

*Alla mia Elisa*



**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA PER  
L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

**INDIRIZZO PROTEZIONE DEL SUOLO**

**DICAM - COSTRUZIONI IDRAULICHE**

**TESI DI LAUREA**

in

**Elementi di infrastrutture idrauliche L**

**ASTA MEDIO INFERIORE DEL FIUME PO: MODELLO  
MATEMATICO PER LA VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI DI  
PERICOLOSITÀ IDRAULICA DELLE AREE DI PIANURA**

**CANDIDATO**

Giacomo Pagliccia

**RELATORE**

Chiar.mo Prof. Attilio Castellarin

**CORRELATORI**

Chiar.mo Prof. Alberto Montanari

Dott. Ing. Alessio Domeneghetti



## Sommario

1 INTRODUZIONE.....	7
2 LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO E IDROGEOLOGICO E LA CLASSIFICAZIONE DELLE FASCE FLUVIALI SECONDO L'AUTORITA' DI BACINO DEL FIUME PO .....	13
2.1 Definizione del rischio .....	13
2.2 Procedura metodologica .....	16
2.2.1 Unità territoriale di riferimento.....	16
2.2.2 Fenomeni di dissesto considerati .....	16
2.2.3 Stima della pericolosità S .....	17
2.2.4 Stima del danno E .....	18
2.2.5 Interpretazione sintetica delle classi di rischio .....	19
2.3 Il Secondo Piano Stralcio per le Fasce Fluviali.....	20
3 DATI E STRUMENTI.....	27
3.1 Il fiume Po .....	27
3.1.1 Regime fluviale.....	31
3.1.2 Autorità sul Fiume .....	32
3.2 Strumenti di analisi di dati georeferenziati: il GIS .....	35
3.2.1 Informazione topografica disponibile.....	36
3.3 Modelli numerico - idraulici.....	37
4 MODELLI NUMERICO IDRAULICI DELL'ASTA DI PO.....	41
4.1 Modello numerico idraulico Q2005D .....	41
4.2 Modello aggiornato .....	48
4.2.1 Caratterizzazione geometrica dei comparti idraulici del fiume Po.....	49
4.2.2 Schematizzazione del comportamento idraulico dei comparti idraulici di fascia C .....	64
5 EVENTO DI PIENA AL LIMITE DELLA PREVEDIBILITÀ: IDENTIFICAZIONE DELLA SOLLECITAZIONE DI PROGETTO.....	69
5.1 Idrogrammi <i>Trit</i> 500 attesi nelle sezioni strumentate.....	69
5.1.1 Elaborazioni statistiche .....	72
5.1.2 Curve di riduzione dei colmi di piena.....	73

5.1.3 Posizione del picco .....	74
5.1.4 Costruzione dell'idrogramma sintetico .....	74
5.2 Calibrazione degli idrogrammi sintetici degli affluenti.....	75
6 MODELLAZIONE E SIMULAZIONE DEI FENOMENI DI ROTTA ARGINALE	87
6.1 Risultati.....	93
7 EVENTO DI PIENA AL LIMITE DELLA PREVEDIBILITÁ: SIMULAZIONE IDRAULICA CON ARGINI INERODIBILI .....	101
7.1 Risultati.....	102
8 ANALISI DEI RISULTATI .....	119
9 CONCLUSIONI.....	127
10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	131

## **1 INTRODUZIONE**

La presente dissertazione affronta il problema della difesa delle aree di pianura prospicienti il tratto medio inferiore del Fiume Po dalle cosiddette piene al limite della prevedibilità, ovvero quelle al di sopra delle quali le stime statistiche perdono di senso a causa della mancanza di eventi osservati di entità confrontabile o superiore (Majone, Tomirotti, 2006). Il lavoro, svolto in ambito di Tesi di Laurea Specialistica, s'inserisce nei più recenti orientamenti nell'ambito degli interventi per la mitigazione del rischio alluvionale e in particolare nelle linee progettuali strategiche formulate dall'Autorità di Bacino del Fiume Po (AdB-Po), descritte in dettaglio nel successivo capitolo (v. ad es. Brath et al., 2010).

Il lavoro, prendendo le mosse dal presupposto che l'attuale sistema di arginature maestre di Po non possa garantire un livello di sicurezza idraulica assoluto dei territori di pianura prospicienti il corso d'acqua nei confronti di qualsiasi scenario di piena, si concentra su un evento con tempo di ritorno pari a 500 anni e, avvalendosi dei risultati sperimentali ottenuti attraverso un modello matematico idraulico di tipo quasi - bidimensionale, muove i primi passi nella direzione del controllo e gestione delle piene al limite della prevedibilità al fine di minimizzare il rischio idraulico. L'intervento di controllo e gestione si traduce nella pratica individuando sul territorio del bacino del fiume Po aree poco "sensibili", in virtù del minor valore o dell'inferiore vulnerabilità dei beni in esse presenti, e dunque adatte ad accogliere i volumi di piena esondabili in occasione di quegli eventi di piena incompatibili con i presidi idraulici preesistenti.

Detti eventi coincidono con le cosiddette piene al limite della prevedibilità, precedentemente richiamate. L'esondazione controllata dei volumi di piena in tali aree avrebbe infatti il fine di tutelare le aree di maggior pregio o a maggiore vulnerabilità, interessate da centri abitati, infrastrutture e beni di

vario tipo, e di permettere migliori e più tempestivi interventi di gestione a valle dell'evento piena.

La definizione delle strategie di intervento per la protezione idraulica dei territori potenzialmente soggetti ad allagamenti provocati dal fiume Po, specie lungo il suo tratto medio inferiore, costituisce un problema complesso, di grande interesse tecnico e scientifico.

Una parte dell'interesse è dovuta alla speciale importanza delle aree interessate, in quanto limitrofe al corso d'acqua e per questo caratterizzate da condizioni favorevoli allo sviluppo economico e antropico. Nel corso degli ultimi due secoli, si è assistito ad un progressivo sviluppo dei sistemi arginali a difesa di tali aree, sia in senso verticale (altezza dei rilevati) che in senso longitudinale (lunghezza dei rilevati), con successivi interventi a seguito delle principali piene, fra cui particolarmente significativi sono quelli eseguiti a seguito delle grandi piene del 1951, 1994 e 2000. Il progressivo innalzamento della quota sommitale delle arginature ha portato al raggiungimento, su gran parte dell'asta inferiore del Po, di condizioni limite strutturali, tali per cui le quote attuali appaiono non più significativamente aumentabili.

Il prolungamento e il consolidamento della cintura arginale lungo l'asta del Po vengono inquadrati in quelle che sono definite "strategie di resistenza". In quest'ambito bisogna intendere come resistenza di un sistema la sua capacità di mantenere inalterate le sue caratteristiche quando sottoposto a differenti sollecitazioni. Le strategie tradizionali (o appunto "di resistenza") sono dunque quelle che si prefiggono come obiettivo la riduzione del rischio idraulico (la cui definizione verrà riportata nel capitolo successivo) prevenendo gli allagamenti; questo tipo di prevenzione richiede solitamente l'aumento del numero o più semplicemente delle dimensioni strutturali dei rilevati posti a difesa delle aree prese in considerazione.

Nel corso però degli ultimi anni recenti studi hanno classificato nuove politiche di gestione del suddetto rischio, individuando una diversa

tipologia di strategie d'intervento, denominate "strategie di resilienza". Col termine resilienza s'intende in quest'ambito la capacità di un sistema di ritornare ad uno stato simile a quello iniziale in seguito ad una perturbazione subita, dovuta ad eventi naturali e/o antropici (Hashimoto et al., 1982).

De Bruijn e Klijn (2001) hanno poi inserito tale definizione nel contesto della gestione del rischio alluvionale. Le strategie di mitigazione del rischio idraulico in cui si fa riferimento al concetto di resilienza si concentrano sulla riduzione degli impatti provocati dagli allagamenti mediante linee d'intervento alternative alle strategie tradizionali, che quindi non cercano di "combattere" l'allagamento, ma piuttosto di "controllarlo" per quanto possibile. Una delle strategie "resilienti" che è stata approfondita nell'ambito del lavoro di Tesi Specialistica prevede l'esondazione controllata (durante l'evento di piena preso a riferimento) di volumi di piena in comparti idraulici, opportunamente identificati sulla base di criteri quali la minimizzazione del rischio idraulico o del rapporto costi/benefici, adiacenti le arginature maestre.

Alla presenza di questi comparti di potenziale esondazione è riconducibile la capacità del corso d'acqua di laminare (ovvero di ridurre) i colmi di portata in occasione dei fenomeni di piena.

L'accumulo di volumi di piena nelle zone di espansione laterale, infatti, ritarda e diluisce nel tempo il fenomeno di propagazione dell'onda di piena che, spostandosi da monte verso valle, si allunga e riduce il valore di portata al colmo di piena. Tale strategia è stata recentemente riconosciuta (assieme alle altre linee strategiche d'intervento per la difesa idraulica del territorio alternative al continuo e sistematico rialzo delle quote di sommità degli argini), quale linea strategica d'intervento per i corsi d'acqua europei, anche dalla Direttiva Europea sui rischi di esondazione (European Parliament, 2007).

Passando da un livello di scala internazionale a uno interregionale, l'Autorità di Bacino del Fiume Po (AdB-Po), anche per ottemperare agli obiettivi contenuti nella suddetta direttiva, ha intrapreso una sistematica attività di studio volta alla definizione di specifiche linee progettuali strategiche per il miglioramento delle condizioni di sicurezza dei territori di pianura lungo l'asta medio inferiore del Po. Gli studi svolti dall'AdB-Po evidenziano la necessità di definire strategie per la mitigazione del rischio residuale, intendendosi come tale quella porzione di rischio che permane anche alla presenza dell'opera di difesa. L'esistenza di un rischio residuale è relazionata in primo luogo alla possibilità di verificarsi di eventi di piena più intensi di quello assunto a riferimento per la progettazione del sistema di difesa arginale (solitamente l'onda sintetica duecentennale) e che quindi non sono contenibili all'interno dello stesso. In secondo luogo, alla possibilità che, anche in sistema arginale ben monitorato e mantenuto nel tempo quale è quello del Po, non possono essere esclusi eventi di rottura arginale. Tale rischio, definito residuale in quanto connesso a scenari di mancata efficacia di un'opera idraulica, interessa un territorio potenzialmente assai ampio (diverse migliaia di km<sup>2</sup>) e fortemente antropizzato. Esso deve essere dunque preso attentamente in considerazione, valutato e gestito con opportuni interventi di mitigazione.

Nello specifico le linee strategiche d'intervento previste dall'AdB-Po sono:

- il miglioramento della capacità di laminazione all'interno delle arginature maestre degli eventi di piena aventi tempo di ritorno,  $T_{rit}$ , pari a 200 anni;
- la valutazione e la gestione del rischio residuale delle porzioni di territorio al di fuori delle arginature maestre, che possono essere interessate da inondazione al verificarsi di eventi di piena sensibilmente più gravosi di quello 200-ennale assunto come riferimento per la progettazione del sistema difensivo arginale, ovvero le cosiddette piene al limite della prevedibilità, secondo la definizione di Majone, 2006;

- lo studio delle possibilità di laminazione controllata all'esterno delle arginature maestre delle piene al limite della prevedibilità.

Il lavoro compiuto e descritto nella presente dissertazione si concentra sulla strategia resiliente di mitigazione del rischio alluvionale precedentemente richiamata, collocandosi proprio all'interno dell'ultima linea strategica di intervento identificata dall'AdB-Po e si articola in otto capitoli.

Nel secondo capitolo vengono riportate la definizione del rischio idraulico adottata dall'AdB-Po e la classificazione delle zone territoriali latitanti il corso fluviale del Po.

Nel terzo sono raggruppate informazioni di carattere geomorfologico, storico e legislativo sull'area oggetto del presente studio, con una breve descrizione dei programmi che sono stati necessari per condurre l'aggiornamento e le modifiche del modello numerico quasi - bidimensionale per il corso medio - inferiore del fiume Po sviluppato dal DISTART, punto di partenza dello studio svolto e oggetto del capitolo quarto.

Il quarto capitolo descrive inoltre le modifiche di natura geometrica apportate al modello originale, caratterizzando da un punto di vista geometrico - idraulico i comparti idraulici situati esternamente alle arginature maestre.

Nel quinto capitolo invece viene presentato il procedimento utilizzato per definire l'evento di piena al limite della prevedibilità, definito in questo contesto come quello associabile a un tempo di ritorno pari approssimativamente a 500 anni su tutto il corso medio - inferiore del Fiume Po (piena al limite della prevedibilità), a partire da idrogrammi sintetici cinquecentennali costruiti per le maggiori sezioni idrometriche di Po.

Il modello predisposto con assetto rivolto alla simulazione di esondazioni al di fuori delle arginature maestre è stato dunque lanciato in una serie di simulazioni compiute con riferimento a due distinti scenari: scenario attuale con argini maestri erodibili e dunque suscettibili ad essere interessati da fenomeni di rotta arginale (sesto capitolo); scenario ipotetico con argini maestri tracimabili, ma inerodibili (settimo capitolo). Lo scenario ipotetico corrisponde a un caso limite, più teorico che pratico, nel quale l'intervento di mitigazione del rischio alluvionale comporti il rivestimento e il consolidamento di tutti i tratti arginali critici, al fine di evitare fenomeni di rottura arginale.

I risultati delle due simulazioni illustrate nei capitoli sesto e settimo sono stati messi a confronto e discussi nell'ottavo capitolo ottenendo utili indicazioni nella valutazione dei volumi di esondazione controllata all'esterno delle arginature maestre e delle superfici complessivamente allagate. Il modello predisposto, infine, incrociato con macro indicatori della vulnerabilità idraulica nei diversi comparti (ad es. n° di residenti, uso del suolo, n° di stabilimenti industriali ecc.) può essere utilmente sfruttato per basare l'identificazione dei comparti meno "sensibili" sulla base di criteri oggettivi, quali la riduzione del rischio, e, dunque, per delineare con maggior precisione interventi mirati di laminazione controllata.

## **2 LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO E IDROGEOLOGICO E LA CLASSIFICAZIONE DELLE FASCE FLUVIALI SECONDO L'AUTORITA' DI BACINO DEL FIUME PO**

### **2.1 Definizione del rischio**

I diversi fattori che compongono il rischio, secondo la definizione riconosciuta in sede internazionale e ripresa nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dall'AdB-Po (1999), si riassumono nella seguente espressione:

$$R = E \cdot H \cdot V$$

dove:

$R$  = rischio relativo a un determinato elemento, inteso come il valore atteso del danno che mediamente può subire l'elemento stesso in un prefissato periodo di tempo;

$E$  = entità degli elementi a rischio, cioè le persone e i beni che possono subire danni quando si verifica un evento, misurata in modo diverso a seconda della loro natura;

$H$  = pericolosità (*Hazard*), cioè probabilità di accadimento di un determinato fenomeno potenziale in uno specifico periodo di tempo e in una data area; il valore di  $H$  è strettamente connesso al tempo di ritorno di un evento  $T_{rit}$ , che esprime l'intervallo di tempo nel quale l'evento si verifica in media una volta. Vale infatti la relazione:

$$H = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_{rit}}\right)^N$$

dove:

$N$  = orizzonte temporale all'interno del quale valutare la pericolosità, espresso in anni.

$V$  = vulnerabilità, definita come attitudine dell'elemento a rischio a subire danni per effetto dell'evento stesso (aliquota dell'elemento a rischio che viene danneggiata); è compresa tra 0 e 1.

È evidente che ad un determinato elemento a rischio possono competere, in funzione delle caratteristiche dell'evento, valori diversi di  $E$  e  $V$ ; inoltre, a parità di condizioni, gli stessi  $E$  e  $V$  possono variare in base a fattori puramente casuali, quali ad esempio il periodo dell'anno, il giorno della settimana e l'ora a cui l'evento si verifica. Pertanto  $E$  e  $V$  possono essere considerate come variabili casuali.

L'equazione del rischio è stata poi modificata giungendo ad una forma semplificata della stessa, soprattutto in relazione alla presa in conto delle forme di dissesto tipiche dei bacini montani, fenomeni gravitativi e di dinamica torrentizia, per i quali risulta molto complessa la valutazione quantitativa della pericolosità  $H$ , richiedendo informazioni dettagliate sulla ricorrenza temporale dei fenomeni e/o sulle loro cause.

Sono pertanto state adottate le seguenti semplificazioni:

- L'entità  $E$  degli elementi a rischio è stata rappresentata mediante il valore economico medio (espresso in euro) degli insediamenti, delle infrastrutture e delle attività produttive presenti nell'unità territoriale di riferimento; la quantificazione esclude la presa in conto del rischio per l'incolumità delle persone;
- La vulnerabilità  $V$  è stata stimata come valore medio riferito a ogni singola tipologia di elemento a rischio;
- La pericolosità  $H$  è stata valutata tramite un indicatore correlato allo stato di dissesto presente all'interno dell'unità territoriale elementare di riferimento, espresso tramite valori parametrici di densità superficiale.

La versione semplificata della relazione del rischio idraulico e idrogeologico diviene pertanto:

$$R = S \cdot E \cdot V$$

dove  $S$  costituisce l'indicatore di pericolosità.

Con le semplificazioni assunte l'espressione del rischio esprime una valutazione relativa, ovvero consente una zonizzazione del territorio su basi semi-quantitative la cui funzione principale è quella di evidenziare in termini relativi la distribuzione del rischio a cui il territorio soggiace a causa di fenomeni naturali idrogeologici. I valori di rischio determinati tramite l'impiego dell'equazione sopra riportata vengono solitamente aggregati in quattro classi a valore crescente (da 1= Rischio Moderato a 4= Rischio Molto Elevato); i limiti di ciascuna classe sono stati individuati attraverso procedure d'analisi statistica della distribuzione dei valori ottenuti.

Da tale definizione si evince come un termine su cui si possa efficacemente intervenire per ridurre il rischio sia il prodotto  $E \cdot V$ . Questa linea strategica di intervento si traduce praticamente individuando sul territorio aree poco "sensibili", in virtù del loro minor valore o dell'inferiore vulnerabilità dei beni in esse presenti, e dunque adatte ad accogliere i volumi di piena esondanti in occasione di quegli eventi di piena incompatibili con i presidi idraulici preesistenti. L'esondazione controllata dei volumi di piena in tali aree avrebbe infatti il fine di tutelare le aree di maggior pregio, interessate da centri abitati, infrastrutture e beni di vario tipo, e di permettere migliori e più tempestivi interventi.

## **2.2 Procedura metodologica**

### **2.2.1 Unità territoriale di riferimento**

L'applicazione dell'equazione del rischio è stata riferita a un'unità territoriale elementare costituita dai confini amministrativi comunali; la pericolosità connessa ai fenomeni di dissesto in atto e potenziali, il valore socio-economico e la vulnerabilità sono pertanto determinati tramite indicatori parametrici con riferimento all'intera unità territoriale, indipendentemente dalla distribuzione dei diversi parametri all'interno del comune.

### **2.2.2 Fenomeni di dissesto considerati**

Le condizioni di dissesto idraulico e idrogeologico del territorio sono state rappresentate con riferimento alle seguenti cinque categorie di fenomeni prevalenti:

- frane;
- esondazioni;
- dissesti lungo le aste dei corsi d'acqua (erosioni di sponda, sovralluvionamenti, sovraincisioni del thalweg);
- trasporto di massa sui conoidi;
- valanghe.

Tali fenomeni sono rappresentati a livello cartografico secondo forme geometriche areali, poligonali aperte e puntuali. Per ognuna delle categorie elencate è stato valutato un parametro quantitativo utilizzato come indice della pericolosità. Per ogni unità territoriale elementare (comune) è stato

calcolato lo stato di dissesto presente attraverso l'intersezione, con tecniche GIS, della cartografia del dissesto con i confini amministrativi; ciascuna unità è pertanto caratterizzata tramite la dimensione (areale, lineare e puntuale) delle tipologie di dissesto presenti. Per le stesse unità elementari è stato calcolato il valore dei beni esposti a rischio, sulla base di indici espressivi delle attività umane, delle infrastrutture presenti e della relativa vulnerabilità.

### **2.2.3 Stima della pericolosità S**

La pericolosità, in termini d'indicatore S, è stata stimata dallo stato di dissesto presente all'interno del territorio comunale; come già detto l'indicatore non rappresenta, per ogni categoria di fenomeno, la probabilità con la quale un dissesto può verificarsi: molti casi sono di complessa valutazione, quindi tale parametro indica la densità superficiale del dissesto in atto e potenziale sul territorio.

Tale semplificazione comporta l'assunzione di una correlazione diretta tra la densità del dissesto rilevato e la probabilità del manifestarsi di nuovi eventi; si osserva infatti che la densità del dissesto presente su un'unità elementare abbastanza estesa, quale il territorio comunale, la cui rilevazione deriva dalla raccolta di serie storiche di eventi sufficientemente lunghe, rappresenta una sorta di "frequenza" dei fenomeni di dissesto, anche se non esistono i presupposti per un'effettiva valutazione statistica.

Peraltro l'osservazione empirica delle piene storiche anche recenti rende evidente la ricorrenza dei fenomeni nelle stesse aree, a indicare che più alta è la concentrazione dei dissesti storicamente osservati, più alta può considerarsi la probabilità che se ne verificano di nuovi o che quelli presenti si riattivino.

Il grado di pericolosità è stato valutato singolarmente per ogni tipologia di dissesto (frane, esondazioni, dissesti della rete idrografica, conoidi e valanghe).

#### **2.2.4 Stima del danno E**

Per la valutazione su base comunale del danno economico atteso a seguito del verificarsi di un fenomeno di dissesto si sono individuati, attraverso l'elaborazione e l'incrocio di dati statistici (essenzialmente fonte ISTAT), una serie d'indici espressivi del valore delle entità esposte. Tali indici si distinguono in "indici di valore diffuso", se riguardanti caratteri del territorio valutati sull'intera superficie comunale, e in "indici di valore puntuale" se espressivi della presenza d'insediamenti localizzati, quali industrie o infrastrutture servizio.

Gli "indici" di valore diffuso riguardano i seguenti aspetti:

- densità territoriale della popolazione;
- concentrazione edilizia;
- intensità di utilizzazione agricola del territorio;
- concentrazione industriale;
- grado di infrastrutturazione viaria (autostradale e ferroviaria);
- carico zootecnico;
- densità di presenza turistica.

Per gli "indici di valore puntuale" si è fatto riferimento a:

- impianti elettrici di rilevanti dimensioni (potenza maggiore di 3,000 kW);
- centrali di pompaggio e distribuzione di gas-metano;
- infrastrutture depurative civili e/o miste di significative dimensioni (maggiori di 10.000 A.E.);

- impianti di incenerimento rifiuti (maggiori di 10.000 t/anno di R.S.U o maggiori di 5.000 t/anno di R.I.);
- infrastrutture di servizio pubblico quali ospedali, aeroporti, stazioni ferroviarie.

Allo scopo di rendere confrontabili tra loro i vari indici, in modo tale da pervenire a una definizione complessiva del valore dell'unità elementare, è stato attribuito agli stessi un valore economico parametrico.

Per ciascuno degli indici di valore è stata stimata una vulnerabilità media, correlata alla tipologia del bene economico esposto, in funzione di valutazioni qualitative, effettuate sulla base di casi storici relativamente ai danni manifestatisi a seguito dei dissesti. La stima del valore economico e del danno atteso riferiti all'unità elementare derivano dalla semplice valutazione del numero degli elementi indicatori presenti all'interno del territorio comunale.

<b>Campo di variazione</b>	<b>Classe</b>
indicatore $\leq -1$	<b>R1 MODERATA</b>
$-1 < \text{indicatore} \leq 0$	<b>R2 MEDIA</b>
$0 < \text{indicatore} \leq 1$	<b>R3 ELEVATA</b>
indicatore $> 1$	<b>R4 MOLTO ELEVATA</b>

**Tabella 1 Raggruppamento in classi dei campi di variazione**

### **2.2.5 Interpretazione sintetica delle classi di rischio**

La procedura di valutazione descritta consente l'assegnazione di classi di rischio alle unità elementari su cui è stato suddiviso il territorio del bacino

idrografico; è evidente che la caratterizzazione è di tipo qualitativo, anche se fondata su una procedura di quantificazione numerica, e prevalentemente a carattere relativo. In via qualitativa il significato fisico delle classi di rischio individuate è riconducibile alle seguenti definizioni che esprimono le conseguenze attese a seguito del manifestarsi dei dissesti:

- **moderato R1** per il quale sono possibili danni sociali ed economici marginali;
- **medio R2** per il quale sono possibili danni minori agli edifici e alle infrastrutture che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e lo svolgimento delle attività socio-economiche;
- **elevato R3** per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi e l'interruzione delle attività socio-economiche, danni al patrimonio culturale;
- **molto elevato R4** per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici e alle infrastrutture, danni al patrimonio culturale, la distruzione di attività socio-economiche.

### **2.3 Il Secondo Piano Stralcio per le Fasce Fluviali**

L'AdB-Po in fase di redazione del Secondo Piano Stralcio per le Fasce Fluviali (PSFF, 1998), ha condotto una serie di analisi fluviali finalizzate alla identificazione di linee guida e criteri per la individuazione delle fasce fluviali, elementi indispensabili alla delimitazione stessa delle fasce.

Per i corsi d'acqua principali nei tratti di pianura e di fondovalle montano è stata in particolare condotta una valutazione delle modalità di deflusso delle portate di piena per assegnati tempi di ritorno  $T_{rit}$  (20, 100, 200 e 500 anni), delimitando l'alveo di piena e le aree inondabili.

L'analisi ha consentito di:

- migliorare la stima del rischio idraulico nella regione fluviale;
- valutare il livello di protezione delle opere idrauliche esistenti e individuare la necessità di nuove opere;
- delimitare le fasce fluviali.

L'asta del Po è stata oggetto di un particolare approfondimento di valutazione attraverso i seguenti punti:

- analisi della portata massima al colmo defluente nell'attuale condizione di assetto delle arginature;
- definizione del profilo inviluppo di piena per un tempo di ritorno omogeneo lungo l'asta, pari a 200 anni;
- delimitazione delle aree potenzialmente allagabili in caso di rotta arginale, sulla base dell'analisi delle rotte storiche, delle caratteristiche morfologiche del territorio circostante e delle grandezze idrauliche coinvolte.

L'analisi è stata finalizzata alla delimitazione della Fascia C, che per tutto il tratto medio - inferiore dell'asta corrisponde alla situazione di un evento catastrofico che comporti una o più rotte degli argini (per sormonto o per cedimento del corpo arginale), e all'individuazione degli interventi di adeguamento del sistema arginale esistente.

Di seguito si riportano le assunzioni e i criteri generali per l'articolazione in fasce della regione fluviale:

“L'applicazione del metodo di delimitazione delle fasce fluviali alle condizioni degli alvei dei corsi d'acqua oggetto del presente secondo Piano Stralcio delle fasce fluviali ha comportato alcune puntualizzazioni tecniche delle procedure di applicazione e un affinamento e approfondimento dei diversi elementi conoscitivi e di elaborazione.

Si richiamano di seguito le definizioni adottate per le fasce fluviali

- « **Fascia A** » *di deflusso della piena*; è costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente, per la piena di riferimento, del deflusso della corrente, ovvero che è costituita dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena;
- « **Fascia B** » *di esondazione*; esterna alla precedente, è costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi dell'evento di piena di riferimento. Con l'accumulo temporaneo in tale fascia di parte del volume di piena si attua la laminazione dell'onda di piena con riduzione delle portate di colmo. Il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento ovvero sino alle opere idrauliche di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata;
- « **Fascia C** » *di inondazione per piena catastrofica*; è costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente (Fascia B), che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento.

Uno schema esplicativo della definizione delle fasce fluviali è riportato in Figura 1.

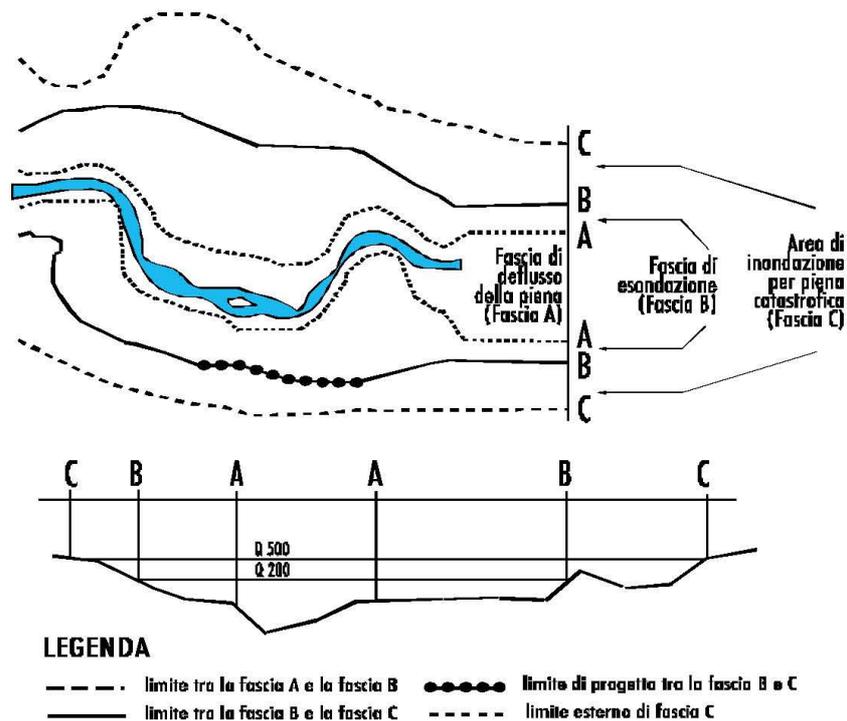


Figura 1 Schema esplicativo per la definizione delle fasce fluviali

I criteri generali, comuni a tutti i corsi d'acqua interessati, che hanno condotto alla delimitazione delle fasce fluviali sono riferibili ai seguenti punti.

- **Fascia di deflusso della piena (Fascia A)**. Per i corsi d'acqua arginati la delimitazione della Fascia A coincide frequentemente con quella della Fascia B (fascia di esondazione), a sua volta delimitata dal tracciato dell'argine. Eccezioni a tale sovrapposizione si hanno nei casi in cui si sia in presenza di golene chiuse (aree golenali il cui allagamento è regolato da un sistema arginale minore), ovvero di golene aperte caratterizzate da un'estensione planimetrica particolarmente ampia al punto che la porzione contribuente al moto non arriva al limite degli argini. La stessa situazione si verifica nei tratti di attraversamento urbano, in cui frequentemente il corso d'acqua è strettamente vincolato da opere di sponda e da argini di contenimento.

- **Fascia di esondazione (Fascia B).** Per i corsi d'acqua arginati (arginature esistenti) la Fascia B è fatta coincidere con il piede esterno dell'argine maestro, anche nelle situazioni in cui l'argine maestro sia eventualmente inadeguato al contenimento della piena di riferimento per la fascia stessa (tempo di ritorno 200 anni).

- **Area di inondazione per piena catastrofica (Fascia C).** Per gli affluenti principali a valle della confluenza del Fiume Tanaro, compresi quelli in cui vi è presenza di arginature discontinue, ovvero è prevista la realizzazione di nuovi argini, la Fascia C è delimitata assumendo la piena teorica con tempo di ritorno di 500 anni.

Per l'asta del Fiume Po la Fascia C, delimitata nel presente Piano nel tratto medio - inferiore dell'asta, corrisponde alla situazione di un evento catastrofico che comporti una o più rotte degli argini (per sormonto o per cedimento del corpo arginale); essa è rappresentata raccordando le quote idriche di piena catastrofica (Fascia C) degli affluenti principali entro il limite fisico del bacino. Nei casi in cui, in ragione dell'andamento topografico del terreno, il limite esterno della Fascia C coincida con quello della B, viene rappresentato convenzionalmente solamente il limite della Fascia B”.

