



**Finanziato
dall'Unione europea**
NextGenerationEU

Presidenza del Consiglio dei Ministri
IL COMMISSARIO STRAORDINARIO ALLA RICOSTRUZIONE
NEI TERRITORI DELLE REGIONI EMILIA-ROMAGNA, TOSCANA E MARCHE



COMUNE DI FANO

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
COMMISSARIO STRAORDINARIO ALLA RICOSTRUZIONE NEL TERRITORIO DELLE REGIONI
EMILIA-ROMAGNA, TOSCANA E MARCHE - ORDINANZA N.35/2024

PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA
MISURE PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONE E PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO
IDROGEOLOGICA - M2C4 INVESTIMENTO 2.1A

MA-UBIS-000017 - SDOPPIAMENTO DELLA RETE FOGNARIA MEDIANTE LA REALIZZAZIONE DI UN
IMPIANTO DI FOGNATURE ACQUE METEORICHE DEDICATO CHE RISOLVA ANCHE IL PROBLEMA
DELL'ATTRAVERSAMENTO DELLA SEDE FERROVIARIA E DELLA STRADA NAZIONALE ADRIATICA SUD
E REALIZZAZIONE DI UN CANALE DI GRONDA PER INTERCETTARE LE ACQUE DA MONTE - LOCALITÀ
PONTESASSO

CUI L00127440410202200040 - CUP E32E22000560006

FASE PROGETTUALE
PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO - ECONOMICA

OGGETTO
**RELAZIONE IDROLOGICA -
IDRAULICA**

ELABORATO
D2.1

PROGETTISTA:

**I&A IDRAULICA
AMBIENTE**
Società di ingegneria

SOCIETÀ DI INGEGNERIA - VIA B. BEDOSTI, 21 - 61122 PESARO
TEL. E FAX. +39 0721 453542 - E-mail ingegneria@idraulicaambiente.it

Ing. Giacomo Furlani



COMMITTENTE:

COMUNE DI FANO
Via San Francesco d'Assisi, 76 - 31032, FANO

Responsabile Unico del Progetto (RUP):
Arch. Adriano Giangolini

DATA:

MAGGIO 2025

REV.	DATA	OGGETTO	RED.	CONT.	APP.
00	08/05/2025	Emissione	AO	EP	GF
01	30/05/2025	Revisione	AO	EP	GF
02	20/06/2025	Revisione	AO	EP	GF

INDICE

1 PREMESSA.....	5
2 CRITICITA' DELLO STATO DI FATTO	11
3 ANALISI IDROLOGICA.....	17
3.1 ANALISI GEOMORFOLOGICHE	18
3.2 USO DEL SUOLO	21
3.3 BACINO A MONTE DELL'ATTRAVERSAMENTO AUTOSTRADE.....	22
3.4 BACINO ALLA FOCE DEL RIO CRINACCIO.....	23
3.5 PIOGGE.....	23
3.5.1 CURVA DI POSSIBILITÀ CLIMATICA	23
3.6 PORTATE DI PIOGGIA.....	25
3.6.1 ANALISI RAZIONALE.....	26
3.6.2 METODO DI GIANDOTTI – GIAMBETTI	28
3.6.3 METODO SCS.....	30
3.6.4 STIMA DEGLI IDROGRAMMI DI PIENA MEDIANTE MIKE PLUS MODULO RR (Rainfall-Runoff).....	34
4 ANALISI IDRAULICA STATO DI PROGETTO.....	42
4.1.1 VERIFICA IDRAULICHE	44
4.1.2 EFFETTI DELLE OPERE DI PROGETTO	49
5 LE CARATTERISTICHE DIMENSIONALI DEI MASSI CICLOPICI DI PROTEZIONE	73

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 – AREA DI INTERVENTO (IN ROSSO)	5
FIGURA 2 - TAVOLA DI ASSIEME DELLE ALTERNATIVE DI PROGETTO ANALIZZATE NEL DOCFAP	8
FIGURA 3 - STRALCIO TAVOLA RI 13 A PAI – CARTA DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO.....	10
FIGURA 4 - ATTRAVERSAMENTO DELLA STRADA COMUNALE A MONTE DELL'AUTOSTRADA	12
FIGURA 5 - ATTRAVERSAMENTO DELL'AUTOSTRADA, SEZIONE DI MONTE E DI VALLE.....	12
FIGURA 6 - ATTRAVERSAMENTO DI STRADA DI MEZZO A VALLE DELL'AUTOSTRADA.....	13
FIGURA 7 - IL RIO CRINACCIO NEL TRATTO TRA L'AUTOSTRADA E LA STRADA STATALE ADRIATICA.....	13
FIGURA 8 - FOTO DEL RIO CRINACCIO NELLA ZONA DEL DEPURATORE DI PONTE SASSO, VISTA DA MONTE E DA VALLE... 	14
FIGURA 9 - SEZIONE DI ATTRAVERSAMENTO DELLA STRADA STATALE 16 ADRIATICA	14
FIGURA 10 – VISTA DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO SUL RIO CRINACCIO.....	15
FIGURA 11 - MODELLO DIGITALE DEL TERRENO DEL RIO CRINACCIO.....	18
FIGURA 12 - MAPPA DELL'ACCLIVITÀ DEL RIO CRINACCIO	19

FIGURA 13 - ESTRATTO DELLA CARTA GEOLITOLOGICA D'ITALIA, 1:500'000	19
FIGURA 14 - MAPPA DEL RETICOLO IDROGRAFICO ED INDIVIDUAZIONE DEI BACINI DEL RIO CRINACCIO A MONTE E VALLE DELL'AUTOSTRADA	20
FIGURA 15 - ESTRATTO DELLA MAPPA DELL'USO DEL SUOLO (LIVELLO 3, CORINE LAND COVER, ISPRA) DEL RIO CRINACCIO.....	21
FIGURA 16 - PLUVIOMETRO DI FANO - CURVE DI POSSIBILITÀ CLIMATICA	25
FIGURA 17 - PLUVIOMETRO DI SENIGALLIA - CURVE DI POSSIBILITÀ CLIMATICA	25
FIGURA 18 - MAPPA DEL CN (III) RELATIVA AL BACINO DI STUDIO.....	33
FIGURA 19 - IDROGRAMMA TR50 IN INGRESSO AL CANALE DI MONTE.....	38
FIGURA 20 - IDROGRAMMA TR50 IN INGRESSO AL RIO CRINACCIO.	38
FIGURA 21 - IDROGRAMMA TR50 IN INGRESSO AL CANALE DI VALLE.....	39
FIGURA 22 - IDROGRAMMA TR200 IN INGRESSO AL CANALE DI MONTE.....	39
FIGURA 23 - IDROGRAMMA TR200 IN INGRESSO AL RIO CRINACCIO	40
FIGURA 24 - IDROGRAMMA TR200 IN INGRESSO AL CANALE DI VALLE.....	40
FIGURA 25 - IDROGRAMMA TR50 IN INGRESSO AL CANALE DI MONTE CALCOLATO CON IL Tc DI KIRPICH.....	41
FIGURA 26 - PUNTI DI IMMISSIONE DEGLI IDROGRAMMI UTILIZZATI NELLE SIMULAZIONI.....	41
FIGURA 27 - TRACCIATO CANALE DI GRONDA E AREA CASSA DI ESPANSIONE.....	42
FIGURA 28 - POSIZIONE DEI TOMBINI (TONDINI AZZURRI).....	47
FIGURA 29 - POSIZIONE SEZIONI (LINEE NERE)	48
FIGURA 30 – DISTRIBUZIONE PUNTI H E Q.....	49
FIGURA 31 - IDROGRAMMA TR50 RIO CRINACCIO SEZIONE POSTA A VALLE DELLA CONFLUENZA CON IL CANALE DI MONTE	52
FIGURA 32 - IDROGRAMMA TR50 RIO CRINACCIO SEZIONE POSTA A VALLE DEL TOMBINO DI CONTROLLO.....	54
FIGURA 33 - IDROGRAMMA TR50 CANALE DI VALLE SEZIONE POSTA IN TESTA AL CANALE	54
FIGURA 34 - IDROGRAMMA TR50 CANALE DI VALLE SEZIONE POSTA ALL'INTERNO DELLA CASSA DI ESPANSIONE	55
FIGURA 35 - IDROGRAMMA TR50 CANALE DI VALLE SEZIONE POSTA A VALLE DEL TOMBINO DI CONTROLLO	55
FIGURA 36 - IDROGRAMMA TR200 RIO CRINACCIO SEZIONE POSTA A VALLE DELLA CONFLUENZA CON IL CANALE DI	56
FIGURA 37 - IDROGRAMMA TR200 RIO CRINACCIO SEZIONE POSTA A VALLE DEL TOMBINO DI CONTROLLO	56
FIGURA 38 - IDROGRAMMA TR200 CANALE DI VALLE SEZIONE POSTA IN TESTA AL CANALE	57
FIGURA 39 - IDROGRAMMA TR200 CANALE DI VALLE SEZIONE POSTA ALL'INTERNO DELLA CASSA DI ESPANSIONE	57
FIGURA 40 - IDROGRAMMA TR200 CANALE DI VALLE SEZIONE POSTA A VALLE DEL TOMBINO DI CONTROLLO DELLA CASSA DI ESPANSIONE	58
FIGURA 41 - FUNZIONAMENTO SCHEMATICO DI UNA CASSA DI ESPANSIONE.....	59
FIGURA 42 - ANDAMENTO DEI MASSIMI LIVELLI DI PIENA IDROGRAMMA CON TR = 50 ANNI (LINEA ROSSA) TRATTO CANALE DI MONTE	60
FIGURA 43 - ANDAMENTO DEI MASSIMI LIVELLI DI PIENA IDROGRAMMA CON TR = 50 ANNI (LINEA ROSSA) TRATTO CANALE DI VALLE.....	61
FIGURA 44 - ANDAMENTO DEI MASSIMI LIVELLI DI PIENA IDROGRAMMA CON TR = 50 ANNI (LINEA ROSSA) TRATTO RIO CRINACCIO.....	62

FIGURA 45 - ANDAMENTO DEI MASSIMI LIVELLI DI PIENA IDROGRAMMA CON TR = 200 ANNI (LINEA ROSSA) TRATTO CANALE DI MONTE	63
FIGURA 46 - ANDAMENTO DEI MASSIMI LIVELLI DI PIENA IDROGRAMMA CON TR = 200 ANNI (LINEA ROSSA) TRATTO CANALE DI VALLE	64
FIGURA 47 - ANDAMENTO DEI MASSIMI LIVELLI DI PIENA IDROGRAMMA CON TR = 200 ANNI (LINEA ROSSA) TRATTO RIO CRINACCIO.....	65

1 PREMESSA

Il progetto oggetto di analisi riguarda lo “SDOPPIAMENTO DELLA RETE FOGNARIA MEDIANTE LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO DI FOGNATURE ACQUE METEORICHE DEDICATO CHE RISOLVA ANCHE IL PROBLEMA DELL'ATTRAVERSAMENTO DELLA SEDE FERROVIARIA E DELLA STRADA NAZIONALE ADRIATICA SUD E REALIZZAZIONE DI UN CANALE DI GRONDA PER INTERCETTARE LE ACQUE DA MONTE – LOCALITA' PONTE SASSO”. L'area interessata dal progetto è situata a sud di Fano, in Provincia di Pesaro – Urbino, nell'abitato di Ponte Sasso sulla costa adriatica, nella seguente Figura 1 è riportata l'ubicazione dell'intervento.

Figura 1 – Area di intervento (in rosso)



L'intervento si inquadra nell'ambito dello “Studio idraulico del tratto terminale del Rio Crinaccio e contributi progettuali preliminari per la mitigazione del rischio” già redatto da Idraulica & Ambiente Srl su incarico del Comune di Fano nel dicembre 2014 con Report Finale a completamento dello studio, consegnato nel febbraio 2015. Tale studio si poneva l'obiettivo di analizzare il comportamento idraulico del Rio Crinaccio in riferimento ai fatti alluvionali accaduti nel corso del 2014 e di individuare un piano d'interventi infrastrutturali per la mitigazione del rischio a cui il territorio in questione è esposto. Dallo studio era emerso che, causa una scarsa officiosità idraulica anche nei confronti di piene e morbide ordinarie, i problemi principali riguardavano in particolare la parte terminale del corso d'acqua ove sono presenti numerose infrastrutture strategiche pubbliche, private abitazioni, residence, alberghi, stabilimenti balneari e attività economiche. Anche recentemente, nel novembre

2021, l'intero centro abitato di Ponte Sasso, è stato interessato da un notevole fenomeno alluvionale che ha determinato diffuse criticità sull'intero territorio del centro abitato della cittadina fanese. Tale evento, a differenza dei precedenti che invece avevano interessato principalmente le aree adiacenti al Rio Crinaccio, ha colpito ampie porzioni del tessuto urbano ed in particolare la parte sud del territorio comunale al confine con Marotta. Successivamente è stato sviluppato il progetto preliminare relativo all'"INTERVENTO DI MITIGAZIONE IDRAULICA CENTRO ABITATO DI PONTE SASSO" redatto dallo studio Idraulica & Ambiente Srl su incarico del Comune di Fano nel febbraio 2023. Tale PFTE ha analizzato ulteriori possibili soluzioni atte a mitigare ulteriormente i livelli di rischio a cui attualmente è esposta la cittadinanza e le infrastrutture pubbliche e private ubicate in prossimità del corso d'acqua stesso, seguendo le seguenti linee d'intervento:

- Il miglioramento delle sezioni di deflusso del Rio Crinaccio;
- La laminazione delle portate di deflusso;
- Il potenziamento del sistema di fognatura a servizio del centro abitato.

All'interno del quadro generale dell'intervento sopradescritto, un punto di particolare criticità riguarda il Rio Crinaccio, uno dei punti più critici dalla strada nazionale SS.n°16 a valle era l'attraversamento di via Ammiraglio Cappellini costituito da un manufatto in cemento armato risalente agli anni '60 o '70 con dimensioni della sezione utile pari a 3,00 m di base per 1,00 di altezza (per tutta la larghezza della strada pari a 10,50 m) e quindi per complessivi 3,00 mq di sezione di deflusso. Per questo il Comune di Fano ha ritenuto opportuno attuare un intervento di somma urgenza di cui all'art.176 del DPR 207/2010 (verbale di somma urgenza sottoscritto prot. n°0008967 del 09/02/2015) realizzando l'ampliamento del tombino suddetto portandone la sezione ad oltre 10 mq. Su questo intervento l'Amministrazione aveva provveduto ad acquisire, tra le altre, l'Autorizzazione Idraulica n. 2217 dopo che in data 16/02/2015 si era tenuta la Conferenza di Servizi istruttoria della pratica e del citato "Studio idraulico del tratto terminale del Rio Crinaccio e contributi progettuali preliminari per la mitigazione del rischio". A tale primo intervento ne è seguito un secondo, denominato appunto "INTERVENTO DI MITIGAZIONE IDRAULICA ALLA FOCE DEL RIO CRINACCIO - PRIMO STRALCIO FUNZIONALE" è stato realizzato nel corso del 2017 – 2018 dopo che il progetto era stato approvato con Deliberazione di GC n. 579 del 15/12/2016 a conclusione della CONFERENZA DI SERVIZI ISTRUTTORIA ai sensi degli artt. 14 e seguenti della L.241/90 e s.m.i. per INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO DEL RIO CRINACCIO: PRIMO STRALCIO FUNZIONALE del 01 settembre 2016. In ultimo è terminato nel 2024 un terzo intervento denominato "PNRR - M2C4 - TUTELA DEL TERRITORIO E DELLA RISORSA IDRICA – 2.2: INTERVENTI PER LA RESILIENZA, LA VALORIZZAZIONE DEL TERRITORIO E L'EFFICIENZA ENERGETICA DEI COMUNI. INTERVENTO DI MITIGAZIONE IDRAULICA ALLA FOCE DEL RIO CRINACCIO - 2° STRALCIO che ha previsto l'aumento della sezione posta a valle dell'attraversamento della Statale

Adriatica n. 16 per circa 60 metri fino al ponte ferroviario, sezione attualmente avente dimensioni di circa 1,60 – 3,50 mq. Il nuovo manufatto affiancato a quello esistente è caratterizzato da una sezione di tipo aperta con sezione tipica a “L”. L’area utile finale è quindi pari a circa 10,00 mq.

Il progetto era stato approvato con Deliberazione di GC n. 423 del 27/10/2022 a conclusione della CONFERENZA DI SERVIZI ISTRUTTORIA ai sensi degli artt. 14 e seguenti della L.241/90 e s.m.i. per INTERVENTI PER LA RESILIENZA, LA VALORIZZAZIONE DEL TERRITORIO E L’EFFICIENZA ENERGETICA DEI COMUNI. INTERVENTO DI MITIGAZIONE IDRAULICA ALLA FOCE DEL RIO CRINACCIO - 2° STRALCIO del 25 ottobre 2022. Nonostante ciò, nel maggio 2023 a seguito degli eventi meteorologici, in corrispondenza delle succitate aree si sono verificati importanti ed estesi allagamenti che hanno danneggiato le reti fognarie, interrotto il traffico veicolare e creato pericolo per la pubblica e privata incolumità, gli interventi sulle opere d’arte realizzati e precedentemente citati (per quanto migliorativi rispetto alla situazione attuale) non sono risultati sufficienti da soli per mitigare l’esposizione al rischio idraulico dato che le interferenze del tessuto urbano nel suo complesso rispetto al corso d’acqua sono tali da impedire un consistente aumento delle sezioni di deflusso per renderle compatibili con gli stati di piena. Per questo si è ritenuto opportuno pensare alla possibile realizzazione di uno o più sistemi d’espansione per laminare i picchi di piena o in, alternativa, un sistema di scaricatori di piena che svolgano comunque, con il proprio volume, anche la funzione di laminazione. In base a quanto premesso, alle risultanze degli studi di riferimento citati e alle problematiche che si sono verificate nel corso degli anni, è stato affidato alla società Net Engineering Srl di Padova con determina dirigenziale n° 2795 del 27/12/2024 l’incarico ad oggetto “PNRR – M2C4 - TUTELA DEL TERRITORIO E DELLA RISORSA IDRICA – I 2.1a: MISURE PER LA GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONE E PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO – INTERVENTI IN EMILIA ROMAGNA, TOSCANA E MARCHE MA-UBIS-000017 - SDOPPIAMENTO DELLA RETE FOGNARIA MEDIANTE LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO DI FOGNATURE ACQUE METEORICHE DEDICATO CHE RISOLVA ANCHE IL PROBLEMA DELL’ATTRaversamento DELLA SEDE FERROVIARIA E DELLA STRADA NAZIONALE ADRIATICA SUD - LOCALITÀ PONTESASSO AFFIDAMENTO DELL’INCARICO PER LA REDAZIONE DEL DOCUMENTO DI FATTIBILITÀ DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI (DOCFAP) E SERVIZIO DI SUPPORTO AL RUP NELLE FASI DI PROGETTAZIONE, ESPROPRIOPRIO, ESECUIZIONE E COLLAUDO. CIG: B4C9121EA2”.

All’interno del DOCFAP sono state formulate una serie di alternative progettuali che tengono conto dei vari vincoli territoriali e che possano essere sviluppate in tempi rapidi

Figura 2 - Tavola di assieme delle alternative di progetto analizzate nel DOCFAP



L'alternativa risultata migliore (Alternativa 1) in base ai fondi a disposizione, ha come obiettivo quello di drenare quanto più territorio possibile, prevedendo infatti i canali di gronda già ipotizzati nel PFTE del 2023 già citato. La differenza sostanziale è data dal non collegamento del Canale sud al Santa Vittoria, partendo esso immediatamente a nord di Via Collodi:

- sistemazione attraversamenti Rio Crinaccio;
- nuovi attraversamenti a nord;
- rizezionamento 200 m del Rio Crinaccio;
- scolmatore del Rio Crinaccio;
- Canale di Gronda sud non collegato al Santa Vittoria, che quindi drena solo le acque di Fano.

La disconnessione del Canale di Gronda a sud evita l'ingresso di acque dal Fosso S. Vittoria, che, al momento, risultano un'incognita da approfondire con studi specifici. Tale soluzione lascia inoltre

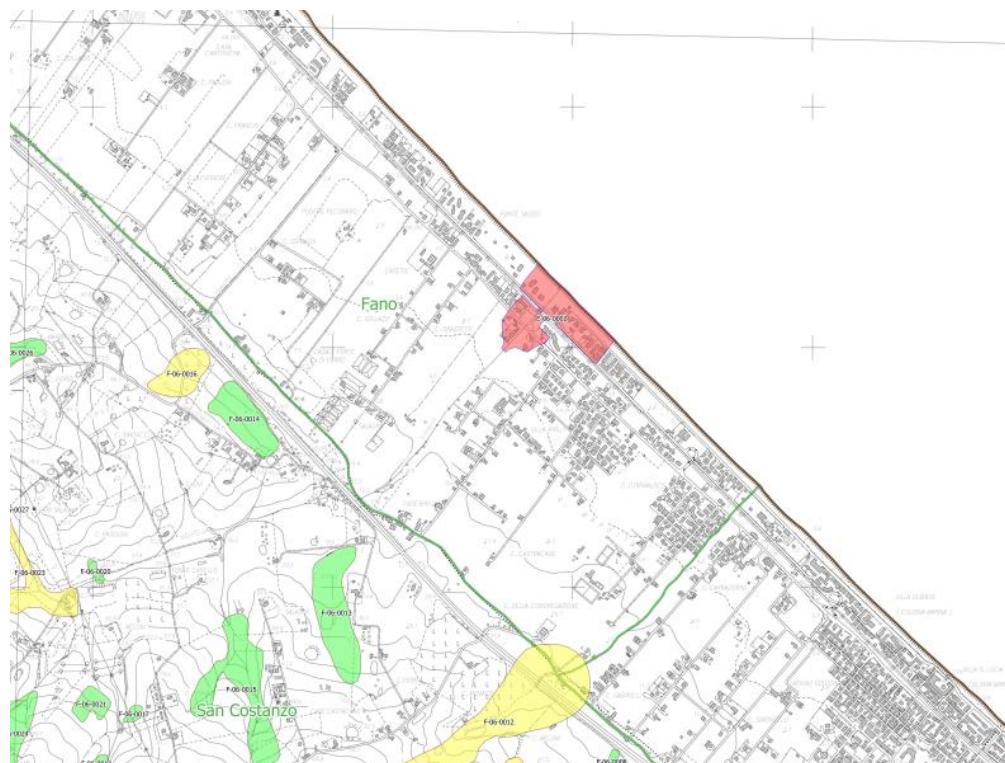
aperta la possibilità di collegare in futuro il Canale di Gronda anche al S.Vittoria (eventualmente anche con un collettore interrato), auspicando nel frattempo che vengano realizzati su tale scolo le necessarie opere di miglioramento idraulico, quali ad esempio il ripristino degli attraversamenti al di sotto della SS16, della zona del campeggio e della linea ferroviaria, nonché dello scarico a mare, attualmente costituito da un paio di tubazioni in PEAD spesso insabbiate.

Il presente progetto è relativo alla soluzione 1 sopra riportata e recepisce le varie indicazioni espresse dall'Amministrazione e dal gruppo tecnico comunale sia sul tracciato che sulla opportunità di prevedere, come da DOCFAP sopra richiamato, già nel presente progetto un'area di laminazione lungo lo scolmatore del Rio Crinaccio di proprietà comunale, rendendo molto più agevole l'iter procedurale rispetto ad altre alternative che richiederebbero l'occupazione di aree private.

L'intervento nel suo complesso non è conforme agli strumenti di pianificazione urbanistica e pertanto, ai sensi dell'art. 6 dell'Ordinanza n. 1002 del 12/06/2023 del Capo del Dipartimento della Protezione Civile, *"Primi interventi urgenti di protezione civile in conseguenza degli eccezionali eventi meteorologici verificatisi a partire dal 16 maggio 2023 nel territorio dei comuni di Fano, di Gabicce Mare, di Monte Grimano Terme, di Montelabbate, di Pesaro, di Sassocorvaro Auditore e di Urbino della provincia di Pesaro e Urbino"*, l'approvazione del progetto costituirà variante agli strumenti urbanistici comunali nonché imposizione di area di rispetto qualora occorra e comporterà vincolo preordinato all'esproprio e dichiarazione di pubblica utilità delle opere e urgenza e indifferibilità dei relativi lavori.

L'area oggetto di intervento ricade in Area a rischio esondazione – Rischio molto elevato (R4) si faccia riferimento al codice elenco eventi E-06-0002 Figura 3 ai sensi del Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI) e, in base a quanto riportato nel Piano di gestione del rischio di alluvioni (PGRA) in zona di bassa pericolosità, con alcune zone di media pericolosità a monte dell'attraversamento della SS16 del Rio Crinaccio e lungo la zona costiera.

Figura 3 - Stralcio Tavola RI 13 a PAI – Carta del rischio idrogeologico



2 CRITICITA' DELLO STATO DI FATTO

L'andamento del corso d'acqua risulta naturale e praticamente indisturbato nella parte collinare del bacino per divenire di fatto artificiale nella sua parte terminale a causa della presenza di attraversamenti, tominature, restringimenti e brusche deviazioni tali di fatto da non permettere il deflusso ordinario del fosso.

