

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Dipartimento di Ingegneria Ambientale, Idraulica, Infrastrutture
Viarie e del Rilevamento



Studio del sistema delle aree di laminazione lungo il Lambro sublacuale ed affluenti finalizzata alla stesura del protocollo di gestione integrato per la difesa idraulica della valle e della città' di Monza

Relatore: Prof. Gianfranco Becciu
Politecnico di Milano

Correlatore: Ing. Stefano Minà
Parco Regionale della Valle del Lambro

Tesi di Laurea Magistrale di:

Chiara Vellani

Matricola: 764974

Anno accademico 2012 - 2013

Indice

Indice delle figure	6
Indice delle tabelle	10
Abstract	11
1. Introduzione	12
2. Inquadramento idrogeologico e climatico del bacino del Lambro	14
2.1 Il bacino prelacuale	15
2.2 Il sistema dei laghi	17
2.3 Il bacino dell'alta valle	18
2.4 Il bacino della media e della bassa valle	22
3. "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro - Olona"	24
3.1 Storia.....	24
3.1.1 Sistemazione del fiume Lambro proposta dal "Comitato Coordinatore delle Acque"	25
3.1.2 "Piano Lambro"	25
3.1.3 Progetto esecutivo per i "Lavori di sistemazione delle opere idrauliche del Lambro Settentrionale nel tronco compreso tra il ponte dell'autostrada MI-BG ed il ponte di innesto alla tangenziale est di C.na Gobba nei comuni di Brugherio e Milano"	26
3.1.4 "Progetto Preliminare di sistemazione del fiume Lambro a monte di Villasanta"	27
3.1.5 "Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico"	28
3.2 Stato di fatto.....	29
3.3 Assetto di progetto	33
3.3.1 Regolazione del lago di Pusiano	33
3.3.2 Aree di laminazione	34
4. Idrologia	37
4.1 Pluviometria	37
4.2 Comportamento idrologico.....	38
4.2.1 LAM4	39
4.2.2 LAM5	40
4.2.3 BEV1	40
4.2.4 LAM6	45
4.2.5 BEV2	46
4.2.6 LAM7	47
4.2.7 BEV3	48
4.2.8 LAM8	49

4.2.9 BRO	50
4.2.10 CAN.....	51
4.2.11 PEG	52
4.2.12 LAM9	53
4.2.13 LAM10.....	54
4.2.14 MOL.....	55
4.2.15 LAM11.....	56
4.2.16 LAM12.....	57
4.2.17 LAM13.....	58
5. Idraulica.....	60
5.1 Modello MIKE 11 (Autorità di Bacino del Po).....	60
5.2 Modello HEC-RAS (Parco Valle Lambro)	62
5.2.1 Sezioni (Cross sections).....	62
5.2.2 Ponti (Bridges).....	64
5.2.3 Traverse (Inline structures)	66
5.2.4 Aree di allagamento (Storage Areas)	67
5.2.5 Calcolo dei profili di moto vario(Richiami teorici)	71
5.3 Confronto modelli.....	74
5.3.1 Condizioni al contorno	75
5.3.2 Sezioni e scabrezze	76
5.3.3 Risultati della simulazione	78
5.4 Configurazioni di progetto ipotizzate	81
5.4.1 Progetto di regolazione del Cavo Diotti.....	81
5.4.1.1 Analisi probabilistica dei livelli idrici dei laghi.....	83
5.4.1.2 Curve di scarico dei laghi.....	88
5.4.2 progetto di laminazione della Cava di Brenno.....	91
5.4.3 Progetto di consolidamento dell'area di spandimento naturale di Inverigo	94
5.4.1.2 Schematizzazione opere di progetto.....	100
5.5 Simulazioni effettuate	103
5.5.1 Simulazione con regolazione del Lago di Pusiano	105
5.5.2 Simulazioni con laminazione della Cava di Brenno.....	106
5.5.3 Simulazioni con laminazione della zona Victory	108
6. Regola di Gestione.....	125
6.1 Obiettivi della regola	125
6.2 Criteri decisionali.....	126
6.3 Definizione della regola.....	127
6.3.1 Regola di gestione del Cavo Diotti.....	127

6.3.2 Regola di gestione della Cava di Brenno	129
6.3.3 Regola di gestione dell'area di Inverigo	130
6.3.3.4 Modello afflussi-deflussi della Bevera di Molteno.....	135
7. Considerazioni conclusive.....	144
Bibliografia.....	146

Indice delle figure

Fig. 2.1 - Bacino idrologico del fiume Lambro (estratto Arpa Lombardia)	14
Fig. 2.2 - Bacino imbrifero dei laghi di Alserio e Pusiano	16
Fig. 2.3 - Il sistema dei laghi	17
Fig. 2.4 - Reticolo idrografico del bacino dell'alta valle del fiume Lambro.....	19
Fig. 2.5 - Sottobacini dell'alta valle del Lambro	21
Fig. 3.1 - Schema a blocchi	32
Fig. 4.1 - Esempio di ietogramma Chicago	38
Fig. 4.2 - Idrogramma del sottobacino LAM4 per tempo di ritorno di 200 anni.....	39
Fig. 4.3 - Idrogramma del sottobacino LAM5 per tempo di ritorno di 200 anni.....	40
Fig. 4.4 - Idrogramma del sottobacino BEV1 a monte della confluenza con il torrente Gandaloglio per tempo di ritorno di 200 anni.....	41
Fig. 4.5 - Idrogramma del sottobacino imbrifero del torrente Gandaloglio per tempo di ritorno di 200 anni.....	42
Fig. 4.6 - Idrogramma del sottobacino imbrifero del torrente Pascolo per tempo di ritorno di 200 anni.....	43
Fig. 4.7 - Idrogramma del sottobacino BEV1 a valle della confluenza con il torrente Gandaloglio per tempo di ritorno di 200 anni	44
Fig. 4.8 - Idrogramma complessivo del sottobacino BEV1 per tempo di ritorno di 200 anni	45
Fig. 4.9 - Idrogramma del sottobacino LAM6 per tempo di ritorno di 200 anni.....	46
Fig. 4.10 - Idrogramma del sottobacino BEV2 per tempo di ritorno di 200 anni	47
Fig. 4.11 - Idrogramma del sottobacino LAM7 per tempo di ritorno di 200 anni	48
Fig. 4.12 - Idrogramma del sottobacino BEV3 per tempo di ritorno di 200 anni	49
Fig. 4.13 - Idrogramma del sottobacino LAM8 per tempo di ritorno di 200 anni	50
Fig. 4.14 - Idrogramma del sottobacino BRO per tempo di ritorno di 200 anni	51
Fig. 4.15 - Idrogramma del sottobacino CAN per tempo di ritorno di 200 anni.....	52
Fig. 4.16 - Idrogramma del sottobacino PEG per tempo di ritorno di 200 anni.....	53
Fig. 4.17 - Idrogramma del sottobacino LAM9 per tempo di ritorno di 200 anni	54
Fig. 4.18 - Idrogramma del sottobacino LAM10 per tempo di ritorno di 200 anni.....	55
Fig. 4.19 - Idrogramma del sottobacino MOL per tempo di ritorno di 200 anni.....	56
Fig. 4.20 - Idrogramma del sottobacino LAM11 per tempo di ritorno di 200 anni.....	57
Fig. 4.21 - Idrogramma del sottobacino LAM12 per tempo di ritorno di 200 anni.....	58
Fig. 4.22 - Idrogramma del sottobacino LAM13 per tempo di ritorno di 200 anni.....	59
Fig. 5.1 - Dettaglio 3D modello Hec-Ras	62
Fig. 5.2 - Esempio di sezione in Hec-Ras.....	63
Fig. 5.3 - Esempio di sezione con obstructions in Hec-Ras	64

Fig. 5.4 - Esempio di schematizzazione di ponti in Hec-Ras	65
Fig. 5.5 - Contrazione ed espansione dell'area di deflusso in corrispondenza di ponti	66
Fig. 5.6 - Esempio di schematizzazione di traverse in Hec-Ras.....	67
Fig. 5.7 - Esempio di schematizzazione di aree di espansione in Hec-Ras.....	68
Fig. 5.8 - Schematizzazione del comportamento delle strutture laterali.....	70
Fig. 5.9 - Esempio di lateral structure in Hec-Ras	70
Fig. 5.10 - Esempio di levee in Hec-Ras	71
Fig. 5.11 - Idrogramma imposto come condizione di monte (risultato modello AdB).....	75
Fig. 5.12 - Andamento dei livelli imposto come condizione di valle (risultato modello AdB).....	76
Fig. 5.13 - Traversa a Costa Lambro	77
Fig. 5.14 - Ponte pedonale di Triuggio	77
Fig. 5.15 - Ponte stradale via Galileo Galilei (Biassono)	78
Fig. 5.16 - Profilo altimetrico del fiume Lambro risultante dal modello in Hec a confronto con il modello AdB	80
Fig. 5.17 - Geometria delle paratoie.....	81
Fig. 5.18 - Prospetto delle nuove paratoie del Cavo Diotti	82
Fig. 5.19 - Planimetria del sistema di emissari del Lago di Pusiano.....	82
Fig. 5.20 - Distribuzione di Gumbel relativa ai livelli idrici nel lago di Pusiano.....	85
Fig. 5.21 - Andamento dei livelli idrici nel lago di Pusiano in funzione del tempo di ritorno.....	86
Fig. 5.22 - Relazione tra le altezze relative nel lago di Alserio e le altezze relative nel lago di Pusiano.	87
Fig. 5.23 - Condizione al contorno alla sezione di monte in caso di "Non Regolazione"	89
Fig. 5.24 - Condizione al contorno alla sezione 132.0901 in caso di "Non Regolazione"	89
Fig. 5.25 - Condizione al contorno alla sezione di monte in caso di "Regolazione Lago"	90
Fig. 5.26 - Condizione al contorno alla sezione 132.0901 in caso di "Regolazione Lago"	90
Fig. 5.27 - Vista dall'alto della Cava di Brenno	92
Fig. 5.28 - Laminazione dell'idrogramma BEV1 da parte della Cava di Brenno	94
Fig. 5.29 - Aree di attuale esondazione del Lambro per T=200 anni	95
Fig. 5.30 - Estratto della cartografia PAI.....	97
Fig. 5.31 - Sezione del ponte di monte (vista da valle).....	98
Fig. 5.32 - Sezione del ponte di valle (vista da monte).....	99
Fig. 5.33 - Sezione geometrica del ponte pedonale di progetto vista da monte (modello Hec-Ras).....	101
Fig. 5.34 - Esempio di funzionamento del ponte pedonale di progetto (modello Hec-Ras).....	102
Fig. 5.35 - Esempio di funzionamento del ponte Victory (modello Hec-Ras).....	103
Fig. 5.36 - Sezione a valle della confluenza con il Cavo Diotti (casi di No Regolazione, Regolazione Lago).....	105

Fig. 5.37 - Sezione a valle della confluenza con la Bevera di Molteno (casi di No Regolazione, Regolazione Lago, Laminazione Cava).....	106
Fig. 5.38 - Sezione a valle della confluenza con la Bevera di Molteno (casi di No Regolazione, Regolazione Lago, Laminazione Cava, Regolazione Lago+Laminazione Cava)	107
Fig. 5.39 - Sezione a valle della zona di espansione di Inverigo (casi di No Regolazione, Regolazione Lago, Laminazione Cava, Regolazione Lago+Laminazione Cava)	107
Fig. 5.40 - Sezione di valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory (caso di sola Laminazione zona Victory).....	109
Fig. 5.41 - Laminazione Victory nel caso di “Non Regolazione” (Sezione di valle del ponte ciclopedonale).....	109
Fig. 5.42 - Sezione di valle del modello Hec-Ras, Parco di Monza (Caso di sola Laminazione zona Victory).....	110
Fig. 5.43 - Sezione di valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory (Caso di Regolazione Lago + Laminazione zona Victory).....	111
Fig. 5.44 - Laminazione Victory nel caso di “Regolazione Lago” (Sezione di valle del ponte ciclopedonale).....	112
Fig. 5.45 - Sezione 102.14 (Caso di Regolazione Lago + Laminazione zona Victory).....	113
Fig. 5.46 - Sezione di valle del modello Hec-Ras, Parco di Monza (Caso di Regolazione Lago + Laminazione zona Victory).....	113
Fig. 5.47 - Sezione di valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory (Caso di Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione zona Victory).....	114
Fig. 5.48 - Sezione 102.14 (Caso di Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione zona Victory).....	115
Fig. 5.49 - Laminazione Victory nel caso di “Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione Victory” (Sezione di valle del ponte ciclopedonale).....	115
Fig. 5.50 - Sezione di valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory (casi di Laminazione Victory, Regolazione Lago + Laminazione Victory, Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione zona Victory)	116
Fig. 5.51 - Sezione di valle del modello Hec-Ras, Parco di Monza	118
Fig. 5.52 - Profilo altimetrico del Lambro dall’uscita del lago di Pusiano al Parco di Monza (casi di “Non Regolazione” e “Massima Regolazione”)	119
Fig. 5.53 - Dettaglio I	120
Fig. 5.54 - Dettaglio II	121
Fig. 5.55 - Dettaglio III	122
Fig. 5.56 - Dettaglio IV	123
Fig. 5.57 - Valori relativi dei dislivelli d’acqua lungo l’asta fluviale rispetto al caso di “Non Regolazione”	124
Fig. 6.1 - Abaco portate lago di Pusiano	128
Fig. 6.2 - Laminazione dell’idrogramma BEV1 da parte della Cava di Brenno	130
Fig. 6.3 - Abaco portate ponte ciclopedonale di progetto	132

Fig. 6.4 - Schematizzazione configurazione paratoie: "regolazione massima"	133
Fig. 6.5 - Schematizzazione configurazione paratoie: "riposo"	133
Fig. 6.6 - Schematizzazione configurazione paratoie: "regolazione minima"	134
Fig. 6.7 - Schematizzazione configurazione paratoie: "regolazione massima a battente"	134
Fig. 6.8 - Schematizzazione bacino della Bevera di Molteno (modello Hec-Hms).....	136
Fig. 6.9 - Volumi considerati nel metodo Muskingum	138
Fig. 6.10 - Precipitazioni registrate a Molteno (novembre 2002).....	139
Fig. 6.11 - Portate osservate a Molteno (novembre 2002).....	140
Fig. 6.12 - Taratura CN	141

Indice delle tabelle

Tab. 2.1 - Sottobacini dell'alta valle del Lambro.....	20
Tab. 3.1 - Portate di tempo di ritorno di 200 anni allo stato attuale e nell'assetto di progetto..	36
Tab. 5.1 - Caratteristiche relative alle aree di espansione presenti in Hec-Ras.....	69
Tab. 5.2 - Valori di portata Modello AdB - Modello Hec-Ras	79
Tab. 5.3 - Tabella riassuntiva dei massimi livelli annuali nel lago di Pusiano	83
Tab. 5.4 - Parametri di Gumbel.....	84
Tab. 5.5 - Livelli idrici dei laghi per tempi di ritorno di 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni	87
Tab. 5.6 - Manovre di regolazione paratoie ponte ciclopedonale (Caso di sola Laminazione zona Victory).....	108
Tab. 5.7 - Manovre di regolazione paratoie ponte ciclopedonale (Caso di Regolazione Lago + Laminazione zona Victory).....	111
Tab. 5.8 - Manovre di regolazione paratoie ponte ciclopedonale (Caso di Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione zona Victory)	114
Tab. 5.9 - Valori di portata al colmo in quattro sezioni relativi ai sette casi analizzati.....	117
Tab. 6.1 - Volumi e portate al colmo degli idrogrammi dei bacini di monte	126
Tab. 6.2 - Parametri in ingresso del modello di Clark	140
Tab. 6.3 - Parametri in ingresso del modello di Muskingum	141
Tab. 6.4 - Valori di CN di 1°,2°,3°, 4° e ultimo tentativo	142

Abstract

A seguito della disastrosa piena dell'autunno del 2002, il fiume Lambro è stato posto al centro di una attenta analisi da parte dell'Autorità di Bacino del Po. La necessità di adeguare l'attuale sistema difensivo per la salvaguardia dei centri fortemente urbanizzati di Monza e Milano ha prodotto una vasta pianificazione di intervento sul bacino dell'alta valle del Lambro (tra l'uscita del lago di Pusiano e il Parco di Monza). Qui, l'assetto di progetto ipotizzato ha previsto la realizzazione di opere di laminazione a ridotto impatto ambientale. L'obiettivo di questa tesi è stato quindi lo studio approfondito del comportamento idraulico del fiume conseguente alle varie configurazioni di progetto proposte, finalizzato alla stesura di un protocollo di gestione integrato per la regolazione degli invasi oggetto di studio in caso di eventi di piena.

1. Introduzione

Attualmente il sistema di difesa idraulica della valle del Lambro, caratterizzato da una notevole urbanizzazione e vittima per decenni di scarsa attenzione da parte dell'opinione pubblica e della pianificazione di bacino, è costituito principalmente da opere di difesa passiva (argini, paratie mobili, muri) costruite con una logica emergenziale e poco lungimirante, a seguito degli storici eventi di piena passati.

A seguito però dell'ultima e più disastrosa piena dell'autunno del 2002 si è avviata una importante fase di studio dello stato di fatto e di elaborazione di una serie di interventi lungo la valle, commissionate entrambe dall'Autorità di bacino del fiume Po, che hanno portato alla redazione, alla fine del 2003, di uno "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro - Olona."

Nella nuova logica, valsa presso gli enti preposti alla pianificazione idraulica (aumentare la capacità di laminazione piuttosto che perseguire il solo obiettivo di smaltire le portate più rapidamente possibile), l'assetto di progetto del fiume secondo tale studio prevede, nel tratto compreso tra l'uscita dal lago di Pusiano e l'ingresso nel centro urbano di Monza, l'utilizzo di bacini esistenti e la creazione di nuove aree ad esondazione controllata. In particolare:

- l'utilizzo del lago di Pusiano quale bacino regolatore delle portate in arrivo dal Triangolo Lariano attraverso l'adeguamento e la migliore gestione del Cavo Diotti;
- l'utilizzo della cava di Brenno sulla Bevera di Molteno quale bacino di laminazione;
- la creazione di un'area di esondazione controllata sul Lambro ad Inverigo.

Tali opere sono necessarie per ottenere un volume complessivo di laminazione di circa 15 milioni di m³ distribuito su tutto il bacino.

Il presente elaborato di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, sviluppato in collaborazione con il Consorzio del Parco regionale della Valle del Lambro, si propone quindi di studiare il comportamento integrato del sistema di difesa ed elaborarne il protocollo di gestione.

Partendo dalle previsioni di piano dell'Autorità di Bacino, che fornisce i valori di portata limite per ogni sezione idraulica del fiume Lambro cui riferirsi per la progettazione delle opere, occorrerà studiare il comportamento di ogni singola opera e la sua interazione, per tutta la durata dell'evento di piena, con le opere di valle.

Il protocollo di gestione dovrà contenere il sistema di regole sulla base delle quali il responsabile dovrà condurre l'opera idraulica a lui affidata: i limiti di gestione dei livelli, le

modalità e le tempistiche per l'invaso e lo svaso, le interazioni tra le diverse opere di regolazione, ecc. Si fa presente come il protocollo di gestione della diga di Pusiano, ormai definito, sarà, una volta realizzate le opere suddette, completamento essenziale per garantire l'armonico funzionamento del sistema a garanzia della protezione idraulica della valle del Lambro e della città di Monza.

Per il raggiungimento di tali obiettivi è si è rivelata necessaria una rappresentazione matematica dei fenomeni di piena: si è proceduto alla creazione di un modello idrodinamico che riproducesse il comportamento del fiume Lambro tra l'uscita del lago di Pusiano e l'ingresso del centro urbano di Monza.

A partire dagli studi effettuati dall'Autorità di Bacino del fiume Po, che forniscono dati relativi al comportamento idrologico del bacino nel tratto oggetto di studio, il lavoro di tesi si è sviluppato intorno allo studio e all'analisi dei risultati derivanti dalle simulazioni del modello idraulico, fornendo interessanti informazioni riguardanti le varie interazioni tra le suddette opere del sistema.

2. Inquadramento idrogeologico e climatico del bacino del Lambro

Il bacino del fiume Lambro possiede una superficie complessiva di circa 1980 km² ed è caratterizzato da un reticolo idrografico complesso e articolato (Fig. 2.1). Il suo corso è breve (134 km) ed ha i caratteri tipici del fiume prealpino: una direzione regolare, una portata d'acqua modesta con variabilità e stagionalità della stessa, date le dimensioni e l'altezza ridotte del bacino di alimentazione.

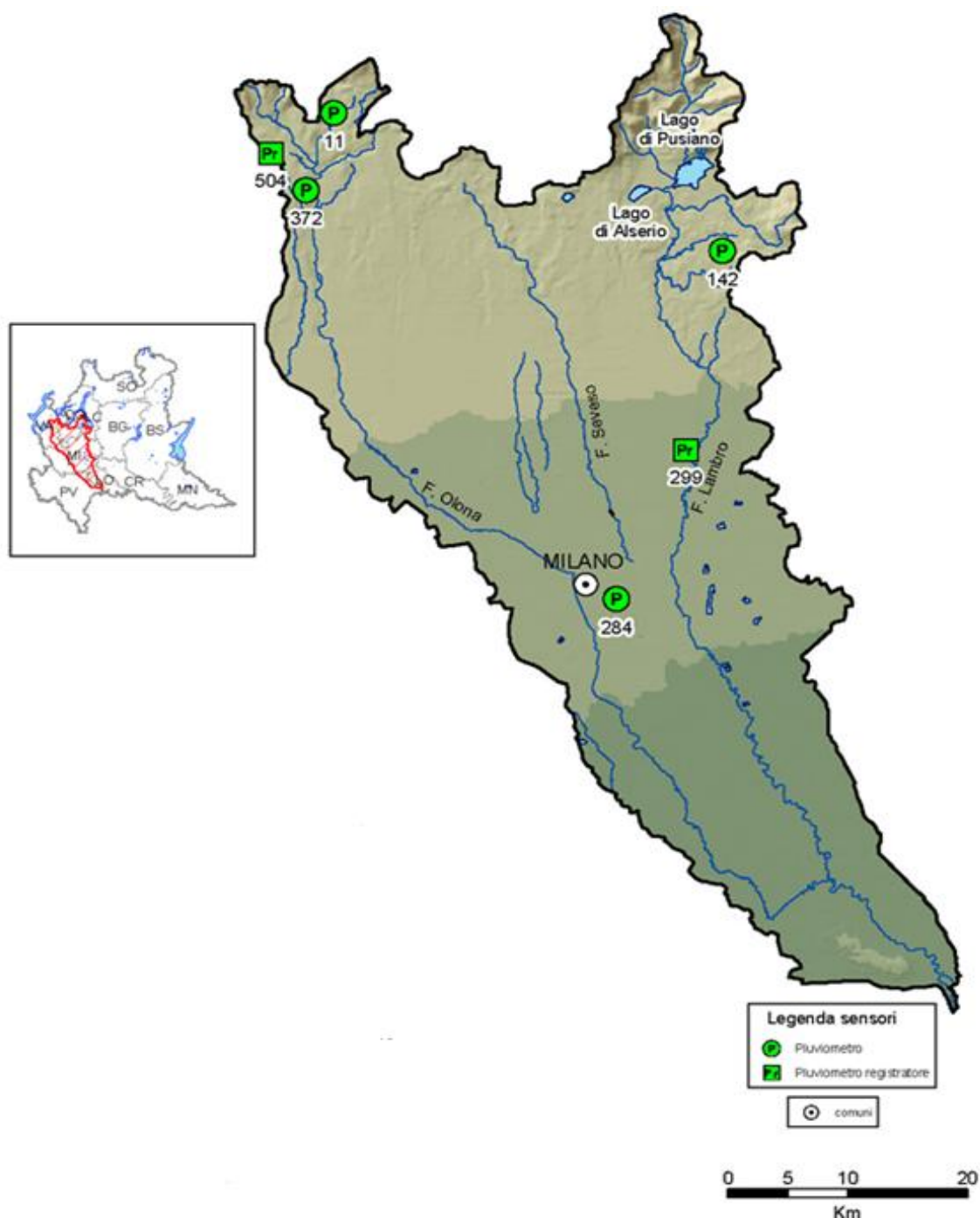


Fig. 2.1 - Bacino idrologico del fiume Lambro (estratto Arpa Lombardia)

Nel seguito di questo capitolo si fornirà un quadro idrogeologico e climatico dell'intero bacino del Lambro, tuttavia si invita il lettore a porre maggiore attenzione alla descrizione del bacino compreso tra l'uscita del lago di Pusiano e l'ingresso nel centro urbano di Monza, denominato bacino dell'alta valle, poiché è riguardo quest'ultimo che si farà particolare riferimento nel corso del presente studio.

2.1 Il bacino prelacuale

Il fiume Lambro ha origine nel Triangolo Lariano, nelle Prealpi racchiuse tra i due rami del lago di Como, ad una quota di circa 1300 m s.l.m.; nasce dalle pendici del monte San Primo, da una serie di insorgenze collocate tutte nel territorio comunale di Magreglio. La più importante e nota di queste sorgenti è la cosiddetta Menaresta, situata a circa 944 m s.l.m. e soggetta a oscillazioni di portata stagionali, da cui il nome "mena" (se ne va) e "resta" (torna), collocata nella parte meridionale del Piano Rancio.

Il tratto di pertinenza del comune di Magreglio è lungo circa 2700 m, affronta un dislivello di circa 600 metri (da 1330 a circa 700 m.slm.) con una pendenza media dell'11%.

In questa prima parte del tratto prelacuale il corso d'acqua ha caratteristiche tipicamente torrentizie: portata molto variabile a seconda della stagione, forte turbolenza, forte pendenza, notevole numero di salti.

Uscendo dal comune di Magreglio il torrente Lambro forma una curva verso est per poi attraversare la piana di Barni nuovamente in direzione nord - sud, quindi si inoltra in un tratto di valle più stretto, fra il monte Cornet a ovest e il monte Colla ad est (Vallassina), prima di riaprirsi più a valle nella piana di Lasnigo. Il passaggio attraverso l'abitato di Barni è caratterizzato dalla prima forte compromissione della naturalità del corso d'acqua in esame. Le fasce fluviali in questo tratto sono esigue o inesistenti, il fondo è occasionalmente artificializzato e sono presenti un discreto numero di scarichi e di attraversamenti.

Successivamente il torrente attraversa i comuni di Lasnigo, Asso, Canzo, Castelmarte e Pontelambro, ricevendo il contributo di numerosi affluenti che scendono dagli anfratti rocciosi delle valli laterali. Nel suo ultimo tratto, prima della sua immissione nel lago di Pusiano, un lago naturale di origine glaciale, il torrente, qui chiamato Lambrone, completamente canalizzato, attraversa l'abitato di Erba dividendolo in due. Non è questo il tracciato originario del corso d'acqua che è stato invece deviato all'inizio del 1800 per iniziativa dell'amministrazione asburgica. Prima di allora il torrente passava in mezzo tra i laghi di Alserio e di Pusiano dando luogo a vaste esondazioni in caso di piena. La deviazione nel solo lago di Pusiano ha trasformato l'idraulica del sistema trasformando di fatto questo lago in un bacino di laminazione.

Il bacino imbrifero del lago (Fig. 2.2) presenta quindi una superficie di circa 94,6 km² (lago incluso), di cui quasi l'80 % naturale: per la maggior parte infatti esso è caratterizzato dalla presenza di foreste decidue e, a decrescere, foreste sempreverdi e arbusti. L'eccezione è però rappresentata dalla zona, seppur limitata, fortemente antropizzata della Piana d'Erba e in corrispondenza delle sue sponde.

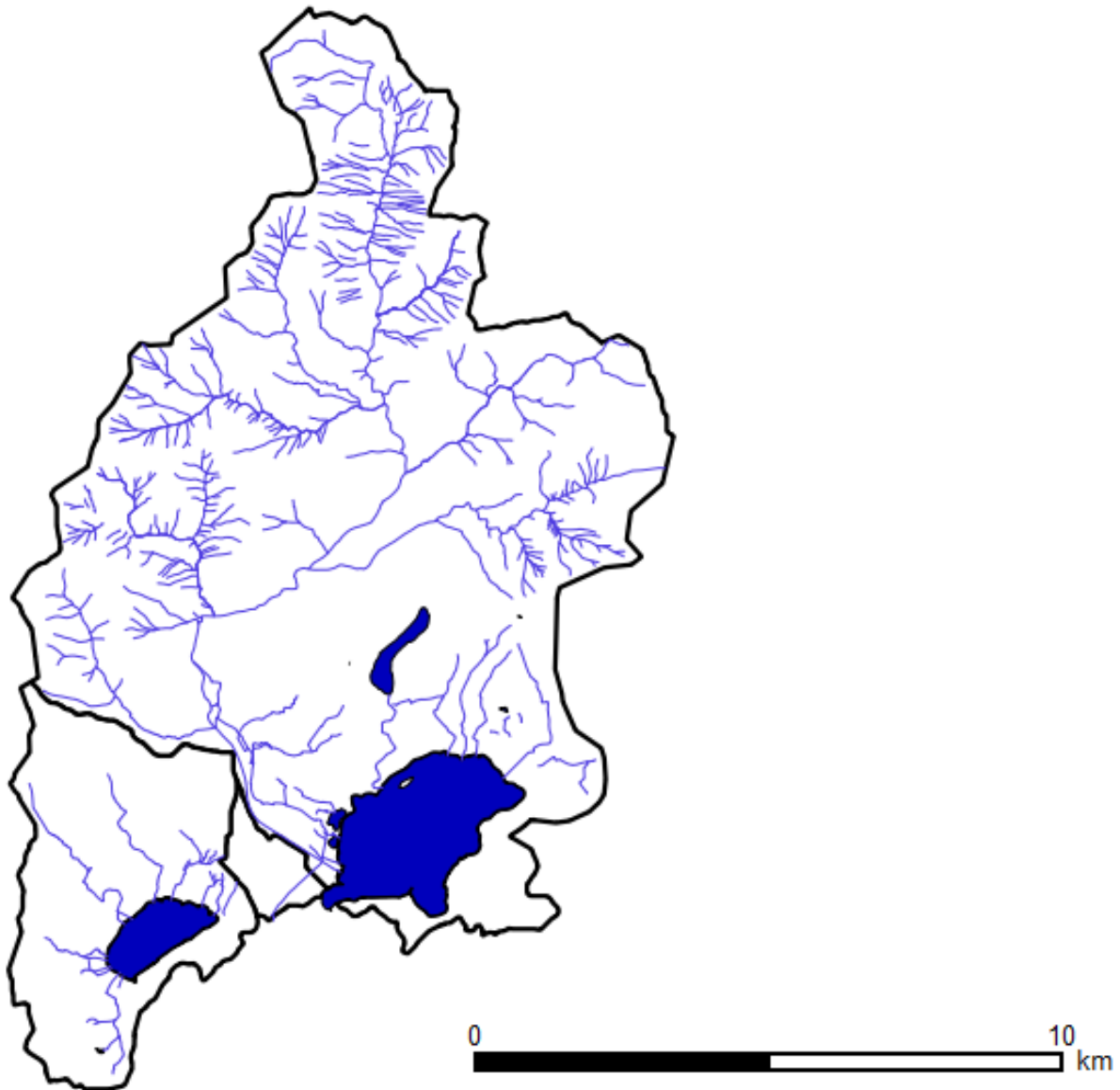


Fig. 2.2 - Bacino imbrifero dei laghi di Alserio e Pusiano

Il territorio dell'intero bacino è compreso quindi fra una quota minima di 260 m s.l.m. (livello medio del lago di Pusiano) e quella massima di 1453 m s.l.m., che coincide con la vetta del Monte Palanzone.

Il bacino del lago di Pusiano è caratterizzato da un regime di precipitazione annua compresa tra l'isoieta 1500 mm e 1900 mm con un aumento delle precipitazioni da sud-est verso nord-

ovest. Il regime pluviometrico della zona risulta abbastanza uniforme durante l'anno, se si prescinde dalla quantità assoluta di precipitazioni. Esso rientra nel tipo sub-litoraneo alpino, caratterizzato da precipitazioni abbondanti in autunno e in primavera-estate, più scarse in estate e minime in inverno. Nello specifico la distribuzione del numero medio di giorni di pioggia permette di evidenziare come maggio, giugno, novembre e dicembre siano i mesi in cui si ha la maggior frequenza di precipitazioni. Al contrario, i mesi in cui le piogge sono meno frequenti sono gennaio, febbraio, settembre e ottobre.

2.2 Il sistema dei laghi

Elementi importanti alla caratterizzazione del bacino imbrifero del Lambro sono i laghi (Fig. 2.3): in aggiunta al lago di Pusiano (5,56 km²), precedentemente menzionato, il bacino del Lambro comprende anche i laghi del Segrino(0,38 km²), il cui emissario alimenta il lago di Pusiano, e il lago di Alserio(1,23 km²).

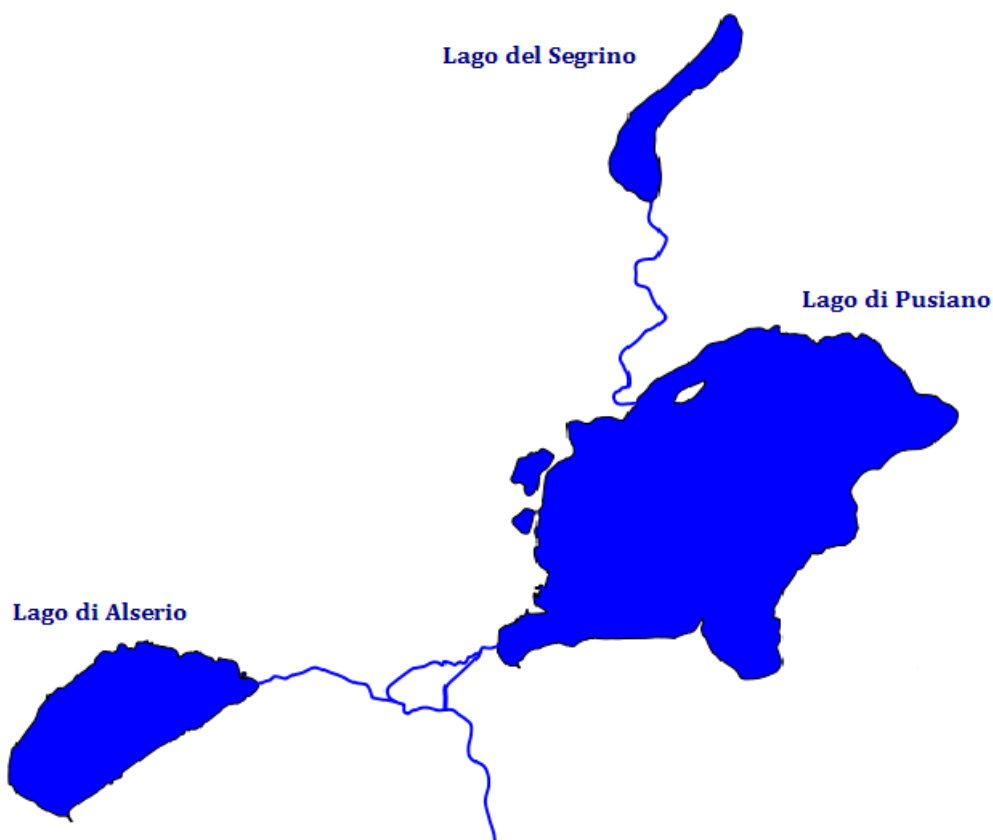


Fig. 2.3 - Il sistema dei laghi

Essi sono laghi di origine glaciale. I laghi infatti occupano una conca naturale formatasi in seguito all'azione erosiva delle masse glaciali, successivamente modificata dall'accumulo dei sedimenti trasportati dal Lambro: i detriti, marnosi ed argillosi, trasportati in centinaia di anni dal fiume Lambro, si sono via via accumulati e depositati tanto che, con molta probabilità,

quelli che oggi sono i laghi di Alserio e di Pusiano, un tempo dovevano essere uniti a formare un unico grande invaso. La vegetazione presenta la tipica zonizzazione che si riscontra lungo le rive dolcemente degradanti dei laghi prealpini.

Mentre il bacino imbrifero del lago di Pusiano, come già detto, supera i 90 km², il bacino del lago di Alserio è di dimensioni più contenute: 18,2 km². L'afflusso sotterraneo e superficiale al lago di Pusiano risulta pertanto elevato al confronto di quello calcolato per il lago di Alserio, vista la maggiore estensione del bacino afferente, il più ampio sviluppo delle sue rive e, soprattutto, gli alti valori di trasmissività che si osservano lungo i tratti del il conoide del Lambro in prossimità del lago. Nella parte centro settentrionale è presente infatti la falda del Pian d'Erba dovuta al cono di deiezione del fiume Lambro che scorre entro depositi altamente permeabili e che converge verso le due conche lacustri. Difficile è comunque suddividere questo sistema idrogeologico in due sotto-bacini di pertinenza di ciascuno dei laghi.

Il substrato roccioso e i depositi argillosi presenti a nord e a sud, nella parte orientale del sistema dei laghi, in corrispondenza dei rilievi montuosi, definiscono un chiaro limite al bacino idrogeologico del lago di Pusiano e del lago di Alserio, impedendo qualsiasi afflusso e deflusso idrico sotterraneo. Anche dal settore meridionale gli apporti risultano essere decisamente trascurabili dato il ridotto spessore dell'acquifero.

2.3 Il bacino dell'alta valle

Dall'uscita del lago di Pusiano, attraverso un emissario naturale ed uno artificiale (Cavo Diotti), il Lambro, dopo aver raccolto anche le acque in uscita dal lago di Alserio, riprende il suo andamento con direzione principale nord-sud; assume il carattere di fiume e, col nome di Lambro settentrionale, inizia il suo percorso collinare. Lungo la strada attraversa diversi comuni come: Merone, Costa Masnaga, Lambrugo, Nibionno, Inverigo, Briosco, Giussano, Verano Brianza, Albiate, Triuggio, Carate Brianza, Sovico, Lesmo, Biassono e Arcore, giungendo infine a Villasanta, appena prima del suo ingresso nel Parco di Monza (Fig. 2.4).

La struttura morfologica di quest'area è caratterizzata da allineamenti semicircolari concentrici di cordoni collinari, relativi ad apparati morenici depositati in fasi successive durante i periodi glaciali ed erosi differenzialmente nel tempo.

L'alveo risulta essere generalmente incassato nel fondo valle; nella sua parte più settentrionale il fiume mantiene un andamento abbastanza sinuoso e la naturalità dell'area ha permesso di meandrificarsi e creare lanche e aree umide naturali anche grazie alla presenza di diverse risorgive, piccoli affluenti e dreni presenti su entrambi i lati.

Procedendo verso valle, sebbene in alcuni tratti venga vincolato da rilevanti opere di irrigidimento spondale e manufatti di attraversamento, il corso d'acqua continua a scorrere in un ambito prevalentemente naturale.

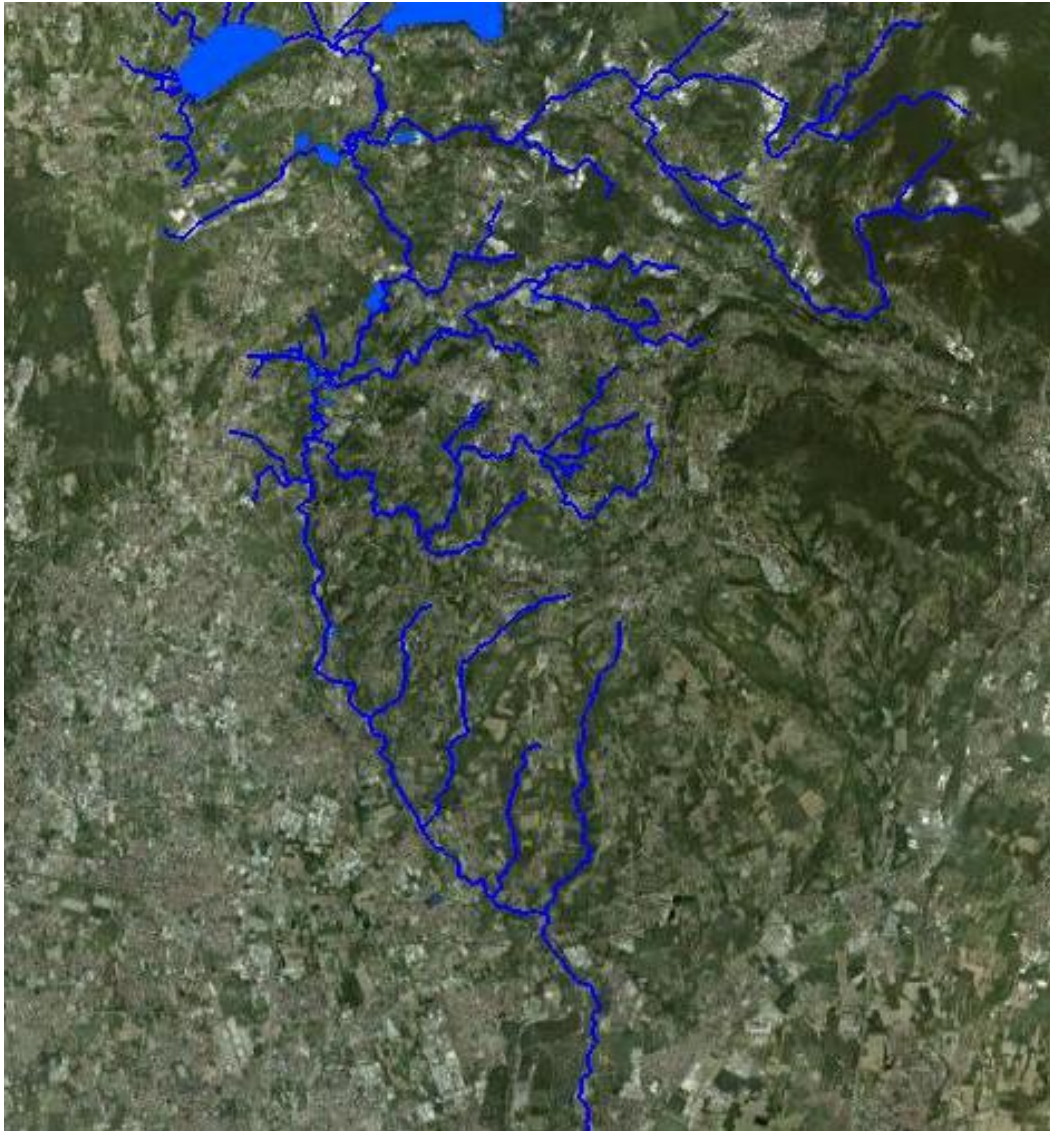


Fig. 2.4 - Reticolo idrografico del bacino dell'alta valle del fiume Lambro

L'ambiente che si incontra è solcato dai diversi corsi d'acqua affluenti del Lambro e arricchito da zone boscate, aree agricole, presenze storico-artistiche assai numerose, su cui tende a sovrapporsi uno sviluppo urbanistico indifferenziato. Nella zona il processo di urbanizzazione si è attuato massicciamente sulla riva destra del Lambro lungo i due assi prevalenti: la Vallassina e la Monza-Carate, formando, tra il centro abitato di Biassono e quelli di Inverigo e Lurago, un' unica conurbazione. Sul lato sinistro del fiume il processo di urbanizzazione è avvenuto in modo meno vistoso, pur non mancando situazioni di conurbazione.

Quasi tutti gli affluenti del Lambro, tra i quali i principali sono costituiti dalle Bevere (Molteno, Bulciago e Renate), sono localizzati in sinistra idrografica, a monte della provincia di Milano.

Di seguito si riportano in tabella (Tab.2.1) le principali caratteristiche relative ai singoli sottobacini in cui è stato scomposto il bacino idrografico del Lambro in questo tratto; per ogni sottobacino sono riportati i seguenti dati: nome del sottobacino secondo la nomenclatura data dall'Autorità di Bacino del Po nello Studio di fattibilità, superficie complessiva, superficie delle aree extraurbane, superficie delle aree urbanizzate ed alcune note (indicazioni sulla tipologia di sottobacino).

Nome sottobacino	Superficie complessiva [km²]	Superficie aree urbanizzate [km²]	Superficie aree extraurbane [km²]	Note
LAM4	1.38	0.56	0.82	Bacino in linea
LAM5	10.2	2.57	7.63	Bacino in linea
BEV1	42.1	10.73	31.37	Affluente Bevera di Molteno
LAM6	10.93	2.27	8.66	Bacino in linea
BEV2	17.99	6.53	11.46	Affluente Bevera di Bulciago
LAM7	4.6	2.2	2.4	Bacino in linea
BEV3	19.29	5.15	14.14	Affluente Bevera di Renate
LAM8	11.75	3.94	7.81	Bacino in linea
BRO	6.37	1.42	4.95	Affluente torrente Brovada
CAN	3.08	0.58	2.5	Affluente torrente Cantalupo
PEG	10.89	2.83	8.06	Affluente torrente Pegorino
LAM9	11.72	3.94	7.78	Bacino in linea
LAM10	6.58	4.01	2.57	Bacino in linea
MOL	19.77	5.63	14.14	Affluente roggia Molinara
LAM11	6.9	3.51	3.39	Bacino in linea
LAM12	8.92	2.18	6.74	Bacino in linea
LAM13	3.48	1.65	1.83	Bacino in linea

Tab. 2.1 - Sottobacini dell'alta valle del Lambro

Nella figura seguente (Fig. 2.5) è rappresentata la suddivisione dei sottobacini dell'alta valle del Lambro: in azzurro sono indicati i bacini in linea, in arancione i bacini imbriferi degli affluenti.

Saranno le portante affluenti da questi sottobacini a determinare le condizioni al contorno nella modellazione effettuata, della quale verranno fornite tutte le informazioni nei capitoli seguenti.

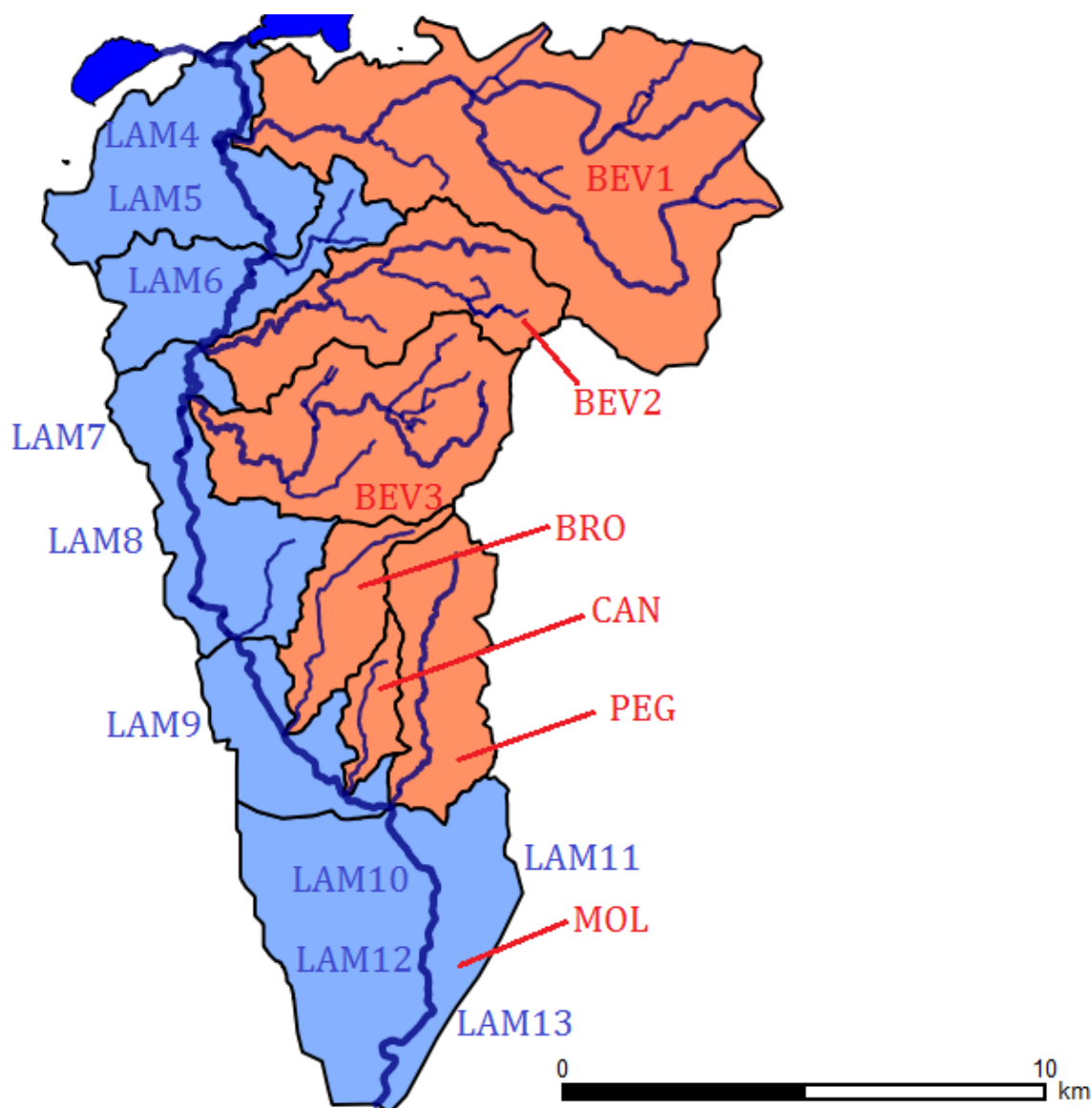


Fig. 2.5 - Sottobacini dell'alta valle del Lambro

Il bacino dell'alta valle del Lambro è caratterizzato da un regime di precipitazione media annua compresa tra l'isoieta 1150 mm e 1550 mm con un aumento delle precipitazioni da sud verso nord.

Il regime pluviometrico della zona è caratterizzato da diverse tipologie di eventi localizzati in determinati periodi dell'anno: precipitazioni convettive, di tipo quindi temporalesco, durante l'estate, precipitazioni cicloniche provocate da fronti caldi tra novembre e febbraio (si ricorda a tal proposito l'ultimo evento che mandò in crisi il bacino nel 2002) e fronti freddi in primavera ed estate quando le temperature si innalzano. Per ognuna di queste categorie è attesa una differente intensità oraria, durata e distribuzione spaziale. I temporali sono caratterizzati da forti intensità orarie, ma estensione e durata ridotte; le precipitazioni cicloniche hanno durata ed estensione superiore, ma inferiore intensità oraria. I massimi

annuali, caratteristici del regime pluviometrico prealpino, sono quindi localizzati in ottobre (il maggiore) e in maggio; mentre i minimi si registrano rispettivamente in febbraio e in luglio.

2.4 Il bacino della media e della bassa valle

Attraversato il Parco di Monza e abbandonata la Brianza, il Lambro attraversa una vasta zona pianeggiante, densamente urbanizzata, all'interno della quale si trovano importanti ed estesi centri urbani (Monza, Cologno Monzese, Sesto San Giovanni e Milano); essa è caratterizzata da un corso ricco di anse e meandri, incassato nell'alveo ordinario dalla serie quasi continua di insediamenti circostanti, immerso in un alveo coronato da un terrazzamento continuo ed evidente, soprattutto in sponda destra.

In questa zona le sponde del Lambro sono quasi ininterrottamente cinte da insediamenti abitativi e produttivi, per la maggior parte edificati entro l'alveo di piena e quindi in aree sottratte alla naturale espansione del fiume. Una rilevante particolarità che il Lambro presenta in questo tratto è la totale assenza di afflussi naturali al corso d'acqua; infatti il contributo di tale porzione di bacino è interamente derivante dagli scaricatori delle reti fognarie comunali e consortili.

Il centro storico di Monza sorge sul Lambro e il fiume ne ha condizionato l'impianto planimetrico improntandone la scena urbana.

Dalla zona a sud di Monza fino a Sesto San Giovanni il territorio è dominato da un'alternanza continua e disordinata di insediamenti industriali localizzati sul bordo del fiume senza un criterio preciso. Lungo le sponde cresce una vegetazione stenta, annerita dall'inquinamento.

Nel tratto metropolitano milanese si presentano due situazioni distinte: l'attraversamento del Parco Lambro e quello dell'area urbanizzata fortemente infrastrutturata. La prima situazione è simile a quella del Parco di Monza, l'altra presenta un paesaggio urbano nel quale il fiume non si integra, ignorato nella sua funzione di elemento naturale e vivo del territorio e considerato un puro fastidio da coprire, intersecare, deviare a seconda delle necessità tecniche dettate da motivi funzionali.

A seguire, il fiume riprende a scorrere con pendenza modesta in campagna, in un alveo ordinario tendenzialmente rettilineo, contenuto in arginature artificiali che in talune zone ne impediscono l'espansione nelle aree circostanti.

E' importante evidenziare come nell'attraversamento dei comuni di Monza e di Milano il Lambro possieda una capacità idraulica molto limitata, a tal proposito si ricorda come negli ultimi 60 anni si siano succedute esondazioni rilevanti (anni 1949, 1951, 1976, 2002) con

cadenza pressoché venticinquennale (inaccettabile se rapportata ai danni indotti al tessuto antropico interessato).

Infine, uscito dall'area milanese, l'alveo riprende la sua corsa all'interno di un fondovalle pianeggiante, meno urbanizzato rispetto ai precedenti tratti; ritorna a essere un motivo del disegno della pianura agricola, scorrendo con ampi meandri ora incisi e leggibili nella pianura, ora sottolineati dall'alberatura di sponda.

Attraversato il centro storico di Melegnano, condizionandone l'impianto planimetrico, come avviene per l'attraversamento di Monza, riceve le acque del Colatore Addetta.

Lungo il tratto lodigiano della valle del Lambro che va da Melegnano al Po, il territorio è formato da un unico ripiano fondamentale inciso da alvei fluviali. Il Lambro scorre ben delimitato nel suo letto e nella serie dei suoi terrazzamenti alluvionali, il principale dei quali corre quasi parallelo al corso d'acqua. La grande quantità d'acqua disponibile e il modo in cui questa viene utilizzata attraverso una vasta e funzionale rete irrigua rendono questa terra tra le più fertili.

Più a sud, a S. Angelo Lodigiano, si fa carico del Lambro Meridionale, formato dalle acque del Seveso e dell'Olonza che, con il Redefossi e il Vettabbia, costituiscono i colatori di Milano.

Infine il Lambro conclude il suo percorso nei pressi di Corte S. Andrea, in comune di Orio Litta, alla confluenza con il fiume Po.

3. “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d’acqua naturali e artificiali all’interno dell’ambito idrografico di pianura Lambro – Olona”

In questo capitolo si vogliono riportare le principali argomentazioni trattate nello “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d’acqua naturali e artificiali all’interno dell’ambito idrografico di pianura Lambro - Olona” redatto dall’Autorità di Bacino del Fiume Pò nel 2003, sulla base del quale si è fondato gran parte di questo lavoro.

3.1 Storia

Il fiume Lambro è stato già oggetto in passato di studi e considerazioni rivolti sia al suo comportamento idraulico, sia alla qualità delle sue acque. In particolare, rivolgendo l’attenzione soprattutto ad un ambito puramente idrologico e idraulico, gli atti che si sono susseguiti negli anni passati possono essere qui brevemente riassunti:

- Sistemazione del fiume Lambro proposta dal “Comitato Coordinatore per le Acque della Provincia di Milano” nel 1937;
- “Proposte per la sistemazione idraulica del Lambro e per il riassetto paesaggistico della sua valle”, detto “Piano Lambro” – Provincia di Milano, 1986;
- Progetto esecutivo per i “Lavori di sistemazione delle opere idrauliche del Lambro Settentrionale nel tronco compreso tra il ponte dell’autostrada MI-BG ed il ponte di innesto alla tangenziale est di C.na Gobba nei comuni di Brugherio e Milano” del Magistrato per il Po di Parma – 1989 ÷ 1997.
- “Progetto Preliminare di sistemazione del fiume Lambro a monte di Villasanta” di competenza della Regione Lombardia, redatto dagli scriventi nel 1998;
- “Progetto di Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico” redatto dall’Autorità di Bacino del fiume Po.

Si può subito notare come negli anni si siano succedute logiche diverse d’intervento, dettate dalla diversa condizione del bacino, sia a livello urbanistico, sia a livello di qualità del sistema

fluviale e delle portate defluenti. Il risanamento avviato negli anni '80, con la formazione di reti di collettamento e depuratori, consente oggi la riproposizione parziale di alcune logiche d'intervento già individuate quasi un secolo or sono e poi accantonate per via del degrado del corso d'acqua, per anni considerato l'emblema dell'inquinamento fluviale.

3.1.1 Sistemazione del fiume Lambro proposta dal “Comitato Coordinatore delle Acque”

Il “Piano generale di coordinamento” (1937) dell'area compresa tra i fiumi Ticino e Adda elaborato dal “Comitato Coordinatore delle Acque” della Provincia di Milano mostrava una stima delle “deficienze di scarico” in caso di piena di tutti i corsi d'acqua nell'area considerata (tra i quali il Lambro Settentrionale e quello Meridionale) e un'indicazione qualitativa delle aree esondate in caso di piena. La logica di intervento proposta in tale studio come soluzione al problema prevedeva una serie di canali scolmatori delle piene dei corsi d'acqua maggiori (Olona, Seveso, Lambro, Naviglio Grande, Molgora) diretti principalmente verso i fiumi Ticino e Adda.

In particolare, per quanto riguarda il fiume Lambro, era stato ipotizzato uno scolmatore all'altezza del lago di Pusiano verso il lago di Annone e quindi verso il lago di Lecco e l'Adda. Anche le acque del torrente Bevera di Molteno (il principale affluente del Lambro nel tratto tra la sorgente e Villasanta) sarebbero state scaricate nel lago di Pusiano. Lo scoppio della guerra nel 1940 non consentì la realizzazione di alcuna delle opere previste.

Dopo le alluvioni degli anni 1947 e 1951 fu redatto sempre da parte del “Comitato Coordinatore delle Acque” un nuovo progetto generale di sistemazione che prevedeva due scolmatori delle piene del Lambro: quello già detto del lago di Pusiano e un secondo a nord di Monza (poi detto “Canale Scolmatore Nord-Est”) convogliante verso l'Adda parte delle acque di piena. Fu segnalata comunque anche la necessità di una generale sistemazione d'alveo in tutto il tratto tra Villasanta e la confluenza nel fiume Po.

3.1.2 “Piano Lambro”

Tale studio, predisposto dalla Provincia di Milano nel 1986, aveva lo scopo di individuare i criteri di sistemazione idraulica del fiume Lambro Settentrionale, in coerenza con le linee generali previste da Stato, Regione, Magistrato per il Po, Province, Comuni, in tema di difesa del territorio, compresa la sistemazione di corsi d'acqua e il loro disinquinamento. In esso si rileva come negli ultimi decenni il rischio di esondazione si sia progressivamente aggravato per la maggiore entità e frequenza degli eventi di piena, a causa della più estesa urbanizzazione del bacino e della minore capacità di portata del corso d'acqua in alcuni tratti,

dovuta a strozzature locali, a limitazioni di quota imposte dai manufatti di attraversamento e a carenza di manutenzione.

Tra gli obiettivi del progetto sono stati assunti come prioritari i problemi della difesa dalle piene e delle conseguenti esondazioni. Perciò è stato elaborato un modello per la trasformazione afflussi-deflussi e per la definizione dei livelli di piena e l'individuazione delle zone soggette a rischio di esondazione. A tal fine è stato effettuato anche un censimento di tutti i manufatti di attraversamento, individuando quelli insufficienti e quindi da modificare.

Per quanto riguarda le varie possibilità di intervento sul bacino del Lambro, il Piano di Bacino riteneva non efficace un maggiore utilizzo dei laghi di Alserio e Pusiano come bacini di accumulo per la laminazione delle piene del tratto di fiume a valle di Milano, anche perché potenziali generatori di inconvenienti igienico-ambientali, manifestando analoghe perplessità per un'ipotesi di volanizzazione in bacini artificiali a monte di Monza. Era ritenuta anche impraticabile la soluzione della realizzazione dello scolmatore Nord-Est delle piene del fiume Seveso e del fiume Lambro verso il fiume Adda finché non si fosse risolto il problema degli alti carichi inquinanti dei due corsi d'acqua.

