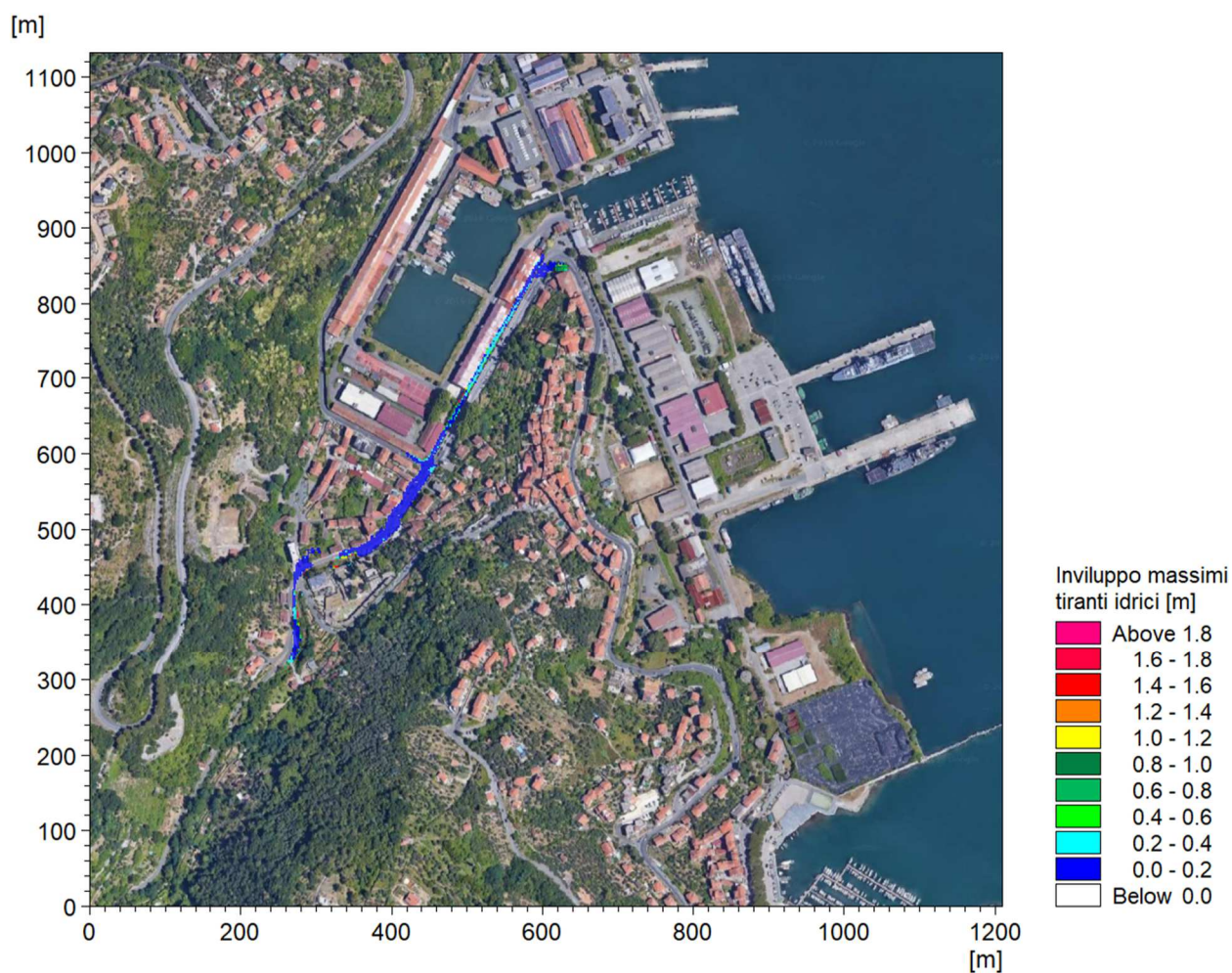


Figura 15 – Distribuzione inviluppo dei massimi tiranti idrici rispetto al piano campagna. TR=500 anni.

Anche in questo caso, escludendo le aree prossime al corso d'acqua, i valori delle altezze idriche massime lungo la strada sono inferiori ai 30 cm.

Le velocità massime lungo via Caporacca sono dell'ordine di 1,0-1,2 m/s, con valori di picco di 3 m/s in corrispondenza dell'area di esondazione prossima al ponte di Via Castellana. Lungo via Fieschi i volumi idrici residui sono modesti, e anche le velocità sono limitate a valori inferiori a 0,4 m/s.