Infatti il corso d'acqua e la sua geometria sono state fortemente manipolate nel corso dei decenni per consentire lo sviluppo urbano del centro abitato e della sua rete viaria pedonale e carrabile senza tenere conto delle esigenze naturali del torrente. L'analisi dello stato dei luoghi evidenzia numerose situazioni puntuali, ed in particolare in prossimità degli attraversamenti, caratterizzate da una progressiva limitazione della sezione idraulica utile ed alcuni lunghi restringimenti delle sezioni finalizzati allo sviluppo dei percorsi pedonali che hanno contribuito a far perdere i necessari gradi di libertà al corso d'acqua.

Ne consegue dal punto di vista idraulico una situazione caotica dovuta a costruzioni in alveo direttamente interferenti con la portata del corso d'acqua (muri in alveo per delimitare i percorsi, pilastri per sorreggere camminamenti, travi di impalcato e spalle dei ponti, ecc.) o comunque poste a pochi metri dalle sponde del Torrente e quindi pericolosamente interferenti con le portate di piena.

Procedendo da monte il primo attraversamento sul corso d'acqua che si trova risulta essere quello prima dell'Autostrada per consentire il passaggio della strada comunale locale (Strada Belvedere - Figura 4); in questo tratto le sezioni naturali sono piuttosto ampie e la sezione utile dell'attraversamento (trattasi di elemento scatolare) è pari a circa 7 m².

Figura 4 - Attraversamento della strada comunale a monte dell'autostrada



Quindi il Rio attraversa l'Autostrada ove scorre all'interno di un tombino scatolare avente superficie di circa $9,5 \text{ m}^2$ a monte e 11 m^2 circa a valle. Questo tombino è stato recentemente allungato nell'ambito dei lavori di realizzazione della 3° corsia dell'Autostrada 14 mantenendo le medesime sezioni originarie Figura 5.

Figura 5 - Attraversamento dell'autostrada, sezione di monte e di valle



Subito a valle dell'Autostrada è presente l'attraversamento della strada comunale (Strada di Mezzo) la cui sezione di deflusso è pari a circa $9,5 \text{ m}^2$ Figura 6.

Figura 6 - Attraversamento di Strada di Mezzo a valle dell'Autostrada



Dopodiché il fosso è caratterizzato da un alveo naturale fino alla Strada Statale Adriatica con sezioni piuttosto variabili. Lungo questo percorso vi sono tratti in erosione alternati a tratti fortemente vegetati con vegetazione a terra e sulle sponde cause di potenziali forme di ostruzione e di trasporto solido e di materiale galleggiante.

Figura 7 - Il Rio Crinaccio nel tratto tra l'Autostrada e la Strada Statale Adriatica



Prima del ponticello sulla Strada Statale Adriatica il Rio lambisce il depuratore di Ponte Sasso Figura 8 e quindi è interessato appunto dall'attraversamento della Strada Statale Adriatica n. 16 Figura 9.

Figura 8 - Foto del Rio Crinaccio nella zona del depuratore di Ponte Sasso, vista da monte e da valle



La sezione di questo attraversamento è estremamente modesta, pari a circa 3 m² e risulta caratterizzato da una sezione nettamente inferiore a quelle delle opere d'arte presenti a monte e a valle pari mediamente a circa 8 – 10 m².

Figura 9 - Sezione di attraversamento della Strada Statale 16 Adriatica



La sezione di questo attraversamento è estremamente modesta, pari a circa 3 m² e risulta caratterizzato da una sezione nettamente inferiore a quelle delle opere d'arte presenti a monte.

evidente, inoltre, come l'attraversamento si possa ostruire in corso d'evento amplificando anche in caso di stati di piena ordinari a carattere stagionale i fenomeni di esondazione.

Quindi il Rio si trova ad incrociare la ferrovia Bologna - Ancona al Km. 166 +023 dove il suo alveo si trova ridotto per la presenza di un passaggio ciclo-pedonale e l'asse del corso d'acqua risulta deviato per permettere il passaggio delle persone nella parte più alta del ponticello ferroviario caratterizzato comunque da una superficie pari a circa 10 m². Questa deviazione provoca un decentramento della linea della corrente anche rispetto all'attraversamento successivo e conseguentemente un ostacolo al deflusso delle sue acque.

Figura 10 – Vista dell'attraversamento ferroviario sul Rio Crinaccio



Subito a valle di questo attraversamento, dopo un breve tratto sempre rivestito, è presente l'attraversamento di Via Ammiraglio Cappellini già oggetto di adeguamento così come il tratto terminale che sbocca nella battigia.

Come già esposto, le sezioni idrauliche del tratto urbano del Rio Crinaccio sono modeste. Facendo un rapido raffronto fra l'attraversamento Autostradale (e quelli nelle immediate vicinanze) e quelli localizzati nella zona abitata, questi ultimi offrono una superficie al deflusso inferiore di più del 50 % rispetto quelli presenti a monte. Questo fatto inevitabilmente costituisce un forte ostacolo al passaggio delle acque, in quanto manufatti con superficie di circa 4 m² collocati in un tratto

pianeggiante come appunto quello terminale che può risentire anche delle condizioni meteo marine avverse, sono caratterizzati da un officiosità idraulica nettamente inferiore a quella necessaria per far transitare anche le piene ordinarie.

Per questo si ritiene fondamentale individuare una doppia linea d'intervento:

- Il miglioramento delle sezioni di deflusso;
- La laminazione delle portate di deflusso.

Il miglioramento delle sezioni di deflusso consiste nell'adeguamento degli attraversamenti esistenti per renderli compatibili almeno al deflusso derivante dalle piene e morbide ordinari, regolarizzando la capacità di deflusso monte – valle del corso d'acqua e con il doppio effetto di migliorare la capacità idraulica e nel contempo di diminuire la probabilità dei fenomeni di ostruzione che caratterizzano in corso d'evento le luci di modeste dimensioni.

Gli interventi sulle opere d'arte (per quanto migliorativi rispetto alla situazione attuale) non sono tuttavia sufficienti da soli per mitigare l'esposizione al rischio idraulico dato che le interferenze del tessuto urbano nel suo complesso rispetto al corso d'acqua sono tali da impedire un consistente aumento delle sezioni di deflusso per renderle compatibili con gli stati di piena.

Per questo si ritiene fondamentale e prioritario la realizzazione del Canale di Gronda che possa intercettare le acque provenienti dai settori collinari e nel contempo scolmare le portate del Rio Crinaccio adducendole a mare tramite un diversivo idraulico unitamente ad un sistema di laminazione funzionale a quest'ultimo. Infatti così come per l'alveo storico del Rio Crinaccio, l'attraversamento della Statale e delle ferrovie ed il vicinissimo sbocco in battigia con le relative condizioni meteo marine, costituiscono dei rigidi limiti fisici che non consentono sezioni di sbocco adeguate per smaltire le portate attese maggiori di circa 15 mc/s, corrispondenti al tempo di ritorno di 5 – 10 anni, a fronte invece di portate al colmo ad esempio per il tempo di ritorno di 50 – 200 anni di circa 40 – 50 mc/s.

3 ANALISI IDROLOGICA

Il Rio Crinaccio è un torrente caratterizzato da un comportamento fortemente torrentizio caratterizzato da un bacino modesto, pari a circa 4,14 km² e da una lunghezza dell'asta principale pari a 3,8 km ricadente per oltre l'88% in area collinare nel Comune di San Costanzo e per la quota restante in area pianeggiante nel Comune di Fano ove è situato anche lo sbocco nell'arenile di Ponte Sasso. Praticamente al confine tra i due Comuni, con tracciato parallelo alla linea di costa, corre la linea dell'Autostrada Adriatica A14 recentemente oggetto dell'ampliamento della terza corsia.

I problemi principali riguardano in particolare la parte terminale del corso d'acqua ove sono presenti numerose infrastrutture strategiche pubbliche, private abitazioni, residence, alberghi, stabilimenti balneari e attività economiche.

Partendo dall'analisi dei dati storici e delle principali variabili che regolano il modello idrodinamico, di seguito si riportano i dati di ingresso assunti nell'analisi idrologica – idraulica del corso d'acqua e dei bacini efficaci ad esso limitrofi d'interesse ed in particolare le portate critiche di massima piena. Con l'utilizzo di software dedicati di modellazione idrologica ed idraulica, software MIKE Plus 2025 sviluppato dal Danish Hydraulic Institute (DHI), in particolare il programma MIKE+ Rivers 1D con il modulo RR (Rainfall-Runoff) e modulo HD (Hydrodynamic), sono stati simulati preliminarmente gli scenari d'evento studiando l'andamento dell'onda di piena in occasione di portate critiche per differenti tempi di ritorno nelle sezioni d'interesse.

In particolare l'analisi idrologica – idraulica è composta delle seguenti valutazioni ed attività:

- Analisi delle serie di precipitazione e/o massimi annuali della stazione di Fano/Senigallia;
- Redazione della mappa aggiornata dell'uso del suolo sulla base delle informazioni cartografiche disponibili;
- Individuazione preliminare delle portate al colmo per differenti tempi di ritorno tramite il metodo razionale tradizionale e modificato (Giambetti) ed il metodo SCS;
- Implementazione di uno o più idrogrammi di piena per la sollecitazione del modello idraulico mediante il modello idrodinamico modulo RR (Rainfall-Runoff) sviluppato dal Danish Hydraulic Institute (DHI);
- Esecuzione di un rilievo topografico di dettaglio,;
- Reperimento dei dati Li.D.A.R. dell'area d'interesse gentilmente concessi dal Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare;
- Esecuzione di verifiche idrauliche in moto vario sul modello idrodinamico modulo 1D HD (Hydrodynamic), sviluppato dal Danish Hydraulic Institute (DHI);
- Analisi e descrizione dei risultati e proposta degli interventi e loro fabbisogno economico.

Nel proseguo del presente capitolo si esamina dapprima il bacino complessivo del Rio Crinaccio e

della quota parte d'interesse che, come anzidetto, riguarda la parte terminale del Rio pari a circa 1,9 km dall'Autostrada A14 alla chiusura alla foce, si riporta la descrizione delle caratteristiche geomorfologiche e dell'uso del suolo, l'analisi delle piogge di riferimento e la stima delle portate che si originano nel bacino chiuso alla sezione d'interesse per differenti valori del tempo di ritorno, quindi si procede con la descrizione e la simulazione degli interventi proposti.

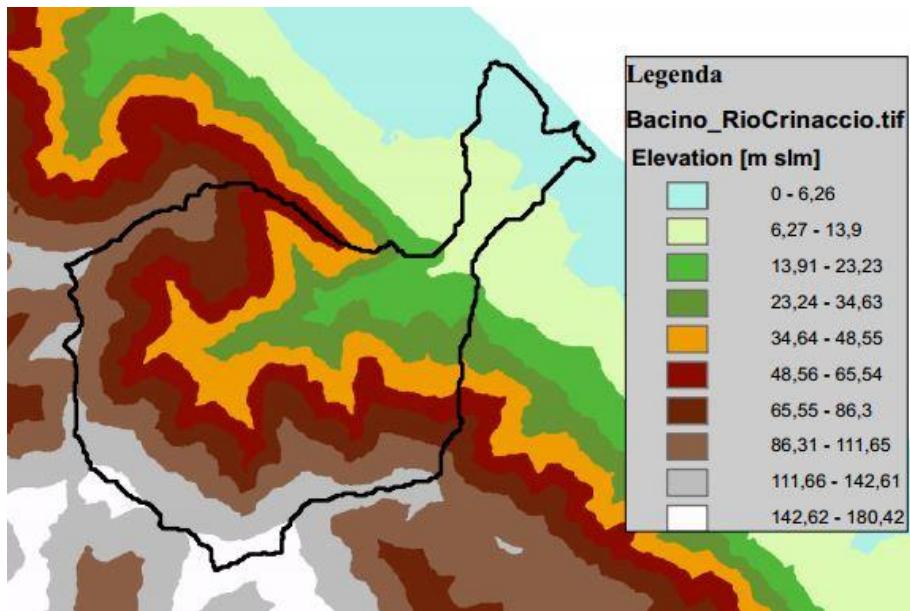
3.1 ANALISI GEOMORFOLOGICHE

Al fine di effettuare le analisi geomorfologiche preliminari è stato redatto un modello digitale del terreno (DEM) partendo dagli strumenti cartografici disponibili.

Il DEM è stato realizzato unendo quello originario di D.E.M. TINITALY con i punti estratti dalla cartografia 1:2'000 della Carta Tecnica del Comune di Fano, questi ultimi impiegati per migliorare la definizione dell'estensione del bacino nel tratto pianeggiante ed i suoi confini naturali Figura 11.

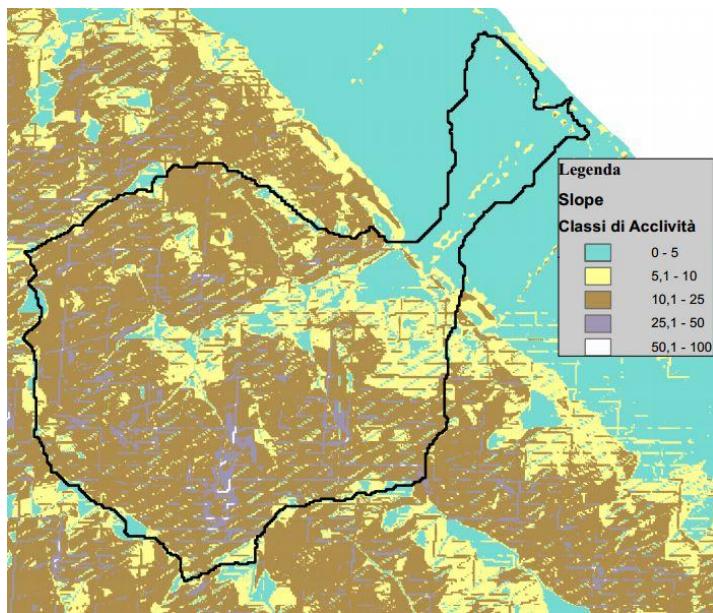
L'infrastruttura autostradale rappresenta come anzidetto lo spartiacque tra la parte di bacino collinare caratterizzato da quote relativamente elevate (altezza massima individuata in 162 m slm), posta in Comune di San Costanzo e quella pianeggiante a valle fino alla foce posta (caratterizzata da quote inferiori a 10 m slm) in territorio Fanese.

Figura 11 - Modello digitale del terreno del Rio Crinaccio



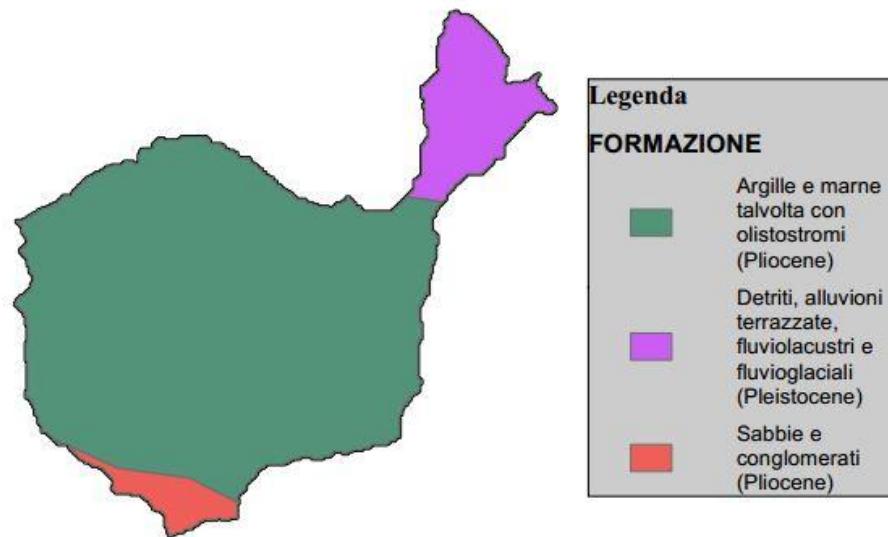
Le due zone di bacino si distinguono nettamente visivamente nella seguente Figura 12 ove è riportata la mappa delle acclività: quella di San Costanzo con una pendenza media elevata e mediamente pari a oltre il 14 % e quella di Fano invece con inclinazioni praticamente nulle.

Figura 12 - Mappa dell'acclività del Rio Crinaccio



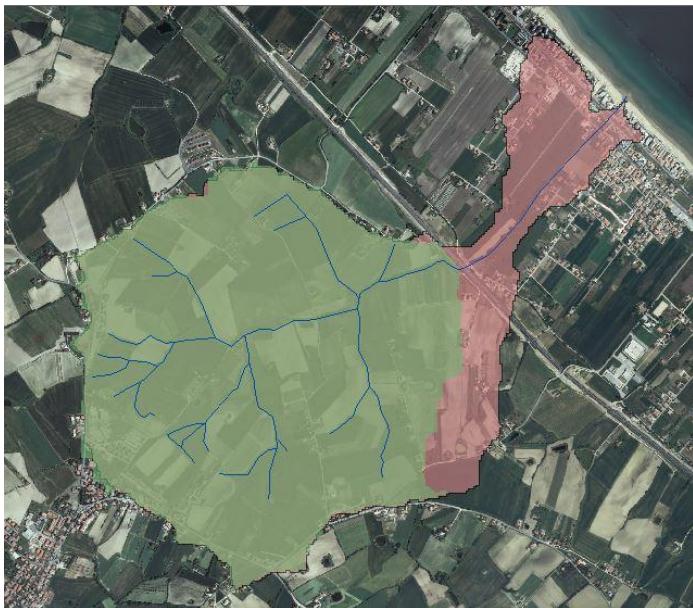
Il cambio di pendenza segna anche Geologicamente il contatto fra i terreni del Pliocene (Argille e Marne e Sabbie e Conglomerati) presenti in area collinare e quelli del Pleistocene (Detriti, alluvioni terrazzate) situati in prossimità del mare.

Figura 13 - Estratto della carta Geolitologica d'Italia, 1:500'000



Per quanto riguarda gli aspetti idrologici l'area in studio si chiude in corrispondenza della foce del Rio Crinaccio, corrispondente allo sbocco a mare nell'abitato di Ponte Sasso. Per i motivi sopra esposti è stata poi posta un'ulteriore sezione di chiusura a monte del rilevato autostradale, in modo di verificare le portate derivanti dalla parte collinare rispetto all'intero bacino Figura 14.

Figura 14 - Mappa del reticolo idrografico ed individuazione dei bacini del Rio Crinaccio a monte e valle dell'Autostrada



In base ai valori che si possono estrarre a partire dalle immagini sopra mostrate, è possibile determinare il tempo di corrievazione, ad esempio tramite la formula del Giandotti, dipendente per la teoria cinematica dalla morfologia del bacino:

$$T_c = \frac{(4 \cdot A^{0.5} + 1.5 \cdot L)}{(0.8 \cdot H^{0.5})} \text{ (ore)}$$

dove: $A = S$ = superficie del bacino in Km^2 ;

L = lunghezza dell'asta principale in Km;

H = altitudine media rispetto alla sezione di chiusura in m.s.l.m.

Per le valutazioni idrologiche sono stati utilizzati diversi valori del tempo di corrievazione T_c calcolati mediante le relazioni normalmente impiegate in casi analoghi. In particolare sono state impiegate le seguenti espressioni adottando quella di Giandotti per il Rio Crinaccio ovvero quella di Kirpich per i bacini che si collocano a EST dello stesso e risultano tributari del Canale di Gronda nel tratto che si immette appunto nel Rio Crinaccio. Lo stesso valore del tempo di corrievazione del Rio Crinaccio è stato assunto anche per i bacini collocati a OVEST del Rio Crinaccio dato che risultano tributari nel medesimo Canale di Gronda emissario del Rio Crinaccio.

$$T_c = \frac{(4 \cdot A^{0.5} + 1.5 \cdot L)}{(0.8 \cdot H^{0.5})} \text{ (Giandotti)}$$

$$T_c = 0.000325 \cdot (L \cdot 1000)^{0.77} \cdot I^{-0.385} \text{ (h) (Kirpich)}$$

$$T_c = 0.055 \cdot \frac{A}{\sqrt{i}}(h) \quad (\text{Pezzoli})$$

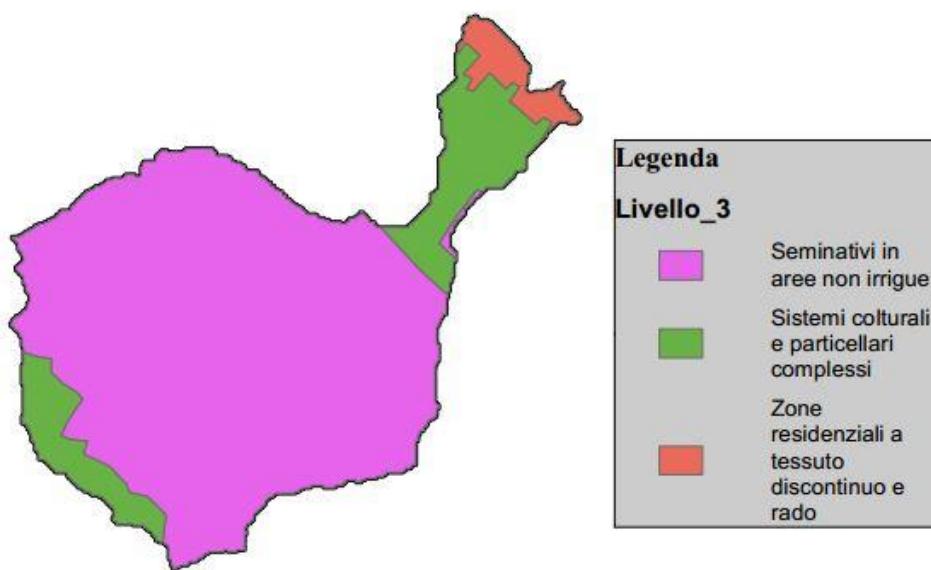
$$T_c = 0,108 \frac{(A \cdot L)^{1/3}}{\sqrt{I}}(h) \quad (\text{Pasini})$$

$$T_c = 0.1272 \sqrt{\frac{A}{I}}(h) \quad (\text{Ventura})$$

3.2 USO DEL SUOLO

Per l'analisi dell'uso del suolo si è fatto riferimento alla banca dati del progetto Corine Land Cover (ver. 2006) elaborato dall'ISPRA. La morfologia collinare e pianeggiante ha favorito un uso del suolo prevalentemente seminativo, eccezion fatta per il tratto costiero, trasformatosi nel corso degli anni in zona residenziale.

Figura 15 - Estratto della mappa dell'uso del suolo (livello 3, Corine Land Cover, ISPRA) del Rio Crinaccio



I valori del coefficiente di deflusso adottati per ogni singola classe di uso del suolo sono illustrati nella seguente Tabella 1 ove si deduce che il coefficiente equivalente per l'intero bacino oggetto di studio è pari a 0,61.

Tabella 1 - Valori del coefficiente di deflusso per classi di uso del suolo del Rio Crinaccio

Uso del suolo	Area [Kmq]	ϕ
Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado	0.13	0.95
Seminativi in aree non irrigue	3.31	0.6
Sistemi culturali e particellari complessi	0.60	0.6
Autostrada	0.03	0.95
ϕ medio		0.61

A questo valore si è giunti mediante la sovrapposizione del bacino con le differenti zone di cui alla mappa Corine Land Cover di terzo livello di cui alla precedente Figura 15 ed assegnando a ciascuna zona presente valori del coefficiente di deflusso presenti in letteratura (e, fra gli altri, nella “Analisi Idraulica [...] dei Torrenti Rio Melo e Fosso Taviolo [...]” redatto dall’Autorità di Bacino Interregionale Marecchia-Conca).

Rispetto alla Figura 15 si è ritenuto opportuno inserire anche un ulteriore “uso” corrispondente alla superficie afferente in termini idrologici dell’Autostrada A14 nel Rio Crinaccio.

Si sottolinea come il calcolo del coefficiente medio, pur valutato come 0,61 successivamente è stato assunto pari a 0,7 al fine di meglio valutare i fenomeni di pioggia ad alta intensità come quelli recentemente verificatesi che di fatto sono caratterizzati da scarso deflusso nel sottosuolo ed elevato scorrimento superficiale e altre situazioni di impermeabilizzazione nel frattempo intervenute o comunque non facilmente individuabili (campi fotovoltaici, scarichi fognari puntuali, ecc.).

3.3 BACINO A MONTE DELL’ATTRAVERSAMENTO AUTOSTRADALE

La chiusura del bacino in questione si trova in prossimità del rilevato dell’Autostrada A 14 proprio in corrispondenza del tombino autostradale.

I parametri morfometrici associati al bacino in questione sono stati calcolati mediante software Gis sulla base del D.E.M. TINITALY a risoluzione 10 m.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

Tabella 2 - Parametri morfologici del Bacino del Rio Crinaccio a monte dell’Autostrada

Area [Km ²]	L [Km]	i [m/m]	H _{max}	H _{min}	H _{med}	ϕ	T _c [ore]
3,29	2,51	0.039	162,55	17,41	72,17	0,7	1,86

3.4 BACINO ALLA FOCE DEL RIO CRINACCIO

La chiusura del bacino in questione si trova in corrispondenza della foce del Rio Crinaccio.