Dai realizzatori dello studio è stata invece considerata praticabile la sistemazione dell'alveo del fiume con saltuari interventi di difesa a monte e a valle del tratto considerato più critico (tra Villasanta e Melegnano) per il quale viene proposto l'abbassamento delle livellette di fondo. Viene quindi proposta la soppressione delle traverse abbandonate con realizzazione di protezioni spondali se necessarie, la sostituzione delle traverse fisse ancora utilizzate con traverse mobili, ristabilire ove possibile le zone golenali con opportune arginature, l'ampliamento delle luci libere sotto i ponti, la difesa locale delle sponde da erosioni con opere radenti in pietrame o altro.

3.1.3 Progetto esecutivo per i “Lavori di sistemazione delle opere idrauliche del Lambro Settentrionale nel tronco compreso tra il ponte dell'autostrada MI-BG ed il ponte di innesto alla tangenziale est di C.na Gobba nei comuni di Brugherio e Milano”

Il progetto esecutivo prevedeva l'adeguamento dell'alveo attraverso la ricalibratura delle sezioni trasversali al fine di garantire il deflusso di una portata di massima piena pari a 520 m³/s, con un franco non inferiore a 50 cm; tale progetto non prevedeva peraltro l'adeguamento delle opere di attraversamento. Di tale progetto sono state realizzate le opere relative ai primi due stralci, mentre non sono state realizzate le opere relative al terzo stralcio, che comprendono il tratto di alveo a valle del ponte dell'Autostrada A4 e il tratto compreso tra

il ponte stradale dello svincolo della tangenziale a Cologno Monzese e il ponte dello svincolo della tangenziale di Palmanova a Cascina Gobba.

3.1.4 “Progetto Preliminare di sistemazione del fiume Lambro a monte di Villasanta”

Il Progetto Preliminare in oggetto riguarda le opere di riassetto idraulico dell’asta del fiume Lambro di competenza della Regione Lombardia dalle sorgenti sino al ponte di S. Giorgio in comune di Villasanta (MI).

A seguito di una prima fondamentale fase di studio, idrologico e idraulico, del fiume Lambro nel tratto in oggetto, è seguita una seconda fase di lavoro dove si sono individuate le migliori soluzioni progettuali idonee ad una completa sistemazione idraulica del corso d’acqua, supportando le scelte con analisi della fattibilità tecnica, economica ed ambientale delle opere.

In particolare le due problematiche di maggior rilievo riscontrate risultano le seguenti:

- bacino prelacuale: il trasporto solido in fase di piena, specie in corrispondenza dei principali affluenti;
- bacino sublacuale: l’insufficienza delle sezioni e dei manufatti nei riguardi delle portate di piena anche di non elevata entità.

Di conseguenza le metodologie di intervento nelle due zone sono risultate diverse ed in particolare le seguenti:

- bacino prelacuale: formazione di opere di trattenuta del materiale solido sia sull’asta principale sia in particolare sugli affluenti di maggior rilievo (torrente Foce, torrente Ravella, torrente Bova);
- bacino sublacuale: formazione di opere di laminazione delle portate e di adeguamento delle difese spondali esistenti e dei manufatti.

Per quanto concerne l’insieme delle caratteristiche influenti sul Progetto sicuramente la zona sublacuale ha rappresentato l’ambito dove gli interventi più risentono dei vincoli esistenti e dove pertanto risulta più difficile l’indicazione di soluzioni standard che si adattino ad ogni situazione. In particolare si è riscontrato come, a fronte di una naturale e determinante azione laminante esercitata dal lago di Pusiano, non risultano facilmente reperibili ulteriori aree di notevole estensione da adibire a cassa di espansione. Infatti a valle di Inverigo e Veduggio la valle del Lambro presenta una larghezza assai modesta, unitamente ad una pressione antropica che si spinge frequentemente sino alle sponde, e talvolta all’interno dell’alveo, tale da non consentire la localizzazione di adeguate casse di espansione. Per tale motivo il ruolo

cardine degli interventi di laminazione e riduzione delle portate è stato individuato nella corretta gestione del deflusso dal lago di Pusiano (attraverso l'emissario naturale e ben di più tramite l'esistente opera di regolazione) e nella salvaguardia e adeguamento delle poche aree di naturale espansione esistenti a monte della provincia di Milano, in sostanziale accordo con l'attività svolta da parte dell'Autorità di Bacino del fiume Po nella redazione della bozza di Piano delle Fasce Fluviali.

Oltre a soluzioni strutturali (casce d'espansione, rinforzi e risagomature arginali e spondali, rifacimento ed adeguamento di attraversamenti, riprofilatura e rinaturalizzazione del fondo alveo), si è fatto ricorso a soluzioni riguardanti la pianificazione dell'uso del suolo in prossimità dell'alveo e la gestione e regolazione delle portate. In merito alla prima tematica l'elevata pressione antropica sviluppatasi a ridosso del fiume specie all'inizio secolo, quando l'acqua del Lambro alimentava una serie ininterrotta di derivazioni che fornivano forza motrice agli opifici, pone vincoli alla possibilità di difesa strutturale. Non risulta infatti possibile realizzare, in un'ottica di corretta gestione ambientale ed economica, difese strutturali per insediamenti posti addirittura in alveo. Gli antichi realizzatori di tali insediamenti conoscevano i rischi derivanti dalla vicinanza del fiume, che peraltro forniva loro la ricchezza, e quindi si attrezzavano affinché le periodiche esondazioni che interessavano i piani bassi non producessero danni ai beni. Oggi tale sensibilità si è affievolita e si riscontrano numerose ristrutturazioni a fini abitativi in zone chiaramente soggette a rischio idraulico. In tali situazioni l'unico intervento possibile è di natura pianificatoria. In merito alla seconda tematica, data la notevole difficoltà a reperire zone di controllo della portata, si indica come fondamentale che la Regione Lombardia possa intervenire nella disciplina di gestione dell'opera di regolazione dei deflussi dal lago di Pusiano, affinché errate manovre sulla stessa non vanifichino tutti i benefici indotti dalle opere in progetto.

Un ulteriore aspetto non trascurabile è quello relativo al rispetto dei vincoli e delle peculiarità della valle. A tal fine si sono sempre confrontate le soluzioni prescelte con le previsioni pianificatorie dei comuni e del Parco Valle del Lambro cercando di conciliare le esigenze ambientali e storiche con la primaria esigenza di protezione civile.

3.1.5 “Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico”

Il “progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico” (PAI) ha lo scopo di assicurare, attraverso la programmazione di opere strutturali, vincoli, direttive, la difesa del suolo rispetto al dissesto di natura idraulica e idrogeologica e la tutela degli aspetti ambientali ad esso connessi.

Tra le varie problematiche e criticità affrontate dal PAI, è stata presa in esame la valutazione delle aree inondabili lungo i corsi d'acqua principali nei tratti di pianura e di fondovalle

montano e tra i vari bacini presi in esame dal PAI è presente anche quello del fiume Lambro, dal lago di Pusiano fino alla confluenza nel Po.

La delimitazione delle fasce fluviali è stata condotta secondo una metodologia che definisce tre distinte fasce:

- *fascia A* o fascia di deflusso della piena, è costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente, per la piena di riferimento con tempo di ritorno pari a 200 anni, del deflusso della corrente;
- *fascia B* o fascia di esondazione, esterna alla precedente, è costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi dell'evento di piena di riferimento. Il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento, ovvero sino alle opere idrauliche di controllo delle inondazioni dimensionate per la stessa portata
- *fascia C* o area di inondazione per piena catastrofica, è costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente, che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento. Come portata si assume la massima piena storicamente registrata, se corrispondente a un tempo di ritorno superiore a 200 anni, o in assenza di essa, la piena con 500 anni di tempo di ritorno.

Lungo l'asta del fiume Lambro sono state individuate le seguenti situazioni di squilibrio:

- instabilità morfologica dell'assetto planimetrico e altimetrico dell'alveo in relazione ai fenomeni di erosione spondale e di fondo, che si manifestano a danno delle opere di difesa e delle infrastrutture di attraversamento;
- elevato grado di artificializzazione del corso d'acqua nell'attraversamento dei territori urbanizzati, fino a Milano, in relazione alla riduzione delle capacità di laminazione;
- riduzione della sezione disponibile per il deflusso delle piene, per la presenza di localizzate formazioni di deposito alluvionale e per l'inadeguata altezza dell'intradosso di numerose infrastrutture di attraversamento, in particolare tra Merone e Linate;
- sistema difensivo frammentato e inadeguato al contenimento dei livelli idrici di piena. Monza, la periferia orientale e sud-orientale di Milano e il Lodigiano sono le zone maggiormente interessate da esondazioni che hanno per lo più carattere localizzato.

Gli interventi principali previste all'interno del PAI per l'asta del Lambro (comprendendo però anche l'asta del Seveso per la salvaguardia del nodo di Milano) sono:

- ✓ completamento difesa del nodo di Milano: realizzazione scolmatore nord-est, adeguamento tratti arginali, raddoppio scolmatore nord-ovest, invasi di laminazione;
- ✓ adeguamento capacità di deflusso a valle.

3.2 Stato di fatto

E' stato l'evento meteorico verificatosi alla fine del mese di novembre del 2002 ad avviare l'elaborazione di uno studio di fattibilità di sistemazione idraulica del fiume Lambro: esso ha infatti provocato esondazioni estese in alcuni tratti dell'asta del Lambro, in modo particolare nei comuni posti sulle rive del lago di Pusiano, a Carate Brianza, Villasanta, nel centro storico di Monza, nel comune di Cologno Monzese e a Milano (Parco Lambro).

E' importante evidenziare come il fiume Lambro risulti attualmente caratterizzato da una grave complessità legata principalmente ad una storica e continua azione modificativa dell'uomo tesa da un lato allo sfruttamento della risorsa idrica e dall'altro alla difesa dalle piene.

A fronte di tale situazione, l'Autorità di Bacino del Po ha ritenuto necessario procedere ad un'analisi idraulica a scala di bacino che tenesse in conto le caratteristiche, le criticità e le potenzialità di ogni tratto dell'asta, al fine di raggiungere un assetto complessivo in grado di porre in sicurezza le zone oggi soggette a rischio, senza tuttavia indurre impatti insostenibili sul territorio.

In estrema sintesi, perciò, si cercherà di riassumere di seguito le maggiori peculiarità che hanno contribuito alla formazione dell'attuale contesto idrografico.

Sempre in relazione alla notevole pressione antropica a cui il bacino del Lambro è stato da sempre soggetto, bisogna innanzitutto far notare come l'intero assetto del corso d'acqua sia caratterizzato da una particolare configurazione a imbuto che crea non pochi problemi all'ambiente circostante (ci si riferisce soprattutto alle situazioni che si verificano in corrispondenza dell'attraversamento di Monza e Milano). Il corso d'acqua presenta una conformazione con capacità di deflusso progressivamente inferiore da monte verso valle: convergendo infatti sulle zone urbane di Monza e Milano, l'alveo risulta possedere capacità di smaltimento inadeguate alle esigenze, con tempo di ritorno modesto, cioè di circa 10 - 20 anni.

L'urbanizzazione del territorio ha di fatto confinato tali tratti in ambiti o sezioni chiuse il cui ampliamento non risulta proponibile.

Le sezioni di deflusso sono caratterizzate da numerosi manufatti di attraversamento, stradale, autostradale e ferroviario, e da un sistema difensivo spondale discontinuo, sviluppatosi senza un criterio guida omogeneo, come conseguenza dei limiti imposti dalle urbanizzazioni.

Ultima peculiarità che coinvolge la parte maggiormente urbanizzata dell'asta fluviale è il peso, in termini di apporto idrico, dei sistemi di smaltimento delle acque meteoriche urbane che, da sole, sono in grado di saturare il sistema lungo l'area urbanizzata; spesso, infatti, l'apporto delle singole reti fognarie risulta di gran lunga superiore all'apporto dei maggiori affluenti naturali: la Bevera di Molteno ad esempio, il massimo affluente naturale del Lambro, di portata duecentennale non superiore ai $60 \text{ m}^3/\text{s}$, non risulta infatti paragonabile, in termini di deflusso confluyente nel fiume Lambro, agli apporti derivanti dagli scaricatori consortili Alto Lambro a Monza ($70 \text{ m}^3/\text{s}$ scaricabili dai tre scolmatori posti in corrispondenza dell'impianto di depurazione) o dal Comune di sesto San Giovanni ($70 \text{ m}^3/\text{s}$).

In aggiunta alle specifiche criticità che il Lambro presenta, conseguenza della smisurata e incontrollata azione antropica, risulta interessante, al fine di effettuare un'attenta e complessiva analisi della struttura del corso d'acqua, evidenziare ulteriori particolarità.

Il fiume Lambro, come già detto in precedenza, risulta essere emissario di un lago (il lago di Pusiano); la presenza di quest'ultimo, con la sua notevole estensione e capacità di invaso, determina un sostanziale abbattimento delle onde di piena provenienti dal bacino prelacuale.

L'effetto di laminazione del lago genera deflussi nell'alveo a valle caratterizzati da picchi poco accentuati (rispetto a quelli in ingresso al lago), ma durate molto prolungate, caratteristiche tipiche delle onde in uscita dagli invasi. I volumi che transitano nel Lambro sono quindi molto elevati. Tale aspetto preclude la reale efficacia di interventi di laminazione diretta delle portate del Lambro in quanto non è possibile reperire lungo il corso del fiume superfici e volumi di entità tale da poter laminare onde con volumetrie così elevate e con impatto sul territorio sostenibile.

Nella pagina seguente viene riportata una schematizzazione (Fig.3.1) del fiume nel tratto analizzato: in particolare sono riportate le caratteristiche principali dei bacini afferenti e valori delle portate al colmo duecentennali a monte e a valle delle varie confluenze.

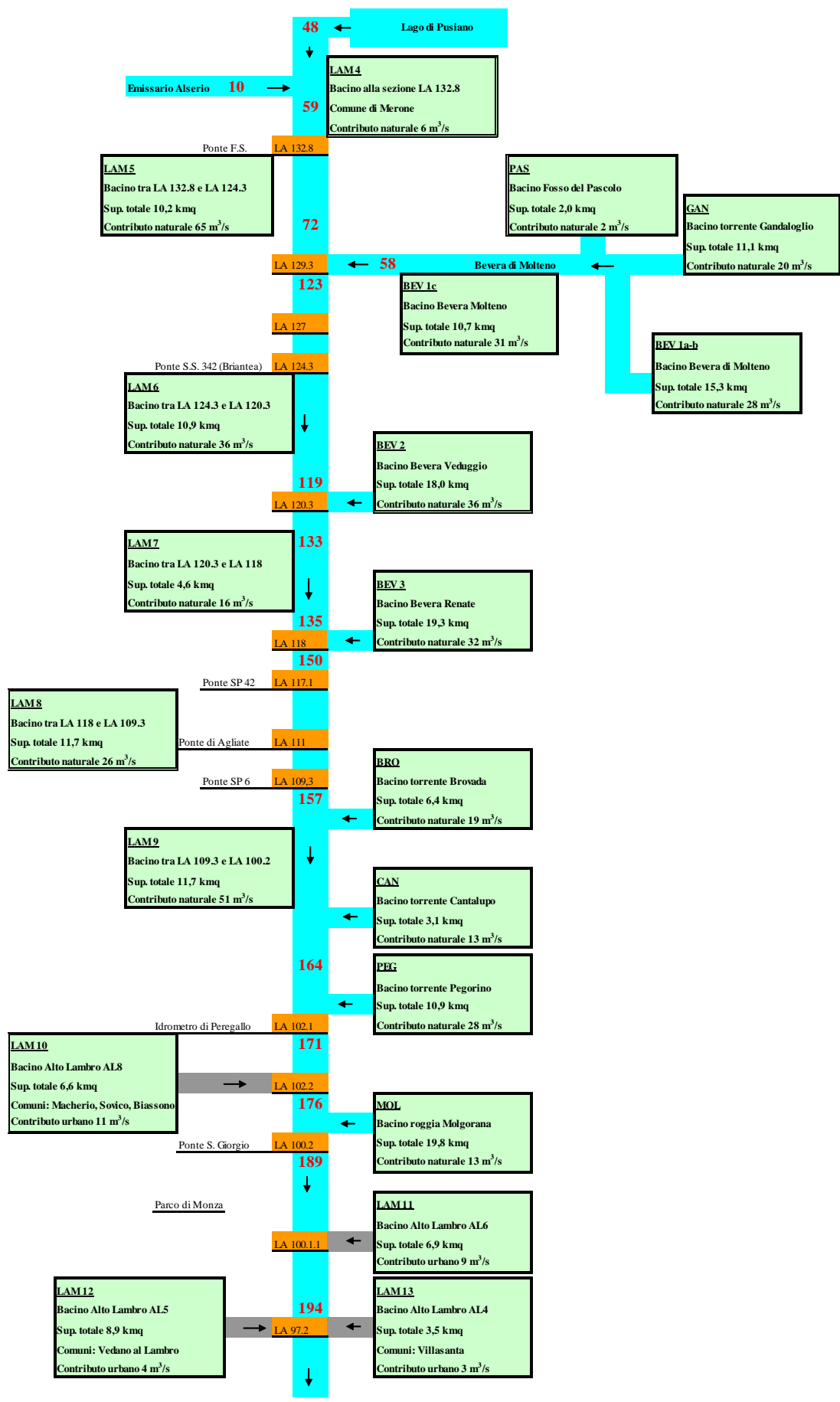


Fig. 3.1 -Schema a blocchi

3.3 Assetto di progetto

Per quanto sopra brevemente riassunto, gli studi che si sono susseguiti nel tempo per la soluzione dell'ambito milanese hanno sempre individuato soluzioni volte a ridurre pesantemente i deflussi alle porte della città. E' ormai chiaro da anni, infatti, il problema dell'insufficienza dei tratti vallivi del corso d'acqua e come tale problema debba essere risolto mediante l'azzeramento dei deflussi da monte attraverso la formazione di nuove laminazioni, ambientalmente e territorialmente compatibili.

Come infatti indicato dall'Autorità di bacino del Po, tenuto conto che l'intero sistema di difese idrauliche dell'asta fluviale deve essere ridimensionato in coerenza con gli obiettivi generali del PAI e con l'assetto complessivo dell'asta, con riferimento a una piena di progetto con tempo di ritorno di 200 anni, si ha che le metodologie di intervento, in grado di tenere in conto tali maggiori criticità, sono le seguenti:

- regolazione del lago di Pusiano;
- aumento, come già accennato, della capacità di laminazione all'interno del bacino (asta fluviale e affluenti), in modo da ridurre opportunamente in relazione agli afflussi ed alla sostenibilità della soluzione, l'entità delle portate;
- mantenimento delle aree di allagamento naturale che interessano zone golenali;
- rimozione dei manufatti di attraversamento che ostacolano il deflusso di piena e inducono allagamenti in zone non compatibili;
- riduzione delle portate scaricate dalle reti di drenaggio urbano;
- aumento della capacità idraulica dell'alveo attraverso opere locali.

3.3.1 Regolazione lago di Pusiano

L'utilizzo del lago di Pusiano quale bacino regolatore delle portate in arrivo dal Triangolo Lariano è attuabile attraverso l'adeguamento e la migliore gestione dell'opera di controllo denominata Cavo Diotti, che funge da by-pass rispetto all'uscita naturale (a tal proposito si fa presente che la progettazione dell'adeguamento idraulico del Cavo Diotti è a livello esecutivo e per i prossimi mesi è prevista l'assegnazione dei lavori). La superficie del lago è di circa 5,6 km², mentre il dislivello massimo teoricamente disponibile, considerando la quota di massimo invaso pari a 262,00 m s.m. (livello di incipiente esondazione) e il livello minimo pari a 259,60 m s.m. (in relazione alla configurazione dell'attuale Cavo di Diotti), è pari a circa 2,4 m, pertanto il volume teoricamente disponibile è pari a circa 12.000.000 m³.

La regolazione del lago di Alserio risulta invece poco significativa in quanto il deflusso naturale raggiunge valori ridotti sia per le dimensioni dell'emissario che per il ridotto bacino direttamente afferente: il bacino afferente al lago di Alserio è pari a 16,5 km², mentre il bacino afferente al lago di Pusiano è pari a 95 km².

Nell'assetto di progetto si è ipotizzata una gestione del lago di Pusiano, in modo tale che durante l'evento di piena si raggiunga il massimo livello d'invaso, pari a circa 262,00 m s.m. e che l'uscita dal lago sia attribuita soltanto al ramo naturale, in quanto il Cavo di Diotti durante la fase d'invaso è stato ipotizzato chiuso, al fine di ridurre al massimo la portata in uscita dal sistema. Tale livello d'invaso è in grado di convogliare nel Lambro una portata al colmo pari a 16 m³/s, a fronte della portata duecentennale nello stato attuale di 48 m³/s (corrispondenti ad un livello idrico nel lago di 263,40 m s.m.). Pertanto si ha una cospicua riduzione delle portate al colmo in uscita dal lago di Pusiano.

3.3.2 Aree di laminazione

Ad eccezione dell' utilizzo della zona di laminazione nella zona di Inverigo, vista la ridotta possibilità di laminare le portate direttamente nell'alveo principale a causa dell'elevata volumetria dell'onda di piena, è stata presa in considerazione la possibilità di ridurre gli afflussi naturali esterni attraverso opere di laminazione localizzate lungo i principali affluenti; in particolare gli interventi previsti sono ubicati lungo i seguenti corsi d'acqua:

- sul Torrente Gandaloglio a Oggiono;
- sulla Bevera di Molteno attraverso l'utilizzo della cava di Brenno quale bacino di laminazione;
- sulla Bevera di Renate a Briosco.

Per quanto riguarda l'intervento di laminazione sul torrente Gandaloglio si può dire che l'opera, di cui oggi si dispone di progettazione esecutiva, permette di ridurre l'apporto idrico del Gandaloglio e del Fosso del Pascolo dagli attuali 22 m³/s complessivi, a circa 10 m³/s in ingresso alla Bevera di Molteno, ed è costituita principalmente da un'area ad allagamento controllato situata a monte del comune di Molteno.

L'adeguamento della Cava di Brenno è a livello preliminare e sono state fatte già ipotesi per il suo funzionamento. La vasca in oggetto è formata da un volume complessivo di 1.400.000 m³ ricavabili nella sede dell'attuale cava in località Brenno della Torre di Costa Masnaga, gestita dalla Holcim S.p.A.. L'opera di sbarramento e regolazione dell'intero sistema, con bocca di uscita tarata per un massimo di 22.5 m³/s, permette una laminazione tale per cui la portata al colmo a monte di tale opera, pari a 57 m³/s allo stato attuale e pari a 45 m³/s se si considera

la laminazione ottenuta con l'area di esondazione controllata sul torrente Gandaloglio, viene ridotta a 22.5 m³/s, per eventi legati a tempo di ritorno duecentennale.

Sostanzialmente l'effetto combinato delle due laminazioni sul torrente Gandaloglio e sul torrente Bevera di Molteno porta l'afflusso globale del torrente Bevera dagli attuali 57 m³/s al colmo a valori prossimi a 22 m³/s, quindi con una riduzione del 60 %.

La cassa di espansione sul torrente Bevera di Renate, di cui si dispone di progetto esecutivo, è localizzata poco a monte della confluenza in Lambro in frazione Fornaci. La cassa d'espansione in progetto si compone di due comparti, denominati settore "Fornaci" e settore "Monbello", con funzionamento sequenziale, comandato dalle paratoie motorizzate che parzializzano progressivamente le luci di fondo sulla base delle letture di livello e portata nella sezione di controllo del ponte di via XI Febbraio.

La vasca prevede un volume complessivo di 500.000 m³, in grado di ridurre la portata al colmo per eventi duecentennali in ingresso nel Lambro, dagli attuali 33 m³/s per eventi con tempo di ritorno 200 anni, a 16 m³/s nell'assetto di progetto.

Infine si prevede la realizzazione di un'area di espansione, diversamente dalle precedenti, situata lungo l'asta principale del fiume Lambro, localizzata nel comune di Inverigo e marginalmente anche nel comune di Nibionno; essa non si configura attraverso la realizzazione di una vera e propria cassa di espansione, ma consiste nella regimazione e salvaguardia a fini idraulici dell'unica area di esondazione di rilievo attualmente esistente lungo l'asta del Lambro.

In progetto, pertanto, è prevista la realizzazione di un'opera di controllo delle portate che, pur con i colmi in arrivo da monte minori per effetto della realizzazione delle vasche di Merone e Molteno, mantenga, per l'evento duecentennale, i medesimi livelli idrici provocando l'esondazione nelle aree non urbanizzate già oggi interessate dalla piena, con volume di laminazione utile pari a 800.000 m³. Per ottenere tale effetto l'opera di regolazione prevista dovrà limitare la portata defluente a valle dagli attuali 135 m³/s a 65 m³/s in occasione degli eventi di piena di progetto.

Per meglio comprendere le varie riduzioni delle portate al colmo dell'evento duecentennale previste dal piano dell'Autorità di bacino, che fornisce i valori di portata limite per ogni sezione idraulica del fiume Lambro, ed avere quindi una visione globale dei benefici conseguenti la realizzazione delle diverse aree di espansione, si riporta di seguito una tabella (Tab.3.1) riassuntiva comprendente le portate, nei diversi tratti del fiume, nello stato attuale e nell'assetto di progetto.

Sezione	Portata stato attuale (Tr=200) [m ³ /s]	Portata assetto progetto (Tr=200) [m ³ /s]
uscita lago di Pusiano	48	16
Ponte S.P. 41 - Merone	60	22
a monte confluenza Bevera Molteno	74	45
confluenza Bevera Molteno	122	55
Ponte via Camisasca - Inverigo	133	66
a monte confluenza Bevera Renate	134	67
Ponte S.P 42	150	85
Ponte via Garibaldi - Verano Brianza	155	91
Ponte via Fiume - Carate Brianza	156	93
Ponte strada comunale - Triuggio	157	95
Ponte ferroviario linea Monza - Molteno	164	107
Ponte vecchio - Biassono	174	129
Ponte S. Giorgio - Villasanta	189	141

Tab. 3.1 -Portate di tempo di ritorno di 200 anni allo stato attuale e nell'assetto di progetto

Si sottolinea come la sommatoria degli effetti delle opere volte alla riduzione della portata in alveo (regolazione del lago di Pusiano e le sopraccitate casse di laminazione) comportano, alla sezione di chiusura del tratto di alveo naturale, una riduzione della portata al colmo da 190 m³/s a 140 m³/s (riduzione del 25%). La riduzione verso valle della portata è influenzata dal fatto che, nello stato attuale, sono presenti tra Merone e Villasanta zone di allagamento non compatibili con l'assetto territoriale, che contribuiscono a ridurre la portata in alveo, le quali, ovviamente, non sono più presenti nell'assetto di progetto. Pertanto gli effetti di riduzione di portata conseguenti ad allagamenti in aree urbane non sussistono più nell'assetto di progetto. La reale riduzione sarebbe pertanto da ricavare paragonando il valore attuale, depurato degli effetti positivi di allagamento in aree urbane, con il valore di progetto.

4. Idrologia

Come detto in precedenza, oggetto della modellazione, che verrà approfonditamente trattata nel prossimo capitolo, è il comportamento del fiume Lambro lungo il bacino dell'alta valle: dall'uscita del lago di Pusiano al Parco di Monza.

Lo studio idrologico dei vari bacini afferenti, in linea o laterali, al Lambro è già stato svolto dall'Autorità di Bacino del Po nello Studio di Fattibilità del 2003 adottando tempi di ritorno pari a 10, 200 e 500 anni, ad ogni modo, nel seguito della trattazione, si prenderà in considerazione il solo evento con tempo di ritorno di 200 anni. A fini esplicativi si riportano nel seguito del capitolo le metodologie scelte e i risultati ottenuti in termini di idrogrammi che hanno costituito quindi le condizioni al contorno per la modellazione idraulica effettuata.

4.1 Pluviometria

In seguito all'individuazione delle curve di possibilità pluviometrica riferite ai tre diversi tempi di ritorno, è necessaria la scelta di uno ietogramma unitario istantaneo per la definizione delle piogge afferenti al bacino.

Tra i diversi tipi di piogge sintetiche utilizzate nella progettazione di opere idrauliche, è stato preso in considerazione lo ietogramma Chicago (esempio in figura 4.1), le cui caratteristiche principali sono: andamento temporale non costante dell'intensità di precipitazione, caratterizzato in particolare dalla presenza di un picco d'intensità posto all'interno della durata complessiva dell'evento e che separa due rami rispettivamente crescente, prima del picco, e decrescente, dopo il picco, aventi andamento esponenziale; congruità tra le intensità medie dello ietogramma e quelle definite dalla curva di possibilità pluviometrica per qualsiasi durata parziale attorno al picco minore o uguale a quella dello ietogramma complessivo.

Anzi tutto è da sottolineare come tale ietogramma conduca a riprodurre onde di piena poco sensibili rispetto alla durata totale dell'evento meteorico, poiché un aumento di essa ha effetto solo sul prolungamento delle code iniziale e finale dello ietogramma ove l'intensità è minore.

Inoltre uno stesso ietogramma Chicago, proprio perché è congruente con la curva di possibilità pluviometrica per ogni durata parziale attorno al picco, risulta contenere le piogge critiche di ogni sottobacino del bacino complessivo, purché la durata totale dello ietogramma sia maggiore del tempo di risposta del bacino complessivo. Esso quindi evita la ricerca dell'evento critico specifico di ogni sottobacino, ricerca che, anche se priva di difficoltà concettuali, diviene pesante quando un bacino, come ad esempio il Lambro, sia suddiviso in

molti sottobacini ed occorra ogni volta procedere a molteplici simulazioni riferite a differenti tempi di ritorno e a differenti scenari di intervento.

È poi da tenere presente che la presenza del picco dello ietogramma Chicago consente di evitare gli errori di sottostima delle portate al colmo conseguenti, soprattutto nei bacini di piccole e medie dimensioni, all'adozione dello ietogramma costante, assai diffuso nelle elaborazioni idrologiche anche perché particolarmente semplice e ben maneggiabile nei modelli matematici.

Si deve peraltro ricordare che lo ietogramma Chicago, poiché rispetta la curva di possibilità pluviometrica per ogni durata parziale, è caratterizzato da un tempo di ritorno maggiore di quello nominale, con conseguente sovrastima dell'onda di piena. Peraltro l'eventuale sovrastima è da considerarsi positivamente nel campo della pianificazione in cui le valutazioni devono essere a carattere prudenziale, tenendo conto delle inevitabili approssimazioni di tutte le elaborazioni idrologiche.

La durata dello ietogramma è stata assunta pari a 24 ore e il parametro r è stato assunto pari a 0,3.

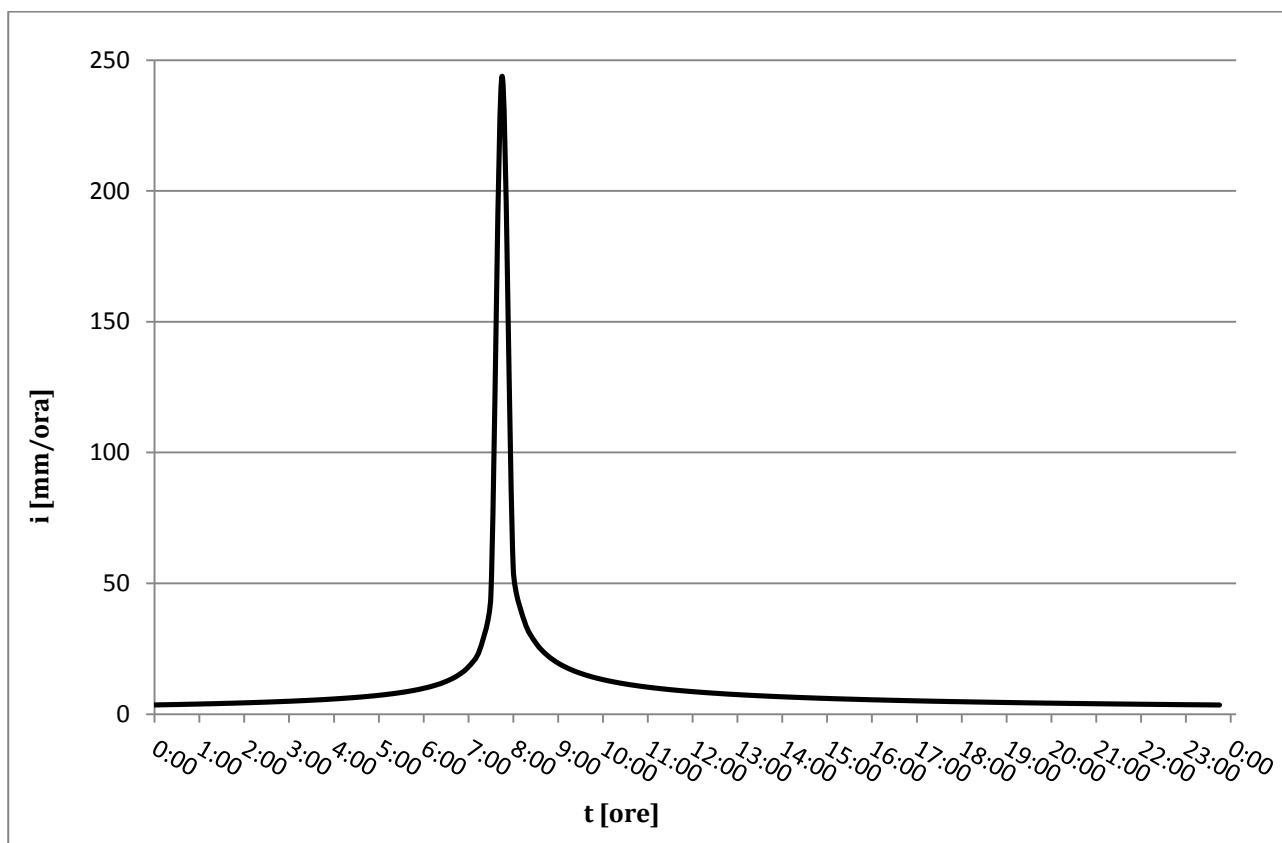


Fig. 4.1 - Esempio di ietogramma Chicago

4.2 Comportamento idrologico

Questo tratto di bacino, seppur mediamente urbanizzato, mantiene un comportamento prevalentemente naturale. Ad ogni modo, di seguito, verranno descritti più in dettaglio i comportamenti dei singoli sottobacini, riportando, per ognuno di essi, l'idrogramma afferente alla relativa sezione di chiusura.

4.2.1 LAM4

Il sottobacino LAM4, rappresenta il bacino diretto del Lambro, compreso tra l'uscita dal lago di Pusiano e il ponte ferroviario (tra le sezioni 132.10 e 132.084 del modello) ha un'estensione di circa 1.38 km² e comprende il territorio del comune di Merone. Tale bacino è mediamente urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.32$, $a(T=200) = 95$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 262 mm, a cui corrispondono 0.36 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.2, ha una portata al colmo pari a 18.3 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0.1 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.28.

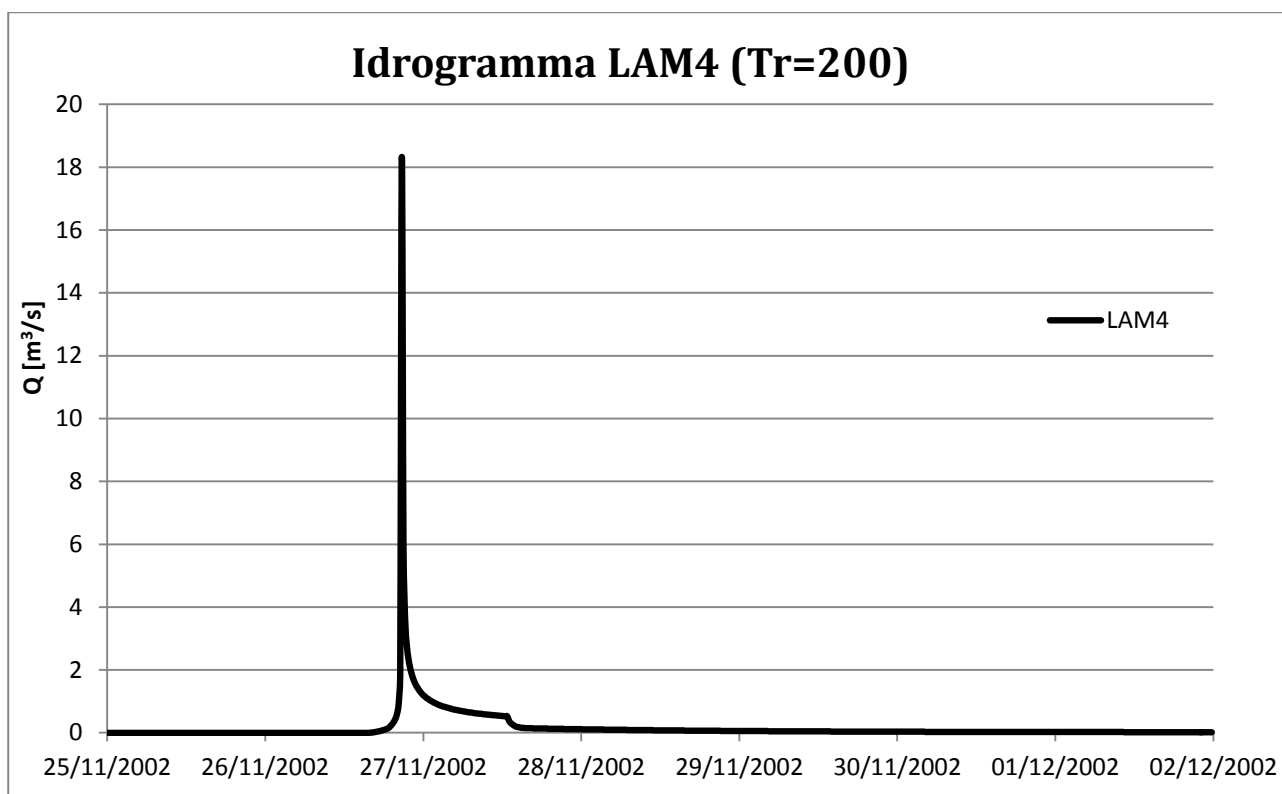


Fig. 4.2 - Idrogramma del sottobacino LAM4 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.2 LAM5

Il sottobacino LAM5 rappresenta il bacino diretto del Lambro compreso tra il ponte ferroviario in Merone e il ponte della statale SS-342 (tra le sezioni 132.084 e 124.34), ha un'estensione di circa 10.2 km² e comprende il territorio dei comuni di Monguzzo e Lambrugo. Tale bacino è mediamente urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.31$, $a(T=200) = 100$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 268 mm, a cui corrispondono 2.7 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.3, ha una portata al colmo pari a 65.4 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0.75 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.28.

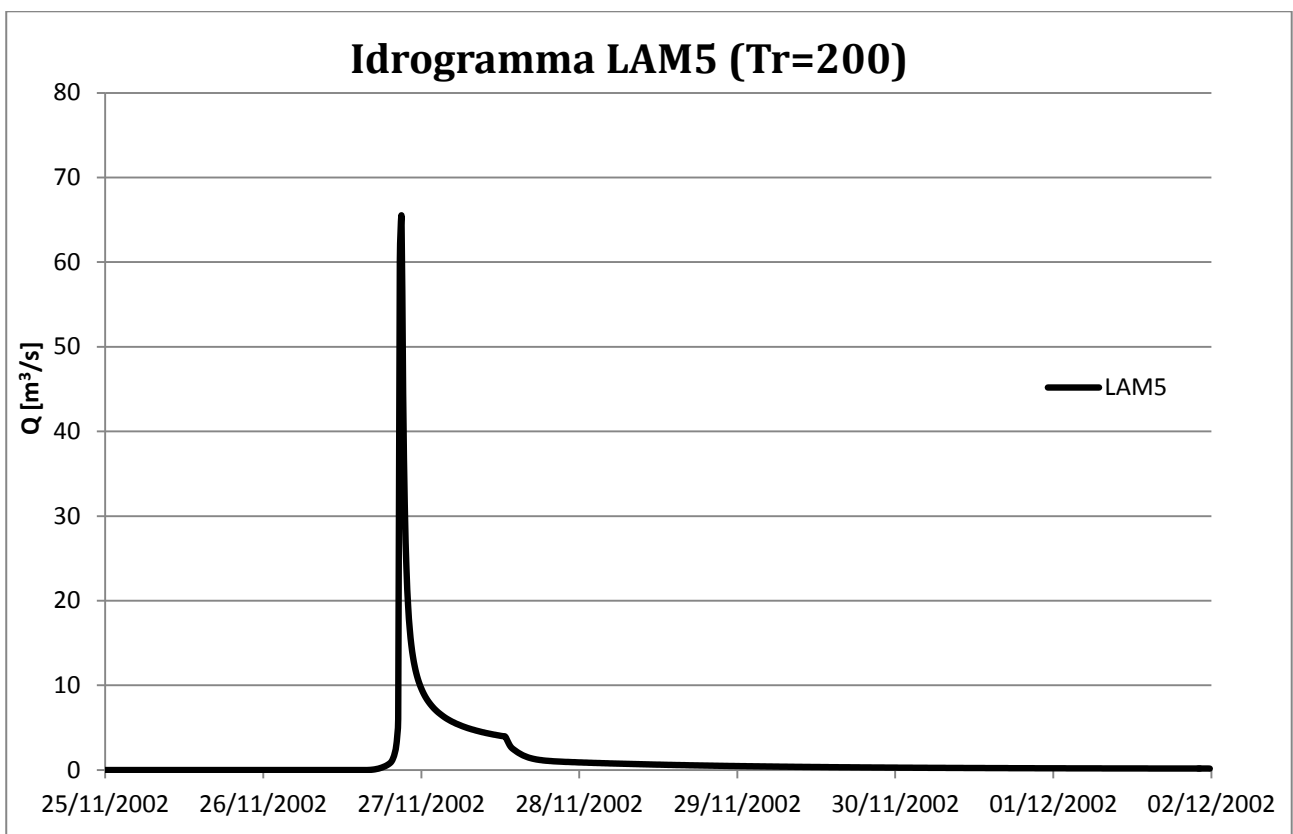


Fig. 4.3 - Idrogramma del sottobacino LAM5 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.3 BEV1

Il sottobacino BEV1 rappresenta il bacino della Bevera di Molteno (affluente del Lambro); data l'estensione del bacino, di circa 40,9 km², il comportamento idrologico di questo può essere ulteriormente indagato suddividendolo in 4 diversi sottobacini.

- Il primo sottobacino, costituito dal bacino della Bevera di Molteno a monte della confluenza con il torrente Gandaloglio, ha un'estensione di circa 18,28 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Colle Brianza, Rovagnate, Perego, Castello di Brianza, Barzago e Sirone. Tale bacino è mediamente urbanizzato ed i versanti sono acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0,29$, $a(T=200) = 105$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 264 mm, a cui corrispondono 4,8 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.4, ha una portata al colmo pari a 28,2 m³/s e un volume complessivo pari a circa 1,3 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0,27.

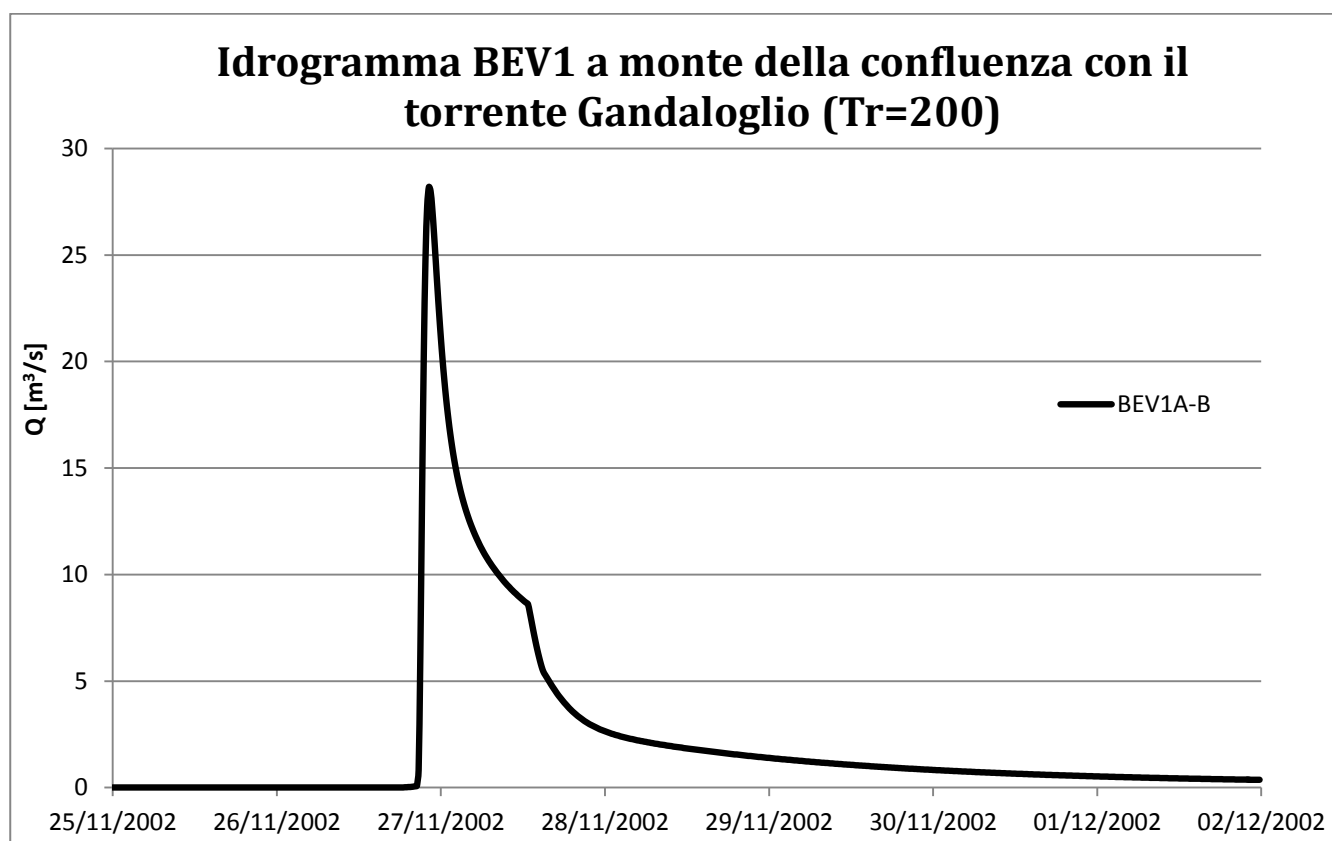


Fig. 4.4 - Idrogramma del sottobacino BEV1 a monte della confluenza con il torrente Gandaloglio per tempo di ritorno di 200 anni

- Il secondo sottobacino, costituito dal bacino del torrente Gandaloglio, affluente della Bevera di Molteno, ha un'estensione di circa 11,11 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Dolzago e Castello di Brianza. Tale bacino è scarsamente urbanizzato ed i versanti sono molto acclivi.

Considerando le curve di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0,29$, $a(T=200) = 105$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 264 mm, a cui corrispondono 2,9 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.5, ha una portata al colmo pari a $20,5$ m³/s e un volume complessivo pari a circa 0,8 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0,27.

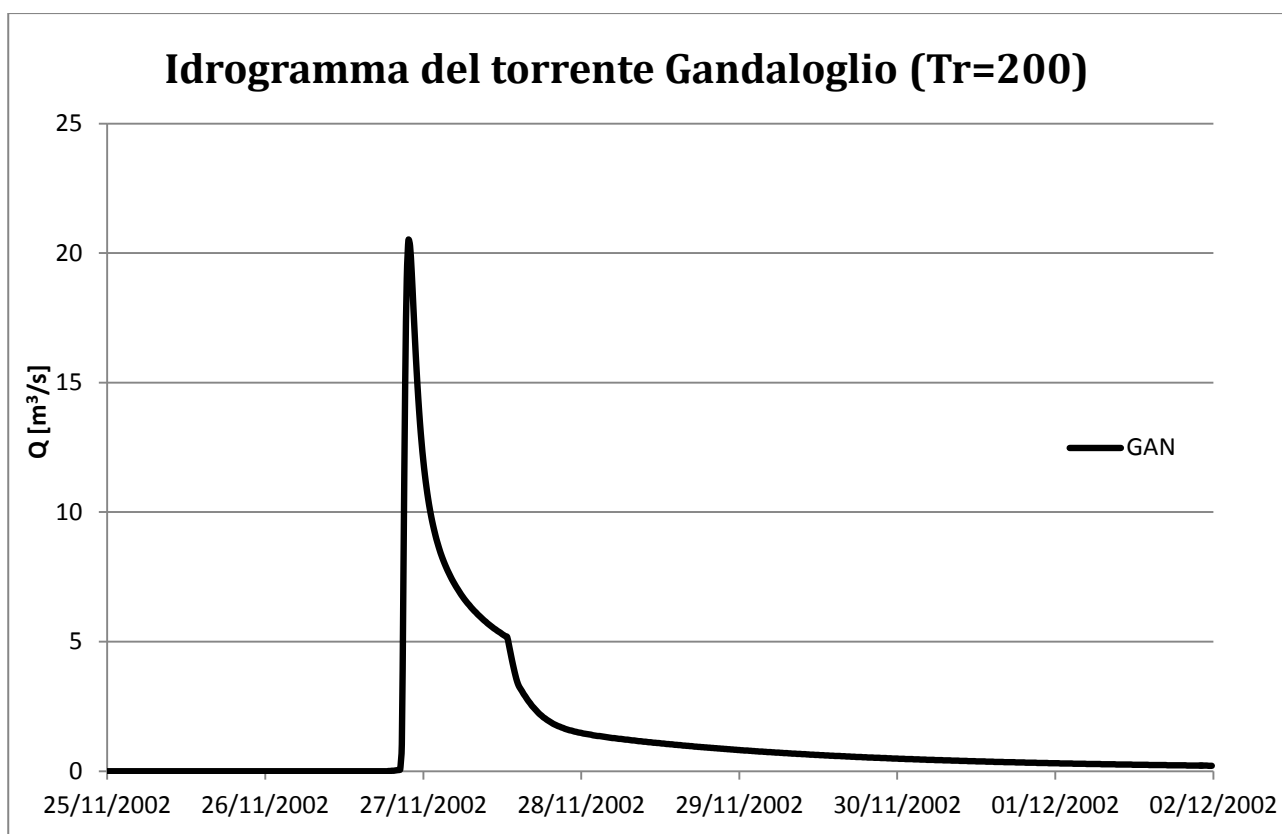


Fig. 4.5 - Idrogramma del sottobacino imbrifero del torrente Gandaloglio per tempo di ritorno di 200 anni

- Il terzo sottobacino, costituito dal bacino del Fosso del Pascolo, affluente della Bevera di Molteno, ha un'estensione di circa 1,98 km². Tale bacino è scarsamente urbanizzato ed i versanti sono poco acclivi.

Considerando le curve di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0,29$, $a(T=200) = 105$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 264 mm, a cui corrispondono 0,5 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.6, ha una portata al colmo pari a $2,1$ m³/s e un volume complessivo pari a circa 0,13 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0,26.

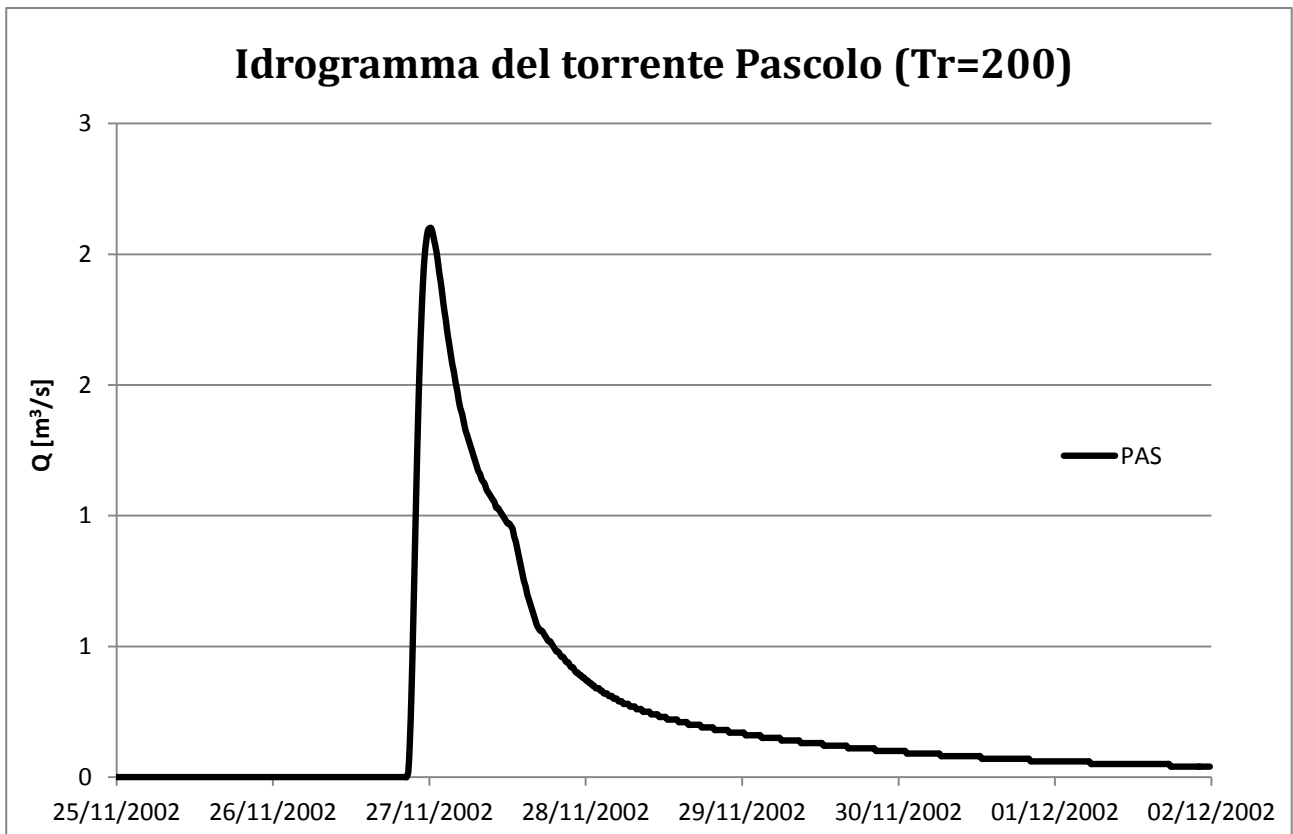


Fig. 4.6 - Idrogramma del sottobacino imbrifero del torrente Pascolo per tempo di ritorno di 200 anni

- Il quarto sottobacino, costituito dal bacino afferente alla Bevera di Molteno, compreso tra la confluenza con il torrente Gandaloglio e la confluenza con il Lambro, ha un'estensione di circa 10,73 km² e comprende parte del territorio del comune di Molteno. Tale bacino è scarsamente urbanizzato ed i versanti sono molto acclivi.

Considerando le curve di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.29$, a $(T=200) = 105$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 264 mm, a cui corrispondono 2,8 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.7, ha una portata al colmo pari a 31,3 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0,76 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0,27.

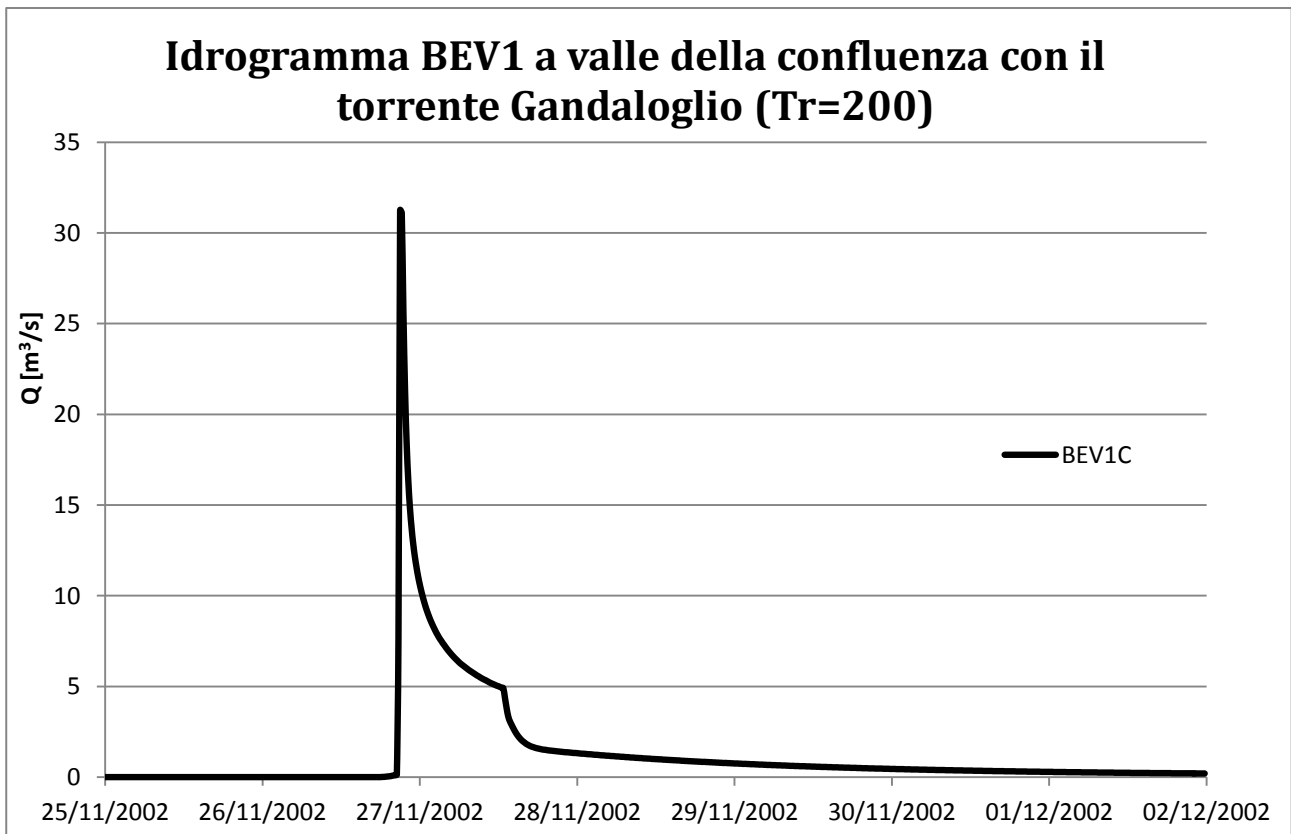


Fig. 4.7 - Idrogramma del sottobacino BEV1 a valle della confluenza con il torrente Gandaloglio per tempo di ritorno di 200 anni

Per ottenere l'idrogramma complessivo afferente alla sezione di chiusura del bacino della Bevera, si sono sommati i primi tre idrogrammi e, successivamente, effettuando una traslazione rigida di questo lungo il tratto di Bevera compreso tra la confluenza con il Gandaloglio e la confluenza con il Lambro, in un tempo di circa 45 minuti, è stata effettuata la somma tra l'idrogramma uscente dal quarto sottobacino e l'idrogramma traslato, così da ottenere l'idrogramma riportato in figura 4.8.

Il seguente idrogramma è inserito nel modello in prossimità della confluenza della Bevera con il fiume Lambro, alla sezione 129.2.

