



Comune di Ravenna
Servizio Tutela Ambientale e Territorio - U.O. Geologico

**VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE PRODOTTE SULLA SPIAGGIA E
SULLE LOCALITÀ BALNEARI LIMITROFE, DALLA MASSIMA PIENA
DEI FIUMI SAVIO, UNITI, LAMONE E TORRENTE BEVANO,
MEDIANTE ANCHE LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO
IDRAULICO NEI TRATTI OGGETTO DI STUDIO**

RELAZIONE



Prof. Ing. Armando Brath
*Ordinario di Costruzioni Idrauliche,
Marittime e Idrologia
Università di Bologna*

Febbraio 2018

Prof. Ing. Armando Brath
Studio di Ingegneria Civile e Ambientale
Via Spataro, 1 - 40134 Bologna
Sede operativa:
Via Bellinzona, 4 - 40135 Bologna
Tel. 051-6153945

Collaborazioni:
Dott. Luca Grimaldi

INDICE

1. PREMESSA	5
2. QUADRO DELLE CONOSCENZE PREGRESSE.....	7
3. STIMA DELLA SOLLECITAZIONE IDROLOGICA.....	13
4. SCENARI ADOTTATI NELLA MODELLAZIONE IDRAULICA.....	33
5. REVISIONE DELLE SCHEMATIZZAZIONI GEOMETRICHE DEI MODELLI ESISTENTI.....	37
6. MODELLAZIONE IDRAULICA NELLO SCENARIO DI ESONDAZIONI IMPEDITE	45
7. MODELLAZIONE NELLO SCENARIO DI ESONDAZIONI LIBERE.....	57
8. EFFETTI DELLE OPERE PRESENTI IN ALVEO NEI TRATTI TERMINALI DEI CORSI D'ACQUA	73

Elenco elaborati cartografici allegati

- Tav. 1 - Planimetria generale. Scala 1 : 100.000
- Tav. 2 - Planimetria di dettaglio. Scala 1 : 50.000
- Tav. 3 - Profili del pelo libero dei fiumi Ronco e Uniti per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=100 e 200 anni, nelle condizioni di esondazioni impedito e di esondazioni libere.
- Tav. 4 - Profili del pelo libero dei fiumi Montone e Uniti per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=100 e 200 anni, nelle condizioni di esondazioni impedito e di esondazioni libere.
- Tav. 5 - Profili del pelo libero del fiume Savio per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=100 e 200 anni, nelle condizioni di esondazioni impedito e di esondazioni libere.
- Tav. 6 - Profili del pelo libero del fiume Lamone per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=100 e 200 anni, nelle condizioni di esondazioni impedito e di esondazioni libere.
- Tav. 7 - Profili del pelo libero del torrente Bevano per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=100 e 200 anni, nelle condizioni di esondazioni impedito e di esondazioni libere.
- Tav. 8 - Profili del pelo libero dei Fiumi Uniti per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=100 e 200 anni in condizioni di esondazione libera, in assenza ed in presenza dei capanni da pesca.
- Tav. 9 - Profili del pelo libero del fiume Savio per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=100 e 200 anni in condizioni di esondazione libera, in assenza ed in presenza dei capanni da pesca.
- Tav.10 - Profili del pelo libero del fiume Lamone per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=100 e 200 anni in condizioni di esondazione libera, in assenza ed in presenza dei capanni da pesca.
- Tav.11 - Profili del pelo libero del torrente Bevano per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=100 e 200 anni in condizioni di esondazione libera, in assenza ed in presenza dei capanni da pesca.

1. PREMESSA

Il Comune di Ravenna ha recentemente ritenuto necessario acquisire conoscenze specifiche sugli effetti indotti dalle massime piene dei fiumi Savio, Uniti (Ronco e Montone), Lamone e torrente Bevano sul territorio di propria competenza.

Per il Comune di Ravenna rivestiva particolare interesse la valutazione degli effetti degli ostacoli presenti nelle golene fluviali, quali chiuse, briglie, prese, ponti, capanni da pesca ed altri, che possano comunque in qualche modo comportare un aumento del livello dell'acqua all'interno della singola asta fluviale. Il Comune era anche interessato a sviluppare un'analisi che mettesse in evidenza eventuali tratti ove possa ritenersi più probabile il verificarsi di un sormonto arginale della portata in esame, in modo tale da definire comunque il livello massimo dell'acqua all'interno dell'alveo raggiungibile alla foce, ma tenendo conto dell'effetto delle esondazioni a monte.

Stante la consapevolezza delle problematiche di cui sopra, il Servizio Tutela Ambiente e Territorio - U.O. Geologico del Comune di Ravenna ha ritenuto di procedere all'affidamento di un incarico professionale specialistico per l'esecuzione di uno studio sulla "Valutazione delle conseguenze prodotte sulla spiaggia e sulle località balneari limitrofe, dalla massima piena dei fiumi Savio, Uniti, Lamone e torrente Bevano, mediante anche la valutazione del rischio Idraulico nei tratti oggetto di studio". Detto incarico è stato conferito allo scrivente professionista in data 31 ottobre 2017.

Il presente elaborato costituisce la relazione finale sulle attività svolte. La relazione è corredata da alcuni elaborati cartografici, che sono da considerarsi allegati alla stessa.

Le attività hanno avuto inizio a seguito della comunicazione dell'avvenuta efficacia della determina di affidamento, avvenuta in data 27 ottobre 2017. Esse hanno previsto la raccolta della cartografia, in parte fornita dal Comune di Ravenna in parte reperita presso la Regione Emilia-Romagna. Sono stati poi acquisiti i rilievi topografici resi disponibili dall'Agenzia Regionale per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile dell'Emilia-Romagna, sede di Ravenna, le stime delle onde di piena per assegnati tempi di ritorno, derivanti dagli studi a suo tempo condotti dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, i modelli matematici esistenti per la simulazione della propagazione delle piene nei corsi d'acqua di interesse, messi a disposizione dal Servizio Area Romagna (ex Servizio Tecnico di Bacino Romagna) dell'Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile della Regione Emilia-Romagna, sede di Rimini.

2. QUADRO DELLE CONOSCENZE PREGRESSE

Il quadro conoscitivo sulla situazione di rischio idraulico del territorio di interesse, disponibile all'epoca della redazione del presente studio, si compone di vari contributi. Vanno in primo luogo citati gli studi svolti dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, istituita con L.R. n.14 del 29/03/1993, in attuazione della Legge n.183/1989 e 18/05/1989. Il territorio di competenza dell'Autorità, oggi soppressa, comprendeva sette bacini principali: il Lamone, i Fiumi Uniti, il Canale Candiano, il Bevano, il Savio e il Rubicone. Quindi tutti i bacini di interesse per il presente studio ricadono in tale territorio. L'Autorità di bacino ha svolto numerosi indagini, studi e attività conoscitive, la cui prima finalizzazione di sintesi si è avuta con la redazione nel settembre 1999 del "Piano Straordinario per il rischio idrogeologico" (PAI). Tale Piano, previsto dal D. L. n. 180 del 11 giugno 1998, convertito in Legge n. 267 del 3 agosto 1998, prevedeva l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico, stabilendo anche norme di salvaguardia e programmi di intervento per la mitigazione del rischio.

Successivamente, è stato redatto il "Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico dei Bacini Regionali Romagnoli", adottato in forma di progetto fin dal 27 aprile del 2001 ed approvato dalla Giunta Regionale il 17 marzo 2003 (DGR 350/2003). Tale piano è stato oggetto di successive varianti, soprattutto di carattere locale ma in qualche caso anche di carattere generale. Per quanto riguarda l'assetto della rete idrografica, fra queste ultime varianti spicca, per importanza, la "Variante cartografica e normativa al Titolo II: Assetto della rete idrografica", approvata dalla Giunta Regionale il 19 dicembre 2011 (DGR 1877/2011).

L'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli è stata soppressa con DM 25/10/2016. Infatti, con la legge 152/2006 il territorio di competenza dell'Autorità, è stato ricompreso all'interno del Distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale. Con la legge 221 del 28/12/2015 (collegato ambientale alla Legge di Stabilità 2016), unitamente alle AdB Reno e Marecchia-Conca, il territorio di competenza è stato poi inserito nel Distretto Padano.

Di fatto l'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli ha continuato a operare come "Unit of Management" (UoM 081 - Unità di Gestione, ambito territoriale di riferimento) nell'ambito del Distretto dell'Appennino Centrale e poi del Distretto Padano, fino al 17 febbraio 2017. In tale giorno, è entrato in vigore il D.M. 25 ottobre 2016 (G.U n. 27 del 2 febbraio 2017), che sopprime le Autorità di bacino nazionali, interregionali e regionali e disciplina l'attribuzione e il trasferimento del personale e delle risorse strumentali e finanziarie alle Autorità di bacino distrettuali.

Come è noto, nelle more dell'istituzione delle Autorità di Distretto, le Autorità di Bacino Nazionali hanno provveduto alla redazione dei Piani di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), strumento di pianificazione relativo alla valutazione e gestione del rischio di alluvioni previsto dalla Direttiva Europea 2007/60/CE (c.d. Direttiva Alluvioni), recepita nell'ordinamento italiano con il D.Lgs. 49/2010. Per quanto riguarda il territorio romagnolo, le attività svolte nell'ambito della redazione del PGRA attualmente vigente sono state quindi svolte all'interno del Distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale.

Il 3 marzo 2016, il Comitato Istituzionale Integrato delle Autorità di Bacino nazionali con Delibera n. 235 ha approvato i Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) realizzati dalle UoM del Distretto idrografico Appennino Settentrionale, tra cui Reno (UoM ITI021), Regionali Romagnoli (UoM ITR081), Marecchia-Conca (UoM ITI01319).

In base al quadro descritto, i principali elementi conoscitivi di interesse per il presente studio possono essere estratti dai seguenti strumenti di pianificazione:

- "Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico dei Bacini Regionali Romagnoli", adottato con DGR 350/2003;
- "Variante cartografica e normativa al Titolo II: Assetto delle rete idrografica", approvata con DGR 1877/2011;
- "Piano di Gestione del Rischio di Alluvione (PGRA) del Distretto dell'Appennino Centrale", approvato dal CI con Delibera 235/2016.

A questi si aggiungono alcuni studi specialistici, focalizzati sugli aspetti della sicurezza idraulica dei corsi d'acqua romagnoli, realizzati per conto dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli dallo scrivente professionista:

- "Studi idraulici propedeutici alla realizzazione di casse di espansione in alcuni dei corsi d'acqua principali della Romagna", redatto nell'ottobre 2005 e avente per oggetto i fiumi Savio, Ronco e Montone.
- "Valutazione delle possibilità di laminazione delle piene del fiume Lamone a monte del tratto arginato", redatto nell'ottobre 2010.

Il quadro del rischio idraulico, delineato dagli strumenti di pianificazione esistenti, evidenzia situazioni di importante e diffuso rischio idraulico per il territorio ravennate. Dalla Figura 1 e dalla Figura 2, estratte dalla Variante al Piano del 2011, si nota infatti come un'ampia parte del territorio ravennate sia considerata a rischio di esondazione.

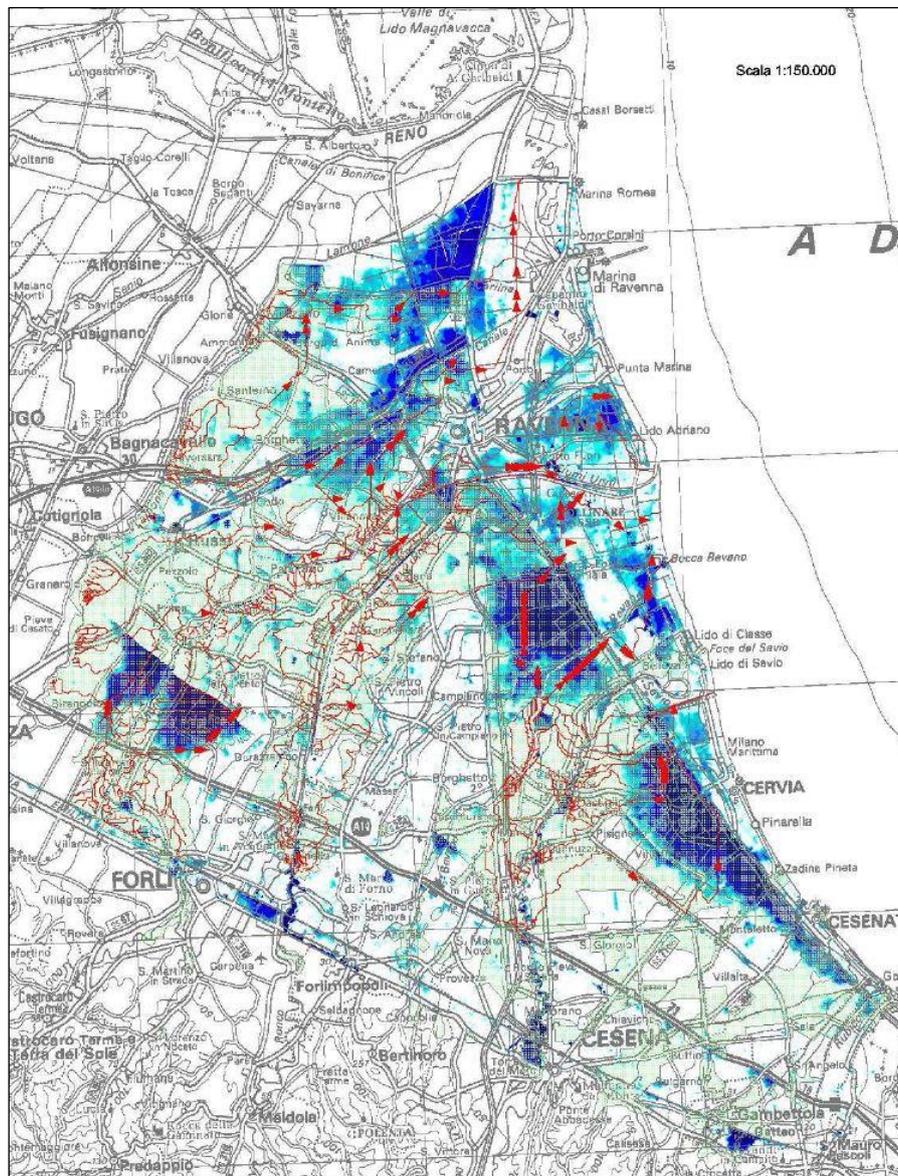


Figura 1 - Estratto dalla Variante al Piano del 2011. Quadro dei rischi idraulici di pianura: in colorazione azzurra le aree di accumulo dei volumi di esondazione, in colorazione rossa i percorsi di possibili esondazioni per sormonto lungo i corsi d'acqua Lamone, Montone, Ronco, Uniti, Bevano e Savio.

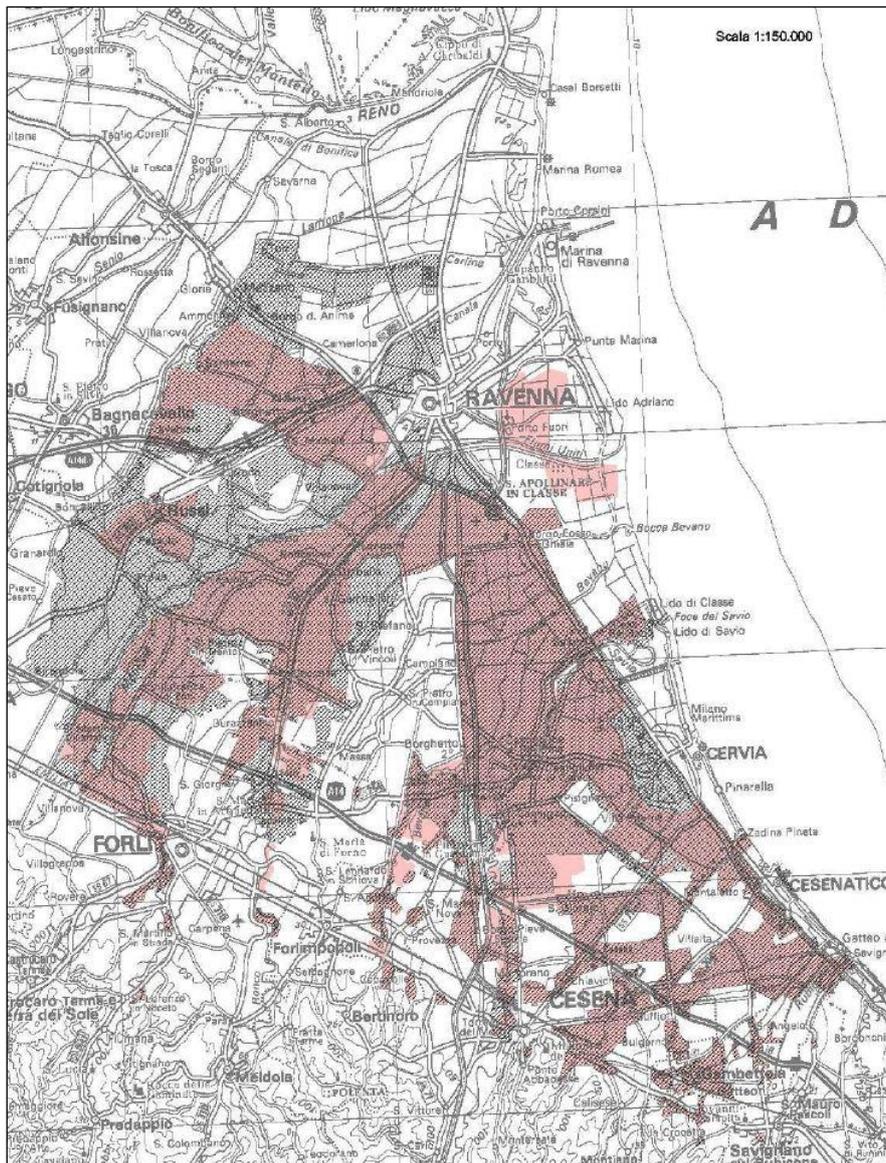


Figura 2 - Estratto dalla Variante al Piano del 2011. Perimetrazione delle aree a rischio di inondazione (in rosa secondo piano vigente, in tratteggio secondo la variante).

Ad analoghe conclusioni si perviene analizzando la cartografia del Piano di Gestione del Rischio di Alluvione attualmente vigente. Come noto, in ottemperanza al D.Lgs. 49/2010, con il quale è stata recepita nell'ordinamento nazionale la Direttiva Europea 2007/60 (Direttiva Alluvioni), le mappe di pericolosità da alluvione riportano (art.6 comma2) la perimetrazione delle aree geografiche che potrebbero essere interessate da alluvioni, secondo i seguenti scenari:

- a) alluvioni rare di estrema intensità: tempo di ritorno fino a 500 anni dall'evento (bassa probabilità);
- b) alluvioni poco frequenti: tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (media probabilità);
- c) alluvioni frequenti: tempo di ritorno fra 20 e 50 anni (elevata probabilità).

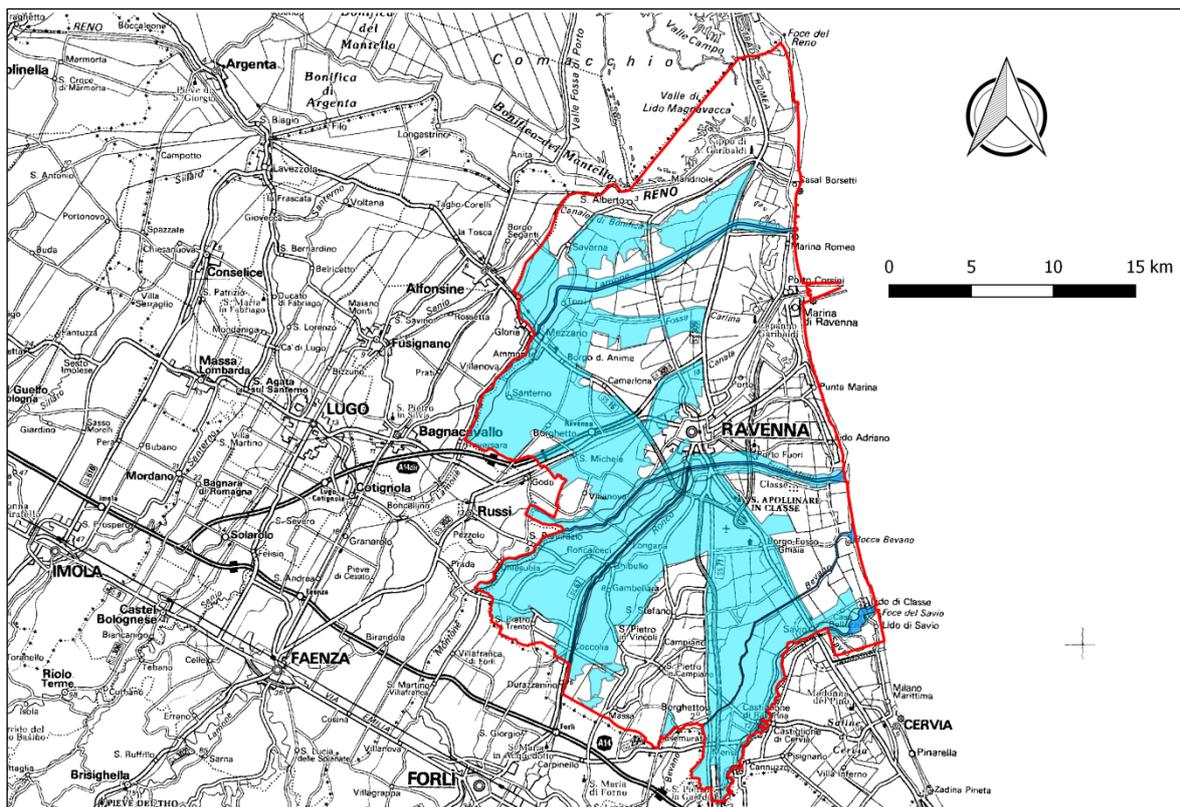


Figura 3 - Aree ad elevata (in colorazione scura) e a media (in colorazione chiara) probabilità di inondazione nel territorio romagnolo, per esondazioni dal reticolo idraulico principale, secondo il PGRA vigente.

Le mappe di pericolosità da alluvione sono state predisposte sia con riferimento alle esondazioni che possono essere prodotte dal reticolo dei corsi d'acqua principali sia con riferimento a quelle generate dalla rete idraulica secondaria di pianura, in pratica il reticolo artificiale dei canali di bonifica. La Figura 3 mostra come un'ampia parte del territorio comunale possa essere interessata da alluvioni derivanti dal reticolo principale, corrispondenti a uno scenario cosiddetto di media probabilità, ovvero da eventi di piena poco frequenti, con tempi di ritorno dell'ordine di 100-200 anni; invece, le aree potenzialmente interessate da alluvioni frequenti (20-50 anni di tempo di ritorno) sono limitate a strette fasce, adiacenti alle aste fluviali.

La Figura 4 mostra la pericolosità idraulica, valutata con riferimento alla rete artificiale di bonifica. In tal caso, ampia parte del territorio comunale è interessata da esondazioni per eventi frequenti (20-50 anni, scenario ad elevata probabilità), mentre, quando si passa a considerare lo scenario a media pericolosità, ovvero le aree che possono essere interessate da alluvioni poco frequenti, viene ad essere interessato l'intero territorio comunale.

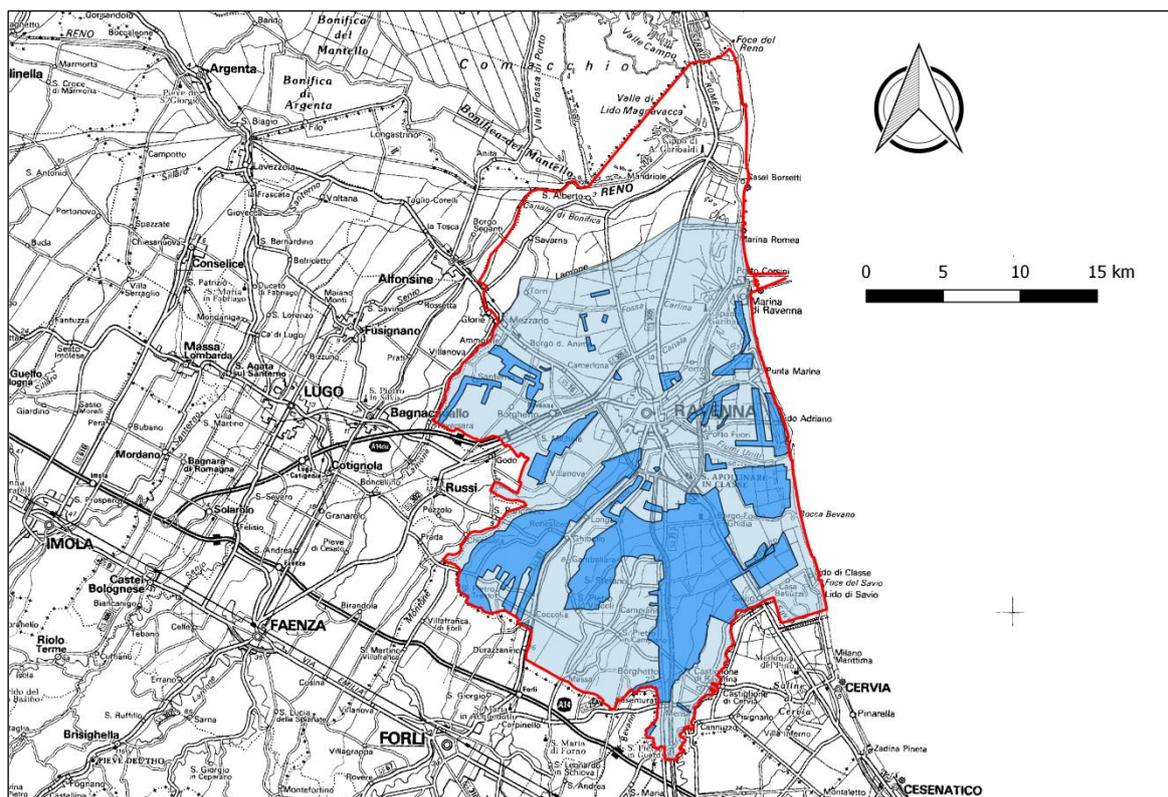


Figura 4 - Aree ad elevata (in colorazione scura) e a media (in colorazione chiara) probabilità di inondazione nel territorio romagnolo per esondazioni dal reticolo idraulico secondario di pianura (rete artificiale di bonifica), secondo il PGRA vigente.

3. STIMA DELLA SOLLECITAZIONE IDROLOGICA

Il presente incarico prevede la modellazione matematica della propagazione delle onde di piena di T=100, 150 e 200 anni dei corsi d'acqua di interesse a partire dalla via Emilia fino al mare, tenendo conto delle esondazioni che si verificano nei tratti a monte. A tal fine, risulta necessario disporre delle stime delle onde di piena di pari tempo di ritorno nelle sezioni dei corsi d'acqua in corrispondenza dell'attraversamento della via Emilia, che costituiscono la sollecitazione idrologica in input ai modelli matematici, ovvero la condizione al contorno all'estremità di monte dei modelli stessi.

Per definire tale sollecitazione idrologica, coerentemente con quanto stabilito nel capitolato dell'incarico, si è fatto riferimento alle stime delle onde di piena adottate nell'esistente pianificazione di bacino. Tale impostazione si può ritenere ragionevole in quanto rende possibile un confronto più omogeneo tra i risultati del presente studio e quelli della pianificazione di bacino (PAI, PGRA), che, come evidenziato nel disciplinare di incarico, "prevedono una allagabilità totale del territorio del Comune di Ravenna" (v. anche quanto discusso nel capitolo 2).

Di conseguenza, per caratterizzare le onde di piena dei vari corsi d'acqua in corrispondenza dei rispettivi attraversamenti della via Emilia, si è fatto riferimento alle stime delle onde desumibili dagli studi idrologici condotti in passato dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli. L'Autorità, nella prima fase delle sue attività pianificatorie, aveva infatti condotto studi di regionalizzazione idrologica che avevano portato a stimare sia le portate al colmo che le onde di piena, aventi assegnato valore del tempo di ritorno, nelle sezioni in cui erano poste stazioni di misura dell'ex Servizio Idrografico Italiano (poi Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale), stazioni poi passate sotto la competenza dell'Arpa, oggi Arpae (Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna), ovvero: per il fiume Lamone, a Sarna; per il torrente Marzeno (affluente del Lamone), a Rivalta; per il fiume Montone, a Castrocaro Terme; per il torrente Rabbi, affluente del fiume Montone, a Calanca (San Lorenzo in Noceto); per il fiume Ronco, a Meldola; per il fiume Savio, a San Vittore. Alle stime in dette sezioni, l'Autorità di Bacino aveva poi aggiunto le stime delle onde di piena di assegnato tempo di ritorno per altre sezioni di interesse, condotte sempre con metodi di regionalizzazione dell'informazione idrologica, e in particolare: il Lamone a Faenza, a valle della confluenza tra i fiumi Lamone e Marzeno, e il Montone a Forlì/Schiavonia, a valle della confluenza tra i fiumi Montone e Rabbi.

Il metodo di regionalizzazione, impiegato per la stima della portata al colmo di assegnato tempo di ritorno, è stato quello della portata indice. Detta metodologia consiste nell'individuare una regione idrologicamente omogenea nei riguardi della variabile idrologica di interesse, nel caso in esame il massimo annuale X della portata al colmo di piena. Si ipotizza poi che, nelle sezioni fluviali che fanno parte della regione omogenea, valga una distribuzione di probabilità della portata al colmo di piena che si può ritenere unica a meno di un fattore di scala. Indicando con μ_X detto fattore di scala (denominato portata indice), si ipotizza quindi che alla variabile adimensionale:

$$X' = \frac{X}{\mu_X} \quad (1)$$

possa essere attribuita, nella regione, un'unica distribuzione di probabilità, denominata curva di crescita.