I parametri morfometrici associati al bacino in questione sono stati calcolati mediante software Gis su una base creata dalla sovrapposizione fra il già citato D.E.M. TINITALY e un raster creato mediante interpolazione di punti quotati della cartografia a 2'000 del Comune di Fano, in modo da meglio discretizzare il tratto vallivo ed individuare l'effettivo spartiacque con i bacini collocati a NORD e a SUD rispetto all'andamento del Rio Crinaccio.

Nella seguente Tabella 3 si riassumono i principali dati/risultati.

Tabella 3 - Parametri morfologici del Bacino del Rio Crinaccio alla foce

Area [Km ²]	L [Km]	i [m/m]	H _{max}	H _{min}	H _{med}	φ	T _c [ore]
4.14	3.83	0.030	162.55	0.9	62.64	0.70	2.20

3.5 PIOGGE

La stima delle portate per le verifiche idrauliche partono dalla valutazione delle precipitazioni meteoriche della zona in questione per poi costruire la curva di possibilità climatica. L'analisi della frequenza dei valori misurati della grandezza idrologica alla quale viene riferito il dimensionamento di un'opera idraulica consente di definire quantitativamente il rischio d'insuccesso: tradizionalmente il rischio idraulico è definito in termini di tempo di ritorno (Tr). Per un'opera, quale una rete di drenaggio urbano a protezione e servizio del territorio, il tempo di ritorno (Tr) è definito come la durata media, in anni, del periodo in cui il valore XT della variabile idrologica (l'altezza di pioggia caduta nel sito di progetto in un assegnato intervallo, portata al colmo di piena della sezione di progetto, o altro) sul quale viene dimensionata l'opera, viene superato una sola volta; esso è legato alla probabilità di non superamento $P(X_T) = P(x \leq X_T)$ dalla:

$$P(X_T) = 1 - \frac{1}{T_r}$$

3.5.1 CURVA DI POSSIBILITÀ CLIMATICA

L'idrologia della zona in oggetto è caratterizzata da un tratto collinare, posto principalmente nel Comune di San Costanzo, e da un tratto pianeggiante corrispondente alla foce. Di conseguenza i tempi di concentrazione, o di corrievazione, dove per tempo di corrievazione si intende il tempo caratteristico del bacino che rappresenta il tempo necessario perché la goccia caduta nel punto più "lontano" del bacino raggiunga la sezione di chiusura, sono relativamente brevi (nell'ordine delle

poche ore) e le precipitazioni che interessano sono quelle a forte intensità di durata oraria (o tri-oraria). Al fine di calcolare le portate di pioggia, occorrono pertanto informazioni sull'idrologia della zona. Queste informazioni possono essere riassunte dalla relazione a due parametri denominata legge di probabilità pluviometrica o curva segnatrice di possibilità climatica che lega le altezze di pioggia con le durate di pioggia con l'espressione seguente:

$$h = at^n$$

Per la stima di a e n è necessario raccogliere i dati di pioggia riportati dal Pluviometro di interesse. Per la stima delle portate del Rio Crinaccio, trovandosi indicativamente ad egual distanza sia dal Pluviometro di Fano che di quello di Senigallia, si è deciso di effettuare i calcoli per entrambe le stazioni, al fine di avere il valore idrologicamente più cautelativo per le valutazioni successive. I dati di pioggia sono stati aggiornati al 2023.

Tabella 4 - Pluviometro di Fano - parametri “n, a” della curva di possibilità climatica

Tr (anni)	a	n
Tr 200	61.61	0.312
Tr100	56.64	0.309
Tr50	51.65	0.304
Tr25	46.62	0.299
Tr10	39.85	0.290
Tr5	34.50	0.281

Tabella 5 - Pluviometro di Senigallia - parametri “n, a” della curva di possibilità climatica

Tr (anni)	a	n
Tr 200	80.26	0.239
Tr100	72.57	0.243
Tr50	64.85	0.246
Tr25	57.07	0.251
Tr10	46.60	0.260
Tr5	38.31	0.270

Le curve elencate nella precedente Tabella 4 e Tabella 5 sono mostrati nelle seguenti Figura 16 e Figura 17, in cui si mostra per i differenti valori del tempo di ritorno l'andamento delle precipitazioni per durate comprese fra 1 – 24 ore.

Figura 16 - Pluviometro di Fano - Curve di possibilità climatica

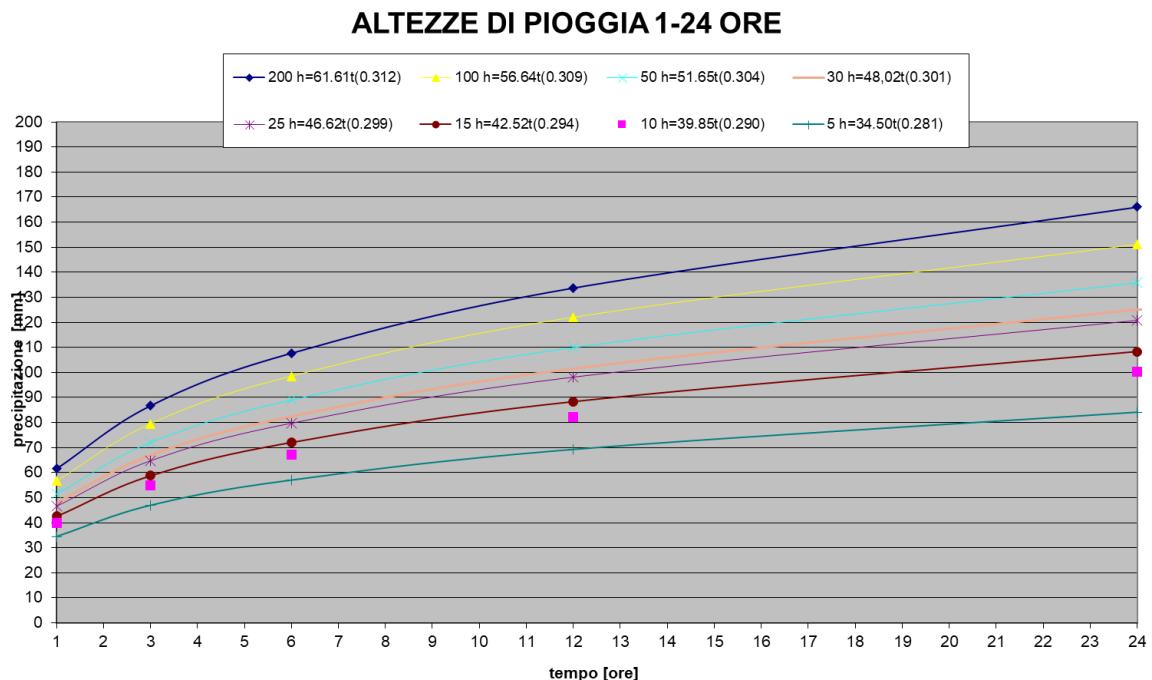
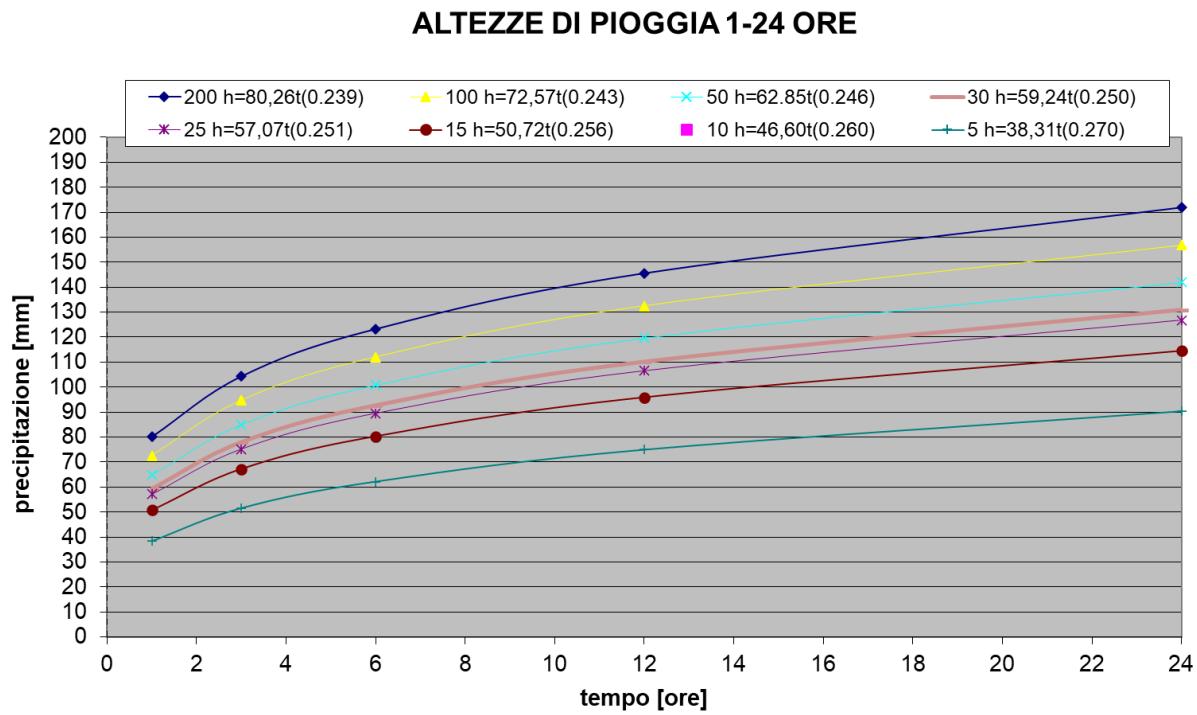


Figura 17 - Pluviometro di Senigallia - Curve di possibilità climatica



3.6 PORTATE DI PIOGGIA

Il presente capitolo riguarda la stima preliminare delle portate di piena del bacino del Rio Crinaccio.

L'area del bacino a monte dell'Autostrada risulta in circa 3,2 Km², mentre quella totale, calcolata alla

foce, corrisponde a circa 4,14Km². I calcoli delle portate sono stati effettuati mediante tre metodologie distinte: il metodo razionale, il metodo razionale modificato (Giandotti – Giambetti) ed il metodo SCS.

3.6.1 ANALISI RAZIONALE

Per rappresentare il processo di deflusso di una rete drenante in questo caso si ricorrere ad una descrizione sintetica del legame fra l'afflusso (pioggia netta o efficace) al bacino idrografico ed il corrispondente deflusso di piena, secondo la procedura nota come Metodo dell'Idrogramma Unitario (I.U.), che fu sviluppato originariamente da Sherman nel 1932.

Nell'ipotesi di linearità ed invarianza nel tempo dei fenomeni di scorrimento superficiale – ad un aumento del volume di pioggia netta corrisponde un eguale aumento della portata defluente, indipendentemente dall'istante in cui la pioggia ha avuto inizio – vale il principio della sovrapposizione degli effetti. Ne consegue che tutti i modelli lineari possono essere messi nella forma della formula razionale:

$$Q_{c,\max} = \varphi \cdot i(t_p) \cdot S \cdot \lambda(t_p)$$

considerando come parametri del modello il tempo di pioggia critico t_p e il valore di $\lambda(t_p)$ essendo φ il coefficiente di afflusso, $i(t_p)$ l'intensità media della pioggia di durata (t_p) ed S la superficie del bacino. La portata di piena corrispondente alla portata di afflusso efficace (o di pioggia netta) al bacino si può stimare pertanto con il *metodo cinematico lineare*, che altro non è che il tradizionale *metodo della corriavazione* con le considerazioni che:

gocce di pioggia cadute contemporaneamente in punti diversi del bacino impiegano tempi diversi per arrivare alla sezione di chiusura di questo;

il contributo di ogni singolo punto del bacino alla portata di piena è direttamente proporzionale all'intensità di pioggia caduta nel punto in un istante precedente quello del passaggio della piena del tempo necessario perché detto contributo raggiunga la sezione di chiusura;

questo tempo è caratteristico di ogni singolo punto ed invariante nel tempo.

Ne consegue che:

esiste un tempo di concentrazione o di corriavazione t_c caratteristico del bacino che rappresenta il tempo necessario perché la goccia caduta nel punto più "lontano" del bacino raggiunga la sezione di chiusura;

l'idrogramma unitario è semplificato.

Stando queste ipotesi la precedente formula è riscrivibile nel modo seguente:

$$Q_{c,\max} = \varphi \frac{iA}{3,6} m^3 / s$$

dove: $A = S$ = superficie del bacino in Km²

i = intensità della precipitazione in mm/h

φ = coefficiente di afflusso

Tenuto conto che usualmente l'intensità media di pioggia va diminuendo con l'aumentare della durata della stessa meno di quanto vada aumentando il parametro $\lambda(t_p)$ la portata massima al colmo si ottiene normalmente per piogge di durata pari al tempo di concentrazione o di corrivazione. La stima dell'intensità massima è legata alla curva di possibilità climatica deducibile direttamente dai dati rilevati ai pluviografi. Tale intensità massima si verifica in corrispondenza del tempo di corrivazione, tempo calcolabile, ad esempio con la classica formula del Giandotti.

La determinazione dell'afflusso meteorico al bacino idrografico richiede pertanto il calcolo dell'altezza media di pioggia caduta sul bacino medesimo, noti i valori puntuali misurati ai pluviografi, come visto al punto in precedenza. Il volume di afflusso può essere stimato operando il ragguaglio all'area del bacino della misura puntuale. Nell'ipotesi che sia nota l'altezza di pioggia nel centro di scroscio, punto di massima intensità di precipitazione, i coefficienti di ragguaglio $K_r = P_m/P_o$, rapporto tra la pioggia media sul bacino (P_m) e quella nel centro della meteora (P_o) possono dedursi da grafici, formule o da coefficienti tabellati come nel caso di quelli calcolati dal Columbo. Nel caso in oggetto, considerata l'estensione modesta dei bacini, il coefficiente di ragguaglio K_r è stato assunto pari a 1,00.

Durante una piena il deflusso superficiale dipende quasi esclusivamente dall'intensità di precipitazione, dalla capacità d'infiltrazione e dai caratteri morfologici del bacino imbrifero. La portata al colmo dell'onda di piena può essere stimata quindi in modo estremamente rapido con la formula razionale precedentemente vista, valida per intensità di pioggia costante nel corso dello scroscio di durata non inferiore al tempo di corrivazione.

I calcoli di portata sono stati effettuati, come consuetudine, per tempo di ritorno di 5, 10, 25, 50, 100 e 200 anni.

In base ai valori precedentemente determinati, si riportano le portate stimate in base alle due stazioni pluviometriche per il bacino chiuso, cautelativamente alla foce (Tabella 6) con il tempo di corrivazione stimato con il metodo di Giandotti.

Tabella 6 - Stima delle portate con il Metodo Razionale per il bacino complessivo del Rio Crinaccio alla foce

	Fano	Senigallia
Q 200 anni [mc/s]	28.60	35.19
Q 100 anni [mc/s]	26.22	31.89
Q 50 anni [mc/s]	23.84	28.58
Q 25 anni [mc/s]	21.43	25.25

Q 10 anni [mc/s]	18.19	20.76
Q 5 anni [mc/s]	15.62	17.21

Nella sottostante Tabella 7, si riportano invece secondo le metodologie prima ricordate, le portate stimate in base alle due stazioni pluviometriche per i bacini presenti ad EST e a OVEST del Rio Crinaccio e come meglio sintetizzati nell'elaborato denominato A4 BACINI SCOLANTI dello STUDIO PRELIMINARE AMBIENTALE.

In particolare come anzi detto il calcolo della portata dei bacini collocati a EST si è basato sulla stima del tempo di corriavazione calcolato con il metodo di Kirpich mentre per quelli collocati a OVEST si è basato sulla stima del tempo di corriavazione calcolato con il metodo di Giandotti.

Tabella 7 - Stima delle portate con il Metodo Razionale per i bacini contribuenti a EST del Rio Crinaccio

Tempo di ritorno	Fano	Senigallia
Q 200 anni [mc/s]	8.52	12.30
Q 100 anni [mc/s]	7.87	11.07
Q 50 anni [mc/s]	7.22	9.84
Q 25 anni [mc/s]	6.56	8.60
Q 10 anni [mc/s]	5.68	6.94
Q 5 anni [mc/s]	4.99	5.62

Tabella 8 - Stima delle portate con il Metodo Razionale per i bacini contribuenti a OVEST del Rio Crinaccio

Tempo di ritorno	Fano	Senigallia
Q 200 anni [mc/s]	7.96	9.79
Q 100 anni [mc/s]	7.30	8.87
Q 50 anni [mc/s]	6.63	7.95
Q 25 anni [mc/s]	5.96	7.03
Q 10 anni [mc/s]	5.06	5.78
Q 5 anni [mc/s]	4.35	4.79

3.6.2 METODO DI GIANDOTTI – GIAMBETTI

La formula di Giandotti – Giambetti risulta essere una variazione del metodo Razionale, sviluppandosi attraverso le stesse basi fisiche ma con l'introduzione di alcuni nuovi parametri.

Nell'applicazione della formula di Giandotti al bacino in esame, date le sue modeste dimensioni,

sono stati assunti i valori di γ e λ secondo Giambetti il quale evidenziò come la formula di Giandotti bene si adattava alla riproduzione delle portate al colmo di piena di bacini imbriferi prevalentemente impermeabili con superficie di non oltre 50 km² assumendo valori di $\gamma = 7$ e $\lambda = 5$.

La formula che si utilizza è questa:

$$Q_{c,max} = \frac{\gamma \cdot \varphi \cdot P \cdot S}{\lambda \cdot T_c}$$

dove γ rappresenta il rapporto fra portata massima e media, φ il coefficiente di deflusso, λT_c è il tempo di durata dell'onda di piena, S la superficie del bacino e P la precipitazione ragguagliata all'intero bacino con durata uguale o leggermente superiore al tempo di corrievazione sopra calcolato. Nell'applicazione della formula di Giandotti al bacino in esame, date le sue modeste dimensioni, sono stati assunti i valori di γ e λ secondo Giambetti il quale evidenziò come la formula di Giandotti bene si adattava alla riproduzione delle portate al colmo di piena di bacini imbriferi prevalentemente impermeabili con superficie di non oltre 50 km² assumendo valori di $\gamma = 7$ e $\lambda = 5$.

Anche in questo caso i calcoli di portata sono stati effettuati per il tempo di ritorno di 5, 10, 25, 50, 100 e 200 anni.

Nelle seguenti tabelle, Tabella 9, Tabella 10 e

Tabella 11 si riportano i valori di portata stimati con il metodo di Giandotti – Giambetti sempre per le stazioni pluviometriche di Fano e Senigallia, per il bacino del Rio Crinaccio chiuso alla foce, per i bacini presenti a EST del Rio Crinaccio e per quelli presenti a OVEST.

Tabella 9 - Stima delle portate con il Metodo di Giandotti - Giambetti per il bacino complessivo del Rio Crinaccio alla foce

Tempo di ritorno	Fano	Senigallia
Q 200 anni [mc/s]	40.01	49.22
Q 100 anni [mc/s]	36.68	44.61
Q 50 anni [mc/s]	33.35	39.99
Q 25 anni [mc/s]	29.98	35.33
Q 10 anni [mc/s]	25.45	29.04
Q 5 anni [mc/s]	21.85	24.07

Tabella 10 - Stima delle portate con il Metodo di Giandotti – Giambetti per i bacini contribuenti a EST del Rio Crinaccio

Tempo di ritorno	Fano	Senigallia
Q 200 anni [mc/s]	2.90	4.18
Q 100 anni [mc/s]	2.68	3.76

Q 50 anni [mc/s]	2.46	3.35
Q 25 anni [mc/s]	2.23	2.93
Q 10 anni [mc/s]	1.93	2.36
Q 5 anni [mc/s]	1.70	1.91

Tabella 11 - Stima delle portate con il Metodo di Giandotti – Giambetti per i bacini contribuenti a OVEST del Rio Crinaccio

Tempo di ritorno	Fano	Senigallia
Q 200 anni [mc/s]	11.13	13.70
Q 100 anni [mc/s]	10.21	12.41
Q 50 anni [mc/s]	9.28	11.13
Q 25 anni [mc/s]	8.34	9.83
Q 10 anni [mc/s]	7.08	8.08
Q 5 anni [mc/s]	6.08	6.70

3.6.3 METODO SCS

Oltre al calcolo della portata mediante il metodo razionale ovvero la formula di Giandotti così come modificata da Giambetti, metodologia di largo impiego, di seguito si riporta, al fine di conseguire una valutazione più approfondita delle perdite del bacino e con essa la stima della pioggia efficace, il metodo proposto dal Soil Conservation Service (SCS) degli Stati Uniti.

Questo metodo è particolarmente utilizzato per la determinazione del deflusso corrispondente allo scorrimento superficiale nei bacini di medie – piccole dimensioni, privi di stazioni di misura. Il metodo, per quanto basato su considerazioni circa l'andamento temporale delle perdite, è stato proposto per stimare il deflusso relativo all'intero fenomeno di piena e risulta quindi del tutto equivalente ad un metodo di stima del coefficiente di afflusso.

Secondo la metodologia proposta il deflusso superficiale Q dipendente dall'afflusso meteorico P viene espresso secondo la seguente relazione (Moisello, 1999) :

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

dove I_a rappresenta la capacità di assorbimento iniziale e S la massima ritenzione potenziale.

In particolare I_a è un parametro che tiene in considerazione le perdite iniziali dovute all'infiltrazione all'intercettazione, all'immagazzinamento nelle depressioni superficiali e dipende dalle condizioni e dall'umidità iniziale del suolo. Analisi empiriche hanno mostrato come il parametro I_a sia proporzionale al parametro S secondo la relazione:

$$I_a = 0.2S$$

da cui sostituendo nella precedente espressione si ottiene:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

Il parametro S rappresenta la quantità immagazzinabile dal bacino e quindi dipende fondamentalmente dalla tipologia del terreno, dall'uso del suolo e dalle condizioni di umidità del suolo determinate dalle piogge antecedenti (AMC, Antecedent Moisture Condition). Tali caratteristiche vengono di fatto riassunte in un fattore adimensionale, CN (Curve Number), legato al parametro S dalla seguente relazione:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

con CN variabile fra 0 (deflusso superficiale assente) e 100 (assenza di perdite di infiltrazione).

Per la determinazione del valore di CN si fa riferimento a tabelle di letteratura che riportano valori del parametro CN, corrispondenti a condizioni di saturazione del suolo medie, a seconda del uso del suolo con riferimento a quattro gruppi (A, B, C, D) definiti in funzione della possibilità di infiltrazione offerta dal tipo di suolo. I quattro gruppi di classificazione vengono così definiti (Moisello 1999):

suoli a basso potenziale di scorrimento, caratterizzati da un tasso di infiltrazione elevato anche quando completamente bagnati. Sono costituiti prevalentemente da sabbie o ghiaie di notevole spessore, con drenaggio da buono ad eccessivo;

suoli caratterizzati da un tasso di infiltrazione moderato quando sono completamente bagnati. Sono costituiti prevalentemente suoli di spessore moderatamente elevato o elevato, con drenaggio da moderatamente buono a buono e con tessitura da moderatamente fine a moderatamente grossolana;

suoli caratterizzati da un tasso di infiltrazione basso quando completamente bagnati. Sono suoli con uno strato che impedisce il movimento discendente dell'acqua, oppure suoli con costituiti prevalentemente da sabbie o ghiaie di notevole spessore, con tessitura da moderatamente fine a fine;

suoli ad alto potenziale di scorrimento, caratterizzati da un tasso di infiltrazione bassissimo quando completamente bagnati. Sono costituiti prevalentemente suoli argillosi con un alto potenziale di rigonfiamento, suoli con una falda prevalentemente alta, suoli con uno strato di argilla alla superficie o presso la superficie e suoli sottili giacenti sopra materiale pressoché impermeabile.

Per quanto riguarda le condizioni di saturazione, il metodo considera 3 classificazioni:

AMC I: bacino con suoli sufficientemente asciutti caratterizzati da potenziale di scorrimento superficiale minimo;

AMC II: condizioni medie;

AMC III: bacino pressoché saturato dalle piogge precedenti con potenziale di scorrimento

superficiale massimo;

Alla luce di quanto esposto finora, è stato calcolato il CN come incrocio della tipologia di suolo Figura 13 e del suo uso Figura 15.