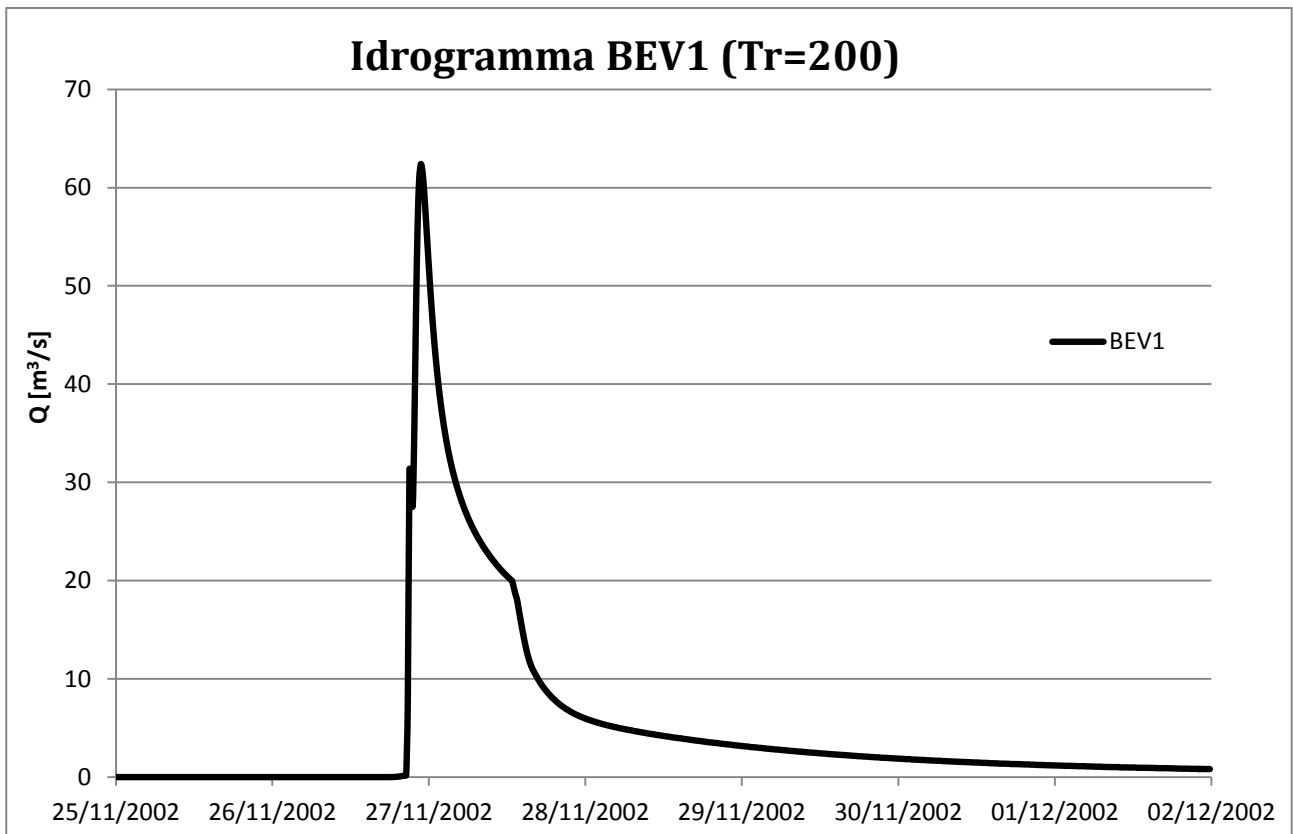


Fig. 4.8 - Idrogramma complessivo del sottobacino BEV1 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.4 LAM6

Il sottobacino LAM6 rappresenta il bacino diretto del Lambro compreso tra il ponte della statale SS-342 (sezione 124.34) e la confluenza con la Bevera di Veduggio (sezione 120.3), ha un'estensione di circa 10.93 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Lurago d'Erba e Veduggio con Colzano. Tale bacino è mediamente urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.31$, $a(T=200) = 100$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 268 mm, a cui corrispondono 2.9 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.9, ha una portata al colmo pari a 36 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0.8 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.27.

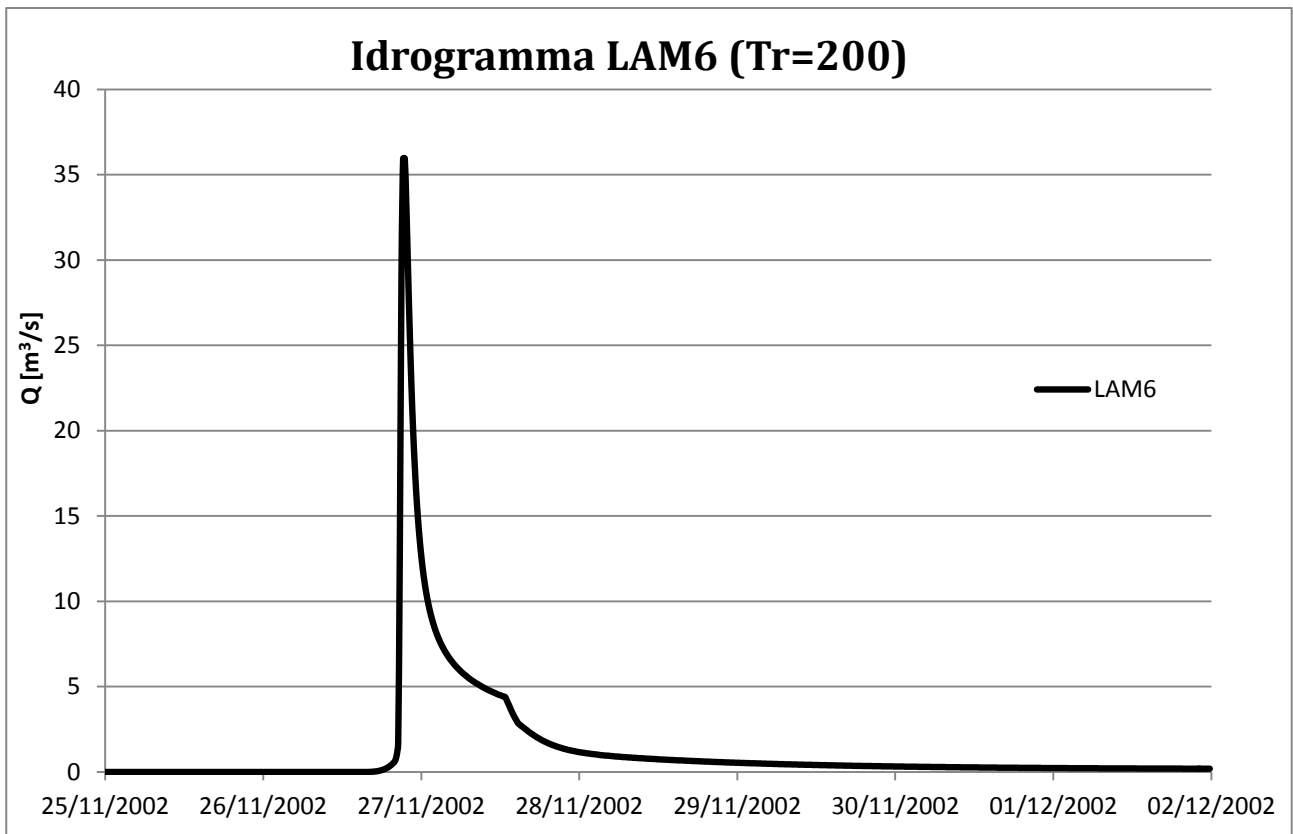


Fig. 4.9 - Idrogramma del sottobacino LAM6 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.5 BEV2

Il sottobacino BEV2 rappresenta il bacino della Bevera di Bulciago, affluente sinistro del Lambro, ha un'estensione di circa 18 km² e comprende parte del territorio dei comuni Veduggio con Colzano, Cassago, Bulciago e Barzago. Tale bacino è mediamente urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.29$, $a(T=200) = 105$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 264 mm, a cui corrispondono 4.7 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.10, ha una portata al colmo pari a 36.7 m³/s e un volume complessivo pari a circa 1.4 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.30. Esso viene immesso nel modello alla sezione 120.21.

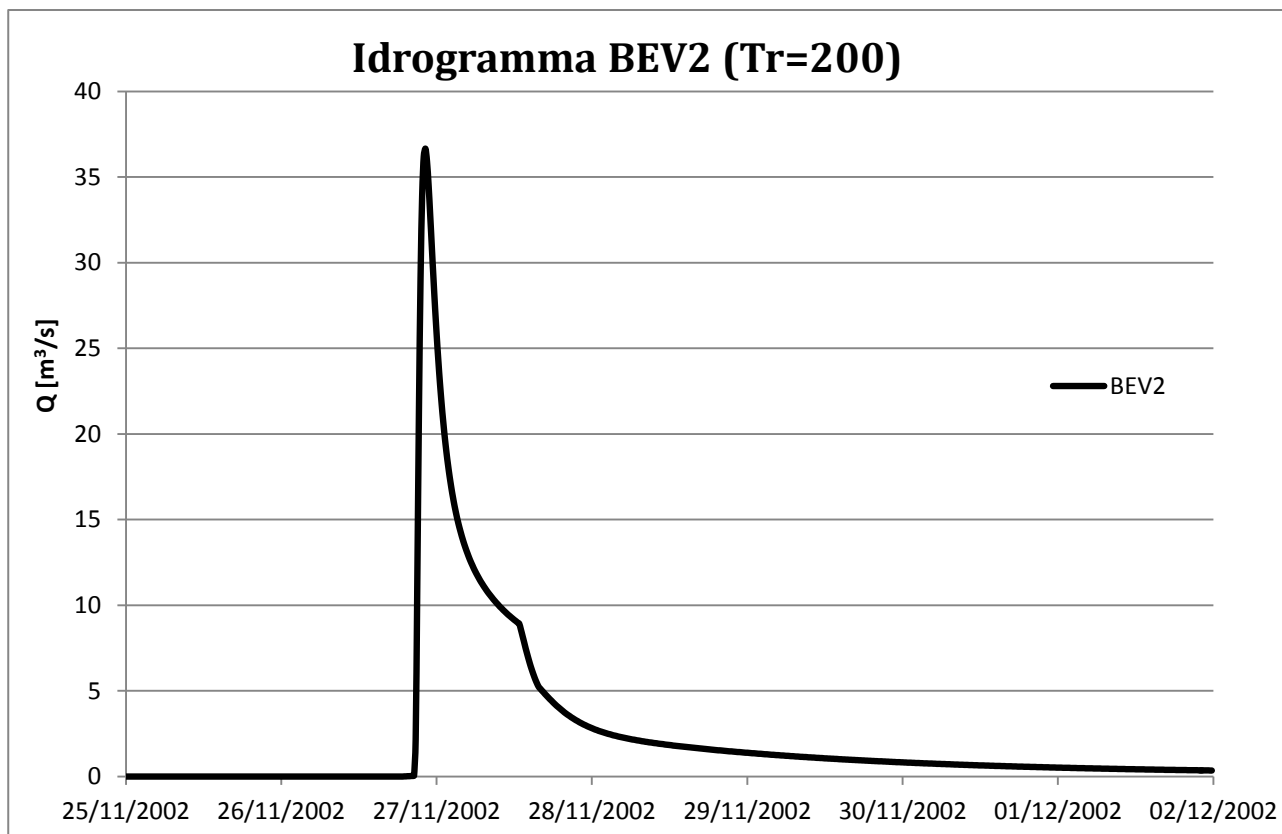


Fig. 4.10 - Idrogramma del sottobacino BEV2 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.6 LAM7

Il sottobacino LAM7 rappresenta il bacino diretto del Lambro compreso tra la confluenza con la Bevera di Bulciago (sezione 120.2) e la confluenza con la Bevera di Renate (sezione 118), ha un'estensione di circa 4.6 km² e comprende parte del territorio del comune di Inverigo. Tale bacino è mediamente urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.31$, $a(T=200) = 95$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 254 mm, a cui corrispondono 1.2 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.11, ha una portata al colmo pari a 17.3 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0.3 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.25.

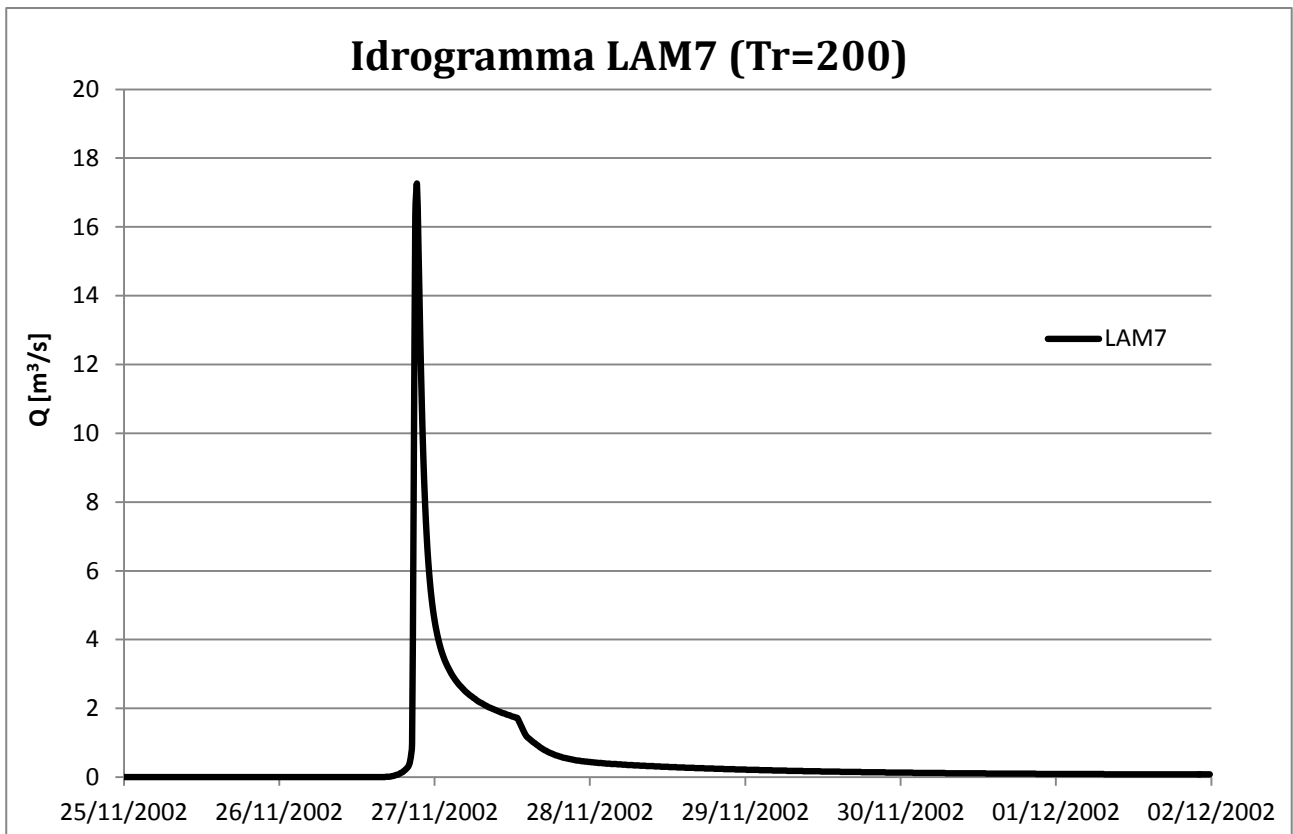


Fig. 4.11 - Idrogramma del sottobacino LAM7 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.7 BEV3

Il sottobacino BEV3 rappresenta il bacino della Bevera di Renate, affluente sinistro del Lambro, ha un'estensione di circa 19.3 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Renate, Briosco e Besana Brianza. Tale bacino è poco urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.3$, $a(T=200) = 95$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 247 mm, a cui corrispondono 4.7 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.12, ha una portata al colmo pari a 32.8 m³/s e un volume complessivo pari a circa 1.4 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.30. Esso viene immesso nel modello alla sezione 118.

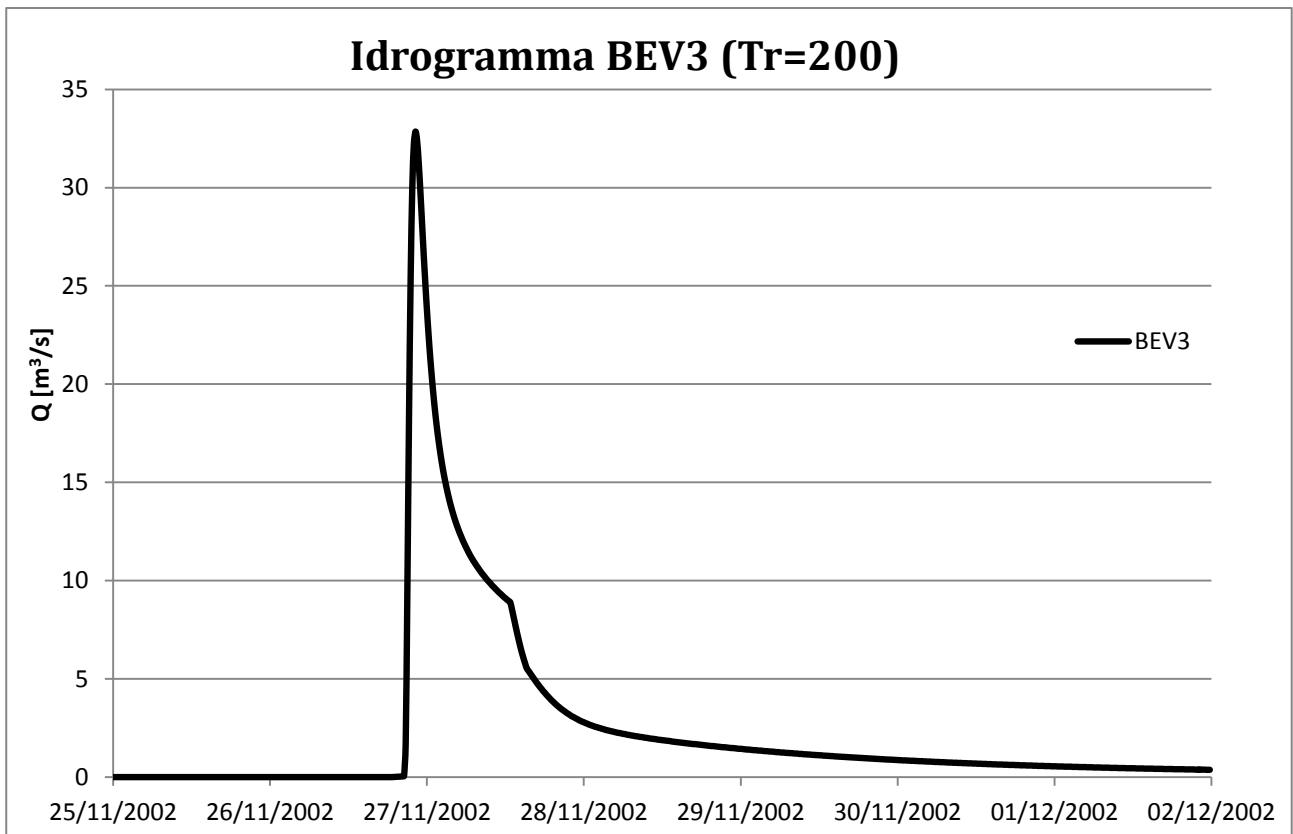


Fig. 4.12 - Idrogramma del sottobacino BEV3 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.8 LAM8

Il sottobacino LAM8 rappresenta il bacino diretto del Lambro compreso tra la confluenza con la Bevera di Renate (sezione 117.3) e il ponte della strada provinciale n.6 (sezione 109.3), ha un'estensione di circa 11.75 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Briosco e Verano Brianza. Tale bacino è mediamente urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.30$, $a(T=200) = 90$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 234 mm, a cui corrispondono 2.7 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.13, ha una portata al colmo pari a 26.3 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0.7 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.26.

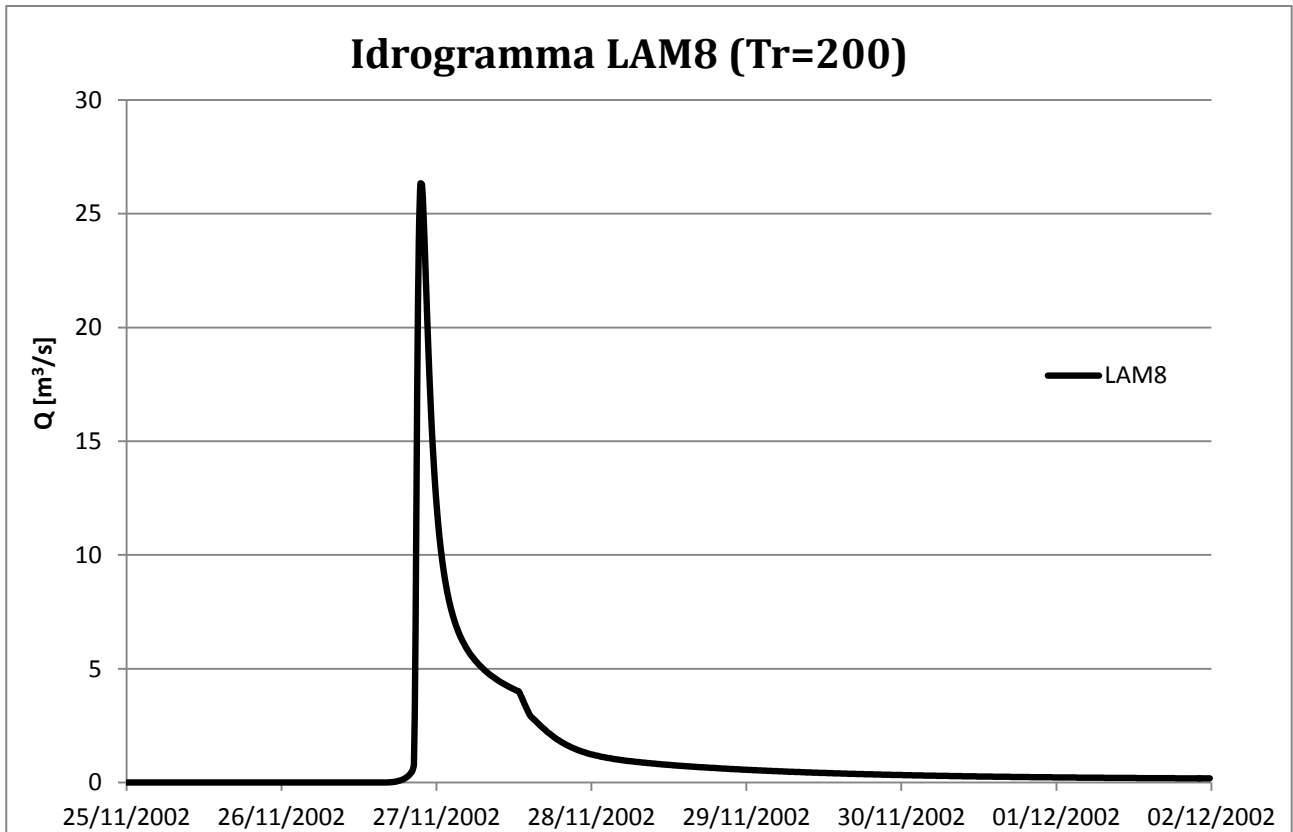


Fig. 4.13 - Idrogramma del sottobacino LAM8 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.9 BRO

Il sottobacino BRO rappresenta il bacino del torrente Brovada, affluente sinistro del Lambro, ha un'estensione di circa 6.37 km² e comprende parte del territorio dei comune di Besana Brianza. Tale bacino è poco urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.3$, $a(T=200) = 90$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 234 mm, a cui corrispondono 1.5 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.14, ha una portata al colmo pari a 20.4 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0.4 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.27. Esso viene immesso nel modello alla sezione 106.4.

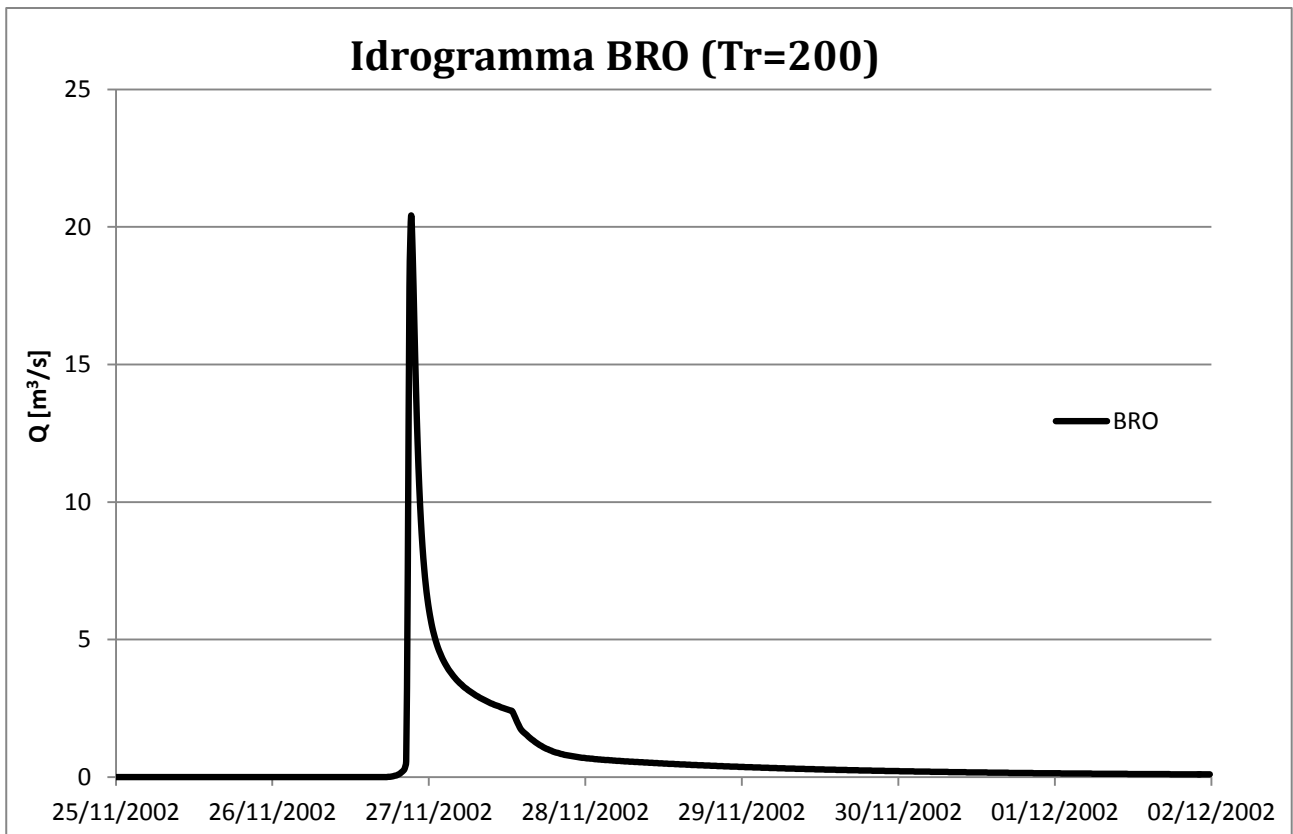


Fig. 4.14 - Idrogramma del sottobacino BRO per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.10 CAN

Il sottobacino CAN rappresenta il bacino del torrente Cantalupo, affluente sinistro del Lambro, ha un'estensione di circa 3.08 km² e comprende parte del territorio dei comune di Triuggio. Tale bacino è poco urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.29$, $a(T=200) = 90$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 226 mm, a cui corrispondono 0.7 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.15, ha una portata al colmo pari a 12.7 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0.2 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.28. Esso viene immesso nel modello alla sezione 104.2.

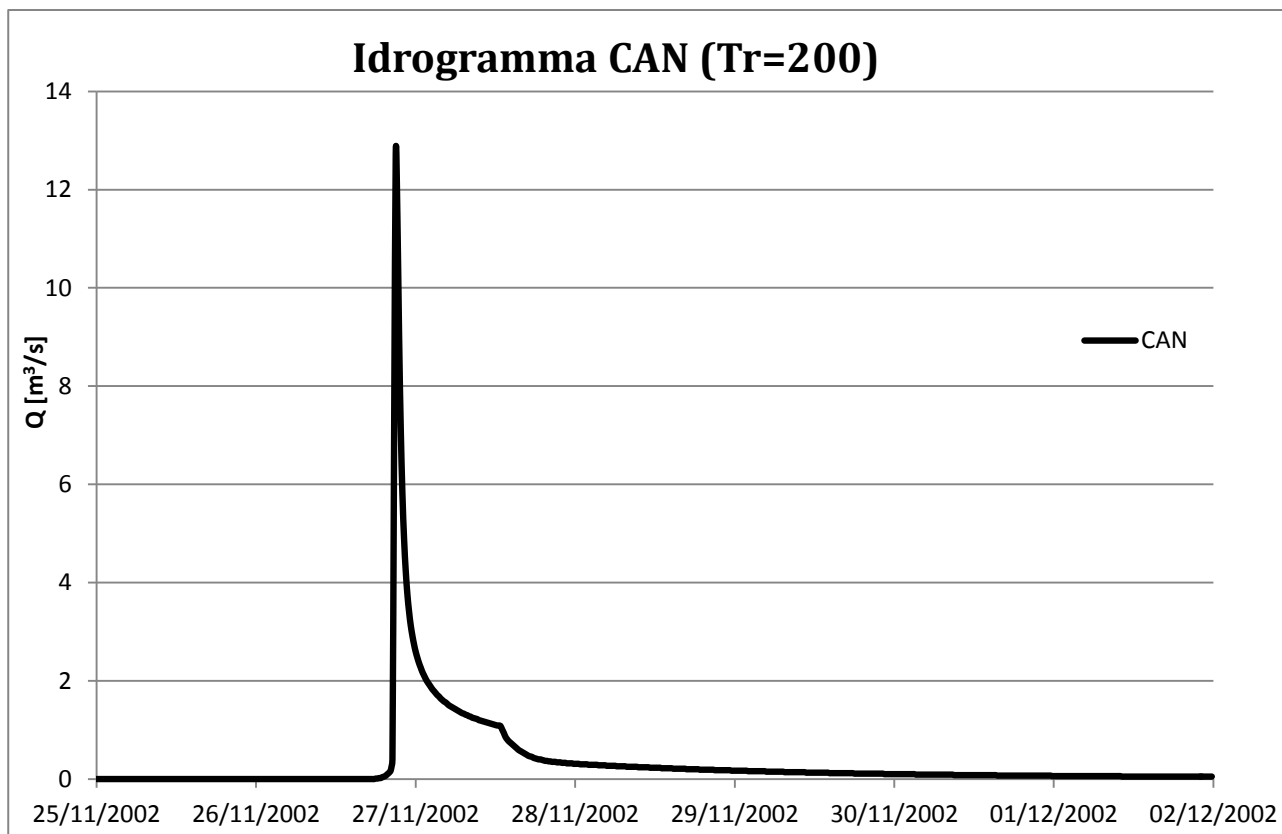


Fig. 4.15 - Idrogramma del sottobacino CAN per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.11 PEG

Il sottobacino PEG rappresenta il bacino del torrente Pegorino, affluente sinistro del Lambro, ha un'estensione di circa 10.89 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Casatenovo e Lesmo. Tale bacino è poco urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.29$, $a(T=200) = 90$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 226 mm, a cui corrispondono 2.5 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.16, ha una portata al colmo pari a 27.6 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0.7 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.28. Esso viene immesso nel modello alla sezione 103.2.

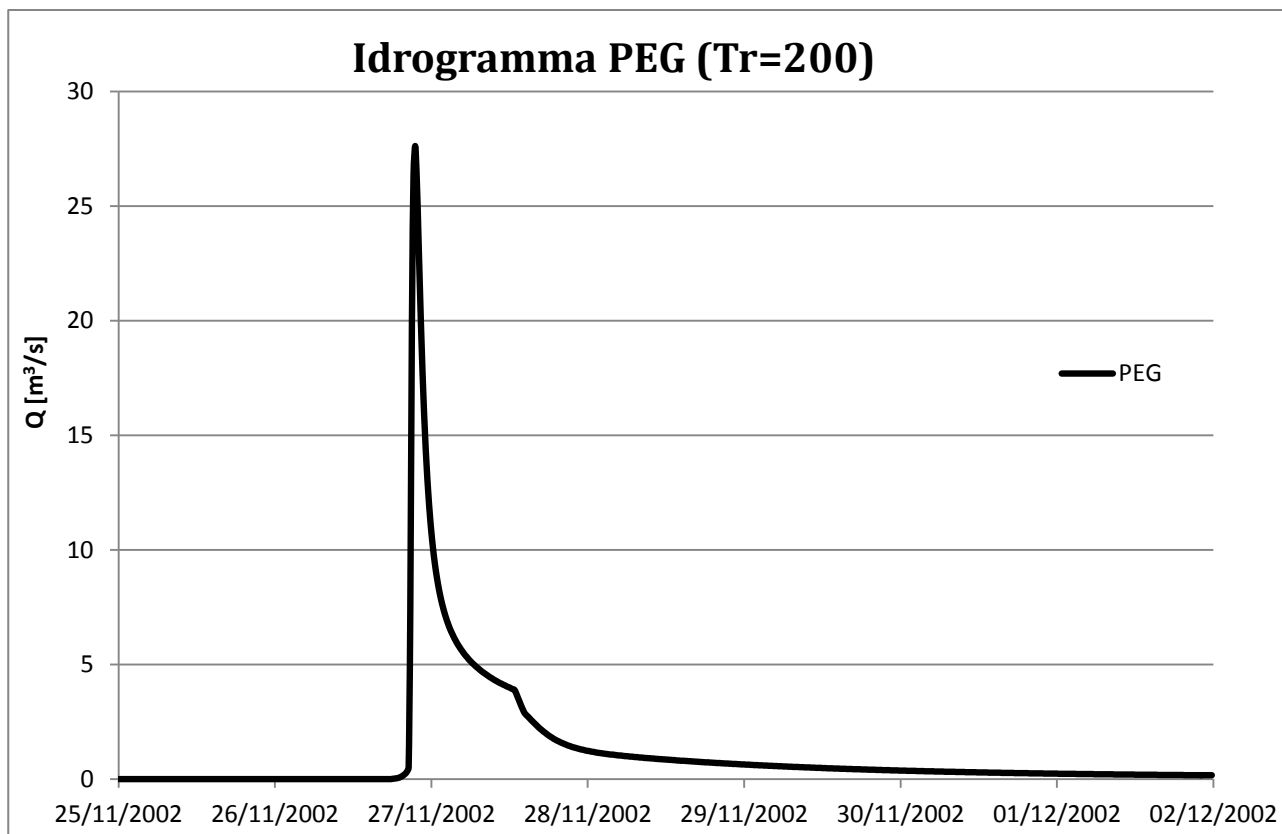


Fig. 4.16 - Idrogramma del sottobacino PEG per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.12 LAM9

Il sottobacino LAM9 rappresenta il bacino diretto del Lambro compreso tra il ponte della strada provinciale n.6 (sezione 109.3) e il ponte di S. Giorgio a Villasanta (sezione 100.24), ha un'estensione di circa 11.72 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Albiate, Triuggio, Sovico, Biassono, Lesmo e Villasanta. Tale bacino è mediamente urbanizzato ed i versanti sono mediamente acclivi.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.28$, $a(T=200) = 85$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 207 mm, a cui corrispondono 2.4 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.17, ha una portata al colmo pari a 50.7 m³/s e un volume complessivo pari a circa 0.6 milioni di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0.25.

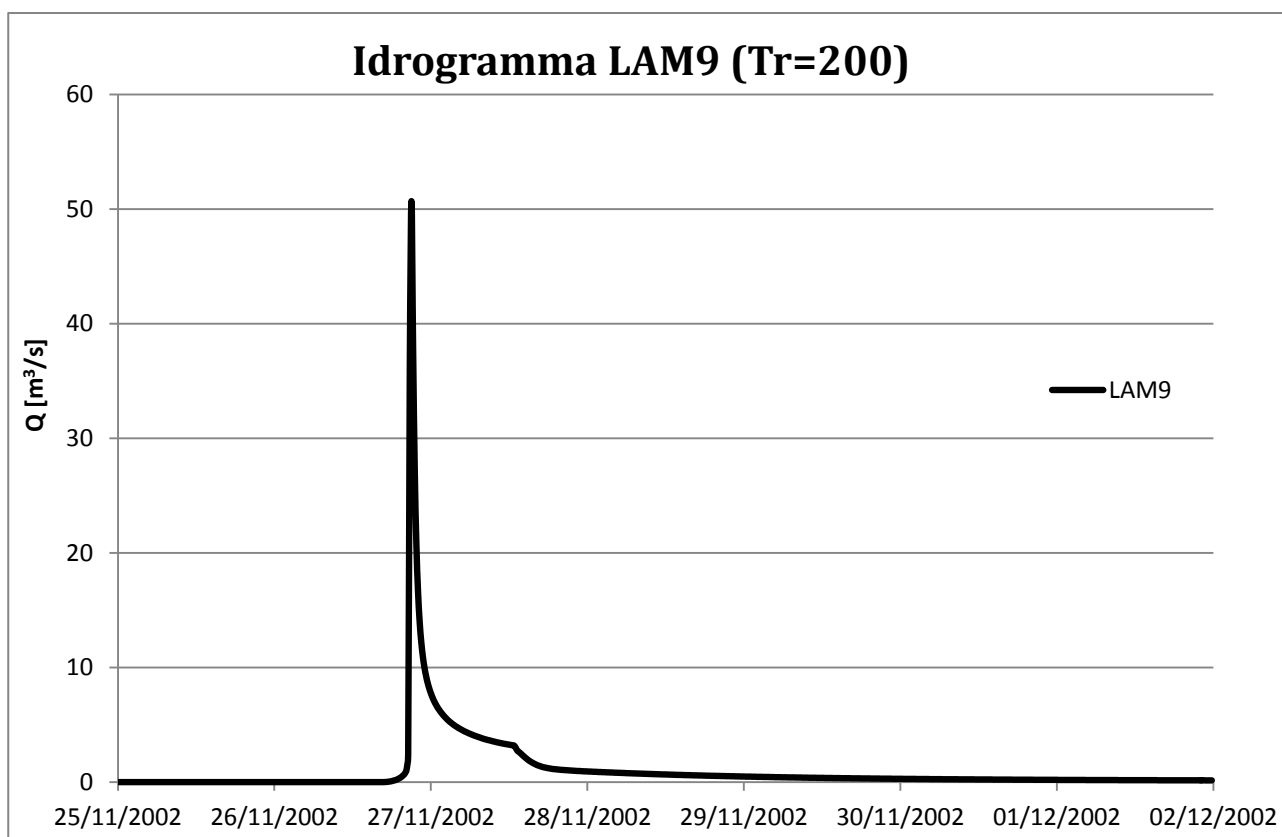


Fig. 4.17 - Idrogramma del sottobacino LAM9 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.13 LAM10

Il sottobacino LAM10, afferente all'asta del Lambro in corrispondenza della sezione 102.24, ha un'estensione di circa 6.58 km² (di cui 4.01 km² di territorio urbanizzato) e comprende parte del territorio dei comuni di Sovico, Macherio e Biassono. Tale bacino è urbanizzato, i versanti sono pianeggianti e sono privi di reticolo superficiale in grado di recapitare nel Lambro le portate meteoriche.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0.28$, $a(T=200) = 85$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 207 mm, a cui corrispondono 0.83 milioni di metri cubi (considerando solo la porzione di sottobacino contribuente, cioè quella urbana).

L'idrogramma in uscita, che si immette quindi nel fiume deve considerare le limitazioni dovute alla configurazione della rete fognaria dei comuni suddetti afferenti allo scaricatore AL8 della rete dell'ALSI, la quale è in grado di convogliare nel reticolo superficiale una portata al colmo pari a circa 10,5 m³/s (notevolmente ridotta se paragonata alla portata al colmo in ingresso alla rete fognaria pari a 33,6 m³/s). Nel caso in esame l'idrogramma scaricato nel Lambro (riportato in figura 4.18) possiede un volume pari a circa 0.24 milioni di m³, mentre il

volume sfiorato e perduto è pari a circa 0,08 milioni di m³ (25% del volume in ingresso alla rete fognaria). Il coefficiente di afflusso complessivo è pari a 0,29.

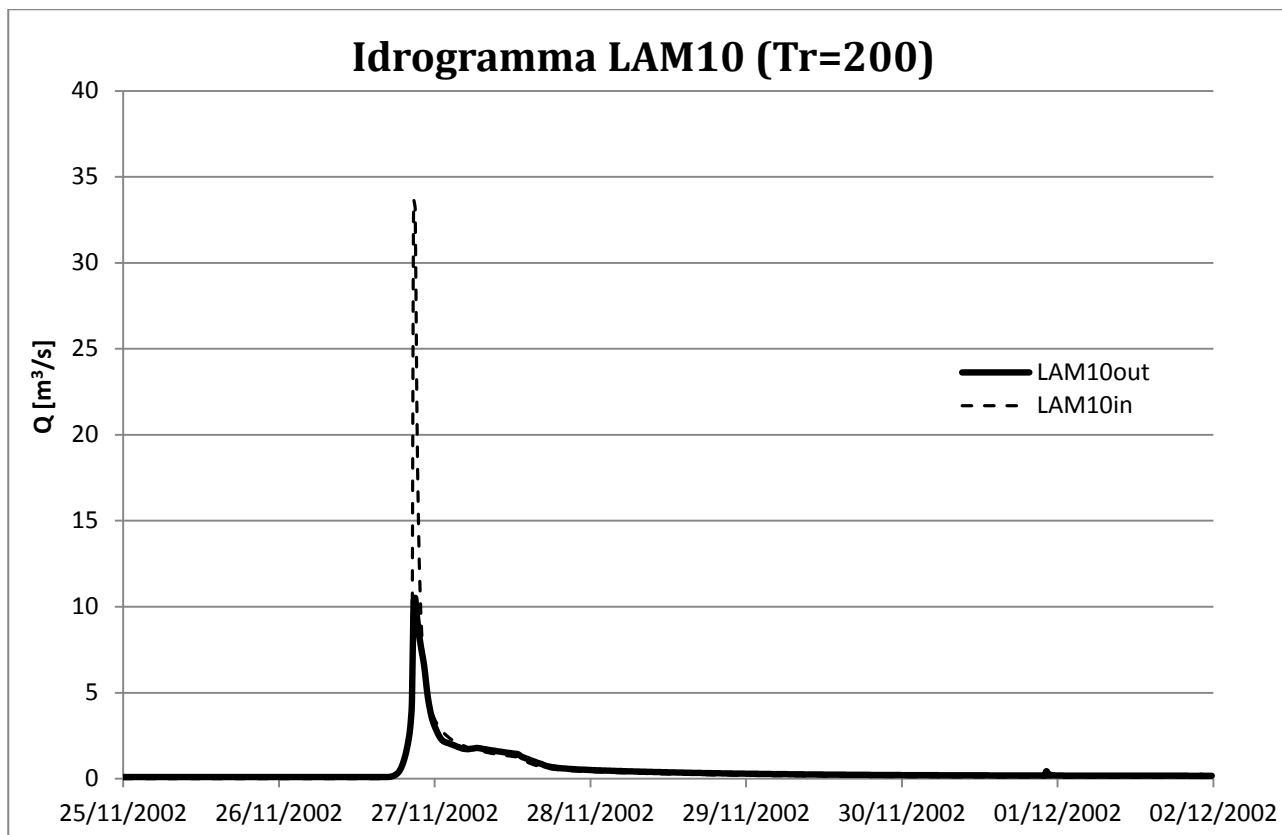


Fig. 4.18 - Idrogramma del sottobacino LAM10 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.14 MOL

Il sottobacino MOL rappresenta il bacino della roggia Molgorana, affluente sinistro del Lambro, ha un'estensione di circa 19,77 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Camparada, Usmate-Velate, Lesmo e Arcore. Tale bacino è mediamente urbanizzato ed i versanti sono pianeggianti ma con presenza di reticolo idrico superficiale.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0,28$, $a(T=200) = 90$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 219 mm, a cui corrispondono 4,3 milioni di metri cubi.

L'idrogramma in uscita, riportato in figura 4.19, ha una portata al colmo pari a 13,1 m³/s e un volume complessivo pari a circa 1 milione di metri cubi, per cui il coefficiente di afflusso medio è pari a 0,23. Esso viene immesso nel modello alla sezione 101.04.

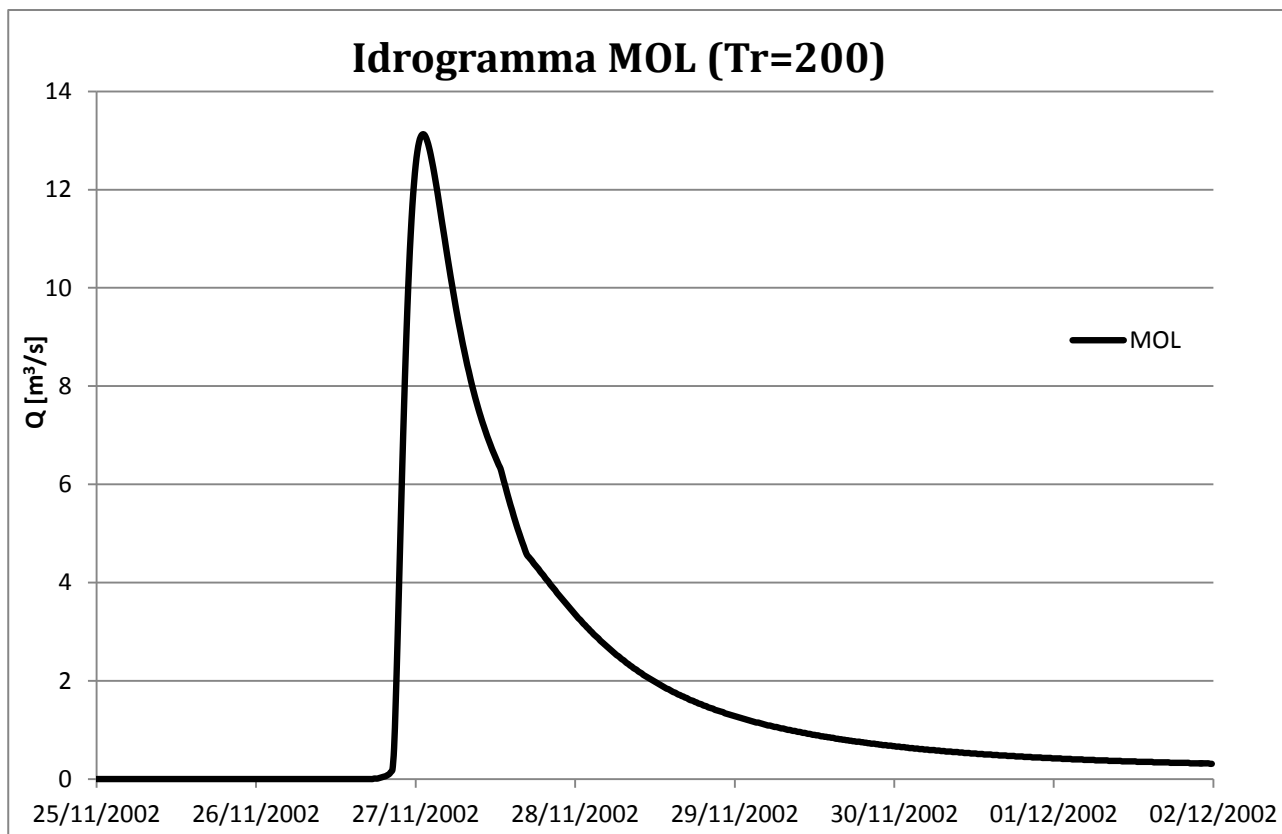


Fig. 4.19 - Idrogramma del sottobacino MOL per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.15 LAM11

Il sottobacino LAM11, afferente all'asta del Lambro in corrispondenza della sezione 100 (parco di Monza), ha un'estensione di circa 6,9 km² (di cui 3,51 km² di territorio urbanizzato) e comprende parte del territorio dei comuni di Arcore e Villasanta. Tale bacino è urbanizzato, i versanti sono pianeggianti e sono privi di reticolo superficiale in grado di recapitare nel Lambro le portate meteoriche.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0,27$, $a(T=200) = 90$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 212 mm, a cui corrispondono 0,74 milioni di metri cubi (considerando solo la porzione di sottobacino contribuente, cioè quella urbana).

L'idrogramma in uscita, che si immette quindi nel fiume deve considerare le limitazioni dovute alla configurazione della rete fognaria dei comuni suddetti afferenti allo scaricatore AL6 della rete dell'ALSI, la quale è in grado di convogliare nel reticolo superficiale una portata al colmo pari a circa 8,8 m³/s (notevolmente ridotta se paragonata alla portata al colmo in ingresso alla rete fognaria pari a 39,2 m³/s). Nel caso in esame l'idrogramma scaricato nel Lambro (riportato in figura 4.20) possiede un volume pari a circa 0,21 milioni di m³, mentre il

volume sfiorato e perduto è pari a circa 0,07 milioni di m³ (25% del volume in ingresso alla rete fognaria). Il coefficiente di afflusso complessivo è pari a 0,28.

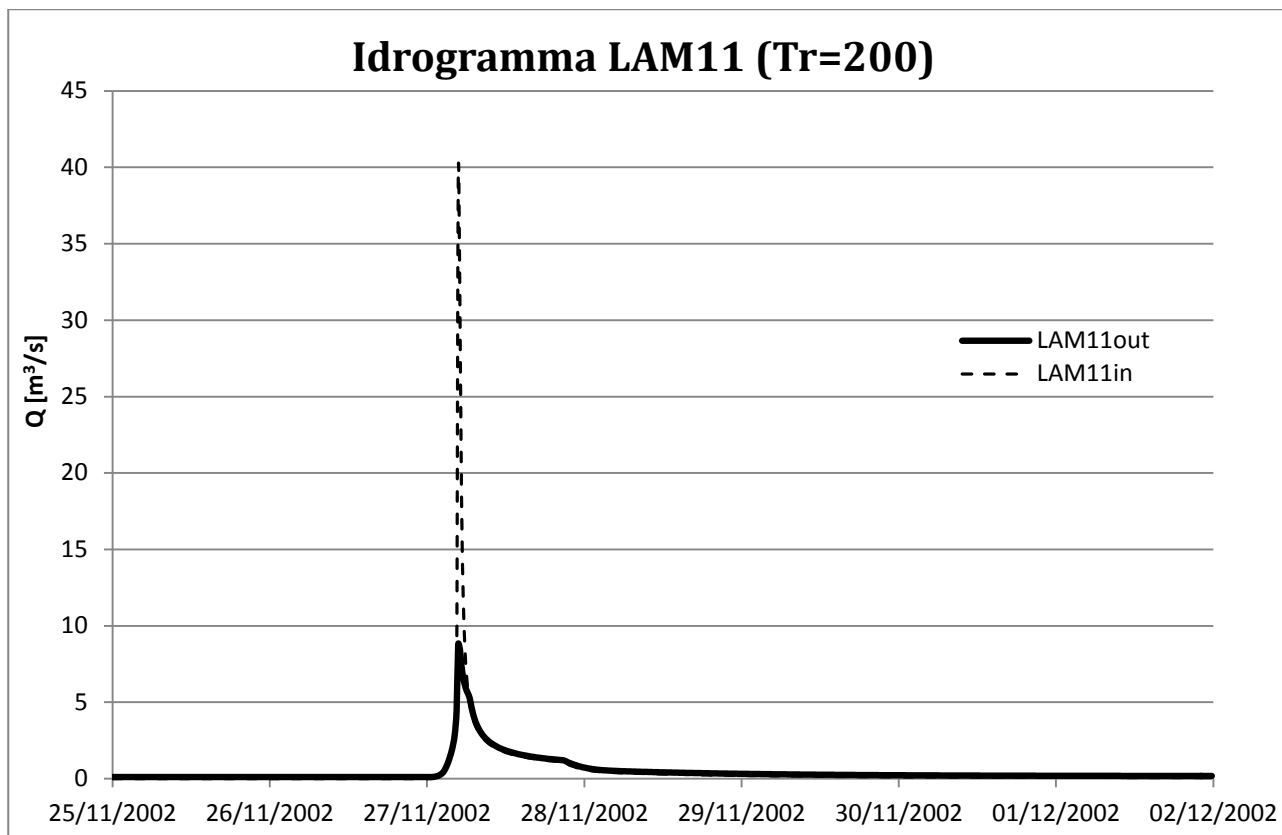


Fig. 4.20 - Idrogramma del sottobacino LAM11 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.16 LAM12

Il sottobacino LAM12, afferente all'asta del Lambro in corrispondenza della sezione 98 posta all'interno del parco di Monza, ha un'estensione di circa 8,92 km² (di cui 2,18 km² di territorio urbanizzato) e comprende parte del territorio del comune di Vedano al Lambro. Tale bacino è urbanizzato, i versanti sono pianeggianti e sono privi di reticolo superficiale in grado di recapitare nel Lambro le portate meteoriche.

Considerando la curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno pari a 200 anni relativa a tale sottobacino ($n = 0,27$, $a(T=200) = 90$ mm/ora), l'altezza di precipitazione lorda è pari a 212 mm, a cui corrispondono 0,46 milioni di metri cubi (considerando solo la porzione di sottobacino contribuente, cioè quella urbana).

L'idrogramma in uscita, che si immette quindi nel fiume deve considerare le limitazioni dovute alla configurazione della rete fognaria dei comuni suddetti afferenti allo scaricatore AL5 della rete dell'ALSI, la quale è in grado di convogliare nel reticolo superficiale una portata al colmo pari a circa 4,4 m³/s (notevolmente ridotta se paragonata alla portata al colmo in ingresso alla rete fognaria pari a 32,6 m³/s). Nel caso in esame l'idrogramma scaricato nel

Lambro (riportato in figura 4.21) possiede un volume pari a circa 0,14 milioni di m³, mentre il volume sfiorato e perduto è pari a circa 0,04 milioni di m³ (22% del volume in ingresso alla rete fognaria). Il coefficiente di afflusso complessivo è pari a 0,3.

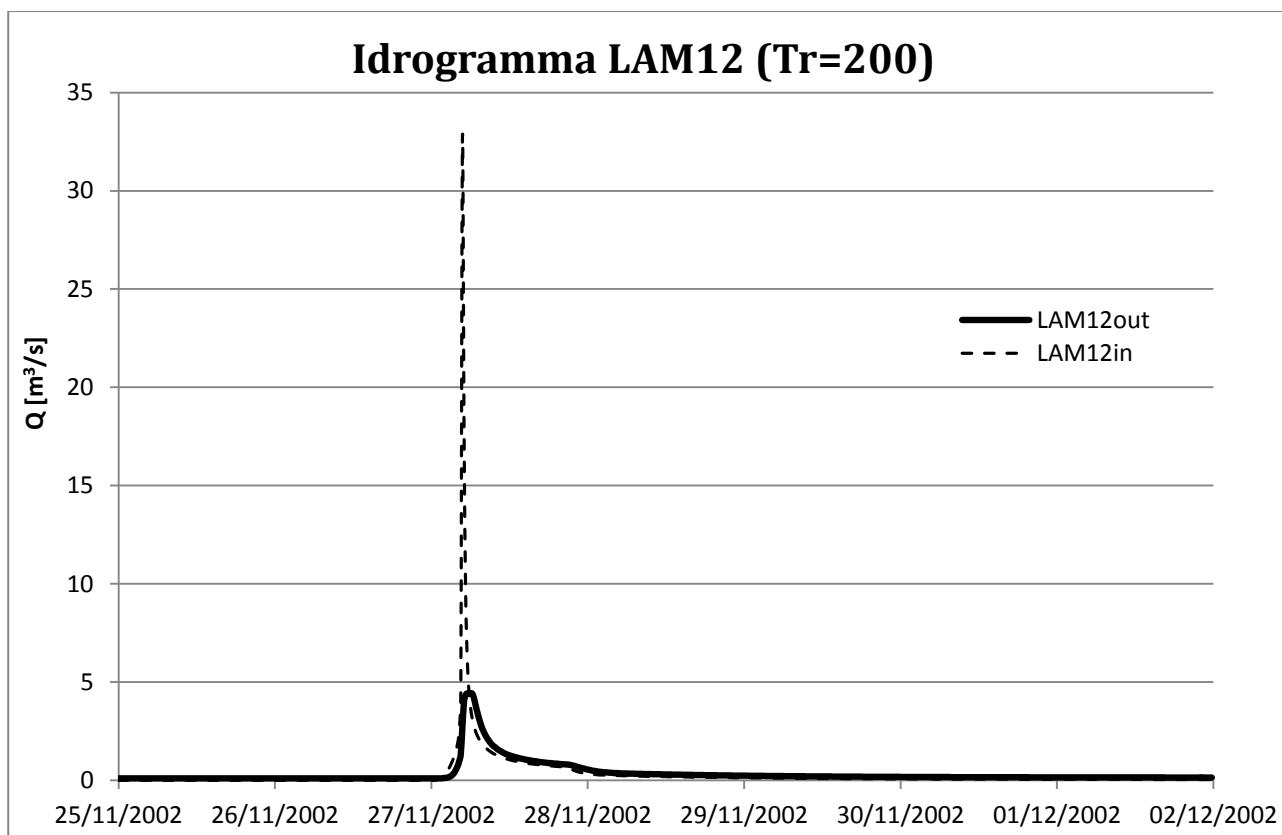


Fig. 4.21 - Idrogramma del sottobacino LAM12 per tempo di ritorno di 200 anni

4.2.17 LAM13

Il sottobacino LAM13, afferente all'asta del Lambro in corrispondenza della sezione 97.2 localizzata all'interno del parco di Monza, ha un'estensione di circa 3,48 km² (di cui 1,65 km² di territorio urbanizzato) e comprende parte del territorio del comune di Villasanta. Tale bacino è urbanizzato, i versanti sono pianeggianti e sono privi di reticolo superficiale in grado di recapitare nel Lambro le portate meteoriche.

L'idrogramma in uscita, che si immette quindi nel fiume deve considerare le limitazioni dovute alla configurazione della rete fognaria dei comuni suddetti afferenti allo scaricatore AL4 della rete dell'ALSI, la quale è in grado di convogliare nel reticolo superficiale una portata al colmo pari a circa 2,8 m³/s (notevolmente ridotta se paragonata alla portata al colmo in ingresso alla rete fognaria pari a 24,9 m³/s). Nel caso in esame l'idrogramma scaricato nel Lambro (riportato in figura 4.22) possiede un volume pari a circa 0,1 milioni di m³, mentre il volume sfiorato e perduto è pari a circa 0,03 milioni di m³ (23% del volume in ingresso alla rete fognaria).

Il coefficiente di afflusso complessivo è pari a 0,29.

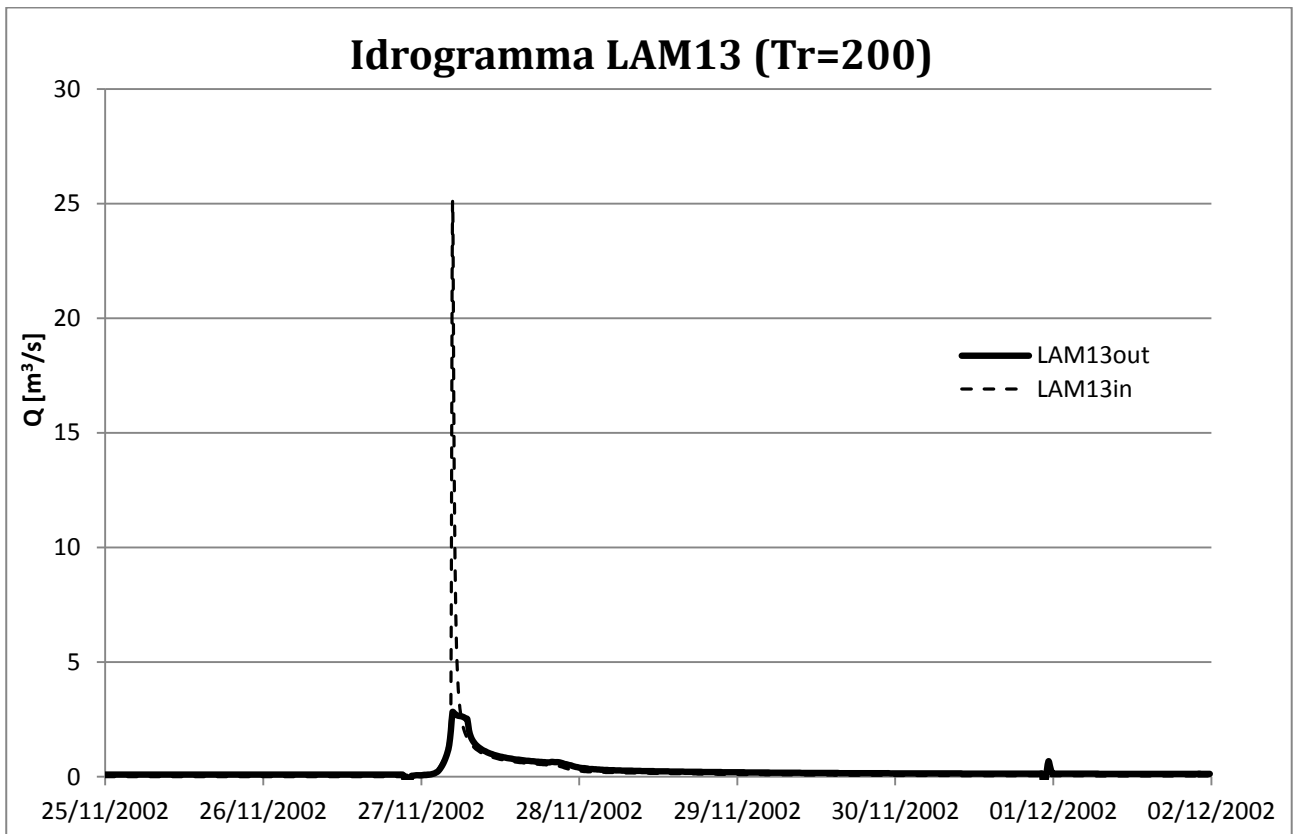


Fig. 4.22 - Idrogramma del sottobacino LAM13 per tempo di ritorno di 200 anni

5. Idraulica

Nel presente capitolo si vuole fornire un quadro il più possibile esplicativo riguardo il comportamento idraulico del fiume Lambro nel tratto oggetto di studio. Sulla base del modello sviluppato dall'Autorità di Bacino del fiume Po nel suo Studio di fattibilità, descritto brevemente nel paragrafo seguente, si è svolta un'analoga attività di modellazione, con diverso programma di calcolo, allo scopo di ottenere un mezzo sufficientemente affidabile per la simulazione del comportamento attuale e futuro del fiume.