In secondo luogo si ritiene importante sottolineare come il lavoro di tesi descritto dalla presente relazione di sintesi ricada perfettamente nel quadro organizzativo redatto dall'AdB-Po nel PSFF, poiché tra gli obiettivi generali e specifici del piano figurano i seguenti elementi:

- stabilire condizioni di equilibrio tra le esigenze di contenimento della piena, al fine della sicurezza della popolazione e dei luoghi, e di laminazione della stessa, in modo tale da non incrementare i deflussi nella rete idrografica a valle;
- salvaguardare e ampliare le aree naturali di esondazione;

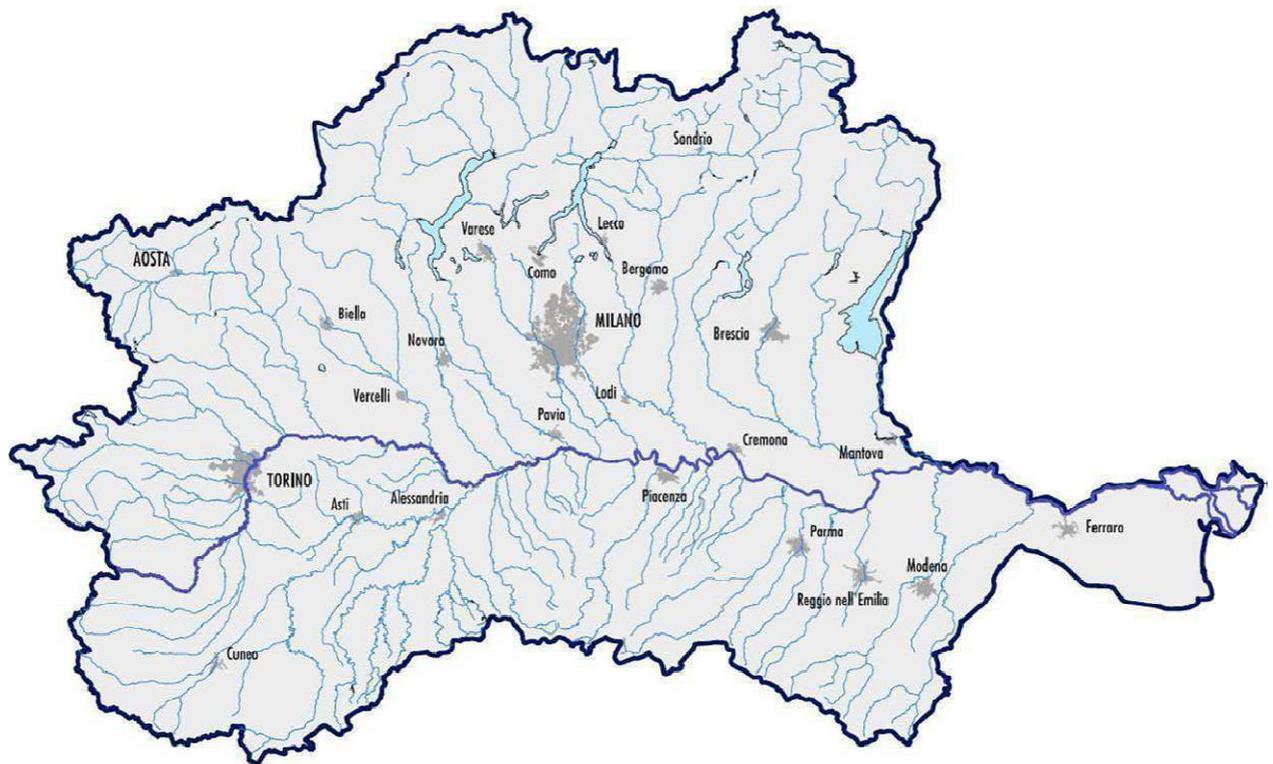
- limitare gli interventi artificiali di contenimento delle piene a scapito dell'espansione naturale delle stesse, e privilegiare, per la difesa degli abitati, interventi di laminazione controllata, al fine di non aumentare il deflusso sulle aste principali e in particolare sull'asta del Po.



## 3 DATI E STRUMENTI

### 3.1 Il fiume Po

Il Po è, per molte ragioni, il più importante fiume d'Italia. La sua lunghezza, pari a 652 km, lo rende il più lungo corso d'acqua interamente compreso nel territorio italiano; ha inoltre il bacino più esteso (circa 71000 km<sup>2</sup>, Figura 2) e la massima portata alla foce (pari, in occasione della piena che ha portato all'alluvione del 14 novembre 1951 del territorio del Polesine, la zona di pianura situata tra il basso corso dei fiumi Adige e Po fino al Mar Adriatico, a ben 10300 m<sup>3</sup>/s).



**Figura 2 Bacino del fiume Po (Fonte: AdB-Po)**

La sua origine è in Piemonte, in provincia di Cuneo. Il fiume poi attraversa da ovest verso est gran parte dell'Italia settentrionale, percorrendo tutta la

Pianura Padana, bagnando quattro capoluoghi di provincia (nell'ordine Torino, Piacenza, Cremona e Ferrara) e infine sfocia nel Mare Adriatico in un vasto delta con cinque rami.

La sorgente del Po è situata in Piemonte, più precisamente nel pianoro denominato Piana del Re ai piedi del Monviso, sulle Alpi Cozie in provincia di Cuneo a una quota di 2020 m s.l.m.. Arricchendosi notevolmente dell'apporto di altre innumerevoli sorgenti, prende a scorrere nell'omonima valle.

Da qui sbocca in pianura dopo appena una ventina di chilometri, lambendo i territori della città di Saluzzo. In questo tratto vari affluenti arricchiscono la portata del Fiume, che entra poi nella provincia di Torino attraversandone la città capoluogo. A Torino il fiume, nonostante abbia percorso solo un centinaio di chilometri dalle sorgenti, è già un considerevole corso d'acqua, con un letto ampio circa 200 m e una portata media già prossima ai 100 m<sup>3</sup>/s.

Con andamento verso est, costeggia poi le estreme propaggini del Monferrato giungendo nella piana del Vercellese, dove si arricchisce dell'apporto di importanti affluenti quali la Dora Baltea e il Sesia. Piegando poi verso sud, continua a lambire in sponda destra il Monferrato in provincia di Alessandria, bagnando le città di Casale Monferrato e Valenza. Qui il corso funge anche da confine regionale tra Piemonte e Lombardia, cominciando ad assumere dimensioni maestose.

Presso Bassignana, il Fiume punta definitivamente verso est grazie anche alla forte azione del Tanaro, suo principale tributario di destra, e assume una connotazione prevalentemente artificiale a causa delle opere di difesa e sistemazione realizzate sulla sua asta e su quelle dei suoi affluenti. Dopo questa confluenza il Po, ormai notevole nella portata (in media oltre i 500 m<sup>3</sup>/s), entra in territorio lombardo, scorrendo in provincia di Pavia. Pochi chilometri a sud del capoluogo pavese il Fiume riceve il contributo essenziale del Ticino, suo principale tributario per volume d'acqua, che ne

trasforma il regime da torrentizio a fluviale, compensando gli stati di magra e di morbida, riducendone la pendenza e rendendolo così navigabile anche da grosse imbarcazioni sino alla foce.

Dopo questa confluenza il Fiume prende a scorrere per parecchi chilometri nella zona di confine tra Lombardia ed Emilia Romagna con andamento dapprima sub-rettilineo, poi caratterizzato da meandri e infine sinuoso, bagnando città importanti come Piacenza e Cremona e ricevendo contributi notevoli dagli affluenti alpini e appenninici. Nel primo tratto l'alveo si presenta moderatamente pluricursale e dà origine a diverse isole fluviali, la più grande delle quali (escludendo naturalmente quelle presenti alla foce) è Isola Serafini, situata poco più a monte della foce dell'Adda; le arginature maestre sono inizialmente discontinue e distanziate (mediamente 1,7 km con un massimo di 4 km), per farsi poi più continue e ravvicinate (passando a una luce di 1,4 km) dopo la confluenza del Trebbia. Nel secondo tratto, a valle della confluenza con l'Adda, le arginature diventano continue e distanziate (circa 2,6 km) e creano una grande area per la laminazione delle piene, che perciò presentano di solito la loro portata al colmo in corrispondenza di Piacenza o Cremona e vengono poi modulate; a causa delle opere longitudinali volte a favorirne la navigazione l'alveo diventa monocursale, caratteristica che mantiene sino alla foce.

Procedendo verso valle il Po riceve i contributi dell'Oglio, del Mincio e del Secchia e presenta argini ravvicinati (mediamente 900 m, con punte minime di 500 m) e alveo spesso canalizzato, soprattutto dopo la confluenza dell'ultimo fiume, il Panaro. Giunto infine nella zona di Ferrara il Po scorre pensile sul confine tra Veneto (provincia di Rovigo) ed Emilia Romagna, nella regione storica del Polesine.

Qui il fiume inizia il suo ampio delta (380 km<sup>2</sup>), dividendosi in cinque rami principali (Po di Maestra, Po della Pila, Po delle Tolle, Po di Gnocca e Po di Goro) e quattordici bocche; un ulteriore ramo secondario (il Po di Volano), che attraversa la città di Ferrara, è ora inattivo. Il grande Fiume

sfocia quindi nel Mare Adriatico, attraversando territori appartenenti al comune di Porto Tolle e Porto Viro.

Fin dall'antichità questo corso d'acqua è stato scenario di eventi storici, sociali ed economici; segno del riconoscimento della sua rilevanza è il nome ad esso attribuito dagli antichi Greci, Ἐριδανός, nome di uno dei fiumi mitologici del regno dell'Ade, cantato anche dal poeta Virgilio nel libro VI dell'Eneide: nel suo nome è contenuta l'antica radice ρδν ossia RDN, comune ad altri importanti fiumi del territorio europeo (Reno, Rodano e Danubio). Secondo lo storico Plinio il Vecchio furono gli Etruschi i primi a tentare di regolamentare il fiume per favorire la navigazione e distribuire le acque durante le piene; lo sfruttamento del Po come via di comunicazione e la realizzazione d'interventi volti a favorirne l'utilizzo si sono accresciuti in epoca romana, come testimoniato da alcuni geografi (ad es. Strabone) e storici (Polibio e lo stesso Plinio il Vecchio nella sua opera *Naturalis Historia*), al punto che nel I secolo d.C. le fosse Augusta, Clodia, Filistina, Messanica e Neronia permettevano di navigare da Ravenna fino ad Aquileia rimanendo sempre all'interno di lagune e percorrendo canali artificiali e tratti di fiumi. Con la caduta nel 476 d.C. dell'Impero Romano d'Occidente vennero meno i principali lavori di manutenzione, ma il decadimento del sistema viario da essi creato rese ancora più importante come via di comunicazione il Po, il cui alveo è stato continuamente navigato e reso oggetto di contese e accordi.

Oggi nelle aree limitrofe al corso d'acqua vivono circa sedici milioni di persone e sono concentrati il 55% del patrimonio zootecnico italiano, il 35% della produzione agricola e il 37% delle industrie, le quali sostengono il 46% dei posti di lavoro (fonte AdB-Po). Per questi motivi il Po e il suo bacino sono da considerare come zone nevralgiche per l'intera economia italiana e una delle aree europee con la più alta concentrazione di popolazione, industrie e attività commerciali. Dal punto di vista economico, l'area è strategica per il Paese garantendo un PIL che copre il 40% di quello nazionale, grazie alla presenza di grandi industrie e di una

quota rilevante di piccole e medie imprese, nonché d'attività agricole e zootecniche diffuse. Sotto l'aspetto della risorsa idrica, inoltre, il bilancio idrologico del bacino riguarda un volume d'acqua complessivo pari a circa il 40% delle disponibilità dell'intero paese.

Il delta del Po, per la sua grande valenza ambientale, è stato dichiarato patrimonio dell'umanità dall'UNESCO.

### **3.1.1 Regime fluviale**

Il bacino idrografico del Po copre gran parte del versante meridionale delle Alpi e quello settentrionale dell'Appennino emiliano - romagnolo, cosicché il regime del Fiume risulta essere misto, ossia di tipo alpino (piene tardo-primaverili ed estive e secche invernali) e appenninico (piene primaverili ed autunnali e secche estive); prevale però il regime appenninico, come provano il concentrarsi dei periodi di magra nel corso dell'estate (solitamente in agosto) e delle piene in autunno. Queste ultime sono abbastanza frequenti e talvolta devastanti, come avvenuto svariate volte nel secolo scorso, con valori massimi assoluti di portata del Po, raggiunti durante gli eventi alluvionali del 1951 e del 2000, di oltre 10300 m<sup>3</sup>/s nel medio e basso corso.

Determinanti nella loro formazione sono soprattutto i tributari piemontesi del Po (Dora Baltea, Sesia e Tanaro in particolar modo) e lombardi (Ticino). Per fare alcuni esempi, durante la piena del novembre del 1994 il Fiume mostrò già in Piemonte, dopo la confluenza col Tanaro, una portata di colmo di oltre 11000 m<sup>3</sup>/s, quasi paragonabile a quella poi transitata molto più a valle nel Polesine. Lo stesso avvenne nell'ottobre del 2000, sempre in Piemonte, dove la portata massima del Fiume superò già a partire dal comune di Valenza i 10000 m<sup>3</sup>/s a causa soprattutto dei contributi pesantissimi di Dora Baltea e Sesia.

### **3.1.2 Autorità sul Fiume**

La necessità di un organo che si occupasse della gestione del Fiume Po è stata avvertita per la prima volta molto tempo fa: già nel 1806 Eugenio Napoleone, Viceré d'Italia, aveva istituito un “Magistrato civile per lavori generali che riguardano il grande sistema del Po”, mentre a Parma aveva sede l'Ufficio di Ispezione superiore del Genio Civile per il Po.

Dopo l'Unità d'Italia, in occasione delle prime grandi piene del secolo, quelle del 1907 e del 1917, si sentì l'esigenza di individuare una struttura unica alla quale affidare il coordinamento unitario dell'attività idraulica di tutto il complesso denominato Bacino del Po.

Nel 1924 fu quindi istituito il Circolo di Ispezione del Genio Civile per il Po, con sede a Parma, al quale vennero affidati i compiti di vigilanza sui progetti e sull'esecuzione delle opere riguardanti la sistemazione e la regolarizzazione degli alvei, e sulla polizia idraulica in tutto il corso del Po e dei suoi affluenti.

In seguito alla catastrofica alluvione del 1951, venne istituito con la legge 735/56 il Magistrato per il Po e i suoi affluenti e il cui compito era coordinare le competenze dei vari organi preposti; le leggi 240/58 e 1484/62 lo trasformarono poi in un organo di amministrazione di tipo attivo con pieni poteri decisionali in materia di programmazione, esecuzione, e gestione delle opere di difesa dell'intero bacino.

Tale ente, già organo decentrato interregionale del Ministero dei Lavori Pubblici, poi organo decentrato interregionale del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e del Ministero dell'Ambiente e del Territorio, dal gennaio 2003 è divenuto l'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPO), in attuazione di quanto previsto dall'art.89 del decreto legge 112/1998. Le regioni interessate, ossia Piemonte, Lombardia, Emilia

Romagna e Veneto, hanno quindi recepito tale decreto attraverso leggi regionali (rispettivamente L.R. 38/2001, L.R. 5/2002, L.R. 42/2001 e l.r. 4/2002).

Parallelamente all' Agenzia opera l' Autorità di Bacino del Fiume Po, la cui attività principale, per effetto delle nuove norme sulla difesa del suolo (cfr. Legge 183/89), consiste nello studio e nella predisposizione del Piano di bacino e nella programmazione, nel coordinamento e nel controllo dei relativi Piani Stralcio a livello di sottobacino.

Le principali attività dell' AIPO possono invece venire identificate con la progettazione ed esecuzione degli interventi sulle opere idrauliche di prima, seconda e terza categoria (si veda Testo Unico n° 523/1904) sull' intero bacino del Po, nonché con i compiti di Polizia Idraulica e Servizio di Piena sulle opere idrauliche di prima, seconda (Regio Decreto 2669/1937) e terza categoria arginata (art. 4 comma 10ter Legge 677/1996). Dette attività vengono svolte dal personale idraulico lungo tutti i tratti arginati, che ammontano ad un totale di 3654 km, suddivisi in 94 tronchi di custodia (Ufficiali Idraulici) e 220 tronchi di guardia (Sorveglianti Idraulici).

Le problematiche connesse con la stabilità arginale e la tutela delle opere idrauliche erano già note in tempi remoti mentre gli interventi e i servizi di tutela, pur già esistenti, vennero sistematizzati su tutta l' asta praticamente dall' unità d' Italia con l' istituzione degli uffici provinciali del Genio Civile, ed in seguito con l' emanazione del R.D. 25 luglio 1904 n.523: "Testo Unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie", e del R.D. 9 dicembre 1937 n.2669: "Regolamento sulla tutela delle opere idrauliche di prima e seconda categoria e delle opere di bonifica". Tali disposizioni di legge, tuttora vigenti seppure con qualche integrazione e modifica, hanno regolato e regolano tuttora l' attività di Polizia Idraulica e Servizio di Piena. In particolare il R.D. 523/1904 all' art. 96 prende in esame e regola tutte le attività che possono arrecare danni alle arginature.

Il corpo normativo relativo alle materie di cui si occupa, a vario titolo, l'Agenzia Interregionale per il Fiume Po si è via via arricchito nel corso degli anni; in particolare vale la pena di citare le più recenti: la L. 183/1989, "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo", la L. 225/1992, "Istituzione del servizio nazionale della protezione civile", la L. 36/1994, "Disposizioni in materia di risorse idriche", e la L. 37/1994, "Norme per la tutela ambientale delle aree demaniali dei fiumi, dei torrenti, dei laghi e delle altre acque pubbliche". Di particolare rilievo risulta la prima, poiché da essa vennero istituite le Autorità di Bacino, la cui attività principale consiste nello studio e nella predisposizione del piano di Bacino e nella programmazione, nel coordinamento e nel controllo dei relativi piani Stralcio a livello di sottobacino. Tra questi di primaria importanza è il "Piano Stralcio delle Fasce Fluviali" (PSFF, 1995), in cui per la prima volta è stata introdotta, a livello di bacino, la suddivisione delle pertinenze fluviali in fasce aventi diverso grado di interesse da parte dei fenomeni di deflusso: Fascia A o di deflusso della piena ordinaria, Fascia B o di esondazione per la piena di riferimento ( $T_{rit}=200$  anni), Fascia C o inondazione per piena catastrofica ( $T_{rit}=500$  anni). Significativamente, all'interno di tali Fasce sono state definite a norma di legge le attività ammesse e vietate, mettendo quindi definitivamente un freno alle pericolose intromissioni urbanistiche negli ambiti di pertinenza fluviale e alle attività antropiche che spesso, nel recente passato, hanno messo a rischio l'equilibrio dei corsi d'acqua.

Le attività iniziate col P.S.F.F. sono proseguite col "Piano per l'Assetto Idrogeologico" (PAI., 2001) che, inglobando i contenuti dei precedenti piani Stralcio (fra cui il PS45 redatto in conseguenza degli eventi alluvionali del novembre '94), ha preso organicamente in esame tutte le varie situazioni di criticità idrogeologica del bacino. Per quanto riguarda il reticolo idrografico relativo ai corsi d'acqua principali (interessati dalle fasce fluviali), il progetto di assetto idraulico per la messa in sicurezza, una volta analizzate le situazioni di dissesto in atto, è proseguito determinando

dapprima la portata di riferimento ( $T_{rit}=200$  anni), studiando quindi la risposta idraulica della rete fluviale ed ipotizzando l'assetto di progetto sulle aste principali del bacino.

### **3.2 Strumenti di analisi di dati georeferenziati: il GIS**

Il termine GIS (Geographical Information System) viene solitamente adottato per indicare un sistema informativo computerizzato che permette l'acquisizione, la registrazione, l'analisi, la visualizzazione e la restituzione di informazioni derivanti da dati geografici (geo-referenziati) .

Per la rappresentazione di tali dati occorre formalizzare un modello rappresentativo flessibile che si adatti ai fenomeni reali. \_Nel GIS questo viene realizzato attraverso tre tipologie di informazioni: geometriche, ossia relative alla rappresentazione cartografica degli oggetti, quali la forma (punto, linea, poligono), la dimensione e la posizione geografica; topologiche, ovvero riferite alle relazioni reciproche tra gli oggetti (ad esempio connessione, adiacenza, inclusione etc.); informative, ovvero riguardanti i dati (numerici, testuali etc.) associati ad ogni oggetto. La gestione di tali informazioni avviene tramite un database relazionale, mentre la loro elaborazione è supportata da una vasta gamma di funzionalità. La loro codificazione avviene attraverso due tipologie principali di dati: i dati vettoriali e i dati raster. I dati vettoriali sono costituiti da elementi semplici quali punti, linee e poligoni, codificati e memorizzati sulla base delle loro coordinate, a ciascuno dei quali è associato un record del database informativo che contiene tutti gli attributi dell'oggetto rappresentato. I dati raster schematizzano invece il mondo reale attraverso una matrice di celle dette pixel, a ciascuna delle quali sono associate le informazione relative all'elemento rappresentato; la dimensione del pixel (detta anche *pixel size*), generalmente espressa nell'unità di misura della carta (metri, chilometri etc.), è strettamente relazionata alla precisione

del dato. I dati vettoriali e i dati raster si adattano ad usi diversi: i primi sono particolarmente adatti alla rappresentazione di dati che variano in modo discreto, i secondi alla rappresentazione di dati con variabilità di tipo continua.

Tali informazioni sono utilizzabili dall'utente con diversi approcci:

- Approccio del Geodatabase: un GIS è un database spaziale, ossia un database contenente *dataset* che comprendono l'informazione geografica. Tramite un modello di dati specializzato consente la gestione dei dati vettoriali e raster.
- Approccio della Geovisualizzazione: un GIS consente di costruire rappresentazioni geografiche complete e complesse (mappe) in cui vengono visualizzati gli elementi e le loro relazioni spaziali sulla superficie terrestre. Si possono costruire sia mappe di base che mappe "avanzate", utilizzando le informazioni geografiche associate ai dati. Tali mappe possono essere archiviate e riutilizzate per supportare l'interrogazione, l'analisi e l'editing dei dati.
- Approccio del Geoprocessing: un GIS è un insieme di strumenti operativi per l'analisi geografica e l'elaborazione dell'informazione. Le funzioni di Geoprocessing, a partire da dataset geografici esistenti, consentono di applicare ad essi delle funzioni analitiche e memorizzare i risultati in nuovi dataset.

Tali approcci sono complementari e rappresentano uno strumento completo per tutte le applicazioni a carattere geografico.

### **3.2.1 Informazione topografica disponibile**

I dati sul bacino del Po a disposizione per il lavoro sono:

- DEM (Digital Elevation Model): modello digitale del terreno in formato raster, in cui ad ogni pixel è associata la quota assoluta del punto del territorio rappresentato;
- CTR (Carte Tecniche Regionali) in scala 1:25000;
- Ortofoto: fotografie aeree georeferenziate e assoggettate a orto rettifica. Tale procedimento corregge gli effetti della distorsione della lente e dell'orientamento della macchina fotografica sulla base di rilievi topografici, rendendo le foto geometricamente corrette ed equiparabili a mappe e consentendo pertanto su di esse la misurazione di distanze reali;
- Idrografia: layer di ArcView contenente la planimetria dei corsi d'acqua del bacino e informazioni associate;
- Planimetria delle sezioni: layer di ArcView contenente le tracce in pianta delle sezioni Brioschi e di quelle, in parte ruotate e/o traslate per esigenze di modellazione, utilizzate in HEC-RAS;
- Livellazione degli argini: layer di ArcView contenente la planimetria degli argini e le informazioni relative alla loro altezza secondo il rilievo topografico del 2005;
- Planimetria delle Fasce Fluviali: informazione topografica sulla suddivisione delle aree prospicienti il Po in Fascia A, B o C secondo la definizione adottata dall'AdB-Po (v. Capitolo 2 paragrafo 3).

### **3.3 Modelli numerico - idraulici**

Tra i software disponibili per lo sviluppo e l'implementazione di modelli numerico - idraulici è stato selezionato il codice di calcolo HEC-RAS (River Analysis System dallo United States Army Corps of Engineering (USACE), Hydrological Engineering Center (HEC); tale scelta è stata dettata dalla sua estrema affidabilità e duttilità, attestata dalle numerosissime applicazioni effettuate in tutto il mondo, e dalla larga disponibilità del codice nell'ambito dei tecnici operanti nel settore

dell'Ingegneria Idraulica. Tale diffusività, essenzialmente dovuta alla natura freeware del codice di calcolo, rappresenta anche garanzia di riproducibilità e, dunque, verificabilità delle elaborazioni presentate, con evidenti vantaggi in termini non solo di trasparenza, ma anche di confronto e approfondimento dei risultati conseguiti.

HEC-RAS permette la simulazione del moto dell'acqua all'interno di canali naturali o artificiali tramite la messa a punto di modelli che possono essere definiti quasi - bidimensionali (quasi-2D). Infatti, sebbene le equazioni che vengono risolte per descrivere il moto siano strettamente di tipo monodimensionali ed utilizzino la linea di fondo dell'alveo come unica variabile spaziale (ascissa curvilinea), sussiste la possibilità di collegare delle golene laterali, rendendo così schematizzabile una realtà bidimensionale. Il programma consente il calcolo del profilo idrico in moto permanente e vario; questa ultima applicazione, di interesse per il presente lavoro, si avvale di uno schema implicito alle differenze finite per la risoluzione delle equazioni complete di De Saint Venant.

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{u}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = i - J \\ \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

Dove con  $Q$  viene indicata la portata idrica in transito,  $A$  rappresenta l'area bagnata della generica sezione fluviale,  $u$  il termine di velocità,  $h$  il tirante idrico,  $i$  e  $j$  rappresentano rispettivamente la pendenza del corso d'acqua e la cadente idraulica.

Le equazioni di De Saint Venant per il moto vario (dipendente dal tempo) si basano su 3 ipotesi fondamentali:

- 1) Corrente gradualmente variata o lineare: distribuzione idrostatica delle pressioni lungo una generica sezione verticale;
- 2) Ipotesi di sezioni trasversali piane e verticali: linea del carico piezometrico della corrente coincidente con il pelo libero;
- 3) Fluido incomprimibile (per l'acqua questo punto è sempre verificato tranne nel caso di colpo d'ariete).

Le caratteristiche geometriche vengono salvate in un file del tipo *geometry*, le condizioni al contorno del moto in un file del tipo *steady* o *unsteady flow*. Un *plan* è dato dall'associazione di due di questi file, che possono anche essere condivisi da più *plan*; in tal modo HEC-RAS permette un agevole confronto tra diversi scenari.



## **4 MODELLI NUMERICO IDRAULICI DELL'ASTA DI PO**

Nel corso degli ultimi anni vi sono stati diversi studi, commissionati dall'Autorità di Bacino del Fiume Po, condotti per indagare il comportamento idraulico del sopraddetto fiume; in modo specifico uno studio elaborato dal dipartimento DISTART e presentato nel 2008, che ha inteso identificare, in maniera univoca, un profilo di piena di riferimento alla luce delle conoscenze fornite dagli studi idraulici ad oggi disponibili e a valle degli aggiornamenti della descrizione morfologica dell'alveo, ha rivestito per noi una particolare importanza.

Questa importanza deriva dall'utilizzo di un modello numerico Q2005D, costruito per condurre le simulazioni idrauliche volte a individuare i profili in sviluppo di piena del tratto medio - inferiore del fiume Po.

Tale modello ha dunque costituito la base di questo lavoro di tesi, il quale si è dedicato agli sviluppi dello stesso che verranno trattati nei prossimi paragrafi.

### **4.1 Modello numerico idraulico Q2005D**

Questo modello è stato messo a punto utilizzando il software HEC-RAS attraverso una serie di studi (v. ad es. Galletti, 2007 e Balacchi, 2007), ed è stato successivamente perfezionato dal DISTART nell'ambito di una convenzione di studio e ricerca con AdB-Po (DISTART - AdB-Po, 2008).

La geometria del modello (informazioni planimetriche e relative alle sezioni trasversali) è stata creata importando i dati del DEM del bacino del Po da ArcView ad HEC-RAS tramite l'estensione HEC-GeoRAS 3.1.1; è stata poi definita la *stream centerline* (adottata dal software come ascissa curvilinea e utilizzata per successive applicazioni) come schematizzazione della linea di fondo del fiume e sono stati definiti i limiti dell'alveo inciso (*bank station lines*), per separare il flusso all'interno del *main channel* da

quello nelle espansioni golenali (*overbanks*) e attribuire differenti condizioni di scabrezza. Sono state poi inserite le sezioni trasversali (*cross sections*) sulla base dei dati forniti dall'AdB-Po e sono state apportate loro alcune modifiche, ove necessario, eliminando le intersezioni e traslandole, ruotandole e modificandone la lunghezza al fine di rendere i dati omogenei. Sono state infine schematizzate nel modello le golene chiuse (ovvero le aree identificabili attraverso il secondo P.S.F.F. come aree di fascia B o di esondazione) tramite lo strumento *storage area* (utilizzato anche nel presente lavoro) e sono state opportunamente collegate al corso d'acqua ed eventualmente tra di loro.

Il modello numerico idraulico sfrutta il codice di calcolo di moto vario 1D UNET (*Barkau, 1997*); 1D UNET rappresenta lo stato dell'arte in quanto a riproduzione del comportamento idraulico di complessi sistemi di corsi d'acqua naturali e canali artificiali mediante schematizzazioni tipo 1D o quasi-2D. Esso risolve le equazioni di De Saint Venant 1D, consistenti nell'equazione di continuità:

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

e nell'equazione del moto:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} - S_f \right) = 0$$

dove  $Q$  è la portata della corrente fluviale,  $A$  l'area della porzione di sezione trasversale bagnata che si considera attiva nei confronti del deflusso,  $S$  l'area di accumulo (area della sezione trasversale bagnata che non contribuisce al deflusso),  $q_e$  la portata per unità di larghezza dovuta agli apporti laterali,  $V$  la velocità media della corrente ed  $S_f$  la cadente. La risoluzione delle equazioni è effettuata dal modello attraverso un classico

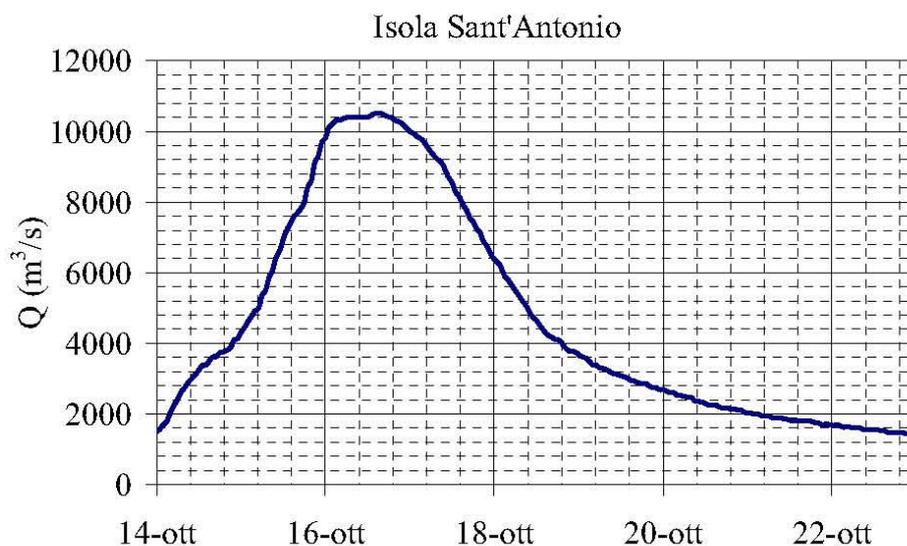
schema implicito alle differenze finite a quattro nodi, definito in letteratura come box scheme.

Il modello, una volta completato, è stato calibrato per riprodurre l'evento di piena verificatosi nell'ottobre del 2000, corrispondente a un tempo di ritorno mediamente quantificabile in 50 anni e scelto come scenario di calibrazione in ragione della significatività di tale evento e della completezza delle osservazioni di piena disponibili. La fase di taratura è stata finalizzata all'identificazione dei coefficienti distribuiti di resistenza al moto caratteristici delle diverse sezioni trasversali impiegate dal modello idraulico. In particolare, per quanto concerne la rappresentazione delle condizioni di scabrezza del Fiume Po, si è deciso di differenziare il coefficiente di scabrezza del canale principale da quello delle espansioni laterali. Ogni sezione trasversale è stata pertanto divisa in tre porzioni, una rappresentativa dell'alveo inciso, caratterizzata da un ben preciso valore del coefficiente di scabrezza, e due rappresentative delle espansioni laterali che partecipano attivamente al deflusso idrico (porzioni aperte, non arginate lato fiume, delle espansioni golenali), caratterizzate da un diverso valore del coefficiente di scabrezza. I due valori di scabrezza caratteristici della generica sezione trasversale sono stati mantenuti costanti all'interno di tratti fluviali omogenei dal punto di vista delle condizioni di scabrezza al fondo, identificati proprio attraverso la fase di taratura del modello. Detta fase è stata condotta con l'obiettivo di pervenire attraverso il modello ad una corretta riproduzione del comportamento idraulico dell'asta medio - inferiore del Fiume Po per l'evento di piena di riferimento. Il comportamento idraulico dell'asta è stato sintetizzato mediante le seguenti grandezze di riferimento:

- osservazioni idrometriche (idrogrammi di piena osservati in corrispondenza delle stazioni idrometriche disponibili e tracce di piena identificate a valle dell'evento);
- dinamica di invaso delle golene chiuse (istanti di inizio invaso e tiranti idrici massimi);

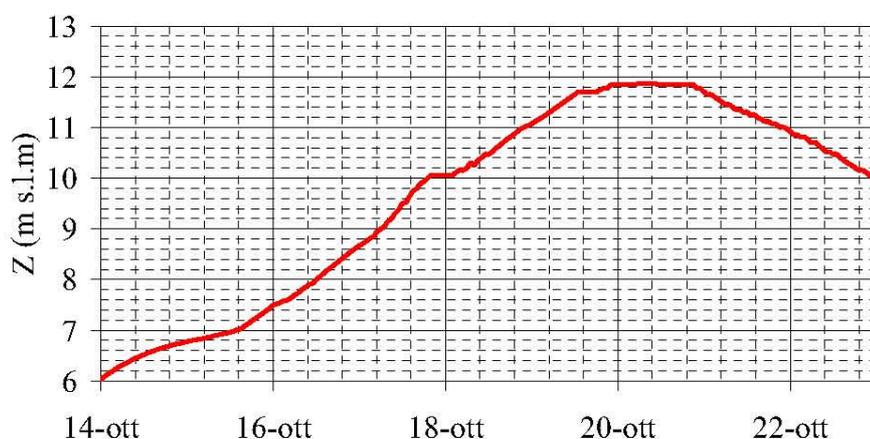
- valori di portata al colmo (valori di portata al colmo in corrispondenza delle sezioni idrometriche di riferimento, desunti dalle scale di deflusso).