Nella seguente Tabella 12 sono riportati i valori percentuali di appartenenza dei diversi tipi di elementi litologici in riferimento alla classificazione proposta dal Soil Conservation Service:

Tabella 12 - Percentuali di appartenenza delle diverse litologie ai gruppi di suolo

Nome Formazione	Gruppo A	Gruppo B	Gruppo C	Gruppo D
Alluvioni, detriti e depositi glaciali	10	35	55	0
Argille, argille e marne	0	0	0	100
Sabbie, arenarie e conglomerati	0	10	40	50

I valori del Curve Number, assegnati ai diversi tipi di uso del suolo sono i seguenti:

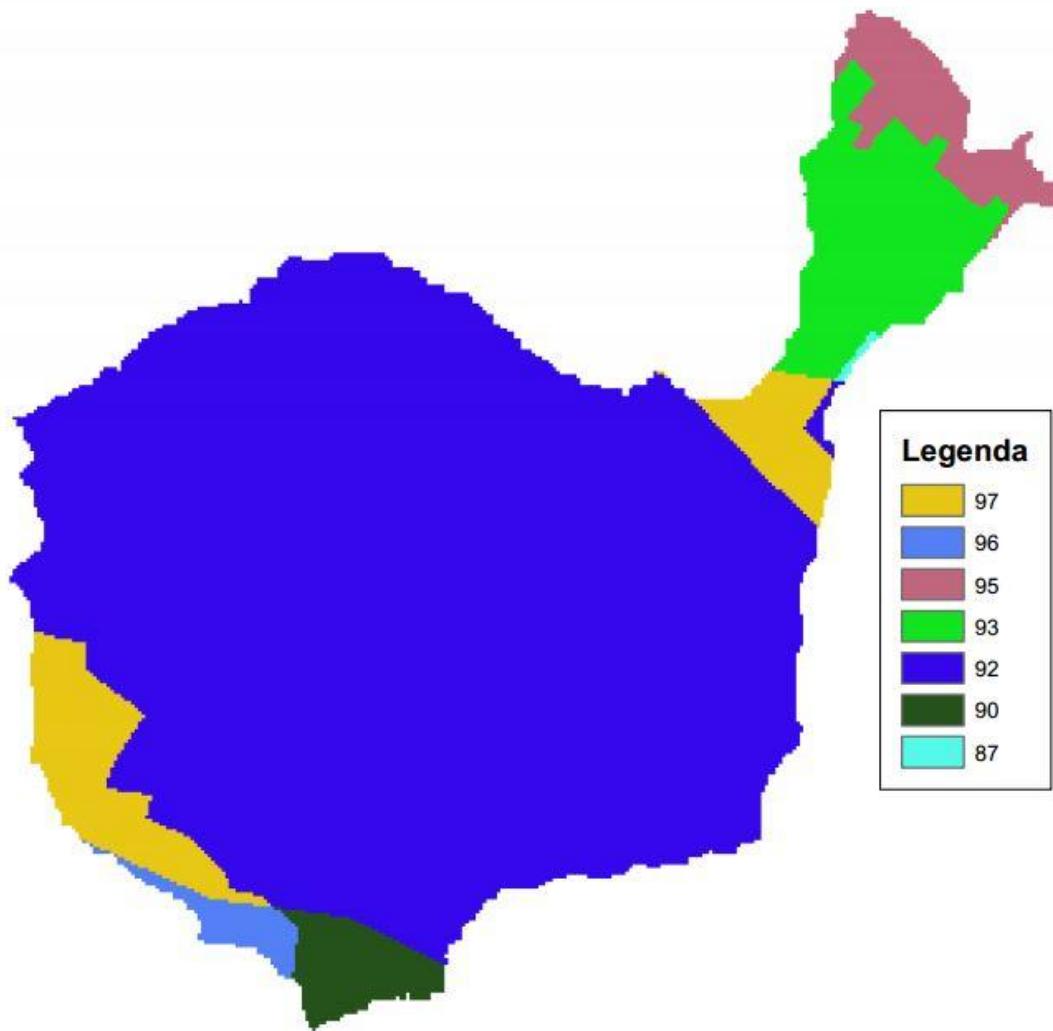
Tabella 13 - Valori di Curve Number (III) per le diverse classi di suolo

Nome Uso del Suolo	Gruppo A	Gruppo B	Gruppo C	Gruppo D
Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado	89	94	97	98
Seminativi in aree non irrigue	79	85	90	92
Sistemi colturali e particellari complessi	86	92	96	97

I valori desunti per le diverse classi di suolo sono stati ottenuti dalla lettura attuale, e sono stati scelti per la classe di saturazione III in quanto fenomeni di alta intensità piovosa non permettono quasi il deflusso nel sottosuolo, trasformandosi quasi interamente in scorrimento superficiale.

Il risultato dato dall'incrocio fra gli elementi sopra descritti si può osservare in Figura 18.

Figura 18 - Mappa del CN (III) relativa al bacino di studio



Il valore medio del CN calcolato sull'intero bacino risulta dunque di 92,28.

Il metodo proposto dall'SCS considera un idrogramma approssimato di forma triangolare che ha una fase crescente di durata t_a (tempo di accumulo) e una fase di esaurimento di durata t_e (tempo di esaurimento) e il cui volume, espresso in m^3 , ha la seguente espressione:

$$V = \frac{Q_p}{2} (t_a + t_e) = \frac{Q_p}{2} (t_b)$$

con t_b equivalente alla durata dell'evento di piena.

Sperimentalmente le analisi eseguite dall'SCS hanno evidenziato che nella fase crescente dell'idrogramma defluisce un volume idrico pari al 37.5% del volume totale V di deflusso, da cui ne consegue che la durata della fase crescente è pari a 0.375 volte la durata dell'evento di piena t_b e

pertanto:

$$t_b = 2.67 t_a$$

Utilizzando le formule di cui sopra, esprimendo il volume di deflusso V in mm, il tempo t_a in ore, l'area A del bacino in Km², si ottiene:

$$Q_p = 0.208 \frac{Q}{t_a} A$$

Per determinare t_a , nell'ipotesi di precipitazione di intensità costante di durata t_p e indicando con t_L il tempo di ritardo, si procede con la seguente relazione:

$$t_a = 0.5t_p + t_L$$

con t_p minore o uguale a 0.133 t_c e minore di 0.2 volte t_a , mentre per la determinazione del tempo di ritardo, t_L , l'SCS propone in particolare l'espressione:

$$t_L = 0.342 \frac{L^{0.8}}{s^{0.5}} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}$$

dove s rappresenta la pendenza media del bacino espressa in %, L la lunghezza dell'asta principale prolungata fino al disliviale espressa in Km.

Considerati eventi meteorici corrispondenti a differenti valori del tempo di ritorno, i valori della portata per il bacino in esame sono rappresentati nella seguente Tabella 14.

Tabella 14 - Valori di portata stimati con il metodo del Soil Conservation Service (SCS)

Tempo di ritorno	Fano	Senigallia
Q 200 anni [mc/s]	25.11	49.44
Q 100 anni [mc/s]	22.06	42.12
Q 50 anni [mc/s]	19.09	34.97
Q 25 anni [mc/s]	16.20	28.00
Q 10 anni [mc/s]	12.52	19.13
Q 5 anni [mc/s]	9.81	12.73

3.6.4 STIMA DEGLI IDROGRAMMI DI PIENA MEDIANTE MIKE PLUS MODULO RR (Rainfall-Runoff).

Le verifiche idrauliche delle opere progettate sono state eseguite utilizzando il software MIKE Plus 2025 sviluppato dal Danish Hydraulic Institute (DHI), in particolare il programma MIKE+ Rivers 1D con il modulo RR (Rainfall-Runoff) e modulo HD (Hydrodynamic).

MIKE Plus rappresenta l'evoluzione dei programmi Mike sviluppati da DHI a partire dagli anni '70, è una piattaforma completa con moduli e strumenti integrati progettati per modellare, analizzare e gestire vari aspetti dei sistemi idrici, tra cui reti di condotte, fiumi, aree di marea e altro ancora.

Nel caso in esame è stata utilizzata la sezione Rivers 1D di Mike +, piattaforma di modellazione versatile progettata per l'ingegneria fluviale, il controllo delle inondazioni, la gestione dei bacini idrografici e il ripristino ecologico, consente di sviluppare analisi monodimensionali, analizzare i flussi fluviali, valutare i cambiamenti idrologici e stimare il trasporto di inquinanti in modo più efficace.

Il modulo MIKE 1D River simula il flusso di fiumi, canali e alvei naturali definendo sezioni trasversali, rami fluviali e scabrezza del letto, modella briglie, tombini e ponti per un'analisi completa dei corsi d'acqua in esame.

Nel caso in esame sono stati ricostruiti gli idrogrammi di piena relativi alla portata al colmo stimata con i metodi riportati nei precedenti paragrafi mediante l'utilizzo del software MIKE + modulo RR. Tale modulo RR (afflussi-deflussi) consente, partendo dai dati meteorologici (pioggia, temperature, evapotraspirazione, ecc...), su bacini naturali o artificiali, di ricostruire attraverso l'utilizzo di modelli idrologici (NAM, UHM, Drift, ecc...) le portate idriche in assegnate sezioni di calcolo.

Nel nostro caso è stato utilizzato il modello idrologico UHM che implementa il metodo dell'idrogramma unitario mediante diverse formule di calcolo delle perdite idrologiche e della portata defluente tra cui il metodo SCS i cui parametri sono riportati nel precedente paragrafo 3.6.3.

La pioggia netta rappresenta la quantità di pioggia che raggiunge il corso d'acqua durante un evento, cioè la precipitazione totale meno la perdita. Durante un evento di pioggia, infatti, parte dell'acqua caduta si infiltra nel suolo, una grossa parte di tale acqua evapora o raggiunge la rete superficiale come deflusso sotterraneo dopo un lungo lasso di tempo dalla fine dell'evento, risulta quindi ragionevole, in questo tipo di modellazione idrologica, descrivere la maggior parte dell'infiltrazione come perdita.

La pioggia netta è quindi trasformata in deflusso nel corso d'acqua attraverso il metodo dell'idrogramma unitario che permette di utilizzare sia l'idrogramma adimensionale del metodo SCS sia qualsiasi idrogramma definito dall'utente e memorizzato in un database che gestisce anche le condizioni al contorno, ovvero le serie storiche dei dati registrati di precipitazione e di portata.

Il modello UHM si basa su tre metodi differenti per il calcolo della pioggia netta, tutti modelli a parametri concentrati, ovvero che considerano ciascun bacino come un'unità e quindi i parametri utilizzati rappresentano valori medi sul bacino. Tutti e tre i metodi, di seguito elencati, includono un fattore di aggiustamento areale che tiene conto dell'eventuale distribuzione non uniforme della precipitazione sul bacino:

Perdita proporzionale (di fatto come nel metodo razionale) in cui le perdite sono assunte proporzionali al tasso di precipitazione;

Perdita fissa iniziale e perdita costante che prevede che non si produca pioggia netta fino a quando la perdita iniziale, definita a priori dall'utente, non sia stata raggiunta. Di conseguenza la pioggia netta è generata solo quando il tasso di precipitazione è superiore a uno specifico tasso costante di perdita, in questo modo il metodo tiene conto del fatto che le perdite sono maggiori all'inizio

dell'evento di precipitazione;

Perdita con CN del SCS.

Per la determinazione della pioggia netta si è considerata la perdita calcolata con il metodo CN del SCS la cui procedura è riportata al precedente capitolo.

Il metodo proposto dall'SCS considera un idrogramma approssimato di forma triangolare che ha una fase crescente di durata t_a (tempo di accumulo) e una fase di esaurimento di durata t_b (tempo di esaurimento) e il cui volume, espresso in m³, ha la seguente espressione:

$$V = \frac{Q_p}{2} (t_a + t_e) = \frac{Q_p}{2} (t_b)$$

con t_b equivalente alla durata dell'evento di piena.

Sperimentalmente le analisi eseguite dall'SCS hanno evidenziato che nella fase crescente dell'idrogramma defluisce un volume idrico pari al 37.5% del volume totale V di deflusso, da cui ne consegue che la durata della fase crescente è pari a 0.375 volte la durata dell'evento di piena t_b e pertanto:

$$t_b = 2.67 t_a$$

Utilizzando le formule di cui sopra, esprimendo il volume di deflusso V in mm, il tempo t_a in ore, l'area A del bacino in Km², si ottiene:

$$Q_p = 0.208 \frac{Q}{t_a} A$$

Per determinare t_a , nell'ipotesi di precipitazione di intensità costante di durata t_p e indicando con t_L il tempo di ritardo (parametro che caratterizza un idrogramma unitario e definito come la distanza tra il baricentro dello ietogramma ed il picco dell'idrogramma triangolare), si procede con la seguente relazione:

$$t_a = 0.5t_p + t_L$$

con t_p minore o uguale a 0.133 t_c e minore di 0.2 volte t_a , mentre per la determinazione del tempo di ritardo, t_L , l'SCS propone in particolare l'espressione:

$$t_L = 0.342 \frac{L^{0.8}}{s^{0.5}} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}$$

dove s rappresenta la pendenza media del bacino espressa in %, L la lunghezza dell'asta principale prolungata fino al dislivello espresso in Km.

In alternativa una stima approssimata di t_L può essere fatta a partire da una stima del tempo di corriavazione t_c del bacino mediante la relazione (Ferro, 2001)

$$t_L = 0.6 \ t_c$$

Dove t_c è stato calcolato con la Formula di Giandotti riportata nei paragrafi precedenti (3.1).

Sulla base di quanto sopra esposto, al fine di procedere con una valutazione circa l'effetto delle opere di progetto, sono stati individuati tre idrogrammi di piena per portate con tempo di ritorno di 50 e 200 anni relativi alle suddivisioni dei bacini indicate nella Tavola denominata G1.2 BACINI SCOLANTI:

- l'idrogramma relativo al bacino del Rio Crinaccio, il cui contributo è stato inserito in testa al Rio Crinaccio;
- l'idrogramma relativo ai bacini collocati ad OVEST del Rio Crinaccio il cui contributo è stato inserito nel Canale di Valle che, unitamente al Rio Crinaccio deve smaltire la portata dell'intero sistema;
- l'idrogramma relativo ai bacini collocati ad EST del Rio Crinaccio, il cui contributo è stato inserito in testa al Canale di Monte.

I tre idrogrammi suddetti sono stati calcolati con il tempo di corriavazione del Rio Crinaccio mediante la formula di Giandotti.

Inoltre è stato calcolato un altro idrogramma con Tr_{50} anni per i bacini collocati ad EST del Rio Crinaccio considerando il proprio tempo di corriavazione stimato mediante la formula di Kirpich. Tale idrogramma è stato utilizzato per il dimensionamento del Canale di Monte ed inserito in testa a detto canale al post del precedente.

Gli idrogrammi sono stati tutti opportunamente calibrati utilizzando le portate al colmo calcolate nei precedenti paragrafi.

Gli idrogrammi risultanti utilizzati nella simulazione complessiva dell'intero sistema sono tre, come suddetto e sono riportati nelle successive Figura 19, Figura 20 e Figura 21 per il tempo di ritorno di 50 anni, Figura 22, Figura 23 e Figura 24 per il tempo di ritorno di 200 anni, mentre i punti di immissione nella rete di canali sono riportati nella Figura 26 seguente.

L'idrogramma utilizzato per il dimensionamento del Canale di Monte con il tempo di corriavazione di Kirpich è riportato in Figura 25.

Figura 19 - Idrogramma Tr50 in ingresso al Canale di Monte

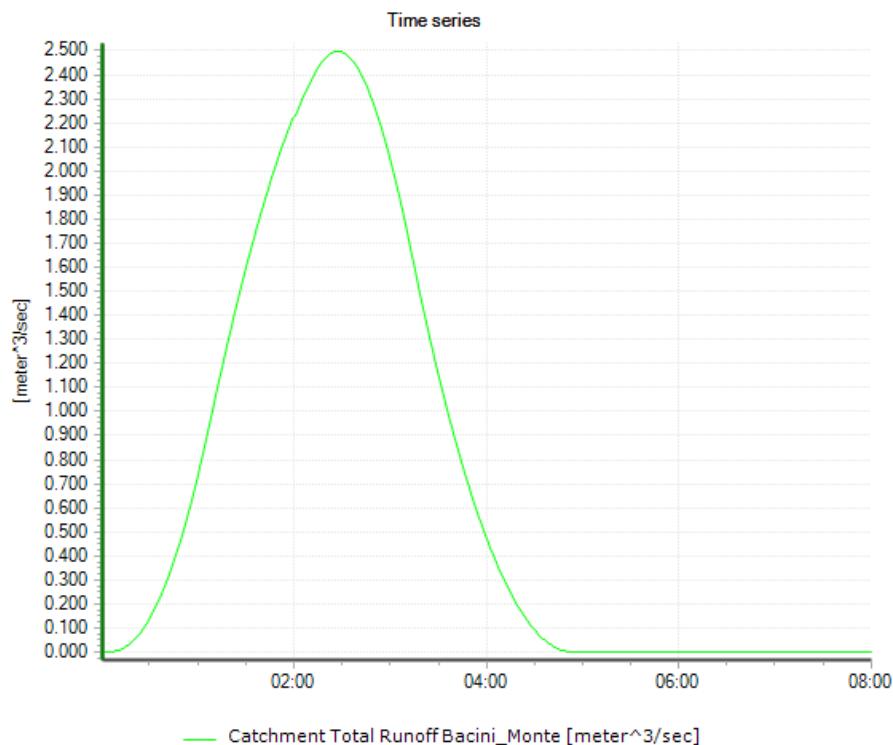


Figura 20 - Idrogramma Tr50 in ingresso al Rio Crinaccio.

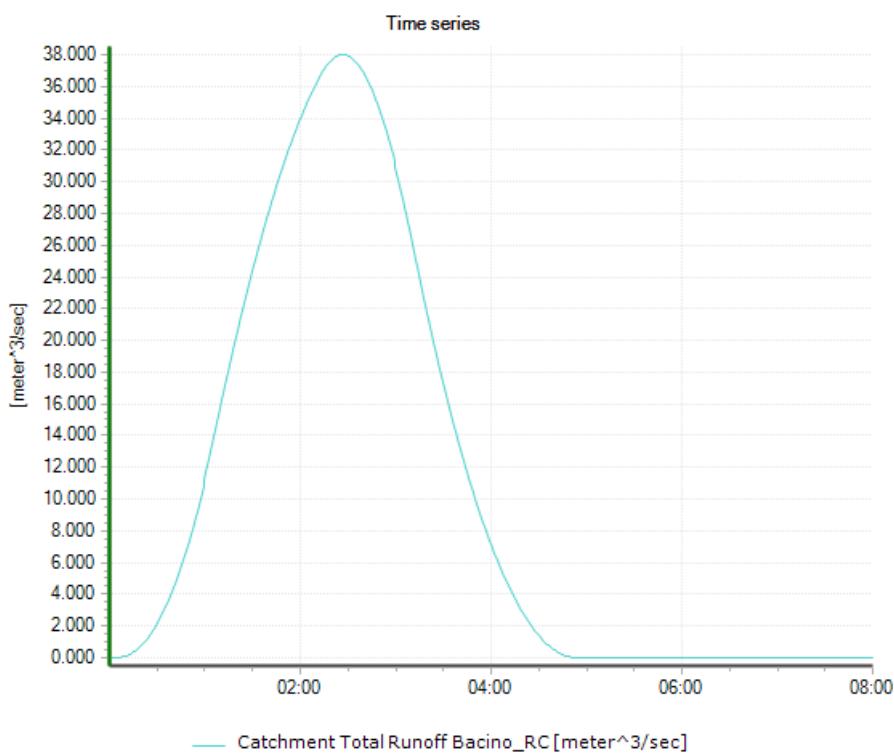


Figura 21 - Idrogramma Tr50 in ingresso al Canale di Valle

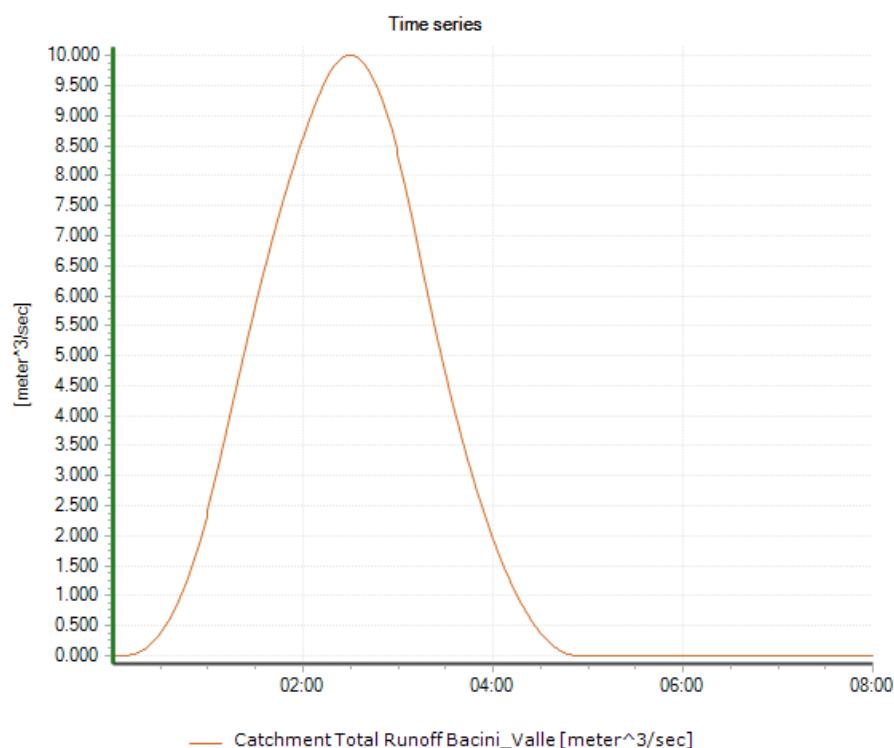


Figura 22 - Idrogramma Tr200 in ingresso al Canale di Monte

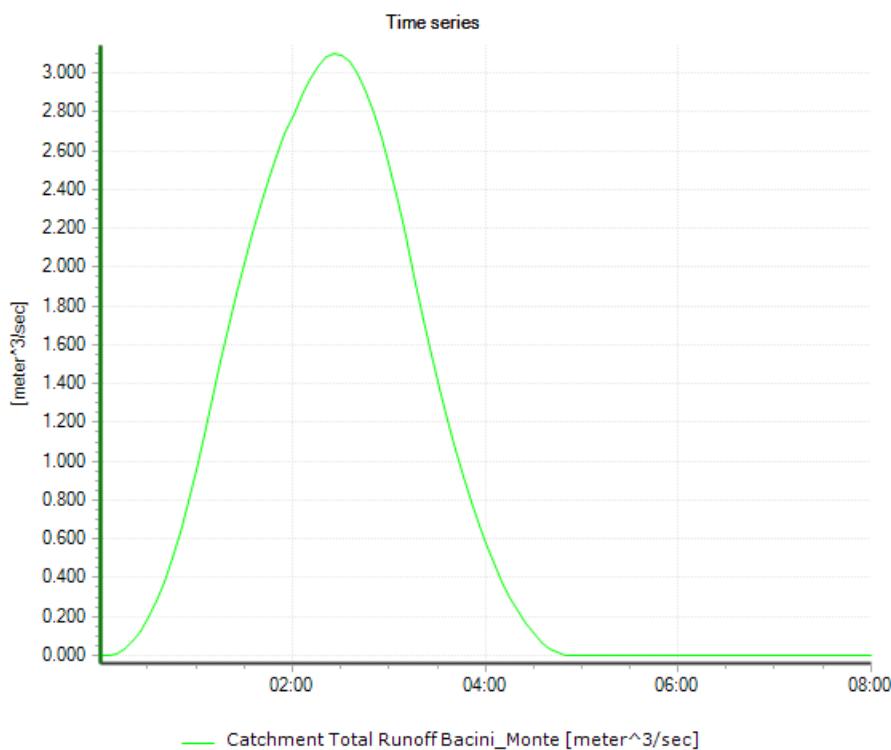


Figura 23 - Idrogramma Tr200 in ingresso al Rio Crinaccio

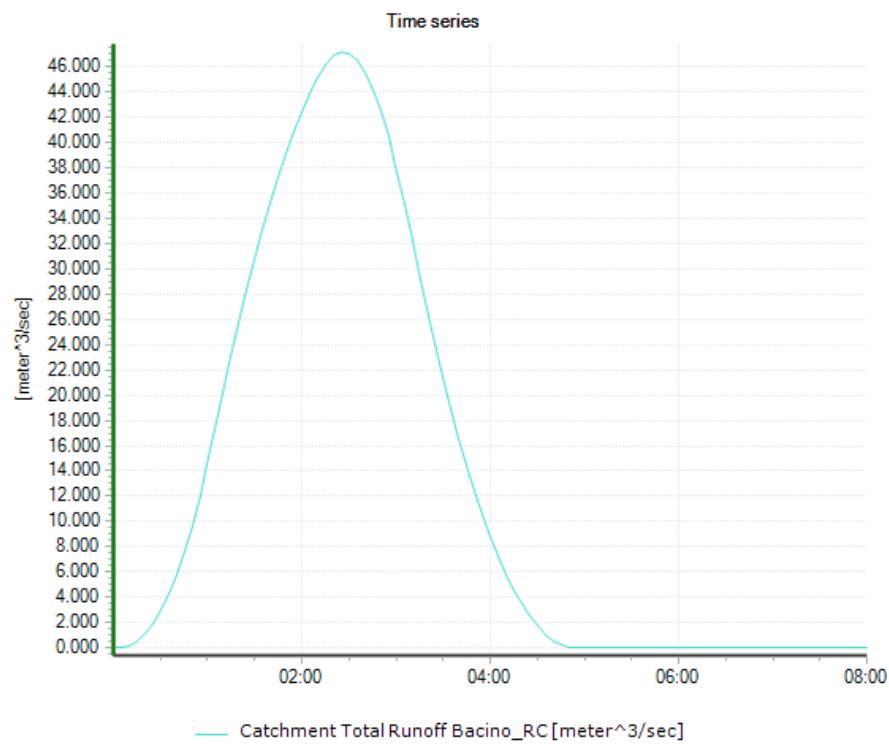


Figura 24 - Idrogramma Tr200 in ingresso al Canale di Valle

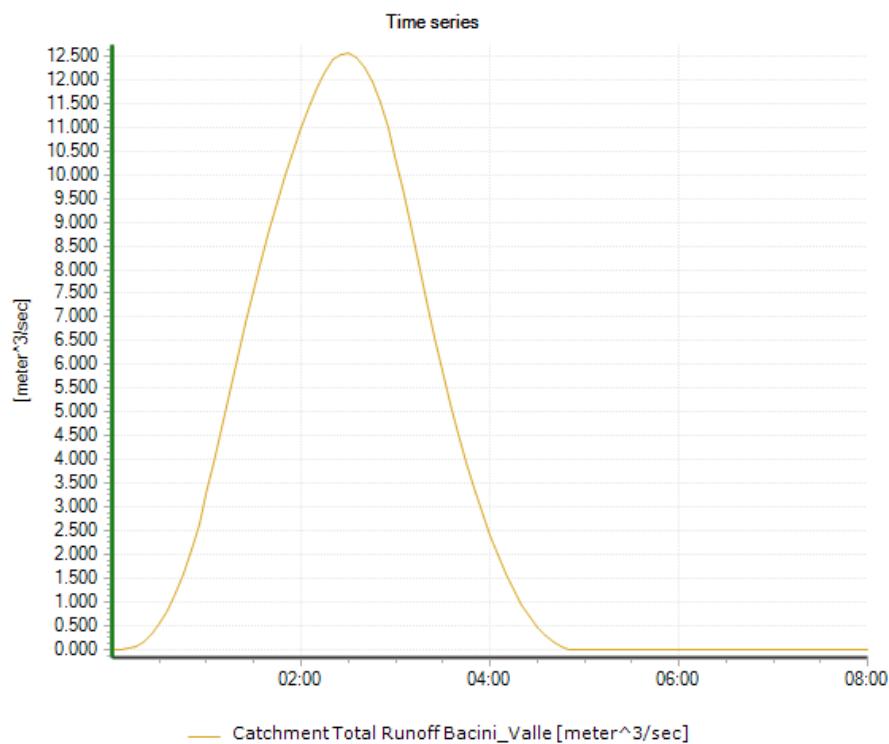


Figura 25 - Idrogramma Tr50 in ingresso al Canale di Monte calcolato con il Tc di Kirpich