La curva di crescita viene dedotta con metodi di inferenza statistica, elaborando l'insieme delle osservazioni disponibili nella regione medesima, preventivamente adimensionalizzate; a tal fine le osservazioni dei massimi annuali delle portate al colmo di piena relative a ciascuna stazione di misura vengono divise per la relativa portata indice. Quest'ultima viene normalmente assunta coincidente con la media dei massimi annuali X , e quindi stimata come media del campione delle osservazioni dei massimi annuali disponibile nella stazione stessa.

Negli studi condotti dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, per la caratterizzazione della curva di crescita, era stata utilizzata la legge di distribuzione di probabilità dei valori estremi a doppia componente, o TCEV, che ingloba in un'unica formulazione due diversi "meccanismi probabilistici" di formazione degli eventi estremi. L'idea che sta alla base del modello TCEV risiede nella constatazione che, frequentemente, nei campioni dei massimi annuali si incontrano un numero ridotto di osservazioni, denominati outliers, i cui valori risultano significativamente più elevati dei rimanenti. Si cerca di rappresentare tale comportamento ipotizzando che i valori della serie dei massimi annuali provengano da due distinte popolazioni, la prima rappresentativa degli eventi di piena ordinari e la seconda degli eventi straordinari, entrambe distribuite secondo il modello probabilistico di Gumbel ma con due distribuzioni fra loro diverse. Indicando con Λ_1 il numero annuo di eventi relativi alla componente ordinaria e con Λ_2 quello relativo alla componente straordinaria ($\Lambda_2 < \Lambda_1$) ed ancora con θ_1 e θ_2 i rispettivi valori medi ($\theta_2 > \theta_1$), ne risulta una funzione di distribuzione di probabilità dei massimi annuali X che è data dal prodotto di due distribuzioni di Gumbel, secondo la:

$$F_X(x) = \exp\left[-\Lambda_1 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\theta_1}\right) - \Lambda_2 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\theta_2}\right)\right] \quad (2)$$

Ne deriva una funzione di distribuzione di probabilità della variabile casuale X' (portata adimensionalizzata, cioè la curva di crescita), esprime la probabilità che il generico massimo annuale sia inferiore di un valore x assegnato, che assume la seguente espressione:

$$F_{X'}(x) = \exp\left[-\lambda_1 \cdot \exp(-x \cdot \eta) - \Lambda^* \cdot \lambda_1^{1/\Theta^*} \cdot \exp\left(-x \cdot \frac{\eta}{\Theta^*}\right)\right] \quad (3)$$

in cui:

$$\Theta^* = \frac{\theta_2}{\theta_1} \quad e \quad \Lambda^* = \frac{\lambda_1}{\lambda_1^{1/\Theta^*}} \quad (4)$$

$$\eta = \left[(\ln \lambda_1 + 0.57722) - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^j \cdot \Lambda^{*j}}{j!} \cdot \Gamma\left(\frac{j}{\Theta^*}\right) \right] \quad (5)$$

essendo $\Gamma(\cdot)$ la funzione gamma completa.

La curva di crescita viene quindi a dipendere da tre parametri, Λ^* , Θ^* e λ_1 , dai cui valori dipende anche il parametro η , secondo la formulazione riportata nell'equazione (5).

Negli studi di base, sviluppati dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli a supporto della pianificazione di bacino, è stata ritenuta plausibile l'ipotesi di considerare tutto il territorio occupato dai bacini compresi tra il Lamone a nord e il Savio a sud come un'unica regione omogenea; per essa sono stati ricavati quindi i seguenti valori dei parametri:

$$\begin{aligned} \Lambda^* &= 0.745 \\ \Theta^* &= 2.512 \\ \lambda_1 &= 9.50 \\ \eta &= 4.217 \end{aligned} \quad (6)$$

Adottando la distribuzione (3) con i valori dei parametri dati dalle (6), si ottengono, per i tempi di ritorno di interesse del presente studio (T=100, 150 e 200 anni), i fattori di crescita riportati in Tabella 1.

Tabella 1 – Fattore di crescita al variare del tempo di ritorno

T [anni]	x'(T)
100	3.100
150	3.342
200	3.514

Utilizzando i valori della curva di crescita riportati in Tabella 1, è possibile pervenire alla stima della portata di assegnato tempo di ritorno T, x(T), utilizzando un'apposita stima della portata indice m_x , attraverso la seguente relazione, che deriva dalla (1):

$$x(T) = x'(T) \cdot m_x \quad (7)$$

Per quanto riguarda la stima m_x della portata indice, nelle sezioni in cui si disponeva di un campione di osservazioni di adeguata numerosità, si è utilizzata la media dei massimi annuali delle portate al colmo; ciò in quanto, come dimostrato da Brath *et al.* (1989), 5-10 anni di stime dirette sono in genere sufficienti per fornire risultati migliori di quelli ottenibili con approcci indiretti. Tale circostanza si verifica per le seguenti stazioni: Lamone a Sarna, Ronco a Meldola e Savio a San Vittore. La stima della portata indice nelle rimanenti stazioni, e ovviamente anche nelle sezioni prive di misura, è stata condotta implementando due semplici modelli multiregressivi, aventi come variabili esplicative grandezze geomorfologiche e climatiche di acquisizione relativamente agevole, ed assumendo poi come portata indice la media delle portate indici stimate con le due formule.

Applicando la metodologia descritta, gli studi dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli hanno portato a stimare, per le sezioni fluviali in precedenza menzionate, le portate di assegnato tempo di ritorno, per T=100 e 200 anni riportate nella Tabella 2.

Tabella 2 – Stime delle portate al colmo per tempi di ritorno di interesse per le diverse sezioni fluviali.

Corso d'acqua e sezione	T=100 anni	T=150 anni	T=200 anni
Lamone a Sarna	474	511	537
Lamone a Faenza	907	978	1028
Marzeno a Rivalta	409	440	463
Montone a Castrocaro Terme	486	524	551
Montone a Forlì/Schiavonia	911	982	1032
Rabbi a Calanca	429	462	485
Ronco a Meldola	931	1004	1055
Savio a San Vittore	1174	1265	1330

Nel presente studio, il disciplinare di incarico prevede la valutazione degli effetti delle onde di piena aventi tempo di ritorno T=100, 150 e 200 anni, mentre le onde desumibili dagli studi dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli coprono solo i casi T=100 e 200 anni. Le stime di portata per T=150 anni non erano quindi precedentemente disponibili. Di conseguenza, esse sono state valutate appositamente per gli scopi del presente studio in tutte le sezioni di interesse, applicando la medesima metodologia di stima adottata negli studi dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli e in precedenza descritta. Nella medesima Tabella 2, ad integrazione delle stime relative a T=100 e T=200 anni già disponibili negli studi dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, sono quindi riportate anche le stime delle portate di tempo di ritorno relative a T=150 anni, che, come detto, sono state effettuate appositamente nel presente studio, applicando la medesima metodologia.

Per la definizione della forma dell'onda di piena, sempre negli studi condotti dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, è stato utilizzato l'approccio delle cosiddette curve di riduzione delle massime portate medie in assegnata durata. La curva di riduzione delle portate medie in assegnata durata è stata stimata sulla base dei dati sperimentali disponibili unicamente nelle tre sezioni del Lamone a Sarna, Ronco a Meldola e Savio a S.Vittore, per le quali sono disponibili più di 10 osservazioni dei massimi annui di portata media nella durata generica. Per le rimanenti stazioni è stata stimata indirettamente, implementando il modello stocastico proposto da Bacchi e Brath (1990) e tarandone l'unico coefficiente, ovvero la scala di fluttuazione, sulla base delle curve di riduzione empiriche disponibili in 18 stazioni idrometriche appenniniche, poste nel territorio che si

estende dall'Emilia alla Marche. Infine, per passare dalla curva di riduzione all'idrogramma, è stato utilizzato l'approccio proposto da Maione et al. (2000).

Sono state così ottenute le onde di piena relative a tutte le sezioni fluviali in precedenza indicate, che vengono riportate nelle figure seguenti (dalla Figura 5 alla Figura 12).

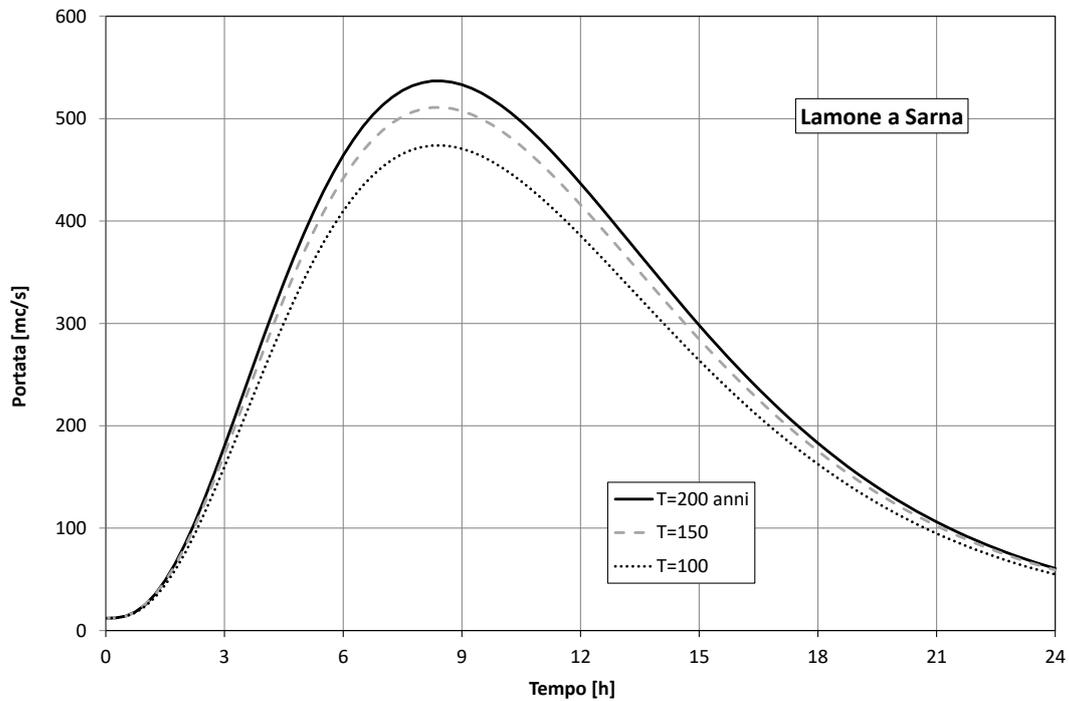


Figura 5 - Onde di piena di tempo di ritorno $T = 100, 150$ e 200 anni del fiume Lamone a Sarna (stime secondo metodologia AdB in base a regionalizzazione idrologica).

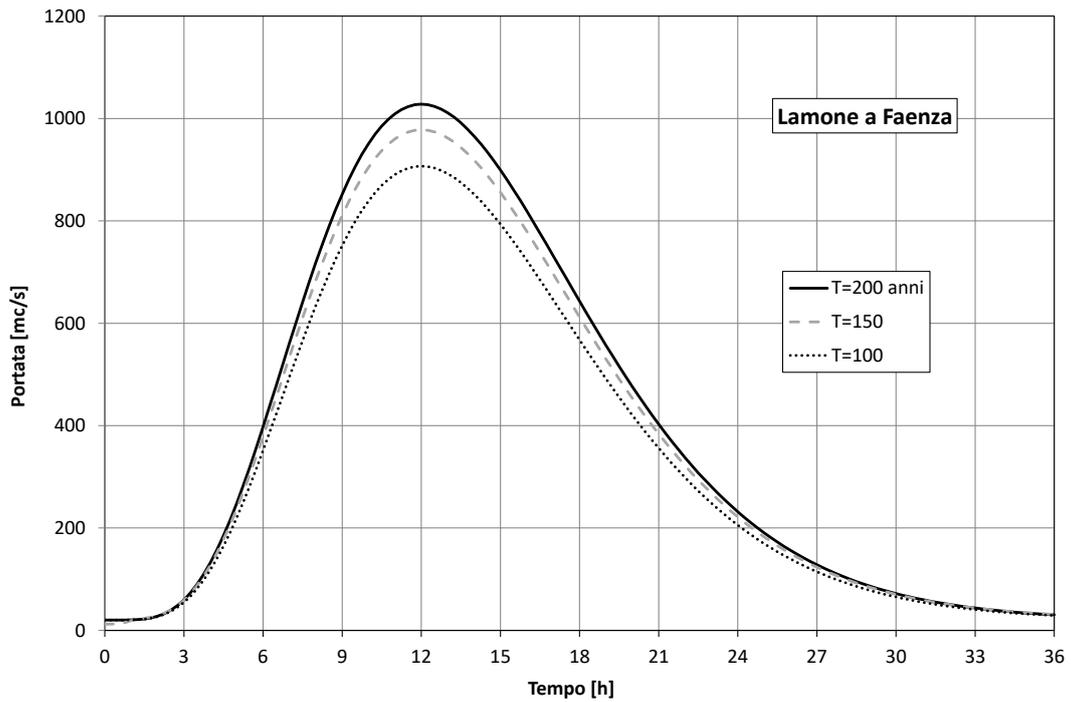


Figura 6 - Onde di piena di tempo di ritorno $T = 100, 150$ e 200 anni del Lamone a Faenza (stime secondo metodologia AdB in base a regionalizzazione idrologica).

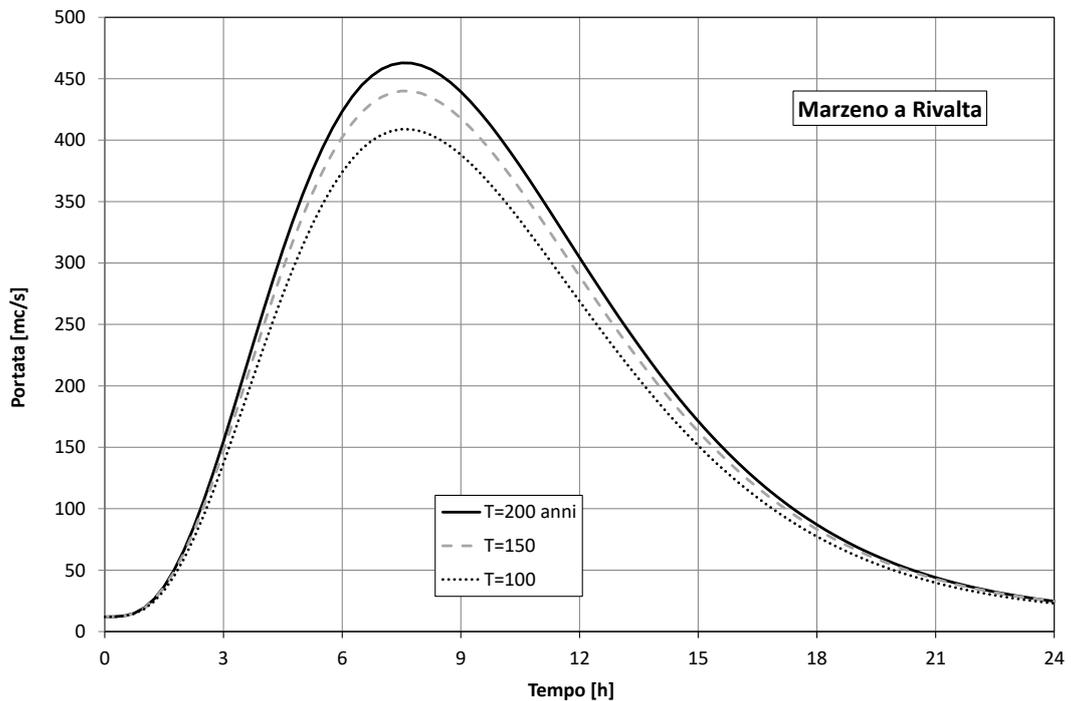


Figura 7 - Onde di piena di tempo di ritorno $T = 100, 150$ e 200 anni del torrente Marzeno a Rivalta (stime secondo metodologia AdB in base a regionalizzazione idrologica).

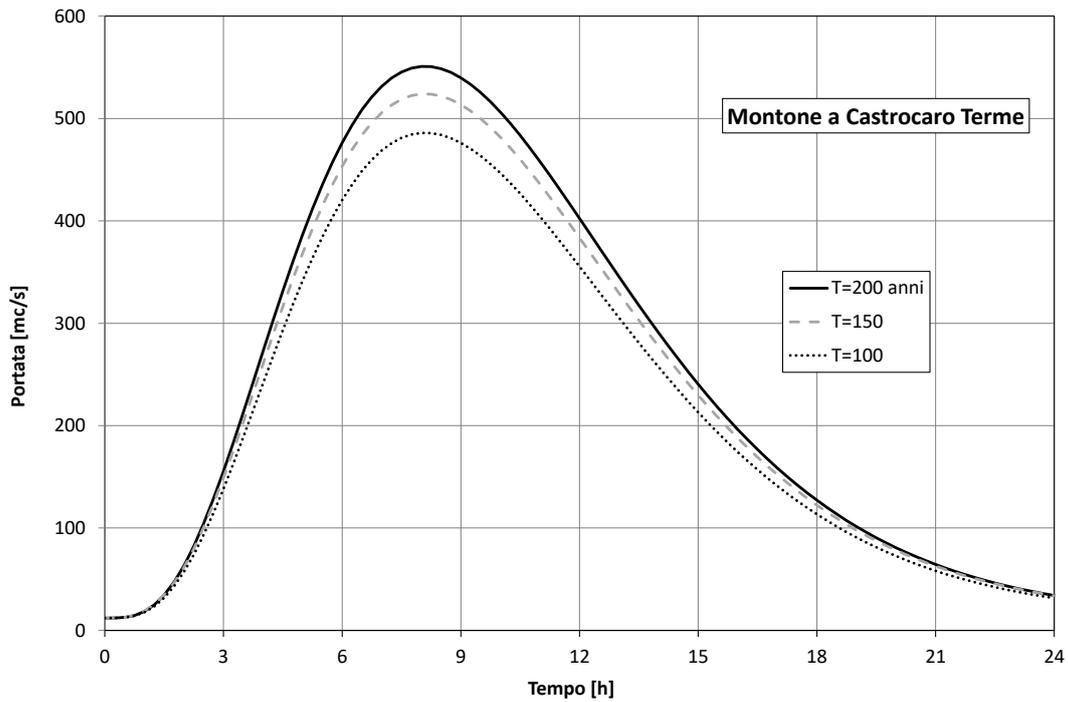


Figura 8 - Onde di piena di tempo di ritorno $T = 100, 150$ e 200 anni del fiume Montone a Castrocaro Terme (stime secondo metodologia AdB in base a regionalizzazione idrologica).

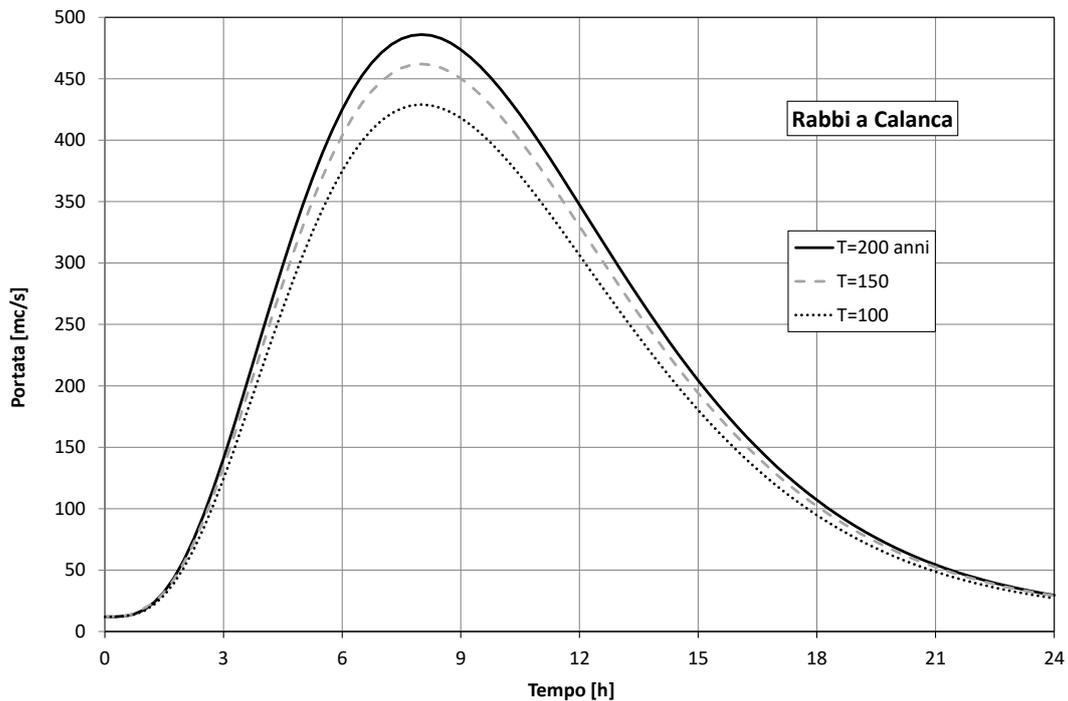


Figura 9 - Onde di piena di tempo di ritorno $T = 100, 150$ e 200 anni del fiume Rabbi a Calanca (stime secondo metodologia AdB in base a regionalizzazione idrologica).

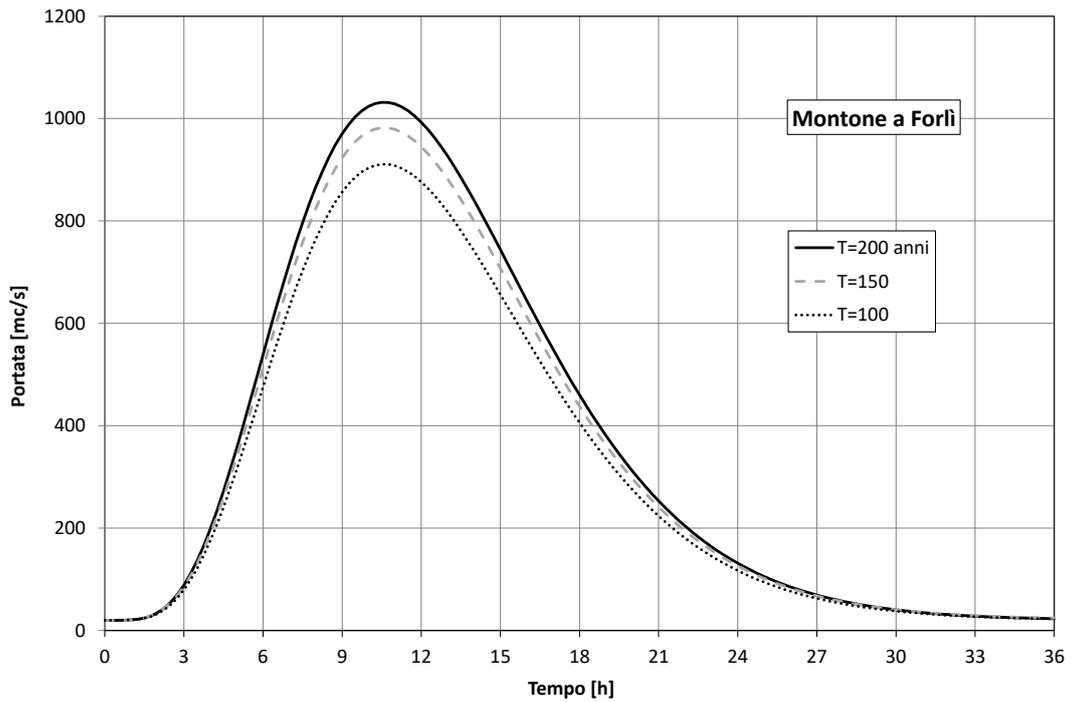


Figura 10 - Onde di piena di tempo di ritorno $T = 100, 150$ e 200 anni del Montone a Forlì (stime secondo metodologia AdB in base a regionalizzazione idrologica).

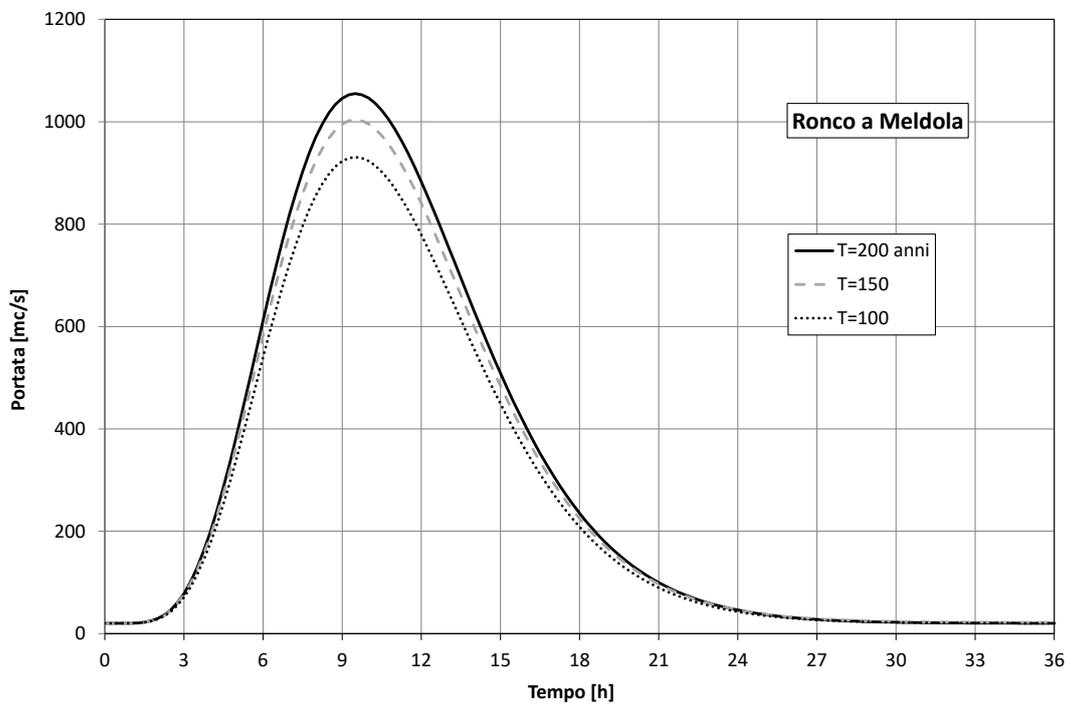


Figura 11 - Onde di piena di tempo di ritorno $T = 100, 150$ e 200 anni del fiume Ronco a Meldola (stime secondo metodologia AdB in base a regionalizzazione idrologica).

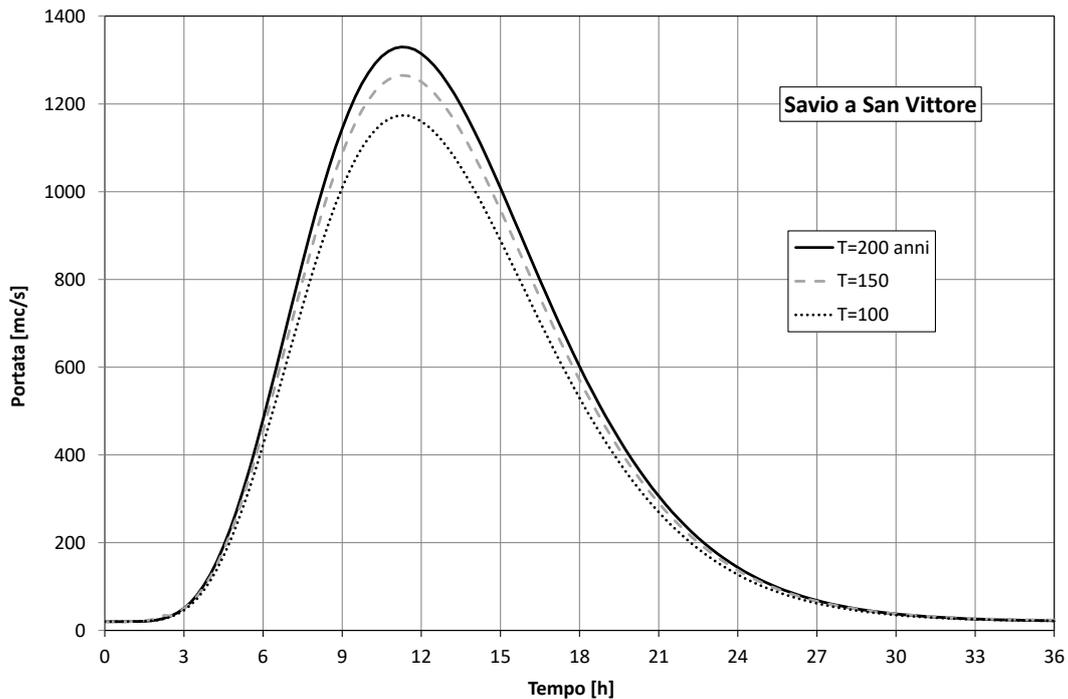


Figura 12 - Onde di piena di tempo di ritorno $T = 100, 150$ e 200 anni del fiume Savio a San Vittore (stime secondo metodologia AdB in base a regionalizzazione idrologica).

Il disciplinare del presente incarico prevede la simulazione della propagazione delle onde di piena per i vari corsi d'acqua nel tratto compreso tra l'attraversamento della via Emilia (SS 9) e lo sbocco a mare. In accordo con ciò, il modello matematico di ciascun corso d'acqua è stato implementato assumendo come sezione iniziale una sezione posta poco a monte della via Emilia e come sezione finale lo sbocco a mare. È stato quindi necessario definire per ciascun corso d'acqua la condizione al contorno di monte, ovvero l'onda di piena in ingresso nella sezione iniziale del modello, quindi in prossimità dell'attraversamento della via Emilia.

L'onda di piena in ingresso al modello è stata definita sfruttando l'informazione congiunta, costituita dagli idrogrammi resi disponibili dagli studi dell'Autorità di Bacino (o, per $T=150$ anni, ricavati con la medesima metodologia), riportati nelle figure precedenti, e dalle conoscenze rese disponibili dagli studi svolti dallo scrivente per conto della stessa Autorità, già citati al Capitolo 1 e che comunque si ricordano: "Studi idraulici propedeutici alla realizzazione di casse di espansione in alcuni dei corsi d'acqua principali della Romagna", redatto nell'ottobre 2005 e avente per oggetto i fiumi Savio, Ronco e Montone, e "Valutazione delle possibilità di laminazione delle piene del fiume Lamone a monte del tratto arginato", redatto nell'ottobre 2010.