5.1 Modello MIKE 11 (Autorità di Bacino del Po)

Il modello dell'Autorità di Bacino del fiume Po è stato sviluppato utilizzando il software di calcolo MIKE 11. Il programma è stato realizzato dal DHI (Danish Hydraulic Institute) a partire dal programma SYSTEM 11. Si tratta di un programma ideato per la simulazione del flusso idrico a pelo libero in estuari, sistemi di irrigazione e simili corpi idrici. Esso è infatti in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi omogenei, in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali, attraverso la risoluzione delle equazioni di De Saint Venant. Come accade per il programma di calcolo Hec-Ras (descritto ampiamente al paragrafo 5.2.5), le equazioni generali di De Saint Venant vengono trasformate dal modello in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h , rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale, ma, a differenza del software Hec-Ras, MIKE 11 utilizza uno schema di risoluzione a 6 punti (schema di Abbott).

Nel complesso il modello sviluppato da AdB è costituito da 805 sezioni; esso infatti, molto più esteso rispetto al modello sviluppato presso il Parco Valle Lambro, comprende tratti esterni alla nostra zona di indagine come, ad esempio, sezioni appartenenti a Lambrone, lago di Pusiano, lago di Alserio e relativo emissario, Bevera di Molteno, torrente Gandaloglio, collettori ALSI S.p.a., ecc.

Come detto, l'alveo in esame risulta essere abbastanza inciso rispetto alle porzioni di territorio circostante (ad esclusione di alcune zone in cui il corso d'acqua attraversa il territorio dei comuni di Lambrugo, Nibionno, Inverigo, Veduggio). Nelle zone in cui il corso d'acqua è incassato nel fondovalle si ha una corrente prevalentemente monodimensionale, caratterizzata da un unico livello idrico per l'alveo e le eventuali aree golenali interessate da esondazioni contenute, con conseguenti perdite nulle dal punto di vista dei volumi per tutta la durata dell'evento. In questo caso le aree golenali possono essere modellate come parte integrante delle sezioni trasversali del corso d'acqua (tipico delle zone contraddistinte da aree

golenali direttamente interagenti con l'alveo principale). Per tali comportamenti idraulici e per le zone per cui non si verificano esondazioni, è stato usato uno schema di tipo monodimensionale.

In tali tratti si assiste pertanto nel modello ad una propagazione dell'onda di piena senza particolari modifiche di forma o valore del colmo se non per gli apporti dei bacini laterali (concentrati e distribuiti).

Per quanto riguarda i tratti in cui il corso d'acqua non risulta inciso e attraversa un fondovalle abbastanza ampio con possibilità di espansione laterale, si è utilizzato lo schema di tipo quasi-bidimensionale: le aree golenali sono schematizzate come corsi d'acqua paralleli all'alveo principale e contribuiscono al deflusso nei limiti che derivano dalle loro caratteristiche idrauliche. Il corso d'acqua principale e le aree golenali sono collegate fra loro attraverso soglie di sfioro, poste nei punti in cui possono verificarsi scambi di portata, sia dal ramo principale verso le golene, sia da queste ultime verso il corso d'acqua.

Nei casi in cui le aree golenali presentino quote inferiori al livello arginale, tale modellazione permette di considerare separatamente le aree di espansione laterale e l'alveo principale sino al momento della tracimazione di quest'ultimo e per il successivo periodo di invaso e di svaso delle aree golenali.

In tal modo se all'interno delle aree golenali esistono aree poste a quote inferiori al livello arginale, esse non influenzano il livello idrico nella sezione d'alveo principale, se non quando si verificano livelli idrici che causano il superamento dell'argine o della sommità spondale.

Lo schema quasi-bidimensionale è stato utilizzato nelle seguenti zone:

- a Lambrugo in destra idraulica;
- a Nibionno e a Inverigo in sinistra e in destra idraulica;
- a Veduggio in sinistra idraulica;
- a Villasanta, in sinistra e in destra idraulica, proseguendo fino al parco di Monza.

I ranges dei valori di scabrezza (in termini di coefficienti di Strickler) utilizzati sono:

- per l'alveo inciso: 25-35 (corrispondenti valori di Manning: 0,04-0,033);
- per le aree golenali: 2-15 (corrispondenti valori di Manning: 0,2-0,067).

Le operazioni di taratura del modello sono state effettuate utilizzando i dati idropluviometrici relativi all'evento meteorico verificatosi nel mese di novembre del 2002, che ha provocato lungo l'asta del Lambro diverse situazioni di allagamento particolarmente significative in diversi comuni.

5.2 Modello HEC-RAS (Parco Valle Lambro)

Per la modellazione del tratto di Lambro sublacuale, compreso quindi tra l'uscita dal lago di Pusiano e il Parco di Monza, sviluppata presso il Parco della Valle del Lambro, è stato utilizzato il codice di calcolo HEC-RAS 4.1 fornito dal US Army Corps of Engineers (figura 5.1).

HEC-RAS adotta una schematizzazione monodimensionale (variazioni graduali della sezione dell'alveo, limitata curvatura dei filetti liquidi, distribuzione di velocità pressoché uniforme nelle sezioni trasversali) su alveo assunto a fondo fisso sia per il moto permanente che per quello vario (usato nel nostro caso).

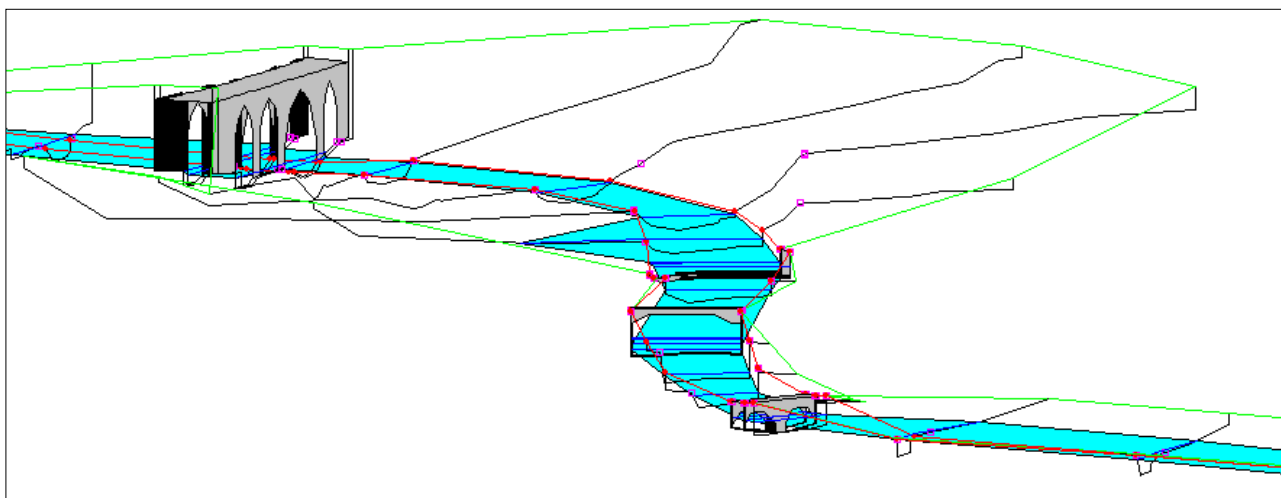


Fig. 5.1 - Dettaglio 3D modello Hec-Ras

Nei seguenti paragrafi verrà descritta in dettaglio la metodologia di modellazione della geometria fluviale, intesa come insieme delle sezioni trasversali e asse fluviale che le collega, oltre all'insieme di strutture e manufatti presenti lungo tutto l'alveo.

5.2.1 Sezioni (Cross sections)

L'asta principale del fiume è stata rappresentata attraverso l'adozione di 280 sezioni, assunte ortogonali alla direzione della corrente idrica, comprese tra:

- una sezione di monte (132.112): sezione di valle del ponte della SP41, a Merone, posta successivamente alla confluenza dell'emissario naturale del lago di Pusiano con l'emissario del lago di Alserio;
- una sezione di valle (96.34): situata nel Parco di Monza, subito a monte dell'ingresso del fiume nel centro urbano.

Tra queste la maggior parte sono state ricavate dallo Studio dell'Autorità di Bacino del Fiume Po del 2003, utilizzate allora per la modellazione di tutta l'asta fluviale del Lambro attraverso

un diverso codice di calcolo e relative a due distinte campagne di rilievo successivamente omogeneizzate dall'Autorità di Bacino; alcune sezioni comprendenti manufatti di recente costruzione invece, attraverso indagini in sito e rilievi topografici, sono state aggiunte e modificate.

All'interno di ogni sezione è possibile tenere conto di ogni variazione della scabrezza, nelle golene o lungo l'alveo, attraverso l'utilizzo di diversi coefficienti di Manning; dove indicati, sono stati inseriti valori di scabrezza di Manning corrispondenti ai valori di Strickler impiegati dall'Autorità di Bacino nel suo Studio di Fattibilità, altrove invece sono stati inseriti valori dei coefficienti di scabrezza compresi nei ranges forniti da letteratura, coerenti ai i valori impiegati dall'Autorità di Bacino.

Dove necessario sono state poi introdotte le *levees*:

questa opzione permette di definire, attraverso quota e progressiva, un punto di "argine" destro o sinistro, oltre il quale l'acqua può andare solo nel caso in cui il livello idrico superi tale quota. Questo è necessario poiché diversamente il programma considererebbe l'intera sezione quale alveo potenzialmente e uniformemente allagabile. Per una migliore comprensione si riporta di seguito (figura 5.2) un esempio di *cross section* con una *levee* posta sul lato sinistro:

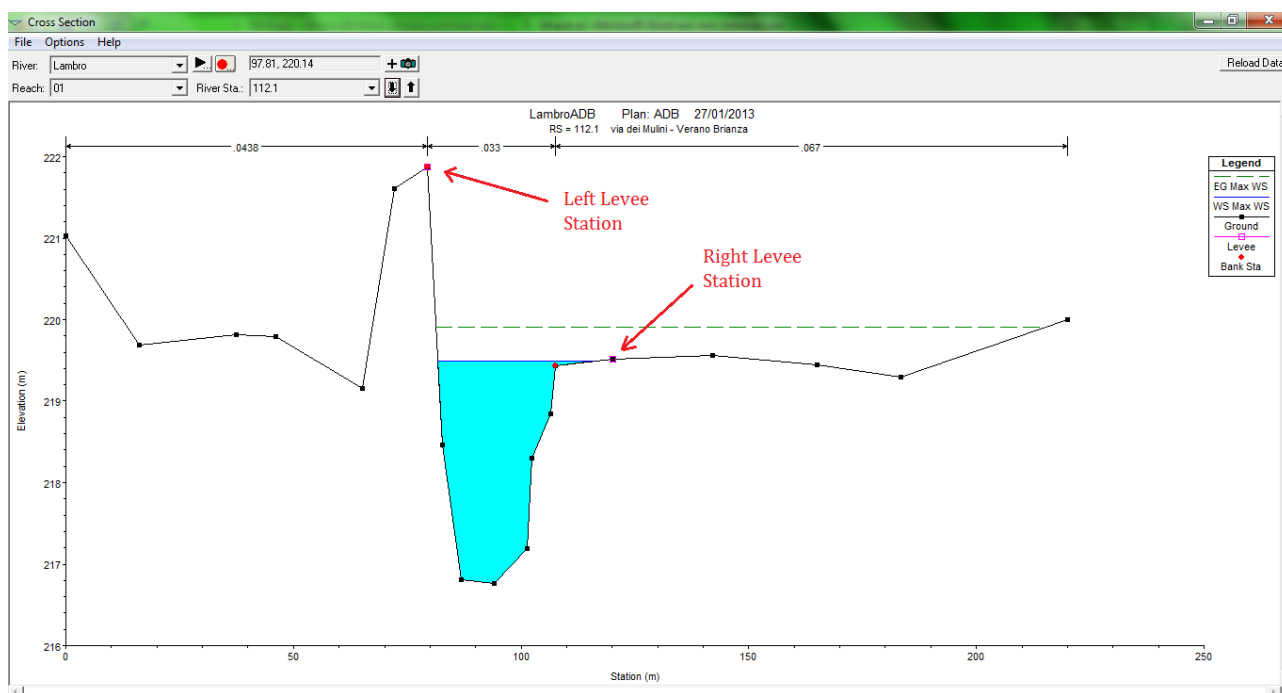


Fig. 5.2 - Esempio di sezione in Hec-Ras

Le *levees* sono state quindi introdotte nel modello sia per una migliore definizione dell'alveo e dei suoi argini, sia nella modellazione delle aree allagabili: in questo caso infatti, le *levees* sono risultate utili al fine di evitare una sovrastima dell'effetto di laminazione, si riserva però ai prossimi paragrafi una più esauriente spiegazione a riguardo.

Infine, all'interno delle *cross sections*, sono state introdotte le *obstructions*: questa funzione permette la definizione di aree dove il flusso viene interrotto e la velocità longitudinale azzerata. Queste "ostruzioni" provocano quindi una diminuzione dell'area di deflusso e contemporaneamente un aumento del perimetro bagnato della sezione. Esse sono state utilizzate nelle sezioni di monte dei manufatti (ponti e traverse) dove quindi gli impalcati, come pile o spalle dei ponti, creano una brusca interruzione dell'area di deflusso. Se ne riporta di seguito un esempio (figura 5.3):

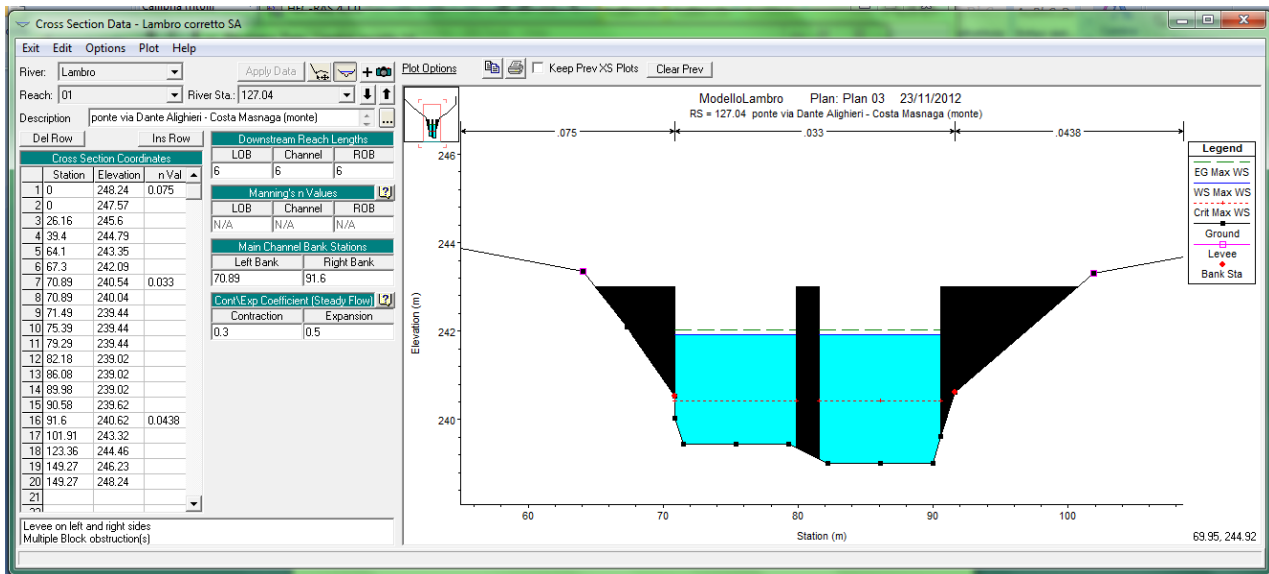


Fig. 5.3 – Esempio di sezione con obstructions in Hec-Ras

5.2.2 Ponti (Bridges)

Una volta inserite tutte le sezioni necessarie si è potuto procedere all'inserimento dei manufatti di attraversamento. In totale il modello conta 32 ponti, comprendenti 23 attraversamenti stradali, 4 attraversamenti ferroviari e 5 attraversamenti pedonali, di cui di seguito si fornisce un esempio (figura 5.4):

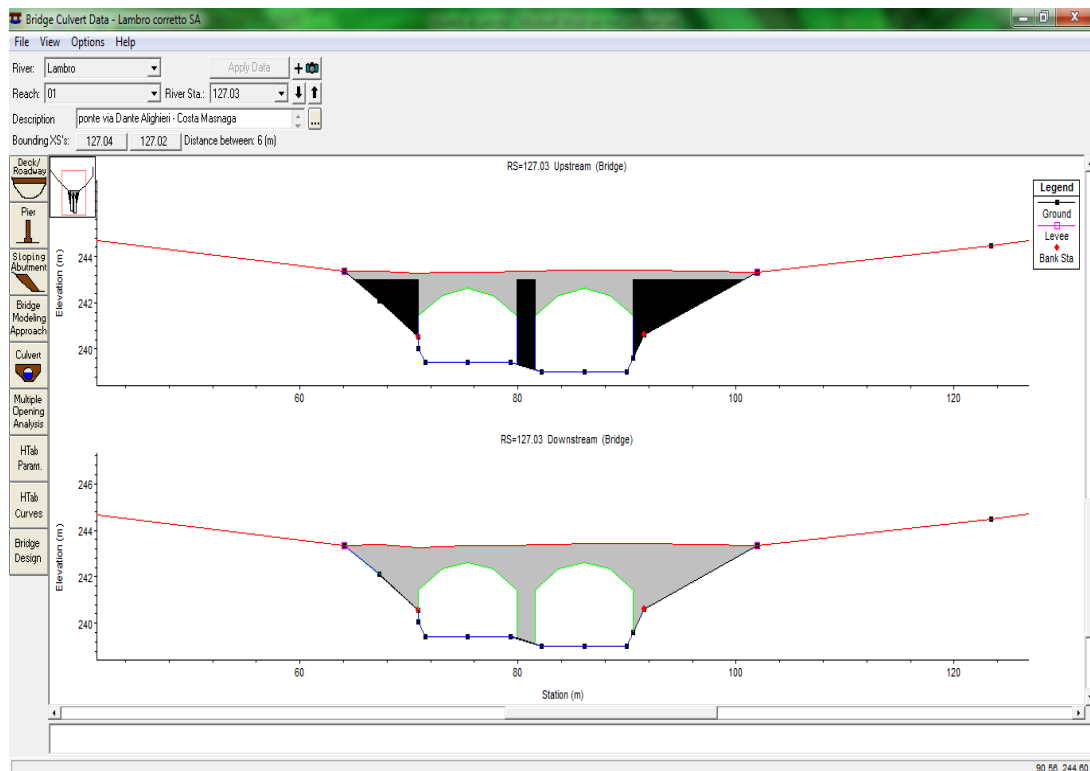


Fig. 5.4 – Esempio schematizzazione di ponti in Hec-Ras

La presenza di queste strutture provoca inevitabilmente perdite concentrate di energia che il software di calcolo computa sommando tre diversi contributi: il primo è localizzato subito a valle della struttura dove si manifesta un'espansione della sezione di flusso, il secondo contributo, localizzato a monte della struttura, rappresenta in contributo dovuto alla contrazione della sezione di flusso, ed infine viene considerato un'ulteriore perdita di energia lungo l'attraversamento della struttura.

Per fare questo il codice di calcolo necessita di 4 *cross sections*: due immediatamente a monte e a valle della struttura (per semplicità inserite uguali nel modello di calcolo), utili a definire il profilo del terreno sul quale poggia l'impalcato, e altre due, delle quali sempre una a monte e l'altra a valle della struttura, posizionate però sufficientemente distanti dal manufatto in modo tale da non risentire dell'effetto di disturbo del ponte sull'area di deflusso.

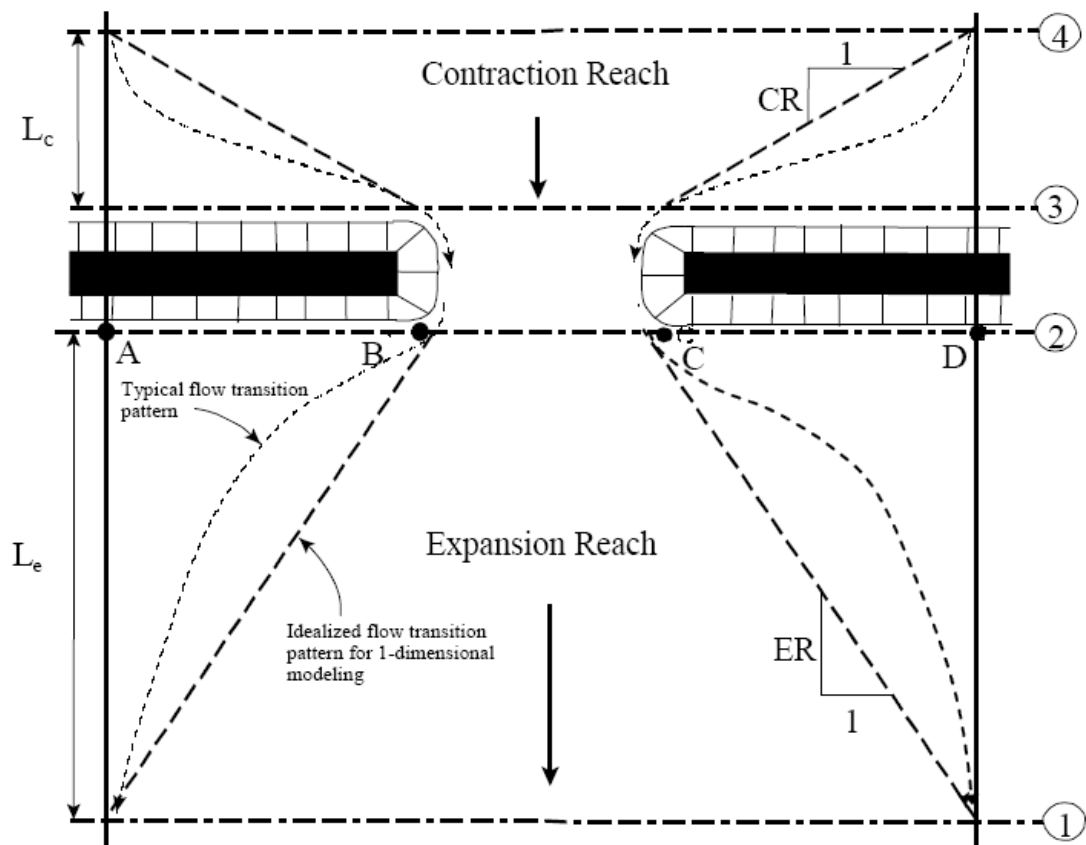


Fig. 5.5 - Contrazione ed espansione dell'area di deflusso in corrispondenza di ponti

Le perdite di energia dovute alla contrazione ed espansione dell'area di deflusso effettiva vengono calcolate attraverso l'utilizzo di coefficienti agenti sull'altezza cinetica: come mostrato in figura 5.5, la contrazione del flusso si verifica tra le sezioni 3 e 4, mentre la sua espansione tra le sezioni 1 e 2. La perdita di energia dovuta all'espansione dell'area di deflusso è generalmente maggiore della perdita dovuta alla sua contrazione, così come le perdite dovute a brevi e brusche transizioni della sezione risultano maggiori rispetto a quelle conseguenti a transizioni graduali.

Nello specifico il programma di calcolo utilizza, nelle condizioni di corrente veloce, i seguenti coefficienti di contrazione CR ed espansione ER:

- CR = 0.1 e ER = 0.3 nel caso di graduale transizione dell'area di deflusso (che si verifica tra le varie sezioni del modello);
- CR = 0.3 e ER = 0.5 nel caso più generale di ponti e attraversamenti;
- CR = 0.6 e ER = 0.8 nel caso particolare di brusche transizioni.

5.2.3 Traverse (Inline structures)

Successivamente all'inserimento dei ponti, si sono definite le varie strutture il linea. Allo stato di fatto, il tratto di Lambro in esame presenta, quali strutture in linea, solamente traverse.

Il modello conta quindi un totale di 26 traverse, di cui si fornisce un esempio di seguito (figura 5.6):

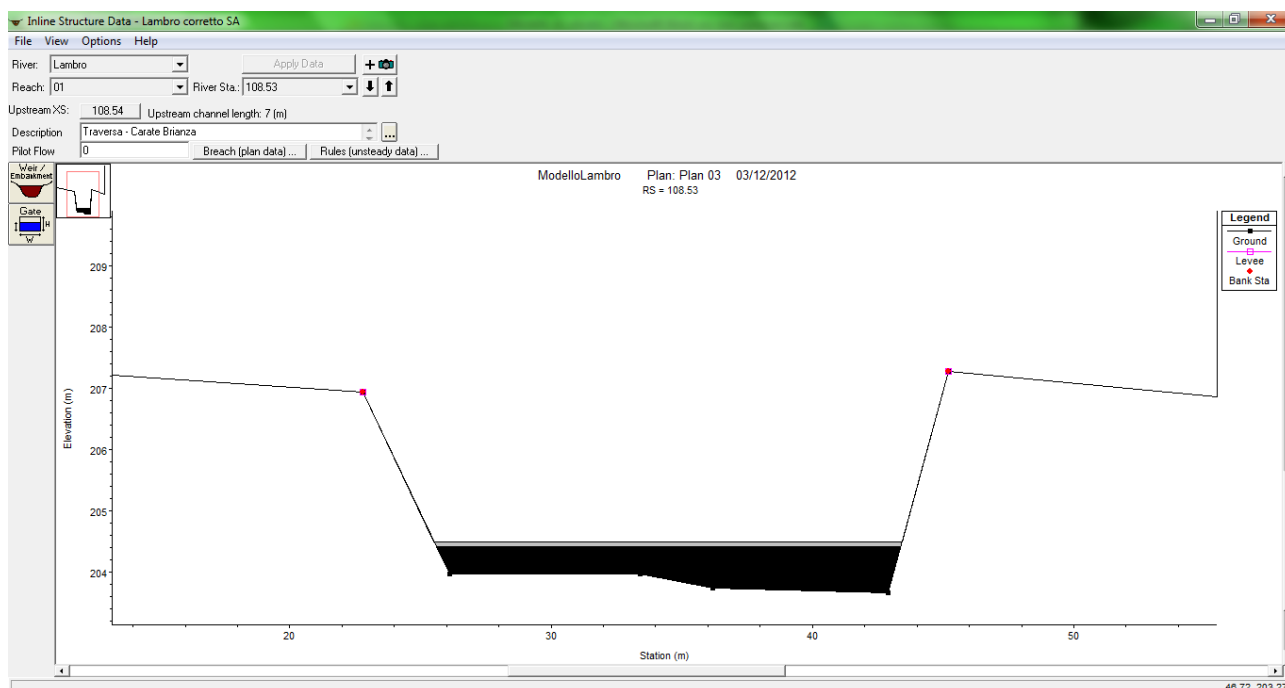


Fig. 5.6 – Esempio di schematizzazione di traverse in Hec-Ras

A differenza di quanto accadeva per i ponti, l’inserimento di una traversa nel modello necessita la presenza della sola sezione di monte: è infatti questa a determinare il profilo del terreno sul quale poi vengono definiti i vari punti che costituiscono il manufatto.

Tutte le traverse presenti nel tratto in esame risultano strutturalmente molto semplici: realizzate per la maggior parte con massi a scogliera, hanno spesso la sola funzione di innalzare il tirante idrico di monte al fine di alimentare piccoli canali irrigui laterali; in alcuni casi esse si possono anche presentare completamente interrate.

Dal punto di vista idraulico questi manufatti sono schematizzabili attraverso semplici salti di fondo che, in base alle condizioni al contorno imposte, possono provocare il passaggio del profilo idrico attraverso lo stato critico.

5.2.4 Aree di allagamento (Storage areas)

È opportuno ricordare che il tratto in oggetto è già stato analizzato dalla Regione Lombardia con il “Progetto preliminare – Sistemazione fiume Lambro a monte di Villasanta” in data 1998. Tale progetto, riscontrata l’assoluta esigenza di garantire l’effetto di laminazione da parte di aree naturali allagabili e di casse d’espansione, oltre alla già citata laminazione assicurata dal lago di Pusiano, ha previsto il mantenimento e la regolazione (con formazione di strutture di controllo dei deflussi) delle diverse aree di laminazione naturale.

Perciò, per quanto riguarda i tratti in cui il corso d'acqua non risulta inciso e attraversa un fondovalle abbastanza ampio con possibilità di espansione laterale, si sono utilizzate le *Storage areas*: le aree golenali sono schematizzate come "aree di invaso" separate dal corso d'acqua, definite attraverso quota minima e superficie, e collegate all'asta del fiume attraverso soglie di sfioro (*lateral structures*), poste nei punti in cui possono verificarsi scambi di portata, sia dal ramo principale verso le golene, sia da queste ultime verso il corso d'acqua.

Tale modellazione permette quindi di considerare separatamente le aree di espansione laterale e l'alveo principale sino al momento della tracimazione di quest'ultimo e per il successivo periodo di invaso e di svasso delle aree golenali. In tal modo se all'interno delle aree golenali esistono aree poste a quote inferiori al livello arginale, esse non influenzano il livello idrico nella sezione d'alveo principale, se non quando si verificano livelli idrici che causano il superamento dell'argine o della sommità spondale.

Di seguito (figura 5.7) viene riportato l'esempio di schematizzazione dell'area di allagamento di Lambrugo:

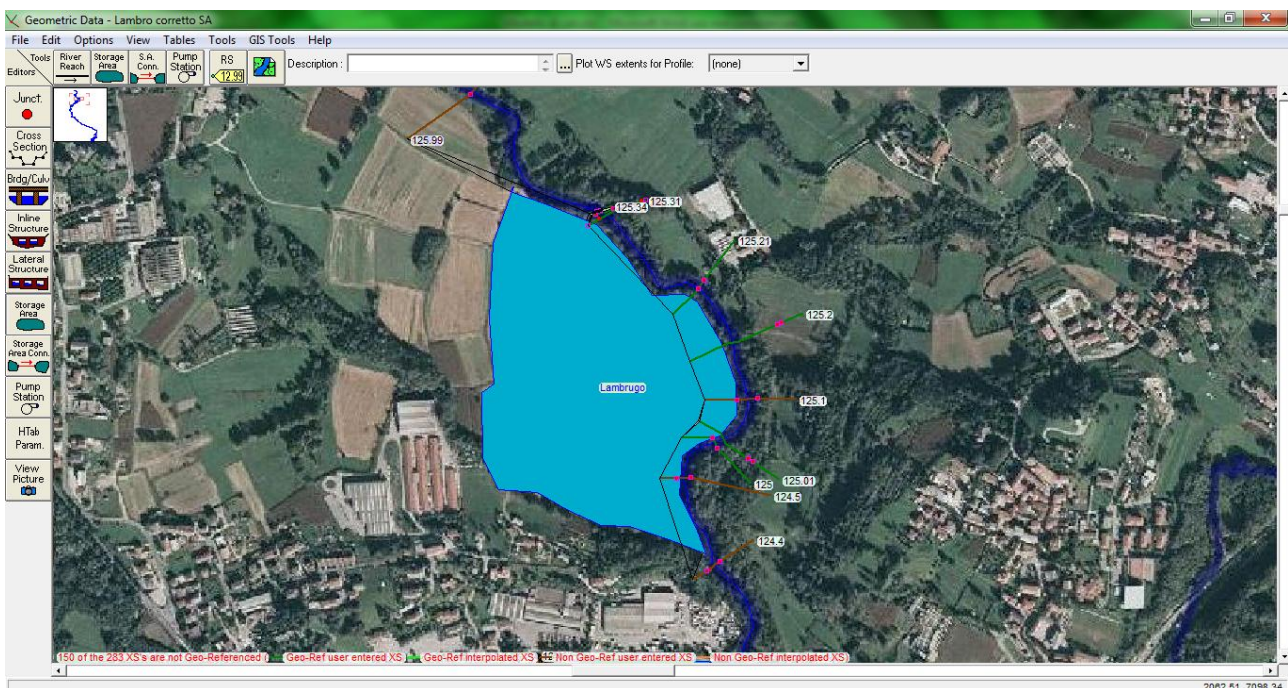


Fig. 5.7 – Esempio di schematizzazione di aree di espansione in Hec-Ras

Tale fenomenologia è ovviamente importante per una realistica rappresentazione dell'effetto degli invasi nel processo di moto vario di propagazione della piena.

Le diverse *Storage areas* sono quindi state inserite nelle seguenti zone:

- a Lambrugo, in destra idrografica;
- a Nibionno e a Inverigo, in destra e in sinistra idrografica;

- a Veduggio, in sinistra idrografica;
- a Villasanta fino al parco di Monza, in destra e in sinistra idrografica.

Per un migliore chiarimento, nella tabella seguente, vengono riportate aree, volumi, quote minime e sezioni, delle suddette aree di espansione:

LOCALITA'	DA SEZIONE	A SEZIONE	QUOTA MINIMA (m s.l.m.)	AREA (m ²)	VOLUME (m ³)
Lambrugo	126	124.4	239.01	170000	300000
Nibionno00	124.32	124.204	237	32000	
Nibionno01	124.202	124.14	238	9000	
Nibionno02	124	123.11	235.5	73000	
Nibionno03	123.1	122.12	237	87000	
Nibionno04	122.11	122.1	236.8	30000	
Inverigo00	124.309	124.204	238.2	15000	800000
Inverigo01	124.202	124.14	237.7	10000	
Inverigo02	124.12	124	237.5	14000	
Inverigo03	123.3	122.4	237.5	144000	
Inverigo04	122.4	122.12	237.5	68000	
Inverigo05	122.11	122.1	237.5	25000	
Veduggio	120.14	118.1	234.71	100000	200000
Villasanta1	101.02	101.0104	173.55	60000	100000
Villasanta2	101.0102	100.24	172.36	40000	
Parco Monza1	100.112	99	167.29	90000	
Parco Monza2	100.112	99	167.5	40000	500000
Parco Monza3	98.12	96.4	161.98	120000	

Tab. 5.1 - Caratteristiche relative alle aree di espansione presenti in Hec-Ras

Come detto in precedenza, le connessioni tra l'asta principale del fiume e le sue Storage areas, sono rappresentate dalle *lateral structures*.

Esse consistono in vere e proprie soglie di sfioro, rappresentanti gli argini naturali del fiume, poste longitudinalmente la corso principale, come mostrato in figura 5.8 .

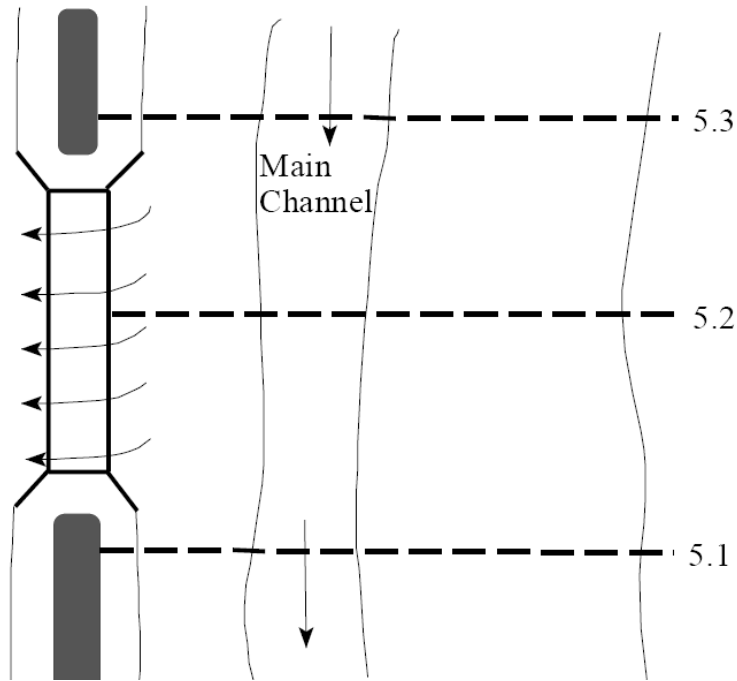


Fig. 5.8 - Schematizzazione del comportamento delle strutture laterali

Per la definizione di tali strutture, il programma richiede l'inserimento di un valore per lo spessore della soglia di sfioro (posto pari a 0.5 m per tutte le strutture longitudinali del nostro modello), la specificazione della sezione a partire dalla quale la struttura si estende, la definizione del tipo di arginatura (se posta in sinistra o in destra idrografica), e naturalmente l'inserimento di una successione di quote e rispettive progressive che ne determinino il profilo (figura 5.9).

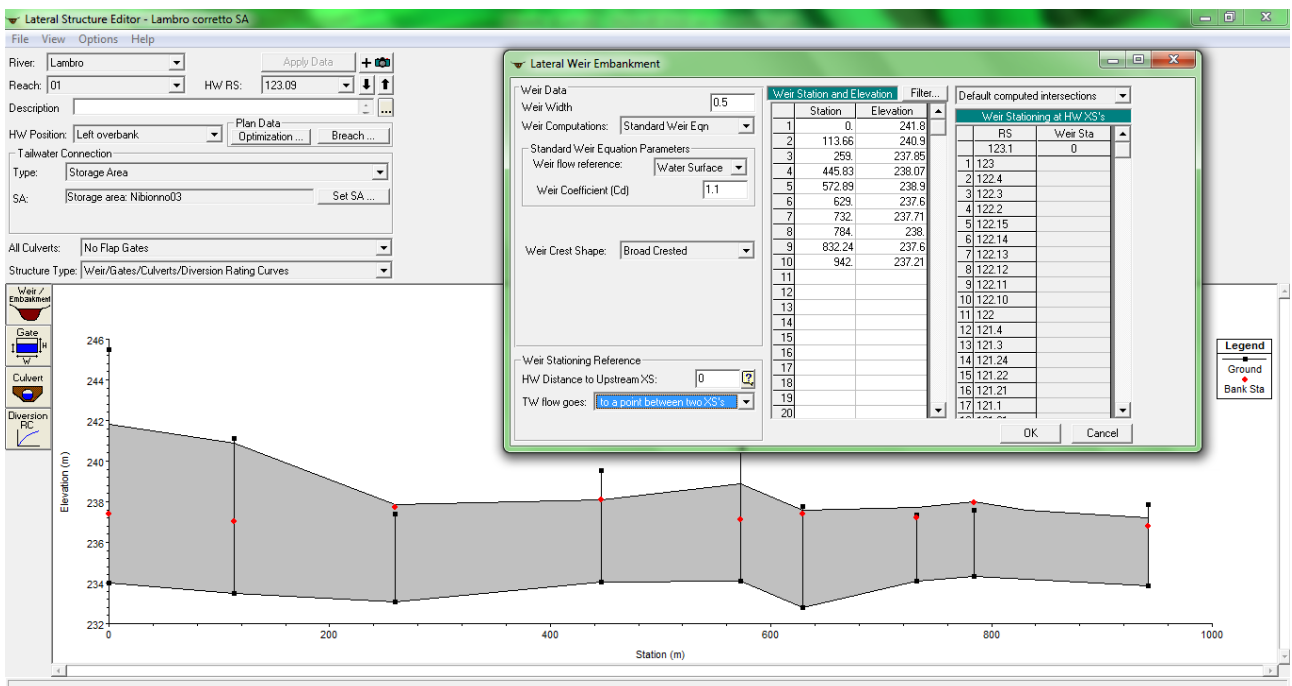


Fig. 5.9 - Esempio di lateral structure in Hec-Ras

Come accennato nel primo paragrafo di questo capitolo, la simulazione del comportamento idraulico del Lambro in corrispondenza di queste aree allagabili, ha costretto all'impiego di levees nelle sezioni in cui sono state inserite le *lateral structures*. In queste sezioni infatti il mancato impiego della funzione *levee*, avrebbe permesso, in caso di piena, qualora quindi il livello idrico superi la quota arginale, l'espansione del perimetro bagnato anche alle zone golenali presenti lungo la sezione, modellando quindi un fenomeno di allagamento che vuole essere però simulato attraverso l'impiego delle *storage areas*, e che, per questo motivo, sarebbe stato doppiamente e quindi erroneamente considerato.

Di seguito (figura 5.10) si riporta, a esempio, una delle sezioni comprendenti l'area di espansione di Lambrugo, vista in precedenza, in cui si vuole evidenziare la posizione della *levee* per i suddetti motivi.

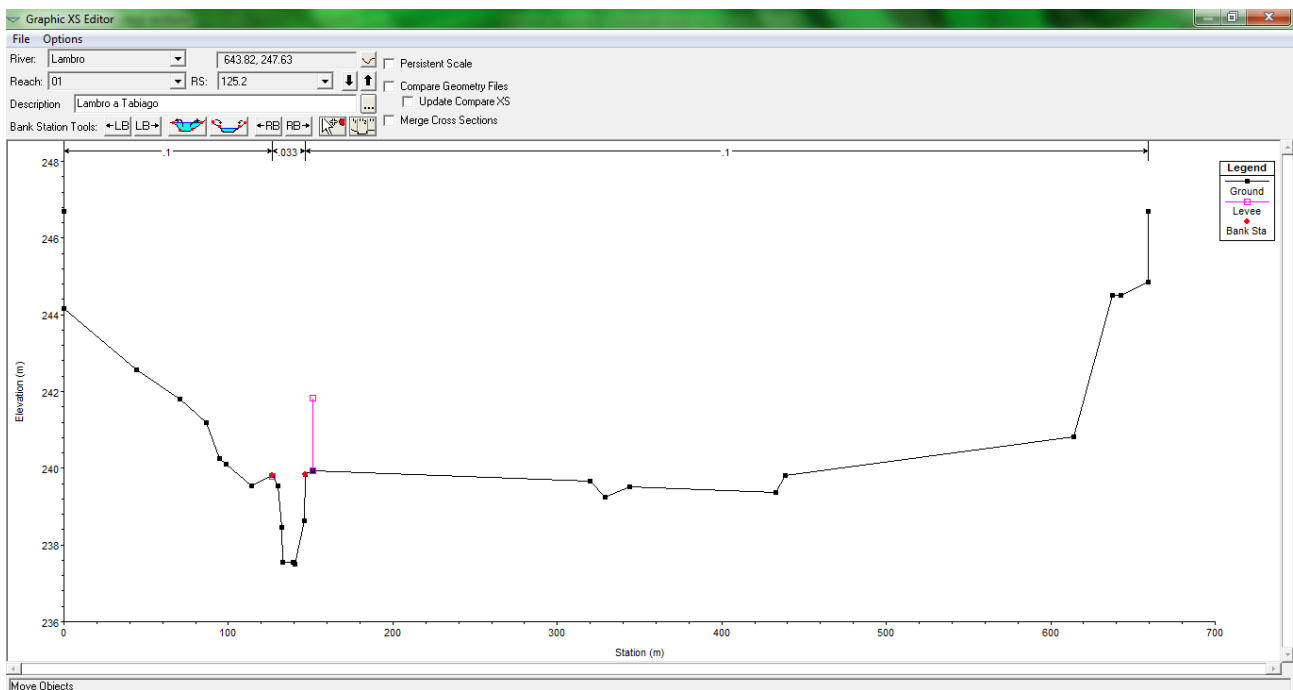


Fig. 5.10 – Esempio di levee in Hec-Ras

5.2.5 Calcolo dei profili di moto vario (Richiami teorici)

Si riportano di seguito alcuni richiami teorici sul moto vario delle correnti a superficie libera e sui metodi di risoluzione delle equazioni che le descrivono.

Adottando le seguenti ipotesi:

- Il flusso è monodimensionale; le grandezze che definiscono la corrente idrica sono funzioni continue del tempo t e della coordinata x . Questo implica che su ogni sezione trasversale normale alla direzione della corrente la velocità è costante e la superficie libera è rappresentabile come un segmento orizzontale. La velocità e le accelerazioni

lungo la verticale sono trascurabili rispetto alle analoghe grandezze in direzione del moto.

- La corrente è gradualmente variata, così che la distribuzione delle pressioni è di tipo idrostatico sulle singole sezioni trasversali.
- La pendenza del fondo è modesta e le variazioni nella sezione trasversale e nella pendenza di fondo possono essere prese in considerazione approssimando il corso d'acqua con una serie di tratti prismatici.
- Il fluido è omogeneo e incomprimibile.

Il moto di una corrente idrica a superficie libera è descritto matematicamente dalle equazioni di continuità e del moto, note come equazioni di De Saint-Venant monodimensionali.

Equazione di continuità

$$\frac{\partial A_t}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

Equazione di moto

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + g \cdot A \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

Dove q_l è la portata laterale per unità di lunghezza e S_f la perdita di carico esprimibile attraverso l'equazione di Manning.

La soluzione del sistema di D. S. V. permette di rappresentare, in dettaglio, tutte le trasformazioni che l'onda di piena subisce nella traslazione da monte a valle per effetto della laminazione naturale, dell'interferenza con le opere idrauliche, delle esondazioni al di fuori dell'alveo attivo, della confluenza di tributari laterali e del contributo distribuito dei bacini versanti. Le equazioni del moto vengono risolte numericamente dopo aver definito le condizioni al contorno e quelle iniziali.

Lo schema monodimensionale è applicabile nel caso di corsi d'acqua con un alveo a sezione semplice (channel), privo cioè delle aree golenali laterali. Tale schema viene, comunque, applicato anche al caso di alvei a sezione composta considerando le aree golenali al di fuori del canale come un'unica area di accumulo o di espansione che scambia acqua con il canale, mentre il flusso in tali aree è considerato come flusso in un canale separato.

Per i due flussi separati vengono scritte le equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto, per semplificare il problema si ipotizza che la superficie dell'acqua sia definita da un'unica superficie orizzontale in ogni sezione normale alla direzione del flusso, in maniera tale che lo scambio di quantità di moto tra il canale e le aree laterali sia trascurabile e la portata sia distribuita secondo l'intera sezione

La suddivisione della portata defluente tra l'alveo centrale (channel) e l'area costituita dalle golene viene effettuata attribuendo al primo una frazione della portata complessiva determinata come segue:

$$Q_c = \varphi Q$$

dove:

Q_c = portata nell'alveo centrale;

Q = portata totale;

$\varphi = K_c / (K_c + K_f)$;

K_c = trasporto dell'alveo centrale (channel);

K_f = trasporto dell'area golenale (floodplain).

Sotto queste semplificazioni l'equazione del moto monodimensionale può essere riscritta:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1 - \varphi)Q]}{\partial x_c} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi^2 Q^2 / A_c)}{\partial x_c} + \frac{\partial((1 - \varphi)^2 Q^2 / A_f)}{\partial x_f} + gA_c \left[\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_{fc} \right] + gA_f \left[\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_{ff} \right] = 0$$

nelle quali i suffissi c e f si riferiscono all'alveo centrale e all'area golenale. Lo schema di calcolo precedente consente di tener conto delle diverse caratteristiche di scabrezza tra l'alveo centrale e le golene.

Queste equazioni rappresentano un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali non lineare la cui soluzione non è generalmente possibile per via analitica, per la loro integrazione è necessario quindi ricorrere a metodi numerici. Il solutore di Hec-Ras per il moto vario adotta quindi un metodo alle differenze finite basato su uno schema implicito a quattro punti. Il sistema di equazioni algebriche che così si ottiene viene risolto con il metodo di Newton-Raphson. Al fine di rendere le soluzioni più stabili, alle classiche equazioni di continuità e di moto nella formulazione generale di De Saint Venant, si vanno ad aggiungere opportune equazioni per la stima delle dissipazioni energetiche sia di carattere concentrato che di carattere distribuito. Per molti manufatti particolari, l'USACE ha svolto campagne sperimentali mirate alla determinazione di appositi modelli di calcolo, permettendo all'utente la specificazione del caso progettuale mediante il solo inserimento di alcuni coefficienti reperibili da tabelle allegate. Ovviamente, oltre che da questi, il grado di risoluzione della simulazione dipenderà dalla attendibilità dei dati inseriti, dalla distanza adottata tra le sezioni e dal numero di punti con cui queste saranno descritte.

Nello schema alle differenze finite adottato le funzioni derivate e i valori di funzione sono calcolati in un punto interno $(n+\theta)\Delta t$; questo valore a $(n+1)\Delta t$ entra in tutti i termini delle

equazioni. Per un corso d'acqua questo dà luogo a un sistema di soluzioni simultanee delle equazioni; il sistema di soluzioni simultanee rappresenta un importante aspetto dello schema perché da informazioni dall'intero corso d'acqua che possono influenzare le soluzioni in ogni punto, pertanto il passo temporale deve essere significativamente più grande rispetto agli schemi numerici espliciti.

L'analisi di stabilità della soluzione con Von Neumann mostra che lo schema implicito è teoricamente incondizionatamente stabile per $0.5 < \theta \leq 1$, condizionatamente stabile per $\theta = 0.5$ e instabile per $\theta < 0.5$.

Altri fattori che contribuiscono all'instabilità della soluzione sono:

- brusche variazioni delle caratteristiche delle sezioni;
- brusche variazioni di pendenza longitudinale;
- caratteristica dell'onda di piena;
- opere d'arte come argini, soglie sfioranti, luci a battente, sfioratori che provochino variazioni brusche nella geometria dell'alveo o delle condizioni del moto.

Pertanto ogni simulazione richiede uno studio di dettaglio specifico per eliminare le cause di instabilità numerica. I maggiori problemi si hanno infatti per quanto riguarda il moto vario dove, per ottenere la convergenza alla soluzione, si deve porre grande attenzione alle condizioni al contorno imposte, alla specificazione del modello geometrico ed alla scelta del passo temporale per l'elaborazione. Inoltre la soluzione delle equazioni di moto monodimensionale gradualmente variato basata sul codice UNET presenta talvolta problemi di stabilità in presenza di passaggi da corrente lenta a veloce e viceversa. Sarà quindi richiesto di seguire piccole prescrizioni dettate dall'esperienza e di calibrare alcuni parametri quali tolleranze, passi temporali, numero di iterazioni massimo per passo, raddoppi di sezione, etc... che, pur non essendo classificabili come condizioni al contorno, caratterizzano il modello variando da caso a caso. Relativamente alle prescrizioni di cui si è ora accennato, si dovrà cercare di ottenere una specificazione geometrica del modello, caratterizzata da un infittimento delle sezioni trasversali nelle prossimità di particolarità idrauliche, così da compensare le rapide variazioni del livello idrico (z) con il minore passo (x).

5.3 Confronto modelli

Al fine di verificare l'attendibilità del modello sviluppato in HEC-RAS è stata effettuata una prima simulazione di confronto con il modello sviluppato dall'Autorità di Bacino del Po attraverso il software di calcolo MIKE 11.

5.3.1 Condizioni al contorno

Lungo l'asta fluviale sono state imposte le medesime condizioni al contorno utilizzate nel modello AdB: gli idrogrammi relativi ai sottobacini afferenti al fiume sono i medesimi descritti al capitolo precedente.

Come condizione al contorno di monte è stato imposto l'idrogramma risultante dalla simulazione svolta con MIKE 11 relativa al campo di indagine lacuale e prelacuale, esterno al nostro dominio di interesse e riportata in figura 5.11.

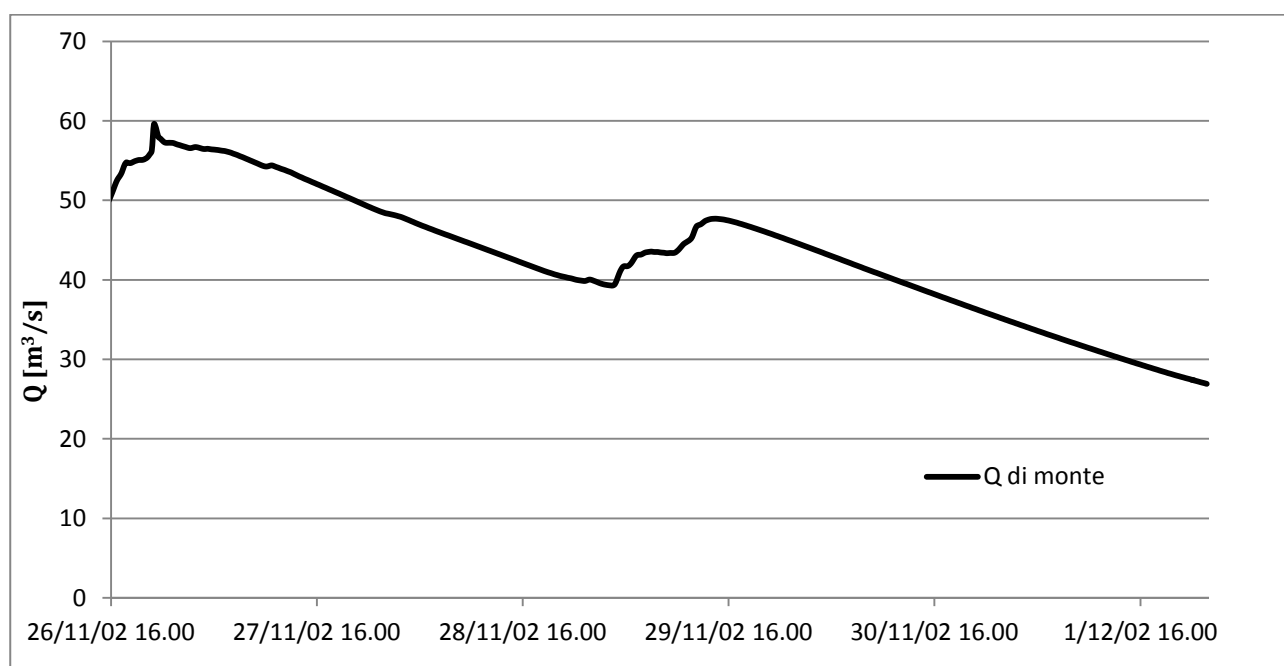


Fig. 5.11 - Idrogramma imposto come condizione di monte (risultato modello AdB)

Alla sezione di valle è stato invece imposto l'andamento dei livelli nel tempo ricavato sempre dal modello sviluppato dall'Autorità di Bacino e riportato in figura 5.12.

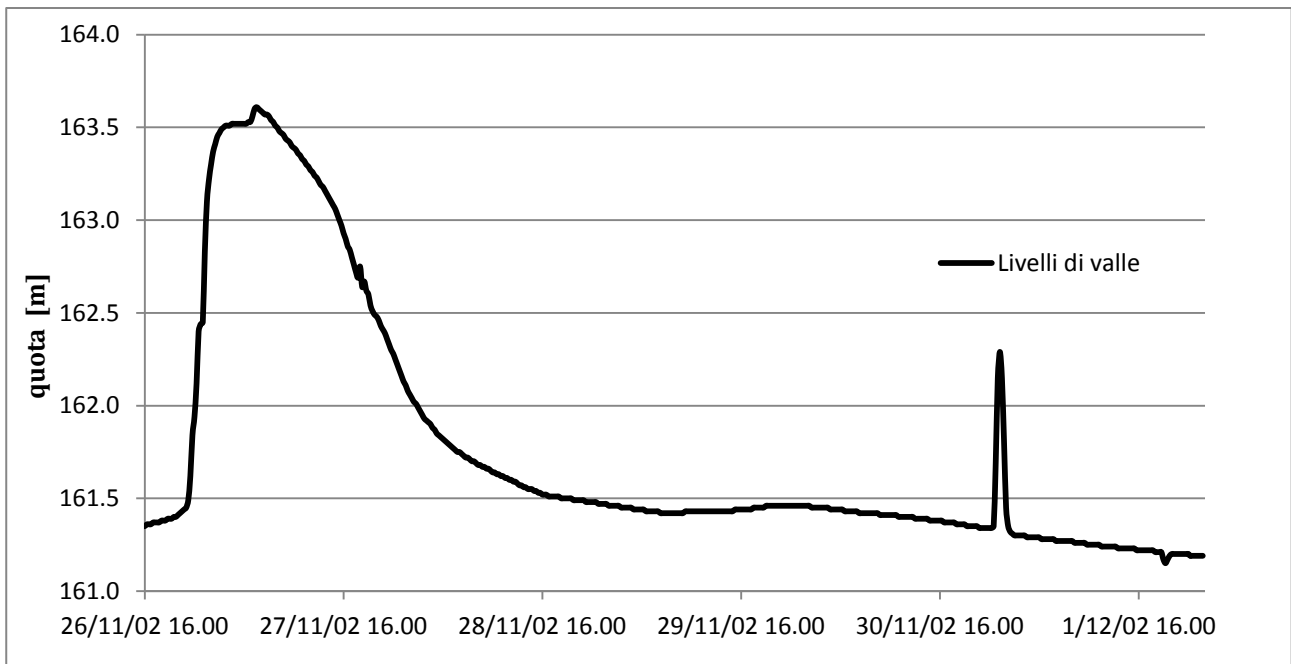


Fig. 5.12 - Andamento dei livelli imposto come condizione di valle (risultato modello AdB)

Sebbene gli idrogrammi inseriti nel modello sviluppato in Hec-Ras siano gli stessi utilizzati dal modello sviluppato con MIKE 11, le sezioni nelle quali vengono inserite tali idrogrammi possono non coincidere con quelle utilizzate nel modello dell'Autorità di Bacino del Po poiché Hec-Ras non permette l'immissione di idrogrammi puntuali o distribuiti nelle sezioni subito a monte e a valle dei ponti o nelle sezioni di monte delle traverse. Inoltre il primo idrogramma distribuito (LAM4) nel modello di MIKE 11 comprende sezioni esterne (più a monte) al nostro dominio di indagine perciò nel modello sviluppato in Hec-Ras viene considerato un contributo maggiore di portata proveniente da tale bacino.

5.3.2 Sezioni e Scabrezze

Si ricorda che il modello sviluppato dall'Autorità di Bacino de Po risale al 2003, esso è perciò basato su informazioni relative a campagne di rilievo svolte circa 10 anni fa; nel corso degli anni il fiume ha inevitabilmente subito delle modificazioni, tra le quali, le più evidenti sono costituite dagli interventi effettuati lungo il suo corso.

In seguito a rilievi in sito sono state perciò inserite alcune opere di recente costruzione ed è quindi stato necessario modificare le sezioni preesistenti. In particolare i manufatti inseriti nel modello idraulico sono: la traversa a Costa Lambro (sezione 110.093) mostrata in figura 5.13, l'attraversamento pedonale di Triuggio (sezione 105.113) mostrato in figura 5.14 e l'attraversamento stradale di via Galileo Galilei a Biassono (sezione 102.203) in figura 5.15.



Fig. 5.13 - Traversa a Costa Lambro



Fig. 5.14 - Ponte pedonale di Triuggio



Fig. 5.15 – Ponte stradale via Galileo Galilei (Biassono)

Per quanto riguarda le scabrezze sono stati utilizzati, dove indicati, i medesimi valori impiegati nel modello sviluppato con MIKE 11, dove assenti (lungo le aree golenali di alcune sezioni) sono stati utilizzati valori di scabrezza coerenti con quelli utilizzati a monte e a valle di queste da AdB. Ad ogni modo, considerando portate duecentennali, variazioni dei suddetti valori comportano variazioni trascurabili sulle altezze d'acqua.

5.3.3 Risultati della simulazione

In considerazione delle semplificazioni inserite nella modellazione è lecito aspettarsi variazioni dei livelli idrici risultanti lungo il tratto in esame rispetto ai livelli riportati nello Studio di fattibilità.