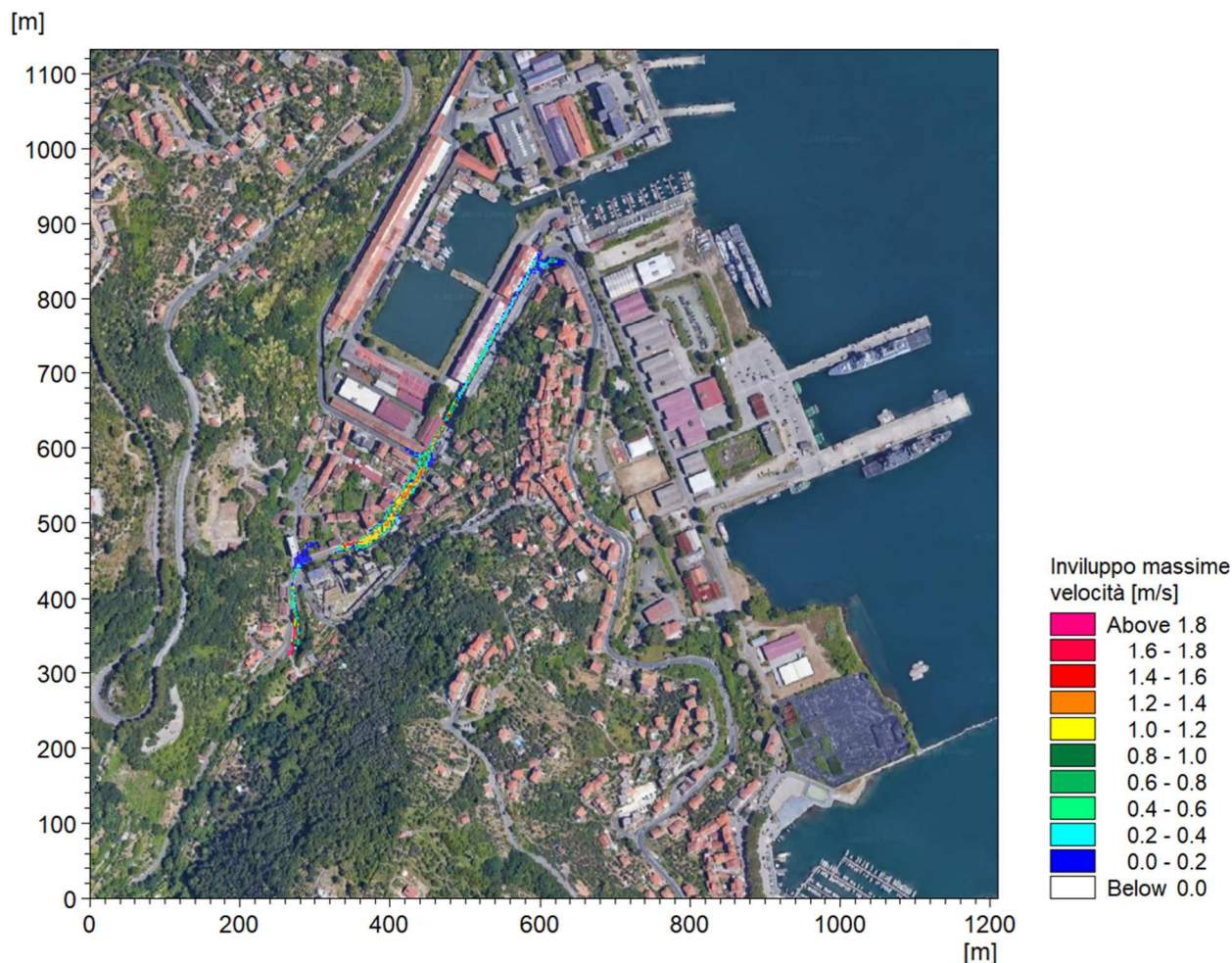


Figura 16 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità. TR=500 anni.

#### 5.1.4 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti

In Tabella 8 sono sintetizzati 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; nel caso delle tombinate identificano la differenza tra le altezze del cielo del tombino e le altezze piezometriche del tratto.