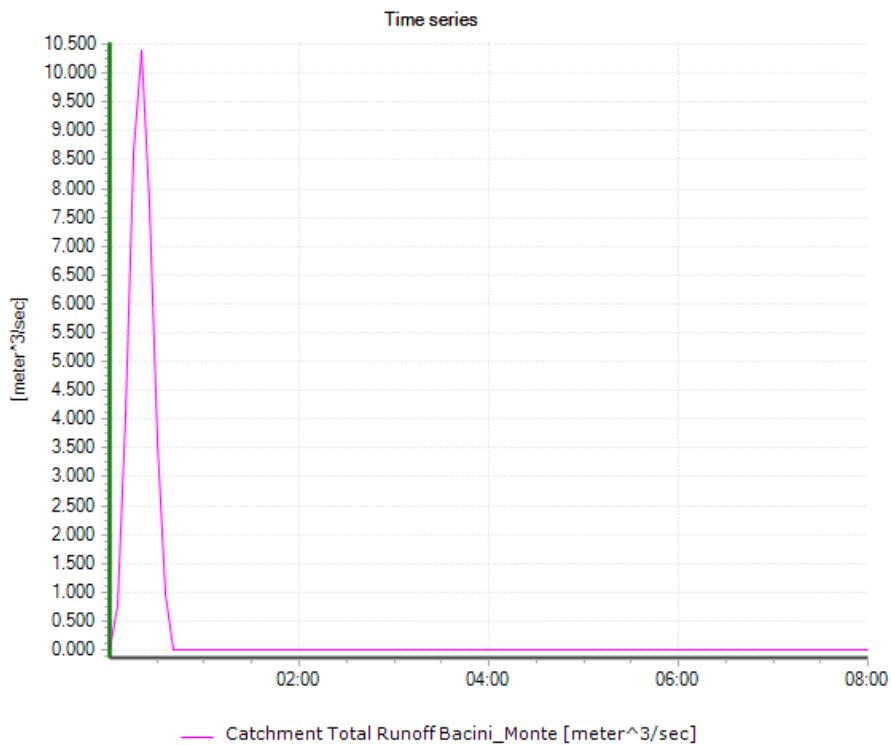


Figura 26 - Punti di immissione degli idrogrammi utilizzati nelle simulazioni



4 ANALISI IDRAULICA STATO DI PROGETTO

L'obiettivo del presente progetto è quello di riduzione del rischio idraulico per i territori circostanti l'area di intervento nonché una diminuzione delle portate che confluiscono nel Rio Crinaccio in tempo di piena andando a mitigare il rischio di esondazione del corso d'acqua e dell'abitato limitrofo, risolvendo il problema dell'attraversamento della sede ferroviaria e della Strada Nazionale Adriatica Sud con la realizzazione di un Canale di Gronda e di una cassa di espansione per intercettare le acque provenienti dalle aree di monte.

Il tracciato proposto e la previsione della cassa di espansione di cui ai presenti elaborati sono stati definiti sulla base delle indicazioni dell'Amministrazione e del gruppo di lavoro del Comune di Fano. Il Canale di Gronda, suddiviso tra parte di monte che si immette nel Rio Crinaccio e di valle che scolma il Rio Crinaccio stesso così come riportato nella sottostante Figura 27, si sviluppa da via Lago Maggiore con direzione Nord-Ovest fino all'intersezione con il Rio Crinaccio interferendo nel tratto iniziale con l'ipotetico ingombro della nuova Strada Complanare non oggetto del presente intervento e comunque facilmente risolvibile nell'ambito dei futuri interventi della complanare stessa.

Figura 27 - Tracciato Canale di Gronda e area cassa di espansione



Proseguendo lungo il Rio Crinaccio per un tratto di circa 120 m, è prevista la realizzazione di una bocca tarata di regolazione e controllo delle portate di dimensioni 1.50 x 1.50 m dotata di sfioratore di emergenza di lunghezza pari a circa 60 m e la realizzazione del manufatto di sfioro caratterizzato

dalla lunghezza di circa 20 m dal Rio Crinaccio al Canale di Gronda di valle delle portate eccedenti rispetto alla capacità di deflusso della bocca tarata.

Lo sfioratore di emergenza è stato dimensionato tenendo anche conto della condizione, del tutto improbabile, della completa occlusione della luce del tombino.

Il Canale di Gronda di valle si sviluppa poi in direzione Nord-Ovest fino all'area di proprietà comunale all'altezza di via Milo, qui entra all'interno dell'area destinata alla realizzazione della cassa di espansione sviluppandosi in direzione Nord-Est dove, dopo aver attraversato la Strada Statale n.16 e la linea ferroviaria Bologna – Ancona, recapita nel Mare Adriatico.

Il Canale di Gronda, così come riportato negli elaborati grafici facenti parte del presente progetto, sarà realizzato parte in terra e parte in calcestruzzo armato, a sezione variabile parte a cielo aperto e parte tombinato.

Detto Canale è stato previsto, partendo da monte, tra via Lago di Bracciano e via Lago Maggiore direttamente in terra in sterro a sezione trapezoidale con base pari a circa 3.00 m e altezza variabile. Il tratto compreso tra via Lago Maggiore ed il Rio Crinaccio è previsto in calcestruzzo armato con sezione scatolare chiusa di dimensione 3.00 x 2.50 m per i primi 100 m circa e con sezione aperta 3.00 x h var per la restante parte fino al Rio Crinaccio.

Anche per il tratto compreso tra il Rio Crinaccio e la cassa di espansione il Canale è previsto in calcestruzzo armato con sezione scatolare parte chiusa con dimensioni 4.00 x 2.50 m e parte a cielo aperto con dimensioni 4.00 m x h var.

Il tratto all'interno della cassa di espansione fino all'intersezione con la Strada Statale n.16 è previsto in trincea in terra con sezione trapezoidale avente base 3.00 m e altezza variabile.

Per quanto riguarda il tratto terminale compreso tra la Strada Statale n.16 ed il recapito a mare, è prevista la realizzazione del Canale in calcestruzzo armato con sezione scatolare 4.50 m x h var fatta eccezione per l'attraversamento della Strada Statale n.16 e della Rete Ferroviaria Bologna - Ancona fino al parcheggio esistente in via Ammiraglio Cappellini nei quali è prevista una sezione scatolare chiusa 4.50 x 2.00 m.

La regolazione delle portate della cassa sul Canale di Gronda avverrà mediante una bocca tarata di regolazione e controllo di dimensioni 1.50 x 1.50 m dotata di sfioratore di emergenza caratterizzato da una lunghezza di circa 80 m.

Lo sfioratore di emergenza è stato dimensionato tenendo anche conto della condizione, del tutto improbabile, della completa occlusione della luce del tombino.

Nell'area della cassa di espansione è prevista la realizzazione di un'arginatura perimetrale per innalzare le quote del terreno in sponda fino a quota pari a circa 7.40 m s.l.m.m.

L'intervento sarà realizzato mediante scotico superficiale di strato vegetale e stesura del nuovo materiale che andrà compattato e omogeneizzato per starti successivi di 20 - 30 cm con energia pari a quella Proctor Standard, in maniera tale da raggiungere un grado di addensamento pari al 95% del maximum e $\pm 2\%$ dell'umidità all'optimum, determinati con prove di costipamento in laboratorio.

I materiali utilizzati per la realizzazione dei rilevati dovranno avere caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni di tipo A-6 con contenuto in sabbia non inferiore al 15% o di tipo A-4 con contenuto in sabbia non superiore al 50% e coefficiente di permeabilità K (orizzontale e verticale per il reticolo di flusso) inferiore a $10^{-6/-7}$ m/s. Utilizzando terreni argillosi e limosi, con buona stabilità su pendenze dolci, andrà scartata ove presente, la frazione organica, ricordando che, a causa degli agenti atmosferici o per fenomeni di filtrazione/capillarità, si possono produrre ritiri e/o rigonfiamenti con formazione di fessurazioni e discontinuità tali da dar luogo a sedimenti differenziali inattesi, deformazione e smottamenti, nonché pericolose infiltrazioni.

Per quanto riguarda le aree di transizione tra tombini e canale a cielo aperto, si sono individuati interventi di ingegneria naturalistica quali rivestimenti costituiti per esempio da massi ciclopici che consente quindi di seguire facilmente la forma dell'alveo componendo fra loro i diversi elementi.

Gli scopi principali del rivestimento possono pertanto essere riassunti in questo modo:

- Miglioramento della stabilità delle scarpate e del corpo arginale;
- Difesa dall'erosione;
- Aumento dell'officiosità idraulica del corso d'acqua;
- Realizzazione di pareti a scabrezza prefissata.

I diversi tipi di rivestimenti individuati, essendo facilmente intasati dal trasporto solido del corso d'acqua, favoriscono la ricopertura da parte della vegetazione con un sicuro inserimento naturalistico ed un aumento della durata nel tempo.

Lungo i tratti di Canale, sia in terra sia in calcestruzzo armato sono previste delle opere di intercettazione dei canali di scolo dei fondi agricoli al fine di garantire la continuità idraulica delle aree.

Tra gli interventi di progetto è previsto il rifacimento dell'attraversamento del Rio Crinaccio in corrispondenza della Strada Statale n.16 mediante uno scatolare in calcestruzzo armato 4.50 x 2.00 m, nonché la riprofilatura dello stesso Rio nel tratto di monte, mentre nel tratto di valle è previsto il raccordo con la sezione in calcestruzzo esistente.

Inoltre è prevista la rimozione di parte della soletta in cemento presente nell'alveo del Rio Crinaccio in corrispondenza dell'Attraversamento della linea ferroviaria Bologna – Ancona.

Si specifica infine che rispetto al Canale emissario (Canale di Gronda di Valle) le portate di magra e di morbida che interessano il Rio Crinaccio proseguiranno sempre in modo indisturbato e naturale nel Rio Crinaccio verso la foce.

4.1.1 VERIFICA IDRAULICHE

Le verifiche idrauliche delle opere progettate sono state eseguite utilizzando il software MIKE Plus 2025 sviluppato dal Danish Hydraulic Institute (DHI), in particolare il programma MIKE+ Rivers 1D

con il modulo HD (Hydrodynamic).

MIKE Plus rappresenta l'evoluzione dei programmi Mike sviluppati da DHI a partire dagli anni '70, è una piattaforma completa con moduli e strumenti integrati progettati per modellare, analizzare e gestire vari aspetti dei sistemi idrici, tra cui reti di condotte, fiumi, aree di marea e altro ancora.

Nel caso in esame è stata utilizzata la sezione Rivers 1D di Mike +, piattaforma di modellazione versatile progettata per l'ingegneria fluviale, il controllo delle inondazioni, la gestione dei bacini idrografici e il ripristino ecologico, consente di sviluppare analisi monodimensionali, analizzare i flussi fluviali, valutare i cambiamenti idrologici e stimare il trasporto di inquinanti in modo più efficace.

Il modulo MIKE 1D River simula il flusso di fiumi, canali e alvei naturali definendo sezioni trasversali, rami fluviali e scabrezza del letto, modella briglie, tombini e ponti per un'analisi completa dei corsi d'acqua in esame.

Le verifiche idrauliche sono state effettuate con il modulo idrodinamico MIKE+ HD in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali descrivibile attraverso i diversi approcci dell'“onda cinematica”, dell'“onda diffusiva” e dell'“onda dinamica”.

L'adozione del programma di simulazione MIKE+ HD 1D 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.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.).

Nel caso di studio è stato utilizzato il modulo monodimensionale idrodinamico HD di simulazione del flusso in canali a pelo libero per studiare la propagazione dell'onda di piena in alveo.

Il modulo HD permette di descrivere le più comuni strutture idrauliche tra cui stramazzi, ponti, coperture, pompe e permette di simulare:

- 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 quasi - bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;

- nodi idraulici (biforazioni e confluenze).

La simulazione idrodinamica per verificare lo stato di progetto è stata sviluppata creando un modello costituito da tre River:

Il Rio Crinaccio:

- lunghezza pari a 1086 m;
- numero di sezioni 25 (indicate in Figura 29 con linee nere);
- numero di tombini 4 (indicati in Figura 28 con tondini azzurri) di seguito elencati:
 - tombino 10 valle della confluenza con il Canale di Valle (scatolare base 1.5 m, altezza 1.5 m)
 - tombino 7 SS16 (scatolare base 4.5 m, altezza 2 m)
 - tombino 8 ferroviario (sezione variabile)
 - tombino 9 Via Cappellini (scatolare base 6 m, altezza 2 m).

Canale di Monte:

- lunghezza pari a 500 m;
- numero di sezioni 19 (indicate in Figura 29 con linee nere);
- numero di tombini 1 (indicato in Figura 28 con tondino azzurro) di seguito elencato:
 - tombino 1 Via Lago Maggiore (scatolare base 3 m, altezza 2.5 m).

Canale di Valle:

- lunghezza pari a 1619 m;
- numero di sezioni 57 (indicate in Figura 29 con linee nere);
- numero di tombini 6 (indicati in Figura 28 con tondini azzurri) di seguito elencati:
 - tombino 2 (scatolare base 4 m, altezza 2.5 m)
 - tombino 3 Via Doria (scatolare base 4 m, altezza 2.5 m)
 - tombino 4 Via Millo (scatolare base 4 m, altezza 2.5 m)
 - tombino 11 cassa (scatolare base 1.5 m, altezza 1.5 m)
 - tombino 5 SS16 (scatolare base 4.5 m, altezza 2 m)
 - tombino 6 ferroviario e Via Cappellini (scatolare base 4.5 m, altezza 2 m).

Figura 28 - Posizione dei tombini (tondini azzurri)



Figura 29 - Posizione sezioni (linee nere)

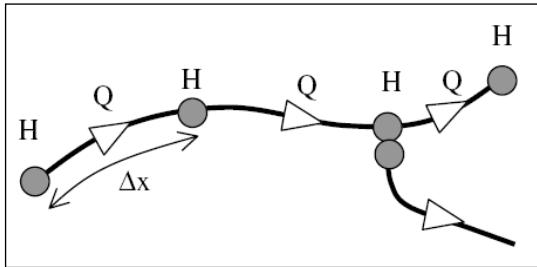


Ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h mentre ad ogni struttura un punto Q.

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 Figura 30.

Figura 30 – Distribuzione punti H e Q



In MIKE+ River le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne.

Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo e relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo o livello costante nella sezione finale).

Le condizioni utilizzate nel modello sono: due condizioni di portata variabile nel tempo rappresentate dagli idrogrammi calcolati per il tempo di ritorno di 50 e 200 anni inseriti in testa al Canale di Monte e al Rio Crinaccio, più un incremento di portata rappresentato sempre da un idrogramma Tr 50 e Tr 200 anni inserito a metà del canale di valle, di cui al paragrafo 3.6.4 precedente, per simulare il flusso d'acqua in ingresso. Nelle sezioni terminali del Rio Crinaccio e del Canale di Valle sono state inserite due condizioni di livello pari a 1.3 m. s.l.m. per simulare lo sbocco in mare in accordo con quanto assunto dal "Progetto di piano stralcio per l'assetto idrogeologico" PAI -Autorità interregionale di Bacino Marecchia - Conca che si ritiene cautelativamente appropriato anche per la foce del Rio Crinaccio (analogia condizione di livello mare è stata assunta nel "PROGETTO DELLA NUOVA ARGINATURA DEL TRATTO FINALE DEL FIUME METAURO FINO ALLA FOCE (2°CAT.) PER CONTENERE LA PIENA CON TEMPO DI RITORNO BISECOLARE - PROGETTO ESECUTIVO - I STRALCIO", SGAI s.r.l. 2006).

Per quanto riguarda i parametri caratteristici del modello geometrico, sono stati impiegati nella versione finale delle simulazioni valori di scabrezza di Manning desunti da dati di letteratura sulla base delle informazioni acquisite in fase di rilievo a terra, della consultazione di elaborati cartografici e fotografici e precisamente pari a $0.025 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ per le sezioni in terra e $0.017 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ per le sezioni rivestite.

4.1.2 EFFETTI DELLE OPERE DI PROGETTO

Dall'analisi dei risultati delle suddette simulazioni sono stati estratti i livelli e le portate di massima piena per i tempi di ritorno di 50 anni (Tabella 15) e 200 anni (Tabella 16) in sezioni significative del sistema di canali, ad esempio nelle sezioni poste a monte degli attraversamenti e nelle sezioni poste a monte e a valle delle confluenze per stimare le variazioni di portata .

Tabella 15 - Valori di livelli e portate in sezioni significative per simulazione con tempo di ritorno di 50 anni (SP_06_rr_tr50)

TRATTI DI CANALE	SEZIONI	POSIZIONE	LIVELLO MAX. [m] Tr50 (SP_06_rr_tr50)	PORTATA MAX [m^3/s] Tr50 (SP_06_rr_tr50)	FRANCO IDRAULICO [m] Tr50 (SP_06_rr_tr50)
CANALE DI MONTE					
canale_sp_monte,284.42	sez.13c	monte Tombino 1 Via L. Maggiore	9.39	2.52	1.44
CANALE DI VALLE					
canale_sp_valle,0	sez.27c	valle confluenza con Rio Crinaccio	9.29	30.97	
canale_sp_valle,41	sez.29c	monte Tombino 2	9.23	30.97	-0.44
canale_sp_valle,504	sez.47c	monte Tombino 3 Via Doria	7.09	30.97	0.16
canale_sp_valle,620	sez.52c	monte Tombino 4 Via Millo	6.67	30.97	0.34
canale_sp_valle,886	sez.62	interno cassa monte	5.80	36.42	
canale_sp_valle,1161	sez.73	monte Tombino 11 controllo cassa	5.80	12.56	-2.76
canale_sp_valle,1356	sez.S1	monte Tombino 5 SS16	1.35	12.38	0.35
canale_sp_valle,1442.33	sez.S4	monte Tombino 6 RFI - Via Cappellini	1.30	12.38	0.22
RIO CRINACCIO					
rio_crinaccio,105	sez.C1.2	monte confluenza canale di monte	9.32	37.97	
rio_crinaccio,137.11	sez.23	valle confluenza canale di monte	9.31	40.33	
rio_crinaccio,214.28	interp	monte confluenza canale di valle	9.29	40.31	
rio_crinaccio,240	sez.C1.3	monte Tombino 10 controllo Rio Crinaccio	9.29	9.34	-1.42
rio_crinaccio,874.94	sez.C8	monte Tombino 7 SS16	1.73	9.35	0.77
rio_crinaccio,963.98	sez.C13	monte Tombino 8 RFI	1.37	9.41	0.54
rio_crinaccio,981.54	sez.C15	monte Tombino 9 Via Cappellini	1.37	9.35	0.74

Tabella 16 - Valori di livelli e portate in sezioni significative per simulazione con tempo di ritorno di

200 anni (SP_06_rr_tr200)

TRATTI DI CANALE	SEZIONI	POSIZIONE	LIVELLO MAX. [m] Tr200 (SP_06_rr_tr200)	PORTATA MAX [m^3/s] Tr200 (SP_06_rr_tr200)	FRANCO IDRAULICO [m] Tr200 (SP_06_rr_tr50)
CANALE DI MONTE					
canale_sp_monte,284.42	sez.13c	monte Tombino 1 Via L. Maggiore	10.16	3.36	0.67
CANALE DI VALLE					
canale_sp_valle,0	sez.27c	valle confluenza con Rio Crinaccio	10.11	38.13	
canale_sp_valle,41	sez.29c	monte Tombino 2	10.08	38.13	-1.29
canale_sp_valle,504	sez.47c	monte Tombino 3 Via Doria	7.51	38.12	-0.26
canale_sp_valle,620	sez.52c	monte Tombino 4 Via Millo	6.99	38.12	0.02
canale_sp_valle,886	sez.62	interno cassa monte	6.41	41.91	
canale_sp_valle,1161	sez.73	monte Tombino 11 controllo cassa	6.41	13.94	-3.37
canale_sp_valle,1356	sez.S1	monte Tombino 5 SS16	1.37	13.71	0.33
canale_sp_valle,1442.33	sez.S4	monte Tombino 6 RFI - Via Cappellini	1.30	13.71	0.22
RIO CRINACCIO					
rio_crinaccio,105	sez.C1.2	monte confluenza canale di monte	10.13	47.09	
rio_crinaccio,137.11	sez.23	valle confluenza canale di monte	10.13	49.80	
rio_crinaccio,214.28	interp	monte confluenza canale di valle	10.11	49.77	
rio_crinaccio,240	sez.C1.3	monte Tombino 10 controllo Rio Crinaccio	10.11	11.63	-2.24
rio_crinaccio,874.94	sez.C8	monte Tombino 7 SS16	1.85	11.63	0.65
rio_crinaccio,963.98	sez.C13	monte Tombino 8 RFI	1.43	11.63	0.48
rio_crinaccio,981.54	sez.C15	monte Tombino 9 Via Cappellini	1.42	11.63	0.69

Come da indicazione dell'Amministrazione e del gruppo tecnico comunale, rispetto allo stato attuale in cui vi sono situazioni di criticità con frequenza di fatto stagionale, il sistema nel suo complesso è stato dimensionato per il tempo di ritorno di 50 anni a cui corrisponde, nella maggior parte dei casi, anche per i tombini, ancora un funzionamento a pelo libero con una luce libera di alcuni decimetri ovvero rigurgitato in pressione.

Anche per il tempo di ritorno di 200 anni la situazione non cambia in maniera sostanziale in termini di efficacia dell'intervento e di funzionamento a pelo libero dei tombini ovvero in pressione, con particolare riguardo a quelli lungo il Canale, a valle della cassa di espansione, nonché sugli analoghi manufatti lungo il Rio Crinaccio.

In generale l'assetto dimensionale delle opere nel suo complesso (piani di scorrimento, altezza e larghezza dei manufatti, franchi idraulici ecc.) ha dovuto tenere necessariamente in conto dei rigidi vincoli derivanti dall'assetto urbano ed infrastrutturale consolidato con particolare riferimento alla Strada Statale SS n. 16 ADRIATICA, alla linea ferroviaria BOLOGNA – ANCONA e alle condizioni di sbocco, nonché della possibilità di massimizzare in termini di costi – benefici l'effetto di mitigazione delle opere anche sulla base dei documenti preliminari alla progettazione e della loro cantierabilità nell'ambito del finanziamento disponibile prevedendo quindi, ove sostenibile dal punto di vista altimetrico, anche il funzionamento in pressione dei tombini.

In corso di evento, come da idrogrammi riportati nelle successive Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40, per i tempi di ritorno di 50 e 200 anni, in testa al Rio Crinaccio si ha una portata al colmo di circa 38 mc/s e 47 mc/s rispettivamente e a valle dell'immissione del Canale di Gronda di monte pari a circa 40 mc/s e 50 mc/s.