Il Grafico 1 e il Grafico 2 illustrano invece le condizioni al contorno di monte e di valle utilizzate in simulazione. Il Grafico 1 riporta la condizione al contorno di monte adottata in corrispondenza della sezione Brioschi 00B1, ovvero l'idrogramma di piena in termini di portata desunto per la sezione idrometrica di Isola Sant'Antonio. Il Grafico 2 riporta la condizione al contorno di valle utilizzata in corrispondenza della sezione di Pontelagoscuo, coincidente con l'idrogramma di piena in termini di livello.



**Grafico 1** Condizione al contorno di monte, idrogramma di piena (portata) per la sezione Isola S. Antonio (sez. Brioschi 00B1) (fonte AdB-Po - DISTART 2008)

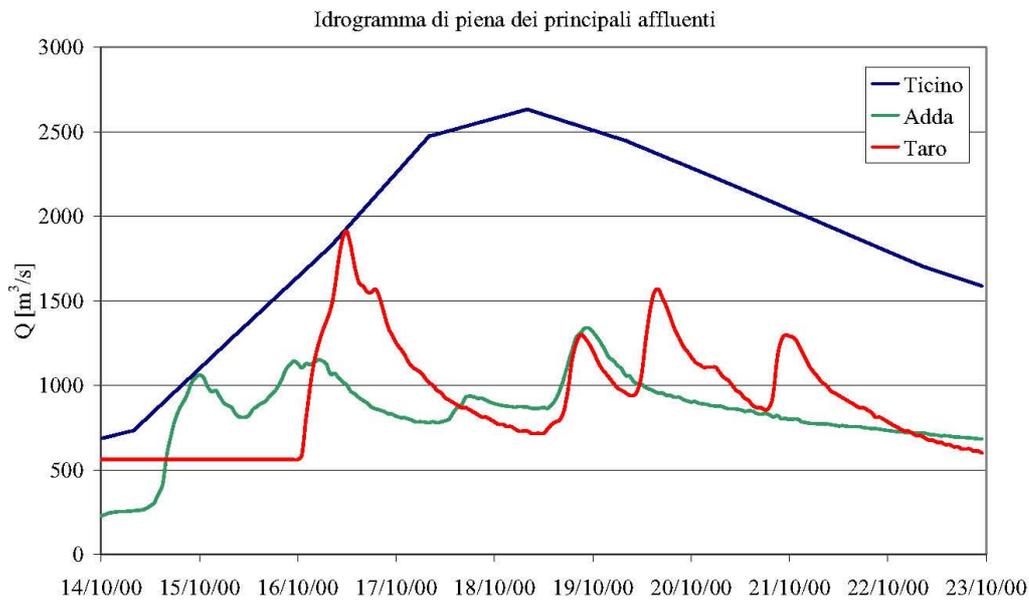
### Pontelagoscuro



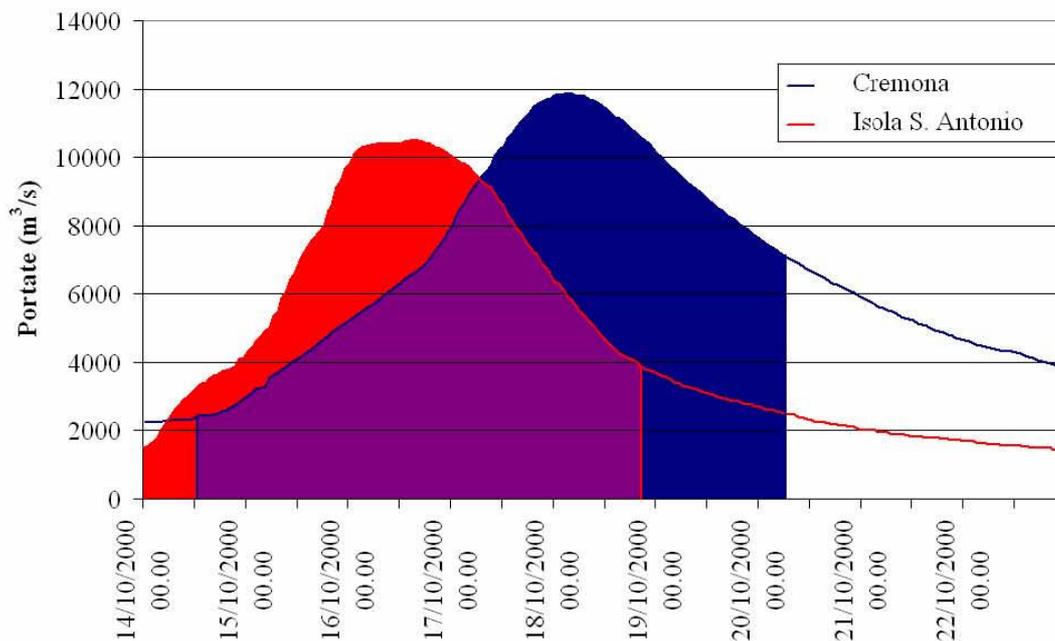
**Grafico 2 Condizione al contorno di valle, idrogramma di piena (livello) osservato alla sezione di Pontelagoscuro (sez. Brioschi 65) (fonte AdB-Po - DISTART 2008)**

Informazioni sugli apporti idrici dei principali affluenti sono illustrate nel Grafico 3. Partendo dai dati riportati nel Grafico 3 si è cercato di pervenire ad una realistica quantificazione dei volumi idrici effettivamente immessi in Po durante l'evento di piena dell'ottobre 2000. A tal fine, i volumi di piena relativi alla stazione idrometrica di Isola Sant'Antonio sono stati confrontati con quelli relativi alla sezione di Cremona. Le due sezioni idrometriche sono state scelte in virtù della buona attendibilità delle scale di deflusso per esse costruite. I volumi di piena per le due sezioni sono stati calcolati in un'opportuna finestra temporale, differenziata tra le due sezioni in maniera da tener conto del tempo di trasferimento tra Isola S. Antonio e Cremona:

- Onda di piena a Isola S. Antonio in termini di portata, integrata tra il 14 ottobre 2000 alle ore 00:00 e il 18 ottobre alle ore 20:00. Volume: 2845 Mm<sup>3</sup> (v. Grafico 4);
- Onda di piena a Cremona in termini di portata, integrata tra il 14 ottobre alle ore 13:00 e il 20 ottobre alle ore 07:00: Volume: 3739 Mm<sup>3</sup> (v. Grafico 4).



**Grafico 3 Portate dei principali affluenti durante l'evento (fonte AdB-Po - DISTART 2008)**



**Grafico 4 Valutazione degli apporti idrici tra Isola S. Antonio e Cremona durante l'evento di piena dell'ottobre 2000 (fonte AdB-Po - D.I.S.T.A.R.T. 2008)**

La differenza tra i volumi transitati a Cremona e a Isola Sant'Antonio (circa 894 Mm<sup>3</sup>) fornisce una indicazione dei volumi idrici apportati dagli

affluenti in Po nel tratto considerato durante il transito dell'onda di piena. Sulla base di questa indicazione sono state quantificate le condizioni al contorno necessarie per la simulazione nel tratto considerato. Gli apporti idrici laterali sono stati distribuiti in tre diverse sezioni trasversali, scelte per comodità coincidenti con le sezioni localizzate in corrispondenza di foce Ticino, foce Trebbia e foce Adda.

Complessivamente, la somma dei volumi idrici immessi in corrispondenza delle tre sezioni nell'arco temporale preso a riferimento per i calcoli sopra descritti coincide con la differenza precedentemente indicata. Nonostante la schematizzazione modellistica adottata non consenta di rappresentare con elevata precisione le dinamiche di scambio di volumi idrici tra l'asta principale di Po e suoi affluenti, si ritiene che essa fornisca una rappresentazione approssimata, ma sufficientemente realistica, degli scambi di volumi idrici tra affluenti e asta di Po in occasione dell'evento esaminato e per il tratto d'asta tra Isola Sant'Antonio e Cremona.

Nel tratto di asta di Po a valle di Cremona anche gli apporti idrici del Taro sono stati schematizzati come un'immissione laterale concentrata in corrispondenza della foce del corso d'acqua. Gli apporti degli affluenti a valle di foce Taro sono invece stati trascurati, assumendo che, durante il transito del colmo di piena, fosse marginale il loro apporto idrico a causa dei fenomeni di rigurgito. Le scelte adottate nella schematizzazione degli apporti idrici degli affluenti, sebbene non consentano una corretta riproduzione degli scambi di volumi idrici tra affluenti e asta principale durante il passaggio dell'onda di piena nell'asta principale, si sono dimostrate in grado di fornire una corretta riproduzione dei valori idrometrici osservati (tiranti massimi e valori di portata al colmo di piena) anche nel tratto di asta fluviale a valle della sezione di Cremona. Al fine di migliorare la riproduzione dei fenomeni di rigurgito indotti dal passaggio dell'onda di piena in corrispondenza delle confluenze sarebbe necessario utilizzare un modello numerico a "rete", schematizzante la geometria degli

affluenti, oltre che quella dell'alveo principale di Po, come un sistema complesso di più corsi d'acqua (AdB-Po – DISTART, 2008).

## **4.2 Modello aggiornato**

Come indicato nel precedente paragrafo il modello Q2005D è stato inizialmente modificato nell'ambito di un precedente studio condotto in ambito di Tesi Specialistica (v. D'Andrea, 2010) con una nuova calibrazione, affinché potesse rappresentare un evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni, ossia l'evento (indicato dal secondo Piano Stralcio per le Fasce Fluviali) preso a riferimento per l'identificazione delle aree di fascia B.

La Fascia C di inondazione per piena catastrofica, come è stato precedentemente detto, è costituita dalla porzione di territorio esterna alla Fascia B, che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento; perciò per poter studiare il comportamento idraulico del Fiume Po e soprattutto le sue interazioni con queste aree adiacenti agli argini maestri si è dovuto provvedere nella presente dissertazione ad alcune modifiche e perfezionamenti del modello matematico idraulico messo a punto dal DISTART.

Una prima modifica è stata fatta per poter rappresentare nel modello i comparti idraulici situati nella fascia C; la suddivisione di tale fascia è stata realizzata utilizzando il software ArcView seguendo i criteri dell'autore (ossia una prima suddivisione delle aree comprese tra gli affluenti del corso medio - basso del fiume Po, e una seconda suddivisione riguardante solo parte dei comparti, nello specifico quelli che presentavano aree troppo estese o interazioni significative con infrastrutture viarie e ferroviarie – v. paragrafo 2.1 e successivi).

Una seconda modifica ha riguardato invece la calibrazione del modello, che è stato utilizzato per identificare attraverso un procedimento iterativo gli idrogrammi sintetici, rappresentativi della sollecitazione idraulica corrispondente ad un evento di piena catastrofica. Tale evento, anche definito evento al limite della prevedibilità, è caratterizzato da portata al colmo di piena e volumi idrici associati ad un tempo di ritorno di cinquecento anni (v. capitolo 5).

Terminata la fase di calibrazione degli idrogrammi di piena in ingresso ai vari affluenti e connesse idraulicamente le aree di Fascia C al corso d'acqua principale (v. paragrafo 2.2), si sono condotte diverse simulazioni idrauliche con il modello aggiornato, ognuna delle quali caratterizzata da una diversa configurazione geometrica delle strutture arginali:

- Configurazione arginale attuale considerando la possibilità di formazione di brecce nei tratti arginali in cui il transito dell'evento di piena ( $T_{rit} = 500$  anni) avviene con tracimazione (v. capitolo 6);
- Configurazione con argini inerodibili; anche in caso di tracimazione i cedimenti arginali sono scongiurati dall'ipotetica presenza di opportuni rivestimenti superficiali in grado di impedire la formazione dei fenomeni erosivi (v. capitolo 7).

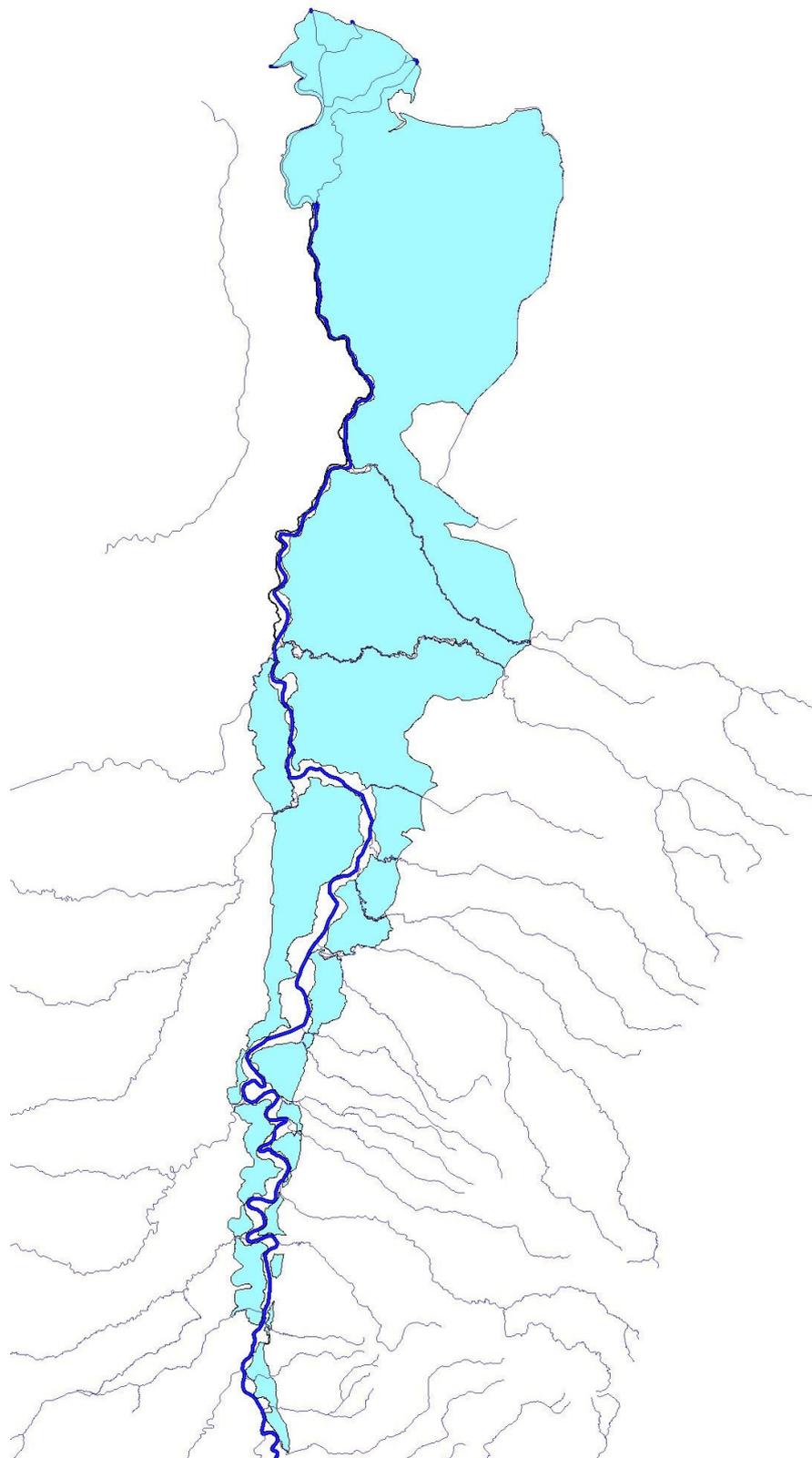
Infine è stato operato un confronto fra i dati ottenuti dalle due diverse tipologie di simulazioni (v. capitolo 8).

#### **4.2.1 Caratterizzazione geometrica dei comparti idraulici del fiume Po**

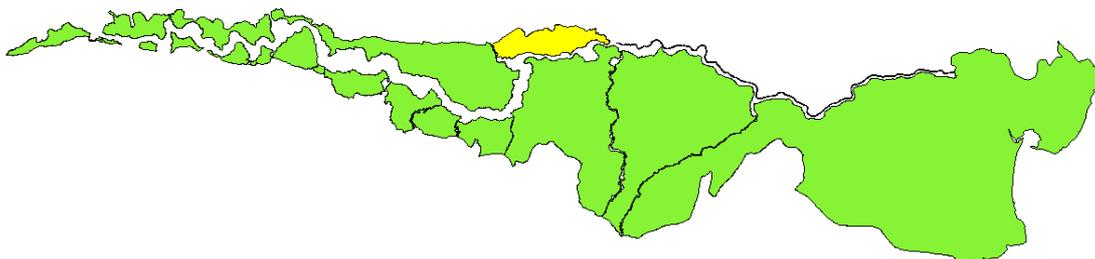
Il software HEC-RAS, come accennato precedentemente, consente la schematizzazione delle aree laterali di accumulo come *storage areas*, ovvero serbatoi descritti attraverso le loro curve di riempimento e quota di fondo. Detti serbatoi sono collegati all'alveo o ad altre *storage area* attraverso degli sfioratori laterali (indicati nel programma come *lateral*

*structure*). Per questo motivo le aree di inondazione catastrofica situate in fascia C sono state suddivise in comparti idraulici delimitati dalle arginature maestre di due affluenti del fiume Po contigui (Figura 3). Successivamente, per ogni area è stato determinato per punti il volume invasabile al variare del tirante idraulico espresso in quota assoluta (una curva del tipo quota invaso/volume).

Il lavoro inizia quindi da un data-base messo a disposizione dal DISTART Costruzioni Idrauliche; il primo di questi è il file di ArcView denominato “*Comparti\_idr.shp*”.



**Figura 3** Idrografia del Bacino del Po e comparti idraulici di Fascia C



**Figura 4 Comparti\_idr.shp**

contenente i layer di tutti i compartimenti di fascia C (v. Figura 3). Si è proceduto alla catalogazione dei compartimenti presenti e alla loro denominazione standard del tipo “xxxx\_yyyy”, dove “xxxx” e “yyyy” rappresentano rispettivamente le prime quattro lettere del nome dell’affluente di monte e di valle che lo delimitano. La Figura 4 riporta un esempio di comparto di Fascia C denominato *ogli\_minc* secondo il criterio di catalogazione sopra descritto (area delimitata dai Fiumi Oglio e Mincio). In due casi, essendo la fascia C non continua tra l’affluente e l’altro, uno dei due confini è costituito dallo stesso Po.

Alcuni di questi singoli compartimenti sono stati ulteriormente sezionati; alcuni per via delle dimensioni troppo estese che presentavano, altri divisi in base alla presenza nel territorio selezionato di naturali restringimenti, rete autostradale o ferroviaria. Ove presenti, le suddette infrastrutture sono state utilizzate come linea di demarcazione per migliorare la schematizzazione dei reali compartimenti idraulici e al fine di poter individuare aree più o meno sensibili o a maggior rischio di allagamento. Questa ulteriore suddivisione non ha portato alla creazione di ulteriori *shapefile*, ma solo ad un aggiornamento nel numero, forma ed estensione areale dei poligoni costituenti lo *shapefile* stesso. Sono stati così classificati 19 compartimenti idraulici con altrettanti *shapefile* corrispondenti, di seguito elencati in Tabella 2. In Tabella 3 sono invece riportati quei compartimenti che sono stati ulteriormente suddivisi secondo i criteri sopra specificati; per identificare

tali sottocomparti è stata utilizzata la precedente denominazione dei comparti originari, aggiungendo alla fine della dicitura la lettera A, B o C a seconda della posizione che il sottocomparto assume rispetto all'orientamento monte-valle (la lettera A sarà assegnata all'area più a monte e la lettera C all'area più a valle).

	<b>Comparto</b>	<b>Affluente di monte</b>	<b>Affluente di valle</b>	<b>Area [m<sup>2</sup>]</b>
DESTRA IDRAULICA	Staf_vers	Staffora	Versa	5.54E+07
	Vers_po	Versa	Po	3.50E+06
	Po_tido	Po	Tidone	8.08E+06
	Tido_treb	Tidone	Trebbia	1.73E+07
	Treb_nure	Trebbia	Nure	2.57E+07
	Nure_chia	Nure	Chiavenna	1.42E+07
	Chia_arda	Chiavenna	Arda	7.66E+07
	Arda_ongi	Arda	Ongina	4.79E+06
	Ongi_taro	Ongina	Taro	7.70E+07
	Taro_parm	Taro	Parma	8.92E+07
	Parm_enza	Parma	Enza	7.07E+07
	Enza_cros	Enza	Crostolo	9.98E+07
	Cros_secc	Crostolo	Secchia	7.26E+08
	Secc_Pana	Secchia	Panaro	9.06E+08
Pana_po	Panaro	Po	3.15E+09	
SINISTRA IDRAULICA	Rogg_lamb	Roggia Olona	Lambro	7.75E+07
	Lamb_adda	Lambro	Adda	9.90E+07
	Adda_ogli	Adda	Oglio	4.44E+08
	Ogli_minc	Oglio	Mincio	1.50E+08

**Tabella 2 Comparti idraulici individuati e catalogati in base alla idrografia dei principali affluenti**

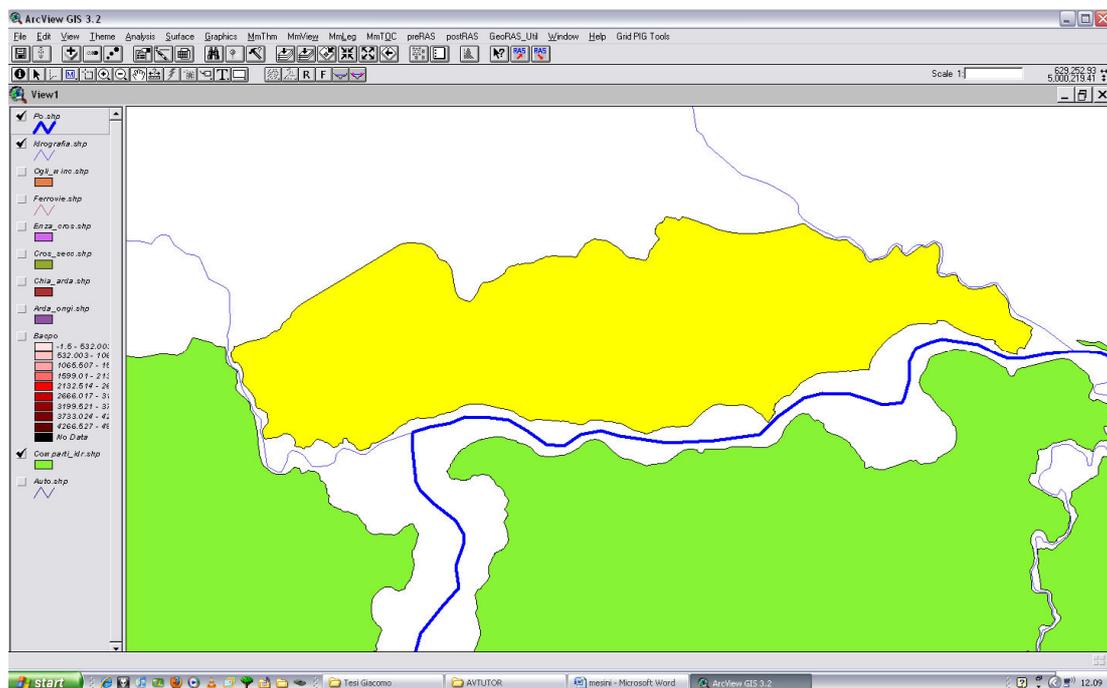
	<b>Comparto</b>	<b>Affluente di monte</b>	<b>Affluente di valle</b>	<b>Area [m<sup>2</sup>]</b>
DESTRA IDRAULICA	Chia_ardaA	Chiavenna	Arda	3.87E+07
	Chia_ardaB			3.88E+07
	Cros_seccA	Crostolo	Secchia	2.69E+08
	Cros_seccB			8.06E+07
	Cros_seccC			3.77E+08
	Secc_panaA	Secchia	Panaro	4.30E+08
	Secc_panaB			4.76E+08
	Pana_poA	Panaro	Po	5.21E+08
	Pana_poB			2.64E+09
SINISTRA IDRAULICA	Rogg_lambA	Roggia Olona	Lambro	3.10E+07
	Rogg_lambB			4.63E+07
	Lamb_addaA	Lambro	Adda	1.56E+07
	Lamb_addaB			3.93E+07
	Lamb_addaC			4.42E+07
	Adda_ogliA	Adda	Oglio	2.17E+07
	Adda_ogliB			1.45E+08
	Adda_ogliC			2.81E+08
	Ogli_mincA	Oglio	Mincio	6.97E+07
	Ogli_mincB			5.29E+07
	Ogli_mincC			2.89E+07

**Tabella 3 Comparti idraulici sezionati**



**Figura 5 Particolare della suddivisione del comparto ogli\_minc in 3 sottocomparti**

Successivamente, per ognuno dei nuovi comparti individuati, è stata eseguita in ArcView la medesima procedura che, a titolo di esempio è di seguito illustrata per il comparto idraulico *Ogli\_minc*,



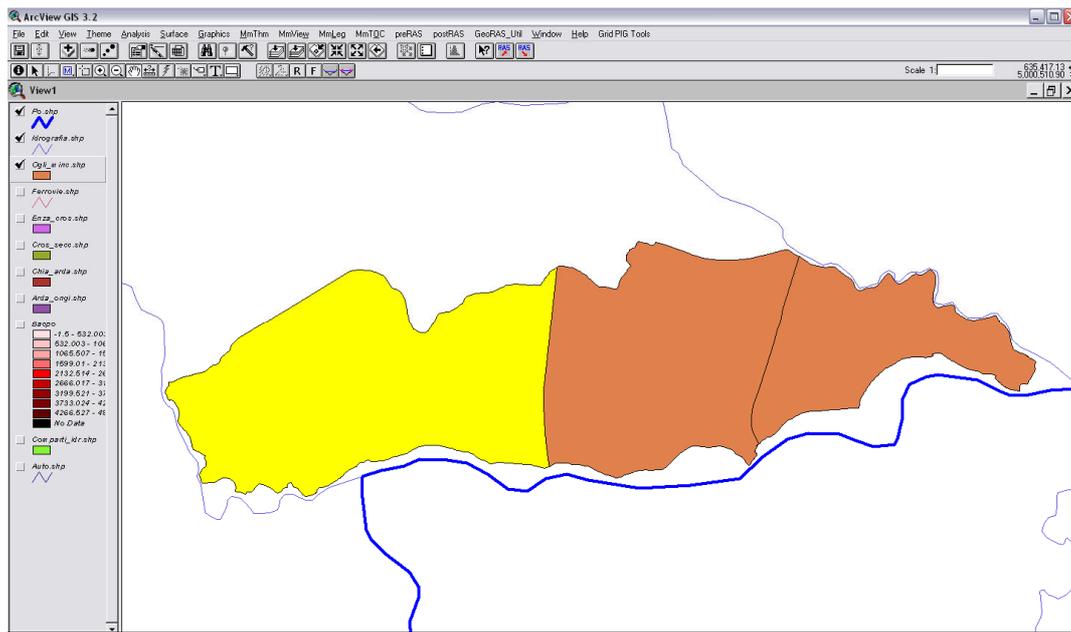
**Figura 6 Comparto Ogli\_minc.shp**

Sono stati innanzitutto caricati i file contenenti il DEM del bacino del Po (*BacPo*, del tipo *grid*) e la planimetria del comparto (*Ogli\_minc.shp*, del

tipo *shapefile*). Dopo aver selezionato il layer (v. Figura 6) si è operata la suddivisione del comparto attivando i layer *ferrovie.shp* e *auto.shp* utilizzando l'estensione di ArcView Memo Tools (Menu→Mm Thm→Split Theme by Polyline Theme) e selezionando il comparto come *theme* da dividere mediante le linee di ferrovie e autostrade si ottengono le varie sezioni del comparto (v. Figura 8).

Shape	Area	Perimeter	Faccia_c	Faccia_c_1	Faccia_c_2	Faccia_c_3	Faccia_c_4	Faccia_c_5	Faccia_c_6	Faccia_c_7	Faccia_c_8	Faccia_c_9	Faccia_c_10	Faccia_c_11	Faccia_c_12	Faccia_c_13	Faccia_c_14	Faccia_c_15	Faccia_c_16	Faccia_c_17	Faccia_c_18	Faccia_c_19	Faccia_c_20	Faccia_c_21	Faccia_c_22	Faccia_c_23	Faccia_c_24	Faccia_c_25	Faccia_c_26	Faccia_c_27	Faccia_c_28	Faccia_c_29	Faccia_c_30	Faccia_c_31	Faccia_c_32	Faccia_c_33	Faccia_c_34	Faccia_c_35	Faccia_c_36	Faccia_c_37	Faccia_c_38	Faccia_c_39	Faccia_c_40	Faccia_c_41	Faccia_c_42	Faccia_c_43	Faccia_c_44	Faccia_c_45	Faccia_c_46	Faccia_c_47	Faccia_c_48	Faccia_c_49	Faccia_c_50	Faccia_c_51	Faccia_c_52	Faccia_c_53	Faccia_c_54	Faccia_c_55	Faccia_c_56	Faccia_c_57	Faccia_c_58	Faccia_c_59	Faccia_c_60	Faccia_c_61	Faccia_c_62	Faccia_c_63	Faccia_c_64	Faccia_c_65	Faccia_c_66	Faccia_c_67	Faccia_c_68	Faccia_c_69	Faccia_c_70	Faccia_c_71	Faccia_c_72	Faccia_c_73	Faccia_c_74	Faccia_c_75	Faccia_c_76	Faccia_c_77	Faccia_c_78	Faccia_c_79	Faccia_c_80	Faccia_c_81	Faccia_c_82	Faccia_c_83	Faccia_c_84	Faccia_c_85	Faccia_c_86	Faccia_c_87	Faccia_c_88	Faccia_c_89	Faccia_c_90	Faccia_c_91	Faccia_c_92	Faccia_c_93	Faccia_c_94	Faccia_c_95	Faccia_c_96	Faccia_c_97	Faccia_c_98	Faccia_c_99	Faccia_c_100
Polygon	28894436.89068603500	30395.57302734360600	822	821	724	1626	C	25	52	PO	001	PO	ogli_minca	0.0	13.0	22.7	ogli_mincaC																																																																																						
Polygon	52874088.84110814300	32263.37690298168000	822	821	724	1626	C	25	52	PO	001	PO	ogli_minca	0.0	12.0	23.0	ogli_mincaB																																																																																						
Polygon	69653824.03246268600	41736.78410417146600	822	821	724	1626	C	25	52	PO	001	PO	ogli_minca	0.0	16.0	24.0	ogli_mincaA																																																																																						

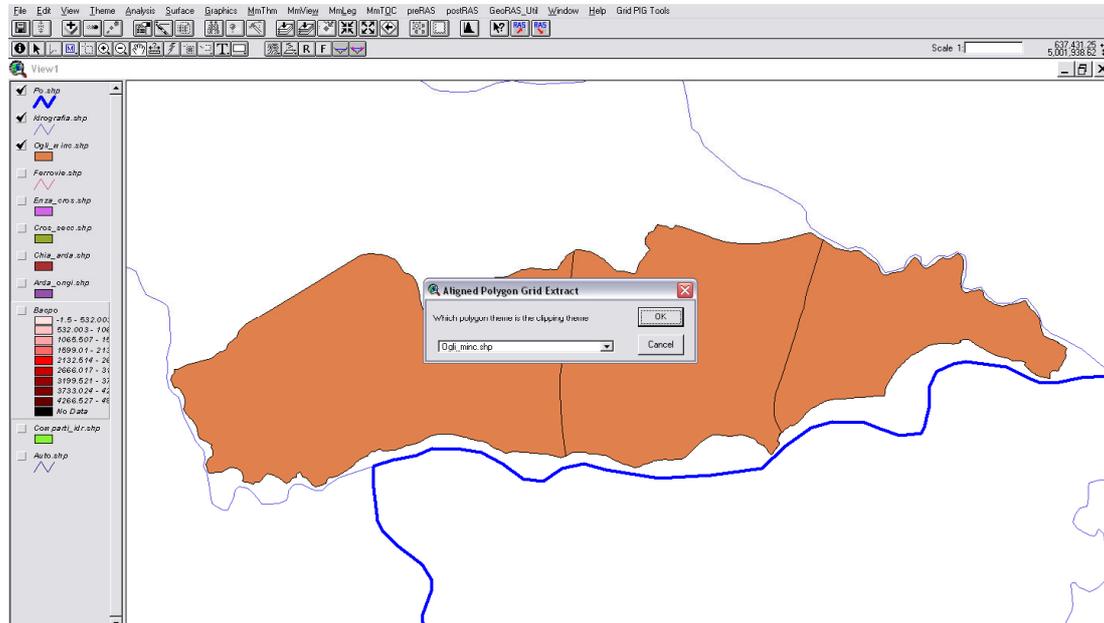
**Figura 7 Editing di Ogl\_minca.shp e successivi**



**Figura 8 Comparto Ogl\_minca.shp**

In seguito, selezionando come theme il BacPo, si utilizza l'estensione Grid PIG Tools (Menu → Grid PIG Tools → Clip Grid by Polygon)

selezionando il comparto di cui intendiamo creare il grid (ossia *Ogli\_minc.shp*)



**Figura 9 Creazione del grid**

Viene creato un file Extract BacPo.grid che è stato opportunamente rinominato col nome del comparto (*Ogli\_minc.grid*) e salvato nella cartella di lavoro grid. Con questa operazione si è ritagliato sulla misura del comparto il DEM del Po, ottenendone quindi uno di dimensioni più ridotte e più facile da gestire. A questo punto il file è stato convertito nel formato di file *.tin* avendo sempre cura di selezionarlo prima dell'operazione (Menu → Theme → Convert Grid to TIN) e salvando il file ottenuto nella cartella tin (v. Figura 10).