I franchi idraulici di sicurezza non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno dei modelli numerici; per queste si è fatto riferimento alla sezione posta immediatamente a monte.

Il vigente Piano di Bacino definisce le caratteristiche idrauliche che le opere di ritenuta e gli attraversamenti puntuali o i tratti tombinati devono possedere per poter essere considerati adeguati al deflusso della piena di riferimento a tempo di ritorno 200 anni; in particolare sono definiti i franchi idraulici di sicurezza che devono essere rispettati in funzione della dimensione del bacino del corso d'acqua interferito (Tabella 7).

Le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC2018), applicabili però ai ponti di nuova costruzione, definiscono inoltre vincoli sui franchi idraulici maggiormente stringenti (1,5 m rispetto all'evento di piena duecentennale); in questo caso gli attraversamenti e la tombinatura terminale non rientrerebbero nelle disposizioni specifiche per i "tombini" ai sensi di quanto indicato dalla Circolare esplicativa del C.S.LL.PP. n.7/2019, in ragione della portata massima superiore a 50 m<sup>3</sup>/s.

Il torrente Caporacca presenta un bacino sotteso di estensione maggiore di 1 km<sup>2</sup> (circa 2,95 km<sup>2</sup>) e quindi, secondo il PdB, ricade nell'ambito del reticolo principale. Inoltre può essere considerato un bacino poco dissestato, con previsione di modesto trasporto solido in caso di piena, per il quale va applicato il valore minimo tra quelli indicati in Tabella 7.

Franco idraulico: valore maggiore tra (a) e (b)			
		Reticolo principale e secondario	Reticolo minore
<b>(a)</b>		$U^2/2g$	$0,5 U^2/2g$
<b>(b)</b>	I) argini e difese spondali	cm. 50/100	cm 50
	II) ponti e strutture di attraversamento fino a estensioni longitudinali di m. 12	cm. 100/150	cm 75
	III) coperture o tombinature (ove ammesse), ponti e strutture di attraversamento di estensione oltre m. 12	cm. 150/200	cm 100

Tabella 7 – Franchi idraulici di sicurezza che devono essere rispettati in funzione della dimensione del bacino del corso d'acqua interferito (Piano di Bacino Stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico – Ambito 20 – Golfo della Spezia).

Tutti gli attraversamenti riportati in Tabella 8 (eccetto la struttura CP\_P2) presentano un funzionamento in pressione già per la piena con tempo di ritorno 50 anni e risultano pertanto idraulicamente inadeguati. Per l'evento con tempo di ritorno 200 anni anche il ponte CP\_P2 mostra un funzionamento in pressione.

ID Sezione	ID Struttura	TR50	TR200	TR500
		FR_INTR [m]	FR_INTR [m]	FR_INTR [m]
SEZ_3	CP_P1	-0,43	-0,70	-0,86
SEZ_7	CP_P2	0,32	-0,09	-0,35
SEZ_11	CP_P3	-0,27	-0,55	-0,73
SEZ_13	CP_C4	-0,68	-1,10	-1,35

Tabella 8 – Franco disponibile dalla quota del pelo libero simulato (per gli scenari TR50, TR200 e TR500) alla quota di intradosso degli attraversamenti e delle tombinature del torrente Caporacca.



## 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 tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni dei corsi d'acqua esaminati.

In relazione ai risultati ottenuti è stata effettuata una proposta di nuova perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica.

La pianificazione vigente per il torrente Caporacca (v. Figura 1) non definisce aree di pericolosità, bensì fornisce delle indicazioni puntuali di criticità relative agli attraversamenti e tombinature presenti, ove essi da una verifica in moto uniforme non mostrino adeguata capacità di smaltimento delle portate al colmo di piena per tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni. Tali indicazioni risultano meno cautelative rispetto ai risultati ottenuti dalla presente analisi.

In particolare, nel vigente Piano di Bacino la passerella pedonale d'accesso al cimitero e l'imbocco della tombinatura a valle sono indicati come sufficienti per tutte le portate considerate, mentre nel presente studio risultano inadeguati già per la piena con tempo di ritorno di 50 anni.