Ad eccezione delle zone a monte di alcuni attraversamenti, il profilo derivante dalla simulazione effettuata con il programma di calcolo HEC-RAS risulta sovrastimare le altezze d'acqua ricavate dal modello dell'Autorità di Bacino. In media il dislivello presente risulta di circa 20 cm; si verificano puntualmente dislivelli maggiori localizzati però in brevi tratti. Le maggiori differenze con il modello presentato dall'Autorità di Bacino si realizzano nei tratti di monte degli attraversamenti stradali più "ingombranti", dove l'impalcato massiccio risulta quindi ostacolare il naturale deflusso del fiume; in questi punti, diversamente da quanto succede altrove, il profilo di rigurgito derivante dalla simulazione svolta con HEC-RAS

presenta altezze d'acqua inferiori rispetto a quelle risultanti dal modello di MIKE 11: in media di circa 0,4 – 0,5 m.

Un grafico rappresentante i profili altimetrici relativi alle due modellazioni è riportato nella pagina seguente (figura 5.16).

Per quanto riguarda i valori di portata presenti lungo il corso d'acqua, essi risultano aderenti ai risultati AdB, la differenza tra i due modelli risulta in media di circa 4 – 5 m³. In tabella 000 sono messe a confronto le portate transitanti alle sezioni indicate relative ai due modelli.

Sezione	Portata Modello AdB [m ³ /s]	Portata Modello Hec-Ras [m ³ /s]
Ponte S.P. 41 - Merone	60	58
a monte confluenza Bevera Molteno	74	82
confluenza Bevera Molteno	122	128
Ponte S.S. 342 (Briantea)	116	125
Ponte via Garibaldi - Verano Brianza	155	151
Ponte strada comunale - Triuggio	157	158
Ponte vecchio - Biassono	174	170
Ponte S. Giorgio - Villasanta	189	190

Tab. 5.2 - Valori di portata Modello AdB - Modello Hec-Ras

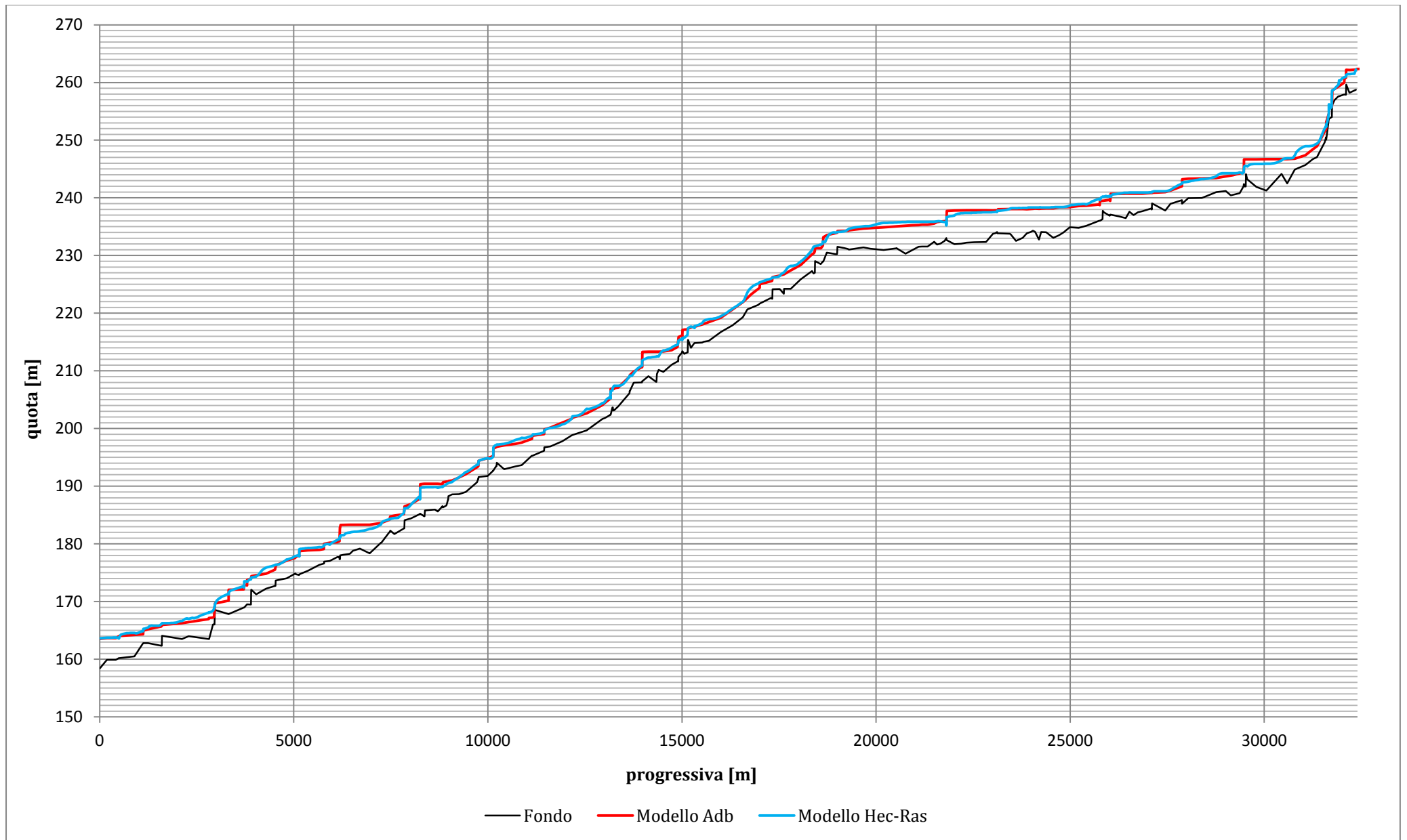


Fig. 5.16 - Profilo altimetrico del fiume Lambro risultante dal modello in Hec a confronto con il modello AdB

5.4 Configurazioni di progetto ipotizzate

5.4.1 Progetto di regolazione del Cavo Diotti

Come detto in precedenza, il lago di Pusiano è un lago regolato dal 1811 grazie alla realizzazione, accanto al suo emissario naturale, il Fiume Lambro, di un emissario artificiale, il Cavo Diotti, al cui incile si trova l'edificio che ospita una coppia di paratoie per il controllo delle portate uscenti.

Dal 19 dicembre 2008 la Regione Lombardia è diventata proprietaria del Cavo Diotti, del fabbricato della Casa del Camparo e di tutti i terreni annessi ivi compreso il canale di adduzione e di scarico della diga. Contemporaneamente all'acquisizione del manufatto la Regione Lombardia ha affidato la gestione operativa delle opere al Parco Regionale della Valle del Lambro (gennaio 2009) con l'obiettivo di assicurare la protezione idraulica del territorio e mantenere adeguate condizioni di deflusso nel Lambro sublacuale.

La regolazione oggi avviene tramite due paratoie sollevabili a battente sia manualmente che elettricamente dagli anni '50, con configurazione geometrica caratterizzata da due luci ad arco di larghezza 2,21 m e altezza 0,72 m (figura 5.17).

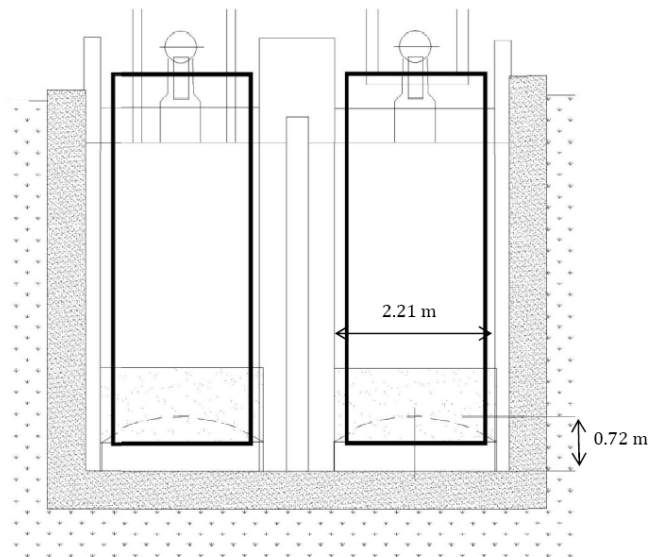


Fig. 5.17 - Geometria delle paratoie

Tra la fine del 2012 e la fine del 2013 è prevista la completa ristrutturazione degli organi di regolazione idraulica della portata defluente dal lago di Pusiano. Il progetto porterà lo stato delle paratoie ad una nuova configurazione geometrica costituita da due luci rettangolari di larghezza 2,21 m e altezza 2,00 m ove verranno montate due paratoie piane automatizzate, che regoleranno le portate defluenti dal lago (Fig. 5.18). In questo modo sarà possibile gestire

un intervallo di portate da 0 a 20 m³/s anche con modesti livelli del lago, a differenza di quello che consente il sistema delle attuali paratoie che, con i medesimi livelli, gestisce circa 10 m³/s.

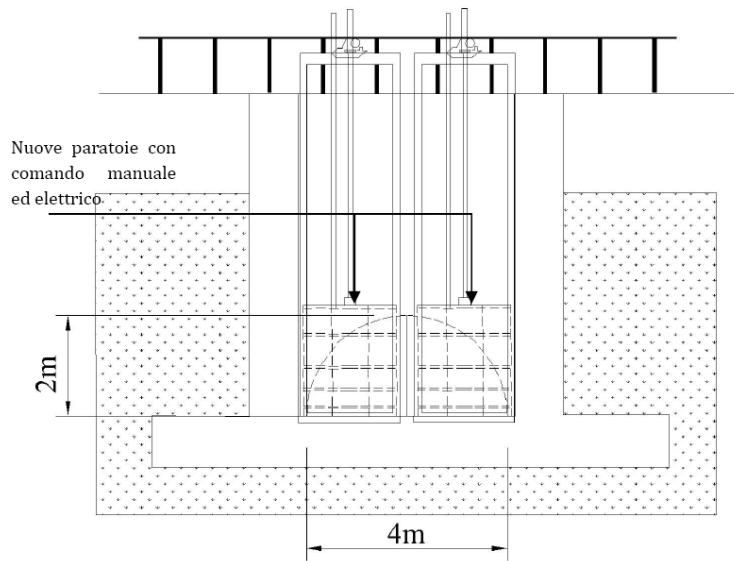


Fig. 5.18 - Prospetto delle nuove paratoie del Cavo Diotti

Per quanto riguarda invece l'emissario naturale del lago di Pusiano si può evidenziare come questo sia sostanzialmente regolato dalla quota 259,15 m s.l.m. : tale livello risulta infatti il minimo "naturale" del lago (zero idrometrico) ed il livello definito "normale" nei documenti storici.

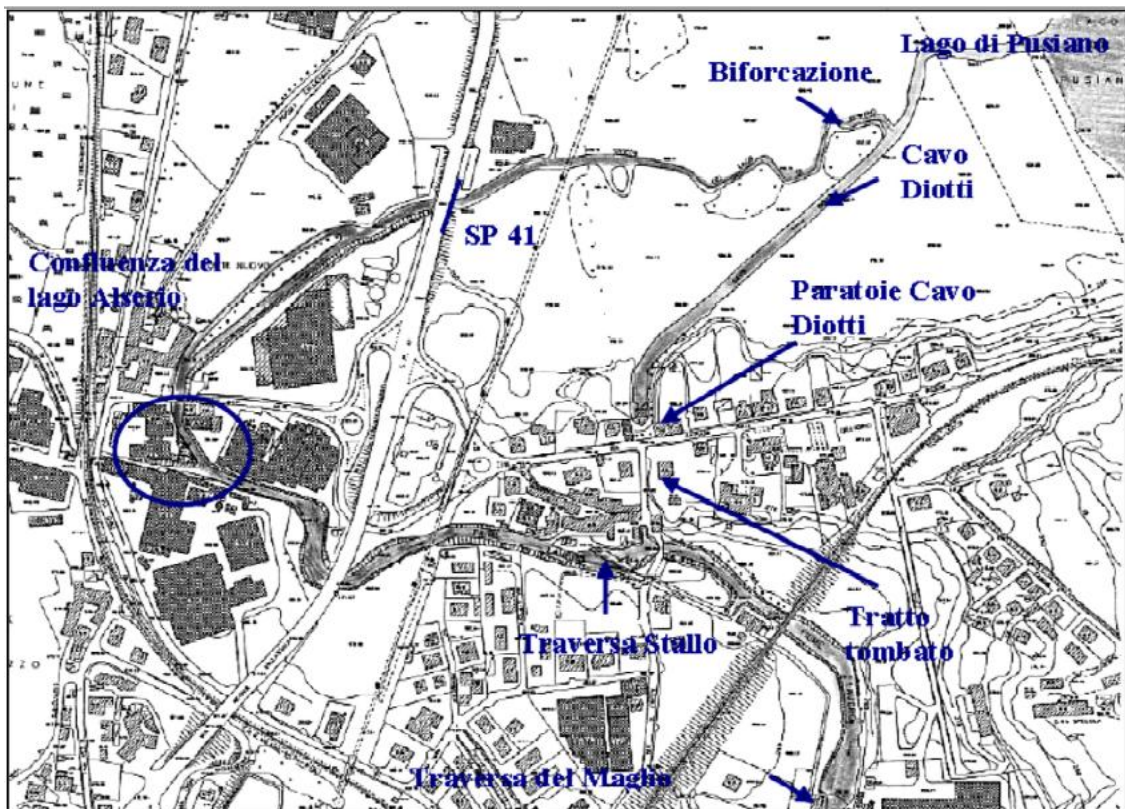


Fig. 5.19 - Planimetria del sistema di emissari del Lago di Pusiano

5.4.1.1 Analisi probabilistica dei livelli idrici dei laghi

Per la definizione di una nuova condizione al contorno di monte comprendente le portate provenienti dai laghi di Alserio e Pusiano, sempre riferite ad un tempo di ritorno di 200 anni, si è proceduto alla raccolta dei dati storici riguardanti i livelli idrometrici del lago di Pusiano e in seguito all'individuazione di una legge che mettesse in relazione i livelli del lago di Pusiano a quelli del lago di Alserio. E' infatti a partire da un determinato livello idrometrico presente nei laghi, di assegnato tempo di ritorno, che si è proceduto al calcolo del relativo idrogramma, o più precisamente curva di scarico. Il campionario a disposizione, costituito dai massimi livelli giornalieri del lago di Pusiano misurati per mezzo di una lettura dell'asta idrometrica di Pusiano e relativi allo zero idrometrico del Cavo Diotti, comprende un arco temporale di circa 72 anni così suddiviso: dal 1876 al 1900, dal 1954 al 1973, dal 1985 al 2011. Tra questi si sono poi individuati i massimi annuali (di seguito riportati) costituenti quindi la popolazione campionaria sulla base della quale si è poi impostata l'analisi probabilistica conseguente.

Anno	Livello massimo [m]	Anno	Livello massimo [m]	Anno	Livello massimo [m]	Anno	Livello massimo [m]
1876	0.82	1954	1.38	1985	0.41	2010	1.42
1877	1.58	1955	0.84	1986	1.44	2011	0.40
1878	1.44	1956	1.90	1987	1.31		
1879	1.81	1957	1.72	1988	1.34		
1880	1.97	1958	1.36	1989	1.60		
1881	1.45	1959	1.61	1990	1.16		
1882	1.81	1960	1.36	1991	1.06		
1883	1.26	1961	0.41	1992	1.31		
1884	0.98	1962	0.46	1993	2.11		
1885	1.44	1963	1.76	1994	1.41		
1886	1.78	1964	1.14	1995	1.15		
1887	1.17	1965	1.62	1996	1.76		
1888	2.21	1966	2.26	1997	1.48		
1889	1.44	1967	1.12	1998	1.55		
1890	1.32	1968	1.08	1999	1.31		
1891	1.78	1969	0.78	2000	2.06		
1892	1.52	1970	1.06	2001	1.06		
1893	-0.01	1971	1.30	2002	3.65		
1894	1.08	1972	1.16	2003	1.07		
1895	0.91	1973	0.72	2004	1.54		
1896	2.05			2005	1.22		
1897	1.09			2006	1.05		
1898	1.48			2007	0.80		
1899	0.74			2008	1.05		
1900	1.34			2009	1.20		

Tab. 5.3 - Tabella riassuntiva dei massimi livelli annuali nel lago di Pusiano

Come noto, “le caratteristiche probabilistiche di questo insieme, cioè il legame tra i suoi valori e la probabilità che essi si verifichino, possono essere descritti tramite una funzione di distribuzione di probabilità $P(x)$, dove x è la variabile casuale considerata”: i livelli idrometrici relativi al Cavo Diotti. Più precisamente quindi, $P(x_0)$ esprime la probabilità che un valore x_0 della variabile casuale non venga superato.

La funzione di distribuzione presa in considerazione è stata la funzione di distribuzione di Gumbel:

$$P(x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}}$$

Dove i parametri α e u sono legati allo scarto quadratico medio σ e alla media μ della variabile x dalle relazioni:

$$\alpha = \frac{1.28}{\sigma}$$

$$u = \mu - 0.45 \cdot \sigma$$

Ammettendo perciò che la media e lo scarto quadratico medio della variabile, cioè della sua popolazione, possano essere considerati coincidenti con i rispettivi valori m e s di un campione di valori estratto da tale popolazione, i parametri della distribuzione possono essere stimati dalla serie di osservazioni note, sostituendo m e s a μ e σ nelle precedenti equazioni.

Si riportano di seguito i valori di m , s , α e u calcolati:

$\sigma = s$	52.33
$\mu = m$	1.34
α	0.02
u	110.38

Tab. 5.4 - Parametri di Gumbel

Ordinando quindi in senso crescente la serie di dati dei livelli idrometrici del lago di Pusiano, si calcolano le probabilità di non superamento (figura 5.20):

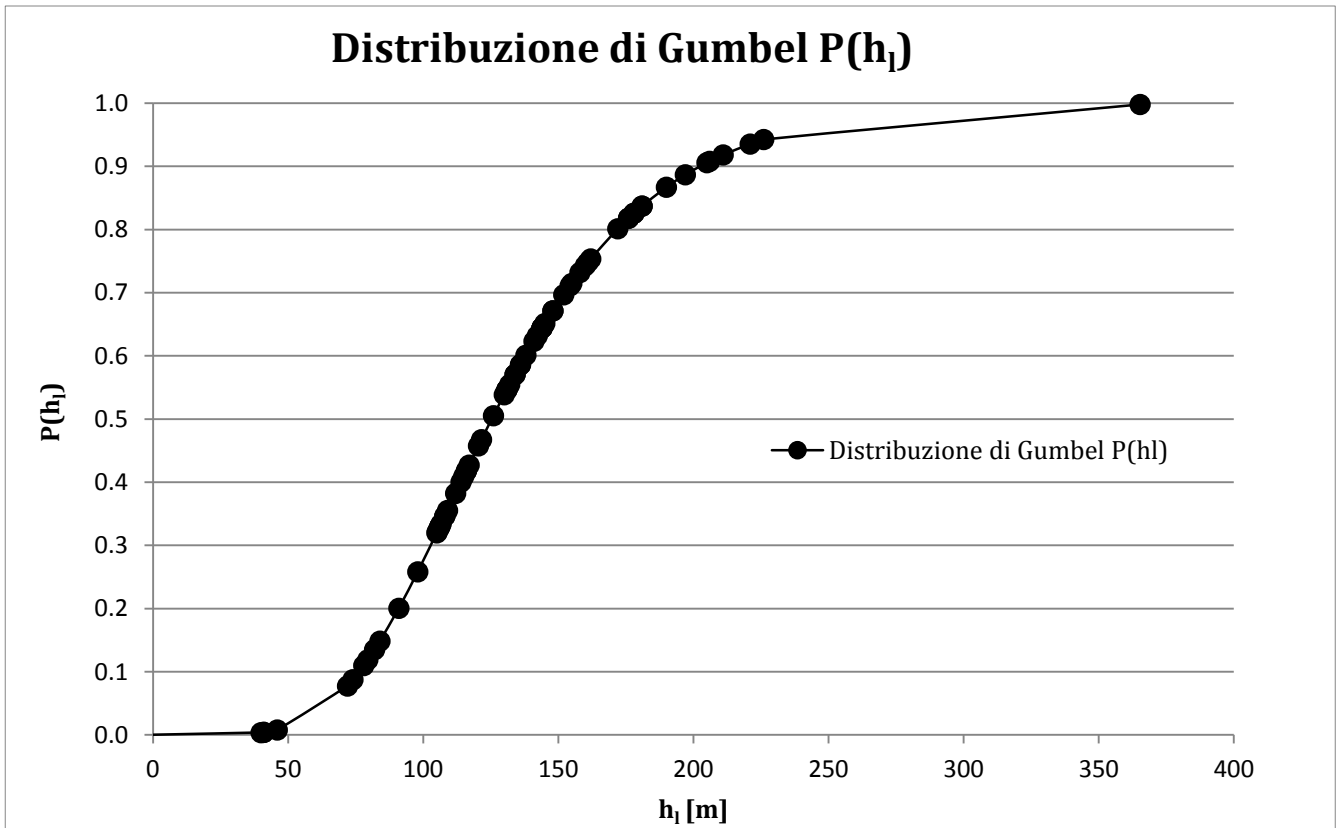


Fig.5.20 - Distribuzione di Gumbel relativa ai livelli idrici nel lago di Pusiano

Invertendo la funzione di probabilità di Gumbel, tenendo presente il legame esistente tra probabilità di non superamento P e tempo di ritorno T :

$$P = 1 - \frac{1}{T}$$

si può quindi calcolare il livello nel lago di Pusiano corrispondente ad un determinato tempo di ritorno T :

$$h_l = u - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Di seguito viene riportato il grafico mostrante l'andamento dei livelli nel lago in funzione del tempo di ritorno, con particolare attenzione ai livelli corrispondenti a tempi di ritorno di 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni (figura 5.21).

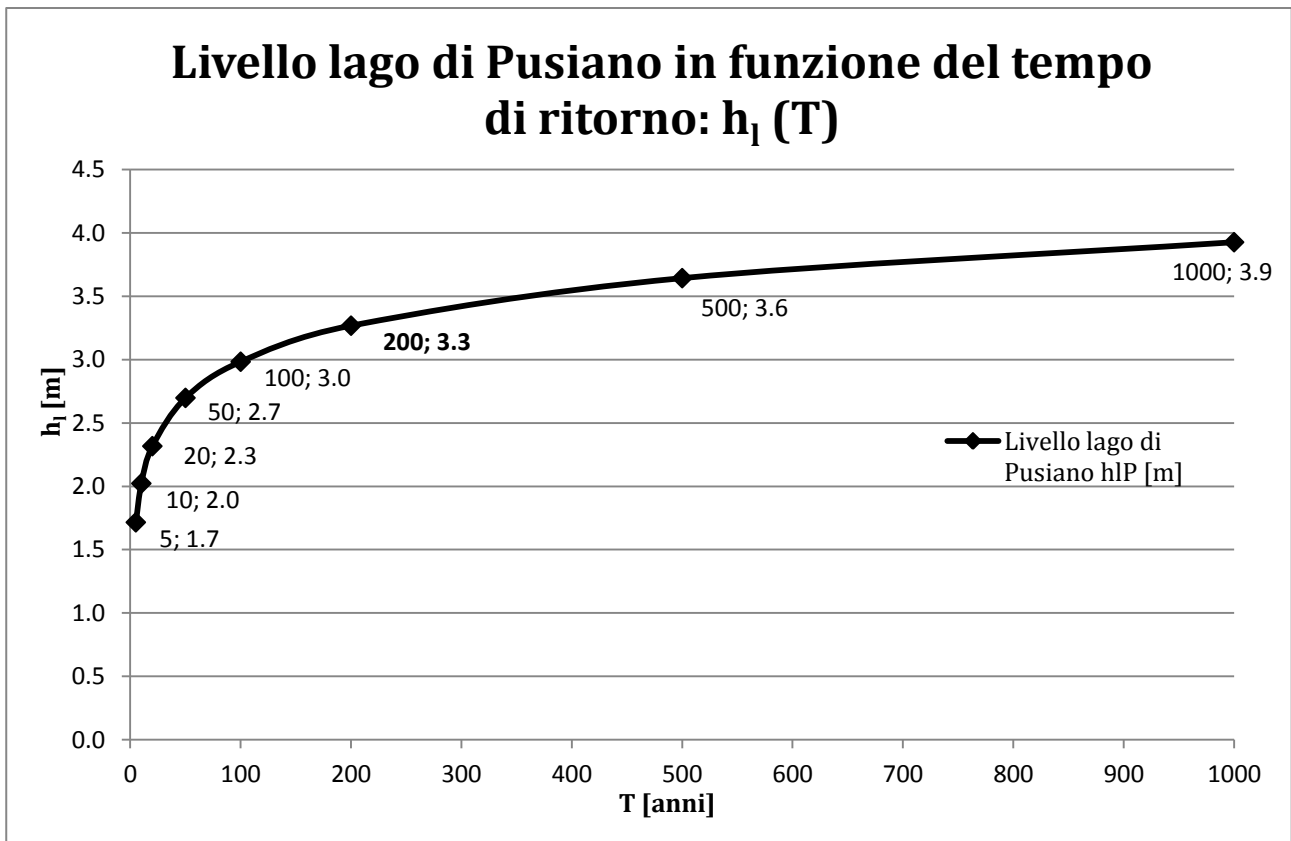


Fig. 5.21 – Andamento dei livelli idrici nel lago di Pusiano in funzione del tempo di ritorno

Per quanto riguarda invece il lago di Alserio, data l'esigua disponibilità di dati relativi ai vari livelli verificatisi nel lago negli anni passati, si è proceduto all'individuazione del livello idrico di partenza della curva di scarico del lago a partire dall'osservazione dell'andamento dei livelli del 2002 in relazione ai livelli del lago di Pusiano.

E' stato quindi a partire dall'andamento dei livelli idrici del lago di Alserio in funzione dei livelli idrici presenti contemporaneamente nel lago di Pusiano (figura 5.22), che si è potuta identificare una curva interpolante tale da descrivere approssimativamente la suddetta relazione.

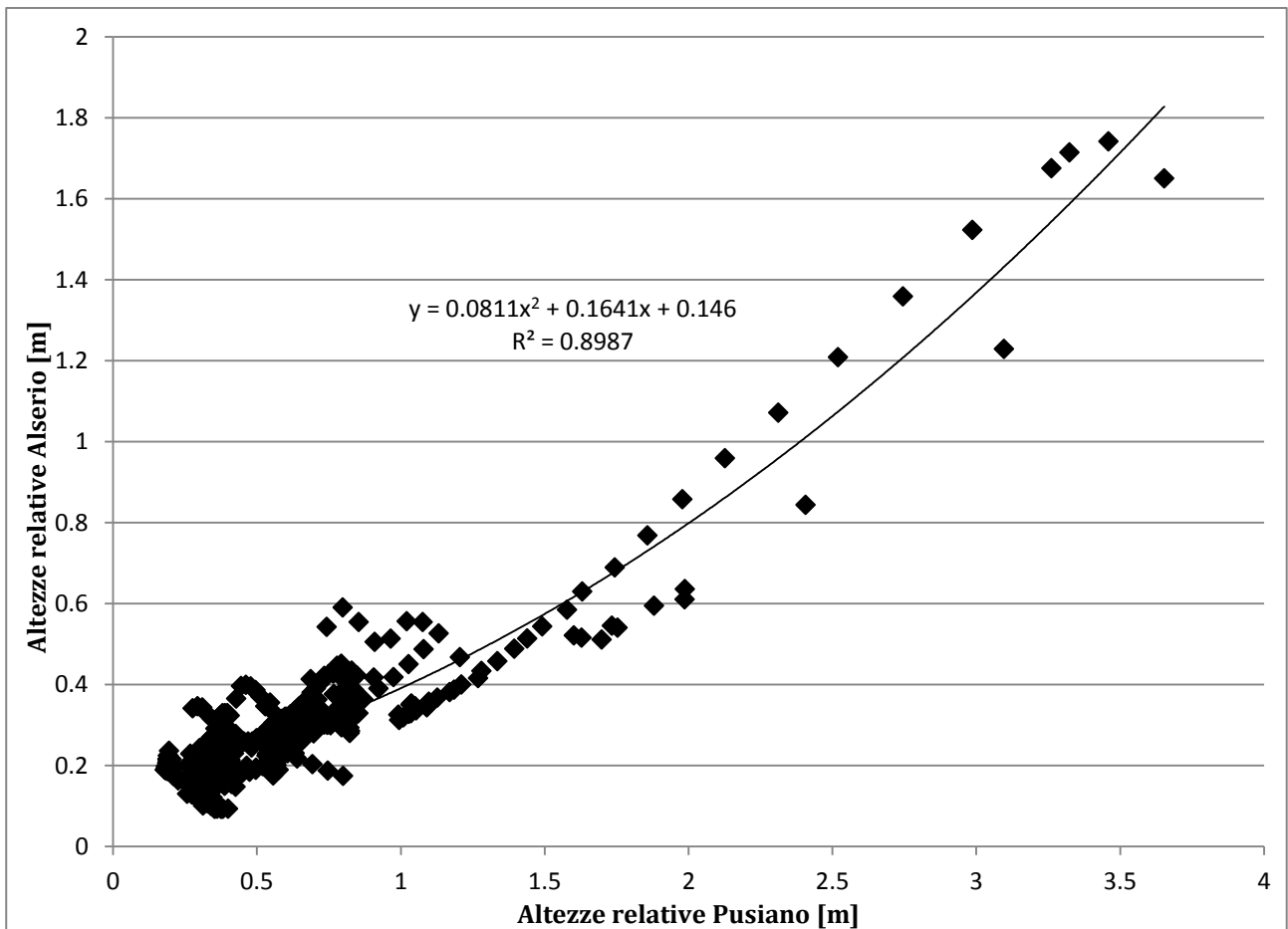


Fig. 5.22 - Relazione tra le altezze relative nel lago di Alserio e le altezze relative nel lago di Pusiano

Disponendo quindi di un'equazione che metta in relazione i livelli del lago di Pusiano e livelli del lago di Alserio, per i diversi tempi di ritorno precedentemente considerati si dispone ora dei rispetti livelli in entrambi i laghi:

T [anni]	Livello lago di Pusiano h_{IP} [m]	Livello lago di Alserio h_{IA} [m]
5	1.7	0.7
10	2.0	0.8
20	2.3	1.0
50	2.7	1.2
100	3.0	1.4
200	3.3	1.6
500	3.6	1.8
1000	3.9	2.0

Tab. 5.5 - Livelli idrici dei laghi per tempi di ritorno di 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni

A partire da queste informazioni, è stato quindi possibile procedere al calcolo delle curve di svuotamento dei laghi, costituenti l'imprescindibile condizione di monte del nostro modello.

5.4.1.2 Curve di scarico dei laghi

Dalla conoscenza empirica delle equazioni di deflusso dei rami naturali dei due laghi e di quello artificiale del Cavo Diotti, avendo ricavato i livelli di partenza dei laghi per tempo di ritorno duecentennale, ed essendo note le caratteristiche morfologiche di questi (in particolare superficie e volume), si sono calcolate le relative curve di svuotamento.

A fini esplicativi si riportano quindi di seguito le equazioni di deflusso sovramenzionate.

Emissario Lago di Alserio

$$Q = 3,1417 \cdot (h + 0,086)^{1,4658}$$

Emissario naturale Lago di Pusiano

$$Q = 3,19 \cdot h^2$$

Emissario artificiale Lago di Pusiano (Cavo Diotti)

$$Q = 0,009132 \cdot h^6 - 0,057035 \cdot h^5 + 0,161953 \cdot h^4 - 0,574218 \cdot h^3 - 0,114747 \cdot h^2 + 8,727726 \cdot h + 10,00714$$

Dove h rappresenta l'altezza d'acqua relativa allo zero idrometrico del lago di Pusiano (259,15 m s.l.m.)

Gli idrogrammi riportati di seguito sono due per ogni caso analizzato, poiché relativi a diversi punti di immissione nel Lambro: il primo e il terzo (figure 5.23 e 5.25), condizione al contorno di monte, riportano i contributi dei rami naturali del lago di Alserio e del lago di Pusiano, il secondo e il quarto (figure 5.24 e 5.26), condizione al contorno, riportano il solo contributo del Cavo Diotti. I casi analizzati sono invece:

- a. NON REGOLAZIONE: esso costituisce il caso più gravoso tra quelli analizzati (e che verranno esposti più avanti); le paratoie del Cavo Diotti si presentano, in questa configurazione, completamente aperte per tenere in considerazione eventuali malfunzionamenti che possono intervenire nella vita dell'opera.
- b. REGOLAZIONE LAGO: le paratoie del Cavo Diotti si presentano, in questa configurazione, completamente chiuse all'inizio della simulazione, per poi venire gradualmente aperte in un secondo momento (apertura graduale tra le ore 02:00 e le ore 03:00 del 27/11/2002), in seguito al passaggio del picco di piena dei bacini immediatamente a valle del lago (come la Bevera di Molteno), in modo tale da disaccoppiare le relative portate al colmo.

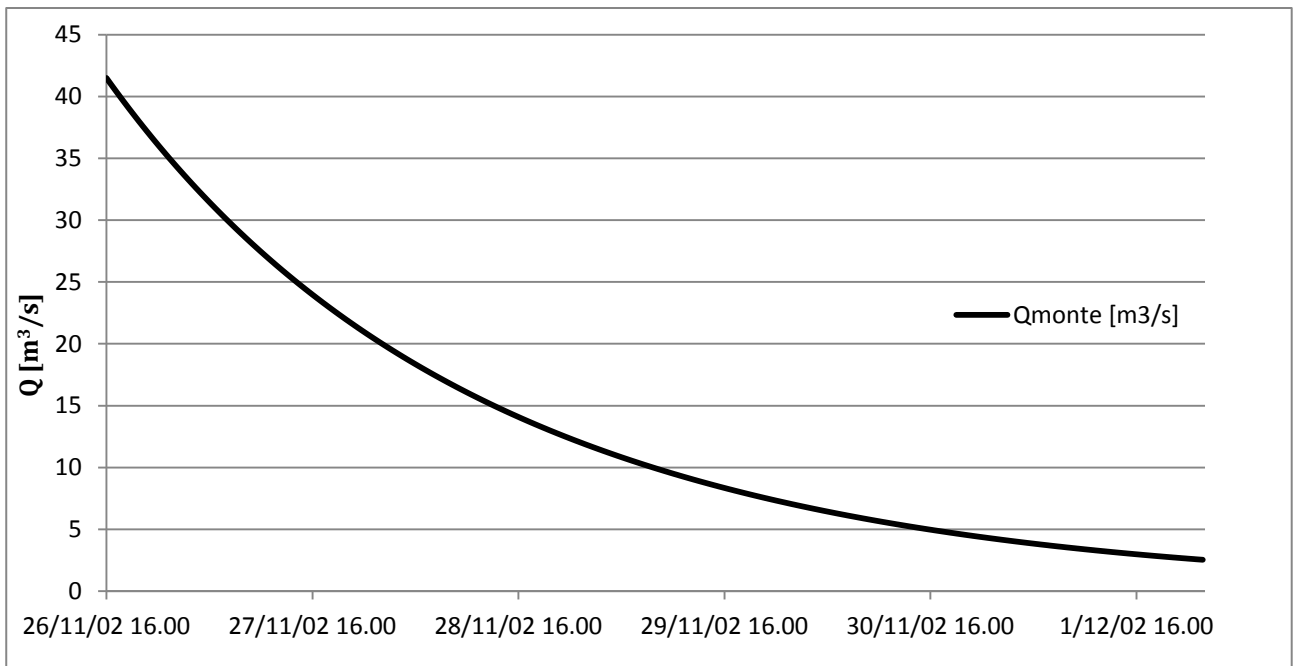


Fig. 5.23 - Condizione al contorno alla sezione di monte in caso di "Non Regolazione"

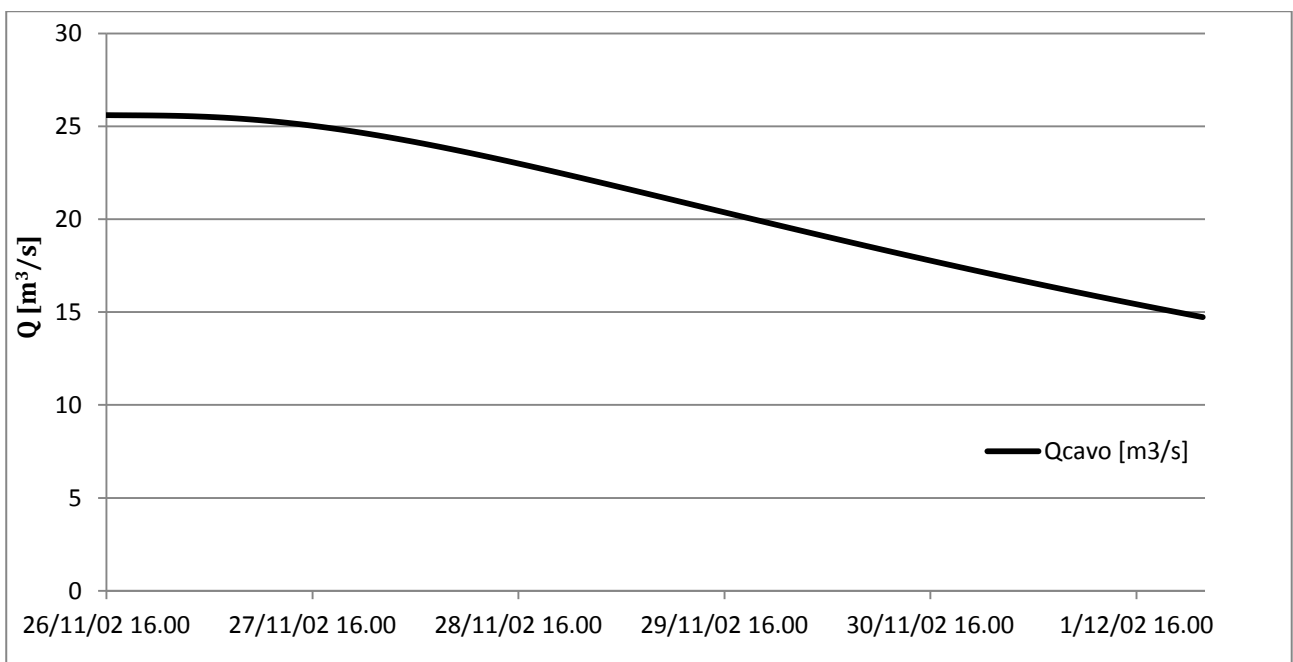


Fig. 5.24 - Condizione al contorno alla sezione 132.0901 in caso di "Non Regolazione"

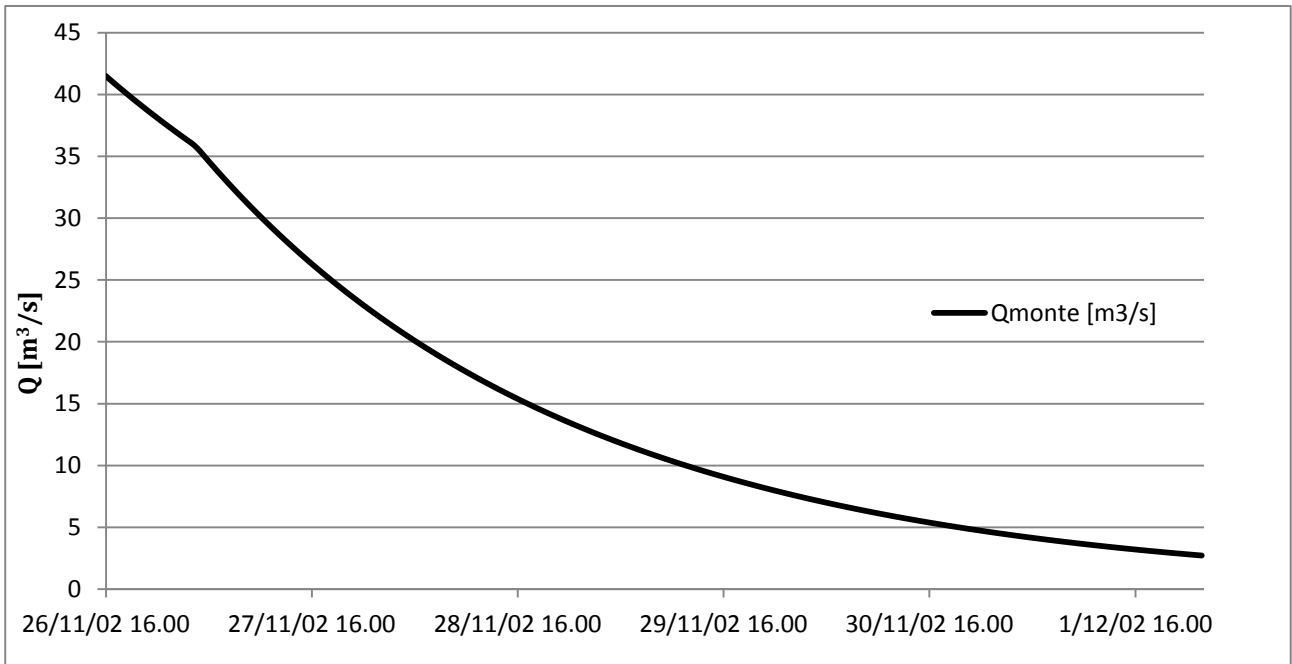


Fig. 5.25 - Condizione al contorno alla sezione di monte in caso di "Regolazione Lago"

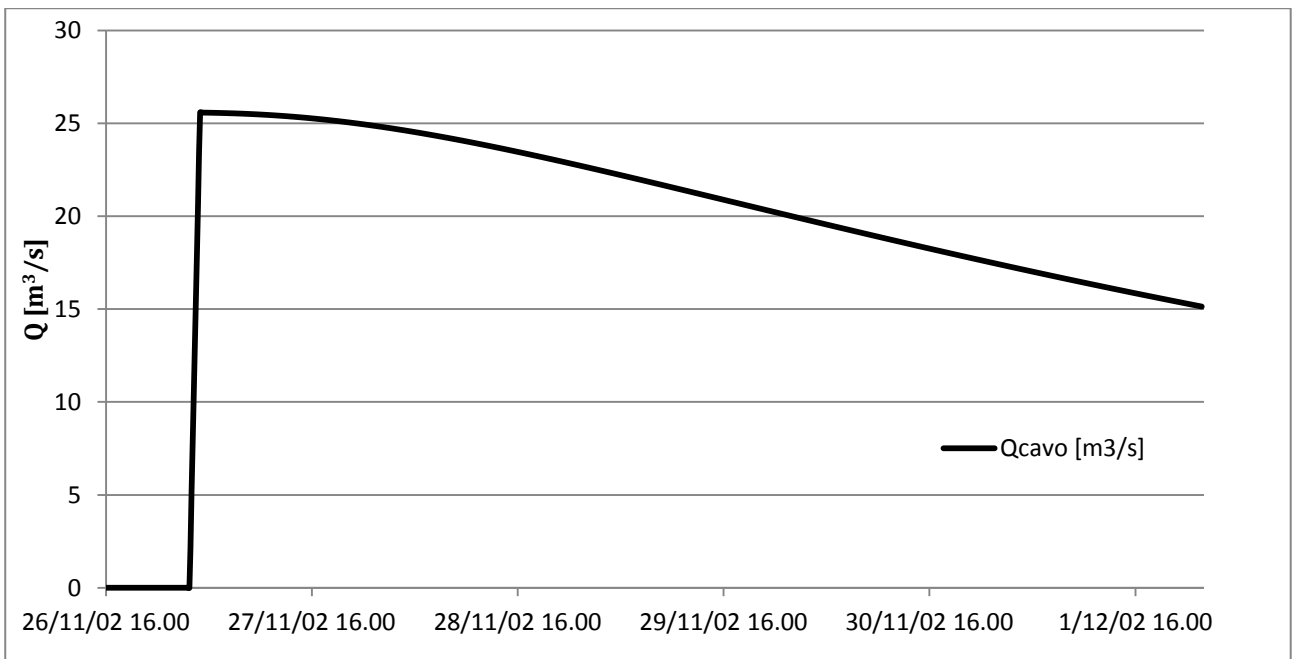


Fig. 5.26 - Condizione al contorno alla sezione 132.0901 in caso di "Regolazione Lago"

5.4.2 Progetto di laminazione della Cava di Brenno

La Miniera di Brenno (figura 5.27) è una miniera di estrazione della marna per la produzione del cemento attiva nel territorio del Comune di Costa Masnaga in virtù della concessione mineraria rilasciata dell'ex Distretto Minerario di Milano (oggi Regione Lombardia) che prevede il completamento dell'attività estrattiva entro il 2013 ed un successivo termine di tre anni per la rinaturalizzazione dell'area. Il progetto di recupero ambientale autorizzato prevede la realizzazione di un lago artificiale alimentato dal torrente Bevera di Molteno con quota libera a 245 m s. l. m.

La morfologia dell'area è caratterizzata da una fossa di circa 115.000 mq di superficie e di circa 55 m di profondità nella configurazione finale del progetto autorizzato.

In questo scenario la soluzione consiste nell'utilizzo della fossa ottenuta alla fine della fase di coltivazione come bacino di accumulo delle acque di piene del torrente Bevera, mediante la creazione di un'opera di presa sul torrente e un sistema di canalizzazione delle acque verso il fondo della fossa e l'installazione di un sistema di pompaggio per lo svuotamento del bacino.

L'intervento permetterebbe sia di sfruttare al meglio la morfologia risultante dalla fase di scavo sia di proporre un'adeguata sistemazione finale del sito con caratteristiche tali da garantire la fruibilità futura dell'area. Inoltre, una pianificazione accurata dell'attività di coltivazione in corso e della realizzazione delle opere del progetto permetterebbe l'impiego sin da subito della Miniera di Brenno quale bacino di accumulo delle acque di piena del torrente Bevera.



Fig. 5.27 - Cava di Brenno

L'opera di presa consiste principalmente in uno sbarramento trasversale cui viene accoppiato uno sfioratore laterale dotato di paratoie mobili. Lo sbarramento studiato consisterà in una traversa dotata di gaveta con fondo pari al fondo dell'alveo per consentire un transito indisturbato delle portate di magra e di morbida senza alcun salto, e di sezione tale da consentire a monte un rigurgito che fornisca alla corrente a monte l'energia sufficiente per lo sfioro delle portate volute, ovvero quelle che superano la soglia di $22.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Inoltre, per impedire che lo sfioro avvenga per portate inferiori a quella di progetto, lo sfioratore laterale dovrebbe essere dotato di paratoie meccanizzate che ne consentano l'apertura comandata solo quando le portate in Bevera superassero la soglia prefissata.

Il volume totale massimo possibile dell'intervento, considerando la superficie e la profondità della fossa di scavo, è superiore ai $4.000.000 \text{ m}^3$, tuttavia, è evidente che in fase di realizzazione dovranno essere introdotti interventi di rimodellamento morfologico per garantire un adeguato recupero paesaggistico ed ambientale dell'area, le condizioni biologiche del lago e la fruibilità futura dell'area che porteranno necessariamente ad una riduzione di tale volume (oltre $1.000.000 \text{ m}^3$). In ogni caso, le dimensioni della miniera consentono la progettazione di un intervento con capacità superiore ai volumi necessari

stimati e quindi l'intervento può costituire una soluzione efficace al problema di esondazione del fiume nel territorio a valle. Inoltre, una pianificazione coordinata dalle attività permetterebbe la disponibilità in tempi brevi di un bacino per il contenimento delle piene del torrente Bevera. Dall'analisi dell'evento del 2002 si è dimostrato infatti come la disponibilità immediata, sia pure parziale, dell'invaso di cava, con volumetria da un minimo di 300.000 ad un massimo di 500.000 m³, determini un notevole beneficio in termini di riduzione dei colmi a valle e quindi un'opportunità di salvaguardia per il territorio.

A inizio 2005 la Cassa di Laminazione di Merone risultava nella seguente configurazione:

- realizzate completamente le opere di ritenuta e regolazione costituite da uno sbarramento in c.a. con luce di fondo libera e soglia di sfioro;
- realizzate completamente le arginature destra e sinistra a delimitazione dell'area di vaso racchiusa tra la strada di servizio del nastro trasportatore della Cementeria di Merone a nord, il torrente Bevera a est e a sud, il fiume Lambro a sud;
- realizzato il nuovo alveo del torrente Bevera a valle della Cassa d'espansione sino a confluenza Lambro con protezioni spondali in scogliera sulla sponda esterna;
- realizzate le opere di scarico di fondo della Cassa mediante due tubazioni asservite a clapet in acciaio con bilanciere.

A livello amministrativo tutte le aree su cui insistono le arginature, il nuovo alveo del torrente Bevera e il manufatto di sbarramento sono state espropriate ed indennizzate ai proprietari. Le aree interne alla Cassa sono viceversa in uso e disponibilità dei singoli proprietari.

Risultano in fase di completamento le opere accessorie alla Cassa (scogliere di protezione delle arginature lato fiume Lambro, ecc.); tali opere rivestono caratteristiche di urgenza al fine di proteggere l'infrastruttura.

La procedura di svaso potrà avvenire invece solamente grazie al posizionamento di un gruppo idrovoro all'interno del punto più profondo dell'area invasabile. Una volta disponibile l'intera area di cava la procedura di svaso avverrà per la prima parte per gravità e successivamente mediante sollevamento.

E' comunque necessario far presente che il termine per l'attività di estrazione è previsto per il 2013 mentre altri 3 anni sono concessi per la riqualificazione dell'area che pertanto dovrà avvenire entro la fine del 2016. Attualmente pertanto il contributo alla sicurezza idraulica della valle dato dal potenziale vaso è nullo e potrebbe al più crescere progressivamente ipotizzando soluzioni graduali e provvisorie compatibili con l'attività di coltivazione della miniera. Per ora però nessun risultato neppure provvisorio è associabile ad alcuna data.

Sulla base di queste informazioni è stato ricavato l'idrogramma da inserire nel modello ipotizzando la suddetta configurazione progettuale. Nell'ipotesi semplificativa di laminazione ottimale, si è attuato un "taglio" orizzontale all'idrogramma duecentennale proveniente dal bacino della Bevera di Molteno per una portata pari a $22,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Come si può vedere in figura 5.28 si è deciso invece di restituire il volume d'acqua invasato (attraverso sistemi di pompaggio che reimmettono nel corso d'acqua una portata pari a $2 \text{ m}^3/\text{s}$) quando la portata subito a monte della cava presenta valori inferiori ai $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

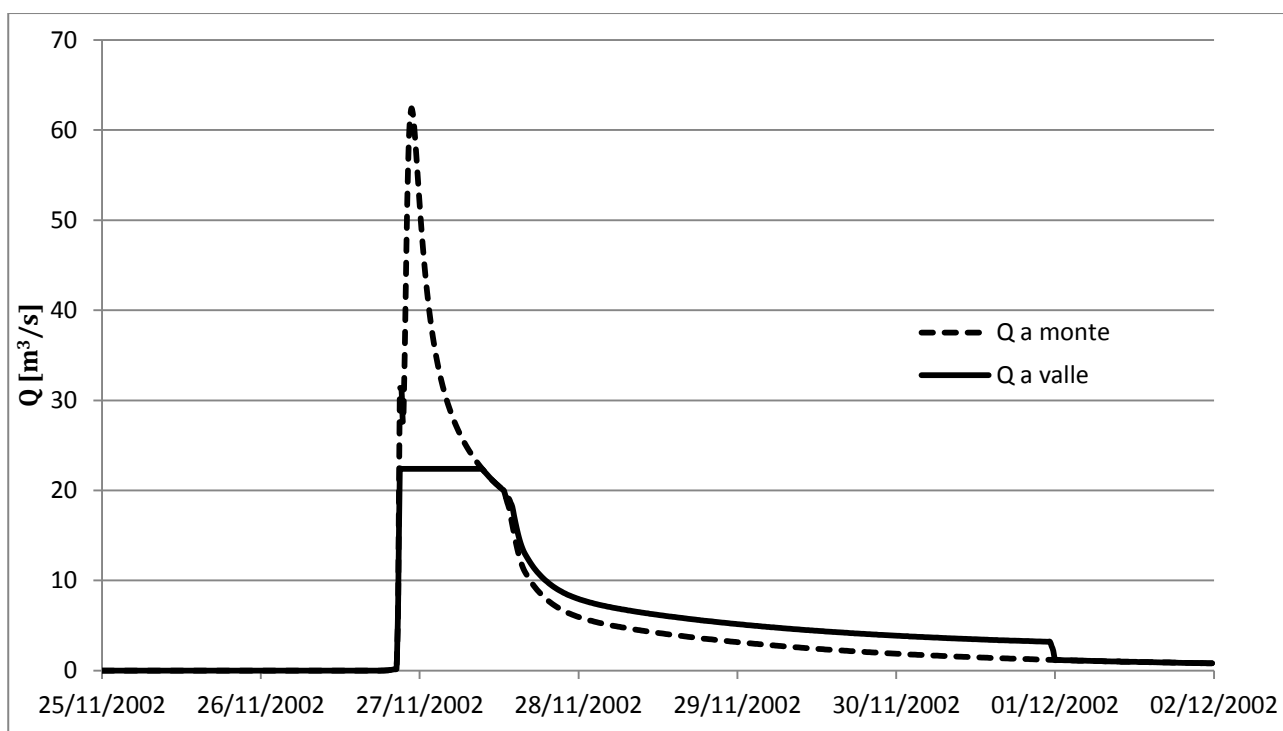


Fig. 5.28 - Laminazione dell'idrogramma BEV1 da parte della Cava di Brenno

5.4.3 Progetto di consolidamento dell' area di spandimento naturale di Inverigo

Si tratta dell'intervento più strategico per la sicurezza idraulica della valle del Lambro. Gli interventi di regimazione idraulica che verranno realizzati consentiranno la conservazione delle attuali aree di naturale spandimento del Lambro in occasione dell'evento di piena duecentennale a fronte di una drastica riduzione delle portate previste a seguito degli interventi da realizzarsi a monte, secondo la pianificazione dell'Autorità di Bacino.

Il volume complessivamente regolato sarà pari a circa 800.000 m^3 ed è rappresentato da tutte le aree sommerse tra il ponte della Como - Bergamo a monte, e quello di Fornacetta di Inverigo a valle (le aree sono indicate in verde più chiaro in figura 5.29).

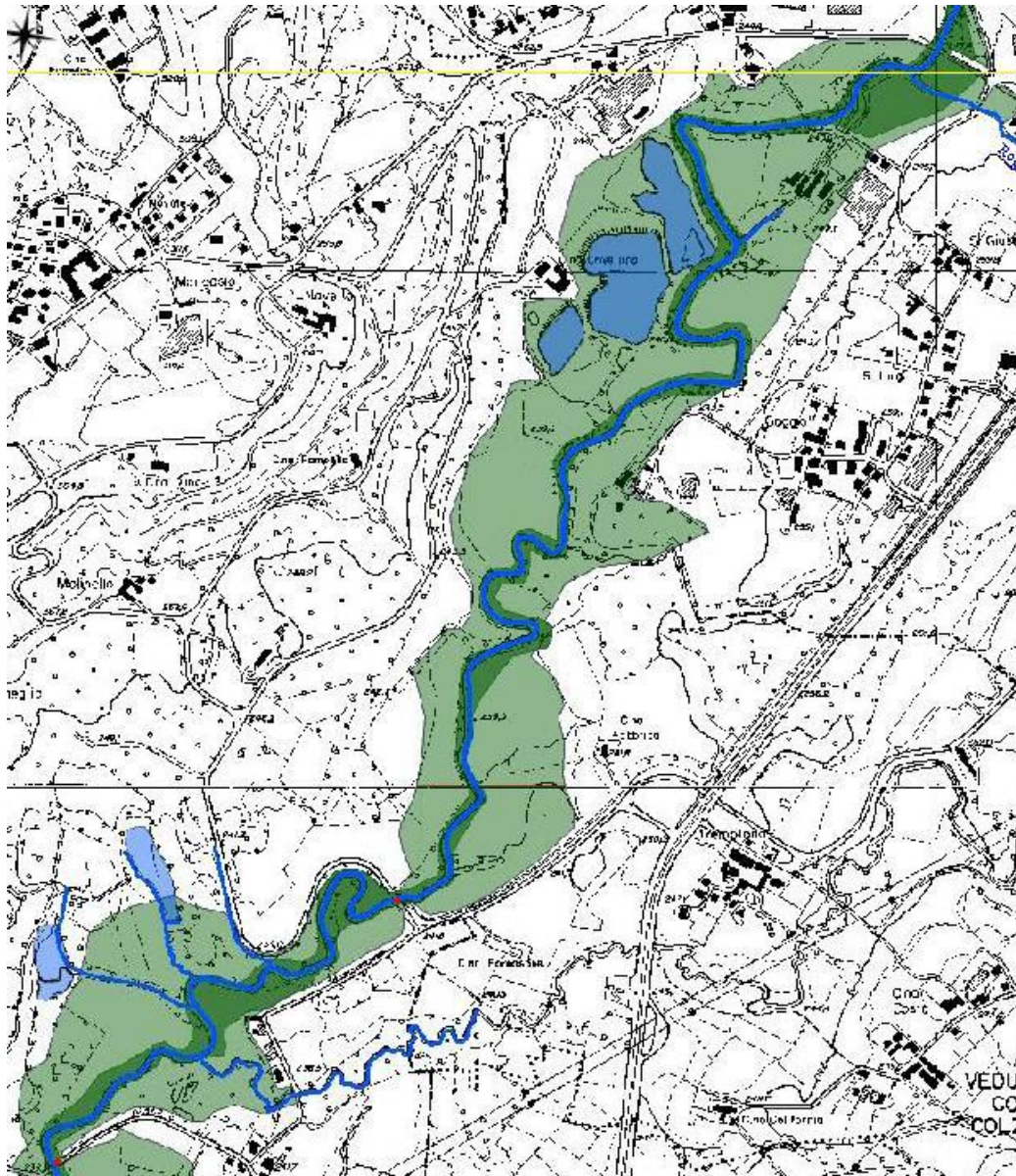


Fig. 5.29 – Aree di attuale esondazione del Lambro per T=200 anni

La regolazione dell'intera area avverrà ad opera di due sistemi di regolazione che saranno posizionati entrambi in corrispondenza o nelle immediate vicinanze dei due attraversamenti sul Lambro di Veduggio e a Fornacetta di Inverigo (figura 5.30); saranno inoltre previste, laddove necessarie, alcune linee di arginatura a protezione di aree edificate già oggi a rischio di allagamento.

I sistemi di controllo consentiranno, senza modifiche strutturali ma semplicemente gestionali, la regolazione di due condizioni di funzionamento molto diverse:

- quelle attualmente previste, che per la piena di riferimento (Tr200) indicano una portata al colmo in transito sotto il ponte della Victory di circa 120 m³/s e dal ponte di Fornacetta di circa 135 m³/s, mantenendo pressoché inalterati i livelli rispetto alla situazione ante operam;

- quelle previste dall'assetto di progetto secondo le indicazioni AdB, ossia transito delle portate di progetto Tr200 dal ponte della Victory (circa 70 m³ /s) e dal ponte di Fornacetta (circa 65 m³/s) mantenendo livelli idrici molto simili a quelli attuali a monte di entrambi a fronte di un notevole decremento della portata cui quei livelli fanno riferimento nello stato di fatto.

La soluzione tecnologica più interessante prevede la regolazione con due sistemi diversi funzionanti con due modalità differenti:

- nella parte a monte la regolazione sarà realizzata con un sistema di tipo "acceso-spento" basato su una ostruzione parziale della luce del ponte nella parte bassa della sezione realizzata con materiale naturale (massi o legname) e la possibilità di occludere ulteriormente la parte superiore con un sistema pneumatico basato su palloni gonfiabili pendenti dall'intradosso del ponte;
- nella parte a valle la regolazione sarà realizzata con uno sbarramento basato su moduli a scomparsa composto da paratoie scorrevoli verticalmente che potranno occludere in maniera progressiva la sezione.