Ora, attivando un'ulteriore estensione di ArcView, HEC-Geo-RAS 3.1.1, si è passati alla definizione delle curve livello/volume invaso del comparto. Mantenendo selezionato il file *Ogli\_minc.tin*, si va a cliccare su (Menu → preRAS → Storage Area Completion) e si selezionano nel campo *storarea* il file *Ogli\_minc.shp* e come *terrain* il file *Ogli\_minc.tin*.

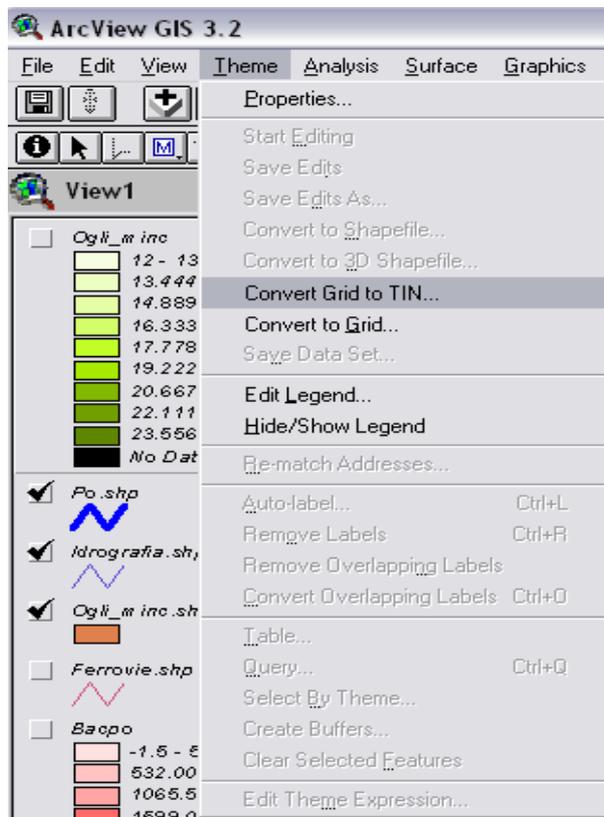


Figura 10 Creazione di Ogli\_minc.tin

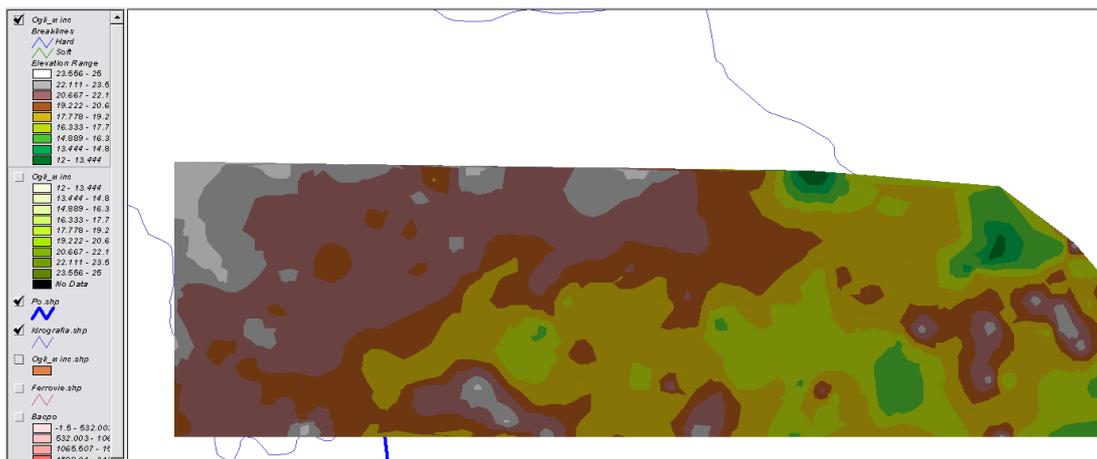


Figura 11 Ogli\_minc.tin

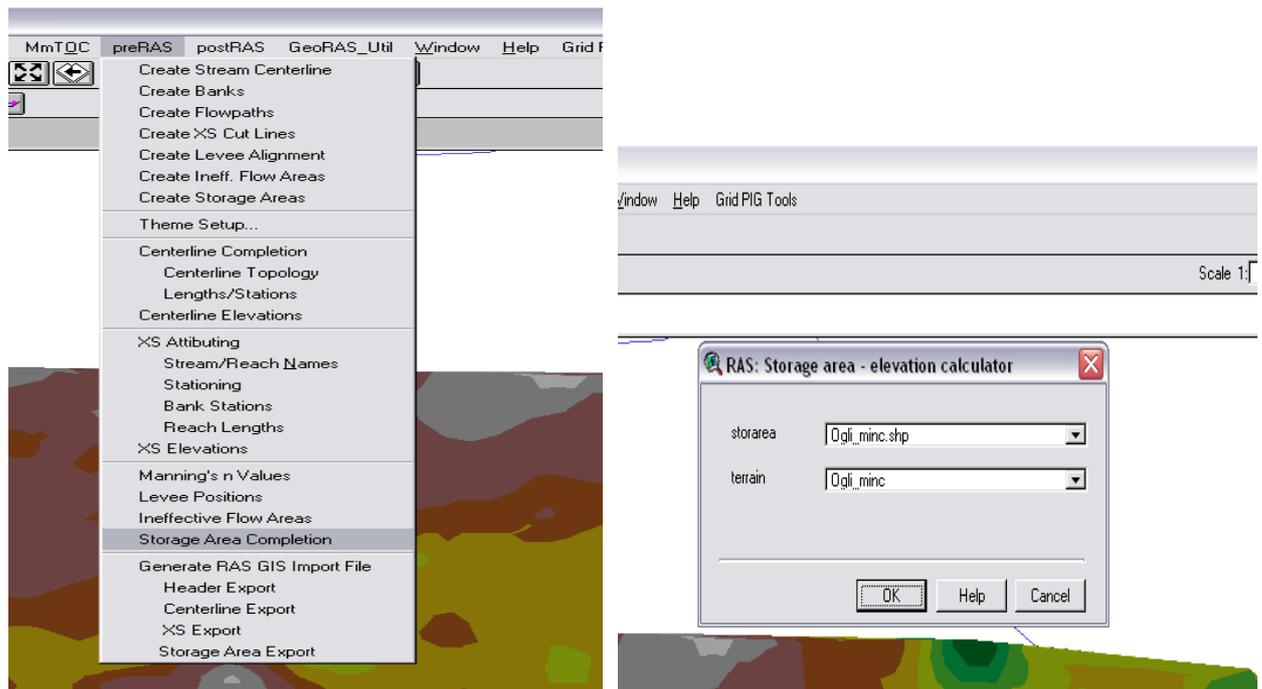


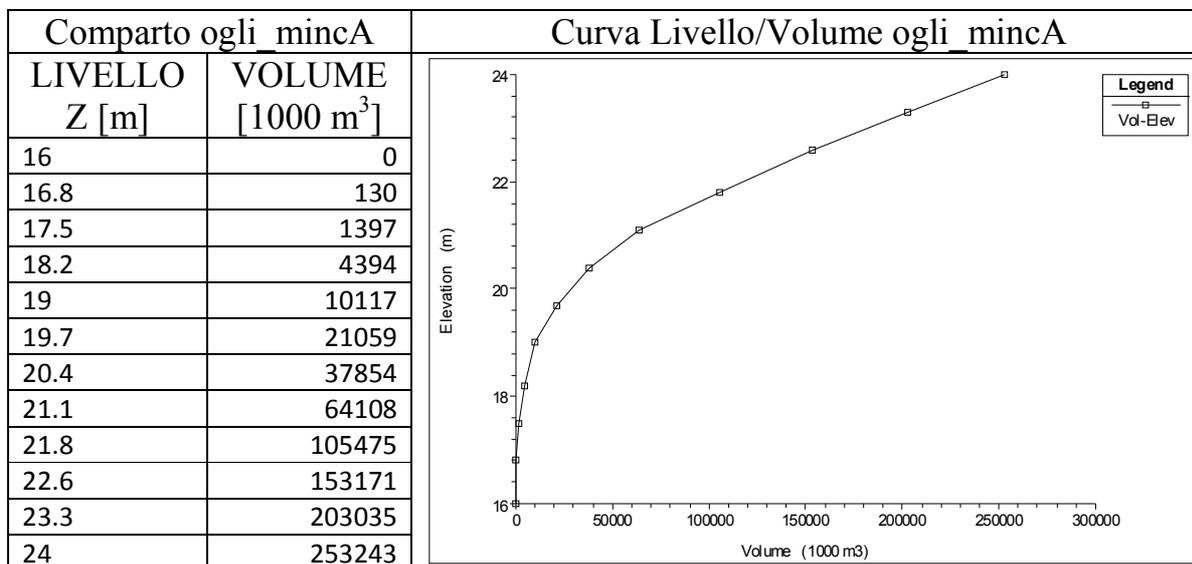
Figure 12 Editing dei database file

Selezionando ora nuovamente il comparto *Ogli\_minc.shp* si modifica il campo *SA\_id*, digitando il nome che si intende assegnare ai file contenenti le tabelle livello/volume delle singole sottoaree dei comparti.

Shape	Area	Perimeter	Fasce_t_c	Fasce_t_c1	Fasce_c_ab	Fasce_c_1	Fasce_c_1	Taglio_c_1	Taglio_c_1	Sigla	Codido	Nomeidro	Comp_idr	Usermax	Minlev	Maxlev	SA_id
Polygon	28894436.89068603500	30356.57302734906000	822	821	724	1626	C	25	52	PO	001	PO	ogli_minc	0.0	13.0	22.7	ogli_mincC
Polygon	52874088.84110814300	32263.37690298169000	822	821	724	1626	C	25	52	PO	001	PO	ogli_minc	0.0	12.0	23.0	ogli_mincB
Polygon	63653824.03246268600	41736.78410417148600	822	821	724	1626	C	25	52	PO	001	PO	ogli_minc	0.0	16.0	24.0	ogli_mincA

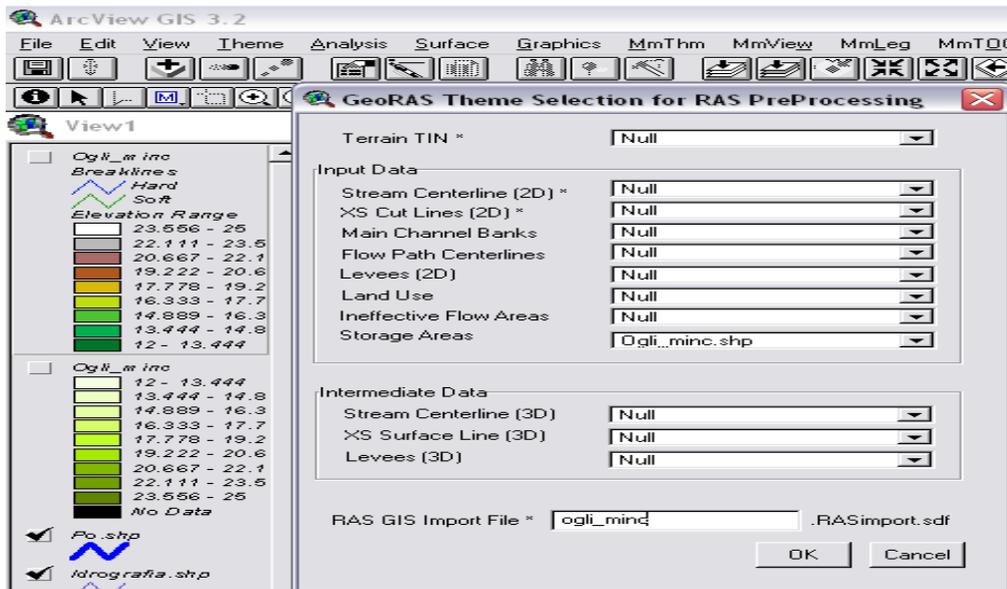
Figura 13 Completamento campo SA\_id

Sono state ora create nella cartella predisposta del programma (cartella AVTUTOR) dei file *.dbf* (*database file*), apribili con il programma Excel, che contengono una tabella con i livelli da una parte e il volume occupato nel comparto a quel dato livello (v. Tabella 4).



**Tabella 4 Andamento del volume al variare della quota (dati tabulati e curva d’invaso) del comparto ogli\_minca**

L’ultimo passaggio del lavoro di caratterizzazione geometrica dei comparti consiste nel modificare il formato dei file *.dbf* contenenti le informazioni relative ai tiranti e ai volumi invasati, in modo da giungere a file che possano essere importati nel modello in HEC-RAS, ossia di tipo *RASimport.sdf*. Questo risultato si ottiene attivando l’estensione HEC-GeoRAS 3.1.1 (Menu → File → Extensions) e utilizzando il comando Menu → preRAS → Theme Setup. Si seleziona nel campo Storage Areas il comparto su cui si sta lavorando (*Ogli\_minca.shp*) e nel campo RAS GIS Import File si assegna il nome della geometria con cui lavoreremo in HEC-RAS (*Ogli\_minca.RASimport.sdf*).



**Figura 14 Theme selection**

ArcView creerà allora questo nuovo file andando a collocarlo nella cartella AVTUTOR, ricavando un file perfettamente compatibile per il nostro modello di simulazione idraulica. Tale procedimento è stato ripetuto più volte per i restanti trenta comparti, portando alla creazione di altrettante tabelle quota invaso/volume che vengono riportate in Appendice A.



#### 4.2.2 Schematizzazione del comportamento idraulico dei comparti idraulici di fascia C

I file schematizzanti i comparti idraulici sono dunque stati importati nel programma HEC-RAS utilizzando il comando Edit → Geometry Data dalla finestra di controllo principale del programma. Per importare i nuovi file si segue il percorso File → Import Geometry Data → GIS Format e si procede alla selezione dei file presenti nella cartella AVTUTOR precedentemente creati con ArcView.

Una volta caricata la nuova geometria, è necessario completare le informazioni delle singole *Storage Area*, poiché i file di cui si dispone contengono già le informazioni relative alle curve di riempimento dei trentaquattro comparti, ma necessitano delle proprie quote di fondo, indispensabili per procedere alla simulazione con il software; per associare tali quote alle rispettive *Storage Area* si utilizza il comando Edit → Unsteady flow Data (v. Figura 16).

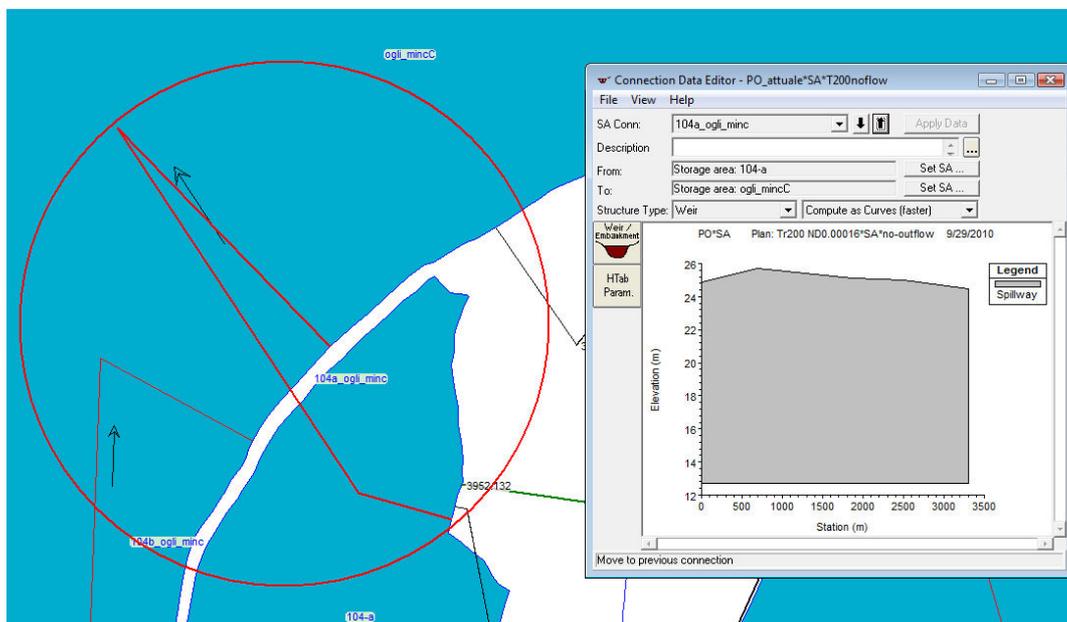
	Storage Area	Initial Elevation
58	adda_ogliA	37.4
59	adda_ogliB	24
60	adda_ogliC	17
61	arda_ongi	36
62	chia_ardaA	37
63	chia_ardaB	35
64	cros_seccA	11
65	cros_seccB	15.5
66	cros_seccC	15

**Figura 16 Inserimento delle quote di fondo dei comparti nell'Unsteady Flow Data Editor**

Il modello dell'Adb-Po-DISTART del 2008 conteneva come *Storage Area* le golene chiuse incluse nella fascia B; aggiungendo le nuove *Storage Area* appartenenti alla fascia C si rende necessario creare dei collegamenti tra

queste ultime e le eventuali golene protette già presenti, e con il corso d'acqua stesso; tali connessioni schematizzano l'andamento plano-altimetrico degli argini maestri.

I collegamenti tra golene vengono effettuati servendosi della funzione *Storage Area Connection*, un'applicazione di HEC-RAS nella quale è necessario specificare le due storage area che si intendono collegare e l'andamento, descritto per punti, della sommità arginale (v. Figura 17).



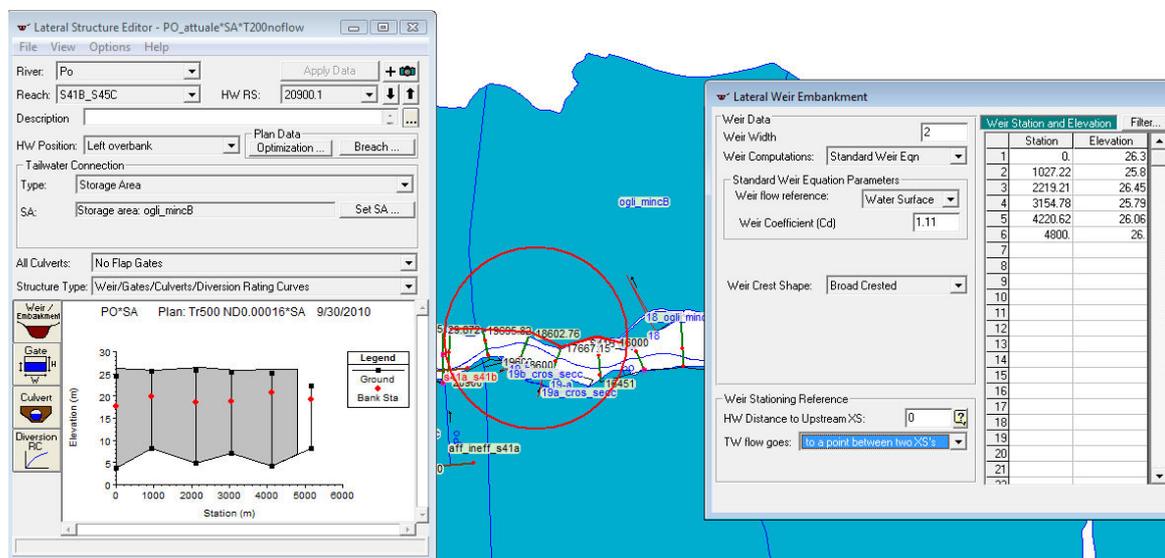
**Figura 17 Esempio di storage area connection per la connessione idraulica tra una golena interna al sistema arginale (Fascia B) ed una storage area esterne alle arginature (Fascia C).**

I collegamenti invece tra le nuove storage area e il fiume Po sono stati schematizzati utilizzando degli sfioratori laterali (*Lateral Structure*); per compiere l'editing di queste strutture bisogna immettere diversi parametri (come mostrato anche in Figura 18):

- andamento longitudinale e altimetrico dei profili dei diversi sfioratori;

- identificazione della storage area in cui la lateral structure riversa le portate laminate durante la simulazione dell'evento di piena;
- collocazione degli sfioratori: destra o sinistra idraulica.

Ogni *Lateral Structure* viene registrata da HEC-RAS con il numero *River Station*, il quale identifica ciascun elemento posto lungo il fiume; il programma prevede che esso, all'interno di ciascun ramo in cui il corso d'acqua è suddiviso (*reach*), sia decrescente da monte verso valle: in tale maniera l'ordine degli elementi risulta univocamente definito.



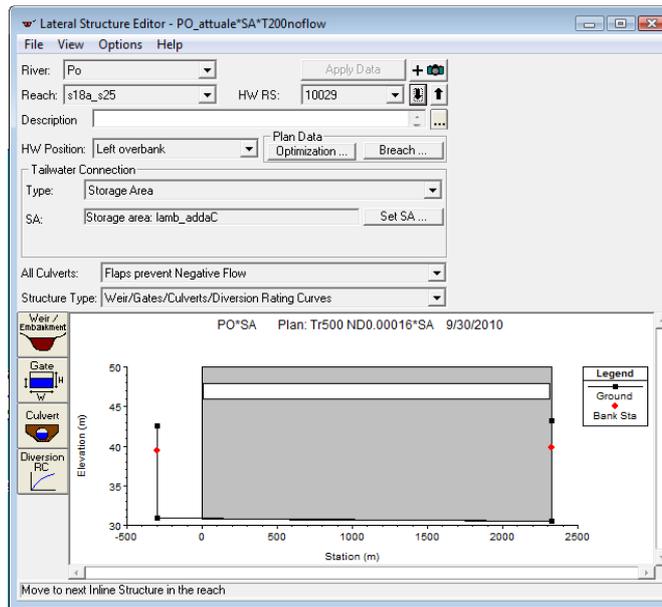
**Figura 18 Creazione di una Lateral Structure**

Nell'editor della *Lateral Structure* è presente la funzione *Culvert*, la quale permette di inserire all'interno di questi sfioratori laterali un canale dotato di una valvola di non ritorno. Questo stratagemma è stato adottato per pervenire ad una modellazione più realistica di tre *Lateral Structure* dalle quali le simulazioni preliminari evidenziavano la fuoriuscita di volumi idrici tracimati nella *Storage Area* da altre *Lateral Structure* ad essa connesse (v. Tabella 5).

Collocazione	Lateral structure con Culvert		Comparto collegato
	Reach	LS	
Sx Idraulica	s10_s18	33820.1	rogg_lambB
Sx Idraulica	s18a_s25	36364	lamb_addaB
Sx Idraulica	s18a_s25	10029	lamb_addaC

**Tabella 5 Lateral Structure in cui è stata inserita una Culvert**

Tale “soluzione” si è resa necessaria per porre rimedio ad un limite intrinseco del programma, il quale schematizza i comparti idraulici come vasche di accumulo, e quindi simula un trasferimento istantaneo dei volumi d’acqua da un punto all’altro: tale simulazione non corrisponde però alla reale propagazione. In tutti e tre i casi la sommità arginale è stata spostata ben al di sopra del massimo tirante idrico previsto, e la *Culvert* è stata definita in modo tale da riprodurre l’andamento dell’argine reale; è stato inoltre possibile definire per ogni canale la perdita di carico e il coefficiente di Manning per la resistenza. Il precedente limite coinvolge anche delle *Storage Area Connection*.



**Figura 19 Lateral Structure con Culvert**

## **5 EVENTO DI PIENA AL LIMITE DELLA PREVEDIBILITÀ: IDENTIFICAZIONE DELLA SOLLECITAZIONE DI PROGETTO**

Il modello numerico del Fiume Po Q2005D è stato ricalibrato per simulare correttamente la propagazione di una piena con tempo di ritorno cinquecentennale; tale procedimento iterativo consiste nella determinazione di idrogrammi sintetici per gli affluenti del Po considerati nel modello (*lateral inflow*) tali che, come risultato delle simulazioni, dessero nelle sezioni strumentate del Po di Piacenza, Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro degli idrogrammi quanto più vicini possibile a quelli sintetici  $T_{rit}500$  messi a disposizione dall'AdB-Po

### **5.1 Idrogrammi $T_{rit}500$ attesi nelle sezioni strumentate**

Nei problemi riguardanti la protezione idraulica del territorio oltre alle portate di colmo, è necessario conoscere anche il volume delle piene e la loro distribuzione nel tempo. La definizione di un'onda di piena sintetica con assegnato tempo di ritorno è il metodo più generale per trattare questi tipi di problemi.

Non è possibile attribuire un valore della probabilità di non superamento ad un'onda, ma solo ad alcuni parametri caratteristici della stessa. Le caratteristiche più importanti dell'onda di piena sono la portata al colmo e il volume in un'assegnata durata (portata media nella medesima durata), di conseguenza all'onda sintetica si può attribuire un tempo di ritorno di riferimento imponendo che alla portata di colmo e alle massime portate medie in ogni durata parziale corrisponda tale valore del tempo di ritorno.

Qualora nella sezione d'interesse sia disponibile una serie sufficientemente lunga e completa di registrazioni di idrogrammi di piena, la determinazione degli idrogrammi sintetici è basata sulla costruzione della curva di

riduzione dei colmi di piena e sulla individuazione della posizione media del picco in ciascuna durata a partire dall'analisi delle onde di piena storiche (Maione et al., 2000a, Maione et al., 2000b)

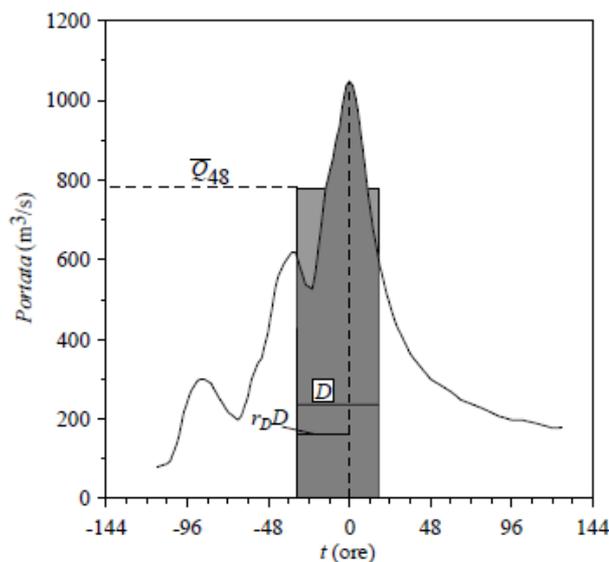
La costruzione degli idrogrammi sintetici  $T_{rit}500$  nelle sezioni strumentate di Piacenza, Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro è il frutto di un lavoro svolto su commissione dell'AdB-Po dal Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento (D.I.I.A.R.) del politecnico di Milano nell'ottobre del 2001; sono stati ricavati tramite elaborazioni statistiche effettuate su un campione di onde di piena storiche, i cui dati sono stati recuperati dalle registrazioni effettuate a partire dal 1951. Le registrazioni idrometriche delle sezioni di Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro sono state recuperate presso la sezione di Parma dell'Ufficio Idrografico del Po; per la stazione di Piacenza non è stato possibile recuperare le registrazioni idrometriche e le onde sono state ricostruite a partire dalle letture giornaliere dei livelli idrometrici pubblicate sulla Parte II degli Annali Idrologici. La lettura degli idrogrammi di piena è stata condotta individuando, anno per anno, gli eventi utili all'analisi statistica; in particolare sono state digitalizzate le onde contenenti i valori massimi annui della portata al colmo e dei volumi di assegnata durata. Per alcuni anni è stato sufficiente prendere in considerazione un solo evento, in altri casi è stato necessario considerare due o tre eventi per anno. Oltre alle registrazioni idrometriche, è stato necessario recuperare per ogni evento la scala di deflusso valevole per il periodo corrispondente, necessaria per il passaggio dai livelli alle portate.

Per ricavare l'informazione necessaria all'individuazione di un idrogramma di progetto di assegnato tempo di ritorno a partire dall'analisi delle onde di piena storiche si è scelto di procedere fissando una serie di valori di durata e analizzando, mediante un'analisi a finestra mobile, il valore massimo del volume (o della portata media) compreso in dette durate.

Tale approccio si basa sull'elaborazione statistica delle massime portate medie in assegnata durata D:

$$\overline{Q}_D = \max \left( \frac{1}{D} \cdot \int_{t-D}^t Q(\tau) d\tau \right)$$

dove il massimo è calcolato rispetto a tutte le possibili finestre temporali (t-D, t) di ampiezza D contenute nel generico idrogramma di piena. Per ciascun idrogramma di piena è stato calcolato il valore massimo assunto dalla portata media per n durate prefissate, ottenendo così n serie di portate composte ciascuna da un numero di dati pari al numero di eventi. La scelta di tali finestre temporali (D) è stata fatta in base ad un'analisi preliminare della durata della porzione più significativa degli idrogrammi di piena registrati. Per ciascuna durata è stata anche calcolata la posizione r assunta dal picco ( $r_D = 0 \div 1$ , v. Figura 20), definita come rapporto tra la frazione della finestra temporale che precede il picco ( $D_b$ ) e l'intera durata considerata (D) Questo parametro, come si vedrà, è di fondamentale importanza nella determinazione della forma dell'onda sintetica.



**Figura 20** Posizione del picco  $r_D$

Per ogni evento e per ciascuna durata sono state estratte quindi due informazioni: la portata media e la massima posizione del picco  $r_D$ . Complessivamente sono stati estratti  $n(\text{eventi}) \times n(\text{durate})$  valori di portata e lo stesso numero di posizioni del picco  $r_D$ .

### 5.1.1 Elaborazioni statistiche

Nel caso di sezioni strumentate la costruzione delle onde di piena sintetiche può essere effettuata attraverso l'interpretazione statistica di alcuni caratteri fondamentali dei fenomeni di piena osservati. La portata  $Q$  relativa ad una sezione fluviale è variabile nel tempo, sicché può essere descritta come un processo stocastico continuo indicato con  $Q(t)$ , dove  $t$  indica appunto il parametro temporale del processo. La portata media in un intervallo temporale  $D$  relativamente alla stessa sezione si ottiene integrando il processo stocastico  $Q(t)$ :

$$Q(t, D) = \frac{1}{D} \cdot \int_{t-D}^t Q(\tau) d\tau$$

Le durate devono essere comprese tra 0, corrispondente alla portata istantanea, ed un valore  $D_f$ , sufficientemente lungo da essere rappresentativo della natura dei fenomeni di piena nella sezione considerata.

Dal momento che entrambi i processi risultano continui e che la continuità è l'unica proprietà utilizzata, è risultato conveniente indicare i due processi, puntuale e mediato, con l'unica notazione  $Q(t, D)$  ponendo  $Q(t, 0) = Q(t)$ .

Poiché l'interesse si è concentrato sui valori estremi del processo  $Q(t, D)$ , si è studiata la probabilità che il valore massimo di  $Q(t, D)$  non superi il valore  $q$  in un intervallo  $\Delta t$ :

$$P_{\overline{Q_D}}(q) = Prob [\max Q(t, D) \leq q \quad t \in (0, \Delta t)]$$

Assumendo il periodo omogeneo di riferimento  $\Delta t = 1$  anno. Dunque la stima della legge  $\overline{q_D} = \overline{q_D}(T_{rit})$  è stata condotta a partire dalla serie dei massimi annuali (Annual Flood Series, AFS), vale a dire la serie dei valori massimi assunti dalla variabile in ciascuno degli anni di osservazione.