Fra le altre informazioni, detti studi rendono infatti disponibili, quale risultato intermedio delle modellazioni matematiche in essi condotte, le onde di piena di piena per T=30 e T=200 anni nelle sezioni dei corsi d'acqua poste in corrispondenza degli attraversamenti della via Emilia, e segnatamente: Lamone a Faenza, Montone a Forlì, Ronco a Forlì, Savio a Cesena. Dette onde sono disponibili sia nella configurazione attuale del corso d'acqua sia nell'assetto di progetto, caratterizzato dalla presenza di alcuni interventi di laminazione proposti lungo le varie aste. Dai risultati resi disponibili dagli studi citati con riferimento alla configurazione attuale è stata quindi desunta l'onda 200-ennale nelle sezioni indicate.

Per quanto riguarda la stima delle onde 100-ennali e di quelle 150-ennali, non direttamente disponibili quali risultati degli studi citati, si è assunto che l'onda adimensionalizzata dei vari tempi di ritorno in ciascuna delle 4 sezioni indicate sia un'invariante rispetto al tempo di ritorno. L'onda di piena adimensionale è stata quindi ricavata dall'onda di piena 200-ennale, dividendo tutti i valori di portata per la portata al colmo dell'onda 200-ennale stessa. Le onde di piena dimensionali 100-ennali e 150-ennali sono state ricavate assumendo poi che, anche per tali tempi di ritorno, il rapporto di laminazione tra la sezione di monte, in cui si dispone degli idrogrammi riportati nelle figure precedenti (da Figura 5 a Figura 12) e la sezione in corrispondenza della via Emilia sia lo stesso che si verifica al transito della portata 200-ennale.

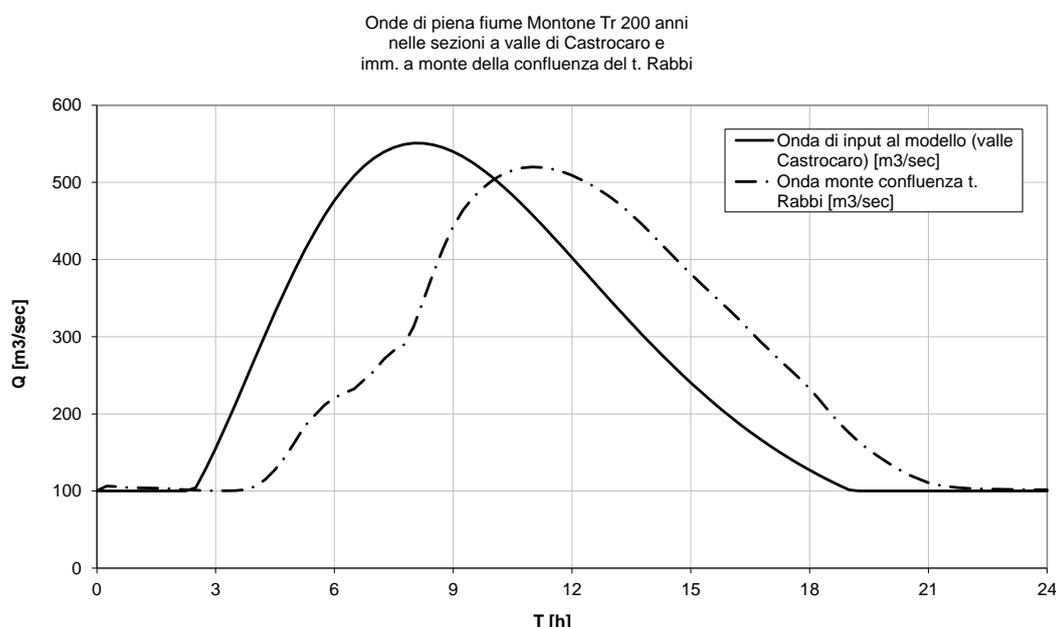


Figura 13 – Modellazione della propagazione della piena 200-ennale del fiume Montone da Castrocaro a monte della confluenza col Rabbi.

A titolo di esempio nella Figura 13, desunta dagli studi poc'anzi citati con rielaborazione della veste grafica, si mostra la propagazione dell'onda idrologica 200-ennale, disponibile per il Montone a Castrocaro Terme e il cui colmo (v. Tabella 2) ammonta a 551 mc/s, fino alla sezione di confluenza con il torrente Rabbi; l'onda, deformandosi per effetto della propagazione, riduce il suo colmo a 519 mc/s, cui corrisponde un rapporto di laminazione pari a 0.94. Analogamente, per il torrente Rabbi è stata eseguita la propagazione dell'onda di piena 200-ennale da Calanca (v. Figura 9) alla sezione immediatamente a monte della confluenza nel Montone; l'onda in questa ultima sezione era stata quindi sommata a quella del Montone nella medesima sezione di confluenza, ottenendo l'onda 200-ennale a valle della confluenza, cioè a Forlì. Tale onda è rappresentata in linea continua nella Figura 14; il suo colmo è pari a 989 mc/s, quindi leggermente inferiore a quello dell'onda idrologica stimata negli studi dell'Autorità di Bacino. In questa sede, applicando la metodologia descritta, ovvero assumendo rapporti di laminazione dei colmi pari a quelli del caso 200-ennale, sono state ottenute l'onda del Montone nella sezione immediatamente a monte della confluenza col Rabbi, a partire da quella a Castrocaro Terme, e l'onda del Rabbi, sempre a monte della confluenza col Montone, a partire da quella di Calanca. Sommando le due onde a monte della confluenza, è stata ottenuta l'onda 100-ennale immediatamente a valle della confluenza, cioè a Forlì, riportata in Figura 14; l'onda 100-ennale ha un colmo pari a 873 mc/s. La stessa procedura è stata poi utilizzata per ricavare la stima dell'onda 150-ennale a Forlì.

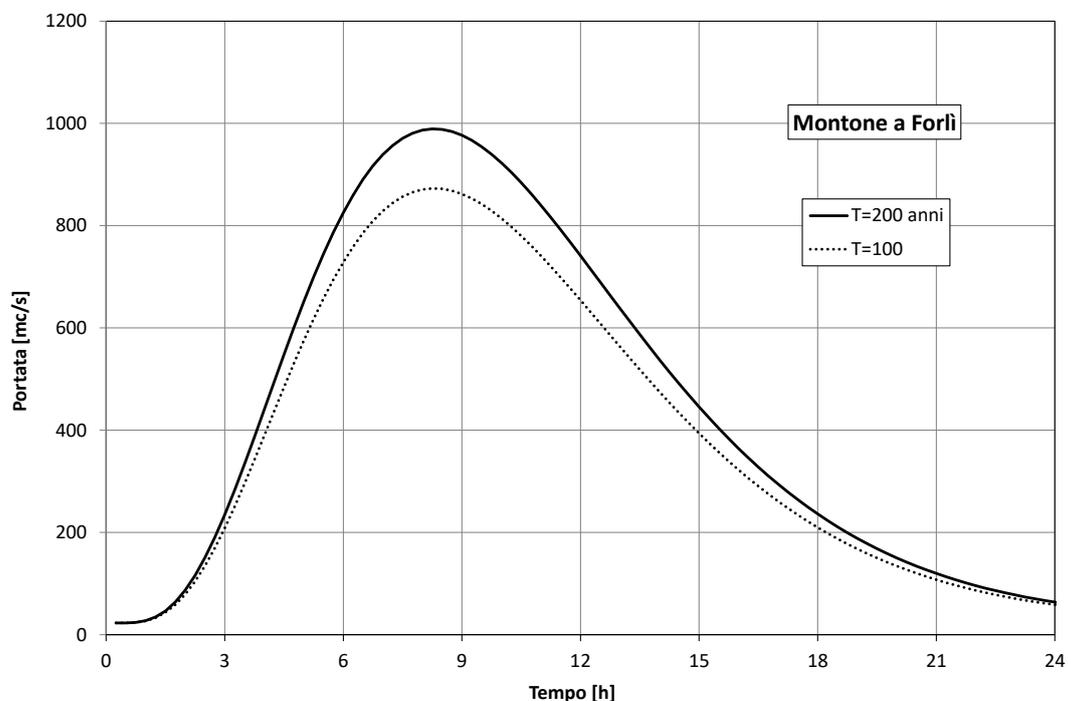


Figura 14 – Onde di piena del Montone a Forlì, per tempo di ritorno pari a 100 e 200 anni, assunte quale condizione al contorno di monte del modello matematico di propagazione di piena.

Nelle simulazioni del transito delle piene relative al fiume Montone si sono utilizzate queste onde quale input idrologico al modello di propagazione di piena, del quale hanno costituito quindi la condizione al contorno imposta all'estremità di monte del tratto rappresentato.

Per quanto riguarda il fiume Ronco, l'onda di piena 200-ennale a Forlì è stata estrapolata dai risultati dello studio citato nell'ambito del quale, fra l'altro, era stata studiata la propagazione dell'onda da Meldola (stimata su base idrologica) a Forlì. La Figura 15 riporta l'onda 200-ennale del Ronco a Forlì.

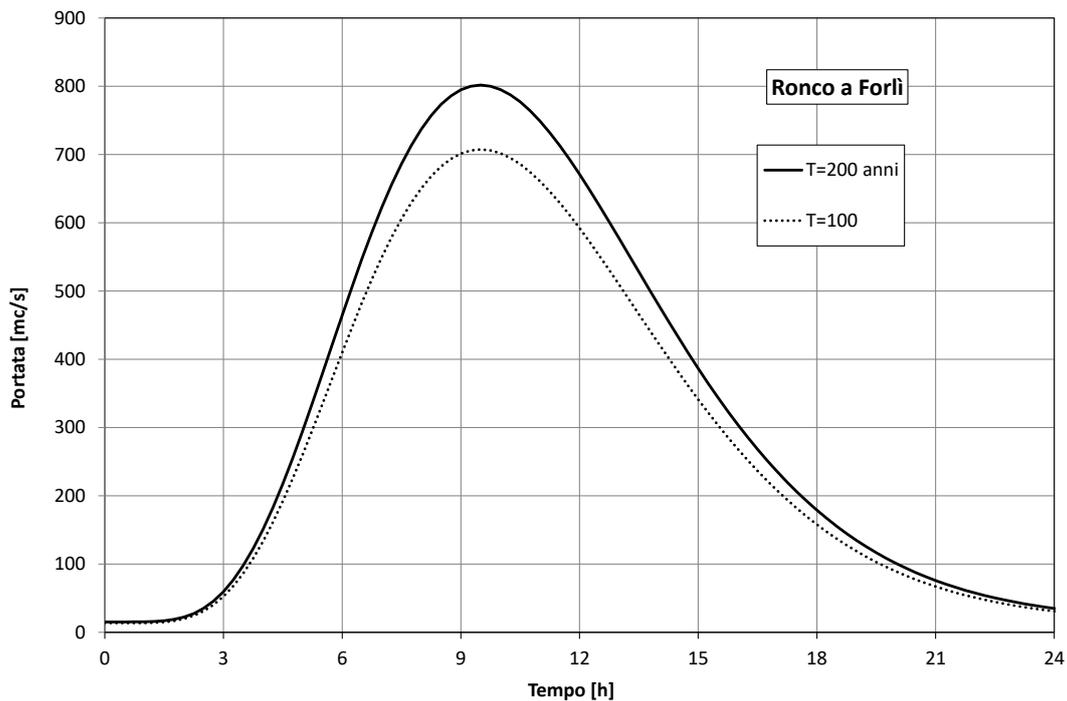


Figura 15 - Onde di piena del Ronco a Forlì, per tempo di ritorno pari a 100 e 200 anni, assunte quale condizione al contorno di monte del modello matematico di propagazione di piena.

La laminazione dell'onda da Meldola a Forlì è piuttosto importante, in quanto il colmo si abbatte del 24%, passando da 1055 mc/s a 802 mc/s, che corrisponde a un rapporto di laminazione pari a 0.76. Ciò avviene anche per l'effetto delle aree di espansione, presenti a monte dell'abitato. Assumendo analogo rapporto di laminazione anche per la portata 100-ennale e ancora che la forma dell'onda adimensionalizzata a Forlì sia invariante al variare del tempo di ritorno, si è ricavata la forma dell'onda 100-ennale, anch'essa riportata in Figura 15.

Per quanto riguarda il fiume Savio, nello studio citato era stata studiata, fra le altre cose, la propagazione dell'onda di piena 200-ennale nel tratto tra Borello a Cesena, assumendo quale onda in ingresso quella idrologica valutata a San Vittore.

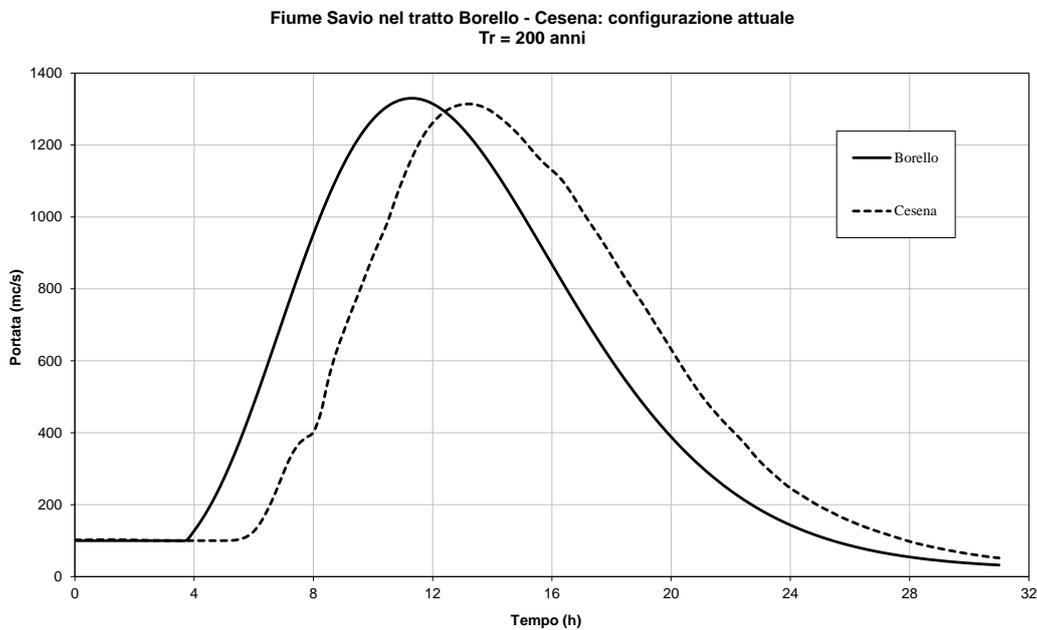


Figura 16 - Modellazione della propagazione della piena 200-ennale del fiume Savio da Borello a Cesena.

Nella Figura 16, rielaborata su dati riportati nello studio citato, è rappresentata la propagazione di detta onda; si nota come, lungo il percorso, riduca il suo colmo da 1330 mc/s a 1314 mc/s, con un rapporto di laminazione pari a 0.988. Adottando il medesimo rapporto di laminazione, e assumendo ancora l'invarianza della forma dell'onda adimensionalizzata a Cesena al variare del tempo di ritorno, è stata ottenuta anche l'onda del fiume Savio a Cesena avente T=100 anni, che è riportata nella Figura 17 assieme all'onda 200-ennale.

Per quanto riguarda infine il fiume Lamone, quale sollecitazione idrologica in ingresso al modello di propagazione di piena nella stazione di Faenza sono state invece utilizzate direttamente le onde idrologiche stimate dall'Autorità di Bacino, in quanto negli studi citati, svolti dallo scrivente, non si disponeva delle informazioni necessarie a effettuare una più accurata ricostruzione relativamente allo stato di fatto.

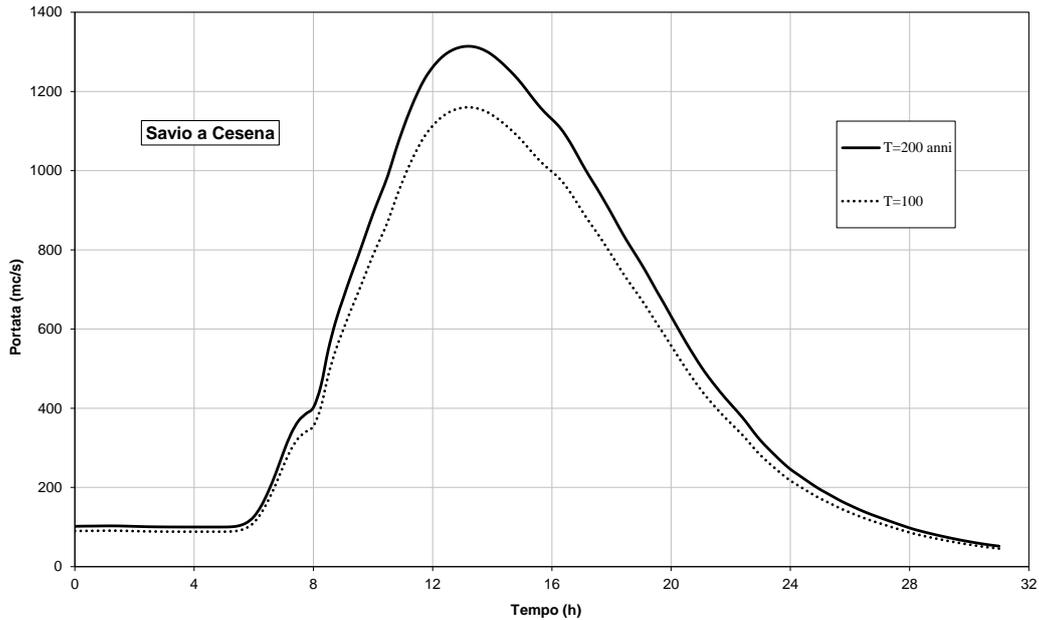


Figura 17 - Onde di piena del Savio a Cesena, per tempo di ritorno pari a 100 e 200 anni, assunte quale condizione al contorno di monte del modello matematico di propagazione di piena.

Quanto finora discusso riguarda la stima della sollecitazione idrologica che interessa i fiumi Montone, Ronco, Lamone e Savio. Un discorso a parte deve essere fatto invece per il torrente Bevano. Il torrente Bevano è, infatti, l'unico fra i corsi d'acqua in esame per cui si ha una significativa interazione tra corso d'acqua e reticolo di bonifica. Il comportamento di tale corso d'acqua non è assimilabile a quello dei rimanenti, in quanto gran parte dei suoi deflussi sono originati dai contributi di comprensori di bonifica, che peraltro poco si prestano a essere stimati con le metodologie di regionalizzazione delle portate, messe a punto per i bacini collinari e montani. Tali contributi di bonifica si immettono nel torrente Bevano a valle della via Emilia, ove si chiude il bacino collinare e montano, che ha estensione sensibilmente ridotta rispetto a quello degli altri corsi d'acqua; pertanto, l'onda di piena del bacino collinare e montano rappresenta solo una piccola porzione della sollecitazione idrologica cui è soggetto il corso d'acqua nel suo sviluppo a valle della via Emilia. Mentre per gli altri corsi d'acqua l'onda di piena alla via Emilia può essere assunta come unica sollecitazione idrologica in ingresso al modello matematico, in quanto a valle non si hanno immissioni significative, nel caso del Bevano non si può prescindere dalle immissioni della rete di scolo di bonifica, come correttamente riconosciuto anche negli studi idrologici condotti a supporto della pianificazione di bacino da parte dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli. Nella Figura 18 sono indicate in apposita planimetria le principali immissioni dei collettori di bonifica nel torrente Bevano, che sono state considerate come ingressi concentrati al modello nelle posizioni indicate.

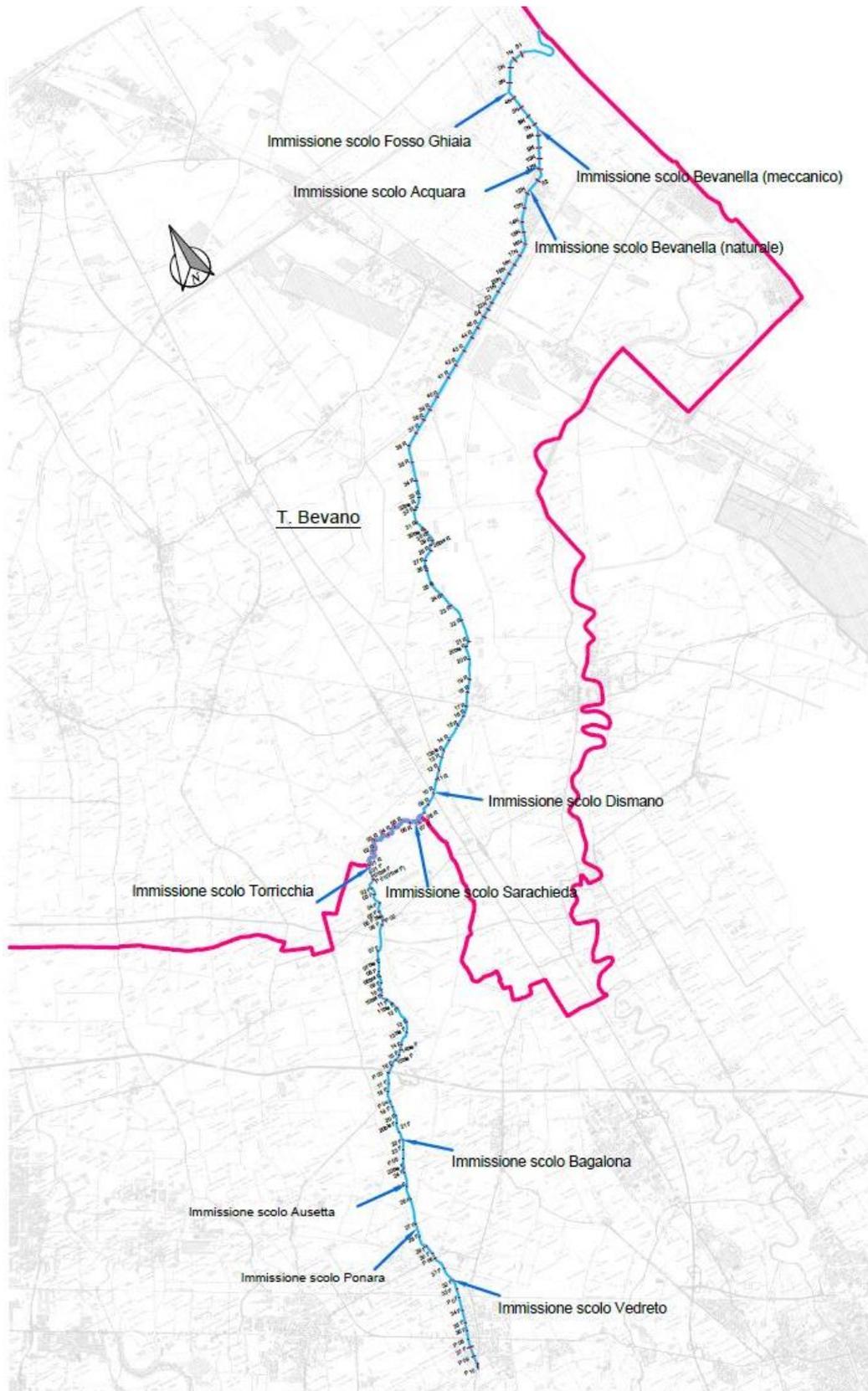


Figura 18 – Principali immissioni dei collettori di bonifica nel torrente Bevano.

Anche per il torrente Bevano si è proceduto in maniera tale da rispettare la congruenza tra le stime della sollecitazione idrologica effettuate nel presente studio e quelle adottate negli studi di pianificazione di bacino, sviluppati dall’Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli. Quest’ultima ha stimato i valori delle portate al colmo di piena 100-ennali e 200-ennali in alcune sezioni del corso d’acqua, poste a valle delle varie immissioni dei canali di bonifica, che sono riportati nella Tabella 3.

Tabella 3 – Stime delle portate al colmo di T=100 e 200 anni e dei tempi di picco in alcune sezioni del torrente Bevano

<i>Sezione</i>	<i>Q(100) [mc/s]</i>	<i>Q(200) [mc/s]</i>	<i>T_p [h]</i>
Chiusura Bevano Collinare (monte via Emilia)	29	36	1
Valle immissione scolo Vedreto	65	78	3.4
Valle immissione scolo Ponara	85	102	4.5
Valle immissione scolo Ausetta	99	119	6.3
Valle immissione scolo Bagalona	111	133	8
Valle immissione scolo Torricchia	127	152	11
Valle immissione scolo Sarachieda/Saraceta	161	193	12
Valle immissione scolo Dismano	196	235	13

Assumendo poi una forma dell’onda triangolare con tempo di picco T_p, variabile linearmente tra 1 ora alla chiusura del bacino montano e 13 ore a S. Zaccaria, in aderenza alle risultanze di un precedente studio condotto dalla stessa Autorità, si ottengono le onde di piena per T=200 e T=100 anni, riportate rispettivamente nella Figura 19 e nella Figura 20.

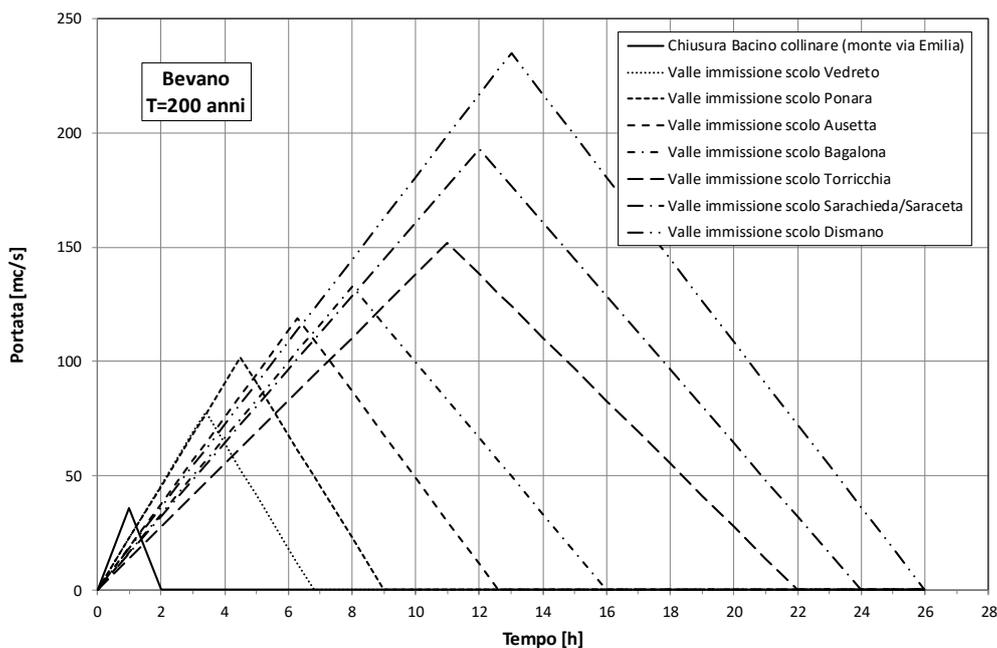


Figura 19 – Onde di piena in varie sezioni del torrente Bevano, per T=200 anni.

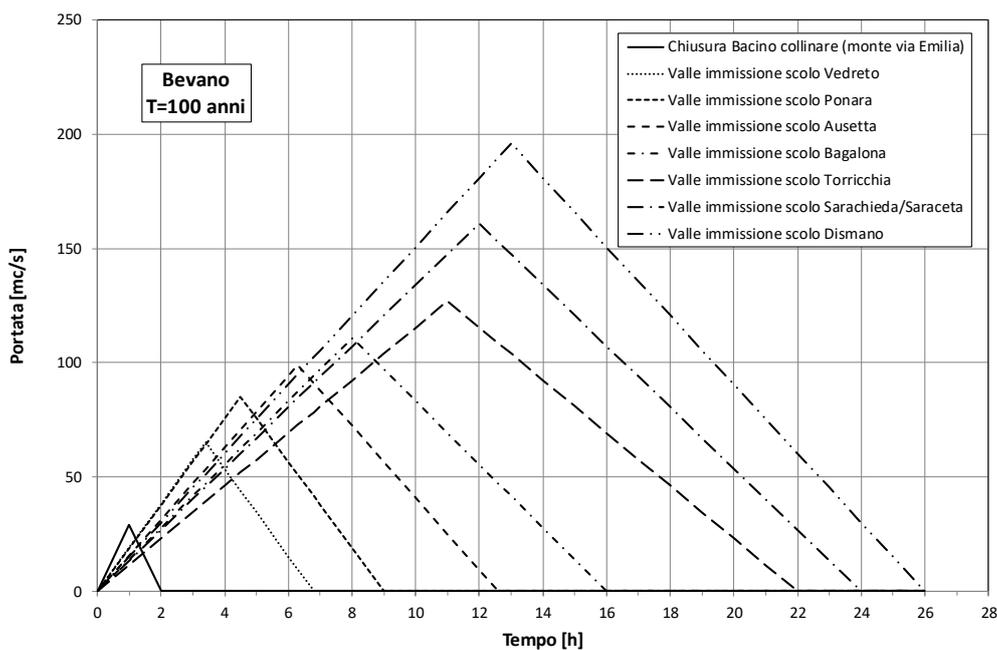


Figura 20 - Onde di piena in varie sezioni del torrente Bevano, per T=100 anni.