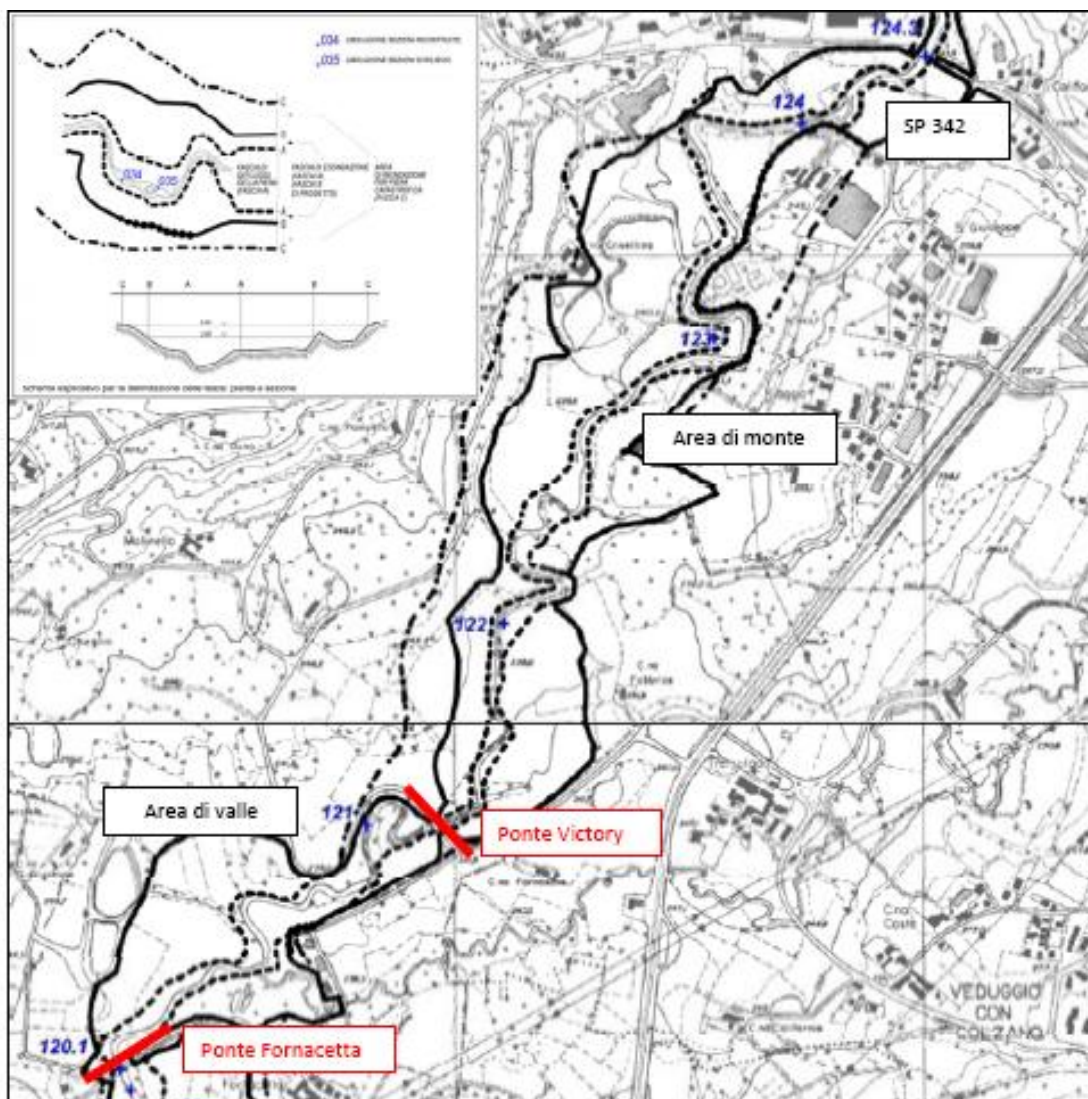


Fig. 5.30 - Estratto della cartografia PAI

La regolazione di monte verrà realizzata utilizzando il manufatto di attraversamento esistente, un ponte a campata unica dotato di un passaggio di servizio sulla sponda destra. Il manufatto allo stato attuale è in cemento armato con impalcato prefabbricato con, a monte e a valle, una quinta a volta sempre in cemento armato.

Il funzionamento del manufatto avverrà sulla base di due componenti diverse:

- una ostruzione permanente posta sul fondo dell'alveo e costituita da materiale naturale (rocce o legname). Questa parte è necessaria per ottenere un innalzamento locale dei livelli di piena e avvicinare il pelo dell'acqua all'intradosso del ponte che altrimenti ne rimarrebbe troppo lontano. L'ostruzione fissa comporterà un leggero innalzamento dei livelli di magra a monte con beneficio per la falda e per la fauna ittica, che potrà transitare senza problemi essendo previsti passaggi di fondo, pur senza aggravare le condizioni di deflusso della piena: essa è infatti concepita per far defluire la portata

duecentennale (120 m³/s) mantenendo pressoché inalterati i livelli di piena a monte del ponte;

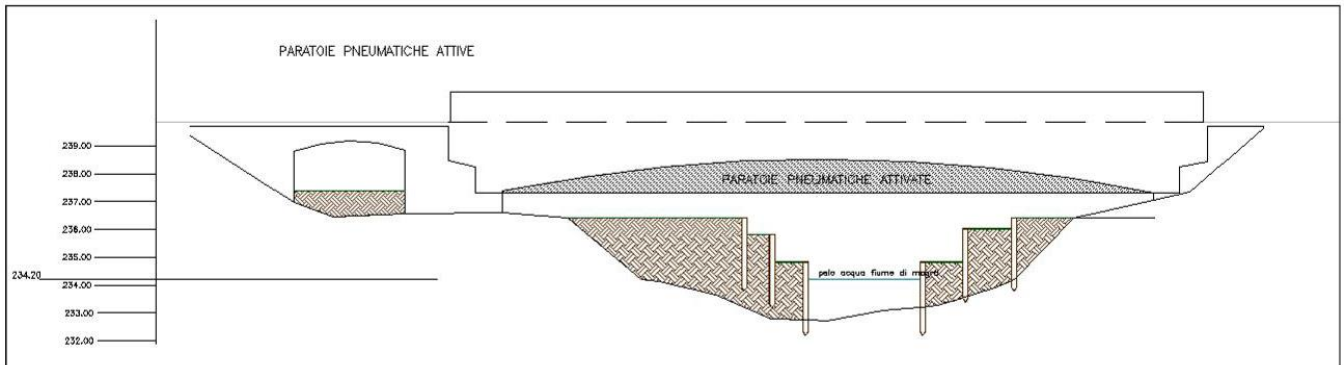


Fig. 5.31 - Sezione del ponte di monte (vista da valle)

- una ostruzione mobile affissa all'intradosso del ponte e costituita da un sistema pneumatico di palloni che gonfiandosi ostruiranno una ulteriore parte della sezione, mentre in condizioni di riposo rimarranno nascosti sotto il ponte. Questa parte è necessaria per ottenere l'innalzamento dei livelli di piena alle quote attuali per le portate previste dall'Autorità di Bacino nelle condizioni finali di assetto (circa la metà di quelle attuali) e mantenere così i volumi di laminazione che rischierebbero di essere perduti. L'ostruzione mobile quindi in condizioni ordinarie non opererà e verrà attivata solamente per raggiungere i livelli attuali di piena duecentennale qualora sia necessario accumulare volumi nell'area poco urbanizzata posta a monte. Le dimensioni dell'apertura regolata dall'ostruzione pneumatica sono state concepite per consentire il transito della portata duecentennale in corrispondenza di questa sezione (120 m³/s) con i livelli attualmente previsti e a palloni completamente sgonfi.

Il manufatto sarà anche pronto per accogliere l'assetto progettuale previsto dall'Autorità di Bacino; in particolare sarà possibile, grazie alla configurazione più ostruita possibile, far transitare le portate di progetto (70 m³/s in questa sezione) mantenendo i livelli previsti per lo stato di fatto e quindi conservando le aree di naturale espansione.

La regolazione di valle verrà invece realizzata costruendo un nuovo manufatto di attraversamento ciclopedonale a circa 20 m di distanza a valle del ponte di Fornacetta costituito da due campate. Il nuovo manufatto sarà dotato di paratoie, due per ogni campata, che scorrendo verticalmente potranno ostruire la sezione fino all'apertura desiderata dal gestore con una certa flessibilità di manovra. Ogni campata sarà dotata di una coppia di paratoie scorrevoli su due piani verticali differenti in modo da consentire configurazioni in cui le paratoie si presentino da completamente sovrapposte (minimo ingombro, quindi minima ostruzione) a completamente affiancate (massimo ingombro, quindi massima ostruzione) con

tutte le possibilità intermedie. Il ponte collegherà una pista ciclopedonale che nella parte terminale del bacino fungerà anche da sfioratore di sicurezza per l'intero invaso.

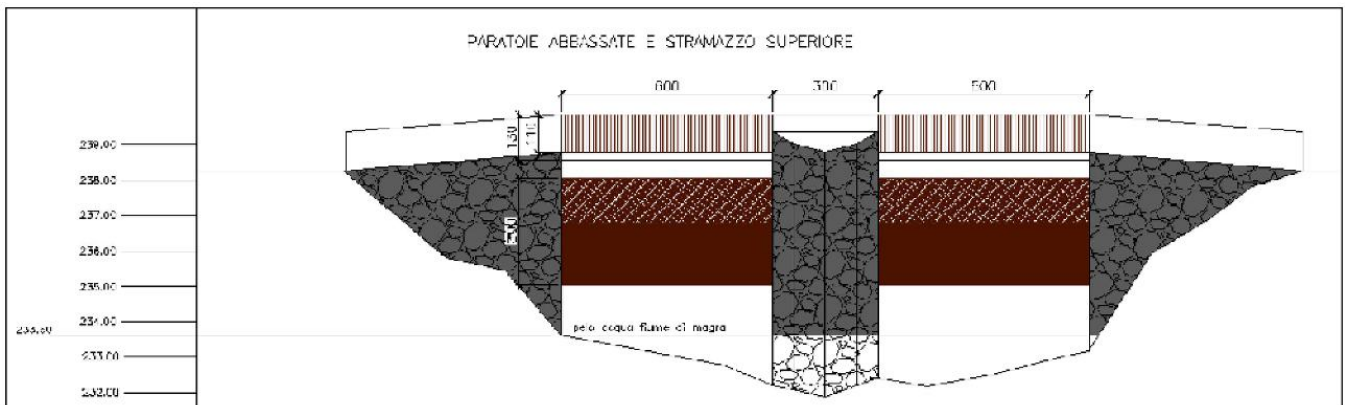


Fig. 5.32 - Sezione del ponte di valle (vista da monte)

Il sistema potrà funzionare sia a battente, nel caso che il livello dell'acqua non superi il ciglio superiore delle paratoie, sia a battente e a stramazzo, nel caso che il livello dell'acqua superi il ciglio superiore delle paratoie sormontandole. Non è previsto invece il funzionamento solamente a stramazzo dal momento che richiederebbe la completa chiusura dell'apertura sul fondo dell'alveo, configurazione considerata non esente da rischi, al punto che gli stessi binari sui quali scorreranno le paratoie saranno dimensionati per non consentire il battimento delle paratoie sul fondo.

Nonostante quest'ultima limitazione questa soluzione consentirà una notevole flessibilità di gestione; in particolare è stato verificato che:

- per quanto riguarda lo stato di fatto per la piena duecentennale (a questa sezione corrispondente ad un colmo di portata pari a $135 \text{ m}^3/\text{s}$), a paratoie completamente sollevate si può ottenere una condizione praticamente identica in termini di livelli a monte, ovvero è garantita l'invarianza idraulica allo stato attuale;
- il mantenimento dei livelli previsti allo stato di fatto per l'evento duecentennale, pur diminuendo le portate (a questa sezione sono previsti $65 \text{ m}^3/\text{s}$ come previsto dall'assetto definitivo dello studio AdB), sarà possibile ostruendo parzialmente la sezione idraulica del ponte ciclopedonale attraverso l'abbassamento delle paratoie.

Naturalmente la flessibilità del sistema consentirà una ulteriore gamma di regolazioni per ottenere risultati differenti a seconda delle differenti esigenze del bacino a valle. Sarà possibile invasare fino ai livelli di piena duecentennale anche portate inferiori a quelle previste dall'assetto di progetto ($65 \text{ m}^3/\text{s}$) ovvero si potrà decidere di non utilizzare l'invaso e conferire tutte le portate afferenti verso valle.

La scelta poi di realizzare il nuovo ponte regolato a valle di quello esistente di Fornacetta, nasce dall'esigenza puramente strutturale di preservare la stabilità del ponte storico esistente. Infatti si è dimostrato che, al passaggio di una portata uniforme pari a $65 \text{ m}^3/\text{s}$, il ponte di Fornacetta verrà sollecitato allo stato di progetto, da una velocità pari a circa la metà rispetto a quella che si verificherebbe allo stato attuale nelle stesse condizioni di portata.

Per quanto infine i sistemi di regolazione non andranno a influire negativamente sulla sicurezza idraulica delle aree di monte regolate, considerando che presentandosi le portate corrispondenti ad un tempo di ritorno duecentennale sarà possibile mantenere i corrispondenti livelli previsti dall'Autorità di Bacino, si ritiene utile completare il quadro progettuale apportando elementi lineari di difesa di alcune aree abitate per diminuirne il già esistente rischio idraulico per gli eventi di piena superiore ai 200 anni. Verranno pertanto previste alcune linee di difesa per una lunghezza oggi sommariamente stimabile in 1500 metri che interesseranno l'abitato di Gaggio in comune di Nibionno ed il nucleo abitato di Fornacetta in comune di Veduggio con Colzano. Per la definitiva soluzione si rimanda ad ulteriori approfondimenti idraulici volti ad appurare l'effettivo e puntuale stato di rischio di ciascun'area.

5.4.3.1 Schematizzazione opere di progetto

Le opere di regolazione progettate sono state schematizzate nel modello idraulico di Hec-Ras, rispettivamente come una traversa avente due bocche a battente divise da una pila centrale, per il ponte pedonale a valle di quello di Fornacetta e con una seconda traversa dotata di una serie di aperture di fondo, che vanno a simulare la conformazione di progetto, che prevede un restringimento della sezione di passaggio utile sotto il ponte della Victory.

Di seguito si riporta il dettaglio della schematizzazione delle due opere di progetto.

Ponte ciclopedonale di Fornacetta

La sezione di riferimento del ponte pedonale è stata posizionata circa 20 m a valle del ponte di Fornacetta; tale soluzione presenta un doppio vantaggio: da una parte, di poter sfruttare l'infrastruttura esistente come opera di contenimento, che funga da filtro per il materiale in sospensione trasportato dalla corrente durante l'evento di piena; dall'altra, di non sovrasollecitare il ponte storico di Fornacetta con correnti di natura veloce, generate a valle di un eventuale restringimento della sezione utile del corso d'acqua. Tale soluzione progettuale in più risulta essere un buon compromesso in termini di non alterazione della dinamica fluviale, dal momento che la traversa va a posizionarsi a valle dell'attuale ponte, non alterando la capacità di invaso del sistema a monte, nell'ipotesi in cui non ci fosse alcun tipo di regolazione sull'organo in progetto. In altri termini l'opera, se non utilizzata non determina

modificazioni rilevanti sui livelli e l'onda di piena transiterà indisturbata, con la stessa entità rilevabile allo stato attuale.

Il ponte, come già anticipato, è stato schematizzato come una traversa avente quota d'estradosso pari alla quota del piano viabile di progetto (238.70 m s.l.m.), dotata di due luci a battente larghe 6 m, divise simmetricamente da una pila centrale larga 3 m. Ciascuna luce a sua volta è stata pensata come l'accoppiamento di due paratoie sovrapposte, in grado di avere un funzionamento indipendente l'una dall'altra, in modo da simulare al meglio la condizione progettuale di due organi in grado di traslare lungo l'asse verticale. Ciascuna luce è quindi stata implementata nel modello di HecRas come un doppio gates: il primo alto 4.2 m avete quota di fondo pari a 233,30 m s.l.m. e posizionato nella parte inferiore della sezione; il secondo alto 1 m con quota di fondo pari a 237,50 m s.l.m. e posizionato nella parte superiore della sezione (Figura 5.33).

Nella modellazione è stato sufficiente impostare una legge per descrivere il funzionamento dei gates che prevedesse la simultaneità di comportamento rispettivamente tra le due coppie inferiori e le due superiori. Tale configurazione ha così permesso di sviluppare una molteplicità di casistiche, simulando al meglio le numerose posizioni raggiungibili dalla regolazione delle paratoie di progetto.

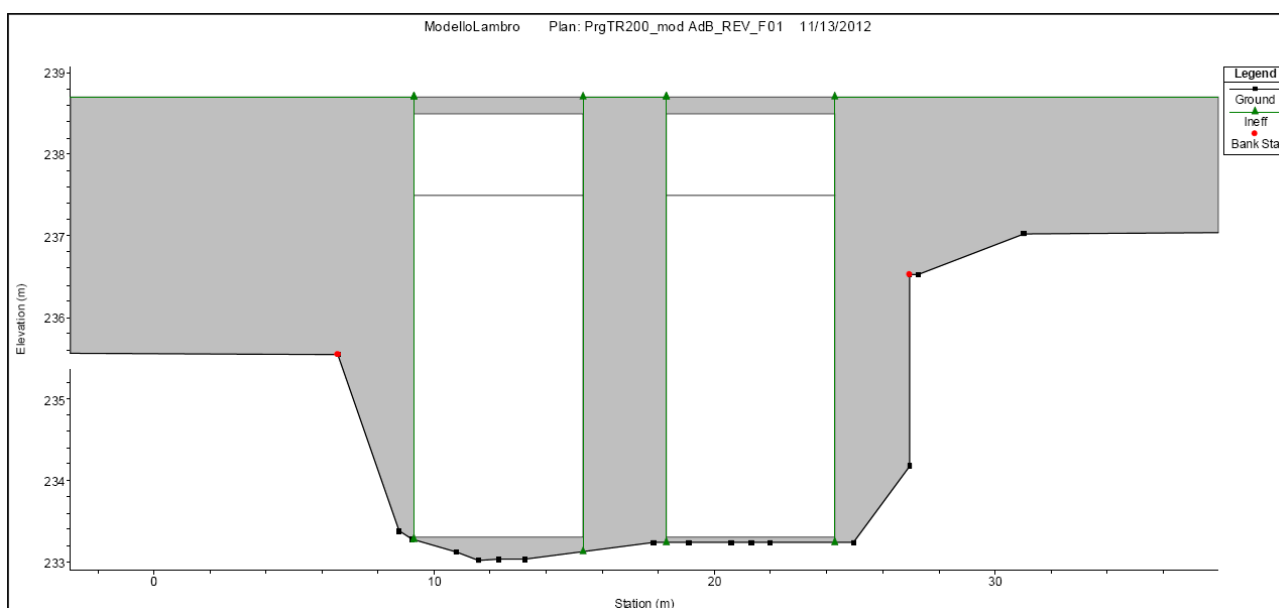


Fig. 5.33 - Sezione geometrica del ponte pedonale di progetto vista da monte (modello Hec-Ras)

Di seguito si riporta un esempio di possibile funzionamento del ponte pedonale, nel quale è stata impostata una chiusura parziale dei gates inferiori, mantenendo completamente aperti i gates superiori.

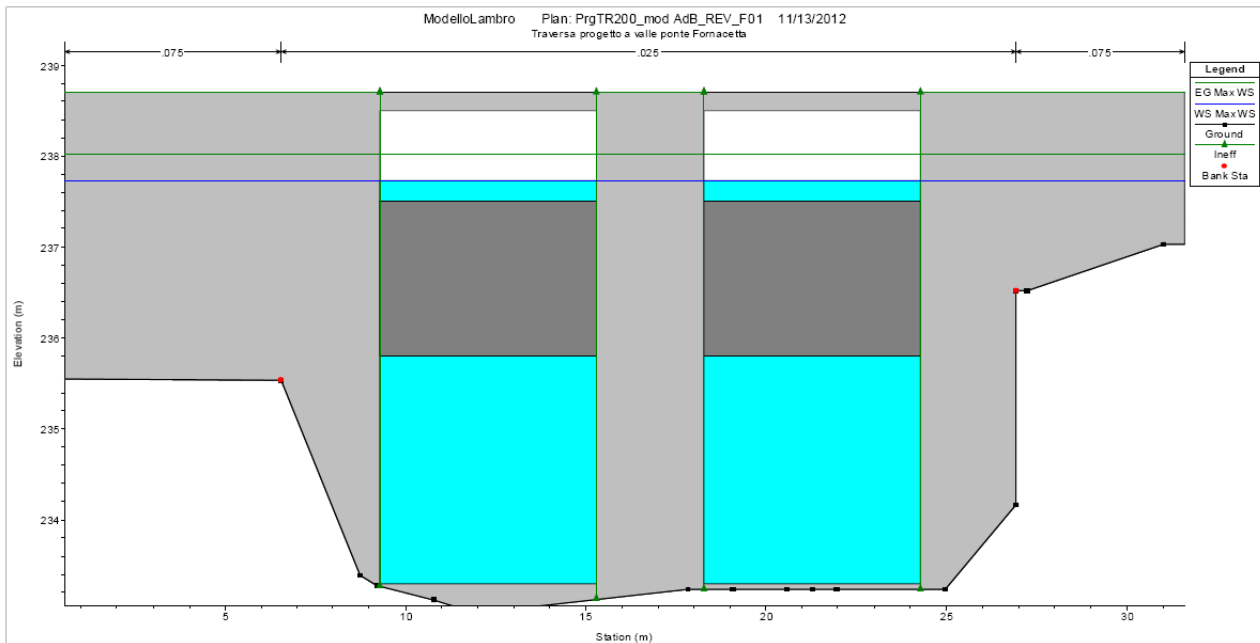


Fig. 5.34 - Esempio di funzionamento del ponte pedonale di progetto (modello Hec-Ras)

Ponte Victory

Come detto precedentemente, il ponte Victory è stato interessato dall'azione combinata di un intervento mirato al restringimento della sezione utile di passaggio sotto il ponte e dal posizionamento di un organo di regolazione costituito da una camera d'aria incernierata sulla sommità dell'intradosso del ponte attuale. Il restringimento previsto con la riprofilatura dell'alveo in corrispondenza del ponte mediante il posizionamento di una doppia palificata in legno, è stato schematizzato con la realizzazione di una serie di aperture lungo il corpo centrale della traversa-ponte Victory. Tali aperture sono state implementate dal modello idraulico come una serie di gates sovrapposti lungo la verticale, aventi dimensioni decrescenti dal fondo dell'alveo all'estradosso del ponte.

Diversamente da quanto visto per il ponte pedonale, in questo caso le leggi di funzionamento dei gates sono state mantenute sempre invariate, ovvero si è ipotizzato di mantenere sempre aperti i gates, simulando così lo stato di progetto di una nuova riprofilatura trasversale della sezione.

La camera d'aria posizionata sull'intradosso del ponte, è stata invece schematizzata come un gate di dimensioni esattamente uguali a quelle della lunghezza attuale tra le due spalle del ponte e con un'altezza di 1 m. In questo caso la regola di funzionamento per tale organo è stata impostata in modo da simulare la completa attivazione della camera d'aria al passaggio dell'evento duecentennale.

Oltre a quanto già descritto, è stato poi inserito un ulteriore gate che ha semplicemente la funzione di rappresentare l'apertura esistente in sponda destra idraulica. A tale apertura è

stata implementata una legge di funzionamento che consiste nel mantenere parzialmente chiusa la luce, trascurandone così il contributo della stessa in termini di volumi defluiti a valle della medesima.

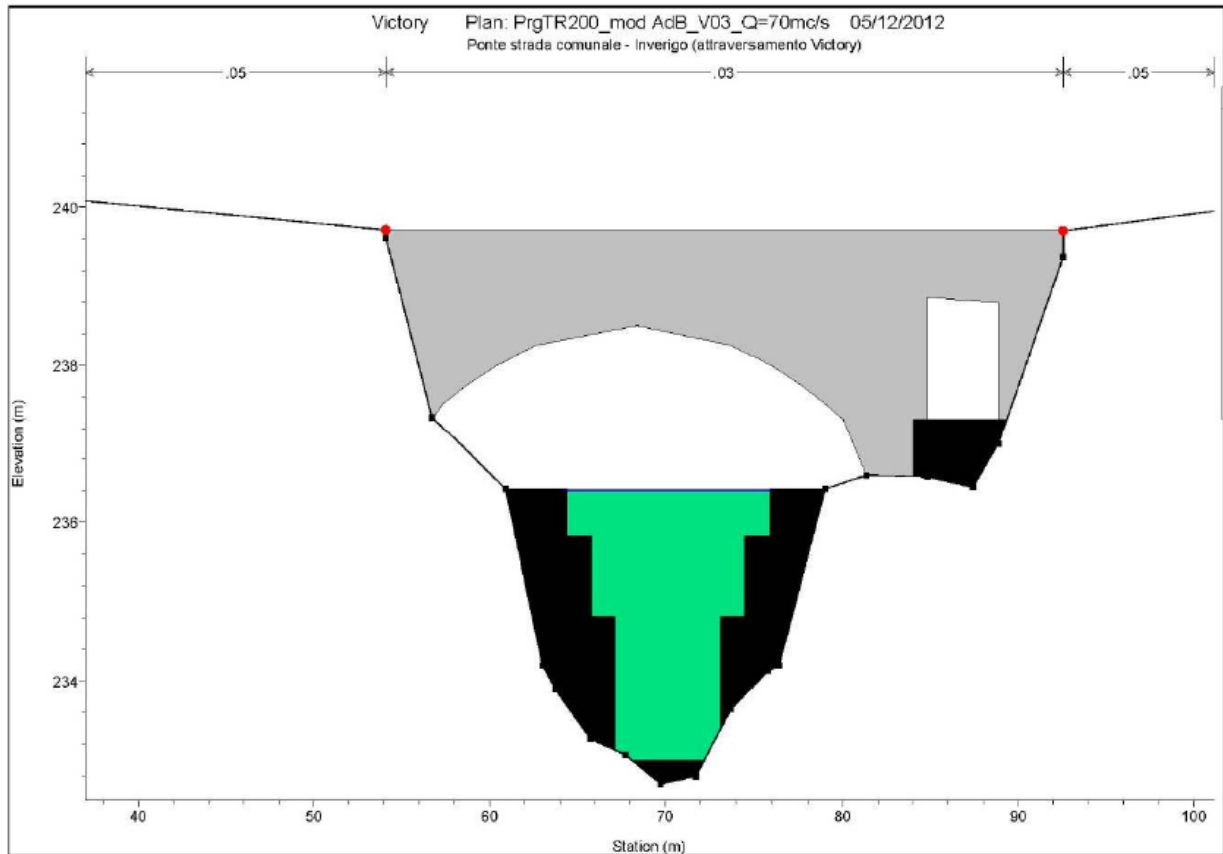


Fig. 5.35 - Esempio di funzionamento del ponte Victory (modello Hec-Ras)

5.5 Simulazioni effettuate

Si riportano, nel seguito di questo capitolo, i risultati delle simulazioni effettuate in relazione alle diverse possibili configurazioni di progetto precedentemente esposte.

La geometria assunta alla base della modellazione è stata però modificata in corrispondenza della zona di espansione di Inverigo: a supporto delle informazioni morfologiche ricavate dalle sezioni dello studio dell'Autorità di Bacino, le stesse sezioni sono state verificate grazie alla realizzazione di un rilievo di dettaglio dell'area oggetto d'interesse. A tal proposito la verifica ha portato a buoni risultati che non hanno richiesto l'adeguamento dei nodi delle sezioni, fatta eccezione per l'area in corrispondenza del ponte di via Magni ad Inverigo (di seguito chiamato per semplicità Ponte Victory), in cui è emersa una non conformità tra la sezione ricavata dallo studio AdB e quella ottenuta dal rilievo.

Questa discrepanza è stata giustificata con l'effettiva datazione delle informazioni a disposizione dello studio di AdB; informazioni che in generale si possono considerare attendibili lungo l'asta fluviale, la dove non si è in presenza di discontinuità quali ponti soglie e traverse, ma che potrebbero essere alterate per effetto della dinamicità dell'assetto morfologico in prossimità delle stesse discontinuità. Per risolvere queste discrepanze si è proceduto modificando la sezione in corrispondenza del Ponte Victory, per ciò che compete la morfologia del terreno, secondo quanto ottenuto dal rilievo.

La condizione al contorno di monte è, in tutti i casi, costituita dall'idrogramma somma dei contributi degli emissari naturali dei due laghi; esso naturalmente si modifica in relazione alle manovre di apertura o chiusura delle paratoie del cavo Diotti poiché dipendente dal livello idrico presente nel lago di Pusiano e dalla velocità con cui questo diminuisce (come visto nel paragrafo 5.4.1.2). Di conseguenza anche la condizione al contorno data dall'idrogramma uscente dal Cavo Diotti cambia in relazione alle relative manovre delle sue paratoie. L'ipotesi alla base delle simulazioni svolte consiste nel considerare il lago completamente "pieno" (livello duecentennale) all'inizio dell'evento meteorico ad esempio a causa di un precedente evento meteorico.

Le condizioni al contorno lungo l'asta fluviale, costituite dagli idrogrammi derivanti dai bacini afferenti, in linea o fuori linea, sono quelle presentate nel capitolo 4.

Come condizione al contorno di valle è stata invece imposta la pendenza della linea dell'energia approssimata alla pendenza del fondo alveo; questa condizione però, nel caso di moto vario, risulta generalmente invalidare l'attendibilità dei risultati in prossimità della stessa. Non sarà perciò in riferimento all'ultima sezione che verranno fatte considerazioni sui risultati ottenuti in termini di livelli, ma verranno piuttosto considerate le altezze d'acqua risultanti a sezioni poste poche centinaia di metri più a monte.

Tutti i grafici rappresentanti i profili altimetrici del Lambro risultanti dalle simulazioni relative alle varie configurazioni sono riportati in fondo al capitolo.

Non Regolazione

Il primo caso si riferisce all'ipotesi base di mancata regolazione non solo per quanto riguarda l'invaso di Pusiano da parte delle paratoie del Cavo Diotti, che quindi si presentano completamente aperte per tutta la durata dell'evento, ma non considera nemmeno i contributi dati dalla laminazione della Cava di Brenno e dalla laminazione della zona Victory. Esso costituisce quindi il caso più sfavorevole tra quelli analizzati.

5.5.1 Simulazione con regolazione del Lago di Pusiano

Regolazione Lago

Il secondo caso è invece riferito all'ipotesi di regolazione delle paratoie del Cavo: queste si presentano completamente chiuse all'inizio dell'evento meteorico per poi venire gradualmente aperte successivamente al passaggio dei colmi di portata dei bacini di valle (apertura completa delle paratoie tra le ore 02:00 e le ore 03:00 del giorno 26/11/2002).

Il contributo dato dalle manovre di regolazione del Cavo influenza il comportamento idraulico del fiume lungo tutto il tratto di interesse. I maggiori dislivelli di altezza idraulica si verificano, ad ogni modo, nel tratto di monte del Lambro, tra la confluenza con il Cavo e la confluenza con la Bevera di Molteno: qui l'abbassamento medio risulta di circa 0,3 m rispetto alla condizione di "Non Regolazione". Procedendo verso valle le differenze di livello si mantengono intorno ai 0,3 - 0,25 m fino alla zona Victory, oltre la quale, i contributi di portata dei bacini afferenti ne riducono il valore, dimezzandolo.

Per quanto riguarda le portate, l'abbattimento del colmo rispetto al caso di "Non Regolazione" risulta di circa il 19% a valle della confluenza con la Bevera di Molteno, per poi ridursi a 8% nel Parco di Monza.

In figura 5.36 vengono riportate gli idrogrammi transitanti a valle della confluenza con il Cavo Diotti relativi ai casi di "Non Regolazione" (azzurro) e "Regolazione" (verde). Più avanti sono riportati gli idrogrammi transitanti nelle sezioni più a valle e relativi alle diverse simulazioni svolte.

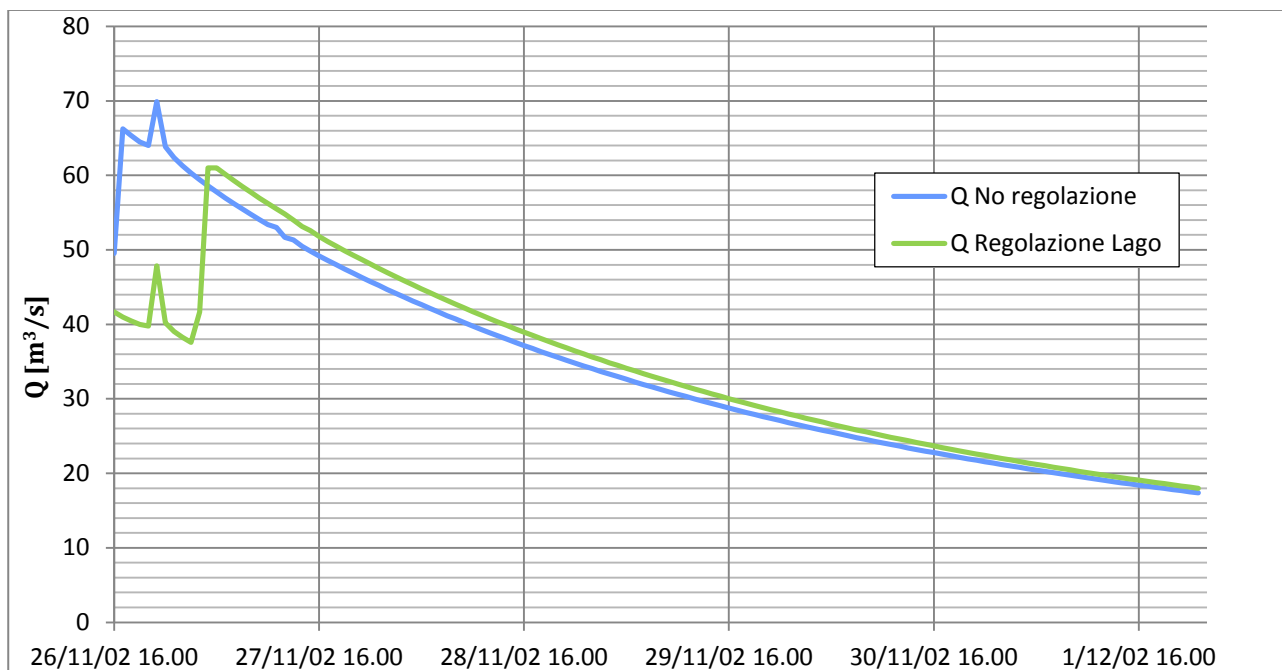


Fig. 5.36- Sezione a valle della confluenza con il Cavo Diotti (casi di No Regolazione, Regolazione Lago)

5.5.2 Simulazioni con laminazione della Cava di Brenno

Con l'introduzione del contributo dovuto alla laminazione da parte della Cava di Brenno, l'idrogramma in arrivo nel Lambro relativo al bacino imbrifero della Bevera di Molteno vede un notevole abbassamento della portata al colmo.

Laminazione Cava di Brenno

Il beneficio dovuto al solo intervento di laminazione sulla Bevera risulta paragonabile a quello dovuto alle manovre di regolazione del Cavo (come si può vedere in figura 5.37); tuttavia sebbene i valori massimi di portata siano gli stessi (circa 110 m³/s), il picco dell'idrogramma conseguente l'intervento di laminazione sulla Bevera risulta anticipato rispetto al caso di sola regolazione del Cavo; questo, sebbene nel tratto di monte non costituisca un problema, procedendo verso valle contribuisce ad un innalzamento più marcato del picco, rispetto al caso di sola "Regolazione Lago", data la contemporaneità di questo con i colmi degli idrogrammi provenienti dai bacini afferenti di valle. A valle della zona Victory infatti i dislivelli presenti risultano in media inferiori a 0,1 m.

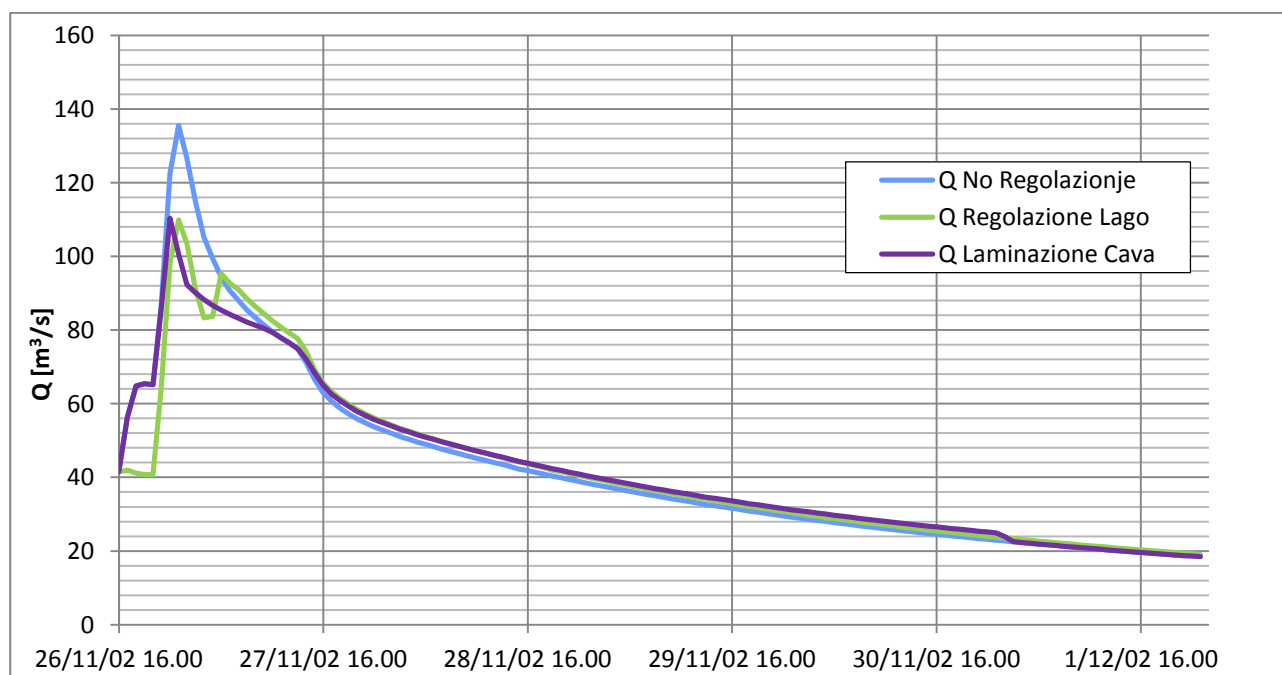


Fig. 5.37 - Sezione a valle della confluenza con la Bevera di Molteno (casi di No Regolazione, Regolazione Lago, Laminazione Cava)

Regolazione Lago + Laminazione Cava di Brenno

Nel caso in cui, all'intervento di laminazione sulla Bevera di Molteno, si aggiungessero manovre di regolazione del Cavo Diotti tali da produrre, come già detto, uno sfasamento dei colmi di portata, il beneficio sarebbe ovviamente maggiore. Dalla simulazione svolta, alla sezione di valle della confluenza con la Bevera, risulta, rispetto al caso di Non Regolazione,

una riduzione della portata pari a circa il 36% (come mostrato in figura 5.38), ed una riduzione di circa il 12% nei pressi del Parco di Monza. Nel tratto di monte dell'asta fluviale, le massime altezze d'acqua subiscono una riduzione media di circa 0,4 m, mentre a valle della zona Victory si attestano intorno a valori di circa 0,2 m.

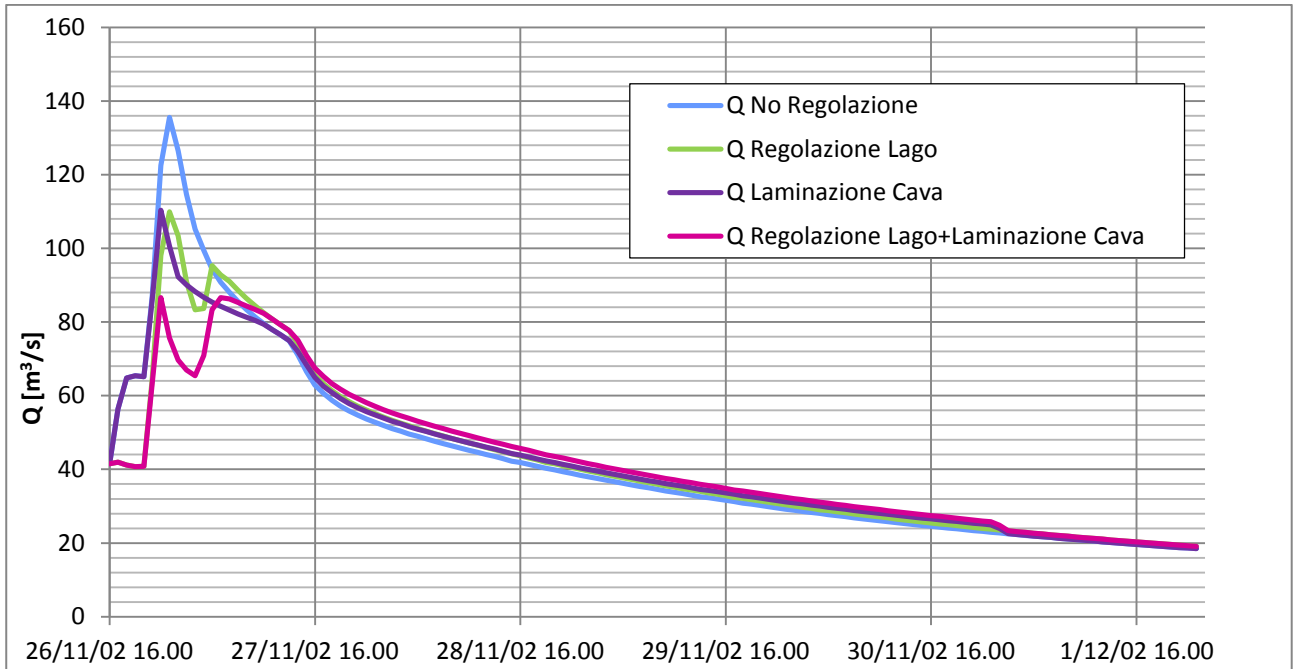


Fig. 5.38 - Sezione a valle della confluenza con la Bevera di Molteno (casi di No Regolazione, Regolazione Lago, Laminazione Cava, Regolazione Lago+Laminazione Cava)

Per meglio valutare i risultati esposti nel paragrafo seguente, si riportano in figura 5.39 le onde di piena transitanti subito a valle della zona di espansione di Inverigo.

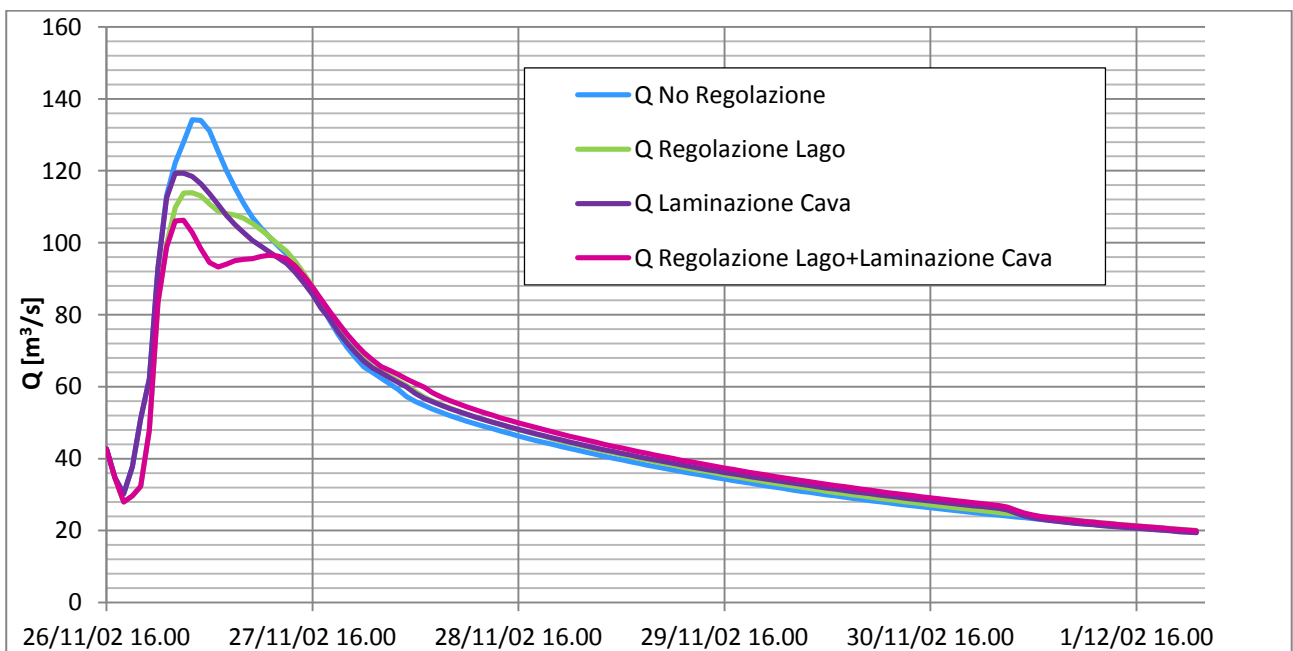


Fig. 5.39 - Sezione a valle della zona di espansione di Inverigo (casi di No Regolazione, Regolazione Lago, Laminazione Cava, Regolazione Lago+Laminazione Cava)

5.5.3 Simulazioni con laminazione della zona Victory

Laminazione zona Victory

Nel caso in cui la regolazione del Cavo non venga effettuata per un eventuale malfunzionamento delle paratoie e l'intervento di laminazione sulla Bevera di Molteno non venga realizzato, o non sia ancora completato al momento della messa in opera della regolazione nella zona Victory (per tenere quindi in considerazione situazioni intermedie che si possono verificare in un prossimo futuro), sono state condotte simulazioni considerando solamente la configurazione di progetto data dalla realizzazione delle opere di regolazione nella zona Victory-Inverigo.

Sono state effettuate diverse simulazioni allo scopo di determinare la manovra più corretta per limitare il più possibile le portate di valle; le tre simulazioni si differenziano quindi in base ai tempi di chiusura e apertura delle paratoie del ponte ciclopedonale a valle del ponte di via Fornacetta. In tabella 5.5 sono riportati gli orari di chiusura e apertura delle paratoie nei tre casi analizzati; in tutte le simulazioni effettuate, per semplicità, il ponte Victory si presenta completamente chiuso: l'ostruzione pneumatica risulta, per tutta la durata dell'evento, completamente abbassata.

Laminazione zona Victory		
caso 1	chiusura graduale	7 ^a ora
	apertura graduale	28 ^a ora
caso 2	chiusura	5 ^a ora
	apertura graduale	40 ^a ora
caso 3	chiusura graduale	6 ^a ora
	apertura graduale	36 ^a ora

Tab. 5.6 - Manovre di regolazione paratoie ponte ciclopedonale (Caso di sola Laminazione zona Victory)

In figura 5.40 sono riportati gli idrogrammi transitanti subito a valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory relativi ai 3 casi analizzati.

Si vuole far notare che, in questo caso, così come nei seguenti, con la dicitura "graduale" nei riguardi delle manovre di chiusura e apertura delle paratoie si vuole indicare una successione di configurazioni intermedie delle paratoie a partire da quella di "riposo" (Fig. 6.5) per arrivare a quella di "regolazione massima" (Fig. 6.4) nei casi di chiusura, o, viceversa, nei casi di apertura, all'interno di un arco temporale di 2 ore. Ad ogni modo è stato osservato che la durata della manovra (graduale o istantanea) ha un'influenza trascurabile; ad influire maggiormente è l'istante (riportato in tabella 5.5) in cui il deflusso a pelo libero viene ostacolato dalle paratoie del ponte ed assume un comportamento a battente.

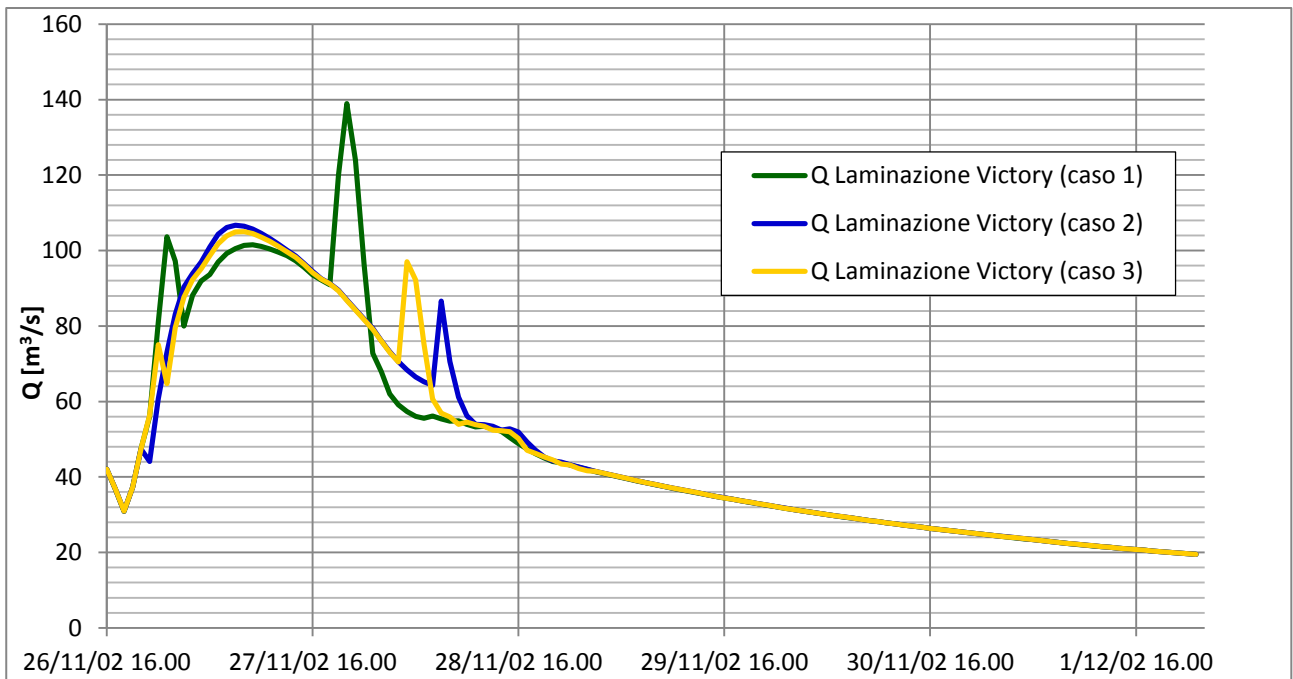


Fig. 5.40 - Sezione di valle del ponte ciclopodonale di progetto della zona Victory (caso di sola Laminazione zona Victory)

Come si può vedere, è la manovra corrisponde al caso 3 a determinare la portata al colmo minore. In figura 5.41 è riportata l'onda di piena inalterata corrispondente al caso di Non Regolazione a confronto con l'onda laminata corrispondente al caso 3.

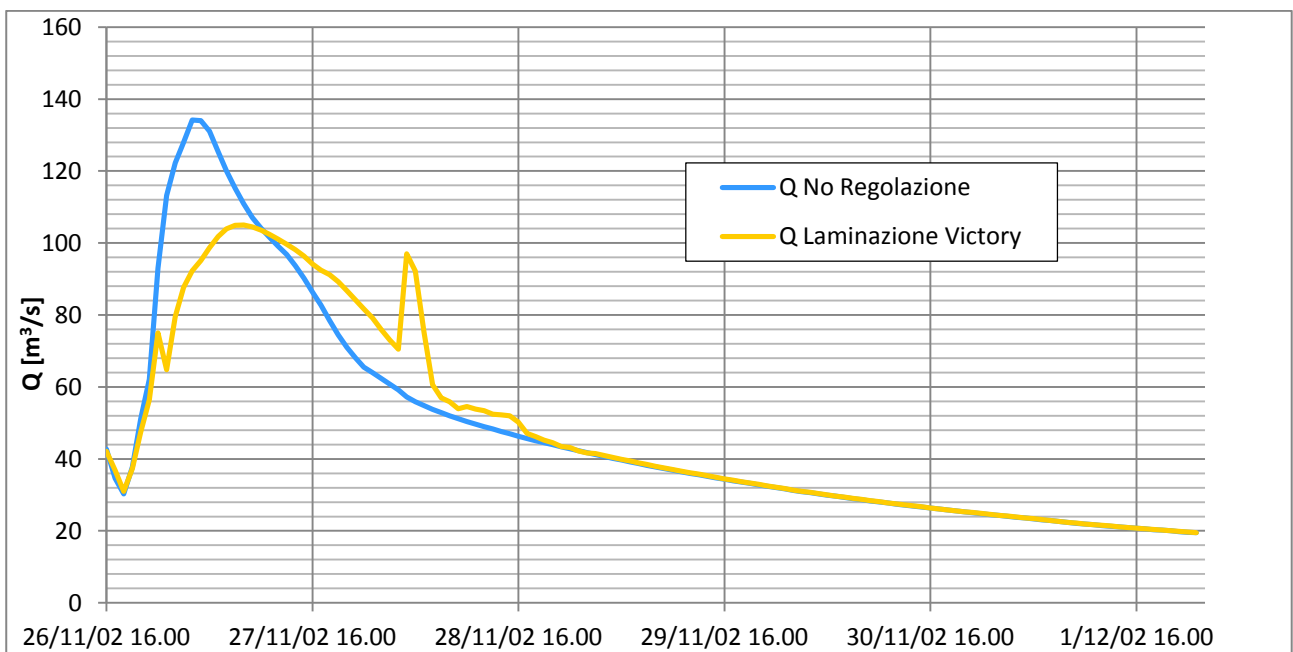


Fig. 5.41 - Laminazione Victory nel caso di "Non Regolazione" (Sezione di valle del ponte ciclopodonale)

La manovra relativa al caso 3 determina non solo minori portate subito a valle della zona Victory, ma anche nella sezione terminale presso il Parco di Monza, come mostrato in figura 5.42.

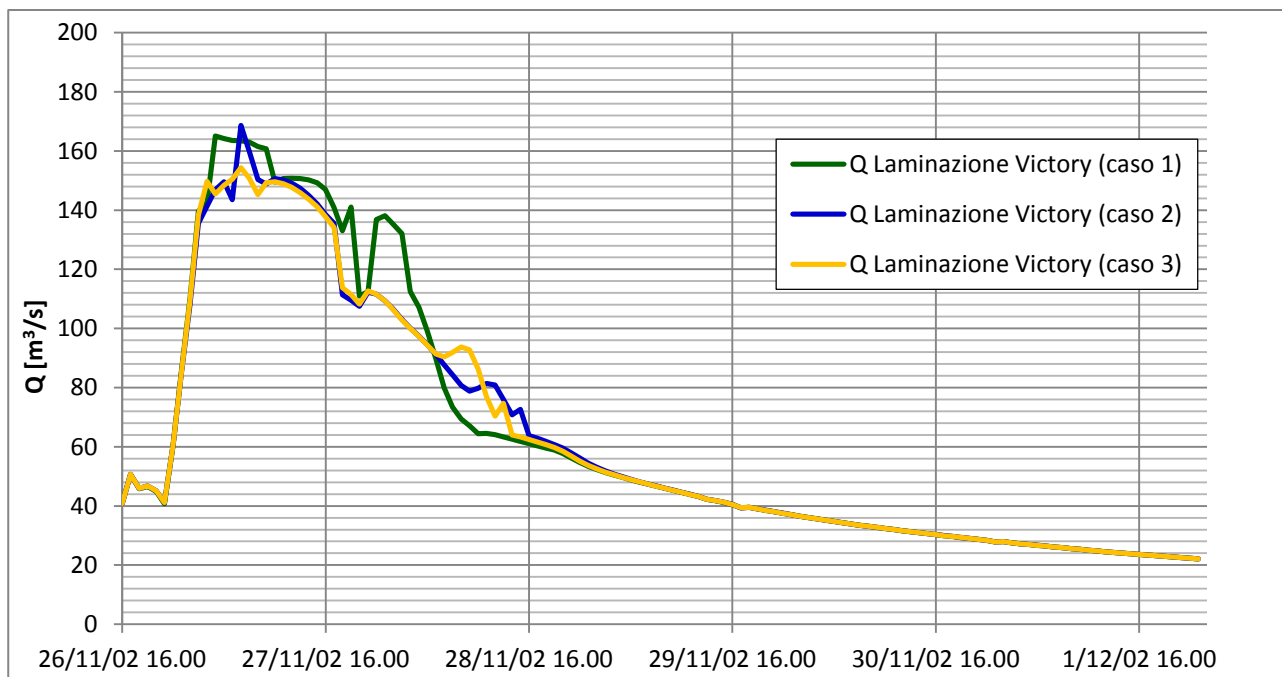


Fig. 5.42 – Sezione di valle del modello Hec-Ras, Parco di Monza (Caso di sola Laminazione zona Victory)

Tale manovra comporta quindi nelle sezioni di valle dell'opera, un abbassamento del colmo di portata superiore al 20% (22% nella sezione subito a valle del ponte ciclopedonale, 21% nella sezione di valle del modello) rispetto alla configurazione data dalla mancata regolazione del Cavo.

E' perciò la zona di espansione di Inverigo, che costituisce l'invaso di laminazione più a valle tra quelli indagati, a comportare i maggiori benefici nei tratti vallivi dell'asta fluviale. Le altezze d'acqua subiscono, a valle dell'opera, un dislivello medio di circa 0,35 m. Naturalmente però, a monte di tali opere, il profilo d'acqua subisce un inevitabile innalzamento di livello, massimo a ridosso delle opere di regolazione: in corrispondenza del ponte ciclopedonale, al passaggio del picco di piena, il profilo assume un comportamento a battente, non solo attraverso la luce inferiore, ma anche attraverso quella superiore; mentre il ponte di via Fornacetta viene, in questo caso, sormontato.

Regolazione Lago + Laminazione zona Victory

Per dettagliare il quadro di indagine sono state effettuate altrettante simulazioni relative al caso in cui, all'intervento di laminazione della zona Victory, venga aggiunta la regolazione del lago di Pusiano.

Come nel caso precedente, le tre simulazioni si differenziano in base alle scelte di manovra delle paratoie del ponte ciclopedonale (riportate in tabella 5.6), mentre l'ostruzione pneumatica risulta completamente abbassata.

Regolazione Lago + Laminazione zona Victory		
caso 1	chiusura	7 ^a ora
	apertura	26 ^a ora
caso 2	chiusura	4 ^a ora
	apertura graduale	30 ^a ora
caso 3	chiusura graduale	6 ^a ora
	apertura graduale	40 ^a ora

Tab. 5.7 – Manovre di regolazione paratoie ponte ciclopedonale (Caso di Regolazione Lago + Laminazione zona Victory)

In figura 5.43 sono riportati gli idrogrammi transitanti subito a valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory relativi ai 3 casi analizzati.

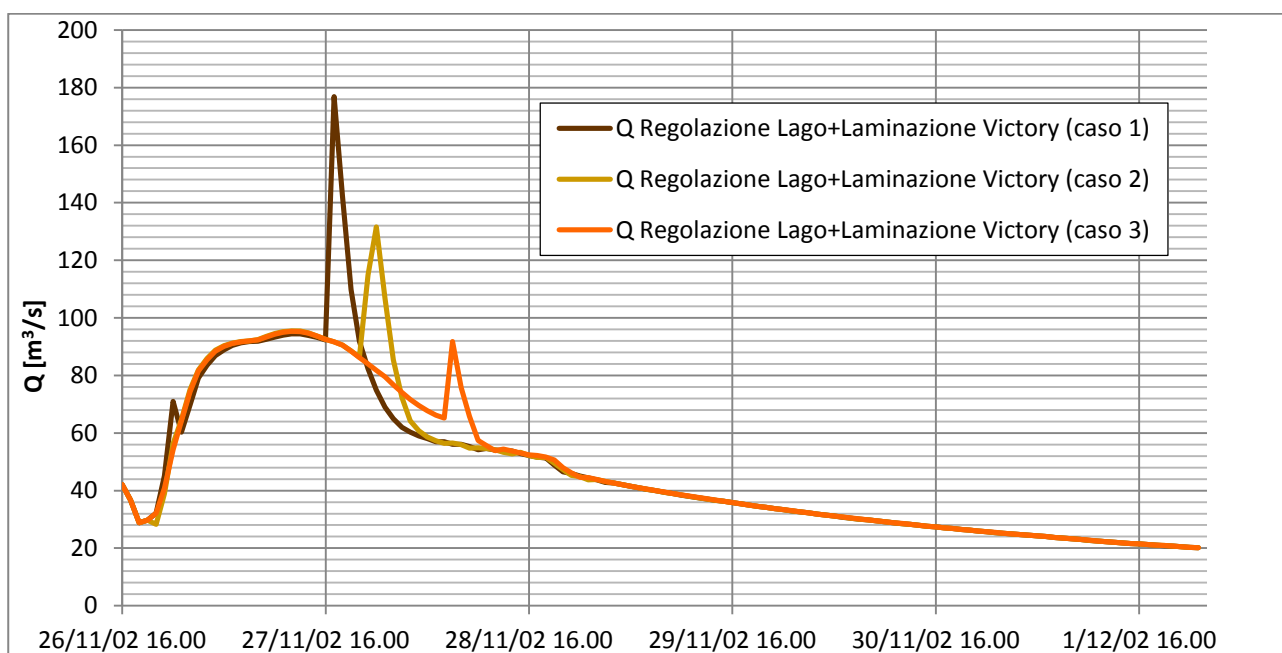


Fig. 5.43 – Sezione di valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory (Caso di Regolazione Lago + Laminazione zona Victory)

Come si vede dal grafico, la manovra che comporta il minimo valore di portata al colmo è quella relativa al caso 3: l’abbattimento di portata, rispetto ai valori raggiunti nel caso di “Non Regolazione” raggiunge ora circa il 29% nella sezione di valle del ponte ciclopedonale, e circa il 24% nel Parco di Monza. Il dislivello, a valle della zona di espansione, risulta in media di 0,45 m rispetto alla configurazione di mancata regolazione.