### 5.1.2 Curve di riduzione dei colmi di piena

Lo scopo delle elaborazioni statistiche consisteva nella determinazione della legge  $\overline{q_D} = \overline{q_D}(T_{rit})$ , che esprime l'equazione della curva di riduzione dei colmi di piena, dalla quale sono stati poi ricavati gli idrogrammi di riferimento in corrispondenza dei tempi di ritorno di interesse. Tale curva rappresenta la relazione che lega la portata media  $\overline{Q_D}$  alla corrispondente durata  $D$ , fissato il generico valore del tempo di ritorno  $T_{rit}$ .

Essendo risultati i coefficienti di variazione dei campioni poco variabili con la durata, è stato possibile considerare ciascun elemento - una volta normalizzato rispetto alla media del campione di appartenenza estratto dalla popolazione dell' unica variabile casuale  $Q^* = \frac{\overline{Q_D}}{\mu(Q_D)}$  (avendo trascurato l'influenza dei momenti di ordine superiore al secondo).

Le serie corrispondenti alle diverse durate sono state dunque normalizzate rispetto al valor medio e raggruppate a formare un unico campione della variabile  $Q^*$  di numerosità pari al prodotto del numero di durate considerate nell'analisi e della numerosità di ciascuna serie storica.

In tal modo la curva di riduzione dei colmi di piena è stata ricavata adattando all'unico campione della variabile adimensionale  $Q^*$  una

funzione di probabilità, stimando la quantità  $q^*(T)$  e moltiplicando tale valore per la media  $\mu(\overline{Q_D})$  (stimata in base ai valori medi campionari delle serie storiche relative alle diverse durate):

$$\overline{q_D}(T_{rit}) = q^*(T_{rit}) \cdot \mu(\overline{Q_D})$$

Per l'elaborazione statistica dei campioni della variabile  $Q^*$  è stata adottata la distribuzione di Gumbel; indicando con  $u$  e  $\alpha$  i due parametri di tale distribuzione, la curva di riduzione dei colmi di piena ha quindi equazione:

$$\overline{q_D}(T_{rit}) = \left\{ u - \alpha \cdot \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T_{rit}} \right) \right] \right\} \cdot \mu(\overline{Q_D})$$

### 5.1.3 Posizione del picco

Per come è stato definito, il valore della posizione del picco  $r_D$  può variare tra 0 e 1. In particolare assume il valore 0 se il picco cade all'inizio della finestra temporale considerata, mentre assume valore 1 se il picco cade alla fine della finestra temporale. Si hanno così a disposizione tante serie temporali di posizioni del picco quante sono le durate analizzate. Ai fini della ricostruzione dell'onda di piena è stato calcolato il valore medio di ogni serie. Inoltre, per rendere la forma dell'onda sintetica il più regolare possibile, i punti  $(D, r_D)$ , ottenuti con la procedura sopra descritta, sono stati interpolati, per tutte le stazioni, con una curva polinomiale del sesto ordine.

### 5.1.4 Costruzione dell'idrogramma sintetico

Ottenuta la curva di riduzione dei colmi di piena, la costruzione dell'idrogramma sintetico è stata effettuata imponendo che la massima portata media in ciascuna durata coincidesse con quella prevista dalla curva di riduzione; la forma dell'idrogramma è stata determinata dal coefficiente

esprimente la posizione del picco  $r_D$ . L'idrogramma sintetico è stato dunque definito dalle condizioni:

$$\int_{-r_D \cdot D}^0 Q(\tau, T_{rit}) d\tau = r_D \cdot \overline{Q_D(T_{rit})} \cdot D$$

$$\int_0^{(1-r_D) \cdot D} Q(\tau, T_{rit}) d\tau = (1 - r_D) \cdot \overline{Q_D(T_{rit})} \cdot D$$

le espressioni dei due rami dell' idrogramma  $Q(\tau, T_{rit})$  prima e dopo il colmo sono state ottenute differenziando le equazioni sopra rispetto alla durata  $D$ :

$$Q(\tau, T_{rit}) = \frac{\frac{d}{dD} (r_D \cdot \overline{Q_D(T_{rit})} \cdot D) \Big|_{D=D(t)}}{\frac{d}{dD} (r_D \cdot D) \Big|_{D=D(t)}}; \quad t = -r_D \cdot D \quad (-r_{D_f} \cdot D_f \leq t \leq 0)$$

$$Q(\tau, T_{rit}) = \frac{\frac{d}{dD} ((1 - r_D) \cdot \overline{Q_D(T_{rit})} \cdot D) \Big|_{D=D(t)}}{\frac{d}{dD} ((1 - r_D) \cdot D) \Big|_{D=D(t)}}; \quad t = (1 - r_D) \cdot D \quad (-r_{D_f} \cdot D_f \leq t \leq 0)$$

## 5.2 Calibrazione degli idrogrammi sintetici degli affluenti

Di seguito viene descritta l'elaborazione degli idrogrammi sintetici dei principali affluenti del fiume Po utilizzati per rappresentare in maniera ancora più accurata l'evento di piena al limite della prevedibilità: tale elaborazione è presentata in dettaglio in D'Andrea (2010).

Il procedimento di calibrazione delle *lateral inflow* è stato svolto in maniera iterativa, procedendo ad ogni step ad una simulazione in HEC-RAS, al confronto degli idrogrammi risultanti con quelli sintetici  $T_{rit}500$  di cui al paragrafo 5.1 e al successivo calcolo della correzione da apportare agli idrogrammi in ingresso; tale iter è stato ripetuto fino al raggiungimento di una precisione soddisfacente.

Per calcolare gli andamenti di primo tentativo sono stati presi a riferimento gli idrogrammi sintetici degli affluenti  $T_{rit}200$  calibrati per il modello preesistente e sono stati amplificati tramite un coefficiente ricavato dalle portate di picco degli idrogrammi sintetici  $T_{rit}200$  e  $T_{rit}500$  nelle sezioni di Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro, così definito:

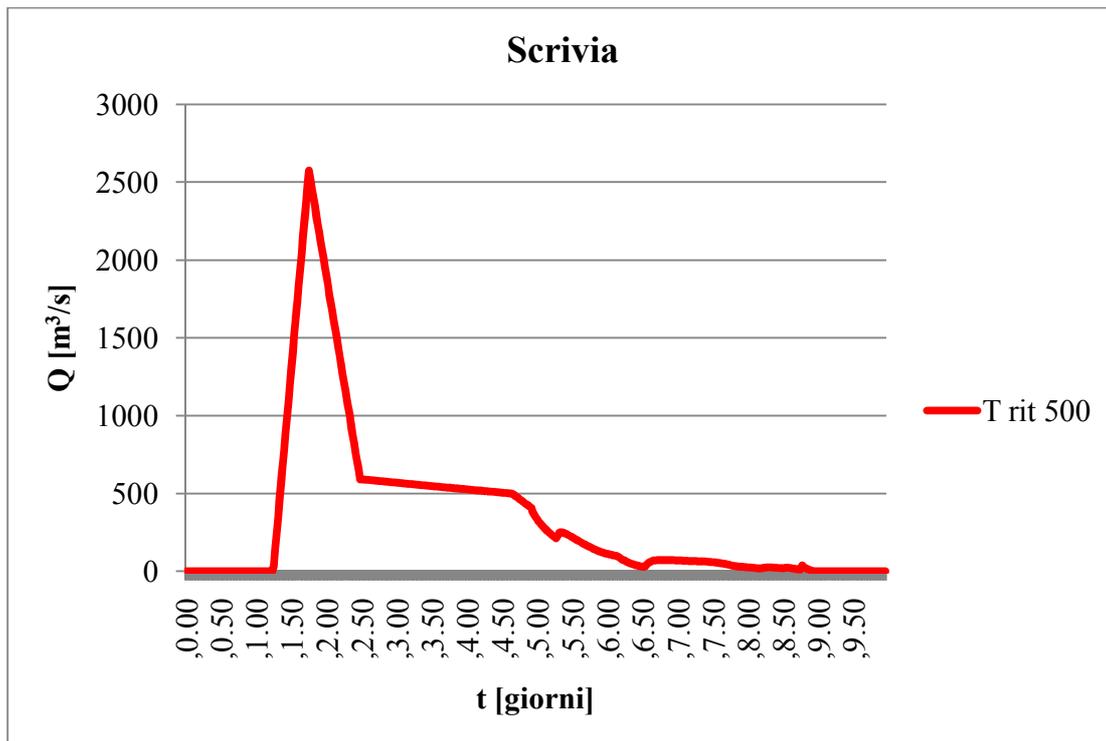
$$k_Q = \frac{\frac{Q_{500}^{max}(Boretto)}{Q_{200}^{max}(Boretto)} + \frac{Q_{500}^{max}(Borgoforte)}{Q_{200}^{max}(Borgoforte)} + \frac{Q_{500}^{max}(Pontelagoscuro)}{Q_{200}^{max}(Pontelagoscuro)}}{3}$$

dove  $Q_{500}^{max}(Boretto)$ ,  $Q_{500}^{max}(Borgoforte)$  e  $Q_{500}^{max}(Pontelagoscuro)$  sono le portate di picco degli idrogrammi sintetici  $T_{rit}500$  nelle corrispondenti sezioni, e  $Q_{200}^{max}(Boretto)$ ,  $Q_{200}^{max}(Borgoforte)$  e  $Q_{200}^{max}(Pontelagoscuro)$  quelle relative agli idrogrammi sintetici  $T_{rit}200$ .

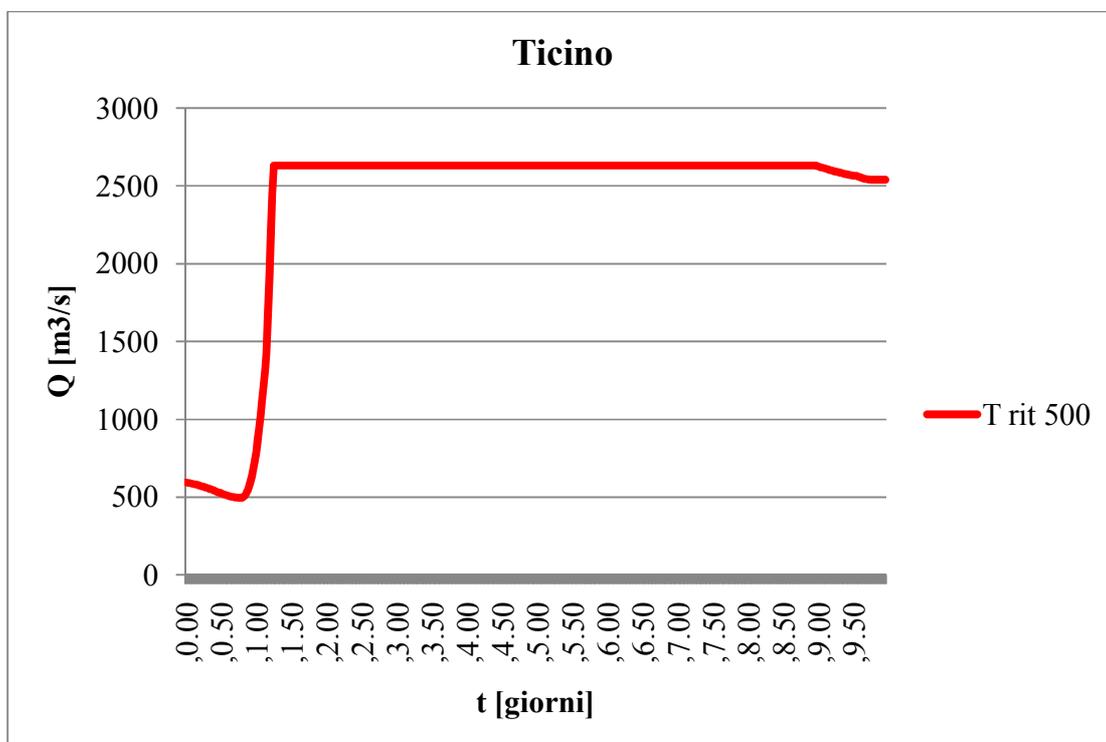
Successivamente è stata eseguita una serie di cinque simulazioni, in ognuna delle quali si è presa come riferimento una diversa sezione strumentata del Po, partendo da monte, dalla sezione di Piacenza, e poi procedendo verso valle facendo riferimento a Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro. Ad ogni passo si è calcolata la differenza istante per istante tra le portate attese e quelle calcolate da HEC-RAS in quella sezione, ottenendo un idrogramma di correzione da applicare all'affluente compreso tra la sezione strumentata in questione e quella immediatamente a monte.

Nei casi in cui erano presenti più affluenti interessati dall'aggiustamento l'idrogramma correttivo è stato ripartito tra di essi in maniera proporzionale alle  $Q_{200}^{max}$  dei rispettivi idrogrammi sintetici.

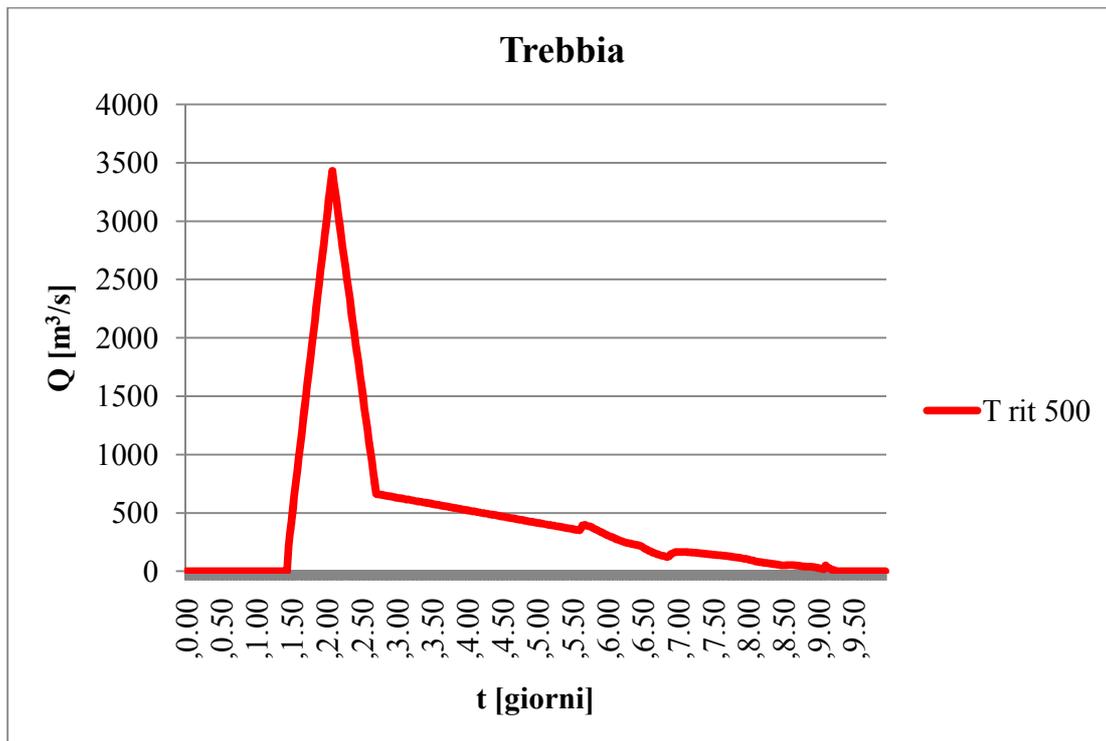
Essendo il risultato non ancora soddisfacente e l'andamento delle *lateral inflow* così ottenute piuttosto artificioso e poco realistico, si è proceduto ad un ulteriore aggiustamento manuale, guidato dal criterio del mantenimento dei volumi individuati. Si è così giunti alla configurazione definitiva degli idrogrammi degli affluenti laterali in ingresso nel Po (v. Grafico 5, Grafico 6, Grafico 7, Grafico 8, Grafico 9, Grafico 10, Grafico 11 e Grafico 12), la cui bontà è stata valutata confrontando, oltre agli idrogrammi attesi e simulati nelle cinque stazioni del Po (Grafico 13, Grafico 15, Grafico 17, Grafico 19 e Grafico 21), anche le curve di laminazione (V,Q) da essi ricavabili (Grafico 14, Grafico 16, Grafico 18, Grafico 20 e Grafico 22).



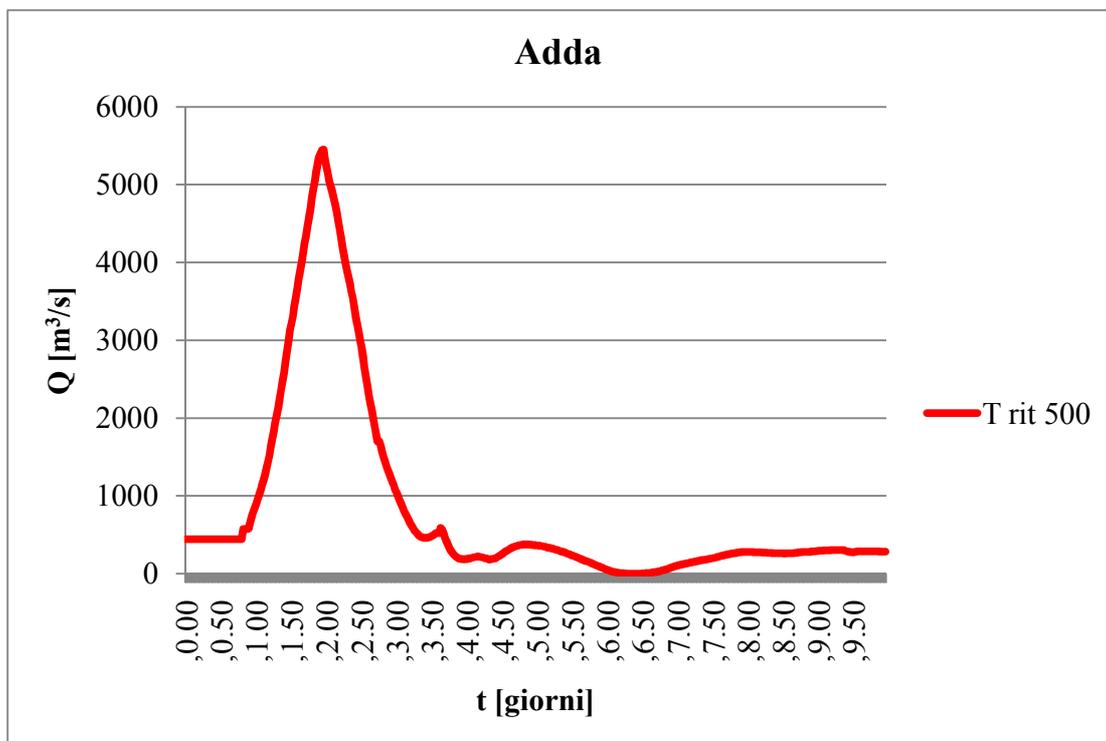
**Grafico 5 Idrogramma sintetico  $T_{rit500}$  dello Scrvia**



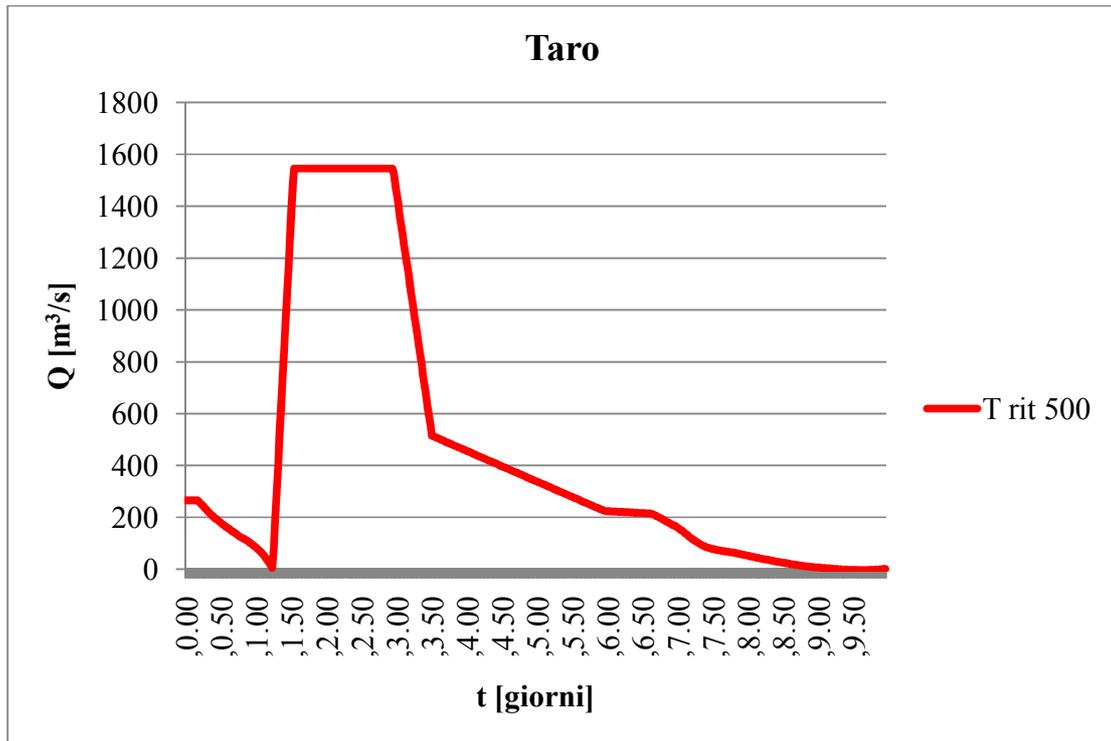
**Grafico 6 Idrogramma sintetico  $T_{rit500}$  del Ticino**



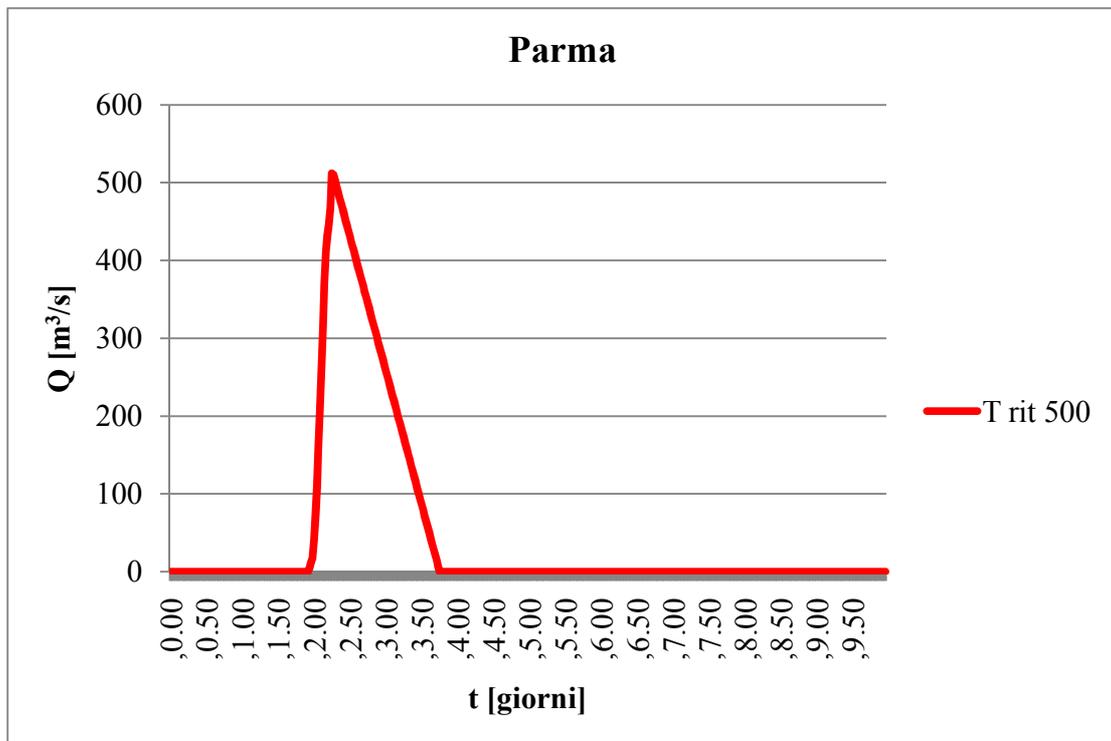
**Grafico 7 Idrogramma sintetico  $T_{rit500}$  del Trebbia**



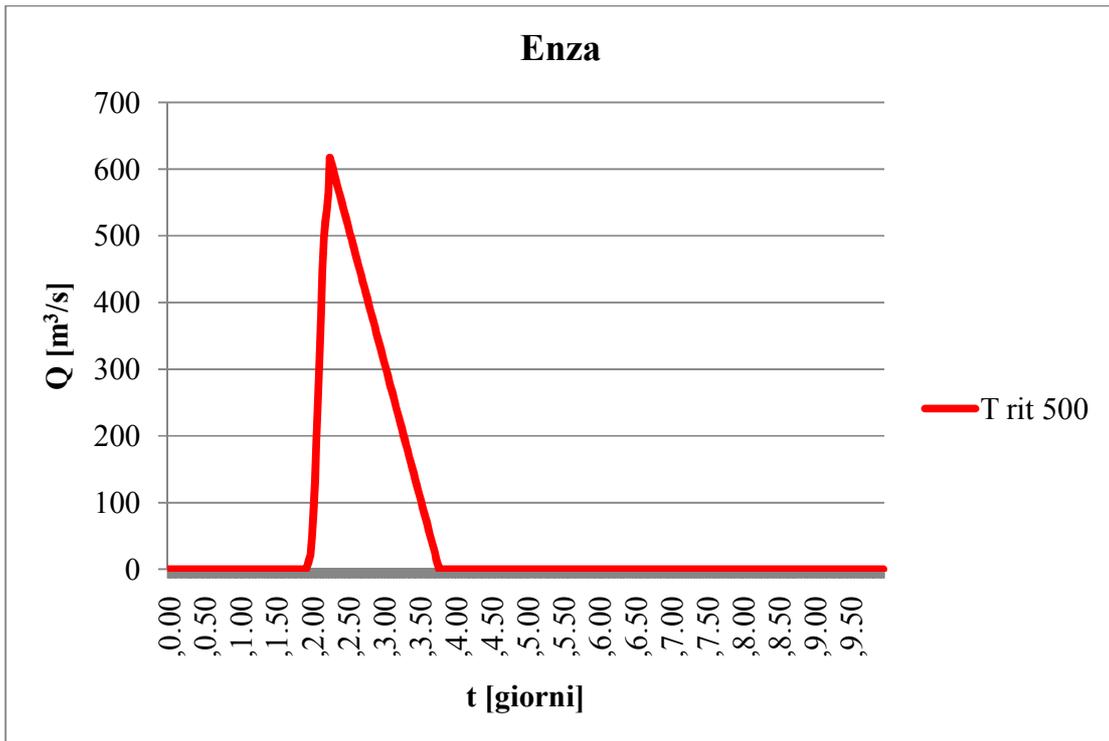
**Grafico 8 Idrogramma sintetico  $T_{rit500}$  dell'Adda**



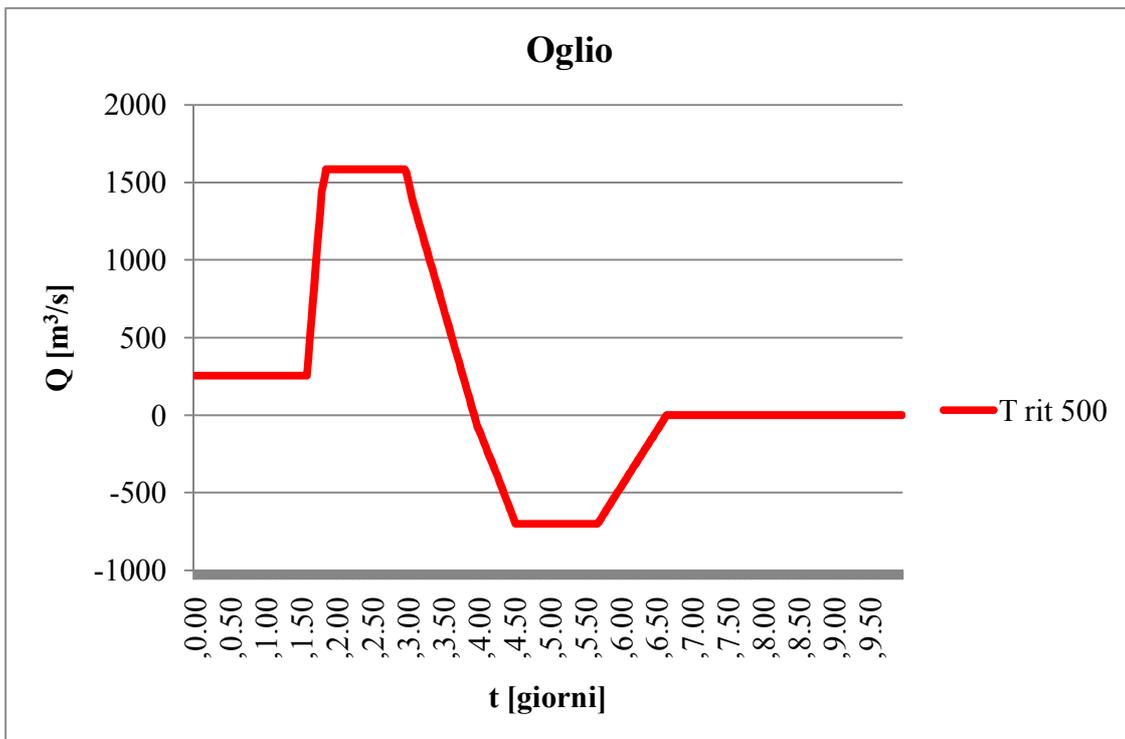
**Grafico 9 Idrogramma sintetico  $T_{rit500}$  del Taro**



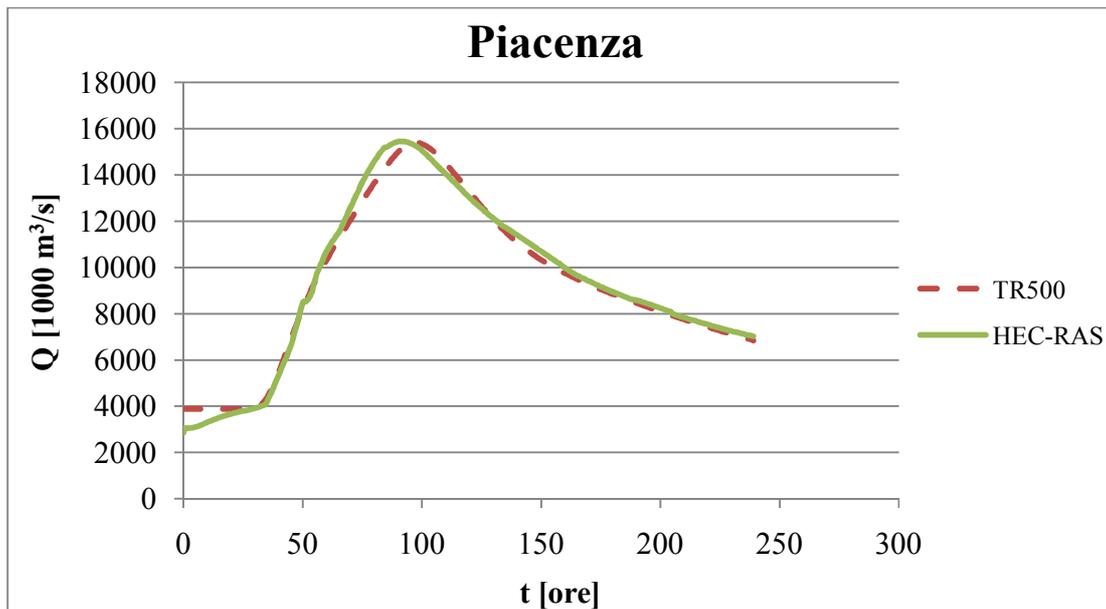
**Grafico 10 Idrogramma sintetico  $T_{rit500}$  del Parma**