Si osserva come le dimensioni geometriche in termini di larghezza e luce massima degli attraversamenti considerate nel PdB siano superiori rispetto a quelle riscontrate in sito nell'ambito del presente studio (vedi elaborato 3636-02-00100). In dettaglio, nello studio idraulico a supporto del PdB la sezione della passerella pedonale è stata definita considerando il fondo alveo a valle briglia, con maggiorazione della luce effettiva (3,2 m anziché 1,6 m del presente studio). Inoltre nel PdB la tombinatura a valle del cimitero presenta una larghezza di 7,4 m e una luce massima di 3,0 m, mentre nel presente studio la sezione ha dimensioni  $b \times h = 7,0 \times 2,3$  m ( $7,0 \times 2,8$  m nel tratto terminale, a valle del salto di fondo).



Figura 17 – Ponte di Via Castellana (CP\_P1) (sx); vista della passerella CP\_P3 di accesso al cimitero da valle con vista su Via Caporacca (dx).

Le dinamiche di esondazione negli scenari indagati sono sostanzialmente identiche, con sormonto delle sponde in corrispondenza del ponte di via Castellana (Figura 17) per tutti e tre gli scenari di piena considerati. L'esondazione in via Caporacca, in corrispondenza della passerella d'accesso al cimitero (Figura 17), si

verifica per una portata con tempo di ritorno di 200 anni. La portata fuoriuscita si propaga lungo via Castellana e via Caporacca con una estensione verso valle che aumenta all'aumentare delle portate degli idrogrammi di piena associati ai tre differenti tempi di ritorno.

Le fasce A, B e C (corrispondenti all'estensione in involuppo delle aree allagate nei tre scenari simulati) risultano sovrapponibili nel tratto di monte (Figura 18).

La fascia A (condizioni di pericolosità elevata) nella nuova perimetrazione proposta si estende lungo via Castellana fino all'incrocio con via Caporacca. Le fascia B (pericolosità moderata) prosegue ulteriormente verso valle fino all'imbocco della tombinatura, mentre la fascia C (pericolosità bassa) si estende lungo via Caporacca e via Fieschi, costeggiando l'area della marina militare.