Il manufatto di regolazione e controllo collocato lungo il Rio Crinaccio lascia defluire lungo il Rio Crinaccio stesso una portata pari a circa 9 mc/s e 12 mc/s, mentre l'eccedenza viene derivata nel Canale di Gronda di valle. A questa si somma il contributo derivante dai bacini collocati ad ovest per complessivi 38 mc/s e 44 mc/s che entrano in cassa di espansione. A valle del manufatto di controllo della cassa di espansione proseguono circa 12 mc/s e 14 mc/s.

Figura 31 - Idrogramma Tr50 Rio Crinaccio sezione posta a valle della confluenza con il canale di

monte

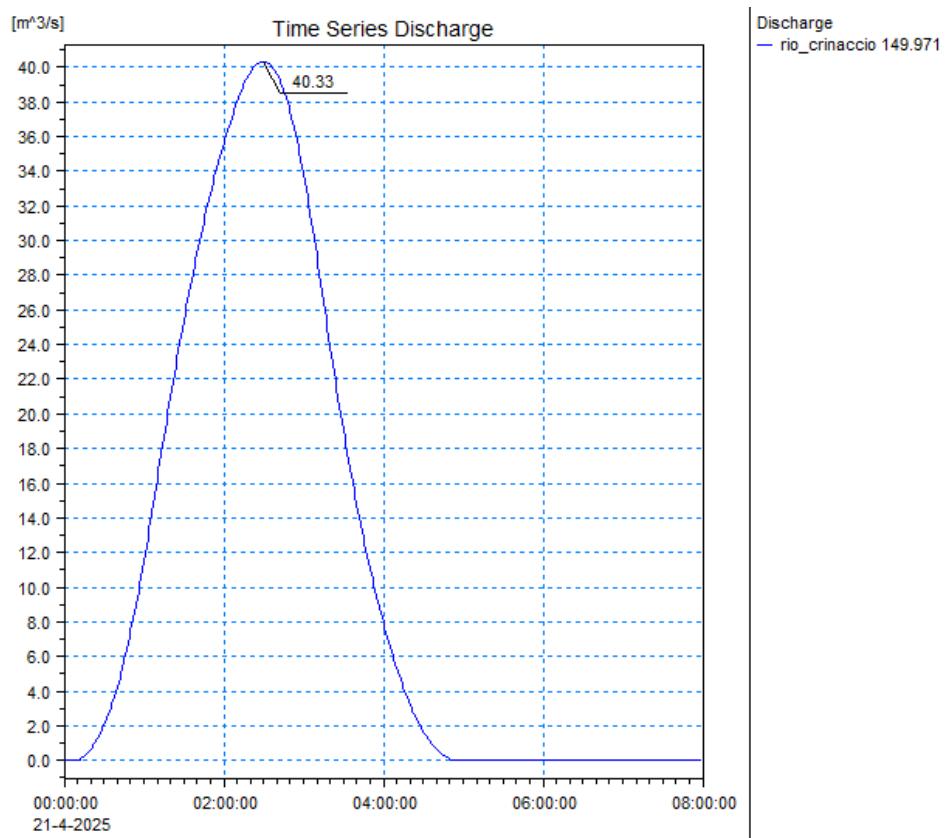


Figura 32 - Idrogramma Tr50 Rio Crinaccio sezione posta a valle del tombino di controllo

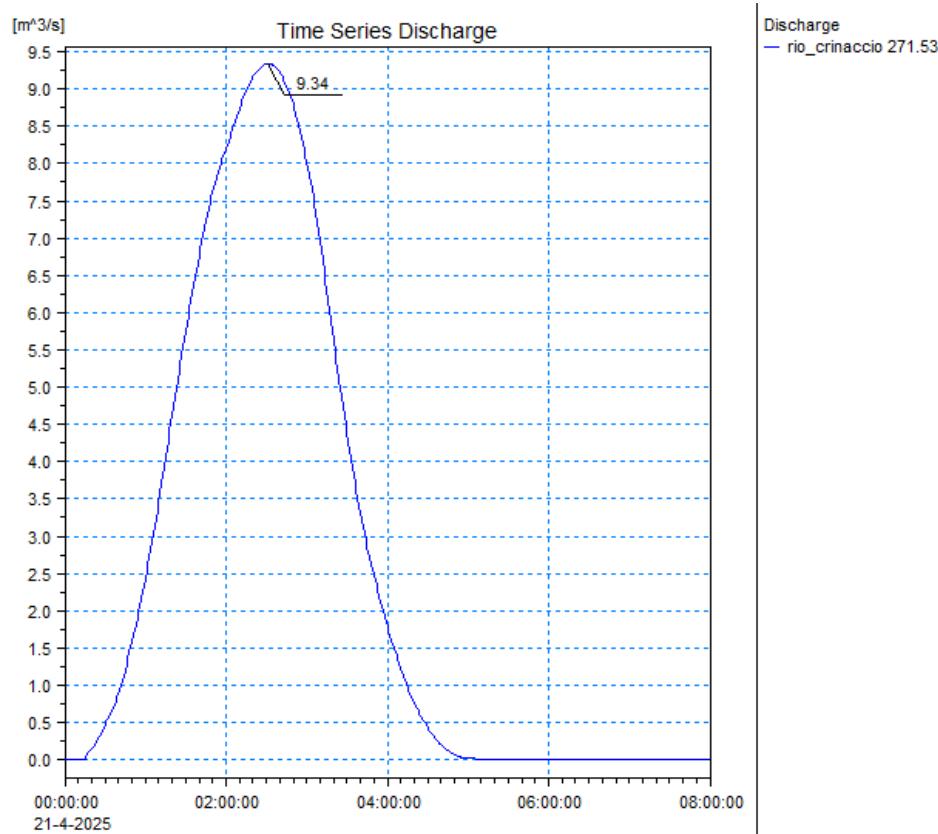


Figura 33 - Idrogramma Tr50 Canale di Valle sezione posta in testa al Canale

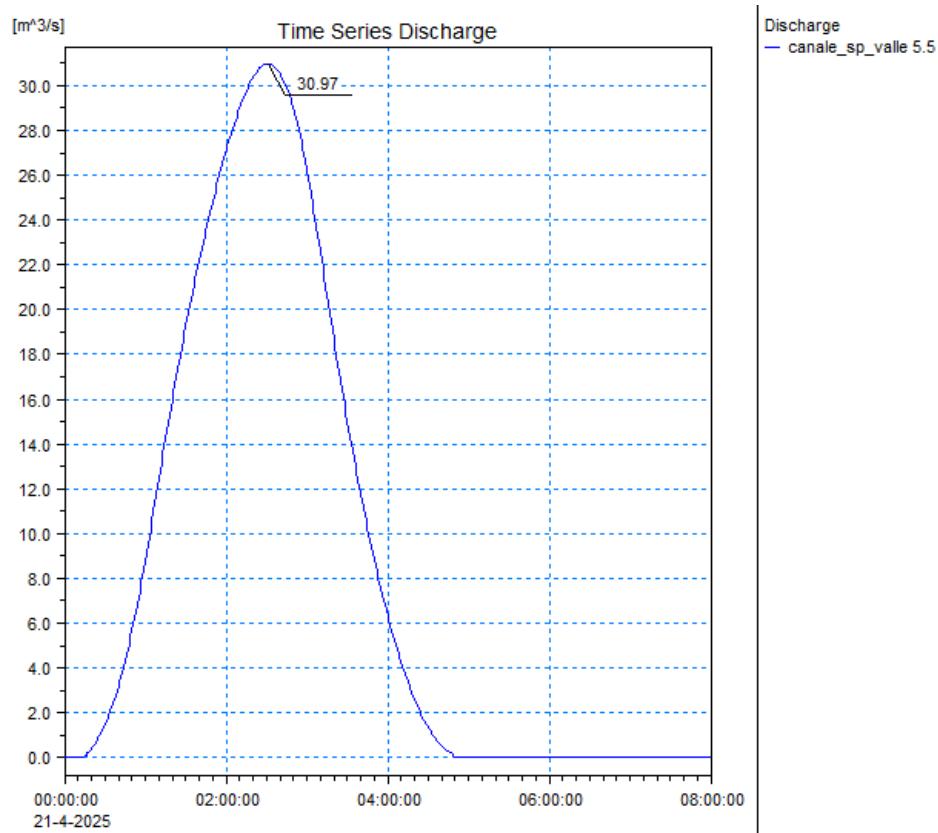


Figura 34 - Idrogramma Tr50 Canale di Valle sezione posta all'interno della cassa di espansione

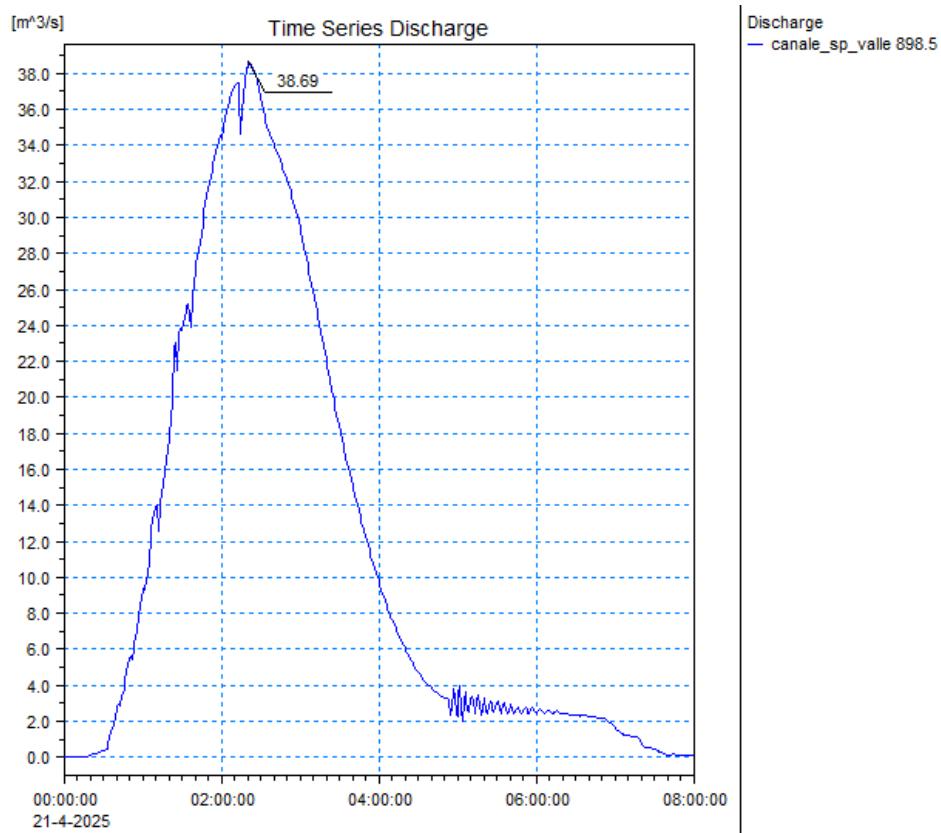


Figura 35 - Idrogramma Tr50 Canale di Valle sezione posta a valle del tombino di controllo della cassa di espansione

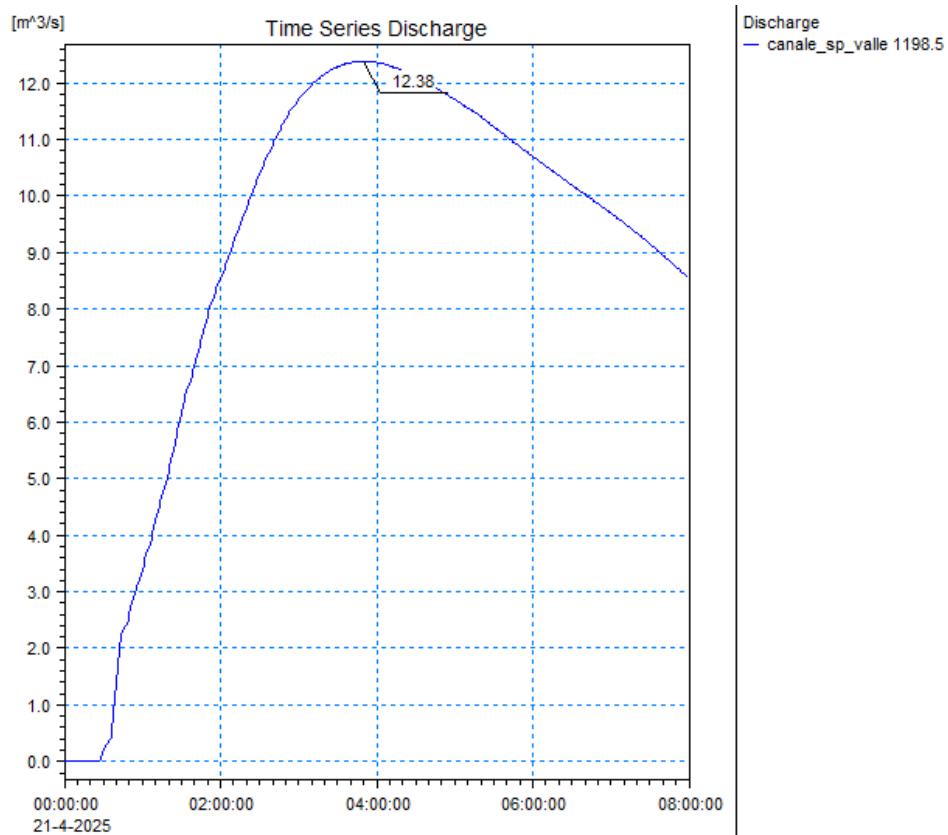


Figura 36 - Idrogramma Tr200 Rio Crinaccio sezione posta a valle della confluenza con il canale di monte

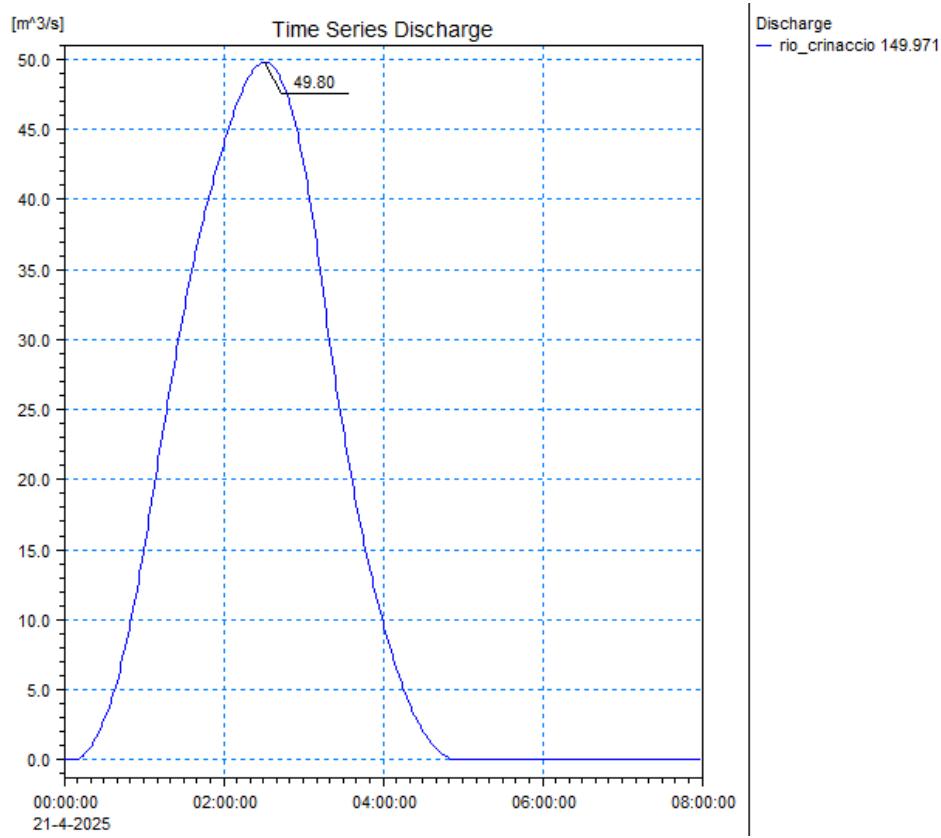


Figura 37 - Idrogramma Tr200 Rio Crinaccio sezione posta a valle del tombino di controllo

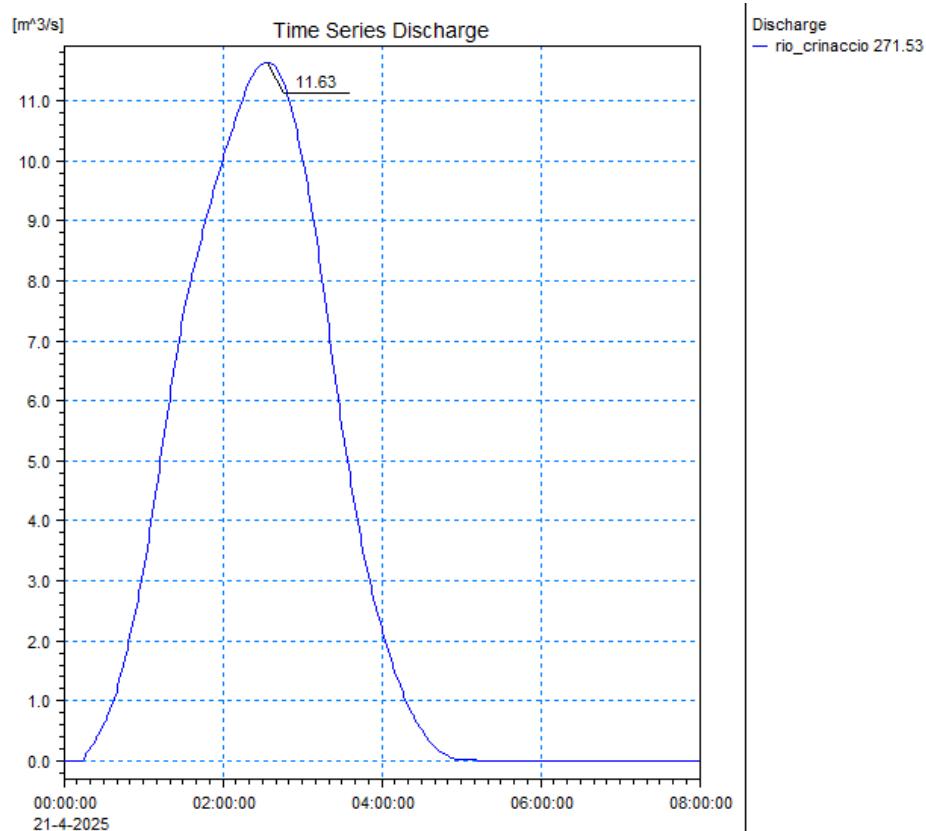


Figura 38 - Idrogramma Tr200 Canale di Valle sezione posta in testa al Canale

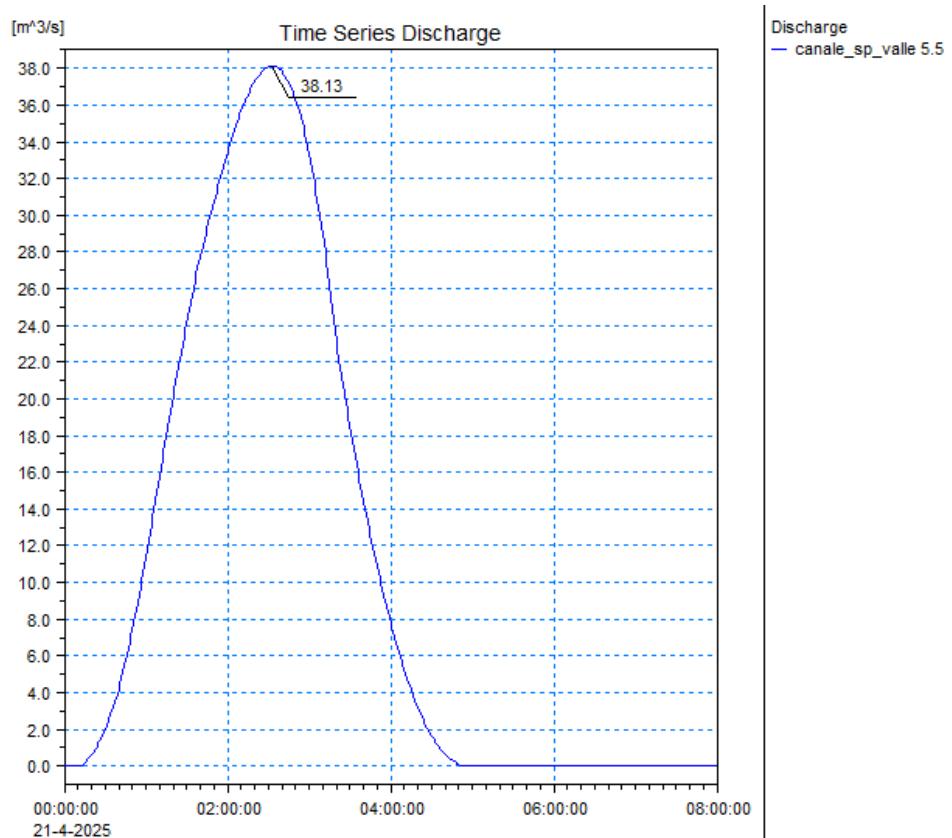


Figura 39 - Idrogramma Tr200 Canale di Valle sezione posta all'interno della cassa di espansione

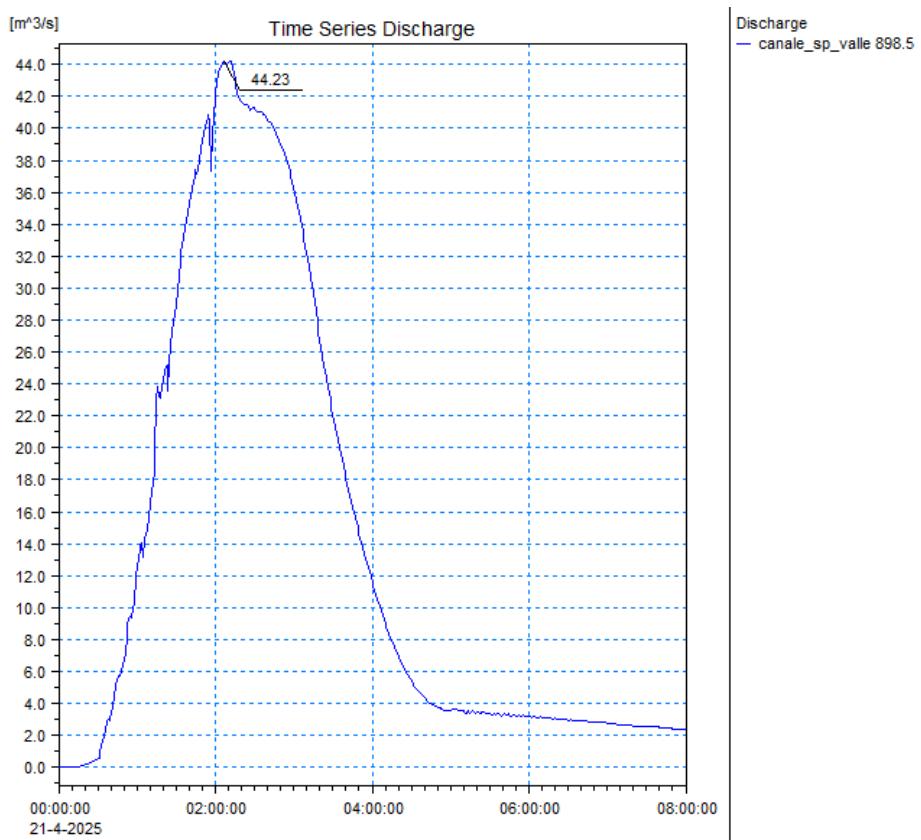
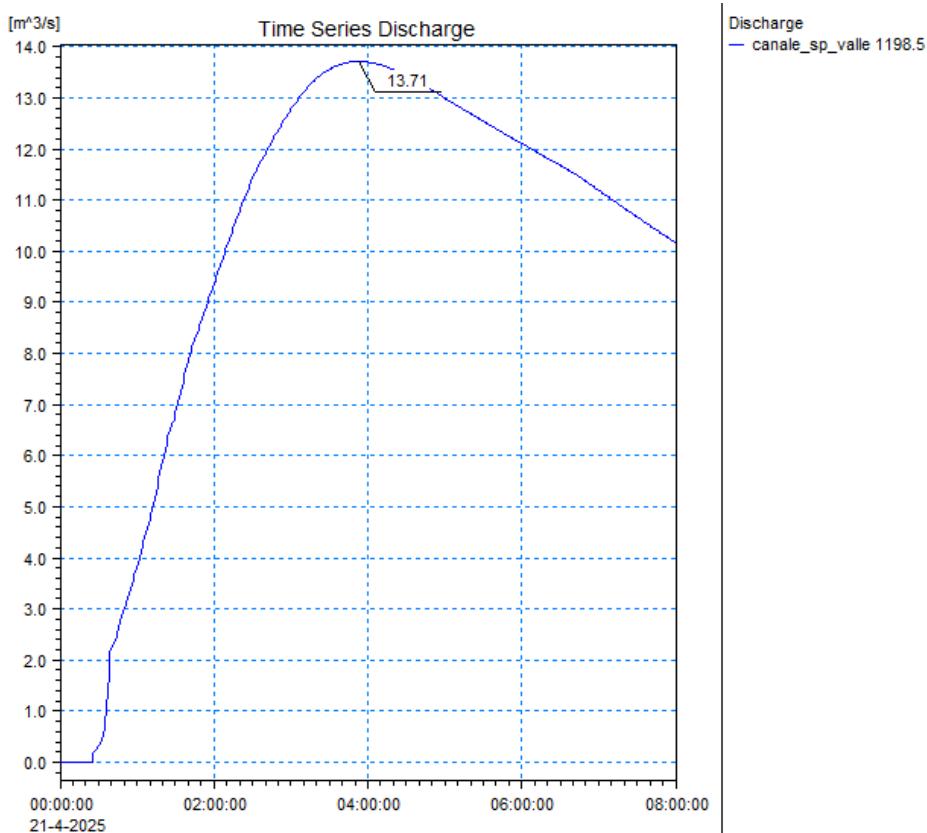


Figura 40 - Idrogramma Tr200 Canale di Valle sezione posta a valle del tombino di controllo della cassa di espansione



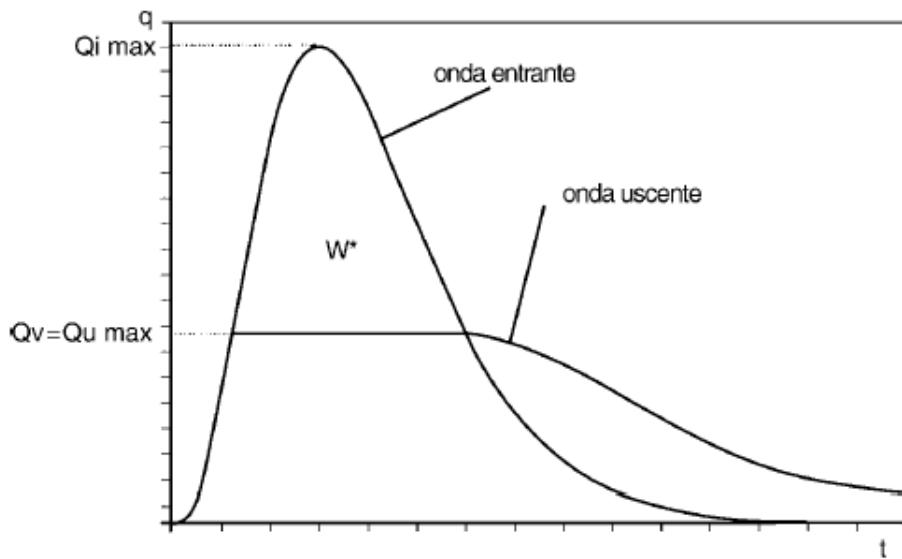
A fronte di un volume defluito in corso di evento pari a circa 400 000 mc per l'evento con Tr 50 anni e di circa 500 000 mc per l'evento con Tr 200 anni, in vasca vengono accumulati circa 175 000 mc e circa 225 000 mc rispettivamente.