Nella modellazione matematica del transito delle piene nel torrente Bevano si è considerato, come per gli altri corsi d'acqua, il tratto compreso tra l'attraversamento della via Emilia e la foce a mare; in questo caso, la sollecitazione in ingresso all'estremità di monte del modello è costituita dall'onda alla chiusura del bacino collinare (riportata nella Figura 19 per T=200 anni e nella Figura 20

per T=100 anni) e dalle immissioni apportate dai vari contributi di bonifica (v. Figura 18); queste ultime sono state stimate, a partire dalle onde riportate nelle figure precedenti (Figura 19 e Figura 20), in maniera tale da avere, a valle di ciascuna immissione, un'onda di piena nel corso d'acqua principale che sia la più vicina possibile a quella stimata dall'analisi idrologica e riportata nelle figure stesse. A valle dello scolo Dismano, sono presenti altre quattro importanti immissioni nel torrente Bevano (v. sempre Figura 18); si tratta, a partire da monte verso valle, dell'immissione dello scolo Bevanella (naturale) in destra idrografica, dello scolo Acquara in sinistra, dello scolo Bevanella (meccanico) in destra e infine del fosso Ghiaia in sinistra idrografica. Queste ultime quattro immissioni, a differenza delle precedenti e coerentemente con l'approccio impiegato dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, sono state stimate schematizzandole come ingressi a portata costante nel tempo; i valori attribuiti sono quelli desunti dagli studi di pianificazione di bacino, vale a dire: 8 mc/s per lo scolo naturale Bevanella, 12 mc/s per lo scolo Acquara, 8 mc/s per lo scolo meccanico Bevanella e 35 mc/s per il fosso Ghiaia.

4. SCENARI ADOTTATI NELLA MODELLAZIONE IDRAULICA

Come in precedenza indicato, il presente incarico prevedeva che dovesse essere espletata la valutazione dei “massimi livelli di piena che, in funzione delle sezioni idrauliche, possano interessare il Comune di Ravenna, tenendo conto delle esondazioni a monte” e inoltre l’identificazione “nel caso possa verificarsi insufficienza idraulica dei tratti fluviali in Comune di Ravenna interessati da esondazione per sormonto arginale”. La modellazione matematica della propagazione delle onde di onde di piena era richiesta per T=100, 150 e 200 anni nei tratti di corsi d’acqua esaminati, a partire dall’attraversamento della via Emilia fino al mare.

Ciò che veniva richiesto di indagare corrisponde a quello che viene normalmente denominato uno scenario “ad esondazioni libere”; in pratica si tratta di operare con un modello di propagazione monodimensionale, considerando che, al raggiungimento della sommità arginale in una certa sezione, l’acqua possa fuoriuscire dall’alveo riversandosi a campagna. La fuoriuscita di volumi idrici dall’alveo verso campagna viene modellata schematizzando la presenza di uno sfioratore laterale a larga soglia, disposto con continuità lungo il rilevato arginale, a quota coincidente con la sommità di quest’ultimo. Va osservato che questa schematizzazione si distingue sia dalle impostazioni di tipo bidimensionale sia da quelle, anch’esse monodimensionali, che in letteratura vanno sotto il nome di “quasi-bidimensionali”.

Nell’approccio “quasi-bidimensionale”, infatti, le aree a campagna limitrofe al corso d’acqua vengono schematizzate come celle idrauliche laterali, connesse all’alveo del corso d’acqua ed eventualmente anche interconnesse fra loro. La delimitazione delle celle idrauliche viene fatta in funzione della morfologia dell’area e della presenza di ostacoli naturali rilevanti, come rilevati stradali e ferroviari o canali particolarmente significativi (per un esempio v. la Figura 26, commentata più avanti). In pratica, l’area a campagna viene trattata come se fosse costituita da una serie di casse di espansione, connesse al corso d’acqua e, in alcuni casi, anche fra di loro. Per ciascuna cella idraulica, in funzione della morfologia del territorio, viene ricavata la curva dei volumi invasati in funzione dell’altezza d’acqua. Come per i modelli ad esondazioni libere, il corso d’acqua viene ancora messo in comunicazione con la campagna tramite degli sfiori, la cui forma riproduce l’andamento del rilevato arginale o della sponda. Gli sfiori permettono il movimento dell’acqua nei due sensi, a seconda della posizione reciproca dei livelli idrici nell’alveo e nella cella. A loro volta, le celle idrauliche sono messe in comunicazione con la campagna retrostante e anche le une con le altre tramite degli sfiori rappresentativi dei rilevati che ne costituiscono il perimetro o connessioni idrauliche, poste in corrispondenza delle discontinuità di tali rilevati (fornici, viadotti, etc). Attraverso un modello di

questo tipo è possibile pervenire a definire l'andamento del livello nel tempo in ciascuna cella idraulica e quindi in particolare il massimo valore del tirante idrico in ciascun punto della cella.

Quello che cambia sostanzialmente, rispetto al caso di un modello ad esondazioni libere, è la schematizzazione del comportamento idraulico dell'area a campagna: in un modello ad esondazioni libere, infatti, l'estensione dell'area esondabile a campagna viene considerata così ampia che il battente che si forma fuori alveo può di fatto essere assunto trascurabile e comunque non di entità tale da permettere all'acqua di rientrare in alveo durante la piena e nemmeno tale da rigurgitare la corrente uscente dall'alveo stesso. In pratica, il modello ad esondazioni libere si attaglia bene nelle situazioni in cui le aree esondabili a campagna siano molto ampie, mentre, qualora ciò non avvenga, è opportuno ricorrere a schemi quasi-bidimensionali, che comunque richiedono una descrizione accurata della geometria fuori dell'alveo, o in alternativa proseguire con un'impostazione puramente monodimensionale ma ricercando un confine all'esondazione lato campagna e estendendo la sezione fluviale fino a quest'ultimo, eventualmente considerando l'area laterale come area di invaso ("ineffective flow area"), come è stato fatto nel presente studio.

Incidentalmente, va osservato che sia lo schema ad esondazioni libere che quello quasi-bidimensionale, prima illustrati, adottano di fatto implicitamente l'ipotesi di argini inerodibili in caso di tracimazione; questa ipotesi è di fatto poco realistica, anche se viene comunemente accettata. Nella realtà, infatti, in caso di sormonto, gli argini sono destinati, con elevata probabilità, ad essere erosi, con conseguente formazione di brecce e rotte arginali, che modificano la geometria del sistema e quindi alterano profondamente la distribuzione dei volumi di esondazione a campagna, rispetto all'ipotesi di argini inerodibili.

Nel caso in esame, oltre alla simulazione secondo lo scenario ad esondazioni libere, si sono eseguite simulazioni del transito delle onde 100-ennali e 200-ennali anche nel caso dello scenario ad esondazioni impedito. Queste ultime, infatti, anche se non richieste dal Capitolato, sono state ritenute necessarie a meglio inquadrare l'assetto del rischio idraulico del territorio.

Al riguardo, si rammenta che, negli studi sulla sicurezza idraulica, è consuetudine fare riferimento allo schema ad esondazioni impedito; ciò non solo in quanto più cautelativo ma anche per almeno altri due ordini di fattori. Il primo fattore è che la descrizione matematica del meccanismo di fuoriuscita dei volumi dall'alveo fluviale verso campagna, ovvero della dinamica di esondazione, è caratterizzata, con i modelli monodimensionali usualmente impiegati, da significativa incertezza. In primo luogo, infatti, come già accennato in precedenza, in occasione di un sormonto è molto verosimile che, a meno che i tiranti idrici di sommersa non siano molto modesti, si

determini una rotta arginale, la cui presenza altera profondamente la distribuzione dei volumi di esondazione, rispetto all'ipotesi di argini inerodibili. In secondo luogo, la capacità della fascia perfluviale posta a campagna di recepire volumi di esondazione è assunta illimitata, mentre nella realtà il crearsi di un battente d'acqua a campagna può prima o poi ostacolare la fuoriuscita del deflusso e, in certe condizioni, può addirittura determinare l'inversione del senso di flusso. Di ciò non può tenersi conto con uno schema ad esondazioni libere, mentre, come in precedenza accennato, può essere fatto adottando una schematizzazione puramente bidimensionale del moto o anche, con qualche maggiore approssimazione, con una schematizzazione quasi-bidimensionale. L'applicazione di tali approcci richiede però una rappresentazione della geometria delle aree limitrofe al corso d'acqua molto articolata e non era comunque prevista nell'ambito del presente incarico. In terzo luogo, non può essere escluso che la realizzazione di opere di rialzo del sistema arginale a monte, anche eseguite nel tempo reale (esempio sovralti con sovrassogli o sacchettature di sabbia, eseguiti in emergenza) possa comportare la veicolazione a valle di portate maggiori di quelle stimabili adottando una schematizzazione a esondazioni libere.

Per quanto riguarda invece i valori dei parametri di scabrezza assegnati ai vari tratti dei diversi corsi d'acqua, in questa sede si è ritenuto di adottare i medesimi valori a suo tempo assunti negli studi condotti dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, che sono stati desunti dalle geometrie dei modelli matematici messi a disposizione. Tale scelta, che peraltro comporta l'adozione di valori ragionevoli in relazione a quelle che sono le caratteristiche geometriche e allo stato vegetazionale corrente dei corsi d'acqua, è stata effettuata al fine di rendere possibile un confronto omogeneo tra i risultati del presente studio e quelli della pianificazione di bacino (PAI, PGRA). Come possibile approfondimento futuro delle attività, si segnala di valutare la possibilità di calibrare i coefficienti di scabrezza degli alvei sulla base delle osservazioni idrometriche di recenti eventi di piena verificatisi sul territorio.

Infine, per quanto riguarda la scelta della condizione da imporre all'estremità di valle del tratto modellato di ciascun corso d'acqua, tenuto conto che quest'ultimo coincide in ogni caso con lo sbocco a mare, si è assunto un valore costante di livello pari al massimo registrato durante l'evento del 5-6 febbraio 2015 al mareografo di Ravenna Porto Corsini, pari a 1.21 m s.l.m.m. Nella Figura 21 si riporta l'andamento del livello del mare durante la mareggiata citata. Per tale strumento, che fa parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita da ISPRA, si dispone di una serie storica praticamente ininterrotta dal 1998 ad oggi, con dati ogni 10 minuti; il dato di livello del mare di 1.21 metri, registrato alle ore 23:40 del 5 febbraio e assunto come condizione di sbocco a mare nelle

simulazioni, è il più alto mai osservato dalla stazione mareografica. Il precedente valore massimo registrato dalla stazione era stato di 1,16 metri il 31 ottobre 2012.

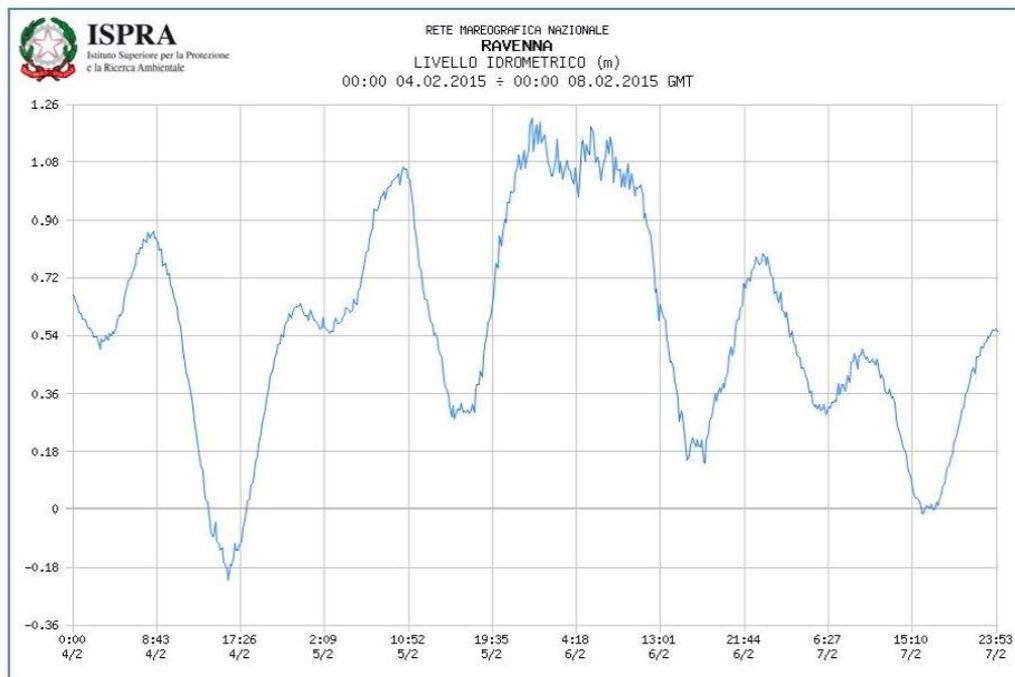


Figura 21 – Livello del mare registrato dal mareografo di Ravenna Porto Corsini durante la mareggiata del febbraio 2015.

Con queste avvertenze, è possibile passare alla discussione dei risultati ottenuti, riportata nei capitoli seguenti. Si osserva preliminarmente che, come sarà più evidente nel seguito, nel caso di esondazioni libere, i profili 100-ennale e 200-ennale nel territorio di competenza del Comune di Ravenna risultano praticamente coincidenti fra loro. Di conseguenza, il profilo avente $T=150$ anni risulta indistinguibile dai precedenti. Per tale motivo, la rappresentazione dei risultati viene effettuata per i soli tempi di ritorno $T=100$ e $T=200$ anni. Conseguentemente, anche nel caso di esondazioni impedito, vengono descritti solo questi due scenari.

5. REVISIONE DELLE SCHEMATIZZAZIONI GEOMETRICHE DEI MODELLI ESISTENTI

Una fase importante del lavoro è consistita nell'analisi dei rilievi topografici messi a disposizione dello scrivente, nella loro omogeneizzazione e successivamente nella revisione delle schematizzazioni geometriche implementate nei modelli matematici esistenti, al fine di renderle più rappresentative del reale comportamento dei corsi d'acqua.

Come prima attività, è stata costituita una base cartografica comune, riportando sulla Cartografia Tecnica Regionale i rilievi dei singoli corsi d'acqua, che erano stati resi disponibili separatamente per ciascun corso d'acqua. Successivamente, sono stati analizzate le descrizioni della geometria dei corsi d'acqua, contenute nei modelli matematici esistenti presso il Servizio Area Romagna (ex Servizio Tecnico di Bacino Romagna) dell'Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile della Regione Emilia-Romagna, messi a disposizione dello scrivente per il tramite del Comune di Ravenna. Nell'utilizzo dei modelli matematici acquisiti si è constatata, in più casi, la presenza di significative anomalie di funzionamento. Va segnalato che detti modelli erano stati originariamente messi a punto proprio dallo scrivente per conto dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, nell'ambito degli incarichi in precedenza menzionati; nel tempo, essi sono stati oggetto di una serie di interventi di rimaneggiamento della geometria rappresentata al loro interno, indirizzati a orientare il funzionamento dei modelli stessi sulle diverse finalità che, di volta in volta, venivano perseguite. Questi successivi interventi possono avere determinato le anomalie di cui sopra.

Un'approfondita analisi sul tema, appositamente condotta nell'ambito del presente studio, ha portato ad attribuire tali anomalie soprattutto a una non corretta descrizione della geometria fluviale in corrispondenza degli attraversamenti, descrizione che quindi è stata completamente riformulata.

Inoltre, è stato eseguito anche un altro importante intervento di adeguamento della geometria dei modelli esistenti, al fine di renderla più aderente alla realtà. In molti casi, infatti, la geometria delle sezioni presenti nel modello risultava troncata in corrispondenza di un punto della sezione stessa non corrispondente alla sommità di un rilevato arginale o, comunque, a un preciso confinamento morfologico (v. ad esempio la Figura 22). Tale circostanza, soprattutto quando si opera con modelli a esondazioni libere, come avviene nel caso in esame, può comportare errori anche molto importanti nella descrizione dei volumi sfiorati verso campagna, quando, come spesso capita, a tergo della sezione troncata esista un qualche elemento morfologico di contenimento. In questi casi, è stata effettuata una ricostruzione della parte di sezione mancante utilizzando la Carta Tecnica

Regionale al 5.000 e il DEM a passo 1 m, che è stato acquisito allo scopo dalla Regione per le aree di specifico interesse (Figura 23).

Le modifiche hanno in particolare riguardato la geometria dei fiumi Ronco e Savio, corsi d'acqua per i quali, in alcuni tratti, l'intervento di modifica necessario è stato di tipo sistematico. Va rilevato che l'opportunità di eseguire dette modifiche è stata confermata dagli esiti di alcuni accurati sopralluoghi eseguiti in campo. Per gli altri corsi d'acqua, la necessità di intervenire con il completamento della geometria della sezione trasversale ha riguardato un numero assai più ridotto di sezioni.

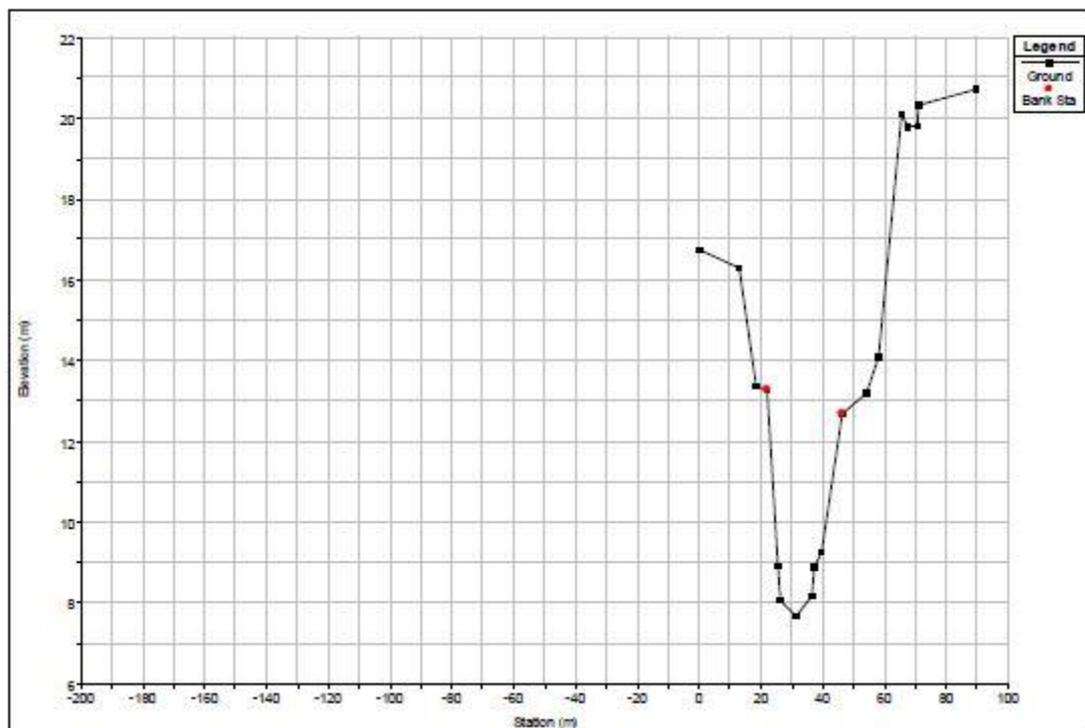


Figura 22 – Esempio di sezione fluviale del fiume Ronco, come risultava dal rilievo topografico e dalla geometria del modello matematico messi a disposizione

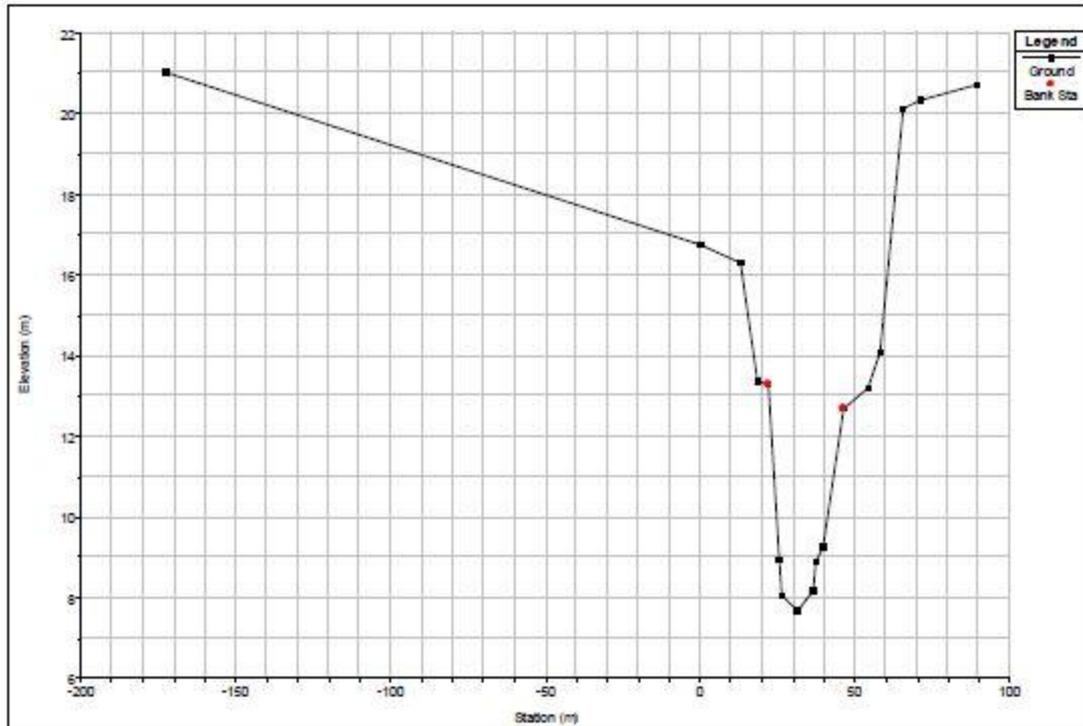


Figura 23 – Estensione della sezione fluviale del fiume Ronco attraverso i dati integrativi, desunti dalla Carta Tecnica Regionale 1:5.000.

Anche nel caso del Savio, è stato necessario ricorrere ad una correzione della geometria delle sezioni fornite dal Servizio Area Romagna (ex Servizio Tecnico di Bacino Romagna) dell’Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile della Regione Emilia-Romagna, in modo da riprodurre in maniera più accurata il comportamento del corso d’acqua nella zona denominata delle curve di Martorano. La Figura 24 mostra, a titolo esemplificativo, il risultato dell’estensione di una sezione del Savio desunta dal rilievo topografico mediante l’uso del modello digitale del terreno avente risoluzione di 1 metro.

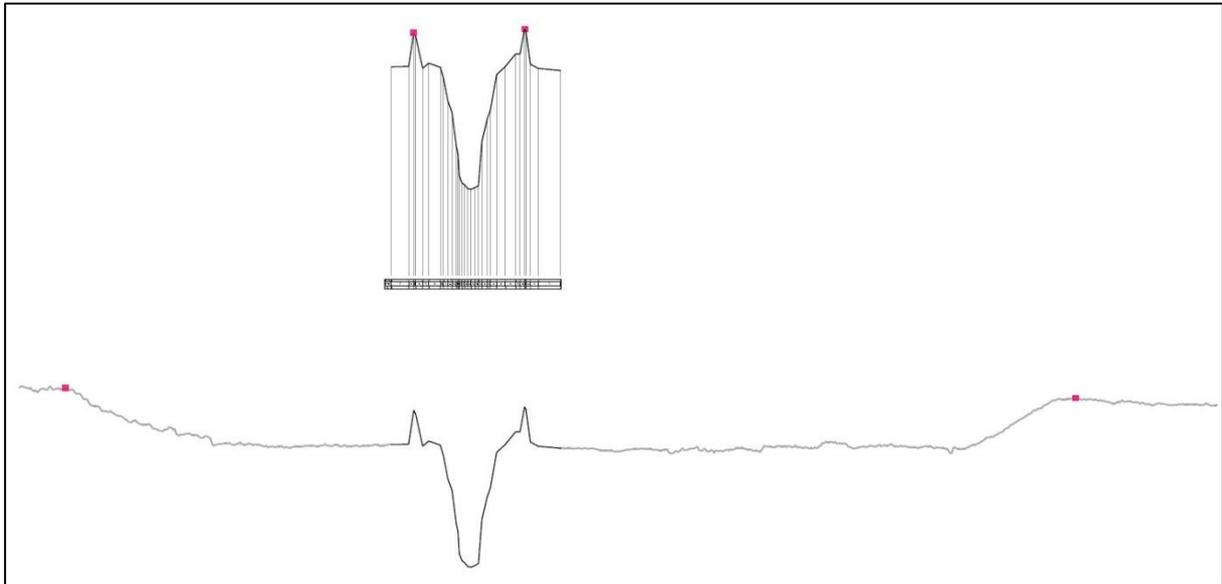


Figura 24 - Estensione di una sezione fluviale del Savio attraverso dati integrativi. In alto la sezione originaria del rilievo topografico, in basso la stessa sezione estesa con l'uso del modello digitale del terreno (DEM).

In pratica, nel tratto compreso tra la città di Cesena e l'attraversamento dell'autostrada A14, lungo il corso d'acqua, pur in presenza di un sistema arginale discontinuo, si rinvengono una serie di confinamenti antropici che delimitano l'inondazione, impedendo che essa si propaghi liberamente a campagna.

La schematizzazione della geometria di tale tratto di alveo, secondo le sezioni fornite dal Servizio Area Romagna (ex STB Romagna), non tiene conto di ciò; le sezioni, infatti, risultano troncate prima di intersecare detti elementi di confinamento. Di conseguenza la simulazione della propagazione, effettuata basandosi su tali sezioni, conduce a risultati irrealistici; ciò è vero soprattutto nel caso di esondazioni libere, in quanto i volumi che escono dal corso d'acqua nella realtà non possono transitare liberamente a campagna, ma rimangono confinati. Di conseguenza, l'utilizzo della geometria iniziale porterebbe a una notevole sovrastima dei naturali effetti di laminazione, conducendo in definitiva a sottostimare i colmi e i volumi delle onde di piena a valle di tale tratto. Ciò è stato chiaramente confermato anche dai risultati di alcune simulazioni preliminari eseguite. Ci si può facilmente rendere conto di quanto appena evidenziato analizzando la Figura 25, che mostra le aree allagate lungo il tratto di fiume Savio corrispondente alle cosiddette curve di Martorano durante la piena del novembre 2005.

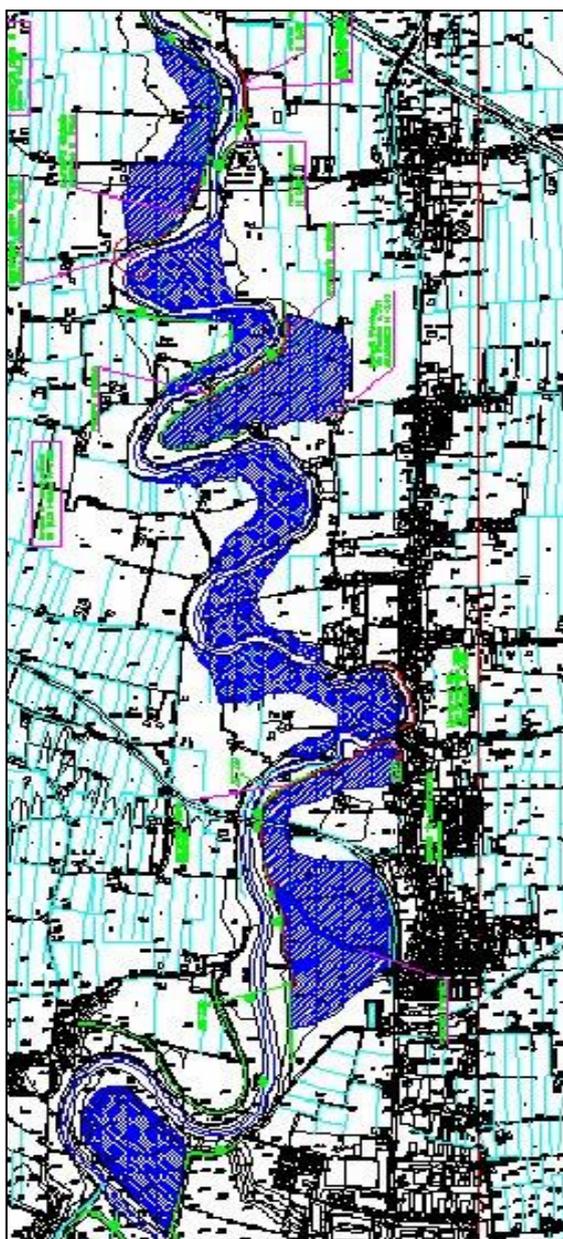


Figura 25 – Mappa delle aree allagate lungo il tratto di fiume Savio corrispondente alle cosiddette curve di Martorano, durante l’evento di piena del novembre 2005.

Come si nota dalla Figura 25, in tale zona il corso d’acqua ha un andamento fortemente meandrizzato con la presenza di numerose espansioni laterali che di fatto, oltre certi livelli di piena, sono messe in comunicazione con l’alveo mentre, salvo che per livelli di piena molto più alti, risultano isolate dalla campagna esterna. Come evidenziato dalla Figura 25, l’esondazione della piena del novembre 2005 è rimasta quindi confinata all’interno di tali aree. Simulare il funzionamento di questo tratto con un modello ad esondazioni libere, per il quale non vi sono confinamenti all’esondazione verso campagna, porterebbe a sovrastimare fortemente i volumi fuoriusciti e di

conseguenza a sottostimare, anche sensibilmente, i livelli di piena a valle. Ciò, come detto, è stato peraltro chiaramente confermato anche dai risultati di alcune simulazioni preliminari eseguite. L'adeguamento della geometria consente di ovviare a tale problema.