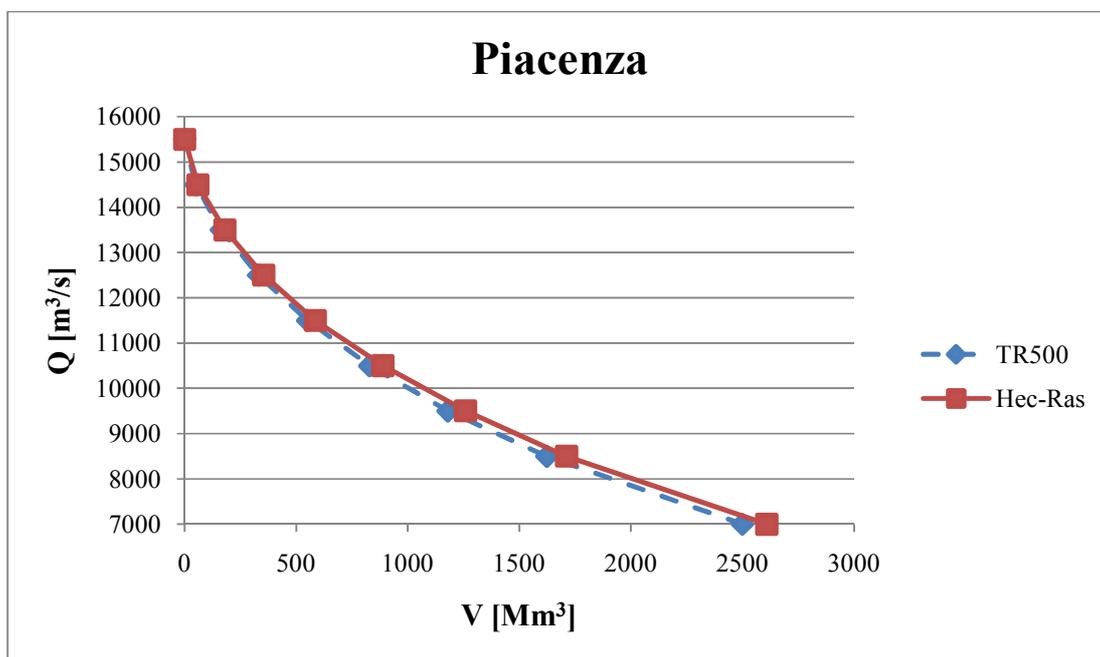
**Grafico 11 Idrogramma sintetico  $T_{rit500}$  dell'Enza**



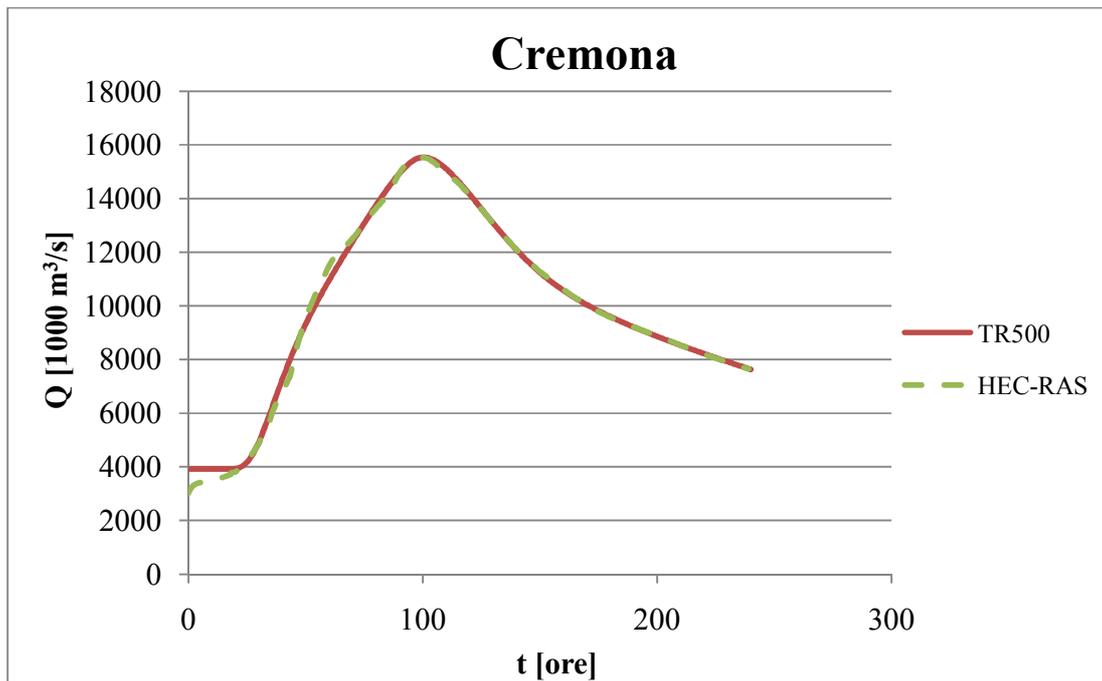
**Grafico 12 Idrogramma sintetico  $T_{rit500}$  dell'Oglio**



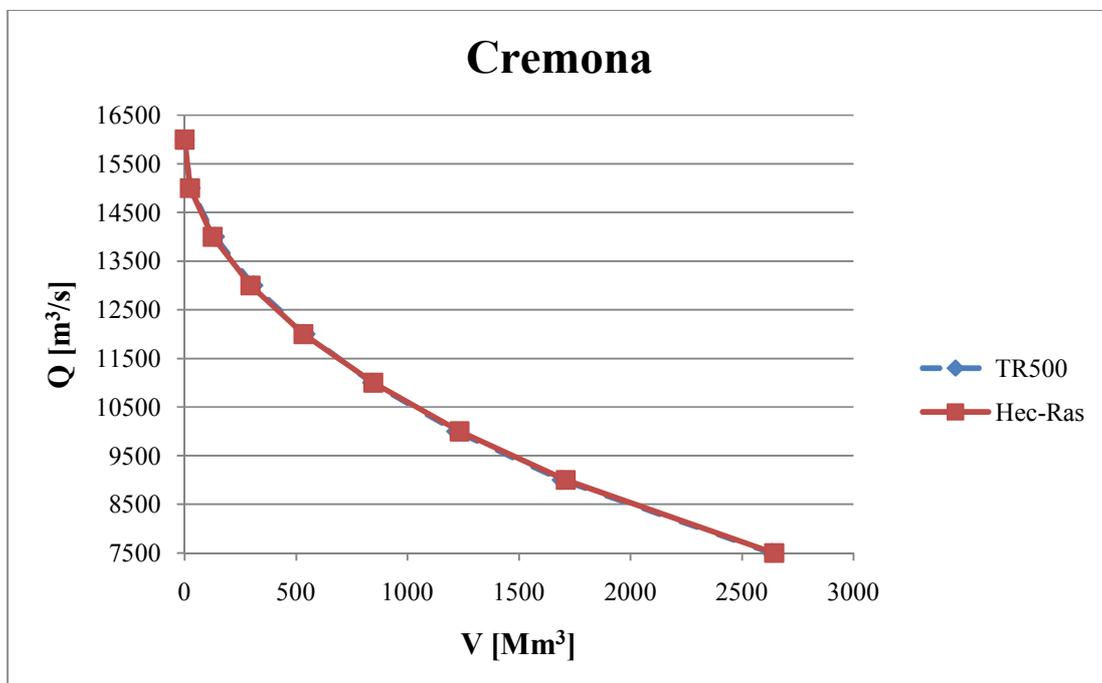
**Grafico 13** Idrogramma  $T_{rit500}$  e idrogramma simulato dal modello nel Po a Piacenza



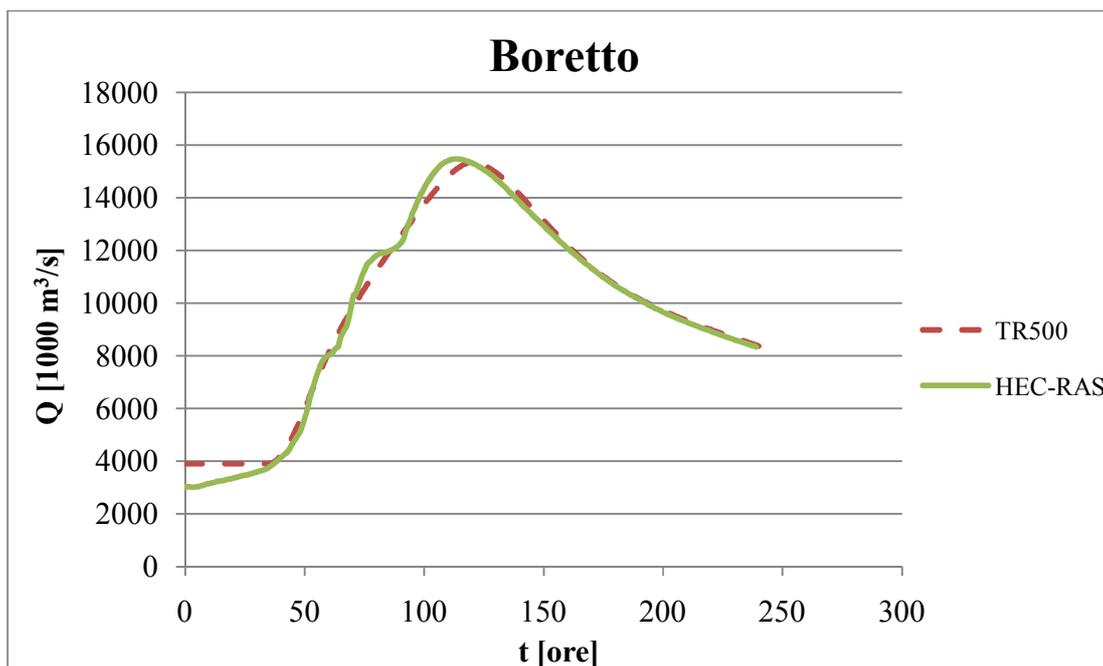
**Grafico 14** Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit500}$  e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Piacenza



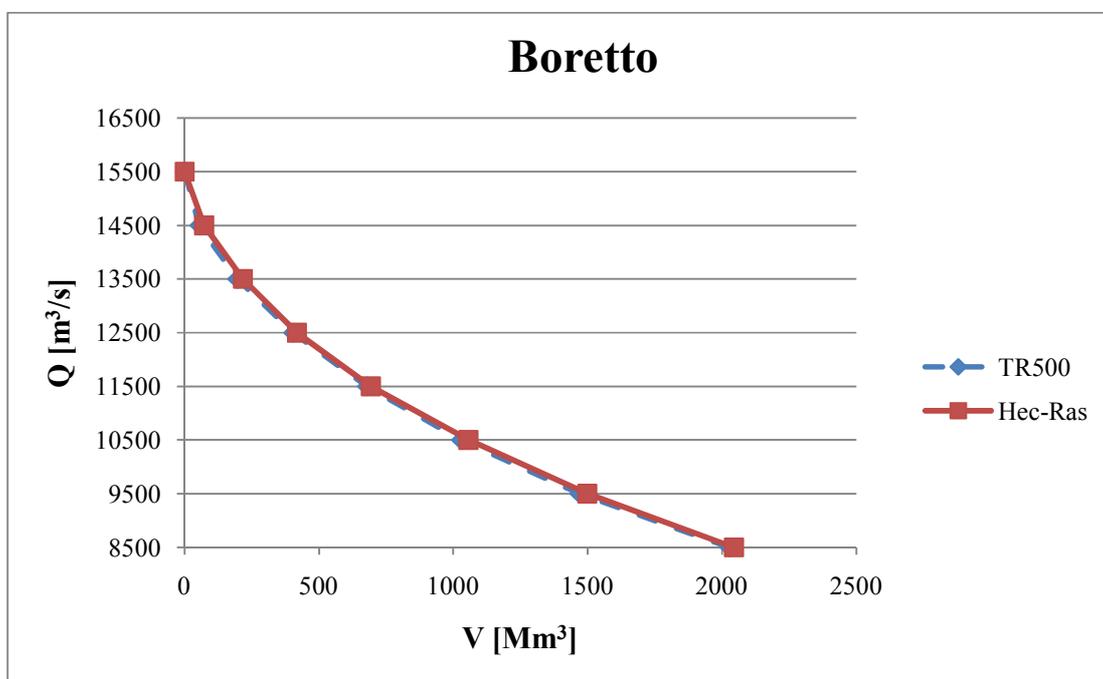
**Grafico 15** Idrogramma  $T_{rit500}$  e idrogramma simulato dal modello nel Po a Cremona



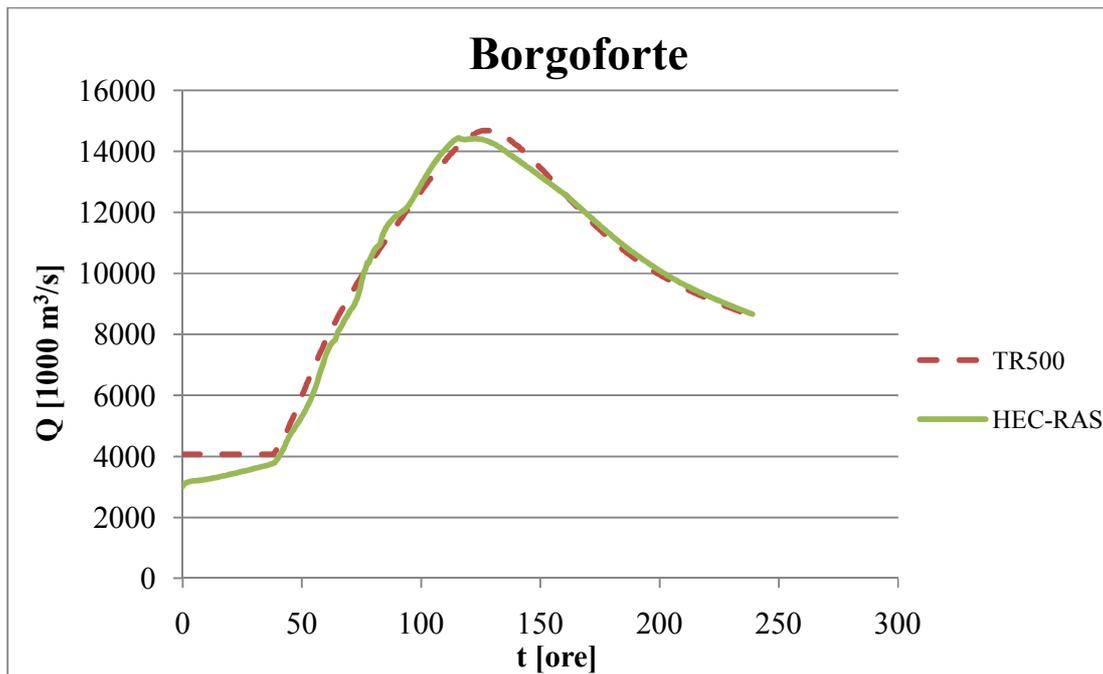
**Grafico 16** Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit500}$  e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Cremona



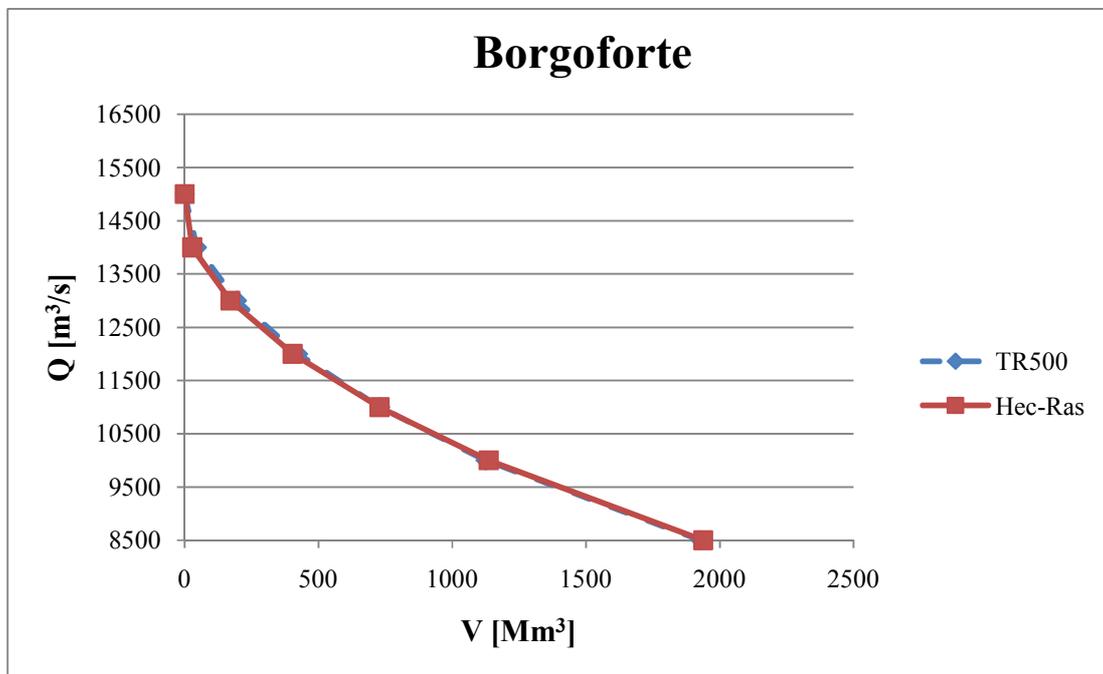
**Grafico 17** Idrogramma  $T_{rit500}$  e idrogramma simulato dal modello nel Po a Boretto



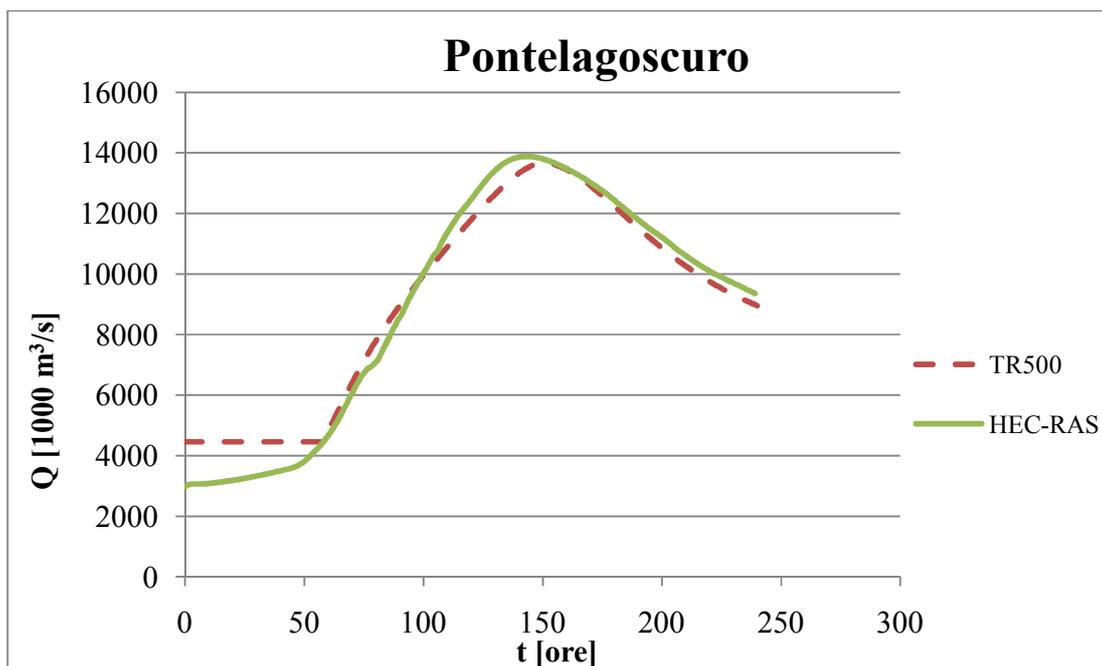
**Grafico 18** Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit500}$  e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Boretto



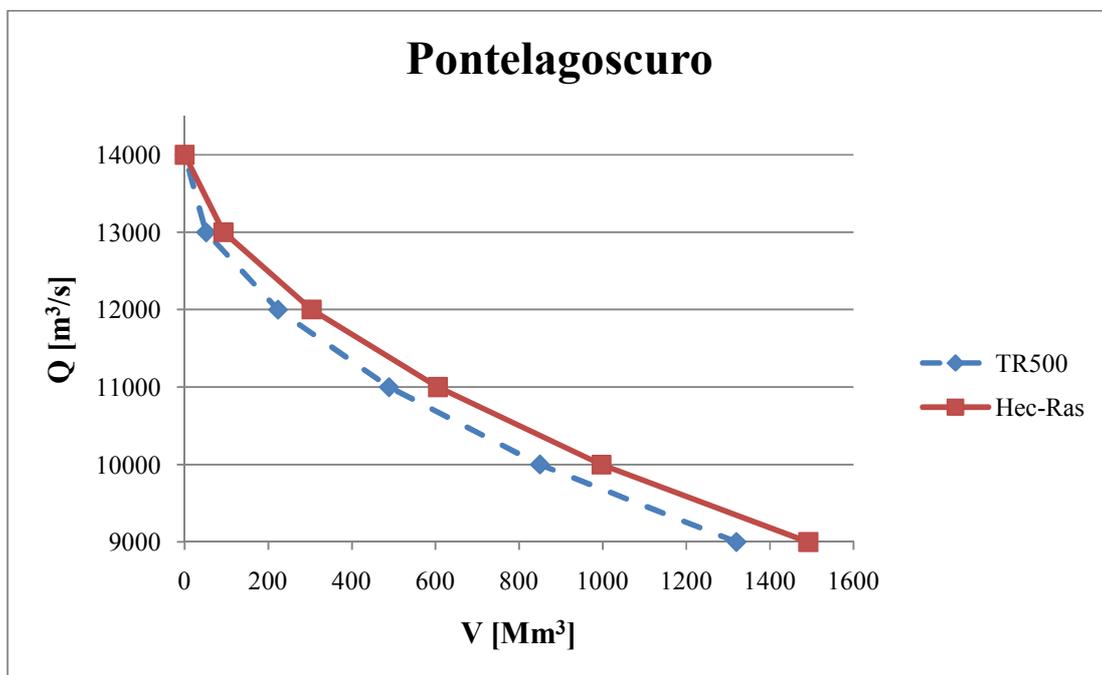
**Grafico 19** Idrogramma  $T_{rit500}$  e idrogramma simulato dal modello nel Po a Borgoforte



**Grafico 20** Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit500}$  e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Borgoforte



**Grafico 21** Idrogramma  $T_{rit500}$  e idrogramma simulato dal modello nel Po a Pontelagoscuro



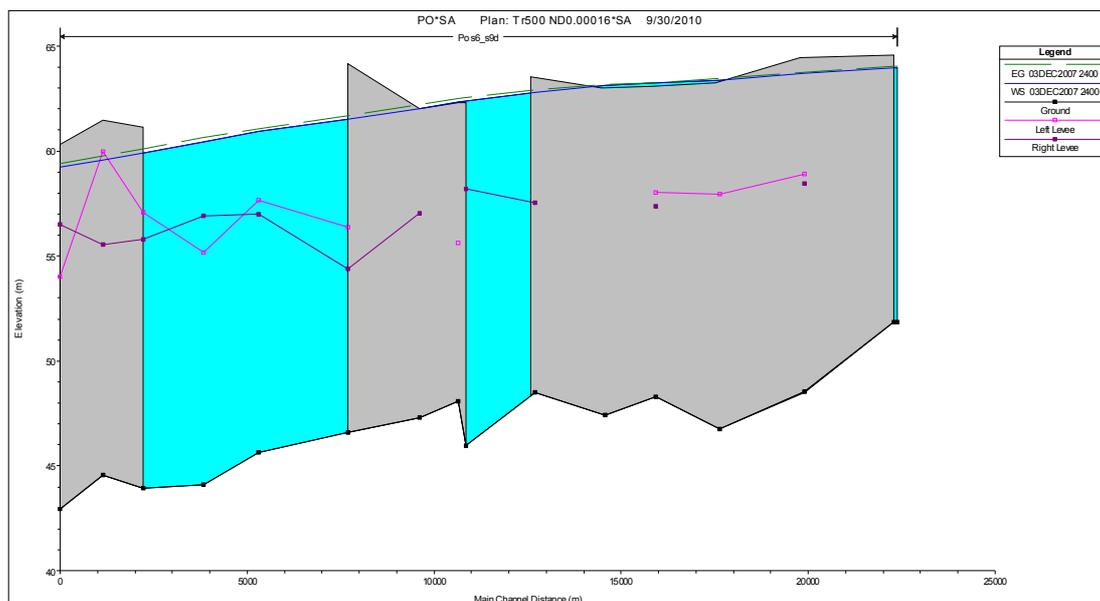
**Grafico 22** Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit500}$  e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Pontelagoscuro

## **6 MODELLAZIONE E SIMULAZIONE DEI FENOMENI DI ROTTA ARGINALE**

Una volta completato l'inserimento dei dati geometrici riguardanti i comparti idraulici situati in fascia C e caricato in HEC-RAS il file contenente le condizioni al contorno del moto associate all'evento di piena con tempo di ritorno cinquecentennale, si è proceduto alla simulazione di tale evento per poter localizzare preventivamente i punti in cui è più verosimile che l'evento di piena con  $T_{rit} = 500$  anni provochi le prime tracimazioni degli argini maestri (schematizzati come visto precedentemente attraverso *Lateral Structure* e *Storage Area Connection*) e che conseguentemente inneschi la formazione di rotte arginali.

Si è giunti all'individuazione e alla localizzazione delle rotte attese attraverso un processo di tipo iterativo; lanciando infatti la simulazione con HEC-RAS si sono andati ad esaminare i risultati della stessa, verificando a che dato momento, in quale ramo, in quale *lateral structure* o *storage area connection* e in corrispondenza di quale sezione del fiume venisse riportato il primo fenomeno di sormonto.

Per tale indagine si è rivelato estremamente utile lo strumento Profile Plot (v. Figura 21) che permette di osservare l'andamento nel tempo del profilo del pelo libero simulato lungo il corso d'acqua durante l'evento di piena, congiuntamente all'andamento altimetrico delle *lateral structure* e delle *storage area connection*. Tale confronto, unitamente all'animazione dell'evento di piena, ha reso possibile individuare visivamente il primo punto in cui si verifica il superamento dell'argine da parte del pelo libero.



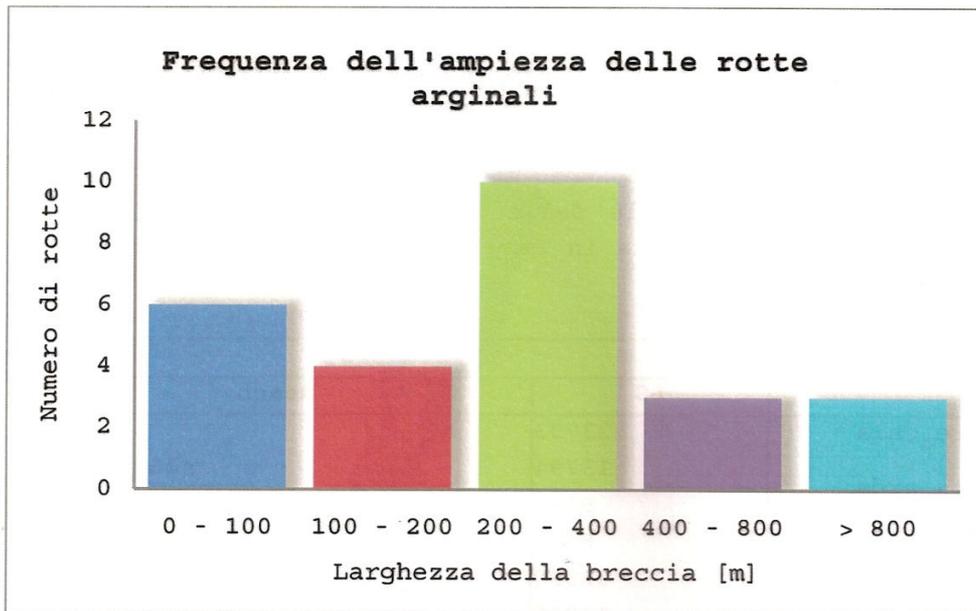
**Figura 21 Profilo longitudinale del ramo s6\_s9d durante la simulazione idraulica**

Dopo aver individuato tra le *Lateral Structure* e le *Storage Area Connection* la prima in ordine temporale coinvolta da tale fenomeno, è stata inserita, in corrispondenza della sezione (fra le tante comprese dall'estensione laterale dei suddetti elementi) in cui si è osservata la tracimazione, una breccia. Infatti è verosimile che si producano delle rotte, conseguentemente alla tracimazione degli argini maestri, poiché il manufatto arginale è generalmente progettato e realizzato per contenere le portate fluviali entro l'alveo, ma non per resistere a tracimazione. Questo è sicuramente il caso per gli argini maestri del fiume Po, i quali non presentano un rivestimento lato campagna. Una recente indagine storica (Govi e Turitto, 2000) ha evidenziato come ai fenomeni di tracimazione delle arginature maestre di Po sia generalmente seguita la formazione di brecce nel corpo del manufatto.

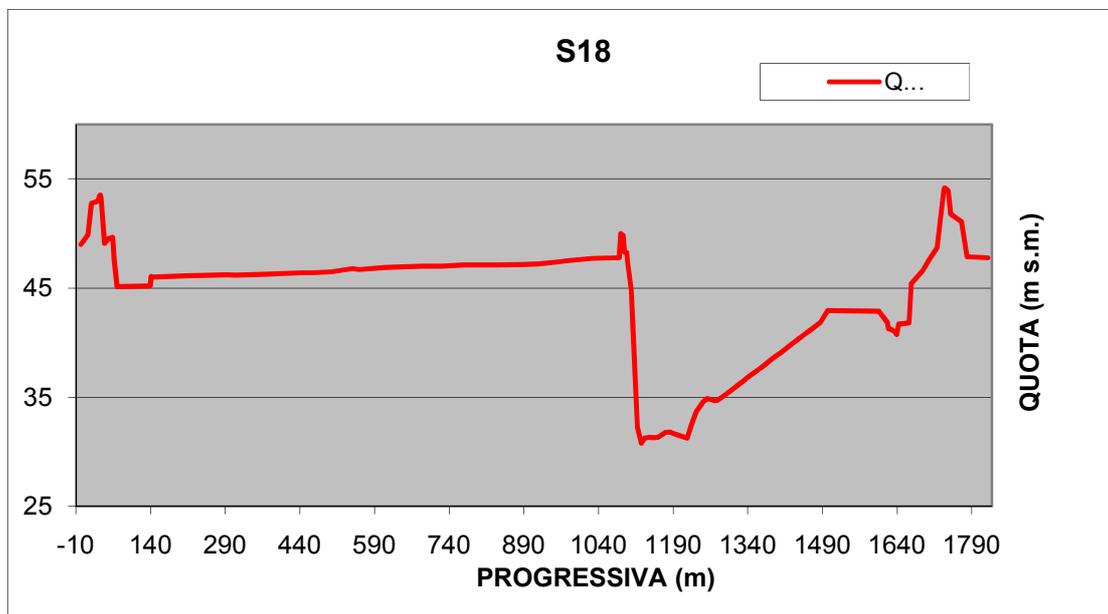
Descrivendo le caratteristiche geometriche della breccia arginale ipotizzata attraverso il Lateral Structure Editor (come si può osservare in Figura 23) è stata condotta una nuova simulazione. Riferendosi a questa nuova

simulazione e procedendo con lo stesso criterio si è individuata la successiva *Lateral Structure* in cui simulare una rotta arginale. Tale processo è stato ripetuto fino al raggiungimento di una condizione di deflusso della piena cinquecentennale per la quale, in nessun ulteriore segmento arginale, si possano riprodurre condizioni di sormonto della sommità arginale.

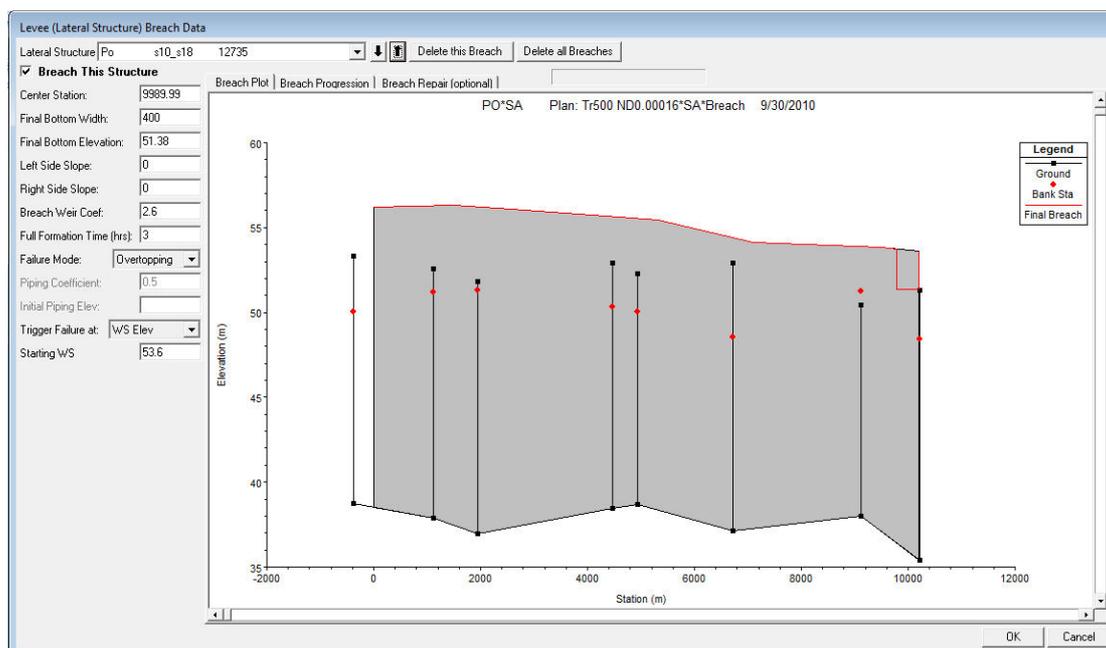
La generica breccia prevista nel rilevato arginale può essere definita sulla base di quattro parametri: l'ubicazione lungo l'asta fluviale, la larghezza complessiva, l'entità del suo approfondimento rispetto alla sommità arginale e il tempo di formazione a partire dall'istante di sormonto. A livello modellistico è stato imposto che la formazione della breccia avesse inizio al raggiungimento di un tirante idrico pari all'altezza del relativo argine (rotta per tracimazione) e avesse una durata pari a tre ore; tale scelta, supportata da studi che evidenziano la scarsa influenza sui risultati della simulazione della variazione del tempo di formazione della breccia tra zero e sei ore (Brath e Di Baldassarre, 2006), è finalizzata all'incremento della stabilità del modello. Come larghezza finale della breccia si è optato per un valore di 400 m in seguito all'analisi della casistica storica delle rotte verificatesi nel Po (come si vede nel Grafico 23) effettuata dall'AdB-Po sulla base dei dati riportati dallo studio di Govi e Turitto del 2000, mentre per la quota di fondo si è assunta la maggiore tra quella del piano golenale e del piano campagna prospicienti l'argine maestro. Per operare tale scelta è stato necessario andare a consultare i rilievi topografici del 2005 delle sezioni all'altezza delle quali il modello aveva individuato l'inizio della tracimazione; tali rilievi sono stati messi a disposizione dal DISTART (v. Figura 22).