In figura 5.44 è riportato il grafico relativo alla laminazione da parte della zona Victory dell’onda relativa al caso di “Regolazione Lago”.

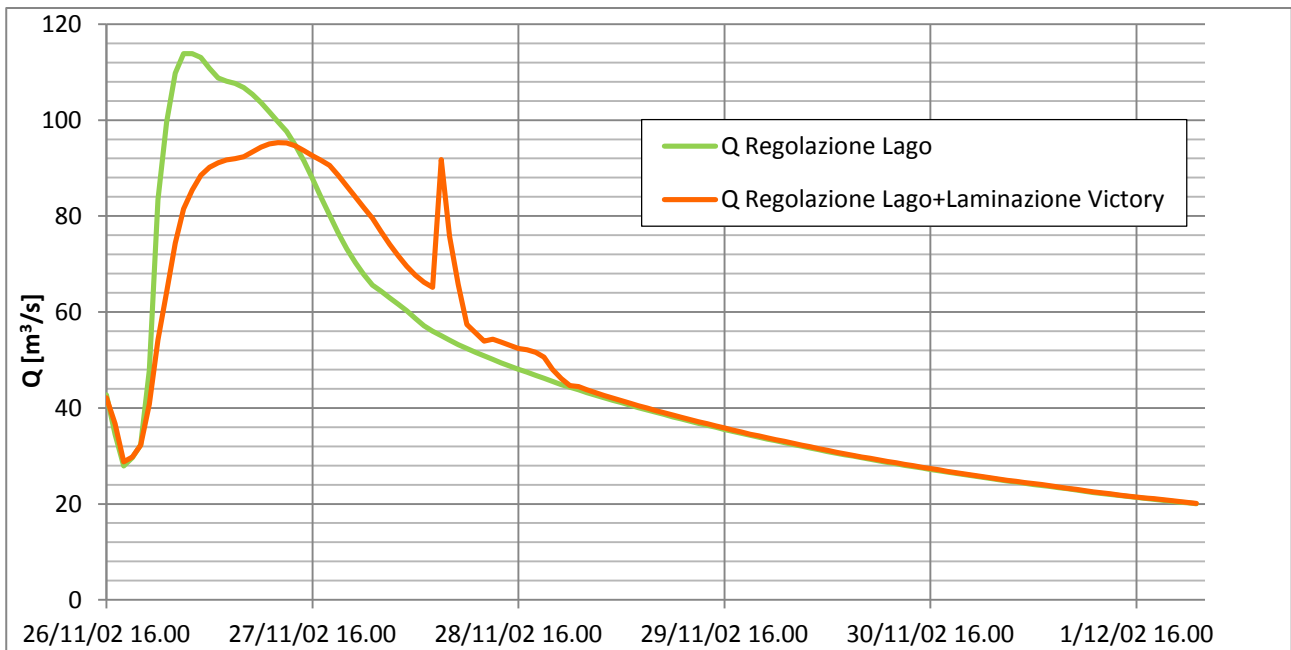


Fig. 5.44 - Laminazione Victory nel caso di "Regolazione Lago" (Sezione di valle del ponte ciclopedonale)

Sebbene la manovra di regolazione delle paratoie del Cavo contribuisca ad un abbassamento dei livelli idrici non solo a valle, ma anche a monte delle opere di progetto della zona Victory (circa 0,2 m) rispetto al caso relativo al paragrafo precedente dove si considerava l'azione di laminazione data dalla sola area di Inverigo, anche in questa simulazione si è verificato, a monte del ponte ciclopedonale, un innalzamento dei livelli tale da provocare lo scavalcamento del ponte di via Fornacetta (anche se per un'altezza inferiore ai 2 cm).

Si vuole inoltre far notare che la manovra di regolazione scelta come "migliore" inizia alla 6^a ora e non alla 7^a: è stato infatti notato, osservando la propagazione dell'onda relativa al caso 1, che, la chiusura ritardata delle paratoie alla 7^a ora provocherebbe un picco di portata situato nelle prime ore dell'evento in fase con i colmi degli idrogrammi provenienti dai bacini più a valle (come si può notare in figura 5.45).

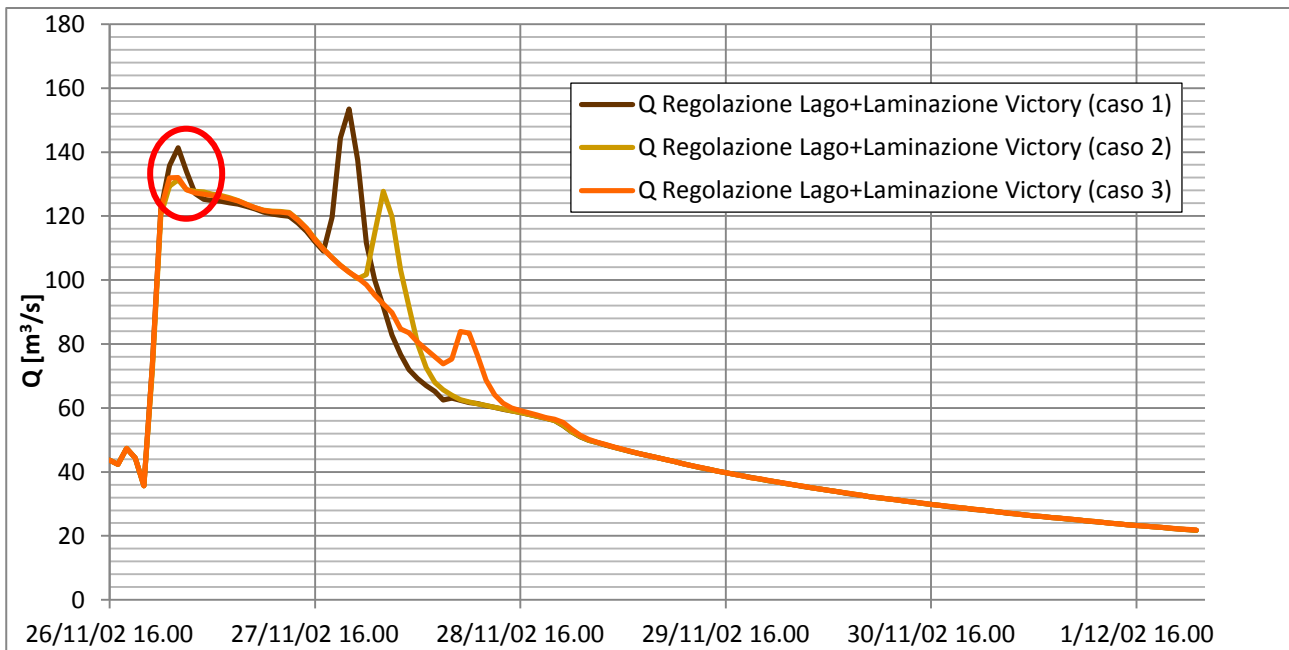


Fig. 5.45 - Sezione 102.14 (Caso di Regolazione Lago + Laminazione zona Victory)

In figura 5.46 sono infine riportati gli idrogrammi relativi ai tre casi analizzati transitori nell'ultima sezione del modello.

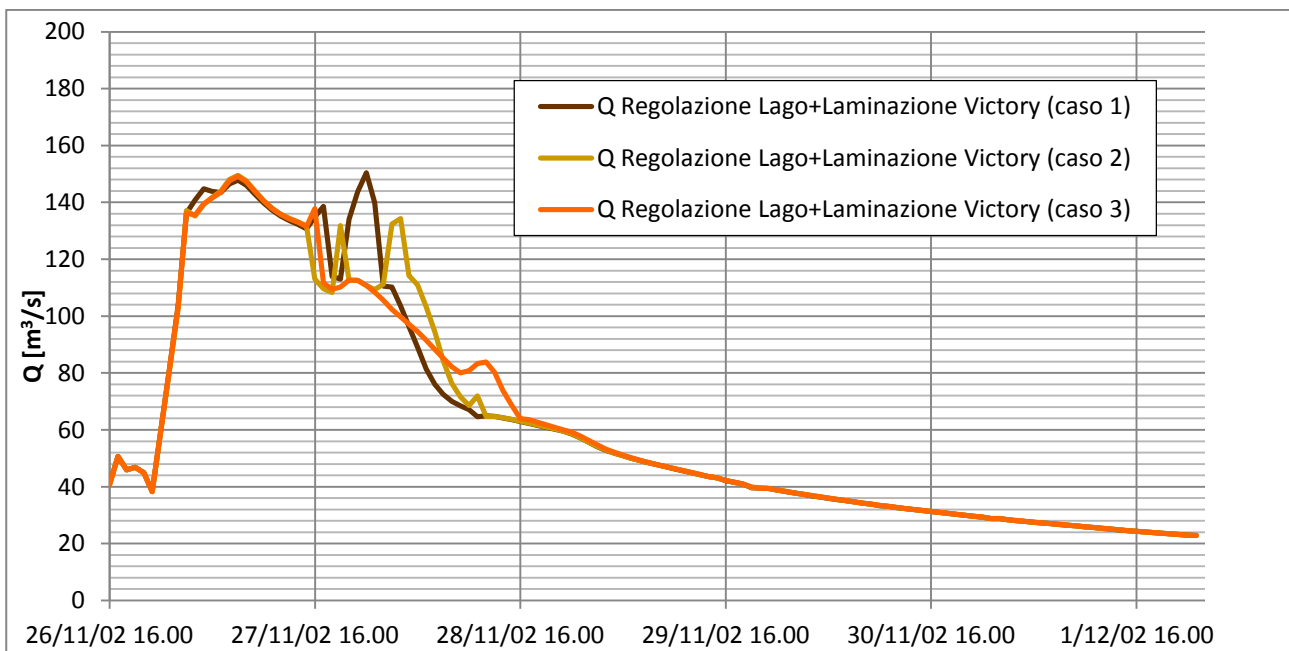


Fig. 5.46 - Sezione di valle del modello Hec-Ras, Parco di Monza (Caso di Regolazione Lago + Laminazione zona Victory)

Regolazione Lago + Laminazione Cava di Brenno+ Laminazione zona Victory

Infine, nell'ipotesi progettuale che tutte e tre le opere vengano realizzate e operino simultaneamente durante un evento di piena, si sono effettuate ulteriori simulazioni tenendo in considerazione i contributi dati non solo della zona di espansione della Victory, ma anche della regolazione del Cavo Diotti e della laminazione della Cava di Brenno. Le tre simulazioni

sono, come visto in precedenza, relative a tre diverse manovre impiegate per la regolazione delle paratoie del ponte ciclopedonale di via Fornacetta, riportate in tabella 5.7.

Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione zona Victory		
caso 1	chiusura graduale	7 ^a ora
	apertura graduale	26 ^a ora
caso 2	chiusura	6 ^a ora
	apertura graduale	36 ^a ora
caso 3	chiusura	4 ^a ora
	apertura graduale	43 ^a ora

Tab. 5.8 - Manovre di regolazione paratoie ponte ciclopedonale (Caso di Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione zona Victory)

In figura 5.47 sono riportati gli idrogrammi transitanti subito a valle del ponte ciclopedonale di progetto relativi ai 3 casi sopra riportati.

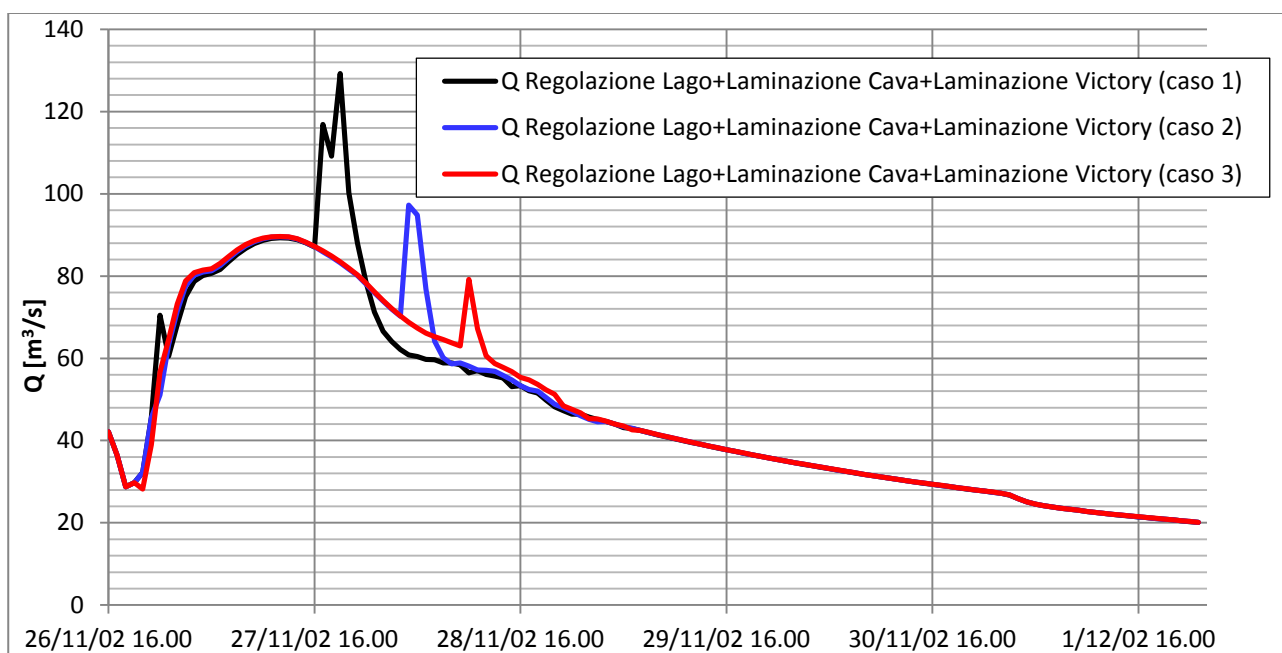


Fig. 5.47 - Sezione di valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory (caso di Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione zona Victory)

Anche in quest'ultima analisi è la manovra relativa al caso 3 a determinare il minimo valore di portata al colmo.

Come nelle analisi riferite al caso precedente, la chiusura posticipata delle paratoie alla 7^a ora provocherebbe un picco anticipato nelle sezioni di valle. E' perciò consigliabile effettuare la manovra una o due ore prima (figura 5.48).

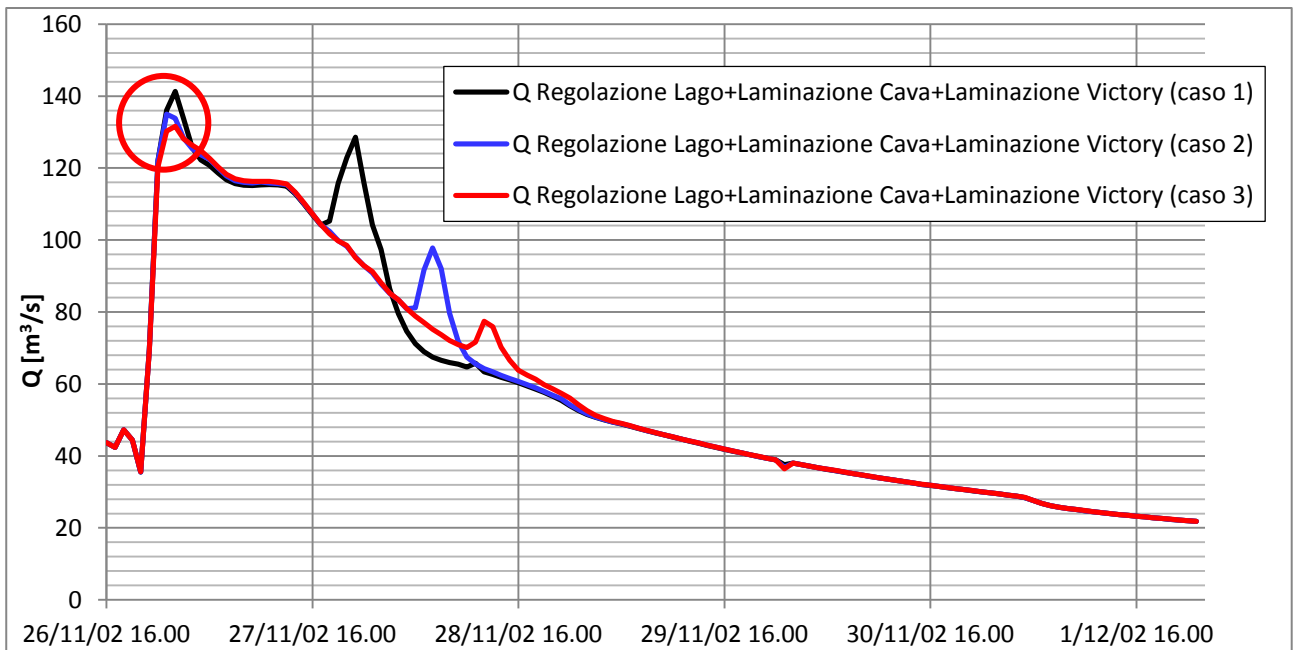


Fig. 5.48 - Sezione 102.14 (Caso di Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione zona Victory)

In figura 5.49 sono rappresentate l'onda di piena nel caso di "Regolazione Lago + Laminazione Cava" e la relativa onda laminata.

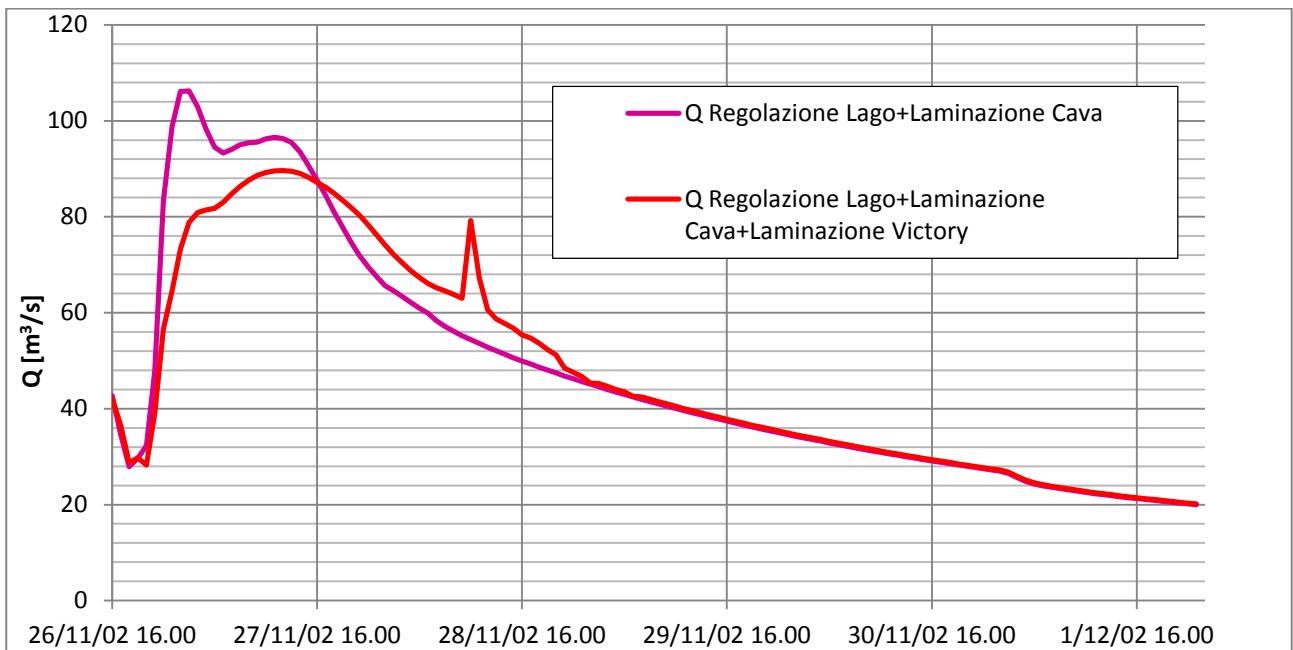


Fig. 5.49 - Laminazione Victory nel caso di "Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione Victory" (Sezione di valle del ponte ciclopedonale)

L'abbattimento del colmo risulta, nella sezione a valle del ponte ciclopedonale, di circa il 33% rispetto al valore relativo al caso di "Non Regolazione", e di circa il 26% nel Parco di Monza. Visto l'ulteriore abbassamento della portata al colmo, appare evidente che, attraverso l'impiego simultaneo delle tre opere di invaso, il beneficio riscontrabile nelle sezioni a valle di Inverigo venga ulteriormente confermato (l'abbassamento medio dei livelli idrici risulta di

circa il 0,5 m), ma è soprattutto a monte di tale zona che i contributi della regolazione del lago e della laminazione della Bevera appaiono più rilevanti: il profilo di rigurgito a monte del ponte ciclopedonale si abbassa di circa 0,45 m rispetto al caso di sola Laminazione Victory, il profilo d'acqua presso il ponte di via Fornacetta, sebbene vada in pressione, non sormonta più l'impalcato e, nelle sezioni di monte, i risultati della simulazione mostrano abbassamenti delle altezze d'acqua in media pari a 0,4 m, coincidenti, ovviamente, con il caso già visto di "Regolazione Lago + Laminazione Cava".

In figura 5.50 sono mostrati i tre idrogrammi scelti transitanti nella sezione di valle del ponte ciclopedonale di progetto relativi alle tre diverse possibili configurazioni.

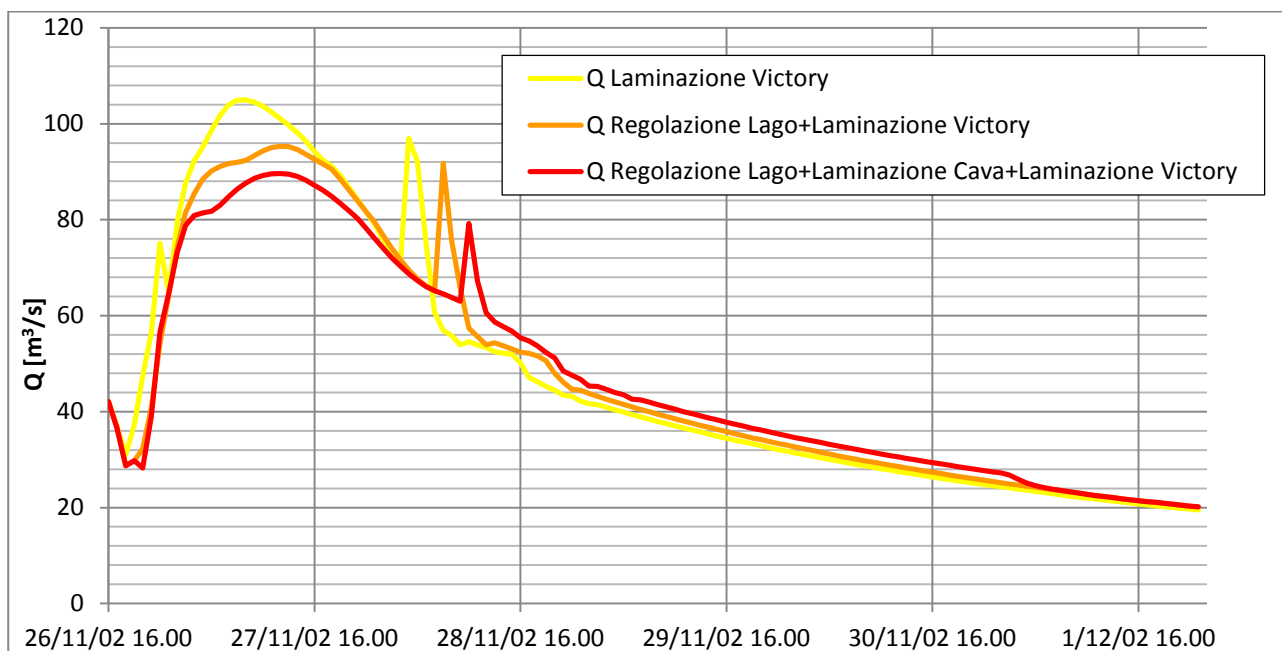


Fig. 5.50 - Sezione di valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory (casi di Laminazione Victory, Regolazione Lago + Laminazione Victory, Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione zona Victory)

E' importante notare come, al diminuire delle dimensioni dell'onda in arrivo alla zona Victory, attraverso la regolazione del Cavo prima e la laminazione della Bevera dopo, la manovra di regolazione "ottimale" delle paratoie del ponte ciclopedonale abbia progressivamente subito un ritardo degli orari di apertura grazie alla crescente disponibilità di volume invasabile. Per quanto riguarda invece la manovra di chiusura, la regolazione ottimale fatta a posteriori considera come orario "limite" la 6ª ora dall'inizio dell'evento: come abbiamo visto, la chiusura posticipata provocherebbe dei colmi relativi che andrebbero a sommarsi, poiché in fase, con i colmi degli idrogrammi dei bacini di valle.

L'analisi del comportamento idraulico dell'asta fluviale ha quindi evidenziato l'importanza della realizzazione delle tre opere di laminazione: sebbene la sola laminazione della zona Victory dia i maggiori contributi nelle sezioni di valle, le condizioni di sicurezza di monte risultano dubbie. Senza la regolazione di Pusiano e la laminazione sulla Bevera di Molteno, il

rischio che l'area di Inverigo risulti insufficiente è maggiore e con esso le probabilità che le conseguenze negative si riversino nel comprensorio posto a valle per effetto di una possibile crescita della rapidità e impetuosità dell'onda di deflusso. Inoltre le opere di regolazione di monte (lago e Bevera), sebbene singolarmente possano contribuire al miglioramento delle condizioni di sicurezza del deflusso, se combinate, portano notevoli benefici soprattutto le tratto iniziale dell'asta.

In tabella 5.8 sono riportati i valori di portata al colmo relativi ai sette casi analizzati transitanti nelle sezioni di interesse del corso d'acqua: sezione a valle della confluenza con il Cavo Diotti, sezione a valle della confluenza con la Bevera di Molteno, sezione a valle del ponte ciclopedonale di progetto della zona Victory e sezione di valle del modello presso il Parco di Monza.

In figura 5.51 sono riportati gli idrogrammi in arrivo alla sezione di valle del modello, presso il Parco di Monza.

In figura 5.52 è riportato il profilo altimetrico, in scala distorta, dell'intero tratto preso in esame con riferimento ai casi di "No Regolazione" e "Regolazione Lago + Laminazione Cava + Laminazione Victory" che costituisce quindi la configurazione di "Massima Regolazione"; in essa sono inoltre evidenziati i tratti di fiumi (I, II, III, IV) soggetti a rappresentazioni di dettaglio riportate, rispettivamente, nelle figure 5.53, 5.54, 5.55 e 5.56 (dove sono riportati i risultati relativi a tutti i casi analizzati).

Infine, in figura 5.57, sono riportati, in funzione della progressiva, i valori dei dislivelli d'acqua, risultanti dalle diverse configurazioni di progetto, considerati in riferimento al caso di mancata regolazione.

Valori di portata [m^3/s]	Valle Cavo Diotti	Valle Bevera di Molteno	Valle Victory	Parco di Monza
No Regolazione	70	136	134	195
Regolazione Lago	61	110	114	179
Laminazione Cava	70	110	119	188
Regolazione Lago+Laminazione Cava	61	87	106	172
Laminazione Victory	70	136	105	154
Regolazione Lago+Laminazione Victory	61	110	95	149
Regolazione Lago+Laminazione Cava+Laminazione Victory	61	87	90	144

Tab. 5.9 - Valori di portata al colmo in quattro sezioni relativi ai sette casi analizzati

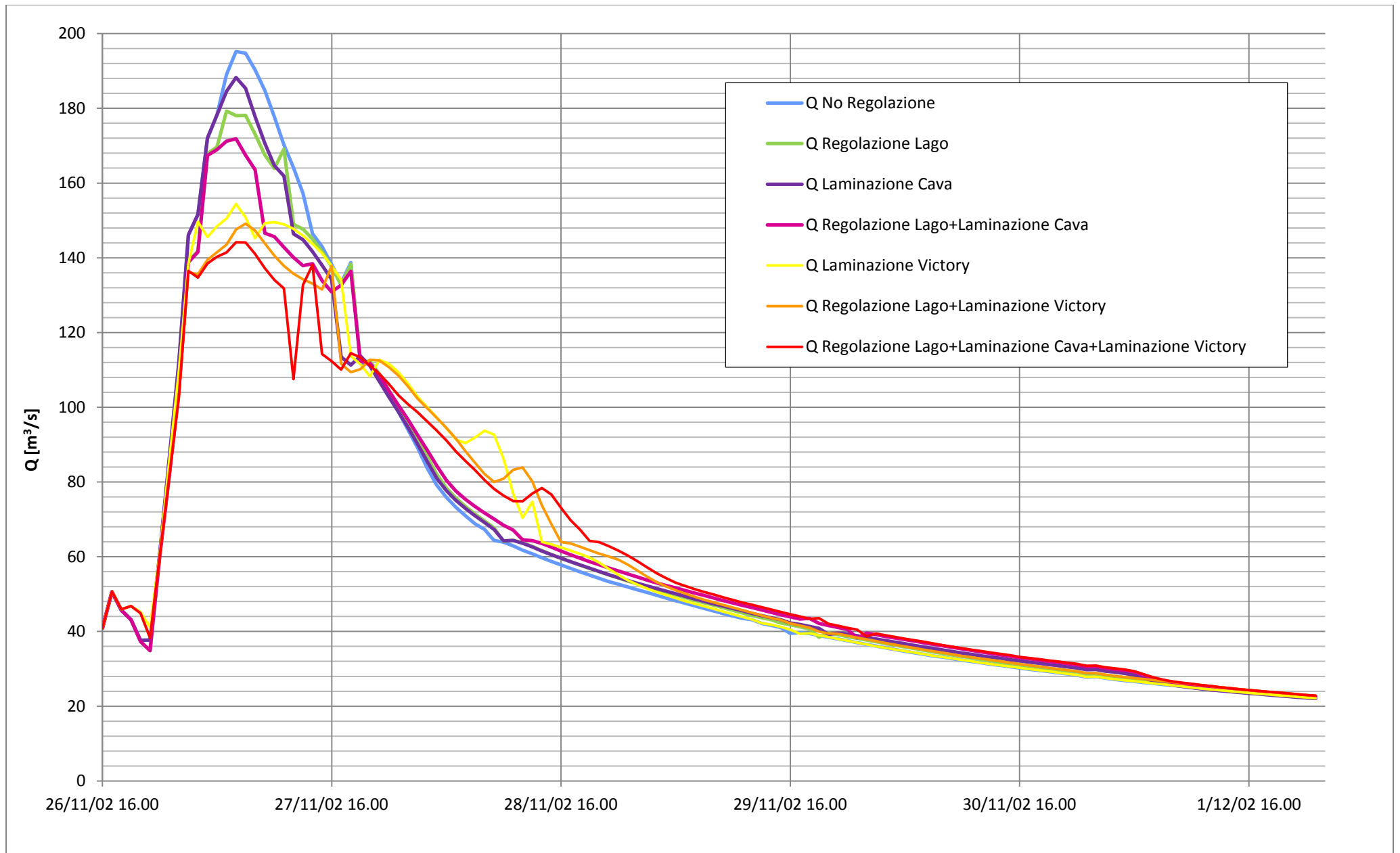


Fig. 5.51 - Sezione di valle del modello Hec-Ras, Parco di Monza

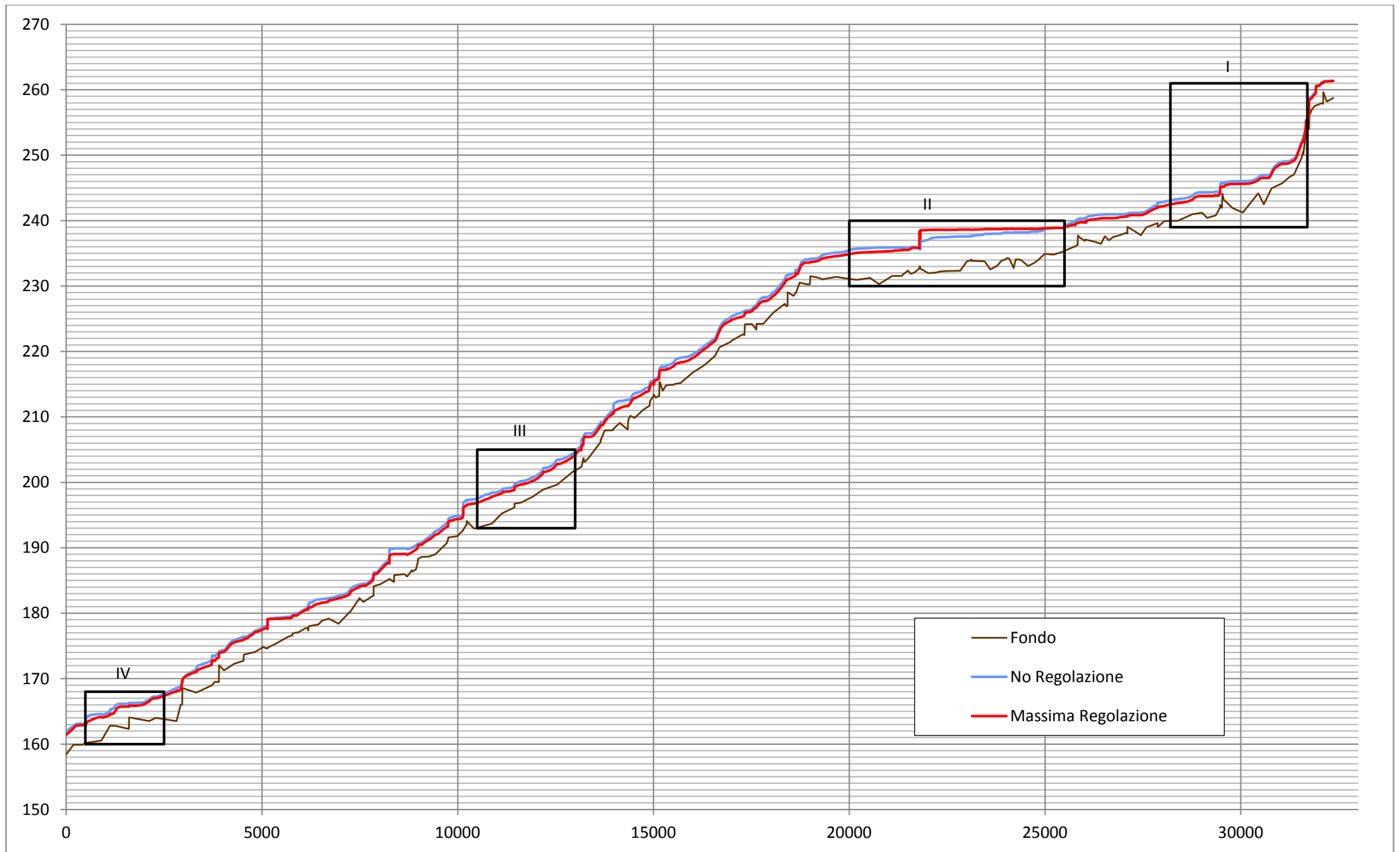


Fig. 5.52 - Profilo altimetrico del Lambro dall'uscita del lago di Pusiano al Parco di Monza (casi di "Non Regolazione" e "Massima Regolazione")

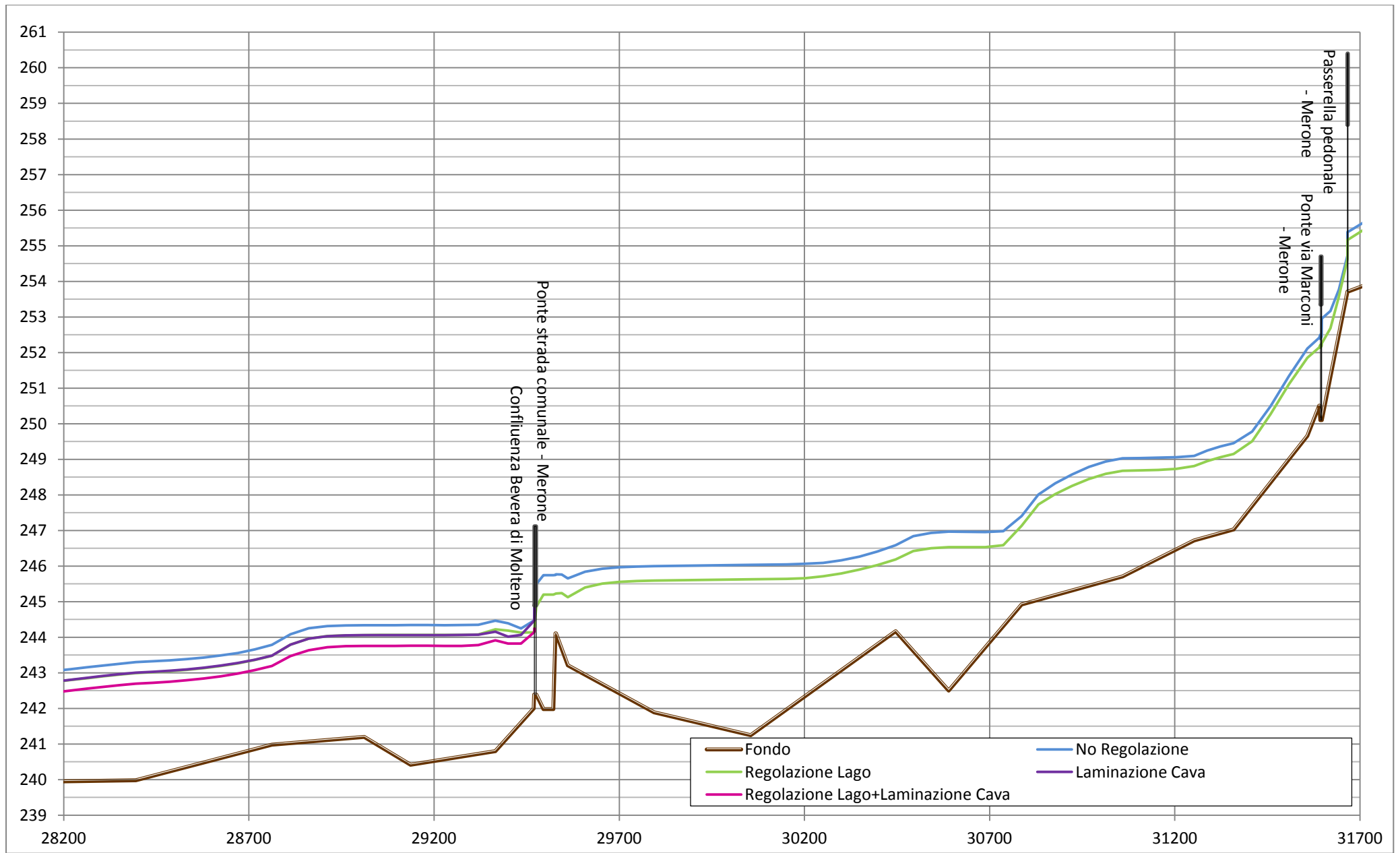


Fig. 5.53 - Dettaglio I

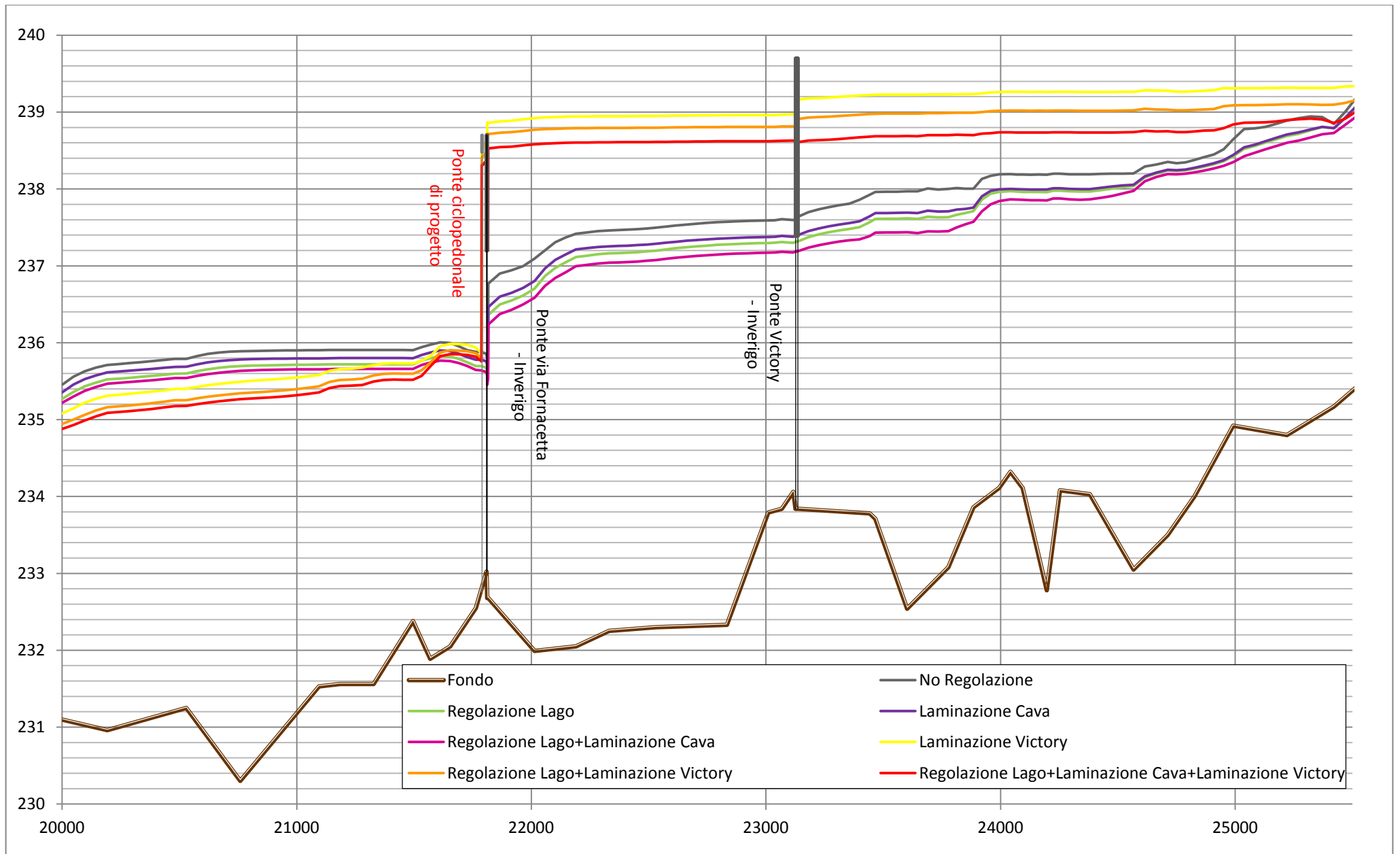


Fig. 5.54 - Dettaglio II

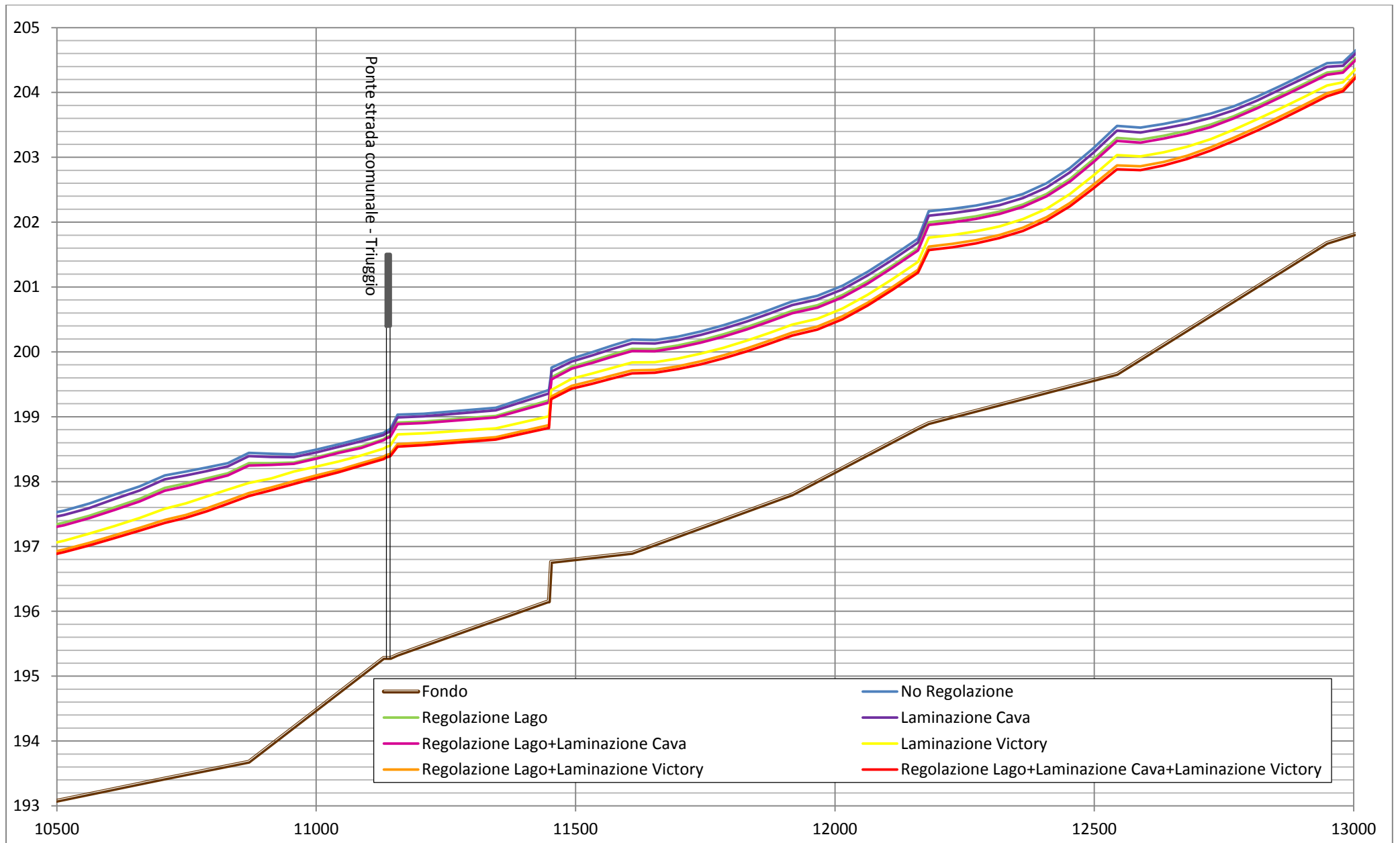


Fig. 5.55 - Dettaglio III

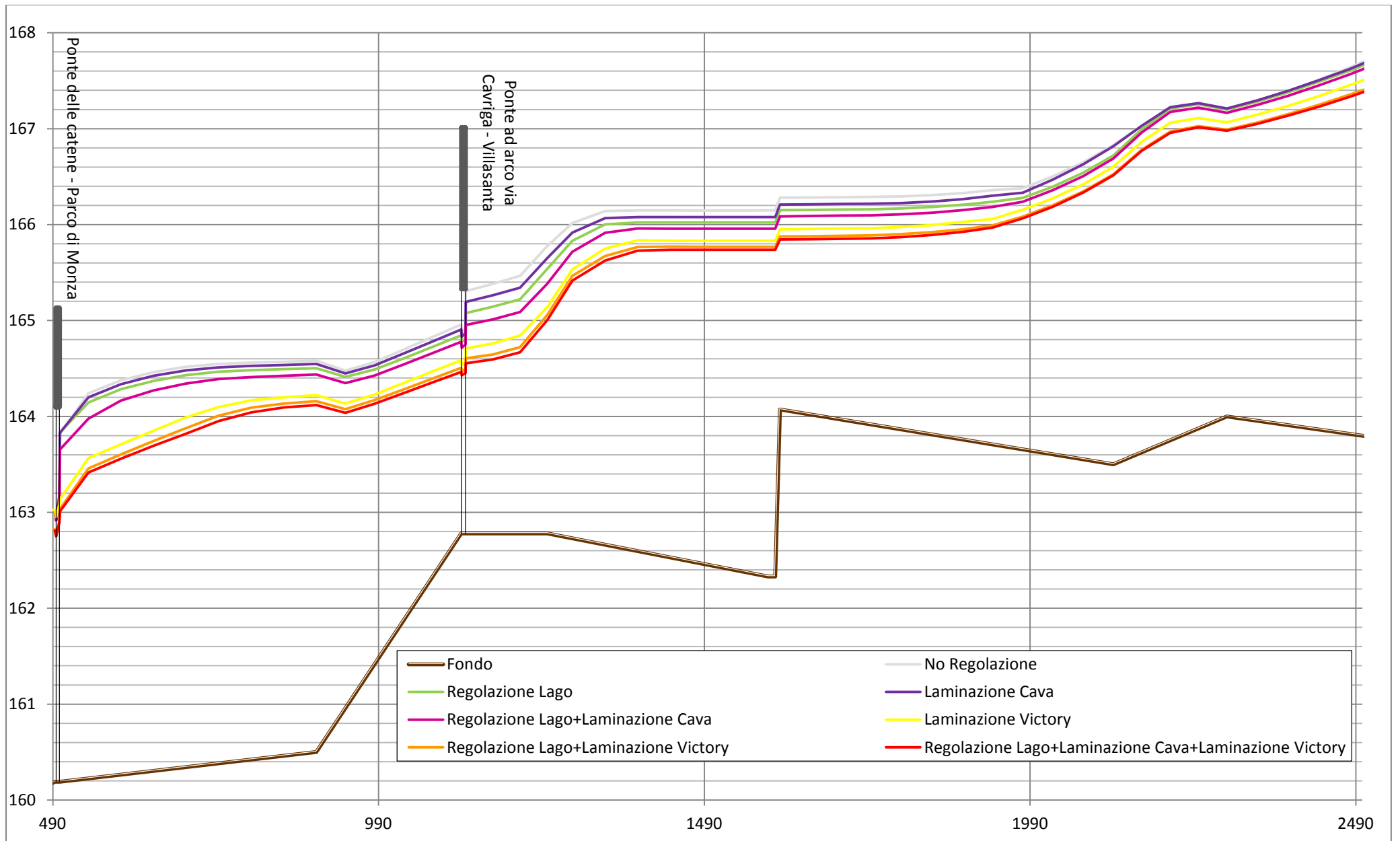


Fig. 5.56 - Dettaglio IV

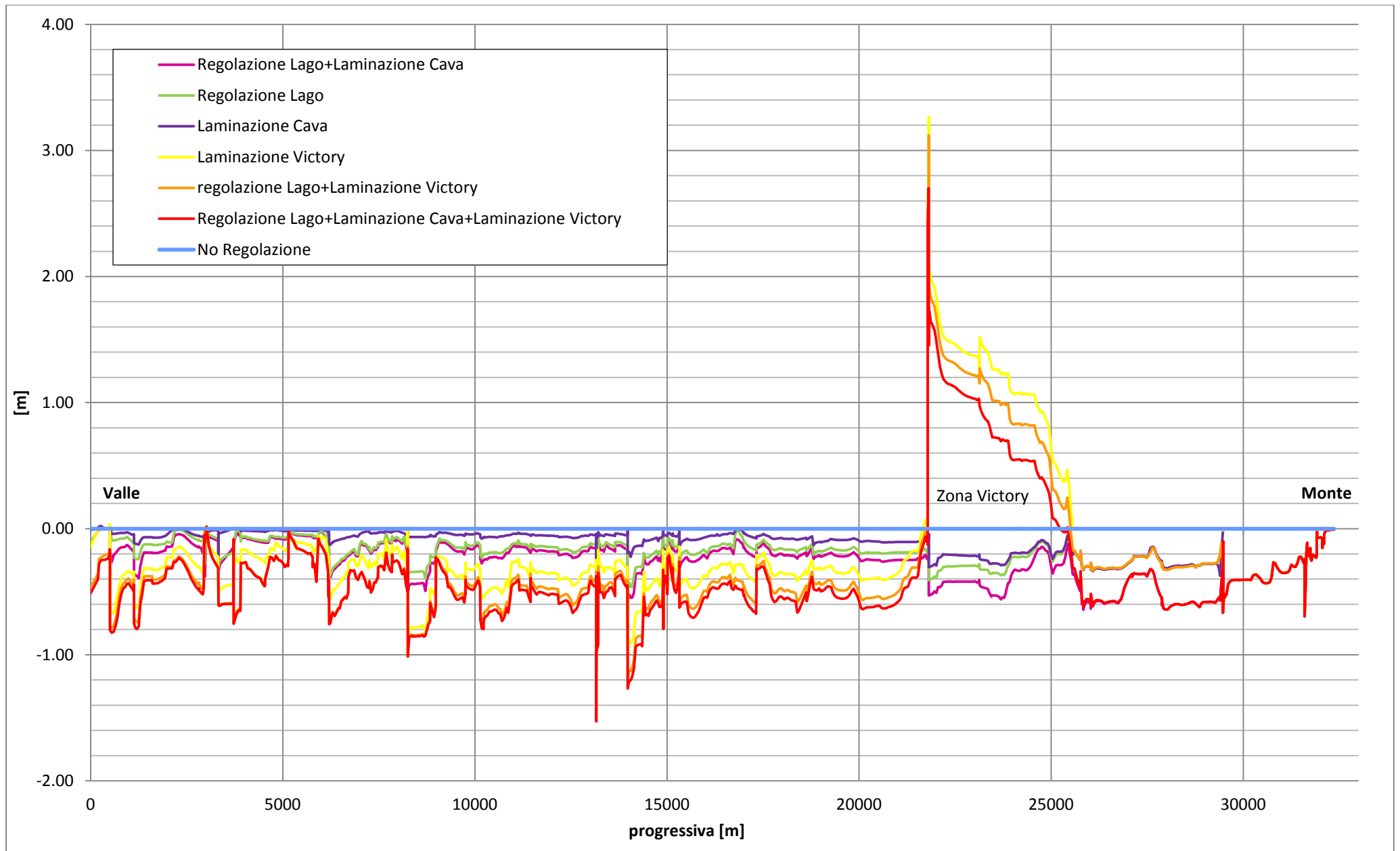


Fig. 5.57 - Valori relativi dei dislivelli d'acqua lungo l'asta fluviale rispetto al caso di "Non Regolazione"

6. Regola operativa di gestione

6.1 Obiettivi della regola

Il presente progetto di gestione è finalizzato a definire il quadro conoscitivo e previsionale delle operazioni di invaso e svasso degli impianti analizzati in caso di eventi di piena; esso deve quindi prevedere scenari per l'utilizzazione delle opere di regolazione, al fine di modulare le condizioni di deflusso a valle degli sbarramenti, ricorrendo ovviamente alle relative possibilità di laminazione.

Come accennato in precedenza, per quanto riguarda il lago di Pusiano è già presente una regola operativa dell'invaso, redatta allo scopo di soddisfare le diverse esigenze degli utenti come: il contenimento delle piene sul territorio, la diluizione degli inquinanti e il mantenimento delle portate di minimo deflusso vitale del Lambro sublacuale, il mantenimento delle condizioni ottimali per l'habitat lacuale e, infine, la fruibilità del lago per la navigazione e la pesca.

Si vuole rimarcare, ad ogni modo, che la presente ricerca di una regola, per i tre invasi, si pone il principale obiettivo di fornire tutte le informazioni, ricavabili dalle analisi effettuate, per ottimizzare le procedure di contenimento nei casi straordinari di piena del fiume.

Data la complessità e molteplicità dei reali eventi di piena risulta molto difficile, se non impossibile, individuare a priori la manovra di gestione ottimale per ridurre al minimo il rischio idraulico conseguente. Ad ogni modo, sebbene le simulazioni effettuate facciano riferimento ad un singolo evento teorico, esse risultano utili per fornire indicazioni rilevanti sul comportamento idraulico del sistema e sul contributo di ogni singolo componente. Sulla base di queste, è stato possibile procedere all'individuazione delle operazioni di controllo da effettuare sulle opere di regolazione del Cavo Diotti, della Cava di Brenno e della zona Victory.

Risulta quindi scontato, data l'aleatorietà degli eventi critici reali che si potranno verificare sul bacino, evidenziare come la regola di gestione presentata nei paragrafi seguenti dovrà inevitabilmente essere soggetta a periodici aggiornamenti da parte del gestore, sulla base delle conoscenze acquisite nel corso della vita dell'impianto e di una crescente sensibilità nel controllo delle opere.

In sede di progettazione definitiva della vasca di laminazione della Cava di Brenno e dell'area di espansione di Inverigo, risulterà essenziale inoltre prevedere tutte quelle operazioni connesse alle attività di manutenzione, specifici (straordinari) e periodici (ordinari) interventi, allo scopo di garantire prioritariamente, in ogni tempo, il funzionamento degli

organi di scarico e di presa, e, di conseguenza, assicurare il mantenimento ed il ripristino delle capacità utili degli invasi.

6.2 Criteri decisionali

Gli invasi quindi soggetti alla definizione di una regola di gestione in caso di eventi di piena sono nel nostro caso:

- l'invaso del lago di Pusiano;
- la vasca di laminazione della Cava di Brenno sulla Bevera di Molteno;
- l'area di espansione della zona Victory sul fiume Lambro.

I tre invasi si situano tutti nella parte di monte del bacino della media valle. In questo primo tratto, dall'uscita dei laghi alla zona di espansione della Victory, è il bacino della Bevera di Molteno a dare i maggiori contributi, in termini di portate, alle piene del Lambro. In riferimento all'evento di piena analizzato, in tabella 6.1 sono riportati i valori dei volumi e dei colmi di portata degli idrogrammi in ingresso nel Lambro, che hanno costituito le condizioni al contorno del modello fino alla confluenza con la Bevera di Bulciago; come si può notare, il volume dell'idrogramma proveniente dalla Bevera di Molteno, considerando anche il caso in cui esso venga laminato dalla Cava di Brenno, risulta notevolmente superiore rispetto ai bacini ad esso adiacenti.

Nome sottobacino	Tratto	Portata al colmo [m ³ /s]	Volume [m ³]
LAM4	Lago - Ferrovia	18.33	102,537
LAM5	Ferrovia - SS342	65.43	762,795
BEV1 <i>(laminato)</i>	Bevera di Molteno	62.41 <i>22.4</i>	3,060,135 <i>2,468,790</i>
LAM6	SS342 - Bulciago	35.96	813,186
BEV2	Bevera di Bulciago	36.66	1,479,600

Tab. 6.1 - Volumi e portate al colmo degli idrogrammi dei bacini di monte

Il bacino complessivamente afferente al Lambro, in questo primo tratto, copre una superficie di circa 80 km²; si tratta di un bacino relativamente piccolo, è lecito ipotizzare che gli eventi meteorici interessino contemporaneamente e con ridotte variazioni areali tutta la superficie del bacino. Sotto questa ipotesi è perciò ragionevole tenere in considerazione l'informazione sull'onda di piena della Bevera di Molteno per le manovre decisionali da attuare alle opere di regolazione.

Per esplicitare in modo esauriente i criteri che il gestore deve seguire nel controllare le regolazioni, è pertanto necessario identificare le informazioni sulla base delle quali si attuano quei meccanismi decisionali, che quindi sono:

- il livello idrometrico del lago di Pusiano, registrato o atteso;
- l'onda di piena, registrata o attesa, lungo la Bevera di Molteno;
- le precipitazioni attese.