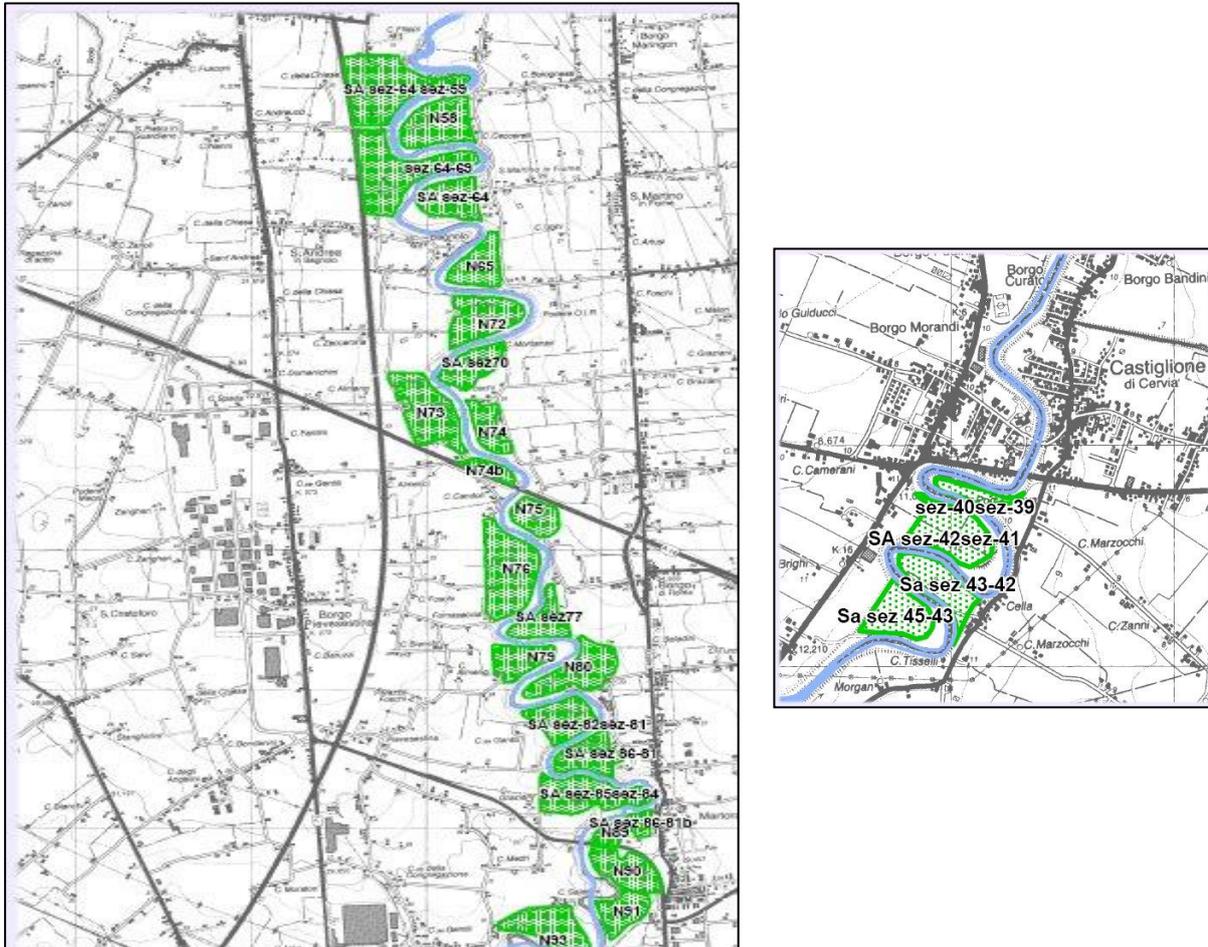


Figura 26 – Esempio di schematizzazione con approccio quasi bidimensionale di due tratti di fiume Savio: quello corrispondente alle curve di Martorano e quello a monte di Castiglione di Cervia.

Va rilevato che l'adozione della geometria originaria porterebbe a risultati irrealistici anche nel caso dello scenario ad esondazioni impedito, anche se il problema è in tal caso di minore entità rispetto allo scenario ad esondazioni libere; ciò sia in quanto le vere quote arginali non corrispondono a quelle desumibili da tale geometria sia in quanto la messa in conto della presenza delle espansioni laterali porta a maggiori volumi di invaso e quindi ad una maggiore laminazione naturale delle piene.

In definitiva, al fine di ottenere risultati più realistici, nello svolgimento del presente lavoro, pur conservando una schematizzazione monodimensionale, le sezioni sono state estese tramite

l'utilizzo di un DEM ad alta risoluzione, avente passo di 1 m, messo a disposizione dalla Regione. Va segnalato comunque che analisi basate su una schematizzazione quasi-bidimensionale, quale quella esemplificata nella Figura 26 o addirittura su una puramente bidimensionale, che non erano però tra gli strumenti di indagine previsti, condurrebbero certamente a risultati ancora più attendibili.

6. MODELLAZIONE IDRAULICA NELLO SCENARIO DI ESONDAZIONI IMPEDITE

Nel caso di esondazioni impedito, i livelli di piena sovrastano gli argini dei fiumi Montone, Ronco e Uniti, Savio e Lamone in maniera generalizzata, sia per T=100 anni che per T=200 anni, come evidenziato dai relativi profili del pelo libero, riportati nella tavole allegate alla presente relazione. In ragione della schematizzazione impiegata, non essendovi fuoriuscita di volumi a campagna, la laminazione del colmo dell'onda di piena lungo il percorso risulta solitamente piuttosto modesta, per cui la situazione di sormonto è quasi generalizzata. Analoga situazione di sormonto arginale generalizzato si verifica per il torrente Bevano.

Per quanto riguarda il Montone, la Tavola 4, elaborato cartografico allegato alla presente relazione, riporta i profili del pelo libero lungo il corso d'acqua dall'attraversamento della via Emilia alla confluenza col fiume Ronco e poi lungo il percorso dei fiumi Uniti fino alla foce a mare. Sono rappresentati i massimi livelli per tempo di ritorno T=100 e 200 anni, nelle condizioni di esondazioni impedito e di esondazioni libere. L'attenzione viene per il momento focalizzata sui primi, mentre i secondi saranno commentati nel prossimo capitolo. Nella Figura 27 vengono invece riportati gli andamenti delle onde di piena per T=200 anni in alcune sezioni del Montone, dall'attraversamento della via Emilia fino alla confluenza col Ronco. Si nota la laminazione dell'onda lungo il percorso; il colmo passa da 989 mc/s, in corrispondenza della SS9, a 982 mc/s, in corrispondenza della Sez 99 S di attraversamento della ferrovia Bologna-Ancona, per ridursi poi a 954 mc/s alla sezione 86 S (ponte SP1), a 940 mc/s alla sezione 74 S (Autostrada A14), a 923 mc/s alla sezione 56 (ingresso del fiume nel territorio del Comune di Ravenna), a 905 mc/s alla sezione 21 S (ponte della SP45).

La Figura 28 si riferisce invece al transito dell'onda 100-ennale, il cui colmo passa dal valore di 873 mc/s, assunto nella sezione iniziale in corrispondenza dell'attraversamento della via Emilia, a 867 mc/s alla Sez 99 S (ponte ferrovia Bologna-Ancona), a 843 mc/s alla sezione 86 S (ponte SP1), a 829 mc/s alla sezione 74 S (Autostrada A14), a 815 mc/s alla sezione 56 (ingresso del fiume nel territorio del Comune di Ravenna), a 797 mc/s alla sezione 21 S (ponte della SP45). Nel complesso il colmo dell'onda 100-ennale si riduce di poco meno del 7% dalla SS9 all'ingresso nel Comune di Ravenna e di poco meno del 9% dalla SS9 alla confluenza con il fiume Ronco. Valori quasi identici di riduzione del colmo si riscontrano per l'onda 200-ennale.

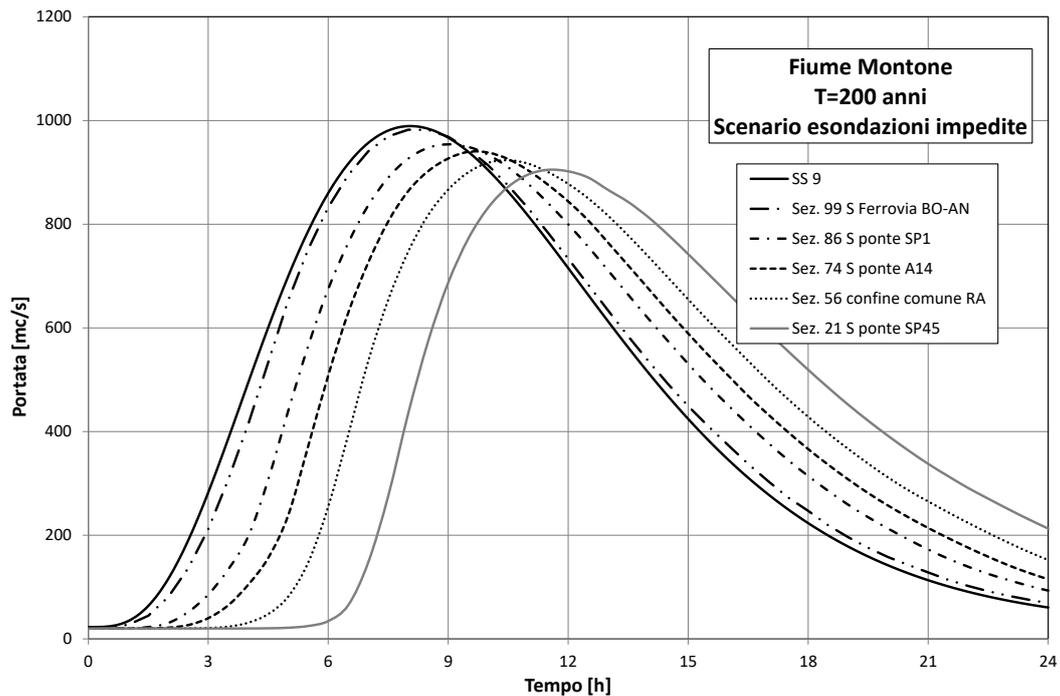


Figura 27 - Onde di piena 200-ennali del fiume Montone in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedite.

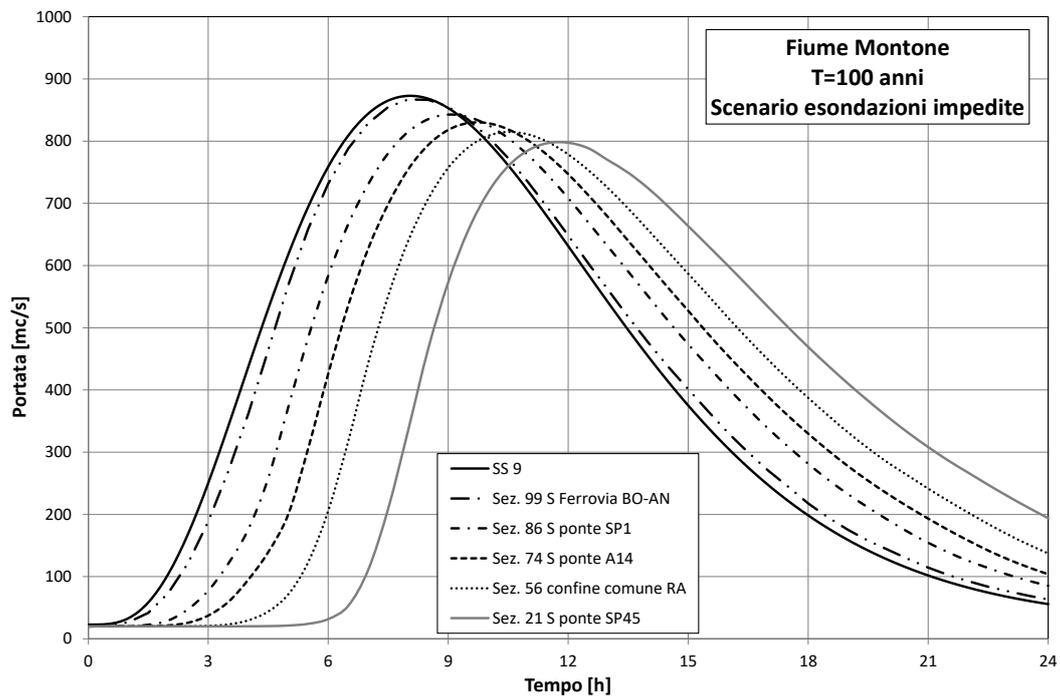


Figura 28 - Onde di piena 100-ennali del fiume Montone in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedite.

Passando all'esame del fiume Ronco, la Tavola 3, allegato cartografico alla presente relazione, riporta i massimi profili del pelo libero dalla via Emilia alla confluenza col fiume Montone e poi lungo

il percorso dei fiumi Uniti fino alla foce a mare. Anche questa tavola riporta sia i profili ad esondazioni libere che quelli ad esondazioni impedite. Sempre focalizzando, per il momento, l'analisi sul caso delle esondazioni impedite, si osserva come, anche per questo corso d'acqua, il sormonto sia generalizzato, sia per T=100 che per T=200 anni, con sommergenze elevate.

Nella Figura 29 vengono riportati, sempre per il caso di esondazioni impedite, gli andamenti delle onde di piena per T=200 anni in alcune sezioni del fiume Ronco, dall'attraversamento della via Emilia fino alla confluenza col Montone. Si nota come, nel caso del Ronco, la laminazione dell'onda sia più accentuata rispetto al caso del Montone, e si manifesti soprattutto nel primo tratto, dall'attraversamento della SS9 a quello della A14. Il colmo dell'onda 200-ennale che, in corrispondenza della via Emilia ammonta a 802 mc/s, si riduce a 685 mc/s nella sezione 64S (ponte A14), con una laminazione di quasi il 15%. Più a valle l'onda continua a laminarsi lungo il percorso ma in maniera meno accentuata; il colmo si riduce a 674 mc/s nella sezione 56 (ingresso nel Comune di Ravenna, con una riduzione del 2% rispetto alla sezione della A14 e al 16% rispetto a quella della SS9), a 666 mc/s nella sezione 46 S (ponte SP53) e a 655 mc/s nella sezione 27S (ponte SP3).

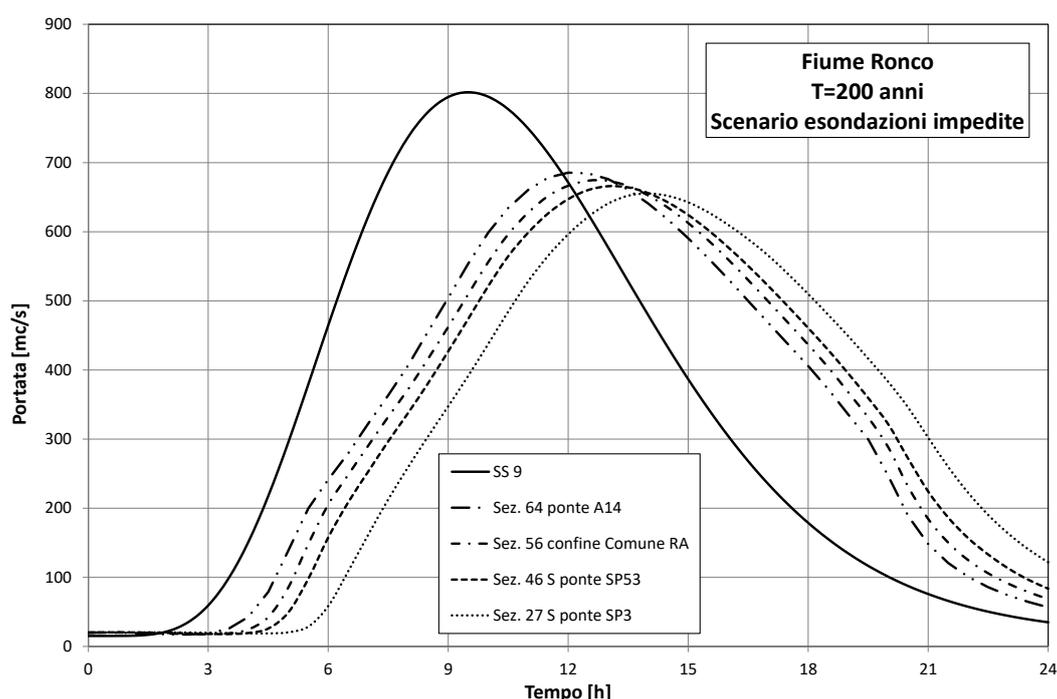


Figura 29 - Onde di piena 200-ennali del fiume Ronco in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedito.

La Figura 30 si riferisce invece al transito dell'onda 100-ennale; la sua osservazione porta a considerazioni analoghe a quelle fatte per l'onda 200-ennale. Si nota infatti una sensibile laminazione dell'onda nel primo tratto a monte dell'autostrada A14; il colmo passa infatti da 708

mc/s in corrispondenza della via Emilia a 607 mc/s all'A14, riducendosi, anche in tal caso, del 15% circa. Verso valle la laminazione è meno accentuata; il colmo ammonta a 598 mc/s nella sezione 56 (ingresso nel Comune di Ravenna), a 591 mc/s nella sezione 46 S (ponte SP53) e a 581 mc/s nella sezione 27S (ponte SP3).

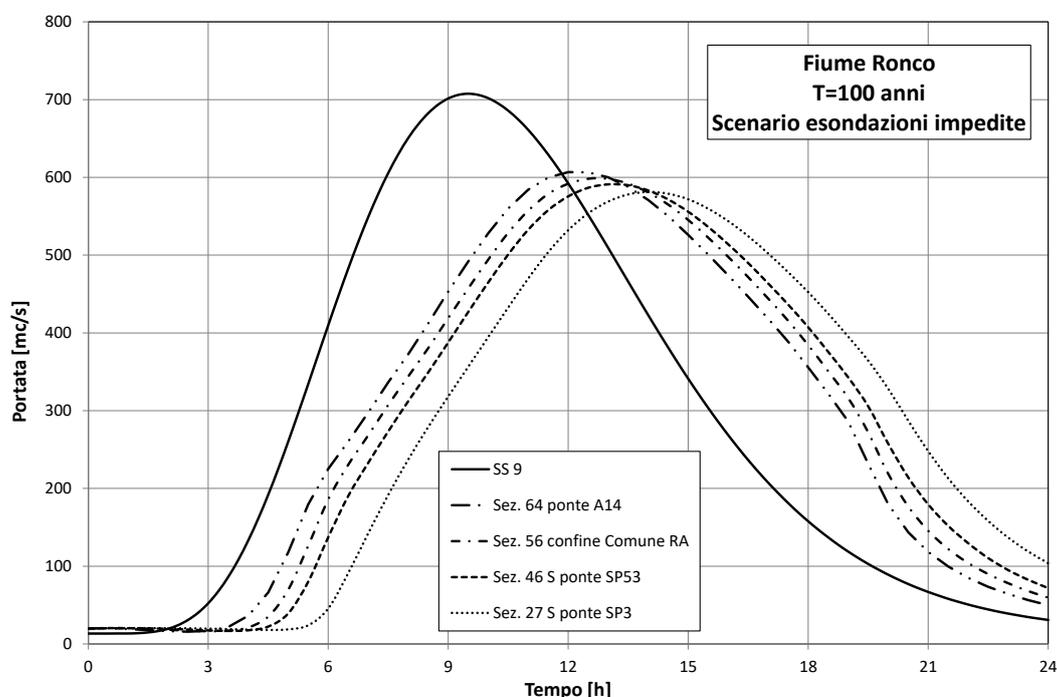


Figura 30 - Onde di piena 100-ennali del fiume Ronco in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedito.

Per quanto riguarda i fiumi Uniti, i profili di piena lungo il loro sviluppo, dalla sezione iniziale, coincidente con la confluenza tra Ronco e Montone, allo sbocco a mare, sono riportati sia nella Tavola 4 che nella Tavola 5, già commentate. Va segnalato che, nel presente studio, non si sono fatte particolari ipotesi sulla possibile non contemporaneità delle precipitazioni intense che interessano i bacini del Ronco e del Montone, di cui si sarebbe potuto in qualche modo tenere conto imponendo un'opportuna traslazione temporale delle rispettive onde di piena; di conseguenza, lo scenario considerato risulta abbastanza cautelativo. D'altronde, non vi sono solide basi conoscitive per ipotizzare e quantificare, in maniera che non sia del tutto arbitraria, uno sfasamento temporale tra le onde stesse; anzi la contiguità dei bacini componenti e la somiglianza delle loro superfici e caratteristiche geomorfologiche fa ritenere non infondata l'ipotesi di occorrenza contemporanea degli eventi meteorici e quindi delle onde di piena più importanti. In ogni caso, va ribadito che, come poc'anzi accennato, trattasi di ipotesi certamente cautelativa; ciò è peraltro mostrato anche dall'evidenza storica recente: il 20 settembre del 2014 si è avuta un'importante piena del Montone

(come anche sul Lamone), dovuta a forti precipitazioni sul bacino montano, che ha fatto registrare, su tutti gli idrometri posti nel tratto montano del corso d'acqua, i livelli massimi osservati dall'inizio della serie in telemisura ed oltre, mentre non si è verificato analogo fenomeno sul Ronco.

La Figura 31 riportata gli andamenti delle onde di piena per T=200 anni in due sezioni dei fiumi Uniti, quella iniziale di confluenza tra Ronco e Montone e la Sez. 15 S, posta in corrispondenza del ponte della SS67. Si nota come il colmo si lamini in maniera molto modesta, passando da 1492 mc/s a 1488 mc/s. Stesse considerazioni valgono per il caso della piena 100-ennale, cui si riferisce la Figura 32; la portata al colmo passa dal valore di 1321 mc/s nella sezione iniziale (confluenza Ronco-Montone) a 1318 mc/s nella Sez. 15S (ponte SS67).

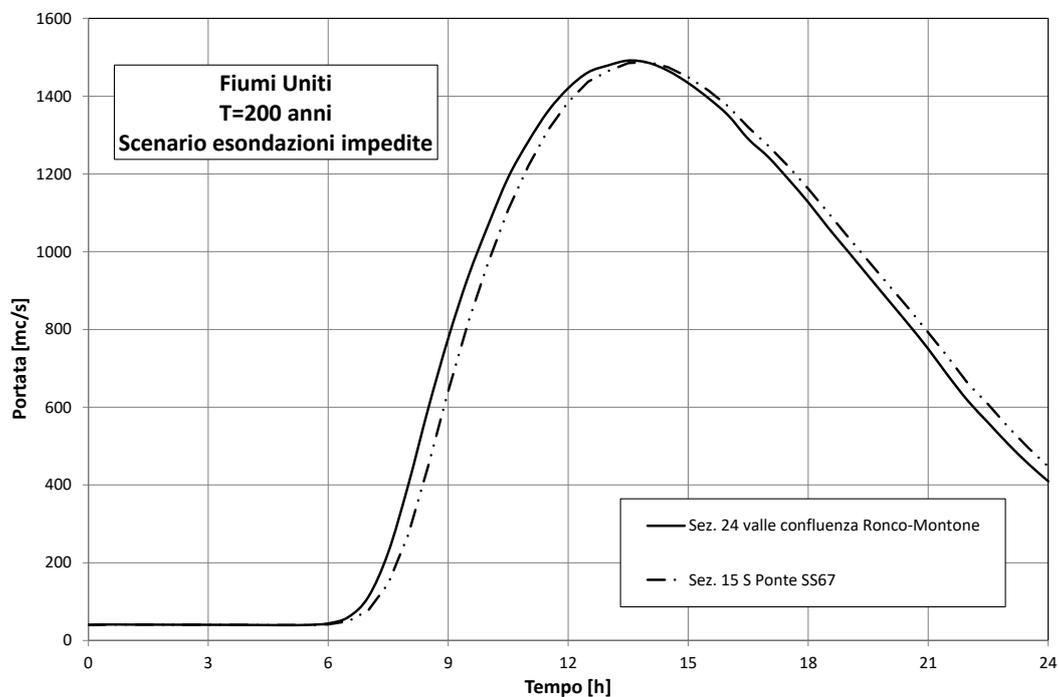


Figura 31 - Onde di piena 200-ennali dei fiumi Uniti in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedito.

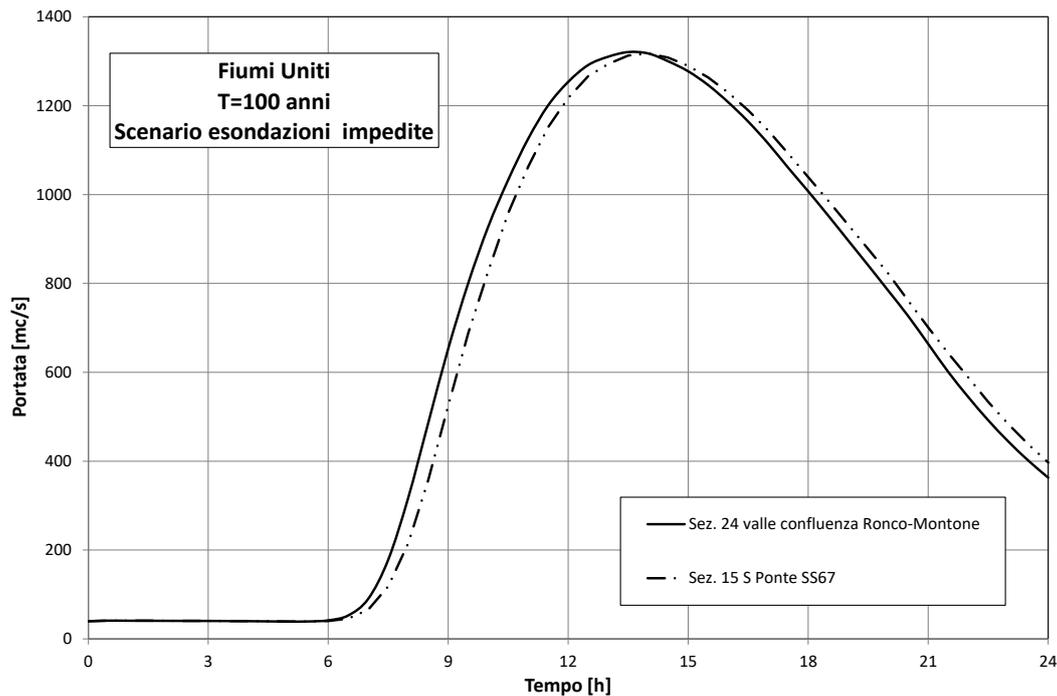


Figura 32 - Onde di piena 100-ennali dei fiumi Uniti in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedito.

La situazione relativa al fiume Lamone è documentata dalla Tavola 6, allegato cartografico alla presente relazione, che riporta i massimi profili del pelo libero dalla via Emilia alla foce a mare, dalla Figura 33, che riporta le onde per T=200 anni in alcune sezioni significative, e dalla Figura 34, che riporta l'analoga informazione per T=100 anni. Dalla Tavola 6, sempre focalizzando l'attenzione sui profili del pelo libero relativi allo scenario ad esondazioni impedito, si osserva come, anche per questo corso d'acqua, il sormonto sia generalizzato, sia per T=100 che per T=200 anni, con sommergenze elevate. Va segnalato che, per tale corso d'acqua, si manifesta una netta discontinuità nel profilo delle quote arginali a valle della sezione 76, molto evidente nell'elaborato grafico, con un innalzamento rispetto alle quote degli argini posti più a monte. Tale circostanza è stata prontamente segnalata ai Tecnici del Servizio Area Romagna (ex Servizio Tecnico di Bacino Romagna) dell'Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile della Regione Emilia-Romagna, che comunque ne erano già a conoscenza.

Dalla Figura 33 si nota come, nel caso del Lamone, la laminazione dell'onda 200-ennale si manifesti, nello scenario ad esondazioni impedito, in maniera piuttosto uniforme lungo il percorso: il colmo dell'onda 200-ennale che, in corrispondenza della via Emilia, ammonta a 1028 mc/s, si riduce a 972 mc/s nella sezione 140 (attraversamento della A14), con una laminazione del 5% circa. Il colmo si riduce poi progressivamente a 939 mc/s nella sezione 108 (ponte della ferrovia Faenza-Rossi-Ravenna) e a 918 mc/s nella sezione 78a, che corrisponde all'ingresso del corso d'acqua nel territorio

del Comune di Ravenna (con una laminazione del 10.6% rispetto alla sezione posta sulla via Emilia), a 888 mc/s nella sezione 23 (ponte via S. Alberto, SP1).

Per quanto riguarda invece l'onda 100-ennale, dalla Figura 34 si possono trarre conclusioni simili a quelle dell'analisi delle onde 200-ennali. Anche qui la laminazione si sviluppa con una progressione piuttosto uniforme; il colmo dell'onda che, in corrispondenza della via Emilia, risulta pari a 907 mc/s si riduce a 891 mc/s nella sezione 140 (attraversamento della A14), a 828 mc/s nella sezione 108 (ponte della ferrovia Faenza-Russi-Ravenna) e a 808 mc/s nella sezione 78a, all'ingresso del Comune di Ravenna (con una laminazione del 10.8% rispetto alla sezione posta sulla via Emilia) e, infine, a 779 mc/s nella sezione 23 (ponte via S. Alberto, SP1).

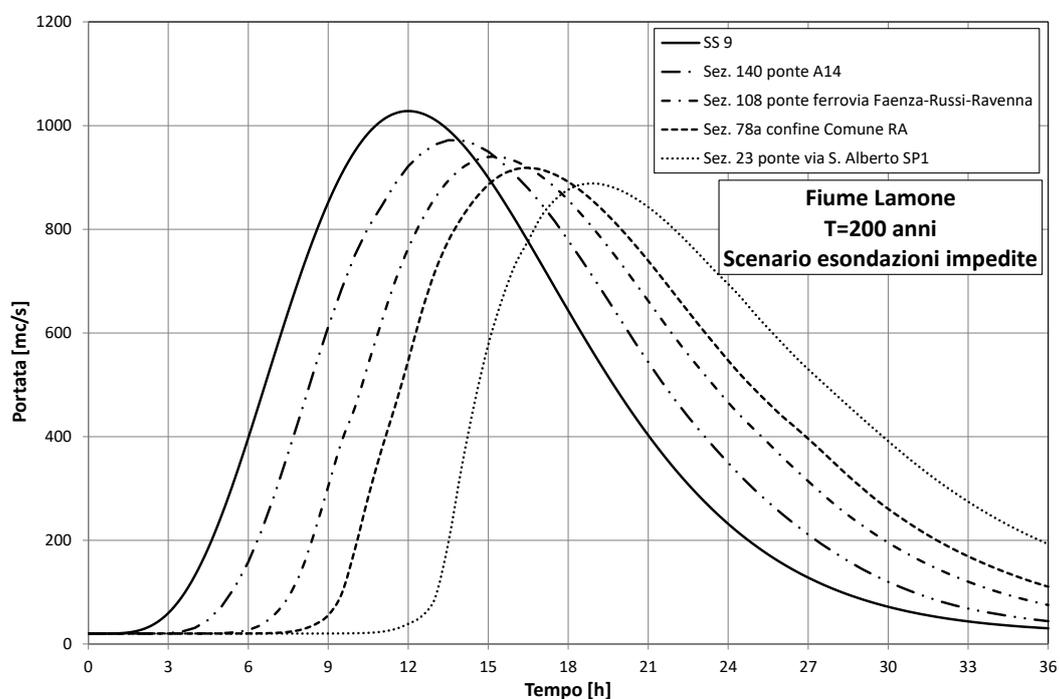


Figura 33 - Onde di piena 200-ennali del fiume Lamone in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedito.