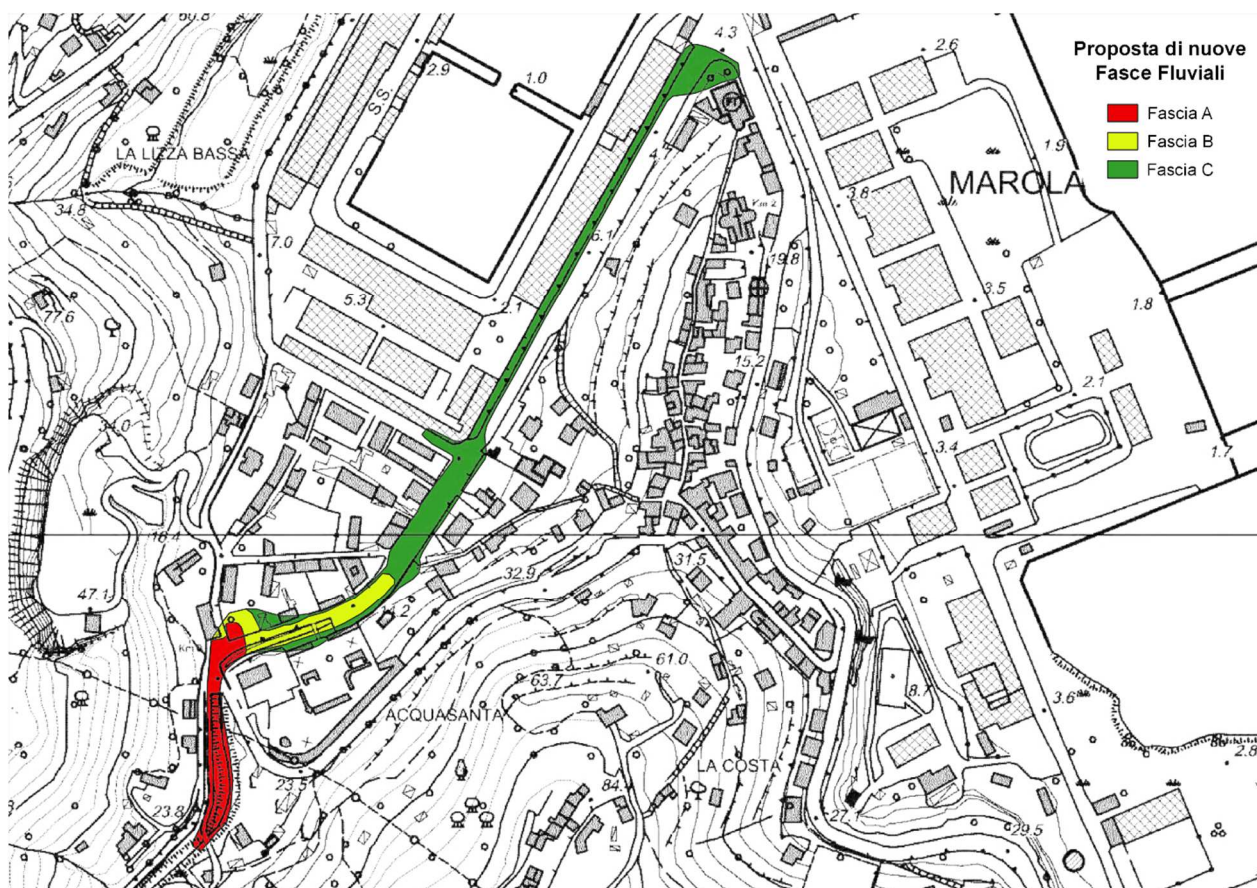


Figura 18 – Estensione delle fasce A, B e C proposte per il Torrente Caporacca.

Tutti gli attraversamenti del tratto di torrente Caporacca studiato presentano dei franchi di sicurezza nettamente inferiori a 1,0 m rispetto ai livelli massimi dell'evento di piena duecentennale (cfr. capitolo 5.1.4), risultando quindi idraulicamente inadeguati ai sensi del vigente Piano di Bacino (oltre che delle NTC2018).

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 19.

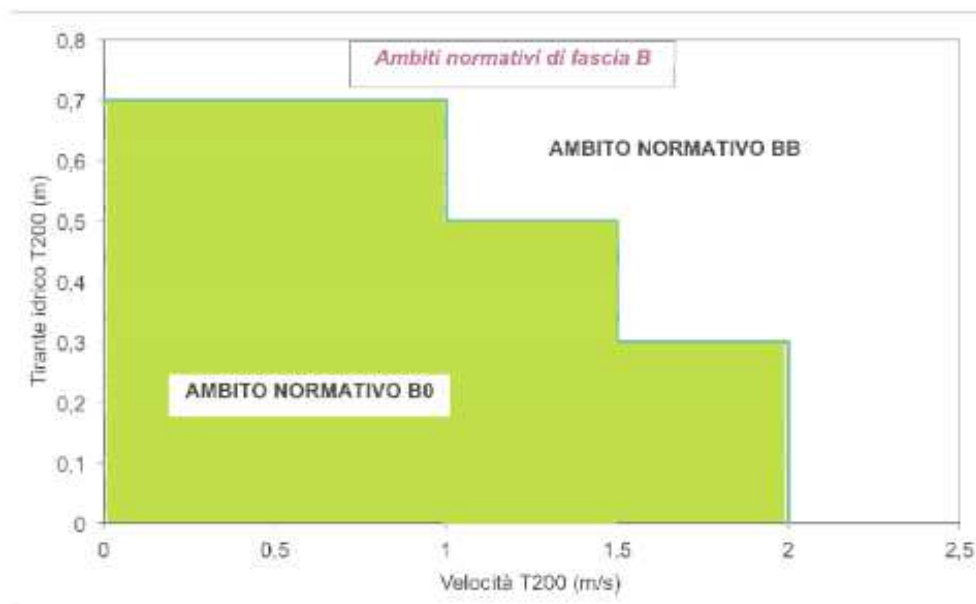


Figura 19 – Definizione delle fasce fluviali BB e B0 ai sensi della DGR 91/2013.

Gli ambiti “B0” e “BB” per il tratto di studio del torrente Caporacca sono rappresentati in Figura 20; le aree perimetrate in fascia B risultano prevalentemente associabili a un ambito B0.





Figura 20 – Definizione delle aree B0 e BB all'interno della fascia B per il torrente Caporacca.

**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 (m<sup>2</sup>);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup>s<sup>-1</sup>);

g = accelerazione di gravità (m s<sup>-2</sup>);

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

Q = portata (m<sup>3</sup>/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta (m<sup>2</sup>/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:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

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;

$\rho_w$	= 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  $\tau$  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,  $\Delta$  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**