Infatti nel caso in cui si verifichino eventi meteorici non compatibili con le caratteristiche dei ricettori presenti le conseguenze possono essere controllate o ridotte realizzando nel bacino una o più casse d'espansione che abbiano la funzione di invasare provvisoriamente una parte dei volumi idrici derivanti dagli eventi di piena, per restituirli poi al ricettore una volta terminato l'evento di piena.

Per il dimensionamento delle opere di laminazione, indipendentemente dal metodo utilizzato, è fondamentale il calcolo della portata di pioggia dato che da questa dipende, in massima parte, il volume da attribuire all'invaso nonché il valore delle portate cosiddetta di taglio ossia della portata che può proseguire verso valle in condizione di sicurezza.

Nel seguente schema Figura 41 viene rappresentato il funzionamento generale di una cassa di espansione.

Figura 41 - Funzionamento schematico di una cassa di espansione



dove:

$Q_{i,\text{max}}$ = portata massima dell'idrogramma di progetto;

$Q_v=Q_{u,\text{max}}$ = portata massima uscente dalla vasca, corrispondente alla portata massima transitabile a valle;

W^* = Volume invasato.

Al servizio della vasca, del tipo in linea, non sono previsti organi mobili di regolazione ma solamente opere fisse in modo che, anche in caso di improvviso stato di piena, non sia fondamentale la presenza di un presidio di controllo. In particolare è stata prevista un'arginatura con una bocca tarata che avrà il compito di far proseguire verso valle solamente la portata compatibile con il corso d'acqua.

Inoltre, in considerazione che il livello della piena cinquantennale e duecentennale in vasca si attesta attorno alla quota circa 5.80 m slmm e 6.40 m slmm, rispettivamente, volendo mantenere un franco di circa 1 m rispetto al suddetto massimo livello, la sommità arginale come riportato nel precedente paragrafo è stata collocata a quota 7.40 m slmm.

Di seguito nelle Figura 42, Figura 43, Figura 44 sono riportati i profili del massimo livello di piena (linea rossa) per tempo di ritorno di 50 anni e Figura 45, Figura 46 e Figura 47 i profili del massimo livello di piena (linea rossa) per tempo di ritorno di 200 anni dei tre tratti di Canale.

Di seguito nelle Tabella 17, Tabella 18 e Tabella 19 sono riportati i tabulati di calcolo con livelli, portate e velocità sia per tempo di ritorno di 50 anni che per quello con tempo di ritorno di 200 anni nelle sezioni dei tre tratti di Canale.

Figura 42 - Andamento dei massimi livelli di piena idrogramma con $Tr = 50$ anni (linea rossa) tratto Canale di monte

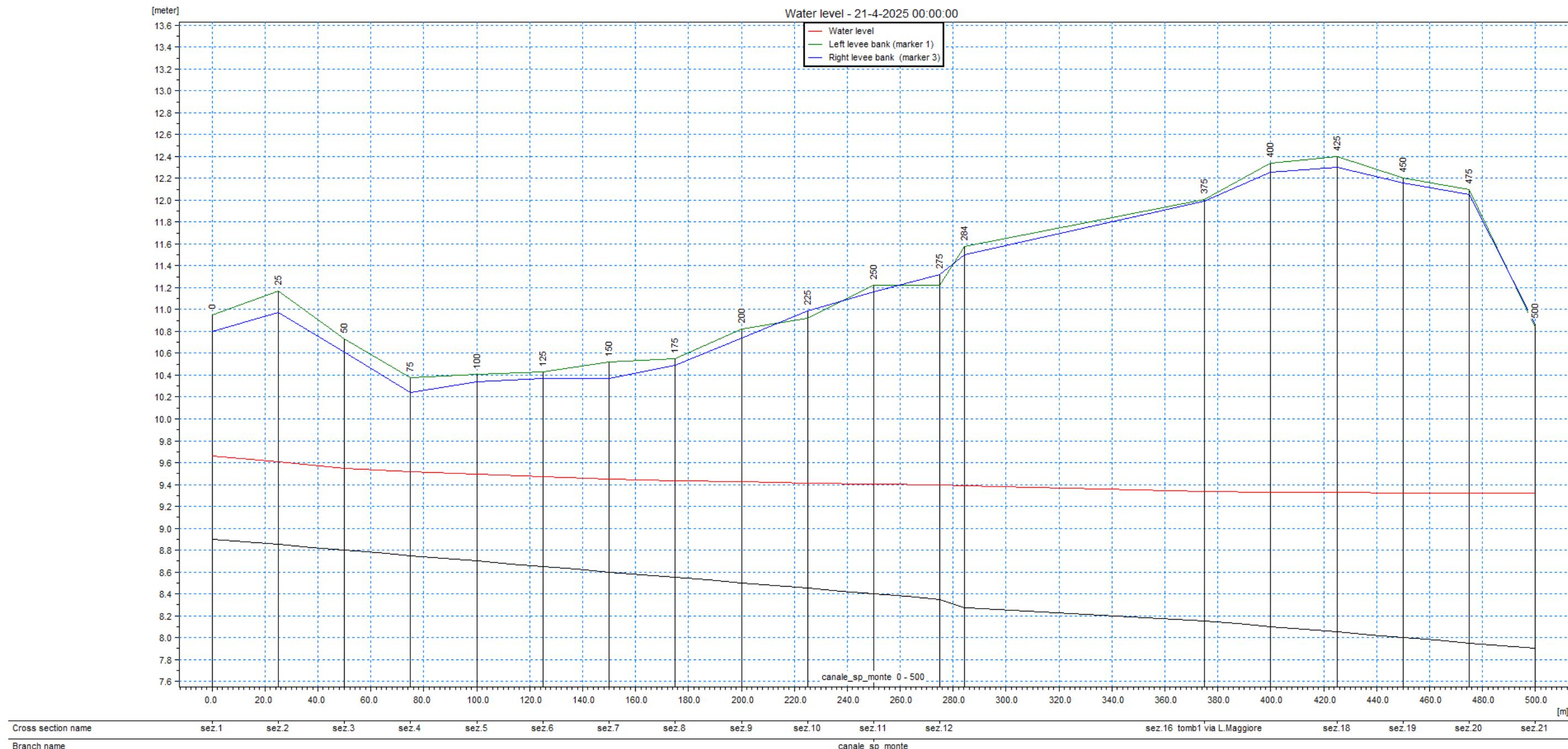


Figura 43 - Andamento dei massimi livelli di piena idrogramma con $Tr = 50$ anni (linea rossa) tratto Canale di valle

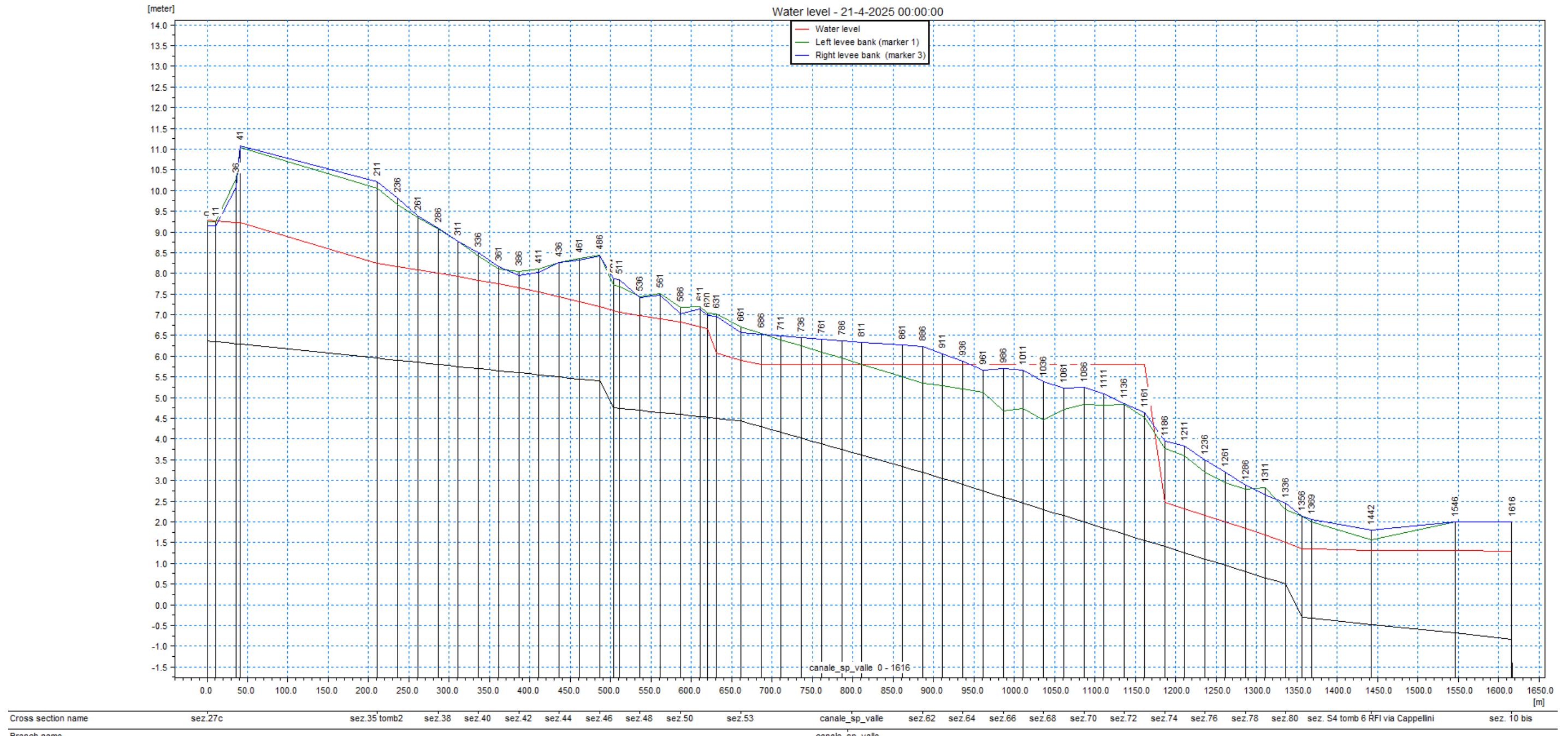


Figura 44 - Andamento dei massimi livelli di piena idrogramma con $Tr = 50$ anni (linea rossa) tratto Rio Crinaccio

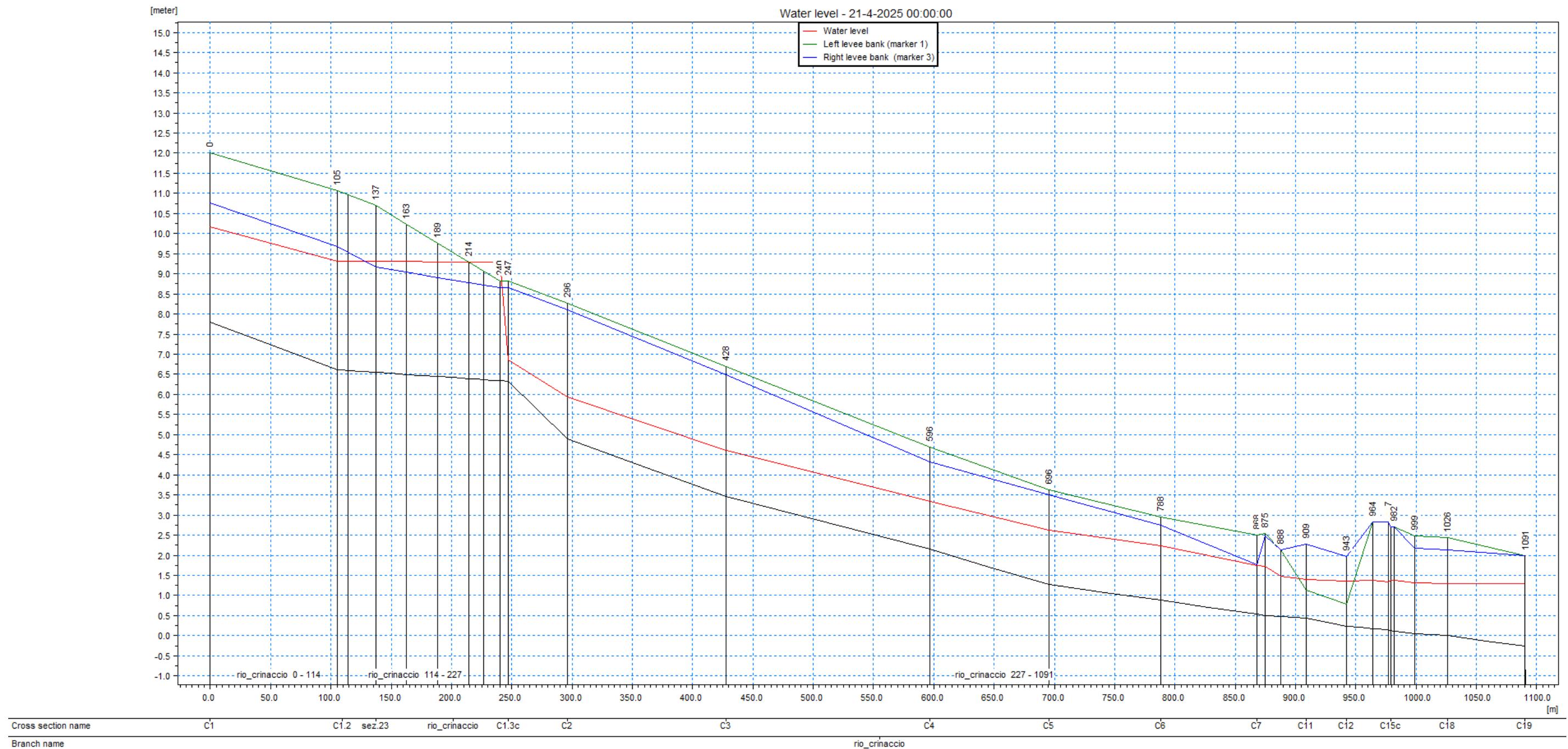


Figura 45 - Andamento dei massimi livelli di piena idrogramma con $T_r = 200$ anni (linea rossa) tratto Canale di monte

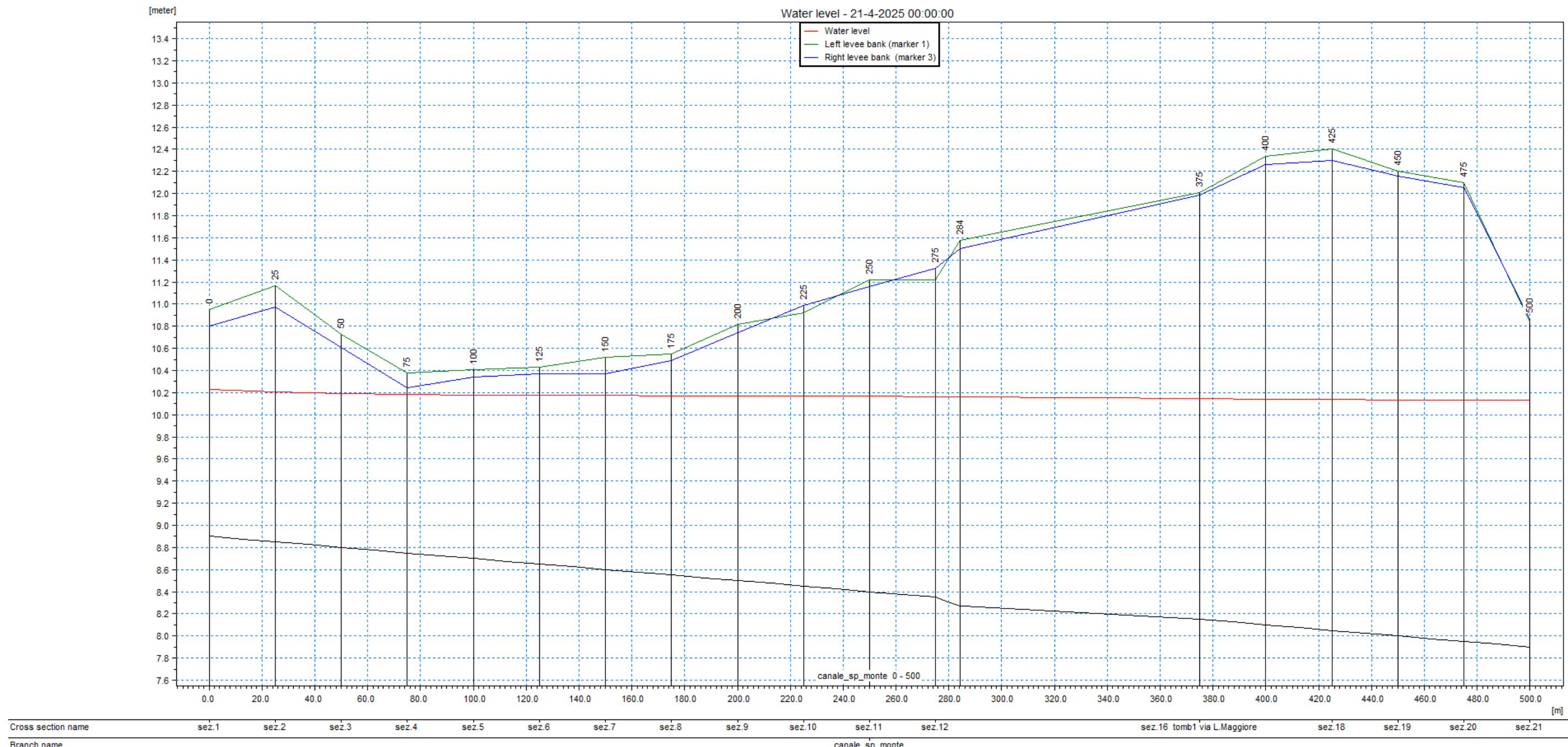


Figura 46 - Andamento dei massimi livelli di piena idrogramma con $Tr = 200$ anni (linea rossa) tratto Canale di valle

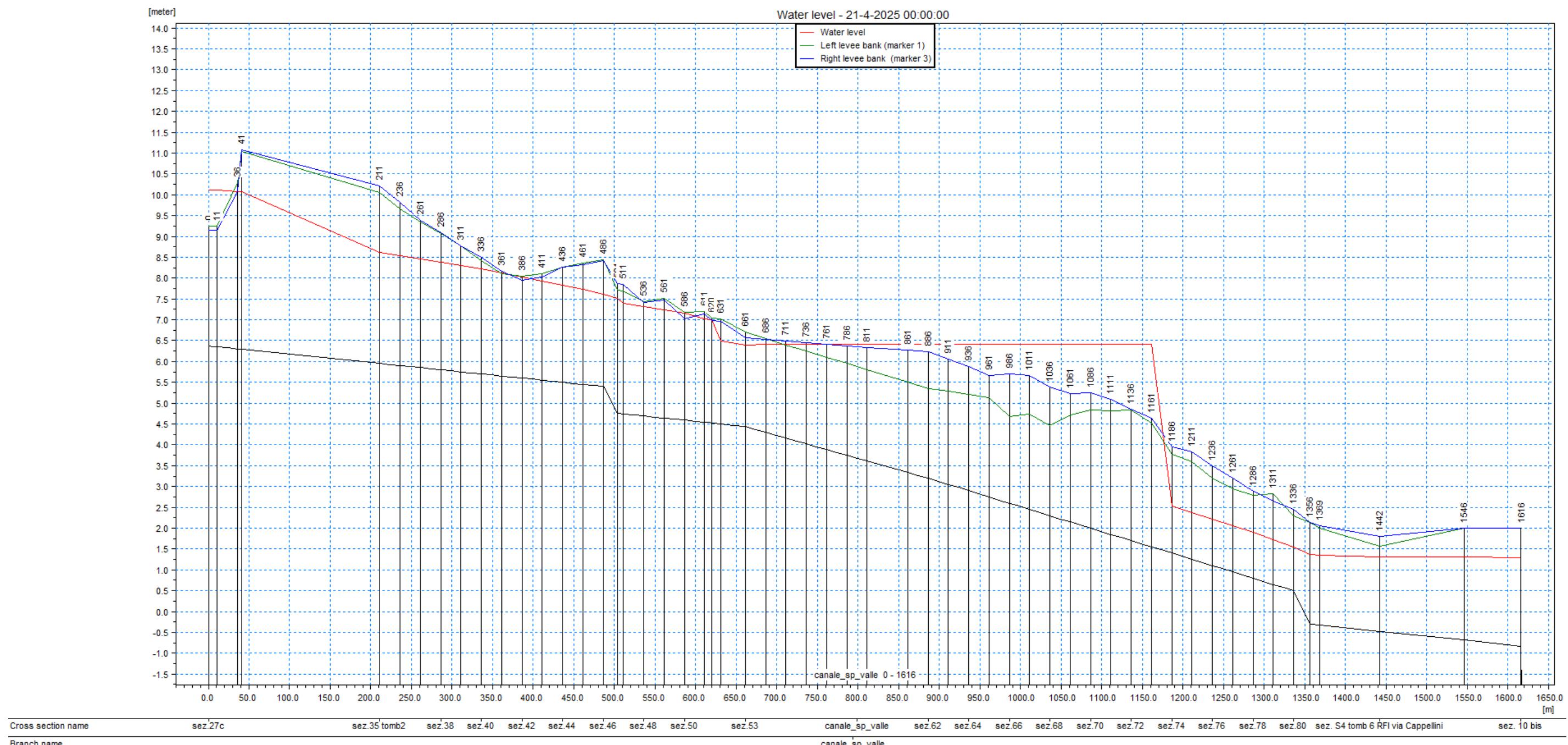


Figura 47 - Andamento dei massimi livelli di piena idrogramma con $Tr = 200$ anni (linea rossa) tratto Rio Crinaccio