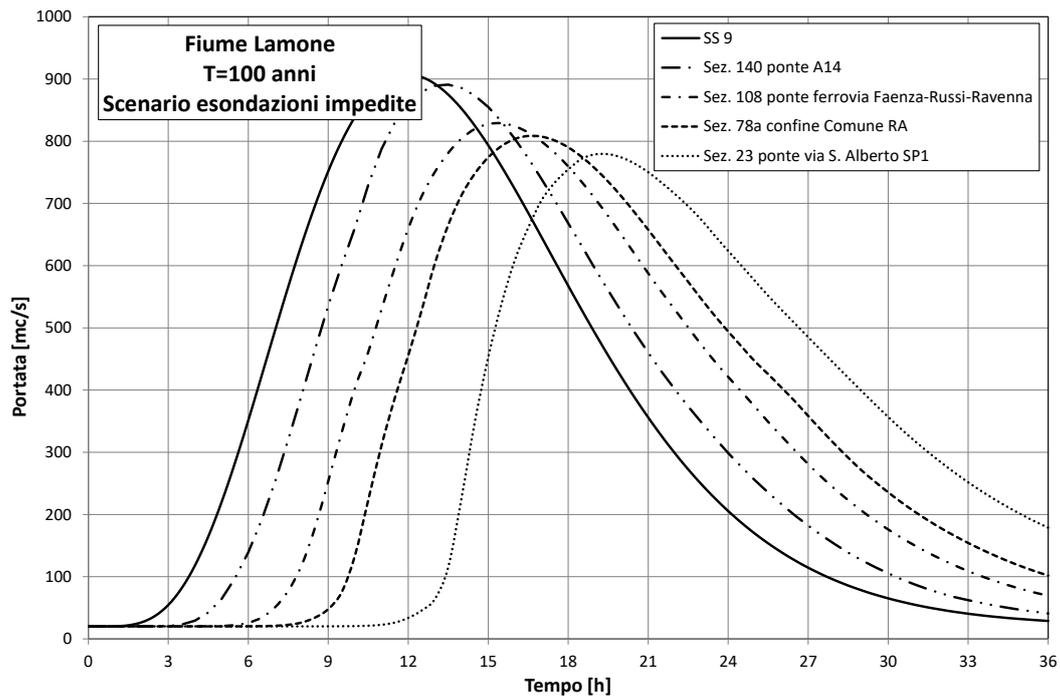


Figura 34 - Onde di piena 100-ennali del fiume Lamone in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedite.

Per quanto riguarda il fiume Savio, la Tavola 5 mostra i profili del pelo libero al transito del colmo della piena 100-ennale e di quella 200-ennale, mentre la Figura 35 e la Figura 36 mostrano gli andamenti delle onde di piena, rispettivamente 200-ennali e 100-ennali, in alcune sezioni scelte lungo il corso d'acqua, sempre nello scenario ad esondazioni impedito. Per quanto riguarda tale scenario, la Tavola 5 mostra estese esondazioni, quasi generalizzate su tutto lo sviluppo del corso d'acqua all'interno del Comune di Ravenna, con tiranti di sommersa piuttosto importanti. L'andamento delle onde di piena si presenta in questo caso peculiare.

Come già discusso in precedenza, per questo corso d'acqua, è stato necessario ricorrere ad una correzione della geometria delle sezioni fornite dal Servizio Area Romagna (ex Servizio Tecnico di Bacino Romagna) dell'Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile della Regione Emilia-Romagna, in modo da riprodurre in maniera più accurata il comportamento del corso d'acqua stesso nella zona denominata delle curve di Martorano. Infatti, in tale tratto, compreso tra la città di Cesena e l'attraversamento dell'autostrada A14, il corso d'acqua, pur in presenza di un sistema arginale discontinuo, è interessato dalla presenza di una serie di confinamenti antropici che determinano la presenza di una serie di aree di espansione laterale, singolarmente di superficie relativamente modesta ma nel complesso di importante volumetria.

Dalla Figura 35 e dalla Figura 36 si nota chiaramente l'effetto di laminazione prodotto da tali aree di espansione laterali; effetto che, come si è verificato, risulterebbe assai più modesto (sempre nello scenario ad esondazioni impedito) qualora si adottasse nel modello la geometria originaria, inizialmente messa a disposizione dello scrivente. Dalla Figura 35, che si riferisce al caso T=200 anni, si nota come l'onda iniziale alla via Emilia, avente colmo pari a 1313 mc/s, si lamina molto poco fino alla Sez.97S (ponte via Ugo La Malfa) e poi si lamina in maniera molto più accentuata nel tratto a valle fino all'attraversamento della A14; infatti, il colmo si riduce a 1122 mc/s nella sezione 88 S (ponte SP140) e poi a 1031 mc/s nella sezione 73 S (attraversamento A14), con una laminazione complessiva, rispetto all'onda iniziale e alla SS9, di circa 280 mc/s, pari al 22%; la laminazione procede poi ad un ritmo molto più modesto nel tratto più a valle, fino all'ingresso nel Comune di Ravenna (Sez. 62), ove il colmo ammonta a 1020 mc/s, riducendosi di soli 11 mc/s rispetto a quello che si ha in corrispondenza della autostrada A14; infine, la laminazione prosegue con ritmi analoghi, ma un po' più accentuati, fino alla Sez.18 (ponte via Romea Sud), ove il colmo ammonta a 973 mc/s. Analoghe considerazioni si possono desumere dall'analisi della Figura 36, che si riferisce al caso T=100 anni. Anche in tal caso, l'onda iniziale alla via Emilia, che ha colmo pari a 1168 mc/s, si lamina molto poco fino alla Sez.97S (ponte via Ugo La Malfa, portata massima 1150 mc/s); più a valle, il colmo si riduce in maniera molto più accentuata, abbattendosi a 973 mc/s nella sezione 88 S (ponte SP140) e poi a 912 mc/s nella sezione 73 S (attraversamento A14), con una laminazione complessiva, rispetto all'onda iniziale (alla SS9), di 247 mc/s, pari al 21%. Ancora più a valle il ritmo di laminazione si riduce; nella Sez.62, all'ingresso nel Comune di Ravenna, il colmo ammonta a 903 mc/s, ed è quindi inferiore di soli 9 mc/s rispetto a quello che si ha alla A14; infine, il tratto più a valle evidenzia un ritmo di laminazione un po' più accentuato, con il colmo che si riduce a 854 mc/s nella Sez.18 (ponte via Romea Sud).

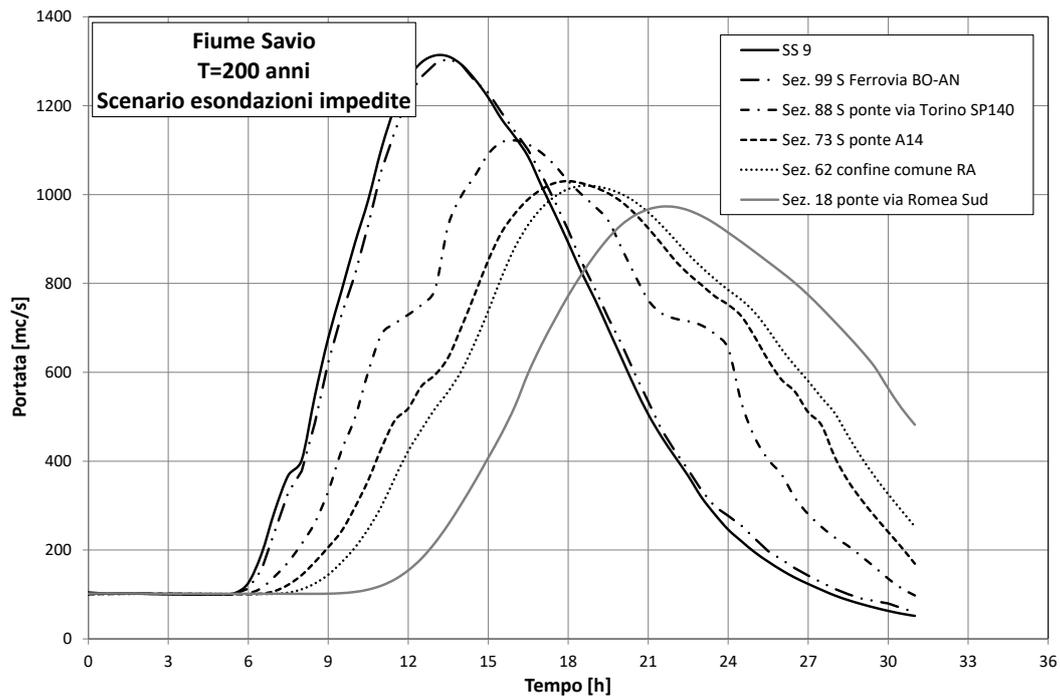


Figura 35 - Onde di piena 200-ennali del fiume Savio in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedito.

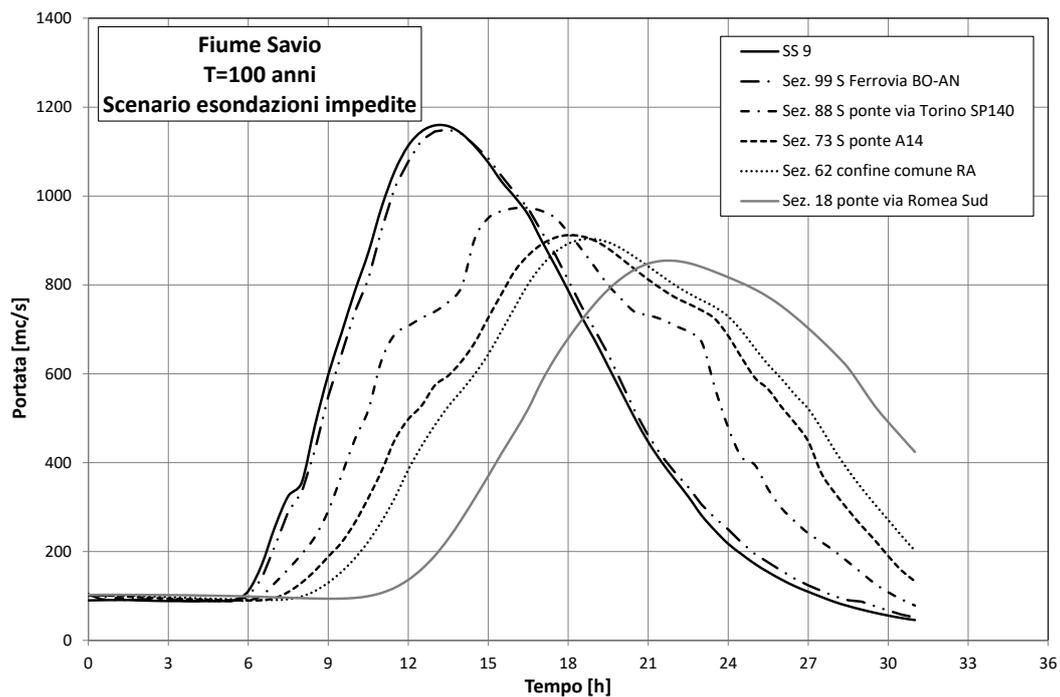


Figura 36 - Onde di piena 100-ennali del fiume Savio in varie sezioni nello scenario ad esondazioni impedito.

I risultati della modellazione del torrente Bevano, relativi allo scenario ad esondazioni impedito, sono riportati nella Tavola 7; in tale elaborato grafico sono contenuti i profili del livello massimo assunto dal pelo libero dell'onda 100-ennale e di quella 200-ennale, oltre ai profili ad

esondazioni libere di pari tempo di ritorno, che saranno discussi nel capitolo seguente. A differenza degli altri corsi d'acqua, si è invece ritenuto non significativo effettuare un'analisi comparativa delle onde di piena nelle varie sezioni. Ciò in quanto, nel caso del Bevano, si hanno portate di colmo generalmente crescenti lungo il percorso, essendo le onde stesse fortemente influenzate dalle immissioni degli emissari delle reti di scolo di bonifica; ciò fa sì che risulti impossibile discernere gli effetti di laminazione indotti dalla propagazione. Ritornando all'analisi dei profili, dalla Tavola 7 si nota come, nel caso ad esondazioni impedito, con l'eccezione di qualche breve tratto nella parte più a monte, la situazione di sormonto sia generalizzata e interessa anche tutto il territorio del Comune di Ravenna. All'interno di questo, con eccezione di un breve tratto alla foce, si hanno valori caratteristici della sommergezza rispetto alle sommità arginali di circa 1.5 m per l'onda 100-ennale e di circa 2 m per l'onda 200-ennale.

7. MODELLO NELLO SCENARIO DI ESONDAZIONI LIBERE

Nel presente capitolo vengono descritti i risultati ottenuti dalle simulazioni, condotte con il modello matematico nello scenario ad esondazioni libere, relative ai tempi di ritorno $T=100$ e $T=200$ anni. Si è già detto delle cautele con cui vanno utilizzati i risultati delle simulazioni che derivano da questo tipo di schematizzazione, in particolare per quanto riguarda la possibilità di utilizzare gli stessi per caratterizzare il reale stato di sicurezza dei territori rivieraschi; considerando l'esondazione a campagna illimitata, infatti, lo stato di rischio di alcuni tratti fluviali potrebbe risultare significativamente sottostimato. Si è anche detto come l'attendibilità di questi risultati potrebbe essere significativamente migliorata passando da una schematizzazione monodimensionale, qual'è quella che è stata implementata nel presente studio in base a quanto concordato con l'Amministrazione, ad una schematizzazione quasi-bidimensionale, considerando l'effettiva geometria delle aree inondabili a campagna e la relativa volumetria associata. Miglioramenti ancora maggiori potrebbero essere ottenuti con una schematizzazione puramente bidimensionale, ovviamente più laboriosa e onerosa da implementare, avente come dominio di analisi del moto dell'insieme alveo fluviale-campagna circostante, attraverso la quale si possono considerare anche le dinamiche di flusso nelle aree esterne all'alveo anziché schematizzarle, come avviene invece nel caso quasi bidimensionale, come aree confinate di vaso-svaso, che non partecipano al moto d'insieme. Con queste avvertenze, si passa adesso alla discussione dei risultati ottenuti.

Per quanto riguarda il Montone, dalla Tavola 4, elaborato cartografico allegato alla presente relazione, possono desumersi i profili dei massimi livelli del pelo libero al transito dell'onda 200-ennale e di quella 100-ennale, nel caso ad esondazioni libere, per il tratto che si estende dall'attraversamento della via Emilia alla confluenza col fiume Ronco e poi lungo il percorso dei fiumi Uniti, fino alla foce a mare. Nella medesima tavola, come già indicato, sono rappresentati anche i profili dei massimi livelli del pelo libero nel caso di esondazioni impedito, di cui però si è già riferito al capitolo precedente. Il fiume Montone si presenta arginato per tutto il tratto investigato; al di là degli argini non sembrano essere presenti significativi ostacoli morfologici, naturali o artificiali, in grado di determinare l'espansione a campagna dell'esondazione, ovviamente fatte salve situazioni locali. Questa circostanza rende la schematizzazione ad esondazioni libere più realistica rispetto ad altre situazioni morfologiche. Si nota come, nel primo tratto del corso d'acqua e fino all'autostrada A14, si abbiano ripetute ed estese situazioni di sormonto arginale che fanno sì che, fin da subito, i profili ad esondazioni libere si abbassino sensibilmente, di alcuni metri, rispetto a quelli ad esondazioni impedito. L'effetto dei sormonti che si hanno nel tratto a monte dell'A14 provoca una netta

decapitazione dell'onda di piena; il profilo si abbassa quindi notevolmente e, nel territorio del Comune di Ravenna, soggiace alle sommità arginali con franchi dell'ordine del metro o più. Il franco passa da poco più di 1.20 m nei pressi del confine comunale ad oltre 2.20 m tra il ponte della SP5 e la chiusa San Marco (con un massimo di 3 metri e mezzo al ponte SP45). Più a valle, lungo il corso dei fiumi Uniti, in considerazione dell'incremento delle portate dovuto all'apporto del Ronco, i franchi si riducono, fino ad annullarsi o quasi in prossimità della chiusa.

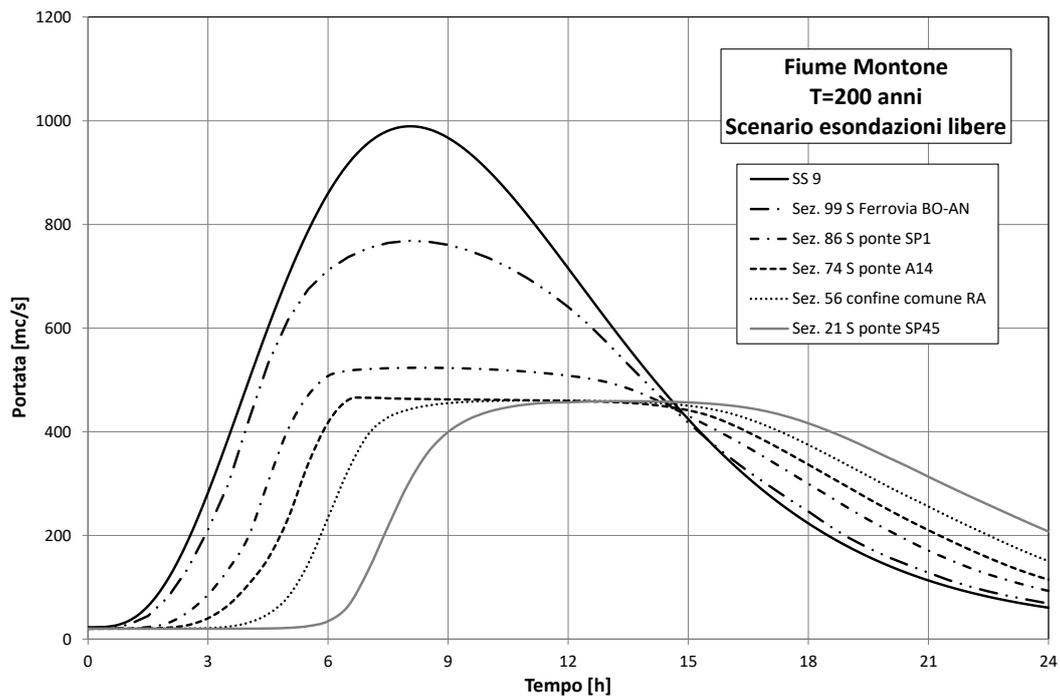


Figura 37 - Onde di piena 200-ennali del fiume Montone in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

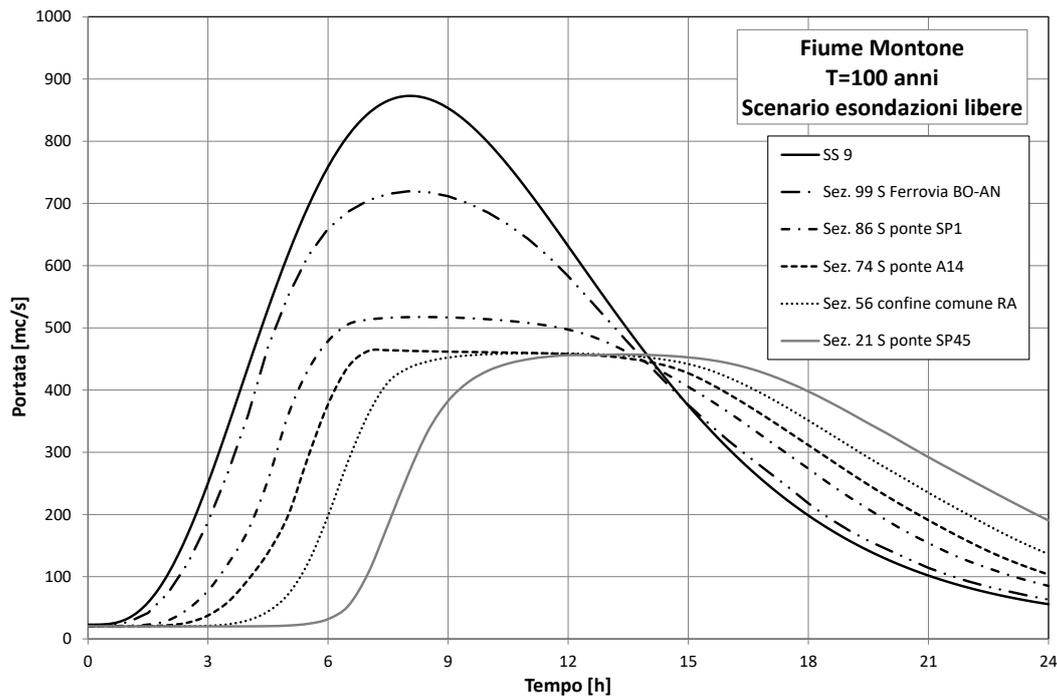


Figura 38 - Onde di piena 100-ennali del fiume Montone in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

Nella Figura 37 e nella Figura 38 vengono riportati gli andamenti delle onde di piena, rispettivamente per $T=200$ anni e $T=100$ anni, in alcune sezioni. Si nota la netta laminazione del colmo dell'onda di piena nel tratto dalla via Emilia all'autostrada A14, soprattutto nel primo tratto fino alla SP1, con una decapitazione che risulta molto simile al caso di una laminazione ideale. Nel caso dell'onda 200-ennale (Figura 37), il colmo passa da 989 mc/s, in corrispondenza dell'attraversamento della SS9, a 768 mc/s, in corrispondenza della Sez 99S, situata all'attraversamento della ferrovia Bologna-Ancona; più a valle, si riduce a 523 mc/s alla sezione 86 S (ponte SP1), a 465 mc/s alla sezione 74 S (Autostrada A14), con una diminuzione complessiva di 523 mc/s pari al 52%; quindi si ha più che un dimezzamento del colmo di piena iniziale. Più a valle l'onda non si lamina quasi più, sia per la forma molto appiattita che ha ormai assunto, difficilmente laminabile ulteriormente, sia per il fatto che non si verificano più esondazioni. Nel caso dell'onda 100-ennale (Figura 38), il colmo si riduce da 873 mc/s in corrispondenza della SS9 a 464 mc/s alla sezione 74 S (Autostrada A14), con una riduzione complessiva del picco di 409 mc/s pari al 47% circa. Si nota come, in tale sezione, il colmo centennale e quello duecentennale praticamente coincidano fra loro, per effetto delle diffuse esondazioni a monte, che di fatto limitano il colmo dell'onda veicolata a valle all'officiosità minima dell'alveo. Questa sostanziale coincidenza di portate si verifica anche in tutte le sezioni del tratto di valle, per cui di fatto nel territorio ravennate, nel caso ad

esondazioni libere, i profili del massimo pelo libero dell'onda 100-ennale e di quella 200-ennale risultano pressoché coincidenti fra loro (v. Tavola 4).

La situazione del fiume Ronco è un po' diversa da quella del Montone. In questo caso, infatti, gli argini si sviluppano con continuità a partire circa dalla sezione 57S, posta circa 2 km a valle dell'attraversamento dell'autostrada A14 e che corrisponde, di fatto, all'ingresso nel Comune di Ravenna. Nel primo tratto, tra l'attraversamento della via Emilia e quello dell'autostrada A14, il corso d'acqua si presenta confinato dalla morfologia naturale del territorio, con quote di confinamento che non sono raggiungibili dalle piene 100-ennali e 200-ennali. Pertanto in tale tratto non si hanno esondazioni verso la campagna posta esternamente a tali elementi morfologici e i profili ad esondazione libera coincidono con quelli ad esondazioni impedito. Va notato che tale comportamento non si sarebbe riscontrato qualora si fossero adottate le geometrie delle sezioni trasversali fornite dal Servizio Area Romagna (ex Servizio Tecnico di Bacino Romagna), com'era stato fatto nella fase iniziale dello studio. Tali sezioni, interessando il solo alveo fluviale relativo alle piene ordinarie, si interrompevano a quote più basse rispetto a quelle degli effettivi confinamenti morfologici. Ne conseguiva che, in tale primo tratto del corso d'acqua, le simulazioni effettuate evidenziavano ampie esondazioni, con una conseguente forte riduzione dei tiranti di deflusso nella porzione di alveo posta più a valle.

Passando adesso all'analisi di quello che succede nel tratto più a valle, si osserva che il venir meno di tali confinamenti morfologici naturali fa sì che, nel primo tratto di attraversamento del territorio comunale, le simulazioni evidenzino la presenza di diffuse esondazioni, che determinano una significativa laminazione dell'onda (anche se meno accentuata di quella del Montone). Il tratto interessato dalle esondazioni si estende quasi fino al ponte della SP3; più a valle, nel caso ideale di esondazioni libere, si hanno franchi variabili da circa 50-60 cm fino ad un metro e più, che si riducono poi, come già discusso, nel tratto dei fiumi Uniti, soprattutto in prossimità della chiusa.

Passando all'esame delle onde di piena simulate nelle varie sezioni, nella Figura 39 e nella Figura 40 vengono riportati gli andamenti di quelle 200-ennali e 100-ennali, rispettivamente. Analizzando il caso $T=200$ anni (Figura 39), si nota una prima laminazione del colmo nel tratto tra la sezione SS9 e il confine comunale; il colmo passa da 802 mc/s in corrispondenza dell'attraversamento della SS9 a 694 mc/s in corrispondenza di quello dell'autostrada A14, a 684 mc/s al confine comunale, con una riduzione complessiva di 118 mc/s, pari a quasi il 15%. Successivamente, per effetto delle esondazioni, il colmo si riduce a 580 mc/s nella sezione 46S (ponte SP 53), abbattendosi quindi di circa 100 mc/s nel breve tratto tra il confine comunale e il ponte della

SP 53, e a 559 mc/s nella sezione 27S (ponte della SP3), a valle della quale, come detto, non si hanno più esondazioni. Nel caso dell'onda 100-ennale (Figura 40), possono farsi considerazioni analoghe a quelle esposte per T=200 anni. Il colmo passa da 708 mc/s alla SS9 a 610 mc/s all'attraversamento dell'autostrada A14 a 607 mc/s al confine comunale, con una riduzione complessiva di 101 mc/s pari a circa il 14%. Più a valle, il colmo si riduce a 552 mc/s nella sezione 46 S (ponte SP 53) e a 540 mc/s nella sezione 27 S (ponte della SP3), a valle della quale, come detto, non si hanno più esondazioni. A valle di tale sezione, i profili del pelo libero 200-ennale e 100-ennale, relativi alle esondazioni libere, risultano assai poco discosti fra loro, come era da attendersi in ragione dei valori molto simili assunti dalle portate di colmo 200-ennali e 100-ennali transitanti in alveo; i due profili tendono poi a coincidere mano a mano che ci si approssima alla foce, a partire dall'ingresso nei fiumi Uniti.