**Grafico 23** Frequenza dell'ampiezza delle rotte arginali nel Po (Fonte: AdB-Po - DISTART, 2008)



**Figura 22** Profilo della sezione s18

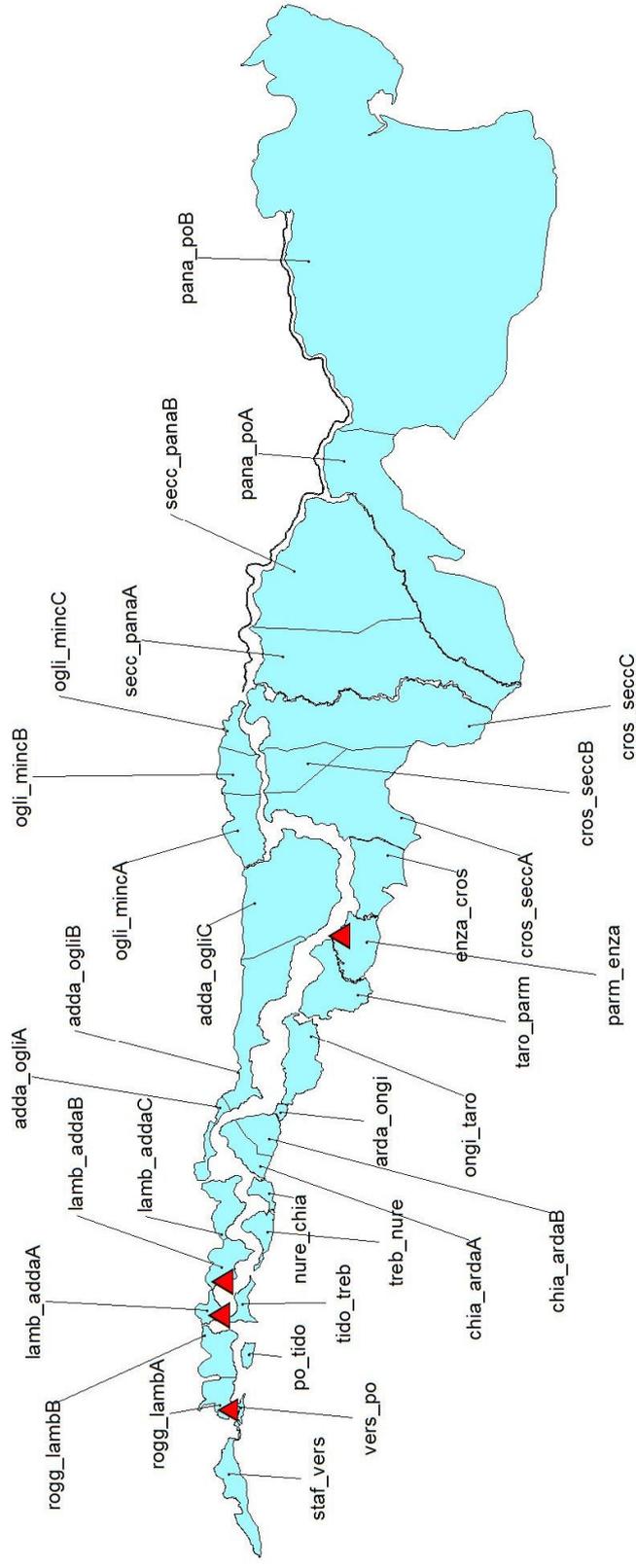


**Figura 23 Inserimento dei dati relativi ad una breccia**

La configurazione finale delle breccie inserite è illustrata in figura 24 e riassunta in tabella 6.

<b>Breccia</b>		<b>Comparto</b>	<b>Collocazione</b>
<b>Reach</b>	<b>Lateral Structure</b>		
s6_s9d	13235	rogg_lambA	Sn. Idraulica
s10_s18	22212	lamb_addaA	Sn. Idraulica
s10_s18	12735	lamb_addaB	Sn. Idraulica
s33c_s36a	8000	parm_enza	Dx. Idraulica

**Tabella 6 Configurazione finale delle breccie**



**Figura 24 Collocazione delle breccie**

## 6.1 Risultati

La simulazione condotta con la configurazione arginale attuale ha evidenziato che, in caso di evento di piena con tempo di ritorno cinquecentennale, 6 dei 31 comparti di Fascia C verrebbero interessati da esondazioni (Tabella 7, Figure 25, 26, 27 e grafici 24, 25, 26, 27, 28, 29), con tiranti massimi anche dell'ordine di diversi metri e con ingenti volumi d'acqua coinvolti. I risultati riportati in tabella 7 risentono ovviamente della schematizzazione concettuale adottata per il comportamento idraulico dei comparti, poiché essa concentra immediatamente nelle zone più depresse i volumi esondati che in realtà occupano inizialmente avvallamenti locali, impiegando un tempo finito per il trasferimento dal punto di tracimazione a quello di accumulo finale.

ID Comparto	Comparto	Collocazione	Volume [Mm <sup>3</sup> ]	Tirante [m]
1	staf_vers	Dx. Idraulica	5.24262	2.19
2	vers_po	Dx. Idraulica	0.85943	3.31
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	111.7934	7.4
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	66.40359	7.79
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	143.0353	6.77
20	parm_enza	Dx. Idraulica	245.2778	7.06

**Tabella 7 Volumi e tiranti massimi nei comparti interessati da esondazione nell'attuale configurazione arginale**

ID Comparto	Comparto	Collocazione
1	staf_vers	Dx. Idraulica
2	vers_po	Dx. Idraulica
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica
5	po_tido	Dx. Idraulica
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica
7	tido_treb	Dx. Idraulica
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica
9	treb_nure	Dx. Idraulica
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica
11	nure_chia	Dx. Idraulica
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica
15	arda_ongi	Dx. Idraulica
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica
17	ongi_taro	Dx. Idraulica
18	taro_parm	Dx. Idraulica
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica
20	parm_enza	Dx. Idraulica
21	enza_cros	Dx. Idraulica
22	cros_seccA	Dx. Idraulica
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica
25	cros_seccB	Dx. Idraulica
26	cros_seccC	Dx. Idraulica
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica
28	secc_panaA	Dx. Idraulica
29	secc_panaB	Dx. Idraulica
30	pana_poA	Dx. Idraulica
31	pana_poB	Dx. Idraulica

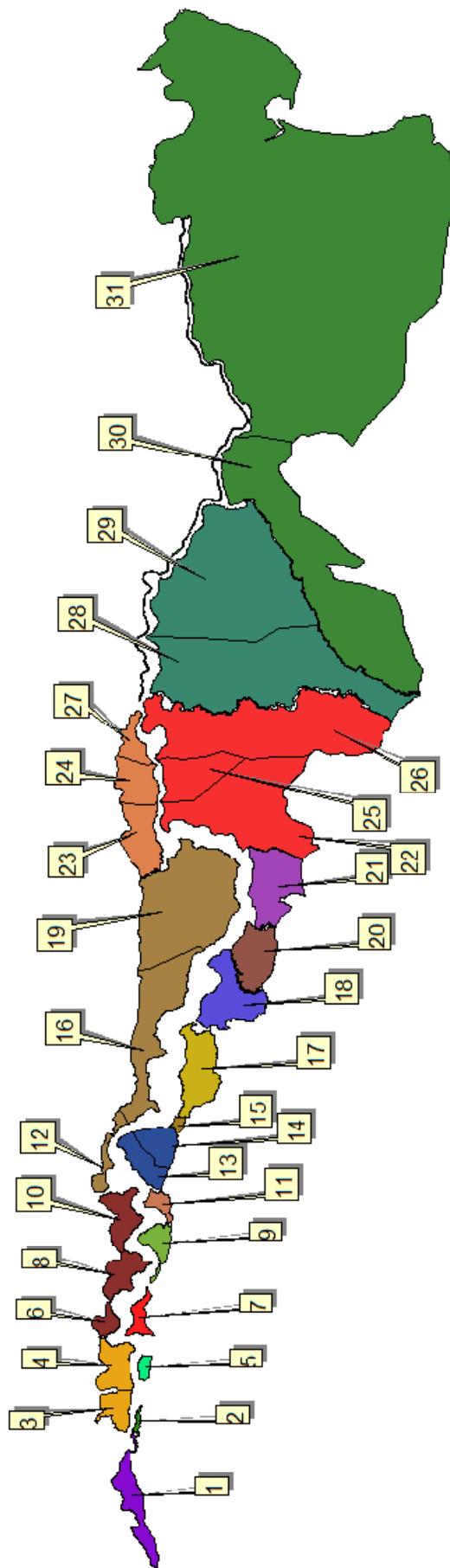
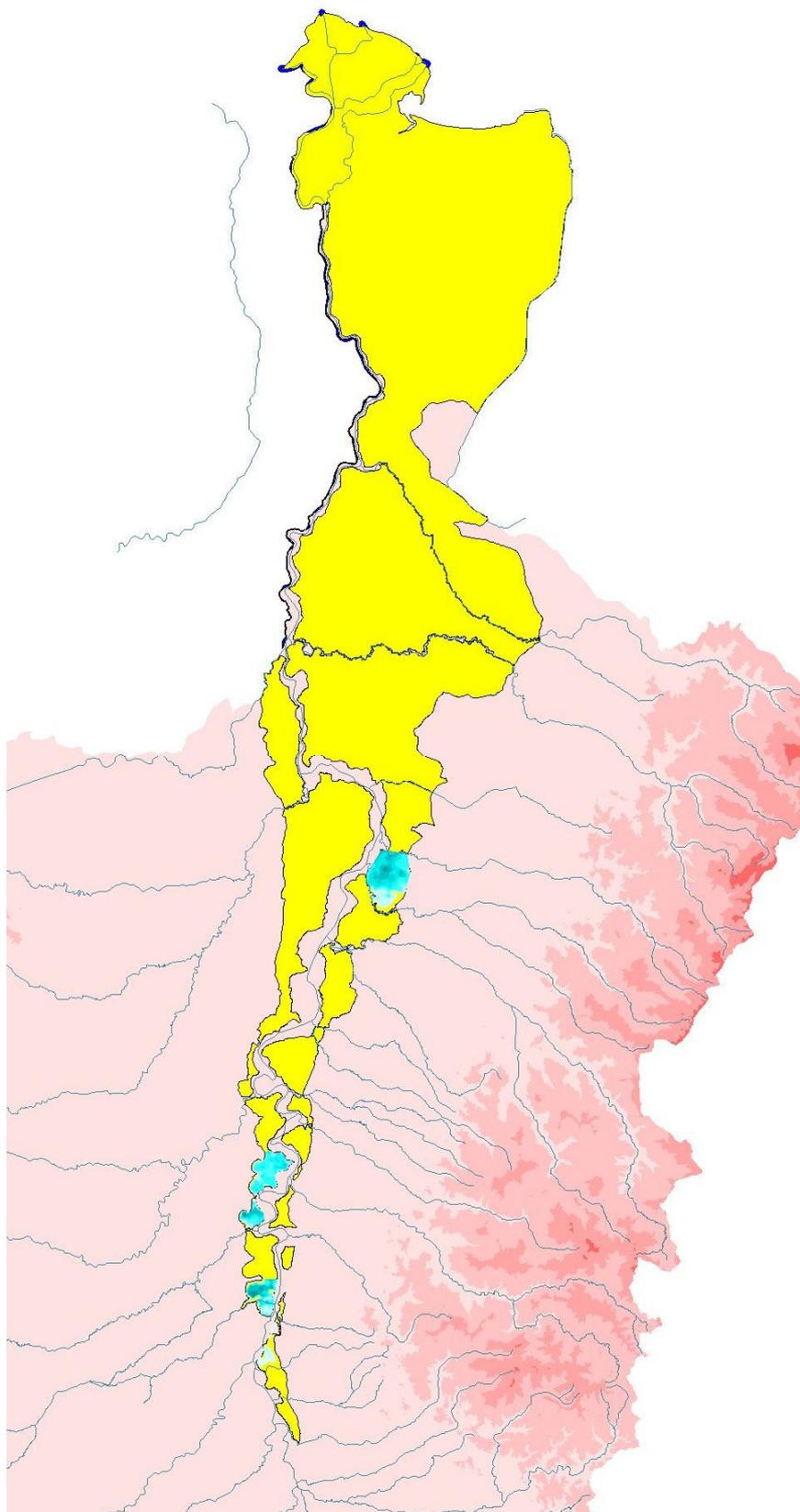
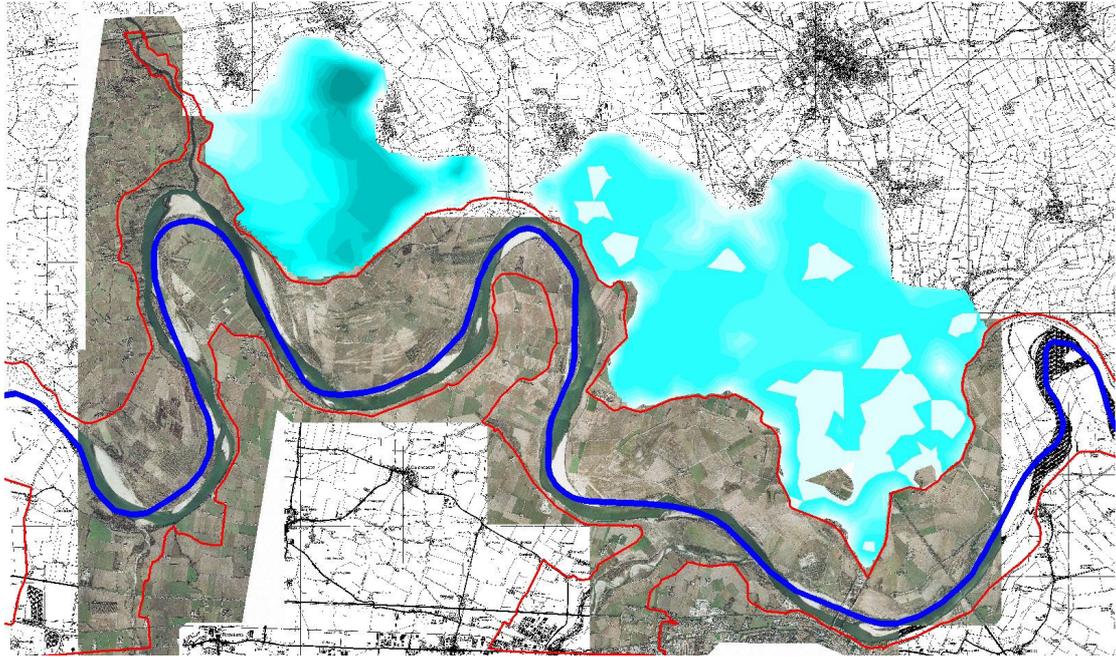


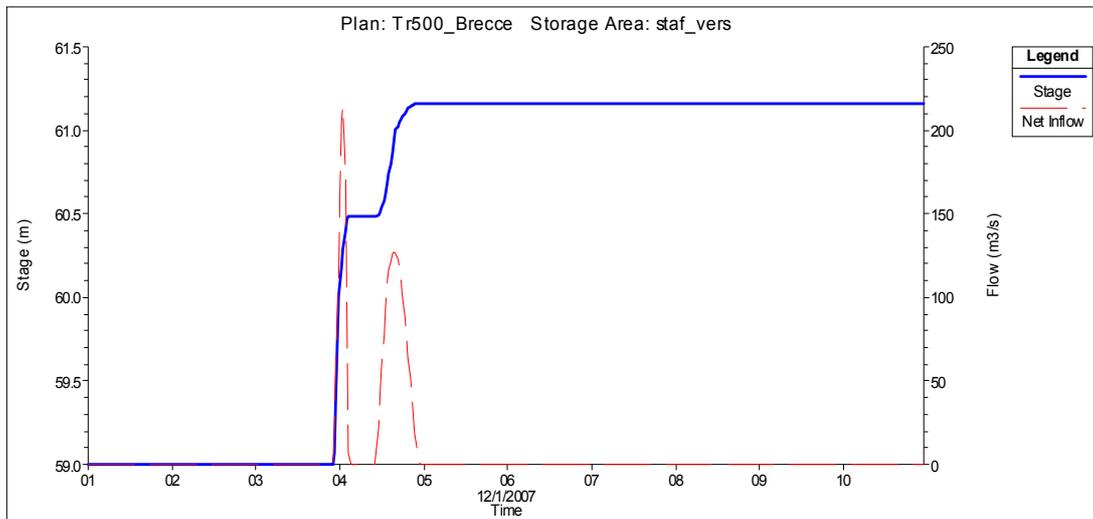
Figura 25 Assegnazione codice numerico per l'identificazione dei compartimenti



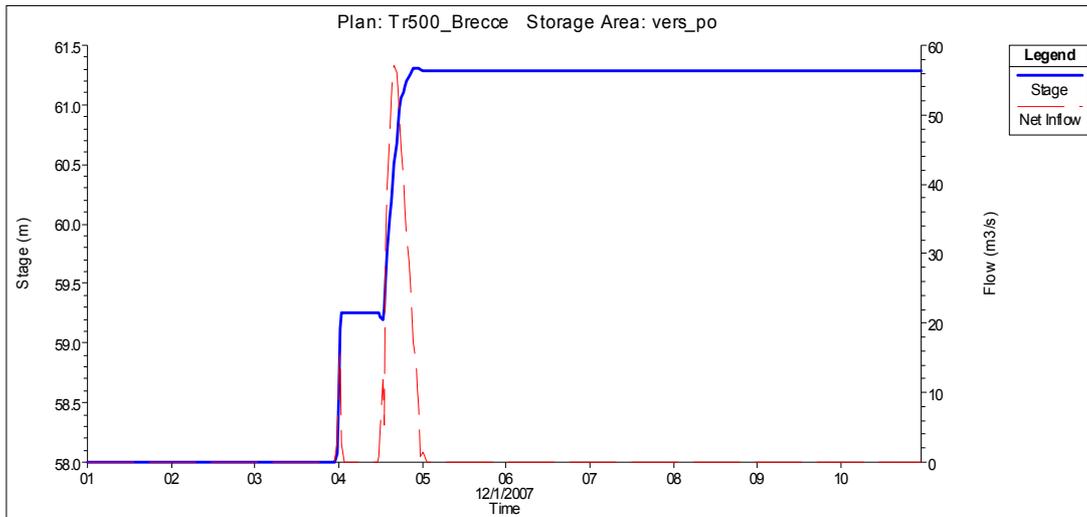
**Figura 26 Allagamento dei comparti nella configurazione con formazione di breccie**



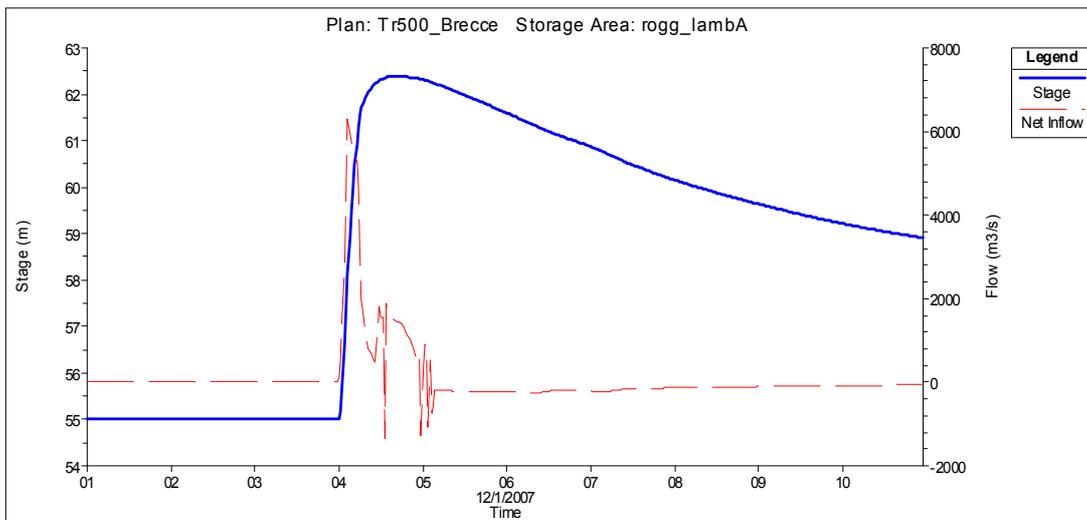
**Figura 27** Dettaglio dell'allagamento del comparto lamb\_adda nell'attuale configurazione arginale



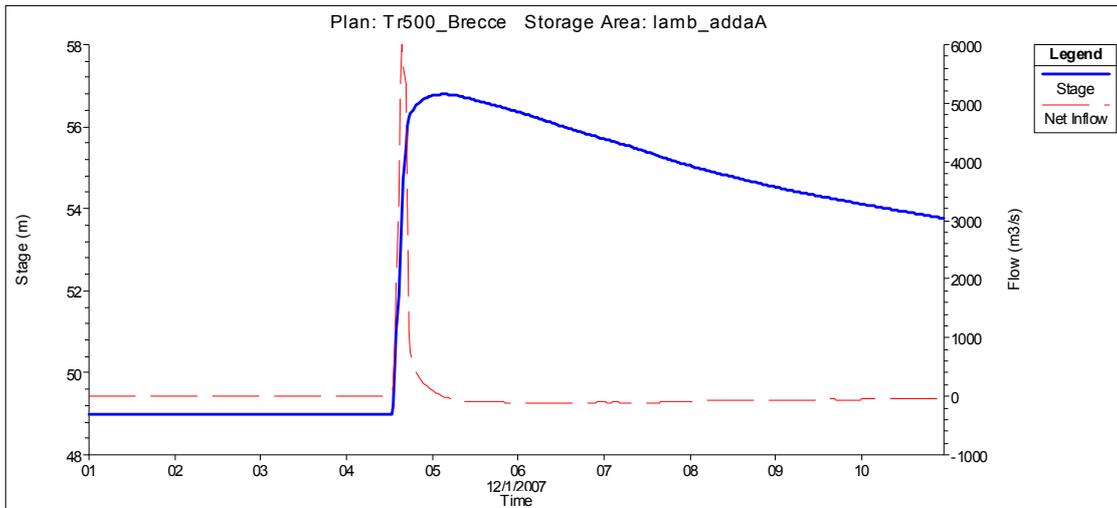
**Grafico 24** Andamento nel tempo di tirante e portata nell'attuale configurazione arginale nel comparto staf\_vers



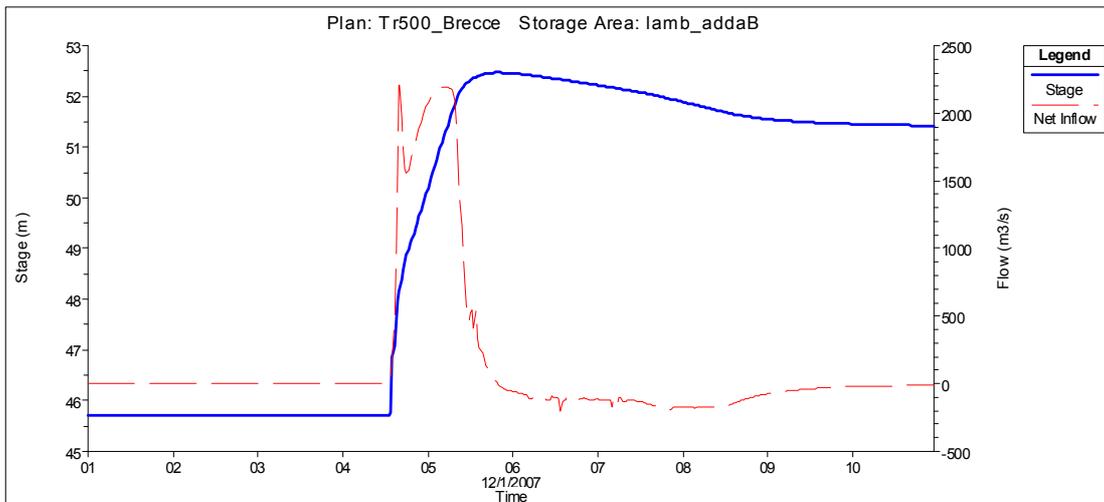
**Grafico 25 Andamento nel tempo di tirante e portata nell'attuale configurazione arginale nel comparto vers\_po**



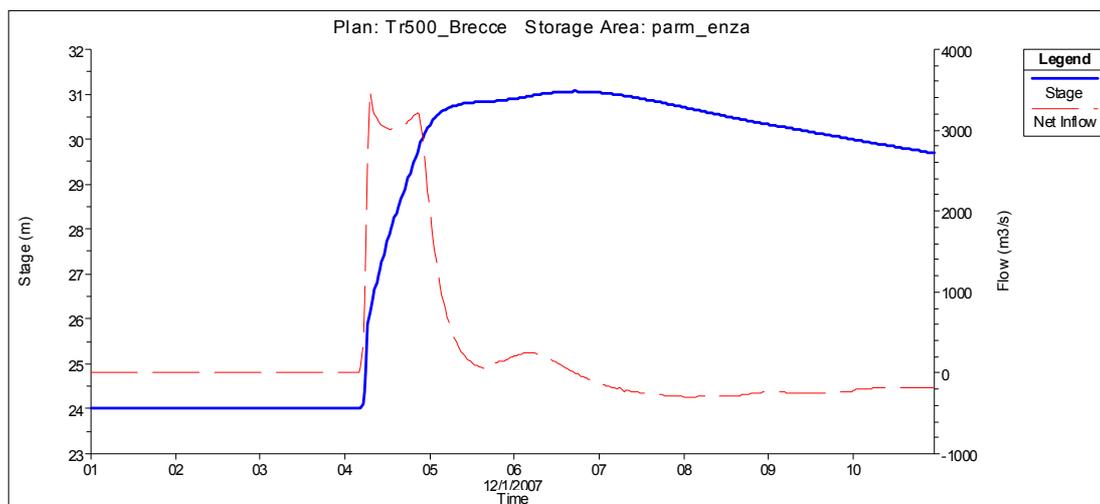
**Grafico 26 Andamento nel tempo di tirante e portata nell'attuale configurazione arginale nel comparto rogg\_lambA**



**Grafico 27** Andamento nel tempo di tirante e portata nell'attuale configurazione arginale nel comparto lamb\_addaA



**Grafico 28** Andamento nel tempo di tirante e portata nell'attuale configurazione arginale nel comparto lamb\_addaB



**Grafico 29** Andamento nel tempo di tirante e portata nell'attuale configurazione arginale nel comparto parm\_enza

I risultati in termini di portate (tabella 8) evidenziano nel campo denominato *outflow* la presenza di flussi provenienti dai comparti in direzione del corso d'acqua; tali flussi sono localizzati in corrispondenza dei comparti nei quali è stata inserita una breccia e vengono giustificati dal fatto che tale elemento non permette alcun tipo di controllo della direzione del flusso.

ID Comparto	Comparto	Collocazione	Inflow [m <sup>3</sup> /s]	Outflow [m <sup>3</sup> /s]
1	staf_ vers	Dx. Idraulica	217.46	0
2	vers_po	Dx. Idraulica	57.45	0
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	6285.16	1441.53
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	5990.47	963.86
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	2263.5	2172.94
20	parm_enza	Dx. Idraulica	3494.18	388.53

**Tabella 8** Portate massime in ingresso e in uscita dai comparti nell'attuale configurazione arginale



## **7 EVENTO DI PIENA AL LIMITE DELLA PREVEDIBILITÀ: SIMULAZIONE IDRAULICA CON ARGINI INERODIBILI**

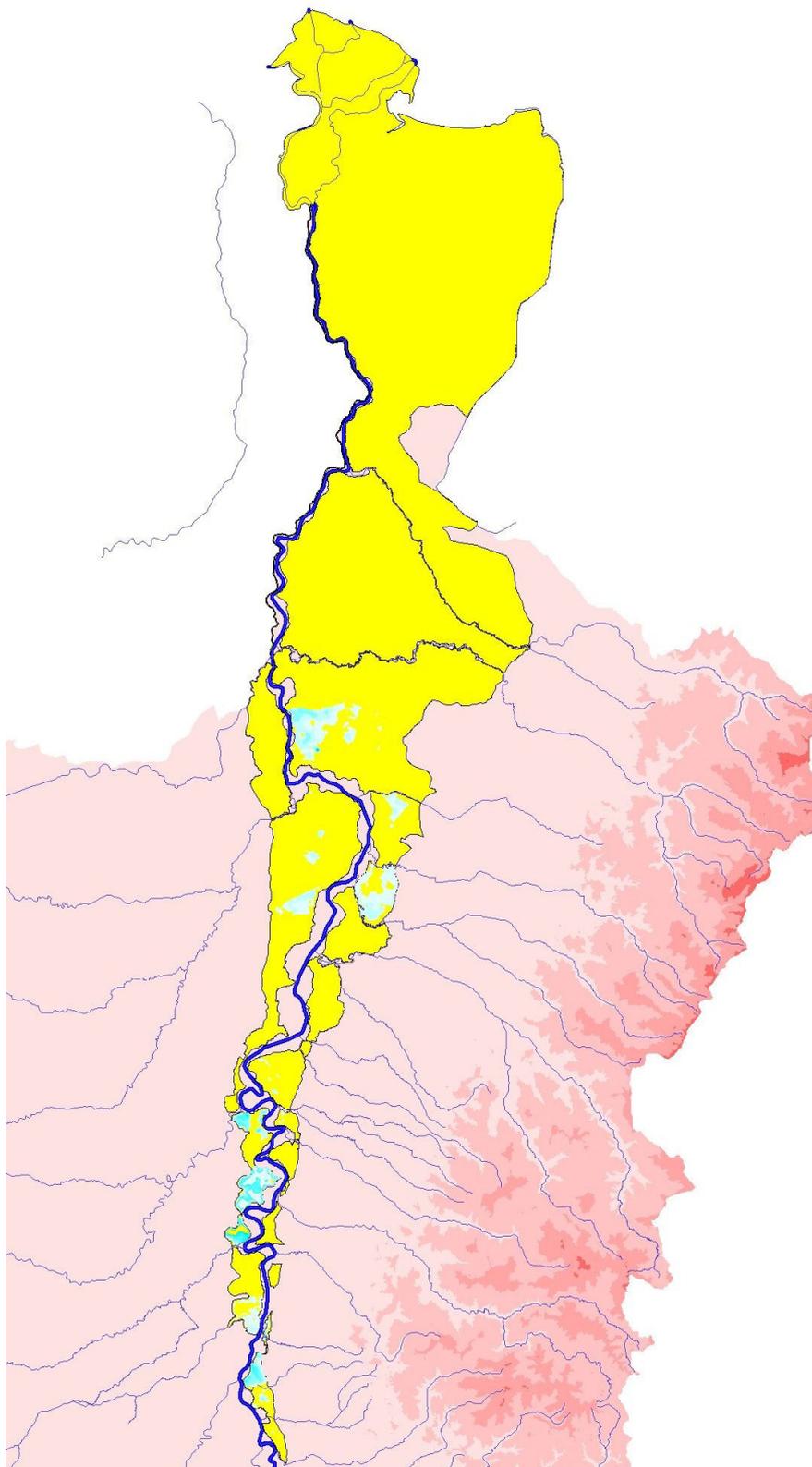
Nell'ultima parte del lavoro è stato preso a riferimento uno scenario ipotetico di argini maestri inerodibili, il che corrisponderebbe operativamente ad un intervento di rivestimento e consolidamento del lato campagna di tutte le arginature maestre attualmente interessate dal fenomeno di sormonto in occasione dell'evento di piena cinquecentennale. La simulazione con tale scenario fornisce indicazioni precise relativamente ai volumi di piena da gestire esternamente alle arginature maestre, ipotizzando che non avvengano fenomeni di rotta arginale. L'identificazione di detti volumi costituisce un primo passo nella direzione del controllo e della gestione degli eventi di piena al limite della prevedibilità, essendo infatti lo scenario di riferimento, come già detto, del tutto ipotetico, e non essendo possibile neppure realizzare una configurazione arginale tale da evitare la tracimazione di fronte a qualsiasi evento di piena, per via del raggiungimento su gran parte dell'asta inferiore del fiume di condizioni limite strutturali. I suddetti eventi al limite della prevedibilità devono necessariamente essere quindi gestiti anche attraverso una laminazione controllata al di fuori delle arginature maestre (v. ad es. DISTART - AdB-Po, 2008). A tal fine è necessario quantificare i volumi da scolmare (primo passo compiuto nel presente lavoro di Tesi), identificare le zone esterne alle arginature maestre più adatte ad accogliere i volumi di laminazione, nell'ottica di minimizzare le condizioni di rischio idraulico e, infine, proteggere i tratti arginali soggetti a tracimazione dai fenomeni erosivi, con l'auspicio di scongiurare rotte catastrofiche come quella di Occhiobello (FE) del novembre del 1951. Esse infatti provocano pericolose esondazioni incontrollate e ingenti danni al patrimonio socio-economico in un territorio che, come precedentemente illustrato, risulta

densamente popolato e intensamente sfruttato sia da un punto di vista agricolo che industriale.