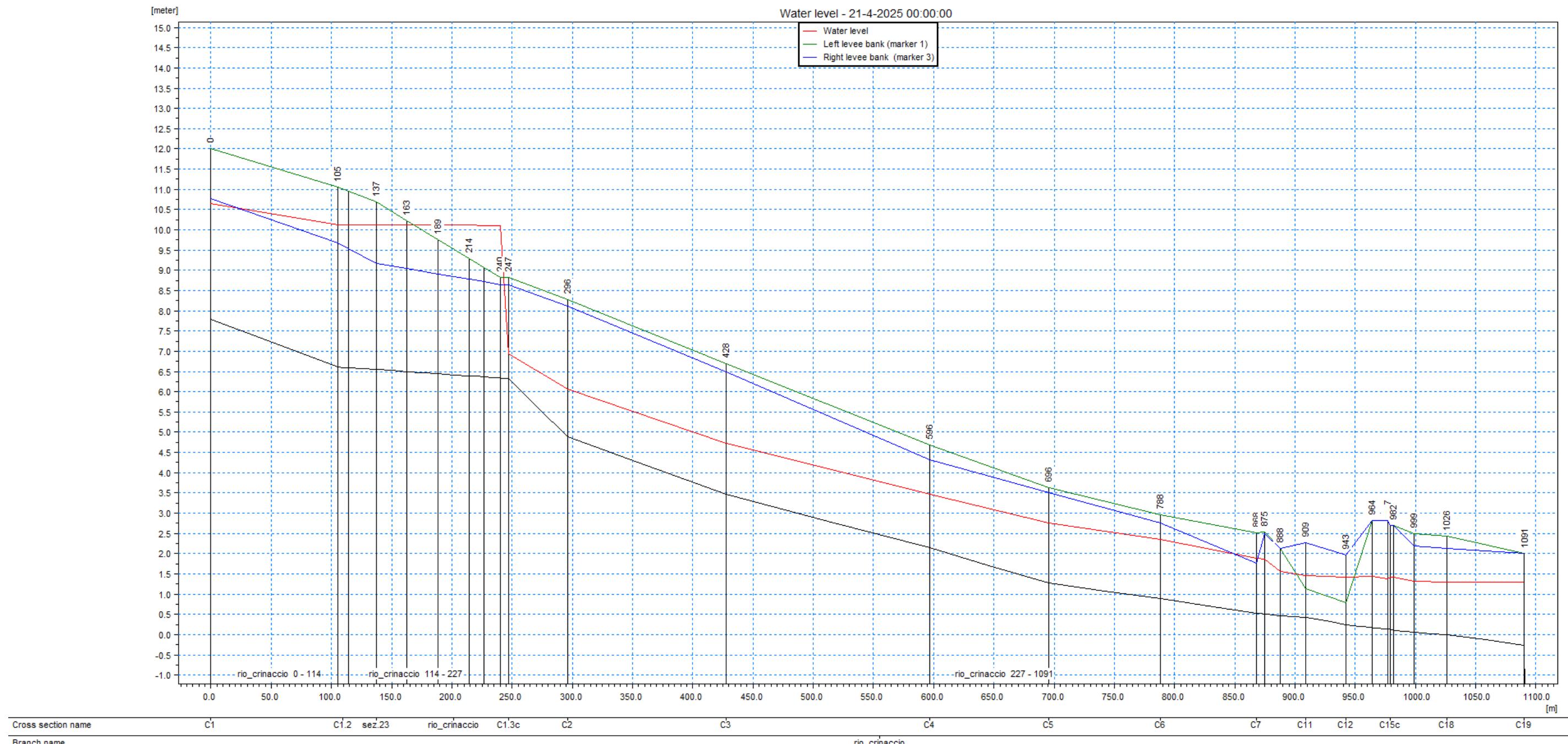


Tabella 17: Massimi livelli di piena idrogramma con $Tr = 50$ e 200 anni

ID-PROGRESSIVE	SEZIONI	LIVELLO MAX. [m] Tr50 (SP_06_rr_tr50)	LIVELLO MAX. [m] Tr200 (SP_06_rr_tr200)
rio_crinaccio 0	C1	10.16	10.65
rio_crinaccio 105	C1.2	9.32	10.13
rio_crinaccio 137.11	sez.23	9.31	10.13
rio_crinaccio 162.83	interp	9.31	10.12
rio_crinaccio 188.56	interp	9.30	10.12
rio_crinaccio 214.28	interp	9.29	10.11
rio_crinaccio 240	C1.3tom10controllo	9.29	10.11
rio_crinaccio 247	C1.3c	6.86	6.94
rio_crinaccio 296.06	C2	5.94	6.06
rio_crinaccio 427.58	C3	4.60	4.73
rio_crinaccio 596.46	C4	3.33	3.46
rio_crinaccio 695.7	C5	2.63	2.75
rio_crinaccio 788.19	C6	2.23	2.34
rio_crinaccio 867.93	C7	1.75	1.88
rio_crinaccio 874.94	C8 tomb7 SS16	1.73	1.85
rio_crinaccio 887.6	C10 tomb7 SS17	1.47	1.57
rio_crinaccio 909.2	C11	1.40	1.46
rio_crinaccio 942.5	C12	1.36	1.41
rio_crinaccio 963.98	C13 tomb8 RFI	1.37	1.43
rio_crinaccio 976.74	C14 tomb8 RFI	1.34	1.38
rio_crinaccio 979.14	C15c	1.37	1.42
rio_crinaccio 981.54	C15 tomb9 via Cappellini	1.37	1.42
rio_crinaccio 998.58	C17 tomb9 via Cappellini	1.31	1.31
rio_crinaccio 1026.28	C18	1.30	1.30
rio_crinaccio 1090.53	C19	1.30	1.30
canale_sp_valle 0	sez.27c	9.29	10.11
canale_sp_valle 11	sez.27	9.27	10.10
canale_sp_valle 36	sez.28	9.23	10.08
canale_sp_valle 41	sez.29c tomb2	9.23	10.08
canale_sp_valle 211	sez.35 tomb2	8.24	8.62
canale_sp_valle 236	sez.36	8.17	8.54
canale_sp_valle 261	sez.37	8.09	8.47
canale_sp_valle 286	sez.38	8.01	8.38
canale_sp_valle 311	sez.39	7.92	8.30
canale_sp_valle 336	sez.40	7.84	8.21
canale_sp_valle 361	sez.41	7.75	8.12
canale_sp_valle 386	sez.42	7.65	8.03
canale_sp_valle 411	sez.43	7.55	7.93

canale_sp_valle 436	sez.44	7.44	7.83
canale_sp_valle 461	sez.45	7.32	7.72
canale_sp_valle 486	sez.46	7.20	7.60
canale_sp_valle 504	sez.47c tomb3 via Doria	7.09	7.51
canale_sp_valle 511	sez.47 tomb3 via Doria	7.06	7.40
canale_sp_valle 536	sez.48	6.99	7.32
canale_sp_valle 561	sez.49	6.91	7.24
canale_sp_valle 586	sez.50	6.83	7.16
canale_sp_valle 611	sez.51	6.71	7.03
canale_sp_valle 620	sez.52c tomb4 via Millo	6.67	6.99
canale_sp_valle 631	sez.52 tomb4 via Millo	6.08	6.48
canale_sp_valle 661	sez.53	5.90	6.39
canale_sp_valle 686	interp	5.79	6.41
canale_sp_valle 711	interp	5.80	6.41
canale_sp_valle 736	interp	5.80	6.41
canale_sp_valle 761	interp	5.80	6.41
canale_sp_valle 786	interp	5.80	6.41
canale_sp_valle 811	interp	5.80	6.41
canale_sp_valle 861	interp	5.80	6.41
canale_sp_valle 886	sez.62	5.80	6.41
canale_sp_valle 911	sez.63	5.80	6.41
canale_sp_valle 936	sez.64	5.80	6.41
canale_sp_valle 961	sez.65	5.80	6.41
canale_sp_valle 986	sez.66	5.80	6.41
canale_sp_valle 1011	sez.67	5.80	6.41
canale_sp_valle 1036	sez.68	5.80	6.41
canale_sp_valle 1061	sez.69	5.80	6.41
canale_sp_valle 1086	sez.70	5.80	6.41
canale_sp_valle 1111	sez.71	5.80	6.41
canale_sp_valle 1136	sez.72	5.80	6.41
canale_sp_valle 1161	sez.73 tomb11 cassa	5.80	6.41
canale_sp_valle 1186	sez.74	2.47	2.53
canale_sp_valle 1211	sez.75	2.32	2.38
canale_sp_valle 1236	sez.76	2.16	2.22
canale_sp_valle 1261	sez.77	2.01	2.06
canale_sp_valle 1286	sez.78	1.85	1.90
canale_sp_valle 1311	sez.79	1.68	1.72
canale_sp_valle 1336	sez.80	1.51	1.54
canale_sp_valle 1356	sez.S1 tomb5 SS16	1.35	1.37
canale_sp_valle 1368.62	sez.S3 tomb5 SS17	1.34	1.36
canale_sp_valle 1442.33	sez.S4 tomb6 RFI via Cappellini	1.30	1.30
canale_sp_valle 1546.03	sez.S9 tomb6 RFI via Cappellini	1.30	1.30
canale_sp_valle 1616.3	sez.10bis	1.30	1.30
canale_sp_monte 0	sez.1	9.66	10.23
canale_sp_monte 25	sez.2	9.61	10.21
canale_sp_monte 50	sez.3	9.55	10.19

canale_sp_monte 75	sez.4	9.52	10.18
canale_sp_monte 100	sez.5	9.49	10.18
canale_sp_monte 125	sez.6	9.47	10.18
canale_sp_monte 150	sez.7	9.45	10.17
canale_sp_monte 175	sez.8	9.43	10.17
canale_sp_monte 200	sez.9	9.42	10.17
canale_sp_monte 225	sez.10	9.41	10.17
canale_sp_monte 250	sez.11	9.40	10.17
canale_sp_monte 275	sez.12	9.40	10.16
canale_sp_monte 284.42	sez.13c tomb1 via L.Maggiore	9.39	10.16
canale_sp_monte 375	sez.16 tomb1 via L.Maggiore	9.34	10.14
canale_sp_monte 400	sez.17	9.33	10.14
canale_sp_monte 425	sez.18	9.33	10.14
canale_sp_monte 450	sez.19	9.32	10.13
canale_sp_monte 475	sez.20	9.32	10.13
canale_sp_monte 500	sez.21	9.32	10.13

Tabella 18: Massimi valori di velocità e portata con $Tr = 50$ anni

ID-PROGRESSIVE	PORTATA MAX [m ³ /s] Tr50 (SP_06_rr_tr200)	VELOCITA' MAX [m/s] Tr50 (SP_06_rr_tr200)
rio_crinaccio 52.5	38.00	3.10
rio_crinaccio 109.51	37.95	2.38
rio_crinaccio 125.565	40.33	2.48
rio_crinaccio 149.971	40.33	2.42
rio_crinaccio 175.694	40.32	2.39
rio_crinaccio 201.416	40.31	2.38
rio_crinaccio 220.454	40.31	2.30
rio_crinaccio 233.315	9.34	0.51
rio_crinaccio 241	9.34	0.89
rio_crinaccio 271.53	9.34	4.25
rio_crinaccio 361.82	9.34	3.79
rio_crinaccio 512.02	9.34	3.56
rio_crinaccio 646.08	9.34	3.16
rio_crinaccio 741.945	9.34	3.10
rio_crinaccio 828.06	9.34	3.35
rio_crinaccio 871.435	9.35	2.06
rio_crinaccio 898.4	9.35	2.16
rio_crinaccio 925.85	9.44	2.29
rio_crinaccio 953.24	9.48	1.73
rio_crinaccio 875.94	10.79	1.38
rio_crinaccio 964.98	9.34	1.27
rio_crinaccio 977.94	9.34	1.04

rio_crinaccio 980.34	9.34	0.87
rio_crinaccio 982.54	9.35	1.03
rio_crinaccio 1012.43	9.41	1.25
rio_crinaccio 1058.4	9.34	0.49
canale_sp_valle 5.5	30.97	2.70
canale_sp_valle 23.5	30.97	2.70
canale_sp_valle 38.5	30.97	2.69
canale_sp_valle 42	30.97	2.96
canale_sp_valle 223.5	30.97	3.40
canale_sp_valle 248.5	30.97	3.44
canale_sp_valle 273.5	30.97	3.48
canale_sp_valle 298.5	30.97	3.53
canale_sp_valle 323.5	30.97	3.59
canale_sp_valle 348.5	30.97	3.66
canale_sp_valle 373.5	30.97	3.73
canale_sp_valle 398.5	30.97	3.82
canale_sp_valle 423.5	30.97	3.93
canale_sp_valle 448.5	30.97	4.06
canale_sp_valle 473.5	30.97	4.22
canale_sp_valle 495	30.97	3.75
canale_sp_valle 505	30.97	3.33
canale_sp_valle 523.5	30.97	3.36
canale_sp_valle 548.5	30.97	3.39
canale_sp_valle 573.5	30.97	3.64
canale_sp_valle 598.5	30.97	3.73
canale_sp_valle 615.5	30.97	3.59
canale_sp_valle 621	30.97	4.16
canale_sp_valle 646	30.97	5.26
canale_sp_valle 673.5	30.97	2.90
canale_sp_valle 698.5	30.93	1.50
canale_sp_valle 723.5	30.84	1.24
canale_sp_valle 748.5	30.73	1.63
canale_sp_valle 773.5	30.59	1.98
canale_sp_valle 798.5	30.39	2.13
canale_sp_valle 836	30.02	2.31
canale_sp_valle 873.5	34.15	2.64
canale_sp_valle 898.5	38.69	4.07
canale_sp_valle 923.5	37.27	3.64
canale_sp_valle 948.5	36.18	3.69
canale_sp_valle 973.5	35.85	3.65
canale_sp_valle 998.5	33.40	3.47
canale_sp_valle 1023.5	29.59	3.04
canale_sp_valle 1048.5	26.94	2.50
canale_sp_valle 1073.5	23.31	2.17
canale_sp_valle 1098.5	21.20	1.77
canale_sp_valle 1123.5	16.06	1.16

canale_sp_valle 1148.5	12.73	0.59
canale_sp_valle 1162	12.38	0.71
canale_sp_valle 1198.5	12.38	2.51
canale_sp_valle 1223.5	12.38	2.52
canale_sp_valle 1248.5	12.38	2.54
canale_sp_valle 1273.5	12.38	2.57
canale_sp_valle 1298.5	12.38	2.61
canale_sp_valle 1323.5	12.38	2.68
canale_sp_valle 1346	12.38	2.06
canale_sp_valle 1357	12.38	1.65
canale_sp_valle 1405.47	12.38	1.59
canale_sp_valle 1443.33	12.38	1.47
canale_sp_valle 1581.16	12.38	0.24
canale_sp_monte 12.5	1.25	0.48
canale_sp_monte 37.5	2.49	0.99
canale_sp_monte 62.5	2.49	1.03
canale_sp_monte 87.5	2.48	1.02
canale_sp_monte 112.5	2.48	0.98
canale_sp_monte 137.5	2.48	0.94
canale_sp_monte 162.5	2.48	0.90
canale_sp_monte 187.5	2.48	0.85
canale_sp_monte 212.5	2.49	0.79
canale_sp_monte 237.5	2.49	0.74
canale_sp_monte 262.5	2.50	0.70
canale_sp_monte 279.71	2.51	0.73
canale_sp_monte 285.42	2.52	0.81
canale_sp_monte 387.5	2.59	1.20
canale_sp_monte 412.5	2.61	1.25
canale_sp_monte 437.5	2.63	1.31
canale_sp_monte 462.5	2.65	1.40
canale_sp_monte 487.5	2.67	1.56

Tabella 19: Massimi valori di velocità e portata con $Tr = 200$ anni

ID-PROGRESSIVE	PORTATA MAX [m ³ /s] Tr200 (SP_06_rr_tr200)	VELOCITA' MAX [m/s] Tr200 (SP_06_rr_tr200)
rio_crinaccio 52.5	47.15	3.13
rio_crinaccio 109.51	47.03	2.40
rio_crinaccio 125.565	49.82	2.49
rio_crinaccio 149.971	49.80	2.43
rio_crinaccio 175.694	49.78	2.39
rio_crinaccio 201.416	49.77	2.38
rio_crinaccio 220.454	49.77	2.30

rio_crinaccio 233.315	11.63	0.51
rio_crinaccio 241	11.63	0.89
rio_crinaccio 271.53	11.63	4.48
rio_crinaccio 361.82	11.63	4.00
rio_crinaccio 512.02	11.63	3.76
rio_crinaccio 646.08	11.63	3.37
rio_crinaccio 741.945	11.63	3.32
rio_crinaccio 828.06	11.63	3.60
rio_crinaccio 871.435	11.63	2.26
rio_crinaccio 898.4	12.28	2.21
rio_crinaccio 925.85	11.63	2.59
rio_crinaccio 953.24	11.63	2.00
rio_crinaccio 875.94	11.63	1.61
rio_crinaccio 964.98	11.63	1.48
rio_crinaccio 977.94	11.63	1.22
rio_crinaccio 980.34	11.63	1.02
rio_crinaccio 982.54	11.63	1.23
rio_crinaccio 1012.43	11.63	1.54
rio_crinaccio 1058.4	11.63	0.60
canale_sp_valle 5.5	38.13	2.71
canale_sp_valle 23.5	38.13	2.70
canale_sp_valle 38.5	38.13	2.69
canale_sp_valle 42	38.13	2.99
canale_sp_valle 223.5	38.12	3.59
canale_sp_valle 248.5	38.12	3.62
canale_sp_valle 273.5	38.12	3.67
canale_sp_valle 298.5	38.12	3.71
canale_sp_valle 323.5	38.12	3.76
canale_sp_valle 348.5	38.12	3.82
canale_sp_valle 373.5	38.12	3.89
canale_sp_valle 398.5	38.12	3.96
canale_sp_valle 423.5	38.12	4.04
canale_sp_valle 448.5	38.12	4.15
canale_sp_valle 473.5	38.12	4.30
canale_sp_valle 495	38.12	3.85
canale_sp_valle 505	38.12	3.52
canale_sp_valle 523.5	38.12	3.60
canale_sp_valle 548.5	38.12	3.64
canale_sp_valle 573.5	38.12	3.91
canale_sp_valle 598.5	38.12	4.01
canale_sp_valle 615.5	38.12	3.84
canale_sp_valle 621	38.12	4.47
canale_sp_valle 646	38.11	5.71
canale_sp_valle 673.5	38.09	3.15
canale_sp_valle 698.5	37.91	1.63
canale_sp_valle 723.5	37.54	1.28

canale_sp_valle 748.5	37.00	1.63
canale_sp_valle 773.5	36.28	1.97
canale_sp_valle 798.5	35.32	2.11
canale_sp_valle 836	34.81	2.29
canale_sp_valle 873.5	39.59	2.61
canale_sp_valle 898.5	44.23	4.31
canale_sp_valle 923.5	42.86	3.86
canale_sp_valle 948.5	40.97	3.88
canale_sp_valle 973.5	38.78	3.92
canale_sp_valle 998.5	37.11	3.62
canale_sp_valle 1023.5	34.67	3.19
canale_sp_valle 1048.5	30.81	2.64
canale_sp_valle 1073.5	26.03	2.33
canale_sp_valle 1098.5	21.17	1.84
canale_sp_valle 1123.5	17.47	1.20
canale_sp_valle 1148.5	14.18	0.58
canale_sp_valle 1162	13.71	0.70
canale_sp_valle 1198.5	13.71	2.59
canale_sp_valle 1223.5	13.71	2.61
canale_sp_valle 1248.5	13.71	2.63
canale_sp_valle 1273.5	13.71	2.67
canale_sp_valle 1298.5	13.71	2.73
canale_sp_valle 1323.5	13.71	2.83
canale_sp_valle 1346	13.71	2.24
canale_sp_valle 1357	13.71	1.81
canale_sp_valle 1405.47	13.71	1.76
canale_sp_valle 1443.33	13.71	1.62
canale_sp_valle 1581.16	13.71	0.26
canale_sp_monte 12.5	1.54	0.49
canale_sp_monte 37.5	3.07	1.00
canale_sp_monte 62.5	3.06	1.04
canale_sp_monte 87.5	3.06	1.03
canale_sp_monte 112.5	3.07	1.00
canale_sp_monte 137.5	3.09	0.95
canale_sp_monte 162.5	3.11	0.91
canale_sp_monte 187.5	3.15	0.86
canale_sp_monte 212.5	3.19	0.80
canale_sp_monte 237.5	3.25	0.74
canale_sp_monte 262.5	3.31	0.72
canale_sp_monte 279.71	3.35	0.75
canale_sp_monte 285.42	3.36	0.81
canale_sp_monte 387.5	3.56	1.20
canale_sp_monte 412.5	3.60	1.26
canale_sp_monte 437.5	3.64	1.31
canale_sp_monte 462.5	3.69	1.40
canale_sp_monte 487.5	3.73	1.56

5 LE CARATTERISTICHE DIMENSIONALI DEI MASSI CICLOPICI DI PROTEZIONE

Il Canale di Gronda, così come le altre opere, saranno protette nei punti di transizione e raccordo da una mantellata in massi ciclopici atti a prevenire il fenomeno erosivo dello scalzamento del piede dell'opera. In particolare verranno impiegati massi ciclopici di 2° categoria aventi quindi peso variabile tra 1001 e 3000 Kg opportunamente miscelati con massi di categoria inferiore.

I massi naturali utilizzati per la costruzione dell'opera dovranno corrispondere ai requisiti essenziali di compattezza, omogeneità e durabilità; dovranno inoltre essere esenti da giunti, fratture e piani di sfalsamento e rispettare i seguenti limiti:

- massa volumica: $\geq 24 \text{ kN/m}^3$ (2400 kgf/m^3)
- resistenza alla compressione: $\geq 80 \text{ Mpa}$ (800 kgf/cm^2)
- coefficiente di usura: $\leq 1.5 \text{ mm}$
- coefficiente di imbibizione: $\leq 5\%$
- gelività: il materiale deve risultare non gelivo

La verificata di idoneità dei materiali utilizzati per le difese ed i rivestimenti nei confronti dell'azione di trascinamento della corrente è stata condotta a piene rive in modo che siano soddisfatte le condizioni più critiche in termini di tiranti. A tale proposito la letteratura suggerisce di confrontare le tensioni tangenziali massime nel punto di verifica con quelle massime ammissibili per il materiale utilizzato. Ciò consente di tenere in considerazione fattori idraulici e geometrici che influiscono sul trascinamento quali profondità dell'acqua, pendenza delle sponde, andamento planimetrico e durata dell'evento di piena.

Ovvero:

$$\tau_f < \tau_s$$

dove:

τ_f = è la tensione tangenziale sul fondo e nel caso di corsi d'acqua naturali, a titolo cautelativo, si può porre:

$$\tau_f = \gamma_w * y_m * i_f$$

dove:

$$\gamma_w = \text{peso specifico dell'acqua} \quad 1.00 \text{ t}$$

$$\begin{aligned}y_m &= \text{tirante idraulico massimo} & 4.86 \text{ m} \\i_f &= \text{pendenza di fondo} & 0.0020\end{aligned}$$

Risulta pertanto:

$$\tau_f = 0.00972 \text{ t/m}^2$$

Per i materiali impiegati nel rivestimento occorre calcolare la tensione massima ammissibile, che può essere fatto attraverso la funzione di Shields ovvero:

$$\tau_s = F * (\gamma_s - \gamma_w) * d_m$$

dove:

F = parametro sperimentale ricavato dalla letteratura (per pietrame $C' = 0.058 - 0.060$ valida in moto turbolento $Re^* > 1000$ e con diametro medio del materiale molto inferiore del tirante idrico mentre per materassi reno e gabbioni $C' = 0.116$;

γ_s = peso specifico del materiale in esame;

d_m = diametro corrispondente al passante 50% dell'assortimento granulometrico costituente il materiale.

Per la traduzione della condizione di equilibrio suddetta in termini empirici ed ingegneristici sono state proposte varie formulazioni, derivanti da osservazioni sperimentali, ciascuna caratterizzata da limiti e campi di applicabilità specifici che ne condizionano l'utilizzo alla preventiva definizione della tipologia dei substrati naturali o artificiali e del comportamento idraulico dell'alveo.

In particolare alcuni autori hanno individuato valori empirici specifici del parametro di Shields:

$F = 0.058 \div 0.060$ nell'espressione originale di Shields, valida in moto turbolento $Re^* > 1000$ e con diametro medio del materiale molto inferiore del tirante idrico;

$F = 0,116$ nell'espressione di Kalinske, che considera un fattore di

compattezza del materiale rappresentante l'effetto di mutuo incastro delle particelle;

$$F = 0,06 \left[1 + 0,67 \left(\frac{d}{h} \right)^{0,5} \right] \quad \text{nella formulazione di Armanini, valida per diametri comparabili con il tirante idrico } h.$$

Per le verifiche di stabilità dei massi costituenti le opere di difesa in progetto verrà fatto riferimento, nel caso specifico cautelativamente, all'espressione di Shields nella formulazione originaria dato che con l'espressione di Armanini si ottiene un valore di F maggiore di 0.08.

Risulta pertanto, nel caso di massi ciclopici:

I diametro equivalente medio per massi di 2° Categoria $d_m = 0.94 \text{ m}$;

$$\gamma_s = 2.400 \text{ t/m}^3$$

$$\tau_s = 0.078 \text{ t/m}^2$$

Che, con le ipotesi cautelative di cui sopra, risulta verificato.