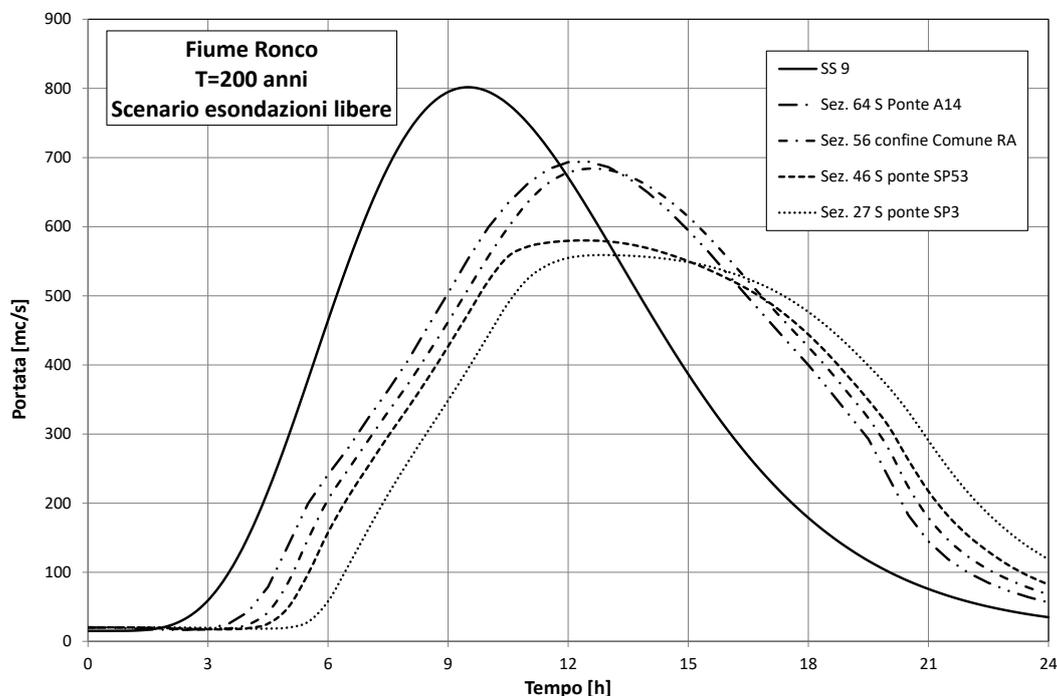


Figura 39 - Onde di piena 200-ennali del fiume Ronco in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

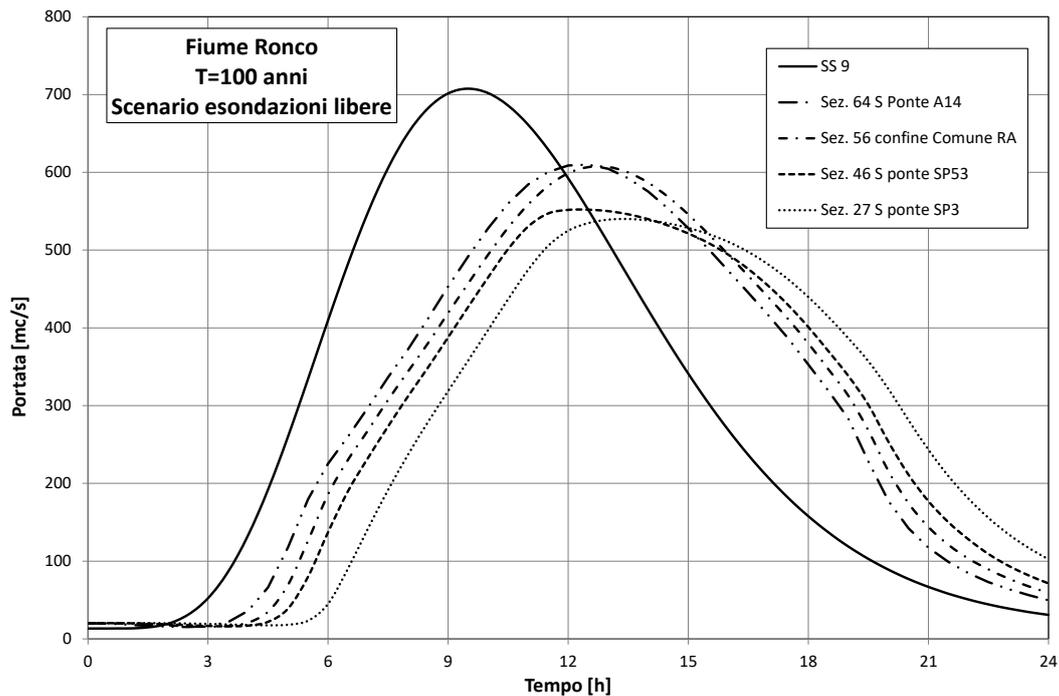


Figura 40 - Onde di piena 100-ennali del fiume Ronco in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

La Figura 41 e la Figura 42 mostrano l'andamento delle onde di piena, rispettivamente 200-ennali e 100-ennali, in due sezioni dei fiumi Uniti: la sezione 24, posta subito a valle della confluenza Ronco-Montone, e la sezione 15S, posta al ponte della SS67. Le onde delle due sezioni sono quasi coincidenti nei colmi, che ammontano a 1013 mc/s per T=200 anni e 991 mc/s per T=100 anni. Si nota la differenza molto modesta tra il colmo 200-ennale e quello 100-ennale, che motiva la quasi identità dei massimi profili del pelo libero.

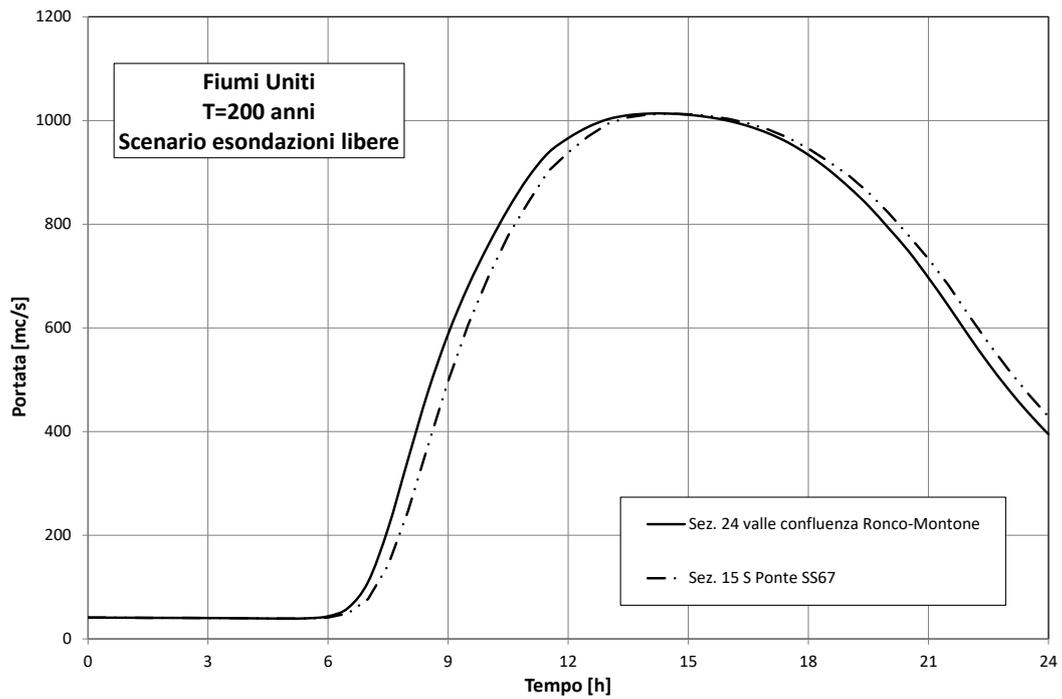


Figura 41 - Onde di piena 200-ennali dei fiumi Uniti in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

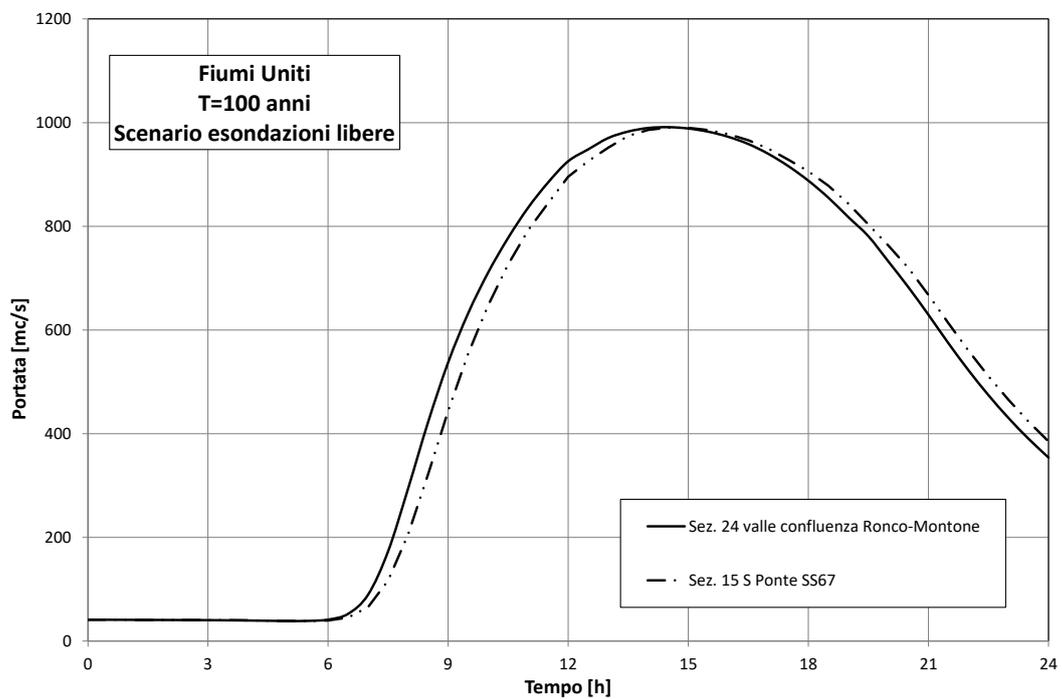


Figura 42 - Onde di piena 100-ennali dei fiumi Uniti in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

Per quanto riguarda il fiume Lamone, i profili di piena nello scenario ad esondazioni libere, per il tratto dall'attraversamento della via Emilia alla foce a mare, sono riportati nella Tavola 6, che contiene anche i già discussi profili relativi allo scenario ad esondazioni impedito. Il Lamone risulta arginato per tutto il tratto investigato e, esternamente agli argini, non sono presenti particolari elementi morfologici, naturali o artificiali, che si sviluppino con continuità e che siano quindi in grado di ostacolare l'espansione a campagna dell'esondazione. Come nel caso del Montone, anche per il Lamone la schematizzazione ad esondazioni libere si può ritenere quindi più realistica rispetto ad altre situazioni morfologiche. Si nota come, nel primo tratto del corso d'acqua, dall'attraversamento della via Emilia a quello dell'autostrada A14, le simulazioni evidenzino estesi sormonti arginali da parte del profilo dell'onda 200-ennale; questo fa sì che il profilo ad esondazioni libere per T=200 anni si abbassi di qualche metro (da circa due metri e mezzo, subito a valle del ponte dell'A14, fino ad un massimo di poco più di 4 m nel tratto successivo), rispetto all'analogo profilo ad esondazioni impedito. Nel caso dell'onda 100-ennale, invece, le situazioni di sormonto arginale sono più localizzate e i tratti interessati più brevi, per cui il profilo 100-ennale e quello 200-ennale si presentano ancora abbastanza distinti fra loro. Immediatamente a valle dell'attraversamento dell'autostrada A14, i due profili ad esondazioni libere, relativi a T=100 e T=200 anni, vengono invece a coincidere di fatto fra loro e tali si mantengono fino alla foce, per effetto delle diffuse esondazioni a monte che limitano di fatto il colmo dell'onda veicolata a valle all'efficienza minima dell'alveo. A valle dell'autostrada A14, si continuano a verificare estesi sormonti dei due profili ad esondazioni libere, che determinano esondazioni, fino al ponte della ferrovia Faenza-Russi-Ravenna (Sez. 108); di conseguenza, per effetto della laminazione dovuta all'esondazione di importanti volumi verso la campagna, il colmo di portata si abbatte sensibilmente. Tali sormonti si verificano anche più a valle, fino alla sezione 89 circa; ancora più a valle, non si verificano sormonti per cui il territorio comunale è attraversato con franchi che raggiungono anche valori di 1-2 metri; più dettagliatamente, tali franchi sono modesti nel tratto immediatamente a valle dell'ingresso nel territorio comunale, e sono variabili più a valle da 1 m a oltre 2.50 m. Va segnalato comunque, come già fatto nel caso delle simulazioni con esondazioni impedito, che per tale corso d'acqua si manifesta una netta discontinuità nel profilo delle quote arginali a valle della sezione 76, molto evidente nell'elaborato grafico, con un netto innalzamento rispetto alle quote delle sommità degli argini posti più a monte. Tale circostanza, come detto in precedenza, è stata prontamente segnalata ai Tecnici del Servizio Area Romagna (ex Servizio Tecnico di Bacino Romagna), che comunque ne erano già a conoscenza.

La Figura 43 e la Figura 44 riportano gli andamenti delle onde di piena risultanti dalle simulazioni condotte nello scenario ad esondazioni libere, rispettivamente per T=200 anni e T=100

anni, in alcune sezioni significative del fiume Lamone. Nel caso dell'onda 200-ennale (Figura 43) si nota una già significativa decapitazione dell'onda di piena nella sezione 140 (attraversamento della A14), dovuta alle esondazioni che si hanno nel primo tratto d'alveo studiato, compreso tra l'attraversamento della via Emilia e quello della A14; il colmo si riduce da 1028 mc/s in corrispondenza della SS9 a 938 mc/s in corrispondenza della A14. Più a valle il colmo si riduce nettamente abbattendosi a 416 mc/s nella sezione 108 (ponte della ferrovia Faenza-Russi-Ravenna), con una riduzione di 611 mc/s rispetto al valore assunto alla via Emilia (SS9), che corrisponde a una laminazione del 60% circa; si nota come, in tale sezione, l'onda ha assunto la forma tipicamente decapitata che corrisponde quasi al caso della laminazione ideale. Ancora più a valle la laminazione prosegue, anche se a ritmo meno accentuato, talché il colmo si riduce a 357 mc/s nella sezione 78a, che corrisponde all'ingresso del corso d'acqua nel territorio del Comune di Ravenna (con una laminazione del 65% circa rispetto alla sezione posta sulla via Emilia); tale valore di colmo si mantiene quasi stabile a valle, mancando situazioni di sormonto, cosicché nella sezione 23 (ponte via S. Alberto, SP1) il colmo ammonta a 356 mc/s.

Per quanto riguarda invece l'onda 100-ennale, dalla Figura 44 si osserva come nel primo tratto, dall'attraversamento della via Emilia a quello dell'autostrada A14, il comportamento sia sensibilmente diverso dal caso 200-ennale, come evidenziato dalla differente forma assunta dalle onde 200-ennale e 100-ennale nella sezione 140 (attraversamento A14). Passando dalla sezione iniziale (SS9) alla sezione 140 (attraversamento A14), il colmo dell'onda si riduce da 907 mc/s a 871 mc/s. Più a valle invece, il comportamento è simile al caso 200-ennale. Le estese esondazioni portano a un netto abbassamento del colmo nella sezione 108 (ponte della ferrovia Faenza-Russi-Ravenna), con una forma dell'onda pressoché decapitata rispetto a quella iniziale; in tale sezione il colmo assume il valore di 412 mc/s, con una riduzione di 495 mc/s rispetto alla SS9, che corrisponde ad una laminazione di quasi il 55%. Più a valle il colmo si riduce a 357 mc/s nella sezione 78a, che corrisponde all'ingresso del corso d'acqua nel territorio del Comune di Ravenna (con una riduzione del colmo rispetto alla sezione posta sulla via Emilia pari a 550 mc/s, che corrisponde ad una laminazione del 61% circa); tale valore di colmo, pressoché identico a quello del colmo dell'onda 200-ennale, si mantiene quasi costante a valle, cosicché nella sezione 23 (ponte via S. Alberto, SP1) il colmo ammonta a 355 mc/s.

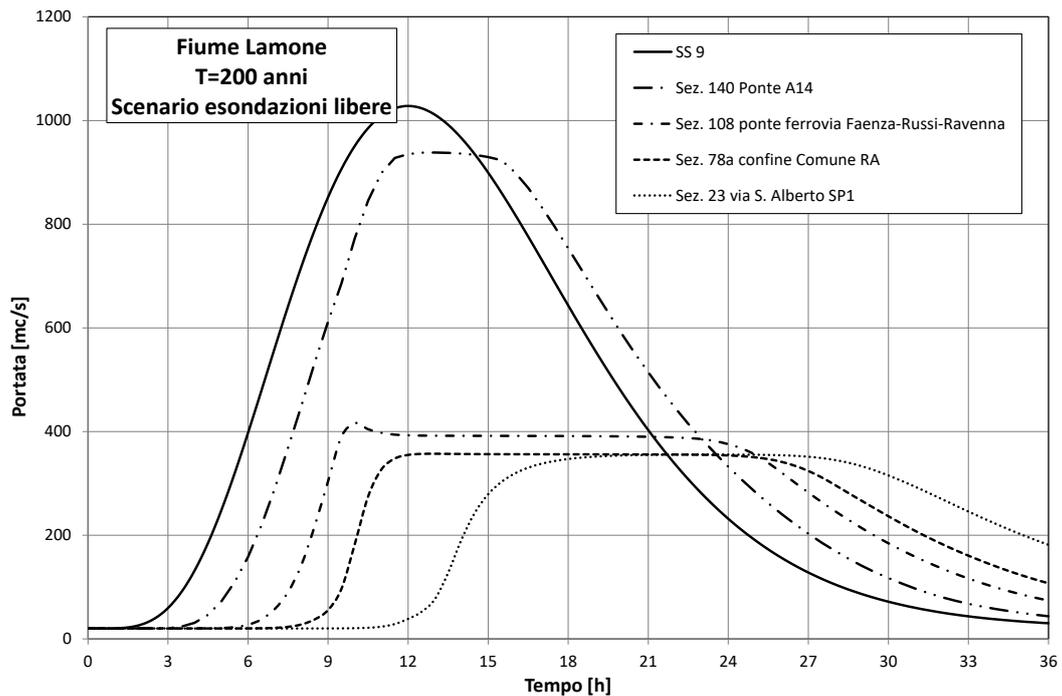


Figura 43 - Onde di piena 200-ennali del fiume Lamone in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

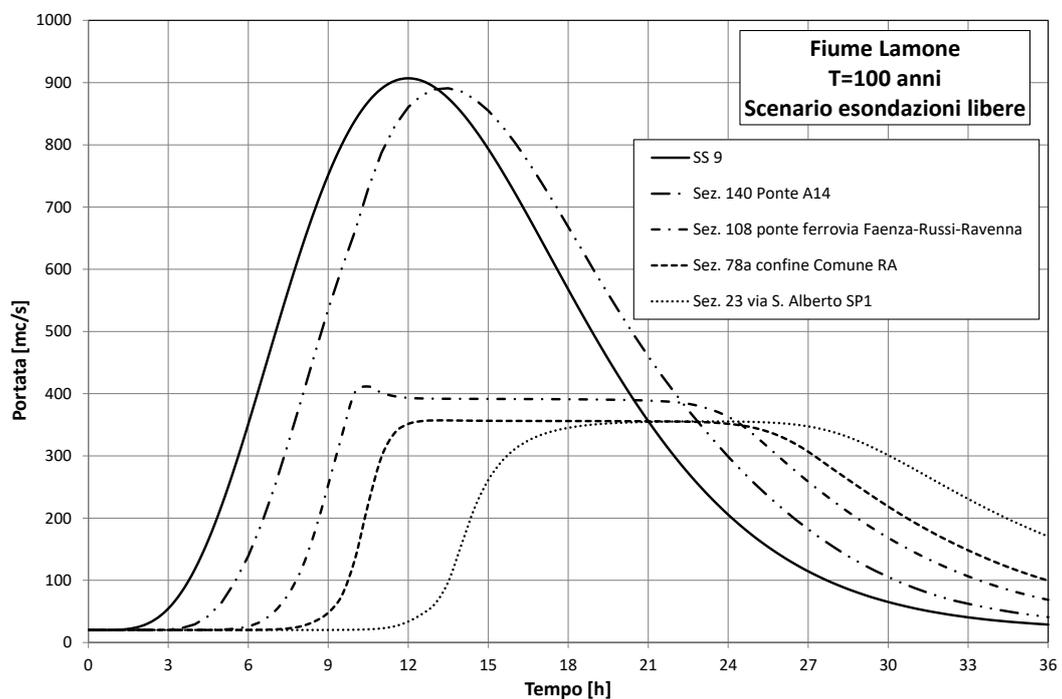


Figura 44 - Onde di piena 100-ennali del fiume Lamone in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

Per quanto riguarda i risultati della modellazione nello scenario ad esondazioni libere della propagazione delle piene del fiume Savio, si può fare riferimento alla Tavola 5, alla Figura 45 e alla Figura 46. La Tavola 5 riporta, insieme ai già discussi profili liquidi relativi al caso delle esondazioni impedito, anche i profili relativi al caso delle esondazioni libere. Sui risultati delle simulazioni relative a questo corso d'acqua hanno avuto grande influenza le revisioni della geometria inizialmente fornita dal Servizio Area Romagna (ex Servizio Tecnico di Bacino Romagna), relativamente al tratto cosiddetto delle curve di Martorano. Come già indicato, la schematizzazione della geometria risultante dalle sezioni trasversali messe a disposizione dal Servizio Area Romagna non tiene conto della presenza di elementi morfologici che determinano un effetto di confinamento dell'esondazione all'interno di una fascia relativamente ristretta, impedendo che queste si propaghino oltre, verso campagna. Le prime simulazioni eseguite, effettuate con la geometria originaria, portavano a risultati irrealistici con fuoriuscita di enormi volumi a campagna e conseguente forte abbassamento dei tiranti idrici a valle. Nel seguito, si discutono le simulazioni basate sulla geometria aggiornata, ottenuta, come accennato in precedenza, sempre impiegando una schematizzazione monodimensionale ma estendendo in tale tratto le sezioni verso campagna tramite l'utilizzo di un DEM ad alta risoluzione, avente passo di 1 m, messo a disposizione dalla Regione. Si ritiene utile evidenziare che, come già accennato, la disponibilità di questa nuova informazione potrebbe consentire, nel futuro, di implementare una schematizzazione quasi-bidimensionale o addirittura una puramente bidimensionale, che condurrebbero a risultati ancora più affidabili.

Dall'osservazione della Tavola 5 si nota che, dopo un tratto iniziale in cui si hanno alcune situazioni di sormonto, i profili delle piene 100-ennali e 200-ennali risultano, nel tratto delle curve di Martorano, normalmente contenuti all'interno dei confinamenti morfologici. A valle dell'attraversamento dell'autostrada A14, il profilo della piena 100-ennale e quello della piena 200-ennale, nello scenario ad esondazioni libere, risultano di fatto coincidenti fra loro. Oltrepassata l'autostrada A14, si hanno alcune situazioni di sormonto, che contribuiscono a limitare le portate a valle, cosicché nell'attraversamento del territorio del Comune di Ravenna il profilo del pelo libero, salvo situazioni molto localizzate, soggiace sempre alle sommità arginali.

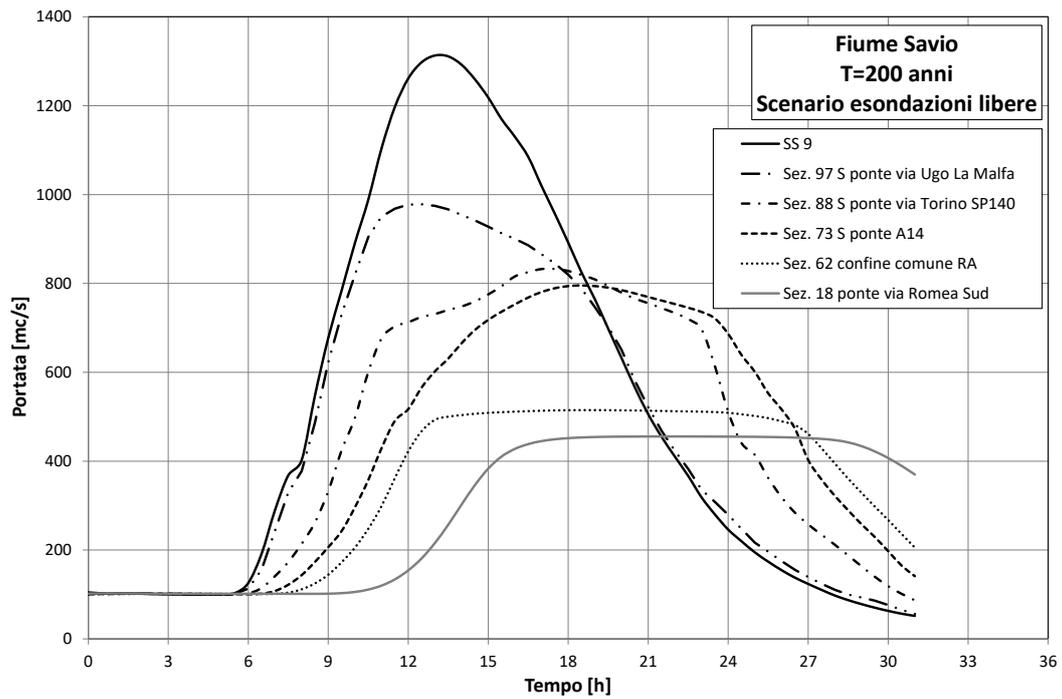


Figura 45 - Onde di piena 200-ennali del fiume Savio in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

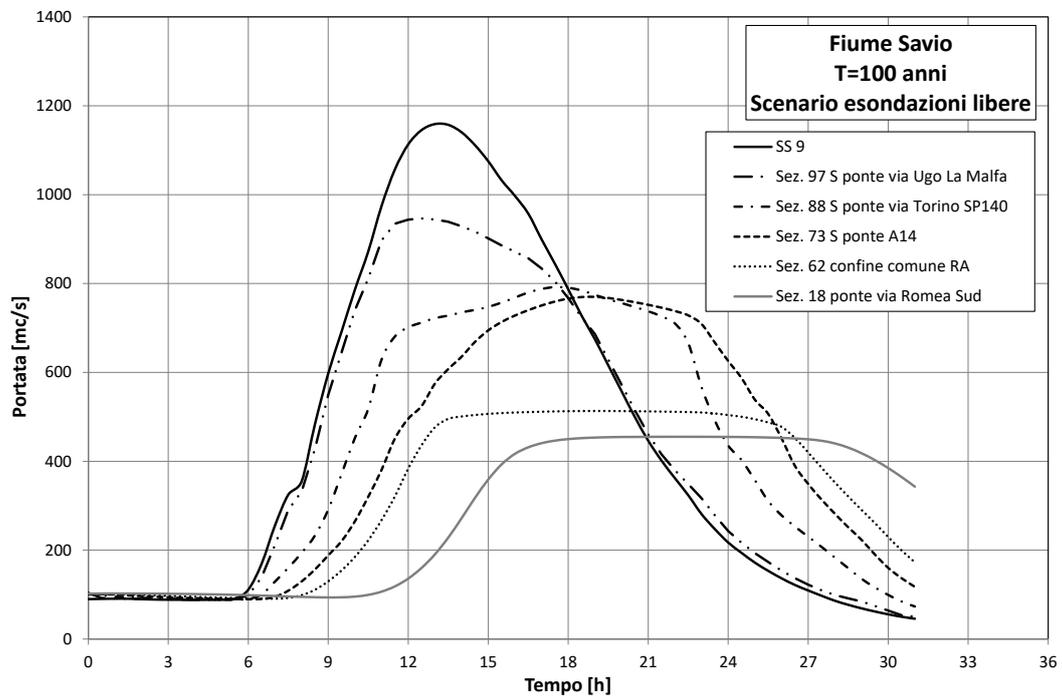


Figura 46 - Onde di piena 100-ennali del fiume Savio in varie sezioni nello scenario ad esondazioni libere.

La Figura 45 mostra il confronto tra le onde di piena 200-ennali risultanti dalla simulazione in alcune sezioni significative, mentre la Figura 46 si riferisce al caso 100-ennale. Dalla Figura 45 si nota come l'onda iniziale alla via Emilia, avente colmo pari a 1313 mc/s, si lamina in maniera significativa fino alla Sez.97S (ponte via Ugo La Malfa), ove assume un colmo di 978 mc/s. Tale tratto non è stato interessato dalla revisione della geometria, ma si può ritenere che ciò non comporti un effetto significativo sui risultati relativi al territorio del Comune di Ravenna; infatti, si è constatato, con alcune simulazioni svolte per lo scopo specifico, che, anche qualora si considerino in tale zona (a monte del ponte di via Ugo La Marfa) gli argini insormontabili, i profili idrici dei livelli di massima piena relativi allo scenario ad esondazioni libere risultano, in tutto il tratto posto a valle della A14 e quindi in particolare nel territorio comunale, di fatto coincidenti con quelli ricavati nel presente studio. Ciò è dovuto al fatto che le esondazioni si spostano verso valle ma senza determinare variazioni di rilievo oltre l'autostrada A14. Passando all'analisi delle sezioni più a valle, dalla Figura 45 si evidenzia la forte laminazione subita dall'onda nel tratto a monte della autostrada A14 e anche a valle, fino quasi al confine comunale; infatti, il colmo si riduce a 833 mc/s nella sezione 88S (ponte SP140) e poi a 795 mc/s nella sezione 73S (attraversamento A14) e infine a 515 mc/s nella Sez. 62, che coincide con l'ingresso nel territorio del Comune di Ravenna. Poco a valle di tale sezione, a partire circa dalla Sez. 55, inizia il tratto arginato con continuità. All'ingresso del territorio comunale (Sez. 62), il colmo risulta attenuato di 798 mc/s rispetto a quello che si ha della sezione iniziale (ponte SS9), con una laminazione del 61% circa. L'onda nella Sez. 62 si presenta completamente decapitata, per cui, più a valle, la laminazione procede con ritmi molto più modesti, anche per l'assenza di significativi sormonti; nella Sez.18 (ponte via Romea Sud) il colmo si riduce a 456 mc/s.

Analoghe considerazioni si possono fare per il caso delle onde relative alla piena 100-ennale, cui si riferisce la Figura 46. In tal caso, il colmo dell'onda iniziale alla via Emilia, pari a 1168 mc/s, si lamina a 947 mc/s alla Sez.97S (ponte via Ugo La Malfa); più a valle il colmo si abbatte a 792 mc/s nella sezione 88 S (ponte SP140), poi a 770 mc/s nella sezione 73S (attraversamento A14) e a 513 mc/s nella Sez.62, all'ingresso nel Comune di Ravenna, ove risulta quasi identico al colmo dell'onda 200-ennale. Nella Sez.62 il colmo risulta attenuato di 646 mc/s rispetto a quello della sezione iniziale (ponte SS9), attenuazione che corrisponde ad una laminazione del 56% circa. Come nel caso 200-ennale, anche nel caso 100-ennale l'onda nella Sez. 62 si presenta completamente decapitata per cui a valle la laminazione procede con ritmi molto più modesti, anche per l'assenza di significativi sormonti, fino alla Sez.18 (ponte via Romea Sud), nella quale il colmo dell'onda 100-ennale si riduce a 455 mc/s, valore quasi coincidente con il colmo 200-ennale.