Si ricorda, a tal proposito, la presenza di un idrometro lungo la Bevera a Molteno, situato in corrispondenza del ponte di via Aldo Moro.

6.3 Definizione della regola

6.3.1 Regola di gestione del Cavo Diotti

La funzione principale della regolazione delle paratoie del Cavo consiste nel disaccoppiare il colmo di portata proveniente dal lago di Pusiano dai colmi di portata dei bacini di valle.

Come è noto, l'entità dell'onda in uscita dal lago viene influenzata dal livello idrometrico presente nell'invaso. La misurazione del livello reale o la previsione del livello atteso risultano quindi essenziali nei meccanismi decisionali della gestione dell'invaso.

In figura 6.1 è riportato l'abaco delle portate uscenti dal lago in funzione del livello idrometrico presente nel lago e del grado di apertura delle paratoie (somma delle portate provenienti dal Cavo e dall'emissario naturale). Esso costituisce uno strumento molto utile al gestore che, in questo modo, è in grado di conoscere in tempo reale la portata che sta erogando o è in grado di erogare nelle sezioni di valle.

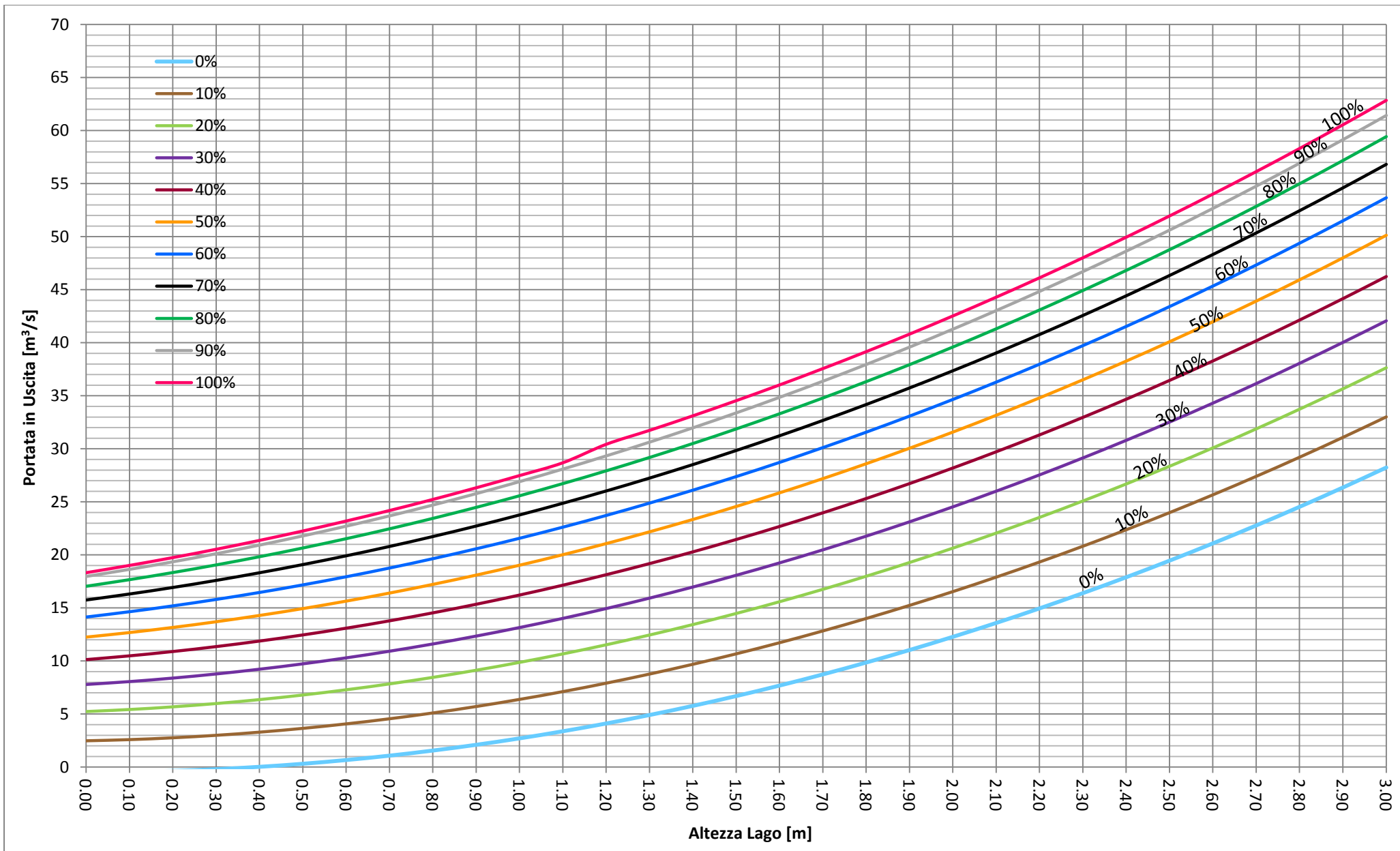


Fig. 6.1 - Abaco portate lago di Pusiano

Nelle simulazioni effettuate, la manovra ottimale individuata sul Cavo è risultata essere composta da due fasi:

1. chiusura completa delle paratoie nelle ore in cui si verifica il picco di portata nei bacini di valle;
 2. apertura completa delle paratoie circa 3 – 4 ore dopo il passaggio del picco di portata nei bacini di valle.
- Durante un evento meteorico intenso è pertanto consigliabile mantenere le paratoie completamente chiuse nella sua fase ascendente per poi riaprirle successivamente.

Il riferimento temporale per la manovra di apertura delle paratoie del Cavo è da ricercare nell'onda di piena che si verifica sulla Bevera di Molteno: il criterio decisionale della manovra è quindi basato sulla conoscenza dell'intervallo temporale in cui transita il colmo di portata sull'affluente.

Un immediato strumento del quale ci si può avvalere è rappresentato dall'idrometro di Molteno. Tenendo in considerazione un tempo di traslazione dell'onda, da Molteno alla confluenza della Bevera con il Lambro, di circa 75 minuti, la lettura dell'idrogramma in arrivo al fiume Lambro deve essere impiegata per individuare l'istante di riapertura delle paratoie del Cavo:

- a partire dall'istante di transito del picco alla sezione dove è situato l'idrometro dovranno passare circa 4 – 5 ore prima di aprire le paratoie del Cavo.

6.3.2 Regola di gestione della Cava di Brenno

Come esposto nel capitolo precedente, l'invaso di laminazione della Cava di Brenno è progettato per attivarsi qualora la portata transitante sulla Bevera superi il valore di 22,5 m³/s. Il funzionamento avviene attraverso uno sfioro laterale che convoglia l'acqua al canale derivatore e quindi alla vasca; per impedire che lo sfioro avvenga per portate inferiori a quella di progetto, lo sfioratore laterale dovrebbe essere dotato di paratoie meccanizzate che ne consentano l'apertura comandata solo quando le portate in Bevera superassero la soglia prefissata.

Sebbene non siano previste particolari indicazioni riguardo le modalità di invaso della miniera, poiché il comportamento ottimale risulta essere quello di progetto, la regola di gestione, per quanto riguarda la Cava, prevede indicazioni riguardo tempi e modalità di svuotamento della vasca:

- il volume invasato nella Cava durante il passaggio dell'onda di piena deve essere ricondotto al corpo idrico naturale attraverso il sistema di pompaggio una volta che la fase di piena è terminata;
- le pompe galleggianti devono essere attivate qualora la portata transitante lungo la Bevera si riduca sotto i $20 \text{ m}^3/\text{s}$, immettendo una portata di $2 \text{ m}^3/\text{s}$ nel corso d'acqua.

In figura 6.2 è riproposto l'idrogramma laminato della Bevera di Molteno utilizzato nelle simulazioni idrauliche: come riportato nel progetto di gestione, il pompaggio del volume invasato nella miniera viene attivato per portate transitanti inferiori ai $20 \text{ m}^3/\text{s}$ in modo tale da non superare i $22,5 \text{ m}^3/\text{s}$ in arrivo nel Lambro.

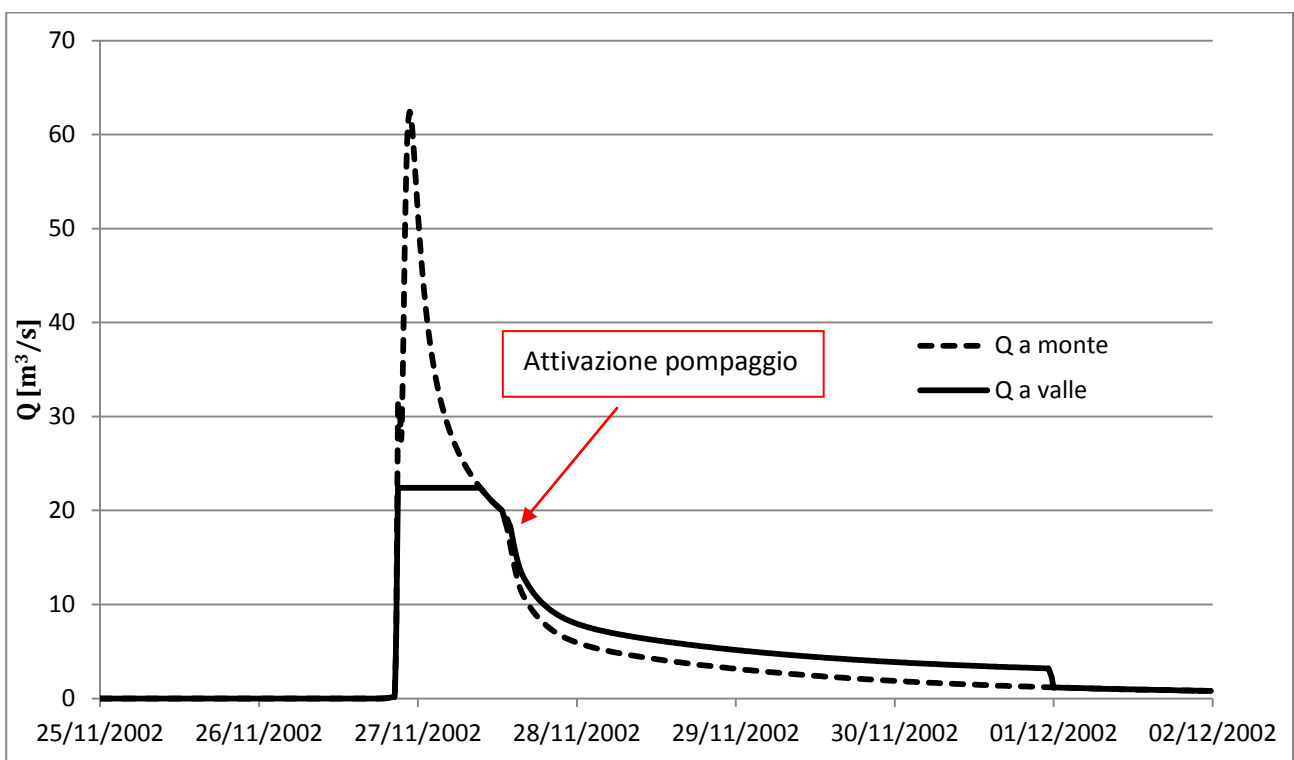


Fig. 6.2 - Laminazione dell'idrogramma BEV1 da parte della Cava di Brenno

6.3.3 Regola di gestione dell'area di Inverigo

La definizione di una regola di gestione per l'area di espansione di Inverigo risulta più complicata delle precedenti poiché è maggiore il grado di incertezza relativo alle sue condizioni di monte.

Oltre alle portate in arrivo dai laghi di Alserio e Pusiano, all'invaso di Inverigo vengono convogliate le acque provenienti da parte del bacino direttamente afferente all'asta fluviale del Lambro e dei bacini delle Bevere di Molteno e Bulciago. Le laminazioni degli invasi di

Pusiano e della Cava, se presenti e attive, modificano le condizioni al contorno in arrivo alla zona Victory e con esse le manovre ottimali da applicare alle paratoie del ponte ciclopedonale.

Lo studio effettuato sul comportamento idraulico del Lambro ha permesso di comprendere meglio il peso dei diversi contributi e di individuare, a posteriori, la regolazione ottimale. Essa si articola in due fasi:

1. Chiusura istantanea o graduale delle paratoie del ponte fino alla configurazione di “regolazione massima” (vedi figura 6.4) nella fase ascendente dell’onda di piena;
2. Apertura istantanea o graduale delle paratoie del ponte fino alla configurazione di “riposo” (vedi figura 6.5) nella fase discendente dell’onda.

Partiamo, per comodità, col considerare la manovra di riapertura delle paratoie.

Come notato nelle simulazioni tale manovra si sposta nel tempo in funzione dell’onda in arrivo all’area di laminazione. Al diminuire del volume dell’idrogramma in arrivo, l’onda laminata, in uscita dalle paratoie del ponte, presenta picchi sempre più ritardati nel tempo e ridotti in valore assoluto (figura 5.48). La manovra di riapertura dipende quindi dalle condizioni di monte e, conseguentemente, dal volume invasato nella vasca; essa deve essere attuata in modo tale da soddisfare contemporaneamente due esigenze:

- a) deve avvenire sufficientemente presto per avere modo di svuotare il volume invasato e recuperare il prima possibile la sua capacità di laminazione per eventuali piene successive;
- b) deve avvenire sufficientemente tardi per evitare che il picco di portata conseguente alla manovra superi quello verificatosi al passaggio dell’onda.

Data la dipendenza dalle condizioni di monte e data la loro infinita variabilità, non è possibile conoscere a priori la manovra più adatta per un determinato evento. Il gestore deve quindi essere in grado di conoscere la portata che sta erogando o che andrà ad erogare in seguito ad una sua decisione di manovra.

A tal fine si fornisce al gestore un abaco (figura 6.3) rappresentante le portate uscenti dalle paratoie del ponte ciclopedonale in funzione del livello di monte e della configurazione delle paratoie dove: per “regolazione massima (100%)”, “riposo (0%)”, “regolazione minima (30%)” e “regolazione massima a battente (70%)” si intendono le configurazioni schematizzate rispettivamente in figura 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7.

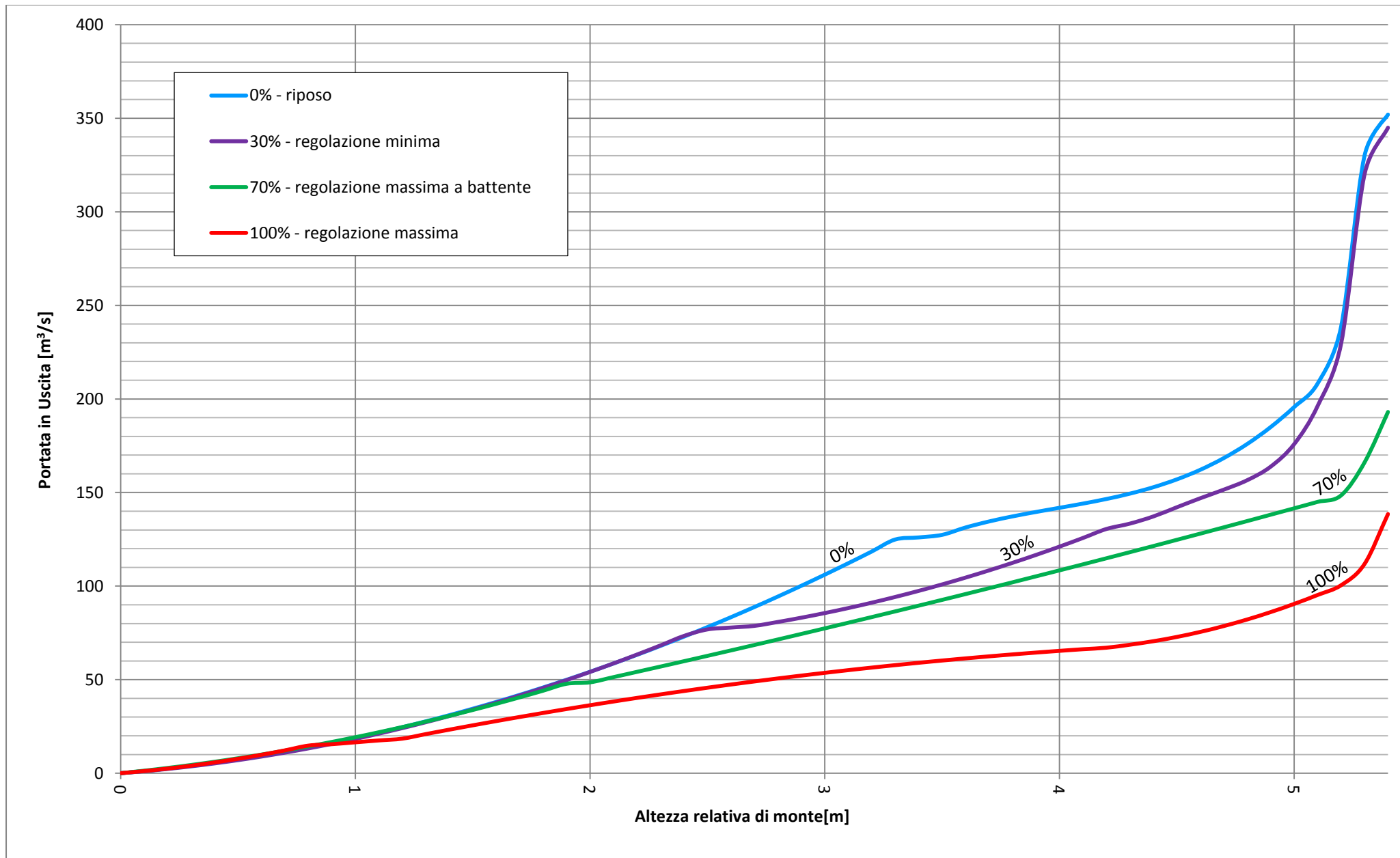


Fig. 6.3 - Abaco portate ponte ciclopedonale di progetto

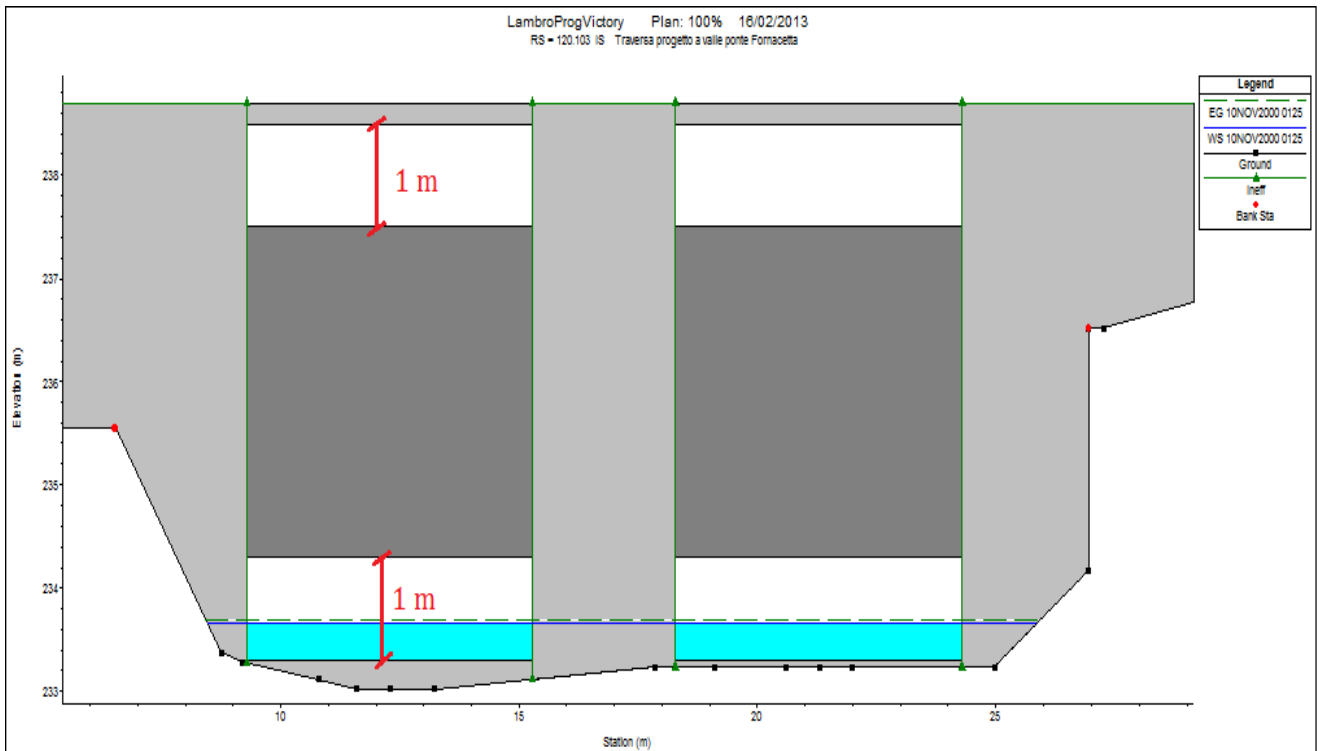


Fig. 6.4 - Schematizzazione configurazione paratoie: "regolazione massima"

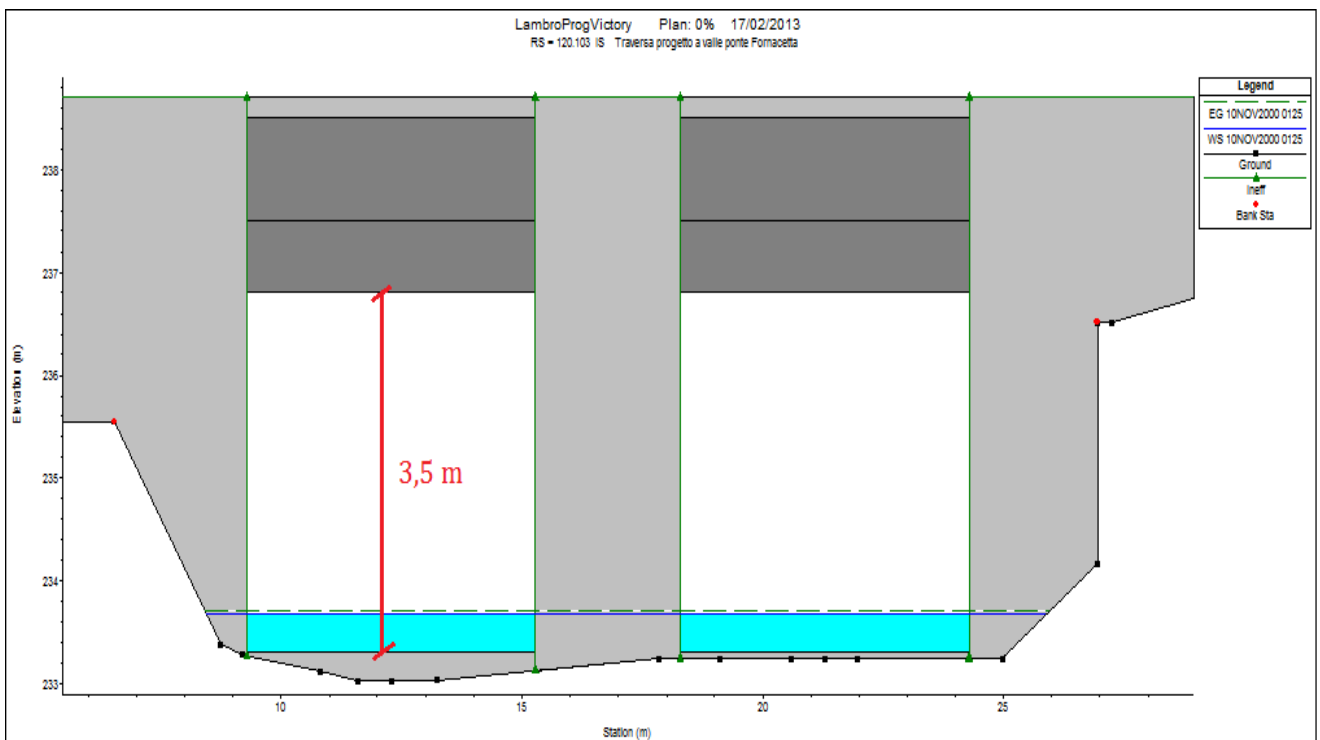


Fig. 6.5 - Schematizzazione configurazione paratoie: "riposo"

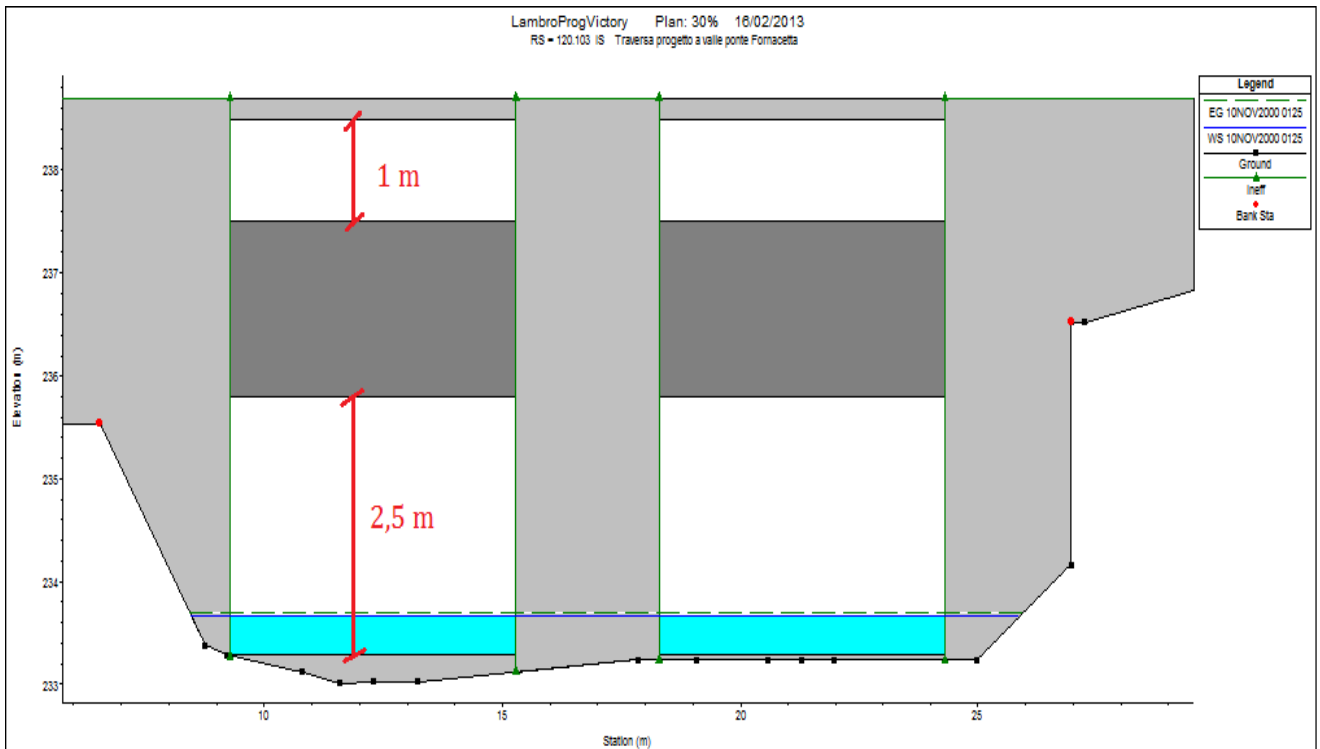


Fig. 6.6 - Schematizzazione configurazione paratoioe: "regolazione minima"

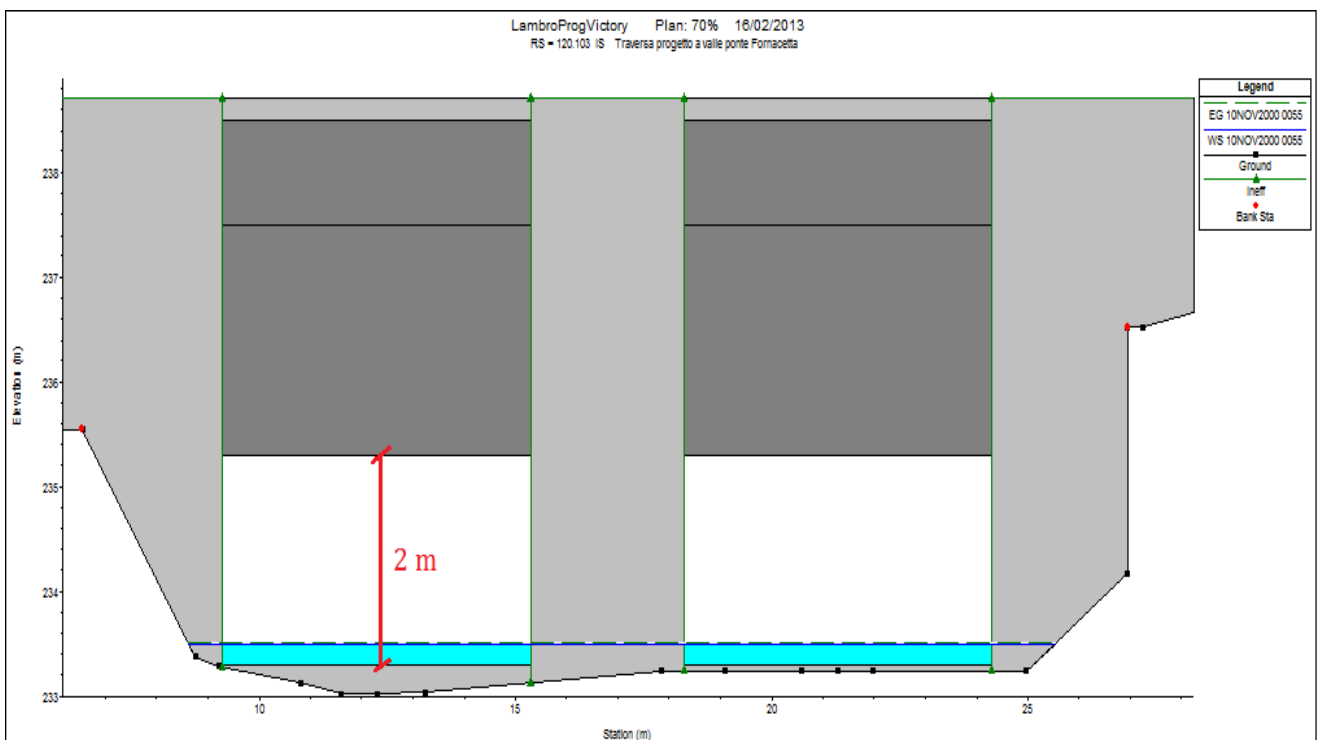


Fig. 6.7 - Schematizzazione configurazione paratoioe: "regolazione massima a battente"

Andiamo ora ad analizzare le tempistiche per la manovra di chiusura.

Dalle simulazioni effettuate, la manovra di chiusura ottimale viene effettuata non oltre la sesta ora dall'inizio dell'evento studiato, questo vuol dire circa un'ora prima che si verifichi il picco di piena sulla Bevera di Molteno alla sezione di confluenza con il Lambro. Nella manovra previsionale deve quindi essere indicato che:

- la manovra di chiusura delle paratoie deve essere effettuata 1-2 ore prima del passaggio del picco della Bevera di Molteno alla sezione di confluenza con il Lambro.

Diversamente da quanto accade per il Cavo Diotti, la manovra di chiusura delle paratoie deve anticipare il colmo della Bevera. La lettura in tempo reale dell'idrometro di Molteno può quindi non essere sufficiente per l'attuazione corretta della manovra di chiusura: sebbene l'idrometro si trovi pochi chilometri a monte della confluenza con il Lambro, il tempo di traslazione dell'onda (75 minuti), dal punto di misurazione all'immissione nel fiume, non è sufficiente a garantire l'anticipo necessario per la manovra. Ovviamente, in mancanza di ulteriori indicatori ci si può affidare all'idrometro di Molteno, sebbene il ritardo nella regolazione di chiusura possa provocare picchi anticipati nelle sezioni di valle per la sovrapposizione con i colmi delle onde confluenti dai bacini di valle (come visto nelle figure 5.43 e 5.46).

L'approccio più corretto e cautelativo dovrebbe però riuscire a prevedere, con l'anticipo necessario, l'andamento dell'onda di piena sulla Bevera. Questo potrebbe essere realizzato, sulla base delle precipitazioni attese, attraverso un modello afflussi-deflussi sviluppato in tempo reale. Questo approccio, sebbene aumenti il grado di incertezza della regola, risulta necessario per soddisfare l'esigenza temporale richiesta.

6.3.3.1 Modello afflussi-deflussi della Bevera di Molteno

Con l'utilizzo del software di calcolo HEC-HMS, sempre fornito dal U.S. Army Corps of Engineers', è stato sviluppato un modello per la simulazione del comportamento idrologico della Bevera di Molteno tarato sull'evento del novembre 2002.

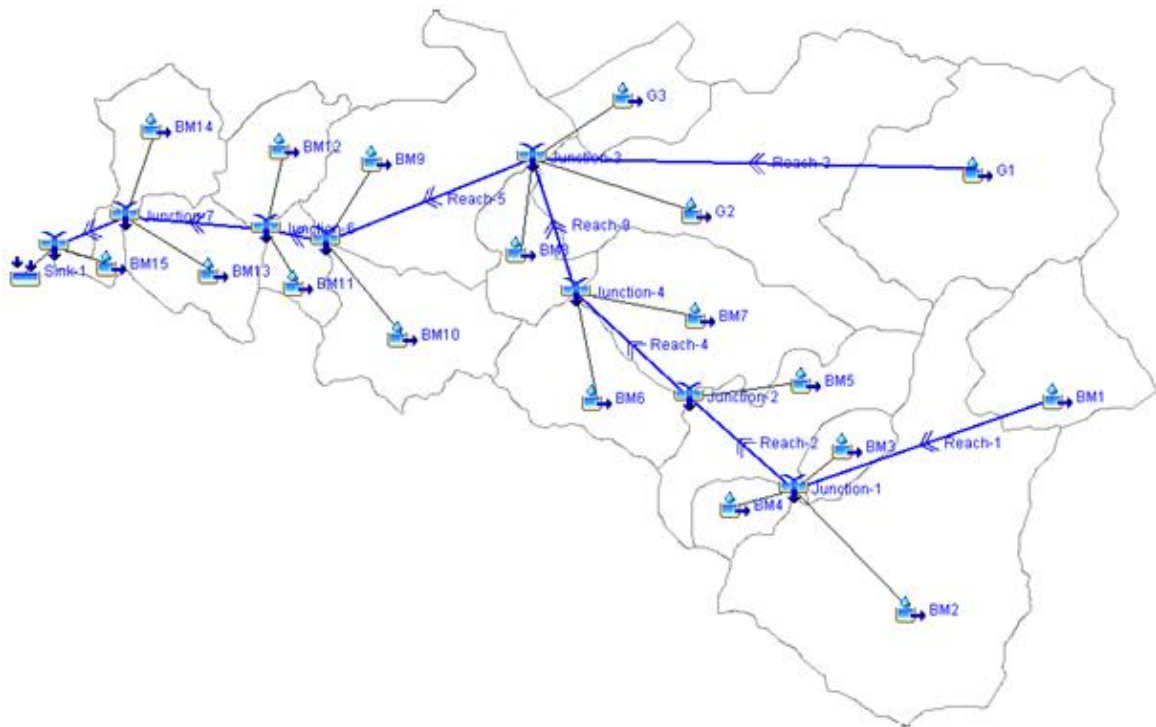


Fig. 6.8 – Schematizzazione bacino della Bevera di Molteno (modello Hec-Hms)

Il programma HEC-HMS permette l'esecuzione di una simulazione idrologica attraverso la specificazione di tre insiemi di dati (componenti idrologici):

1. *Basin Model*: rappresentazione fisica delle caratteristiche del bacino idrografico;
2. *Meteorologic Model*: dati meteorologici relativi alle precipitazioni e all'evapotraspirazione;
3. *Control specifications*: informazione temporali necessarie per la simulazione (finestra temporale, intervallo di calcolo, ecc.)

Il componente *Basin Model* permette di specificare:

- *Elementi idrologici*: sottobacini, invasi, confluenze, ecc.
- *Metodi di calcolo delle perdite di bacino*: perdita costante, SCS Curve Number, ecc.
- *Metodi di calcolo della trasformazione afflussi-deflussi*: idrogramma unitario di Clark, Cinematico, ecc.
- *Metodo di calcolo del deflusso a pelo libero nei corsi d'acqua*: Cinematico, del ritardo, Muskingum, ecc.

Il bacino della Bevera è stato quindi schematizzato attraverso l'impiego di 15 sottobacini e 8 confluenze che collegano altrettanti tratti del torrente (figura 6.8). Come metodo di calcolo per le perdite è stato scelto il metodo SCS-CN, il modello dell'idrogramma unitario di Clark è stato utilizzato per il calcolo della trasformazione afflussi-deflussi, e infine, per il calcolo del deflusso nella rete idrografica è stato impiegato il metodo Muskingum.

Il metodo SCS Curve Number è stato sviluppato dal “Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture”. Il deflusso superficiale è calcolato in base alla differenza tra precipitazioni e perdite, inglobando però in un unico termine di perdita anche fattori diversi dall’infiltrazione come intercettazione vegetale, evapotraspirazione, ecc. I parametri in ingresso, richiesti dal programma, per descrivere le perdite sono tre: *Initial Abstraction* (perdita iniziale), *CN* (parametro che dipende da tipo, copertura e tasso di umidità del suolo) e la *percentuale di superficie urbanizzata*. Il metodo SCS-CN calcola il volume della portata di deflusso con la seguente formula:

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

Dove:

Q = altezza di deflusso [mm]

P = altezza di pioggia [mm]

I = perdita iniziale [mm] pari a: $I = 0,2 \cdot S$

S = altezza d’acqua massima immagazzinabile nel terreno[mm] pari a:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

CN è il Curve Number. La procedura per la stima del CN consiste in:

1. scelta della classe tessiturale del terreno;
2. individuazione di un primo CN sulla base della classe tessiturale del terreno considerando anche l’uso del suolo,
3. correzione del primo CN considerando le condizioni di umidità del suolo antecedenti all’evento.

Ci si può avvalere, in tutti i passaggi, di valori tabulati, ovvero abachi, per individuare un valore di primo tentativo per il CN.

Il metodo dell’idrogramma unitario di Clark tiene conto dell’effetto di propagazione e di laminazione a cui è sottoposto il deflusso superficiale quando si sposta attraverso il bacino per arrivare alla sezione di chiusura. E’ un modello lineare e integrato. Si basa su due parametri: *Time of Concentration, Tc*, (espresso in ore) tempo impiegato dalla particella più lontana dalla sezione di chiusura per raggiungere la stessa e *Storage Coefficient, n*, (sempre espresso in ore, variabile tra 1 e 3 in base all’estensione e alla pendenza media del sottobacino) che tiene conto dell’effetto di immagazzinamento temporaneo del sottobacino, schematizzandolo come un serbatoio lineare. La forma dell’idrogramma è quella di Clark. Il

tempo di concentrazione, in seguito ai processi di taratura, è stato calcolato secondo la formula di Pasini:

$$T_c = \frac{0,108}{\sqrt{i_m}} (A_b \cdot L_a)^{1/3}$$

Dove:

A_b = Area del sottobacino [km²]

i_m = pendenza media dell'asta principale del bacino [-]

L_a = lunghezza dell'asta principale del sottobacino [km]

Il metodo di Muskingum, infine, si basa sul semplice approccio di conservazione della massa per la propagazione dell'onda lungo il corso d'acqua attraverso la distinzione del volume invasato tra due sezioni del corso d'acqua in due parti: la prima è quella occupata da un prisma la cui superficie superiore è parallela alla linea di fondo e che passa per la linea della superficie libera sulla sezione di valle; la seconda parte è costituita da un cuneo, limitato dalla superficie congiungente la superficie libera della sezione di monte con quella di valle, nonché dalla superficie superiore del prisma precedentemente considerato (Fig. 6.9). Mentre il volume a forma di prisma avrà sempre un contributo positivo al volume totale invasato, il cuneo può assumere valore positivo o negativo a seconda che si consideri la fase di accrescimento o quella di decrescita dell'onda di piena.

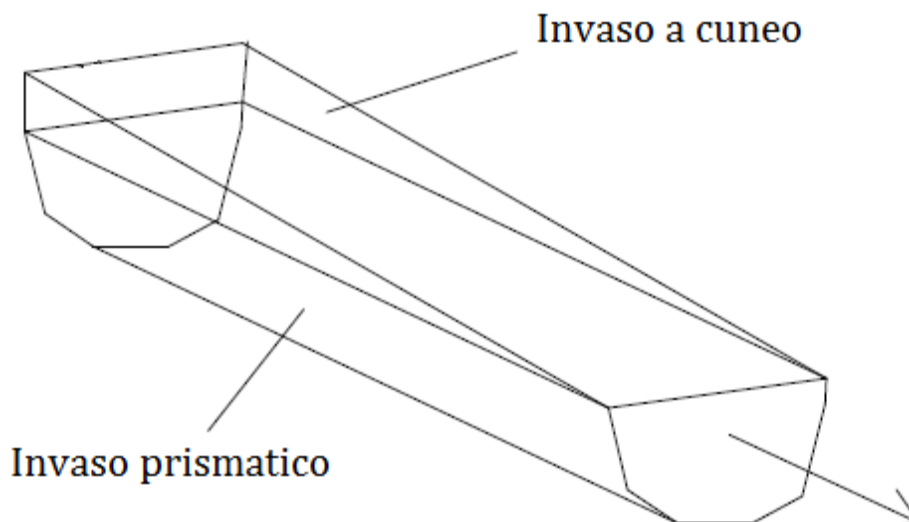


Fig. 6.9 - Volumi considerati nel metodo Muskingum

L'ipotesi di base consiste nel considerare il volume invasato proporzionale ad una combinazione lineare delle portate in ingresso e in uscita dal tratto considerato.

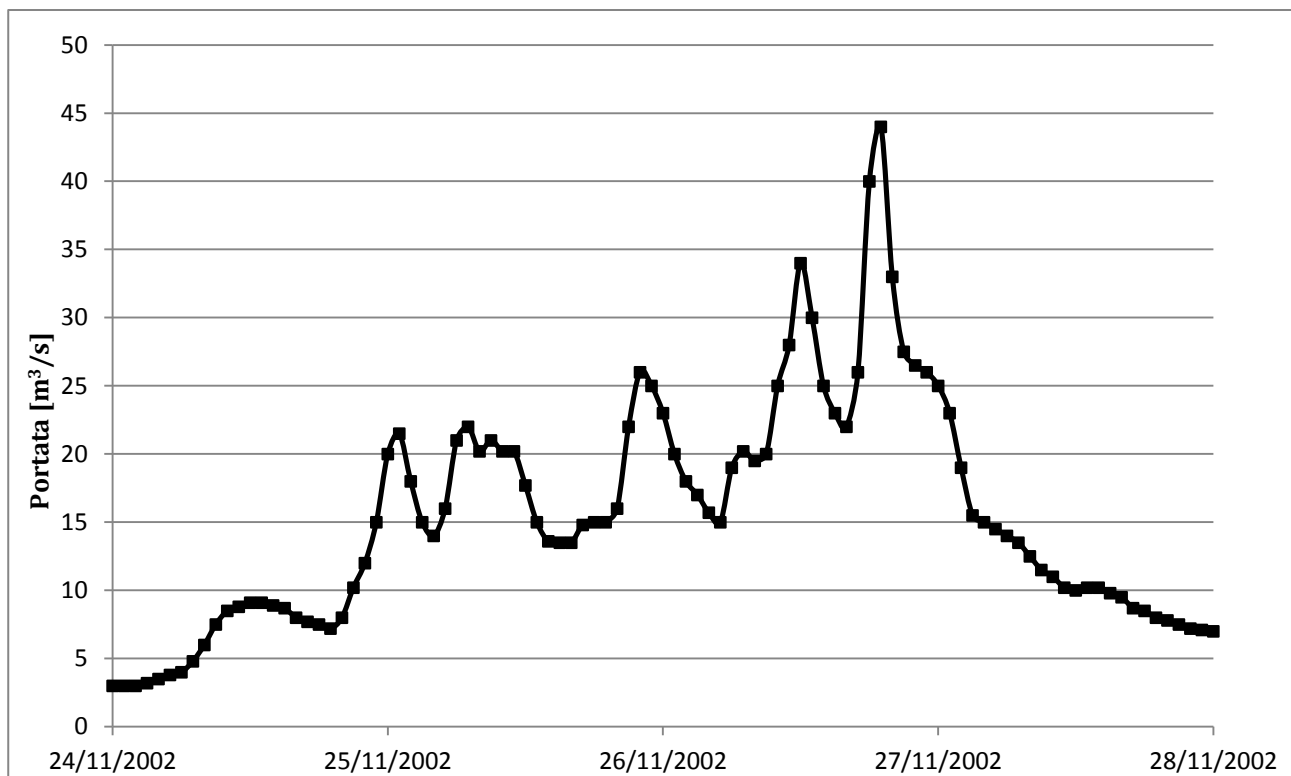


Fig. 6.11 - Portate osservate a Molteno (novembre 2002)

I processi taratura hanno fornito i seguenti valori (Tab. 6.2 e 6.3) dei parametri di calcolo relativi ai metodi dell'idrogramma unitario di Clark (T_c e n) e di Muskingum (K e X).

Nome sottobacino	A_b [km ²]	L_a [km]	i_m [-]	T_c	n
G1	5.06	3.89	0.13	0.80	1
G2	5.83	4.98	0.02	2.24	3
G3	1.24	2.17	0.05	0.65	1
BM1	2.17	1.80	0.15	0.44	1
BM2	7.87	4.89	0.07	1.37	2
BM3	0.60	0.71	0.02	0.61	1
BM4	0.58	0.97	0.02	0.69	1
BM5	2.16	2.15	0.04	0.94	3
BM6	1.65	1.86	0.02	1.14	3
BM7	2.32	2.11	0.01	1.73	3
BM8	1.02	1.89	0.01	1.14	2
BM9	3.27	2.97	0.01	2.30	3
BM10	2.18	2.81	0.04	1.04	1
BM11	0.62	0.92	0.02	0.63	1
BM12	1.24	1.24	0.02	0.82	1
BM13	1.39	1.91	0.02	1.06	3
BM14	1.40	1.56	0.03	0.86	1
BM15	0.33	1.13	0.02	0.55	1

Tab. 6.2 - Parametri in ingresso del modello di Clark

Nome tratto	K	X
Reach 1	0.57	0
Reach 2	0.25	0
Reach 3	0.58	0
Reach 4	0.22	0
Reach 5	0.35	0
Reach 6	0.11	0
Reach 7	0.22	0
Reach 8	0.13	0
Reach 9	0.22	0

Tab. 6.3 - Parametri in ingresso del modello di Muskingum

Nella figura seguente (figura 6.11) vengono mostrati i risultati delle simulazioni di tentativo effettuate al variare dei parametri in ingresso per il calcolo delle perdite idrologiche.

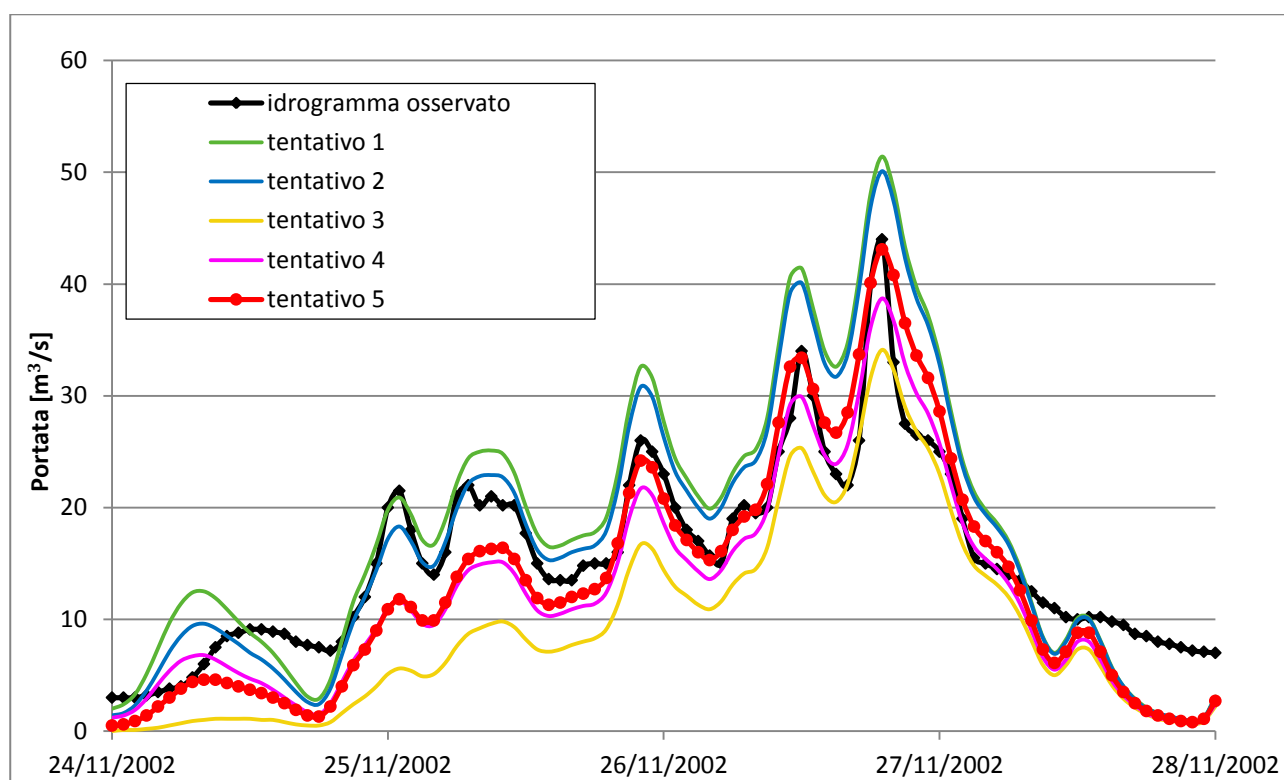


Fig. 6.12 - Taratura CN

In tabella 6.4 sono riportati i valori di tentativo assunti per le varie simulazioni. Il processo di taratura manuale ha quindi individuato il modello riferito al “tentativo 5” come quello meglio rappresentativo del comportamento idrologico del bacino della Bevera.

Nome sottobacino	CN _{II} *	% Urb	CN _{II(urb)} **	CN _{I(urb)} ***	CN _I ****	% Urb	CN _{I/II(urb)} *****
BM1	55	7	56	35	34	7	46
BM10	60	33	65	44	39	33	54
BM11	68	37	71	50	47	37	60
BM12	68	31	70	50	47	31	60
BM13	64	26	67	46	43	26	56
BM14	70	13	71	50	49	13	60
BM15	64	35	68	47	43	35	57
BM2	67	27	69	48	46	27	59
BM3	63	29	66	45	42	29	56
BM4	58	17	61	40	37	17	50
BM5	66	20	68	47	45	20	57
BM6	63	24	66	45	42	24	55
BM7	72	34	73	53	52	34	63
BM8	69	46	72	52	48	46	62
BM9	75	38	75	56	56	38	65
G1	59	14	61	40	38	14	51
G2	67	33	70	49	46	33	59
G3	76	0	76	57	57	0	67

Tab. 6.4 - Valori di CN di 1°,2°,3°, 4° e ultimo tentativo

* : Valori di CN non comprensivi delle aree urbanizzate, in condizioni iniziali standard di umidità del suolo (classe AMC: II).

** : Valori di CN comprensivi delle aree urbanizzate, in condizioni iniziali standard di umidità del suolo (classe AMC: II).

*** : Valori di CN comprensivi delle aree urbanizzate, in condizioni iniziali di umidità del suolo asciutte (classe AMC: I).

**** : Valori di CN non comprensivi delle aree urbanizzate, in condizioni iniziali di umidità del suolo asciutte (classe AMC: I).

***** : Media dei valori di CN_{I(urb)} e CN_{II(urb)}.

Il modello riesce a cogliere molto bene i tempi in cui si realizzano i picchi maggiori di portata. Il volume dell'idrogramma simulato sottostima il volume reale di circa il 13%, applicando però una traslazione verticale dell'idrogramma di 2,5 m³/s per tenere in considerazione la portata transitante all'istante iniziale sulla Bevera questa differenza si ridurrebbe al 3%.

Il dato più interessante che è possibile osservare, ai fini della stesura della regola di gestione per l'invaso di Inverigo, è il ritardo che intercorre tra il picco di pioggia e il picco di portata: dall'osservazione dell'evento reale esso risulta essere di circa 2 ore.

- E' perciò possibile fare riferimento alle previsioni/osservazioni di pioggia per attuare la manovra di chiusura delle paratoie, che quindi dovrà avvenire in contemporanea o poco dopo il verificarsi del picco di pioggia.

L'indagine idrologica effettuata sul bacino della Bevera di Molteno rappresenta certamente un valido punto di partenza per ulteriori indagini; approfondimenti potrebbero essere fatti in merito allo sviluppo di più dettagliati modelli afflussi/deflussi dei sottobacini di monte conseguente, magari, ad uno studio approfondito delle dinamiche atmosferiche e meteorologiche del territorio in oggetto.

7. Considerazioni conclusive

L'obiettivo dell'assetto di progetto definito per il tratto di fiume Lambro che va dal lago di Pusiano al Parco di Monza è quello di difendere dalle periodiche e frequenti esondazioni le numerose e, generalmente ampie, aree con grado di sicurezza insufficiente che si trovano lungo il suo corso, tra le quali assumono particolare rilevanza, per livello di urbanizzazione e tipo di insediamenti, quelle all'interno dei centri urbani di Monza e di Milano, ove si verificano con grande frequenza allagamenti molto ampi e diffusi. Accanto a queste particolari situazioni di criticità non si possono trascurare gli estesi allagamenti che interessano i comuni compresi tra Monza e Milano (Cologno Monzese, Brugherio e Sesto San Giovanni) e quelli subito a valle di Milano (Peschiera Borromeo, San Giuliano Milanese e San Donato Milanese).

Nel corso degli anni è sicuramente emersa la necessità e l'importanza di una logica di difesa idraulica che individui, come soluzione per il contenimento delle piene del fiume Lambro, l'aumento progressivo della capacità di laminazione dello stesso. In tale ottica, nel presente lavoro di tesi, l'attenzione è stata focalizzata sullo studio del sistema di opere di laminazione sul fiume Lambro e i suoi affluenti considerate nell'assetto di progetto esaminato dall'Autorità di Bacino del Po.

Durante lo svolgimento, attraverso la creazione di un modello atto a riprodurre il comportamento idraulico del fiume lungo il dominio di interesse, è stato possibile analizzare in dettaglio il contributo dato dai singoli interventi proposti nonché il beneficio conseguente ad una sinergica attivazione degli invasi, allo scopo di redigere il piano integrato di gestione.

Ad ogni modo, dalla consultazione di studi svolti in passato è emersa la volontà di ricercare ulteriori aree adatte alla realizzazione di un'espansione controllata del fiume e dei suoi affluenti; in aggiunta alle opere analizzate, come anticipato nel capito relativo allo Studio di fattibilità, gli enti preposti alla pianificazione idraulica hanno preso in considerazione i seguenti interventi:

- l'intervento di laminazione sul torrente Gandaloglio, previsto nel Progetto Preliminare di sistemazione del fiume Lambro a monte di Villasanta, di cui oggi si dispone di progettazione esecutiva, è costituito da un'area ad allagamento controllato compresa tra il torrente Gandaloglio e il Fosso del Pascolo, a monte del comune di Molteno, atta a circoscrivere i fenomeni di esondazione in un'area definita e controllabile. Tale opera permetterebbe di ridurre l'apporto del Gandaloglio dagli attuali 22 m³/s complessivi, a circa 10 m³/s in ingresso alla Bevera di Molteno, riducendo quindi la portata della Bevera a valle del centro abitato di Molteno dagli attuali 48 m³/s a 34 m³/s nell'assetto di progetto.

- La cassa di espansione sul torrente Bevera di Renate, di cui, anche in questo caso, si dispone di progetto esecutivo, è localizzata poco a monte della confluenza in Lambro, in frazione Fornaci. La cassa si compone di due comparti con funzionamento sequenziale e interessa un'area di circa 8 ha, compresa tra la quota 235 m s.l.m. e la quota 242 m s.l.m. circa. Il volume complessivo previsto è di circa 500'000 m³, in grado di ridurre la portata al colmo per eventi duecentennali in ingresso nel Lambro, dagli attuali 33m³/s a 16 m³/s nell'assetto di progetto.

Sebbene entrambi i progetti siano arrivati alla fase esecutiva, la loro realizzazione, ad oggi, risulta incerta.

Un'alternativa efficace potrebbe prevedere l'utilizzazione di alcune aree del Parco di Monza come zone di spandimento indotto del fiume in caso di piena. L'induzione all'esonazione verrebbe provocata attraverso la riattivazione ed il potenziamento di rogge già esistenti e la restrizione locale e temporanea di alcuni punti dell'alveo; i volumi d'acqua sarebbero contenuti entro apposite linee arginali. L'impatto ambientale sarebbe minimo, legato soprattutto alla formazione delle linee d'argine ed alle opere di restringimento d'alveo.

Bibliografia

C. LOTTI & ASSOCIATI, Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona (settembre 2003)

Parco Regionale della Valle del Lambro (PRVL), Area di laminazione di Inverigo, Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio Con Colzano, Relazione Tecnica (novembre 2012)

Parco Regionale della Valle del Lambro (PRVL), Progetto definitivo, Opere di ristrutturazione del Cavo Diotti in comune di Merone (CO), Relazione Idrologica – Idraulica (luglio 2009)

Parco Regionale della Valle del Lambro (PRVL), Studio di fattibilità, Utilizzo della miniera di Brenno in comune di Costa Masnaga (LC) quale vasca di laminazione, Relazione Tecnica (febbraio 2005)

Parco Regionale della Valle del Lambro (PRVL), Progetto Preliminare, Utilizzazione della Cava di Brenno quale vasca di laminazione del torrente Bevera di Molteno – Comune di Costa Masnaga (LC), Relazione Descrittiva – Introduttiva e di Fattibilità Idraulica, DOC. 1.1 (22 luglio 2010)

BARRACO D., Bilancio idrologico e ricerca di una regola operativa ottimale del Lago di Pusiano (CO), Tesi di Laurea Magistrale (ottobre 2012)

Autorità di Bacino del fiume Po, Caratteristiche del bacino del fiume Po e primo esame dell'impatto ambientale delle attività umane sulle risorse idriche (aprile 2006)

Autorità di Bacino del fiume Po, Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi, Bacino del Lambro

Gruppo Ecologico “Amici del Lambro” Sovico, Il Lambro: storia di un fiume (ottobre 2010)

Decreto Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, Criteri per la redazione del progetto di gestione degli invasi, ai sensi dell'articolo 40, comma 2, del decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152, e successive modifiche ed integrazioni, nel rispetto degli obiettivi di qualità fissati dal medesimo decreto legislativo (30 giugno 2004)

Studio Croce, Studio Idrologico – Idraulico di supporto alla redazione del piano strutturale, comune di Montecatini Val di Cecina (dicembre 2009)

BECCIU G., PAOLETTI A., Fondamenti di Costruzioni Idrauliche, Editore UTET Scienze Tecniche, (2010)

US Army Corps of Engineers, HEC-RAS River Analysis System, User's Manual (gennaio 2010)

US Army Corps of Engineers, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual (gennaio 2010)

US Army Corps of Engineers, Hydrologic modeling system HEC-HMS - Technical manual, Version 3.4

US Army Corps of Engineers, Hydrologic modeling system HEC-HMS - User manual, Version 3.4

CIMA, Analisi Idraulica del bacino del torrente Aspio nei Comuni di Camerano, Osimo e Castelfidardo: RELAZIONE FINALE, Allegato 1: Descrizione del modello numerico MIKE 11 - HD del Danish Hydraulic Institute (DHI) Water & Environment (2008)

Appunti di idraulica (Metodo Muskingum), Stefano Pagliara

Appunti di Moto Vario a Superficie Libera, corso di Idraulica II, S. Franzetti, A. Guadagnini, F. Ballio (1999)

www.arpalombardia.it

www.progettolambro.it

www.altabrianza.org