Si può prendere spunto dal caso del fiume Savio, per fare qualche osservazione relativamente al deflusso delle principali piene storiche osservate. Facendo riferimento al periodo per il quale si dispone di registrazioni idrometrografiche del sistema di monitoraggio regionale, la piena più intensa registrata è stata quella del novembre 2005. Facendo riferimento alla sezione 37S, in corrispondenza della passerella di Castiglione di Cervia, si segnala che il massimo livello di piena registrato dall'idrometrografo presente in questa sezione in occasione di tale evento è risultato pari a 9.76 m, che, tenuto conto che la quota dello zero idrometrico è pari a 2.05 m s.l.m.m., corrisponde a una quota assoluta massima del pelo libero di piena pari a 11.81 m s.l.m.m.. In tale sezione le sommità arginali sono a quota pari a 14.11 m s.l.m.m. in sponda sinistra e a 13.70 m s.l.m.m. in sponda destra; quindi la piena risulterebbe transitata con un franco minimo pari a 1.89 m. Sempre in tale sezione, nelle simulazioni a esondazione libera, il livello massimo della piena 100-ennale e 200-ennale risultano di fatto coincidenti tra loro e pari a 11.86 m s.l.m.m. Si può quindi osservare che tale valore è in ottimo accordo con la quota liquida massima verificatasi durante l'evento del 2005; al riguardo può essere utile ricordare che il periodo di ritorno del colmo di piena verificatosi in località San Carlo fu stimato da Arpa in circa 50 anni. Queste considerazioni sono anche l'occasione per rinnovare il monito sulle cautele con cui vanno utilizzati i risultati delle simulazioni ad esondazioni libere, ai fini della caratterizzazione del reale stato di rischio idraulico dei territori.

I risultati della modellazione del torrente Bevano, relativi allo scenario ad esondazioni libere, sono riportati nella Tavola 7; in tale elaborato grafico sono contenuti i profili del livello massimo assunto dal pelo libero dell'onda 100-ennale e di quella 200-ennale, oltre ai profili ad esondazioni impediti di pari tempo di ritorno, già discussi in precedenza. Come già indicato in precedenza, per il torrente Bevano, a differenza degli altri corsi d'acqua, si è ritenuto di scarso significato effettuare un'analisi comparativa degli andamenti delle onde di piena nelle varie sezioni, essendo le stesse fortemente influenzate dalle immissioni degli emissari delle reti di scolo di bonifica. Ritornando all'analisi dei profili, dalla Tavola 7 si nota come, nel caso ad esondazioni libere, si abbia un'iniziale situazione di sormonto tra il ponte della SP65 (località Panighina) e quello della via Emilia (SS9), che interessa sia il profilo dell'onda 200-ennale che quello dell'onda 100-ennale; i due profili risultano ancora distinti fra loro nel tratto compreso tra le sezioni 34F e 22F. Tra la sezione P06 (ponte della SP61) e la P03 (ponte dell'autostrada A14) si hanno altre situazioni di sormonto, che portano i due profili a congiungersi a monte dell'A14. A valle dell'autostrada A14, i profili 100-ennale e 200-ennale si presentano pressoché coincidenti fra loro per tutto il restante sviluppo longitudinale del corso d'acqua, anche a dispetto del fatto che le onde di piena delle immissioni relative ai due tempi di ritorno sono fra loro differenti; i profili risultano contenuti in alveo, con franchi variabili tra 5-6 cm e

mezzo metro, fino alla passerella Torricchia, poco a monte del confine comunale, a partire dalla quale si ha una situazione di sormonto diffuso tra le sezioni 04R e 15R. Nel resto del territorio comunale, si hanno altri sormonti localizzati (nei pressi del ponte Rosso, del ponte ferroviario Ravenna-Rimini e del ponte Libertà e Lavoro) e, comunque, nei tratti in cui i profili sono contenuti, i franchi risultano sempre molto modesti. E' evidente come la modestia dei franchi teorici stimati, considerate anche le incertezze usualmente in gioco, indichi una situazione di rischio elevato. Va anche segnalato però che tale risultato è molto influenzato dalle schematizzazioni delle onde di piena del corso d'acqua e di quelle della rete di bonifica, che, nel presente studio, come da capitolato, si sono assunte congruenti con quelle dei documenti di pianificazione di bacino, ma che, soprattutto per tale corso d'acqua, potrebbero forse essere affinate. Nel tratto terminale, a partire dalla sezione 7N fino alla foce a mare, i profili risultano invece contenuti con franchi dell'ordine di 60-70 cm.

8. EFFETTI DELLE OPERE PRESENTI IN ALVEO NEI TRATTI TERMINALI DEI CORSI D'ACQUA

Si sono quindi effettuate una serie di elaborazioni specifiche, intese a valutare gli effetti esercitati dagli ostacoli presenti nelle golene fluviali dei tratti terminali dei corsi d'acqua oggetto di studio; la presenza di tali ostacoli potrebbe comportare aumenti, in linea di principio anche significativi, dei livelli idrici di piena all'interno della singola asta fluviale. A tal fine, nella geometria dei modelli matematici dei vari corsi d'acqua è stata inserita la rappresentazione di tutti i capanni presenti nei tronchi terminali dei vari corsi d'acqua esaminati (fiumi Uniti, fiume Lamone, fiume Savio, torrente Bevano). La posizione planimetrica dei capanni è stata desunta incrociando le risultanze di apposite planimetrie in scala 1:5.000 recanti l'ubicazione dei capanni, messe a disposizione dal Comune, con quelle della CTR Regionale, sempre in scala 1:5.000.

Sono state considerate una serie di sezioni trasversali aggiuntive rispetto a quelle di rilievo, che sono state inserite nella schematizzazione geometrica dei vari corsi d'acqua, all'interno dei modelli matematici, prevedendo una sezione aggiuntiva in corrispondenza di ciascun capanno (v. ad esempio la planimetria riportata nella Figura 49, che si riferisce ai fiumi Uniti); la geometria di queste sezioni è stata ricavata per interpolazione, a partire da quelle delle sezioni del rilievo topografico di partenza (ad es. nel caso dei fiumi Uniti dalla sez. 9, in corrispondenza della chiusa, alla sez. 1, posta allo sbocco a mare). I capanni sono stati considerati come elementi parallelepipedi, uguali fra loro, con superficie pari a circa 70 mq, in accordo con le indicazioni ricevute dal Comune. Si è normalmente assunta una dimensione pari a 8 metri nella direzione trasversale all'asse del corso d'acqua e a 9 metri nella direzione longitudinale (lato parallelo al verso della corrente). Le ostruzioni sono state considerate completamente impermeabili al deflusso. Nella realtà, le tipologie dei capanni esistenti sono piuttosto differenziate fra loro, come si può notare dalla Figura 47 e dalla Figura 48, in cui sono rappresentate due diverse strutture presenti nel tratto terminale dei fiumi Uniti; le fotografie sono state riprese in occasione della piena del settembre 2014.



Figura 47 - Esempio di capanno fondato su pali, presente in alveo nel tratto terminale dei fiumi Uniti; la foto è stata ripresa in occasione della piena del settembre 2014.



Figura 48 – Esempio di struttura edilizia presente in alveo nel tratto terminale dei fiumi Uniti; la foto è stata ripresa in occasione della piena del settembre 2014.

Di fatto sono presenti sia tipologie costruttive che determinano un ingombro massimo della sezione fluviale su tutto il loro sviluppo altimetrico sia tipologie di capanni fondati su pali, che determinano ingombri minori della sezione fluviale. La schematizzazione geometrica adottata (v. anche le sezioni trasversali, riportate nelle figure seguenti) si può ritenere quindi cautelativa. Incidentalmente, va rilevato che quanto trattato in questa sede riguarda il solo aspetto dell'effetto idraulico esercitato dai capanni, prescindendo da qualunque valutazione sulla sicurezza e sulle condizioni di rischio delle strutture edilizie e delle persone che ne usufruiscono, argomento che esula dalle finalità del presente studio.

Nella planimetria riportata nelle figure seguenti (ad es. quella riportata nella Figura 49, che si riferisce ai fiumi Uniti) sono rappresentati i capanni, così come schematizzati nei modelli matematici dei vari corsi d'acqua.

E' stato quindi simulato il transito delle onde di piena 100-ennali e 200-ennali nelle condizioni ad esondazioni libere, confrontando il caso reale (presenza di capanni) con un'ipotetica situazione ideale di assenza dei capanni (il relativo profilo coincide con quello già disponibile dalle simulazioni precedentemente discusse, in quanto la presenza dei capanni non era ivi contemplata).

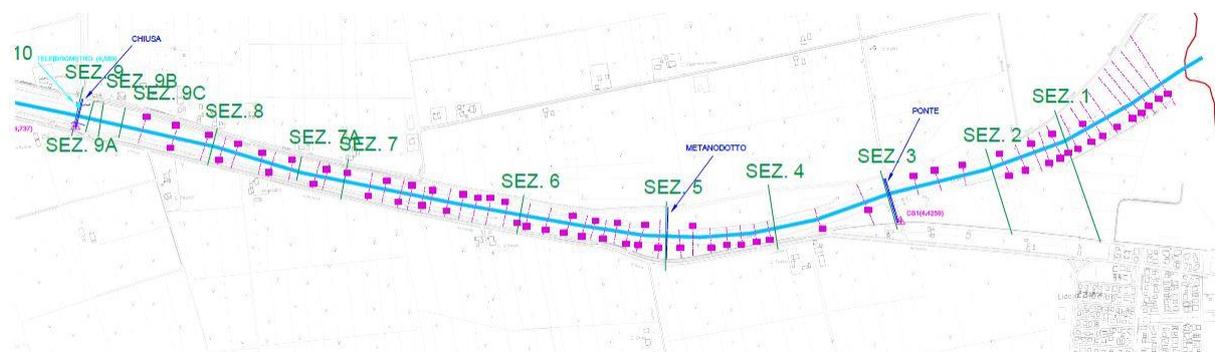


Figura 49 – Ubicazione dei capanni, delle sezioni trasversali del rilievo topografico e di quelle aggiuntive, utilizzate per la modellazione specifica dell'effetto dei capanni, nel tratto terminale dei fiumi Uniti.

La Tavola 8 riporta il confronto tra i profili del pelo libero dei fiumi Uniti per T=100 e T=200 anni, nella situazione in presenza ed in quella in assenza dei capanni, sempre nel caso di schematizzazione ad esondazioni libere. Si può notare come i profili relativi a T=100 e T=200 anni in assenza di capanni siano pressoché coincidenti fra loro, in virtù dell'effetto esercitato dalle

esondazioni a monte; la stessa cosa avviene per i profili relativi a T=100 e T=200 anni in presenza di capanni.

La Tavola 8 evidenzia come l'effetto del sovrizzo nei profili di piena dei fiumi Uniti, dovuto alla presenza dei capanni, sia contenuto entro valori al più pari a 10-15 cm; fa eccezione il tratto a cavallo della chiusa, nel quale il sovrizzo del livello liquido, dovuto ai capanni posti a valle, determina un'accentuazione del deflusso in pressione, che fa incrementare il sovrizzo a valori di poco superiori ai 20 cm.

Nella Figura 50 viene mostrato il confronto tra i livelli di piena in presenza ed in assenza dei capanni in tre sezioni poste nel tratto terminale dei fiumi Uniti, sempre nel caso dello scenario ad esondazioni libere. I livelli del pelo libero riportati si riferiscono al caso T=200 anni; i livelli relativi al caso T=100 anni risultano indistinguibili dai precedenti, in quanto, come più volte ricordato, nello schema ad esondazioni libere le relative portate di colmo vengono praticamente a coincidere, per effetto delle esondazioni a monte.

Risultati analoghi si ottengono per gli altri corsi d'acqua. Per quanto riguarda il fiume Lamone, la Figura 51 mostra l'ubicazione dei capanni, delle sezioni trasversali del rilievo topografico e di quelle aggiuntive, utilizzate per la modellazione specifica dell'effetto dei capanni, sempre relativamente allo scenario ad esondazioni libere. I risultati della modellazione matematica relativi al Lamone sono dettagliati nella Tavola 10. Dalla Tavola 10, si può osservare la sostanziale coincidenza dei profili delle piene 100-ennale e 200-ennale, sia nel caso di presenza che in quello di assenza di capanni. Per quanto riguarda l'effetto di questi ultimi, le simulazioni condotte hanno evidenziato come il sovrizzo che essi determinano sia stimabile nell'ordine di pochi centimetri, risultando in genere inferiore ai 10 cm, con un massimo di 13 cm. Infine, la Figura 52 riporta il confronto tra i livelli di piena in assenza ed in presenza dei capanni in due sezioni trasversali del tratto terminale del fiume Lamone. Anche in tal caso si evidenzia la sostanziale coincidenza tra i profili 100-ennali e quelli 200-ennali.

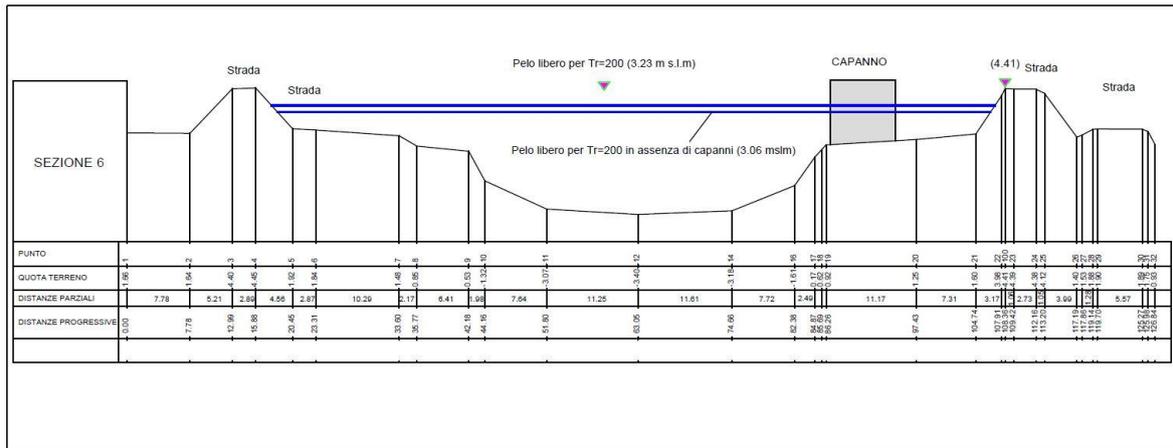




Figura 51 – Ubicazione dei capanni, delle sezioni trasversali del rilievo topografico e di quelle aggiuntive, utilizzate per la modellazione specifica dell’effetto dei capanni, nel tratto terminale del fiume Lamone.

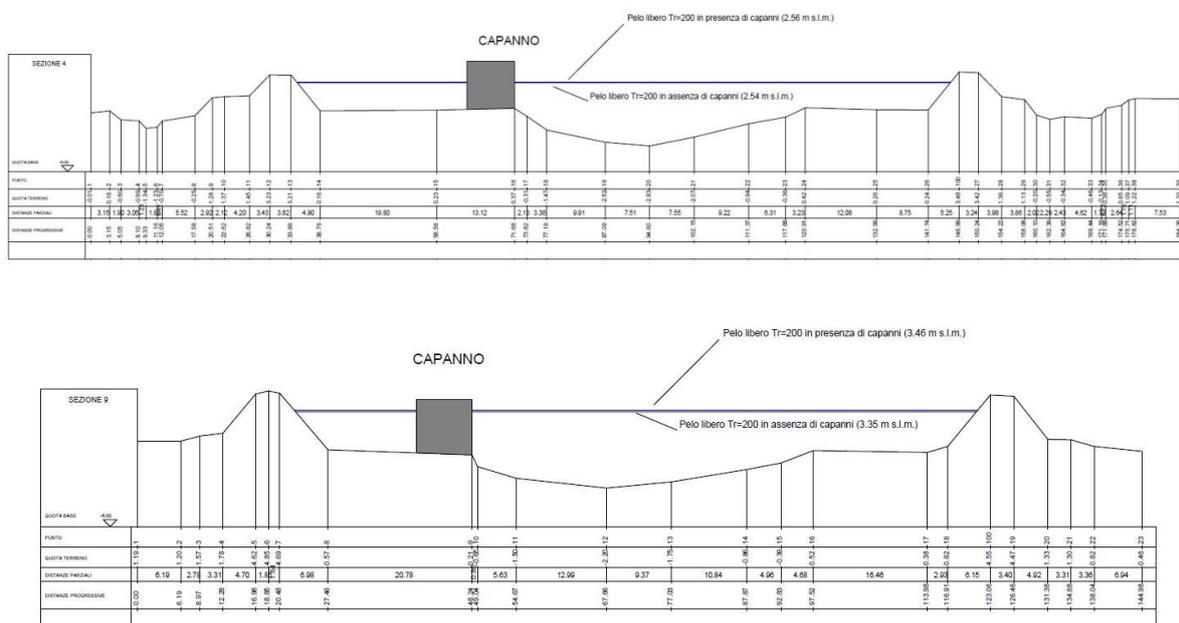


Figura 52 - Confronto tra i livelli di piena in assenza ed in presenza dei capanni in due sezioni del tratto terminale del fiume Lamone.

Per quanto riguarda il fiume Savio, nella planimetria riportata in Figura 53 può essere osservata l’ubicazione dei capanni, insieme a quella delle sezioni trasversali del rilievo topografico e di quelle aggiuntive utilizzate per la modellazione specifica dell’effetto dei capanni stessi. La Tavola 9 riporta invece i profili 200-ennali e 100-ennali del pelo libero, sia nel caso di presenza dei capanni che in quello ipotetico di assenza degli stessi, relativi allo scenario ad esondazioni libere. Dalla Tavola 9, si può osservare come, ancora una volta, il profilo della piena 100-ennale e quello della 200-ennale siano fra loro quasi sovrapposti. Per quanto riguarda l’effetto dei capanni, il sovrzalzo che essi

determinano è dell'ordine di pochi centimetri, in genere inferiore ai 10 cm, assumendo invece valori più elevati a cavallo della Sez.8, con un massimo di 19 cm. La Figura 54 riporta infine il confronto tra i livelli di piena in assenza ed in presenza dei capanni in due sezioni trasversali del tratto terminale del fiume Savio.

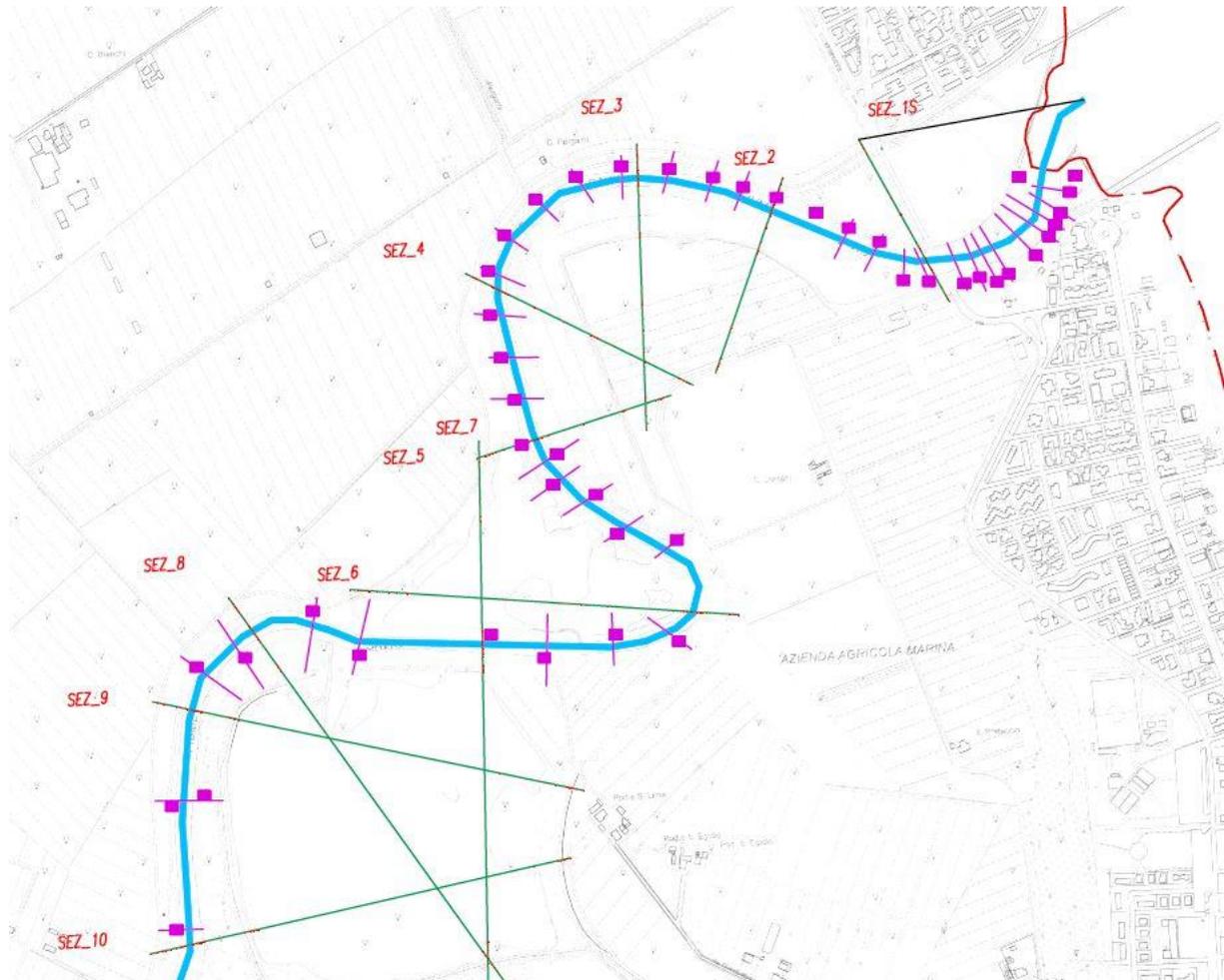


Figura 53 - Ubicazione dei capanni, delle sezioni trasversali del rilievo topografico e di quelle aggiuntive utilizzate per la modellazione specifica dell'effetto dei capanni, nel tratto terminale del fiume Savio.

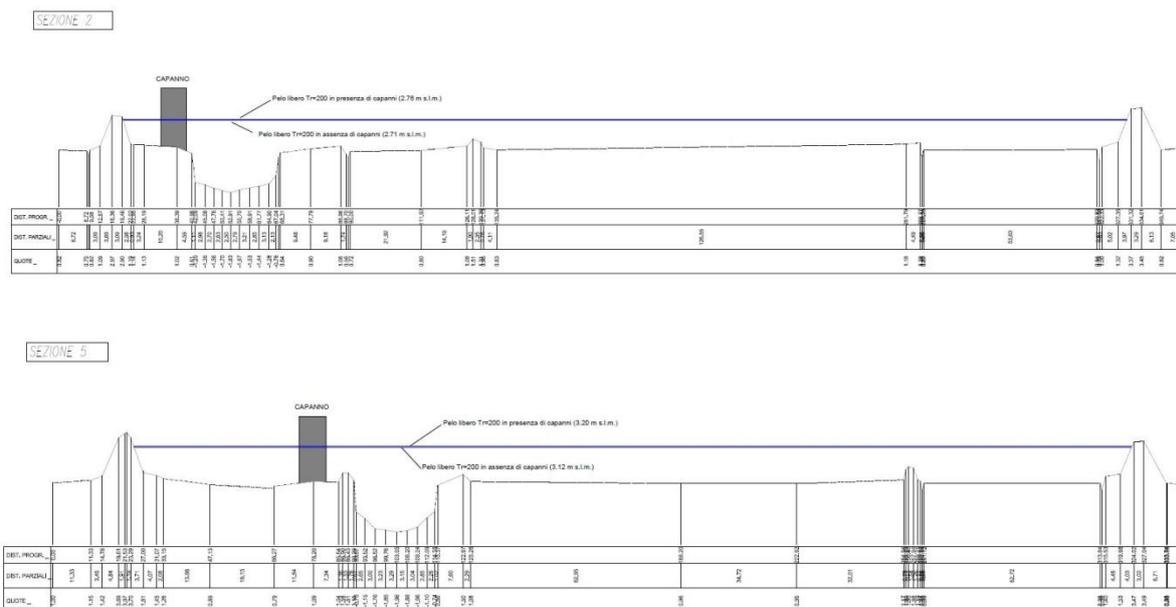


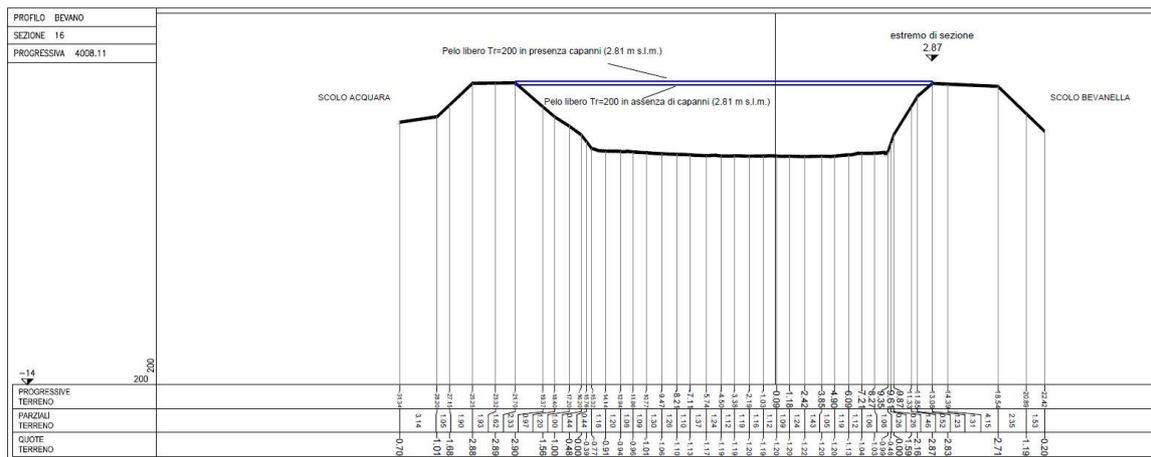
Figura 54 - Confronto tra i livelli di piena in assenza ed in presenza dei capanni in due sezioni del tratto terminale del fiume Savio.

Per quanto riguarda il caso del torrente Bevano, la planimetria riportata in Figura 55 mostra l'ubicazione dei capanni così come schematizzati nel modello matematico, insieme a quella delle sezioni trasversali del rilievo topografico e delle sezioni aggiuntive, utilizzate per la modellazione specifica dell'effetto dei capanni stessi. La Tavola 11 riporta invece i profili 200-ennali e 100-ennali del pelo libero, sia nel caso di presenza dei capanni che in quello ipotetico di assenza degli stessi, entrambi relativi allo scenario ad esondazioni libere. Dalla Tavola 11, si può osservare come i profili della piena 100-ennale e di quella 200-ennale siano fra loro perfettamente sovrapposti, sia nel caso di presenza di capanni che in quello di assenza degli stessi. Per quanto riguarda invece l'effetto dei capanni, il sovrалzo che essi determinano non è apprezzabile nel tratto in cui essi sono ubicati; più a monte invece, fino al ponte della SS16, si apprezza una certa differenza tra il profilo in assenza di capanni e quello in presenza degli stessi, con un innalzamento che rimane comunque sempre modesto, con un valore massimo di circa 16 cm nella Sez. 16N. Ovviamente, visto che il profilo del pelo libero è già molto prossimo alle sommità arginali in assenza di capanni, tale innalzamento, per quanto modesto, provoca un qualche incremento dei tratti interessati da sormonto e delle relative sommergenze. Si segnala comunque che tale risultato, come già accennato, può essere in qualche modo influenzato dalle assunzioni fatte nella schematizzazione delle onde di piena del corso d'acqua e dei vari tributari di bonifica. Infine, la Figura 56 riporta il confronto tra i livelli di piena in assenza ed in presenza dei capanni in due sezioni trasversali del tratto terminale del torrente Bevano.



Figura 55 - Ubicazione dei capanni, delle sezioni trasversali del rilievo topografico e di quelle aggiuntive utilizzate per la modellazione specifica dell'effetto dei capanni, nel tratto terminale del torrente Bevano.

SEZIONE 16N



SEZIONE 12N

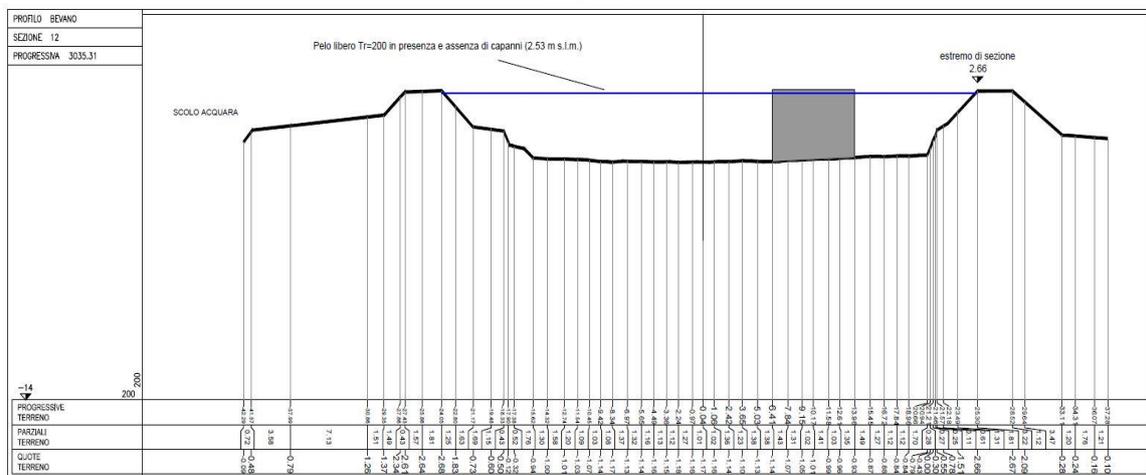


Figura 56 - Confronto tra i livelli di piena in assenza ed in presenza dei capanni in due sezioni del tratto terminale del torrente Bevano.

Nel complesso, i risultati ottenuti portano a ritenere modesto l'effetto di sovralzo dovuto ai capanni, anche se la schematizzazione impiegata per descriverne la geometria è da ritenersi cautelativa. Va incidentalmente rilevato che detti capanni potrebbero comunque favorire l'arresto di materiale flottante, eventualmente trasportato dalla corrente fluviale, con conseguenti effetti di rigurgito. Ovviamente di tali effetti non è possibile tenere conto nella modellazione matematica se non schematizzando opportunamente in essa le risultanze di precise evidenze sperimentali, necessariamente derivanti dall'osservazione storica di eventi di piena del passato.

Bologna, febbraio 2018

Prof. Ing. Armando Brath
 Ordinario di Costruzioni Idrauliche,
 Marittime e Idrologia
 Università di Bologna