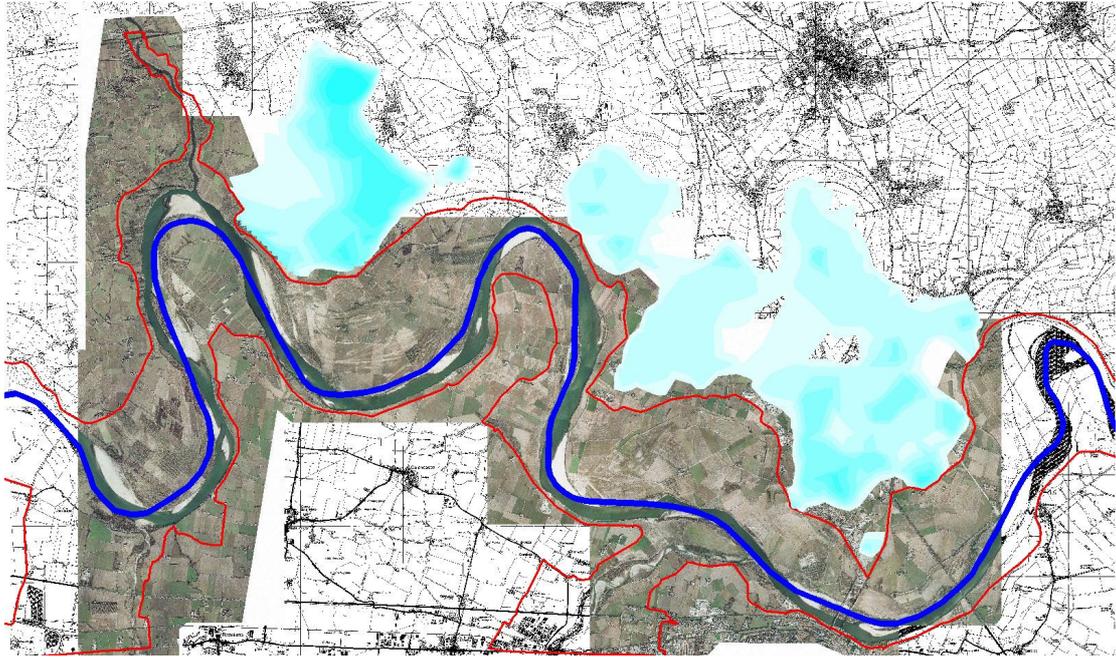
Per poter valutare i volumi di piena da laminare in maniera controllata, nel modello è stata caricata una geometria schematizzante l'attuale configurazione arginale nella quale è stata impedita la formazione delle brecce, ed è stata quindi condotta una nuova simulazione, i cui esiti sono stati studiati e poi successivamente confrontati con quelli precedentemente ottenuti e illustrati nel capitolo 6. Tale scenario geometrico, chiaramente del tutto ipotetico, si basa sull'ipotesi di un rivestimento della struttura arginale. Tale rinforzo superficiale, impedendo i fenomeni erosivi tipicamente connessi ai fenomeni di sormonto, evita il cedimento strutturale del rilevato e riproduce una condizione di laminazione controllata di volumi di piena per eventi particolarmente intensi.

## **7.1 Risultati**

La simulazione condotta sotto l'ipotesi di argini inerosibili ha evidenziato una differente dinamica della propagazione della piena e delle esondazioni all'esterno delle arginature maestre, con 21 comparti su 31 interessati da esondazione (Tabelle 9 e 10, Figure 28 e 29, Grafici 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50). Per i comparti n° 23, 24 e 27 (ogli\_mincA, ogli\_mincB e ogli\_mincC), i volumi tracimati vengono considerati trascurabili per via della loro modesta entità, ma vengono tuttavia riportati per completezza nella tabella riassuntiva dei risultati osservati.



**Figura 28**Allagamento dei comparti nella configurazione con argini inerodibili



**Figura 29 Dettaglio dell'allagamento del comparto lamb\_adda nella configurazione con argini inerodibili**

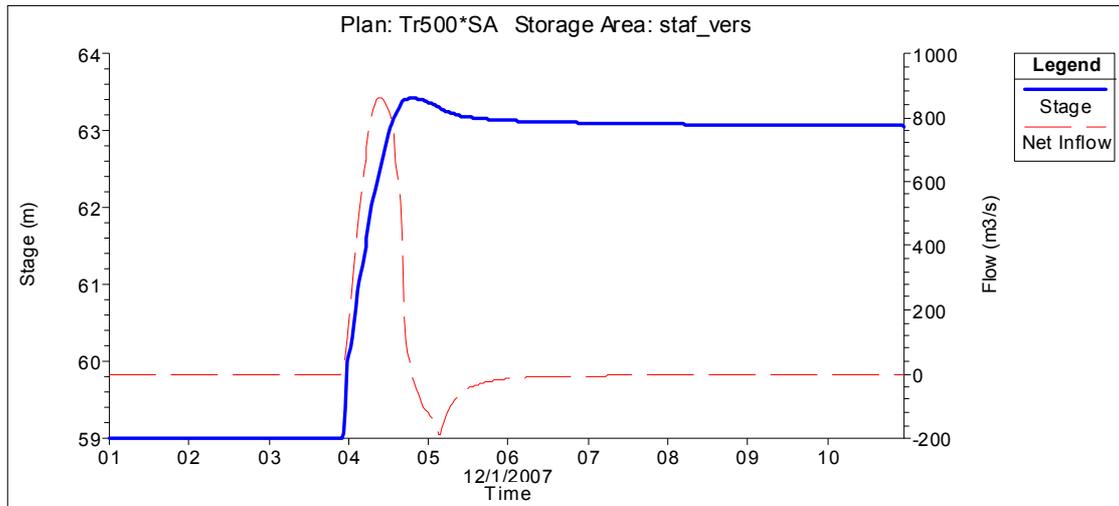
<b>ID Comparto</b>	<b>Comparto</b>	<b>Collocazione</b>	<b>Volume [Mm<sup>3</sup>]</b>	<b>Tirante [m]</b>
1	staf_vers	Dx. Idraulica	39.91052	4.42
2	vers_po	Dx. Idraulica	2.15492	4.46
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	4.03469	1.08
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	0.8463	0.6
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	26.23406	4.86
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0.00504	0.03
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	34.04523	3.65
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	27.31637	4.88
11	nure_chia	Dx. Idraulica	0.41163	2.04
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	0.06613	0.14
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0.00054	0
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	0.35962	1.15
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	4.37699	1.52
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	3.33749	1.75
20	parm_enza	Dx. Idraulica	4.40434	1.11
21	enza_cros	Dx. Idraulica	4.63348	1.03
22	cros_seccA	Dx. Idraulica	4.53645	6.37
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica	0.00005	0
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica	0.00004	0
25	cros_seccB	Dx. Idraulica	6.10238	2.18
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica	0.00008	0

**Tabella 9 Volumi e tiranti massimi nei compartimenti interessati da esondazione nella configurazione con argini inerodibili**

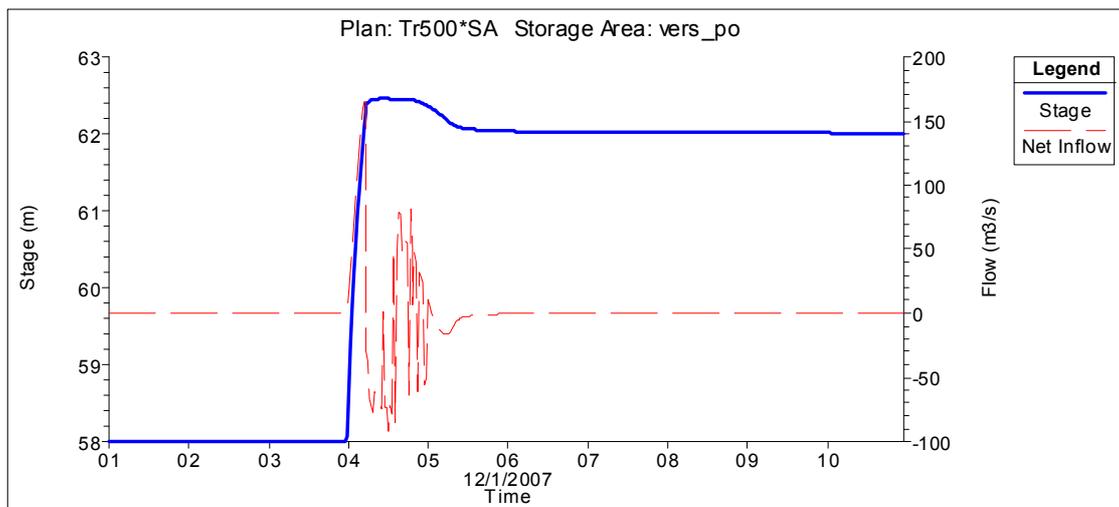
<b>ID Comparto</b>	<b>Comparto</b>	<b>Collocazione</b>	<b>Inflow [m<sup>3</sup>/s]</b>
1	staf_vers	Dx. Idraulica	862.74
2	vers_po	Dx. Idraulica	165.86
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	64.79
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	22.22
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	347.14
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0.16
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	441.33
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	323.37
11	nure_chia	Dx. Idraulica	7.81
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	4.19
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0.03
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	5.17
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	59.74
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	42.34
20	parm_enza	Dx. Idraulica	55.62
21	enza_cros	Dx. Idraulica	60.24
22	cros_seccA	Dx. Idraulica	76.21
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica	0
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica	0
25	cros_seccB	Dx. Idraulica	94.41
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica	0

**Tabella 10 Portate massime in ingresso nei comparti nella configurazione con argini inerodibili**

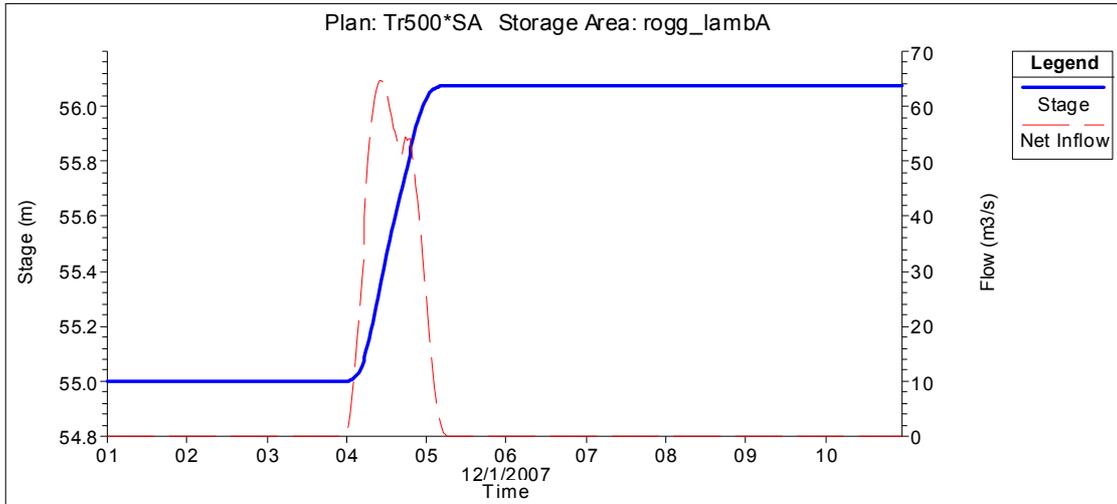
Con questa configurazione non si presentano portate che dai comparti si reimmettono nel corso fluviale; questo perché l'assetto degli argini ed i valori assunti dai tiranti non sono sufficientemente elevati per permettere ai volumi invasati di dare origine a portate negative.



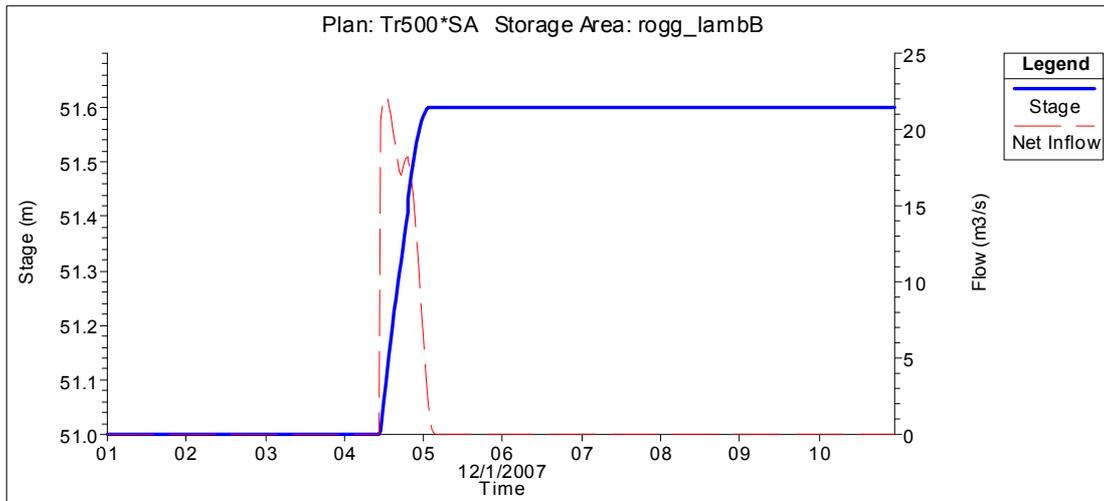
**Grafico 30** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto staf\_vers



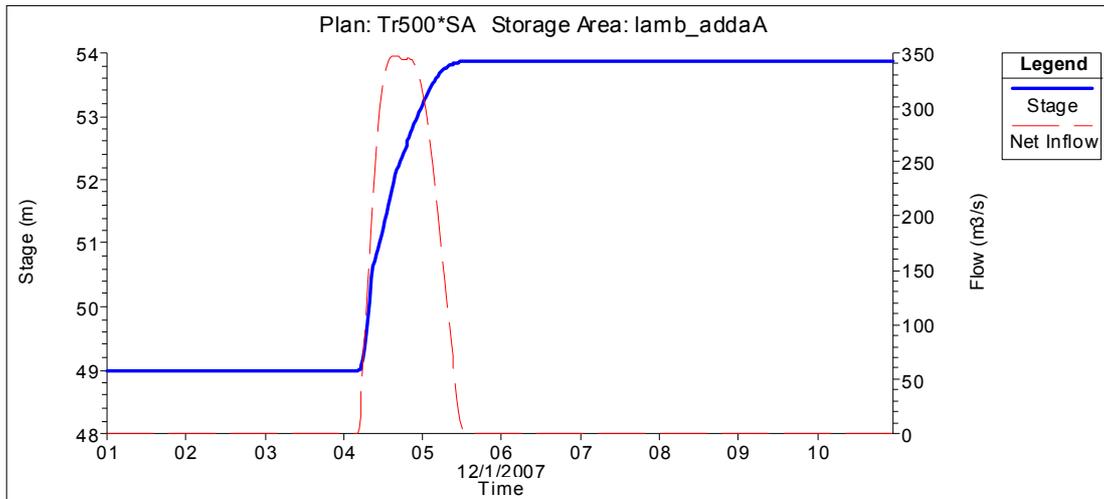
**Grafico 31** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto vers\_po



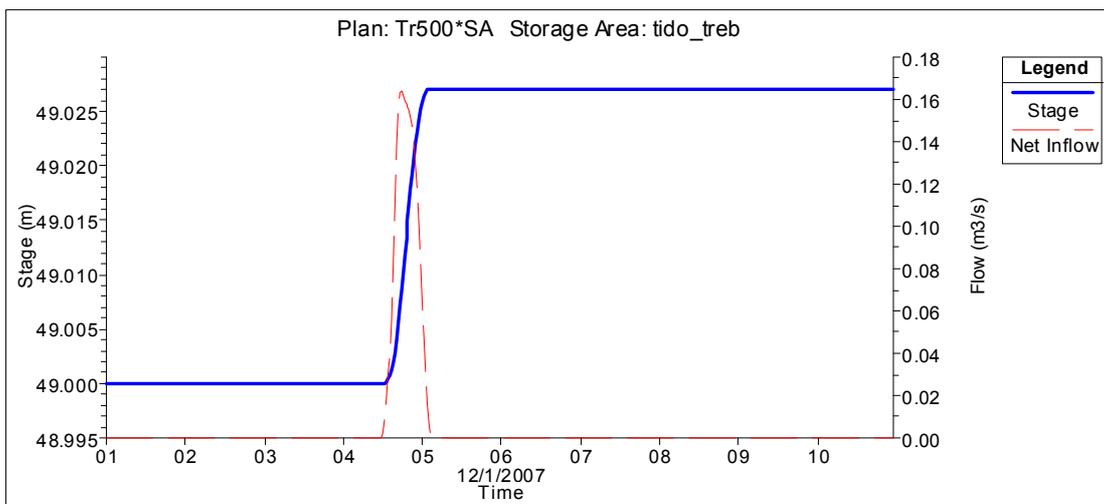
**Grafico 32 Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto rogg\_lambA**



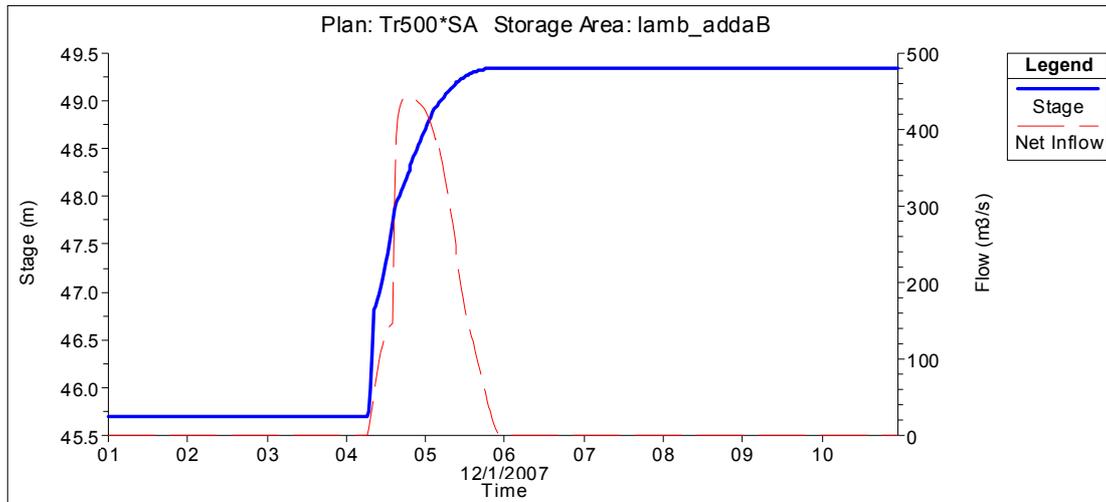
**Grafico 33 Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto rogg\_lambB**



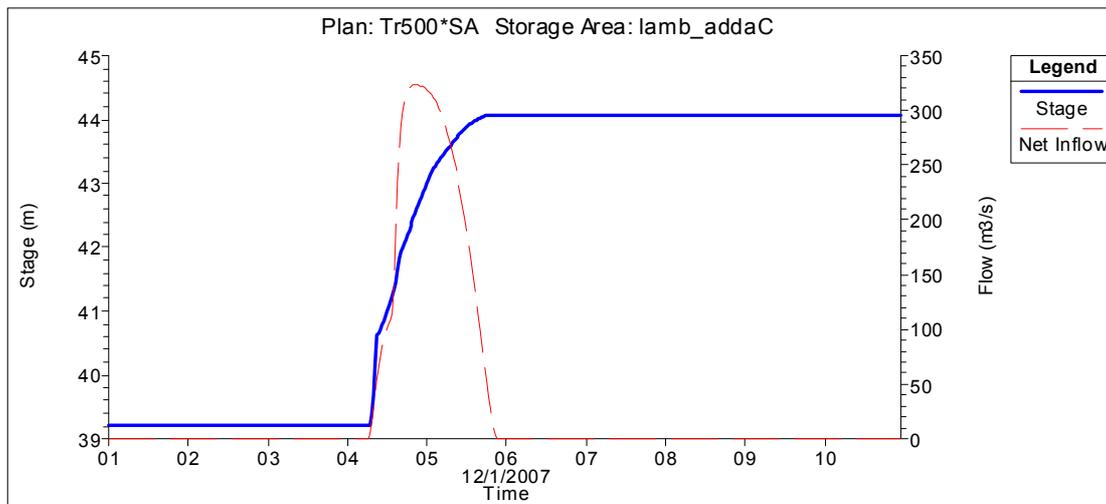
**Grafico 34 Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto lamb\_addaA**



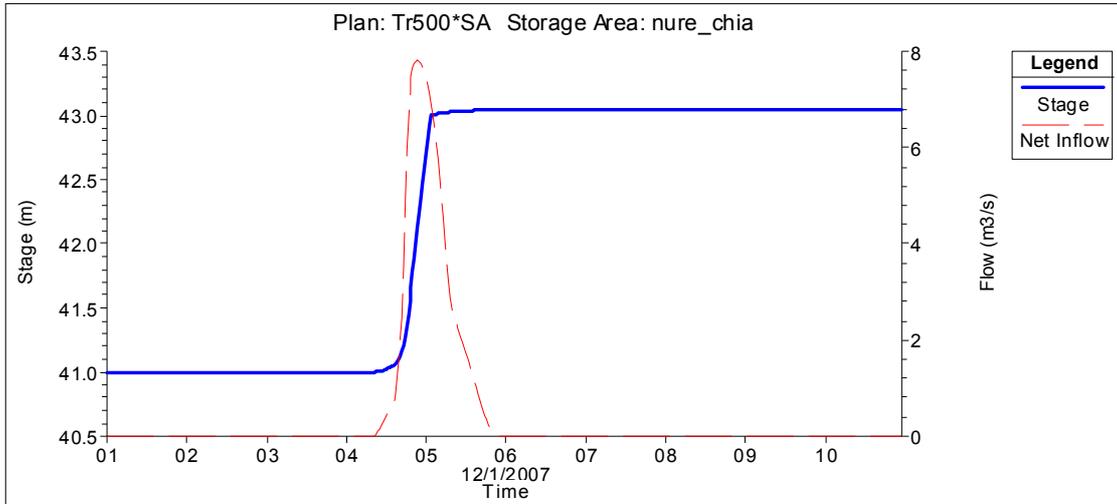
**Grafico 35 Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto tido\_treb**



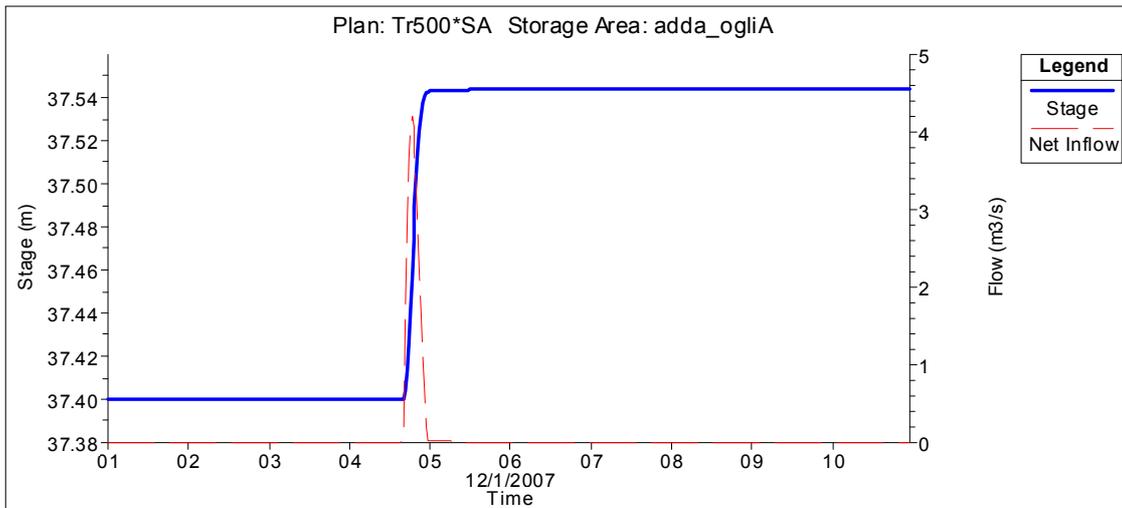
**Grafico 36** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto lamb\_addaB



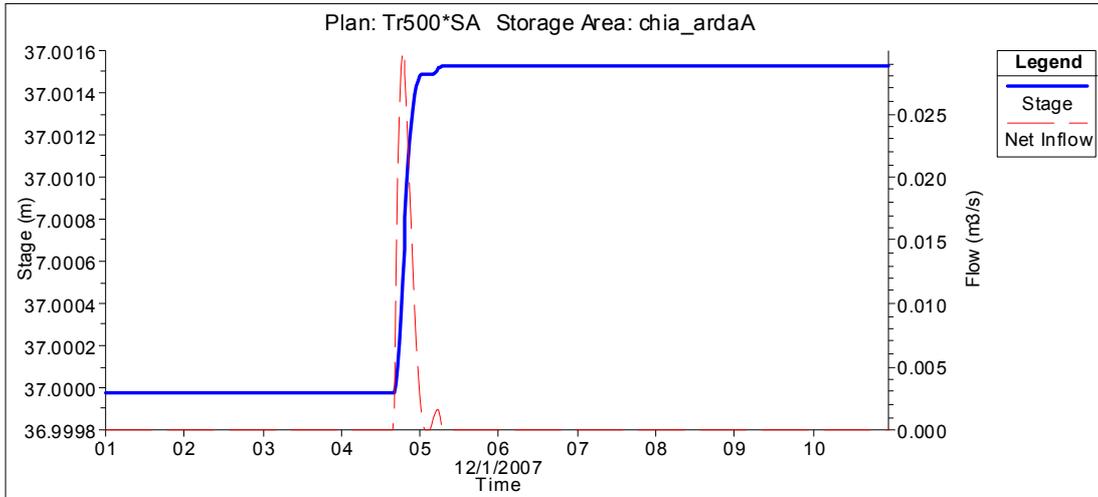
**Grafico 37** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto lamb\_addaC



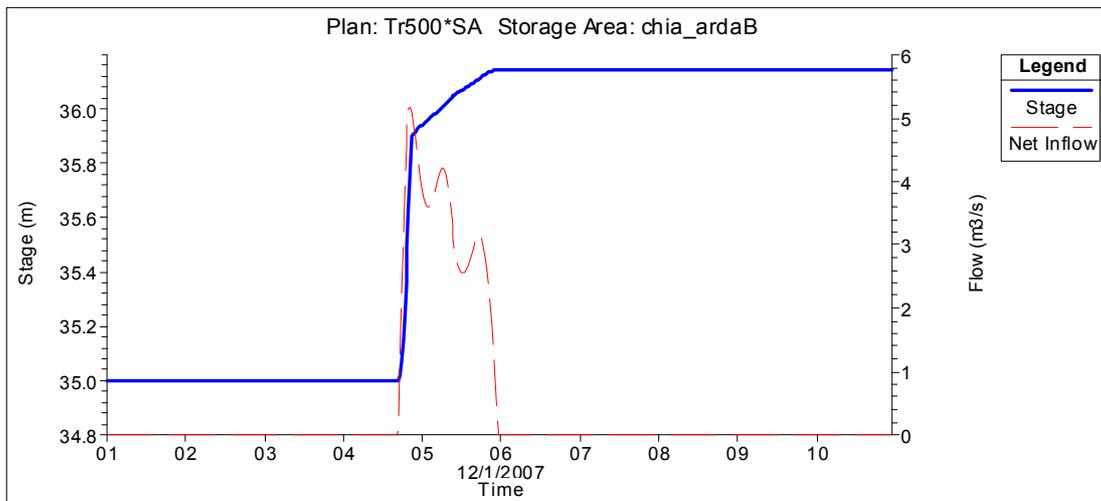
**Grafico 38** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inderodibili nel comparto nure\_chia



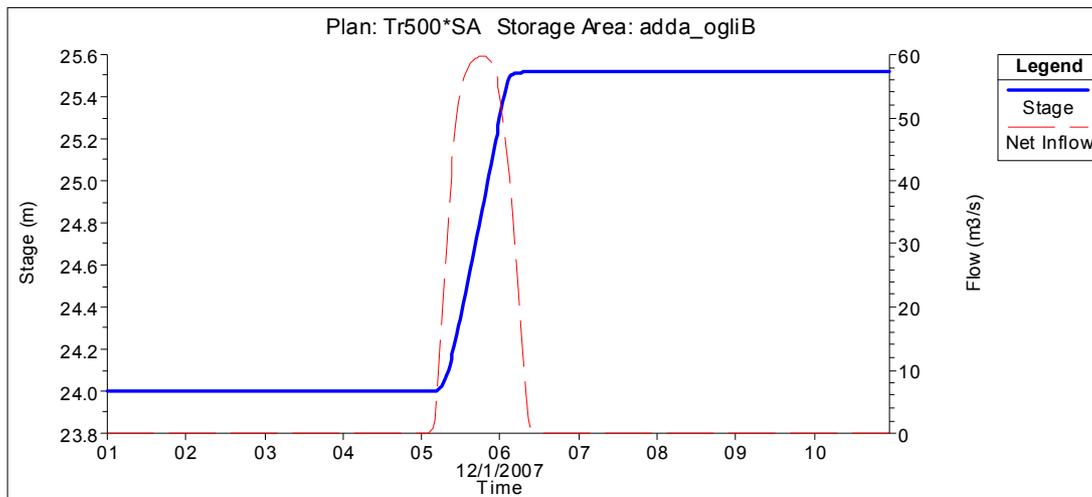
**Grafico 39** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inderodibili nel comparto adda\_ogliA



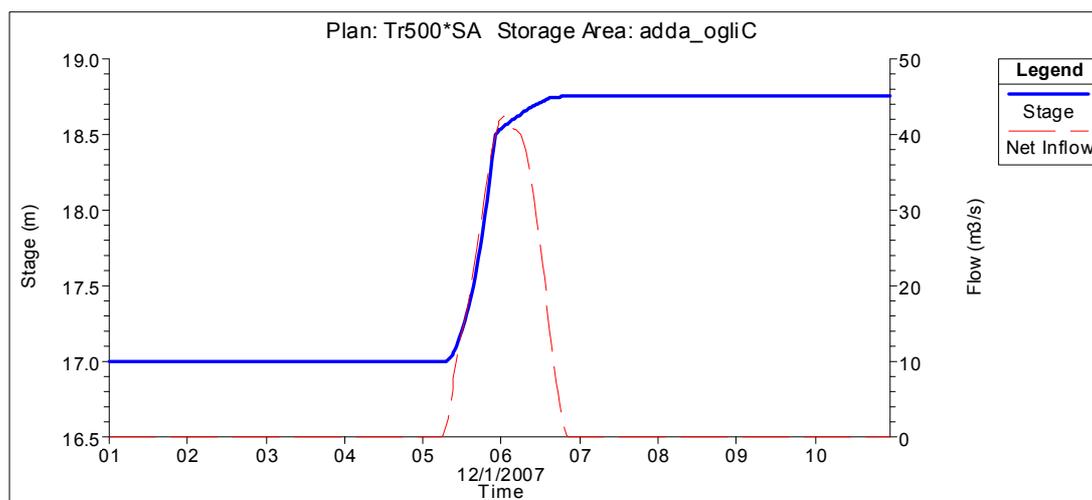
**Grafico 40** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto chia\_ardaA



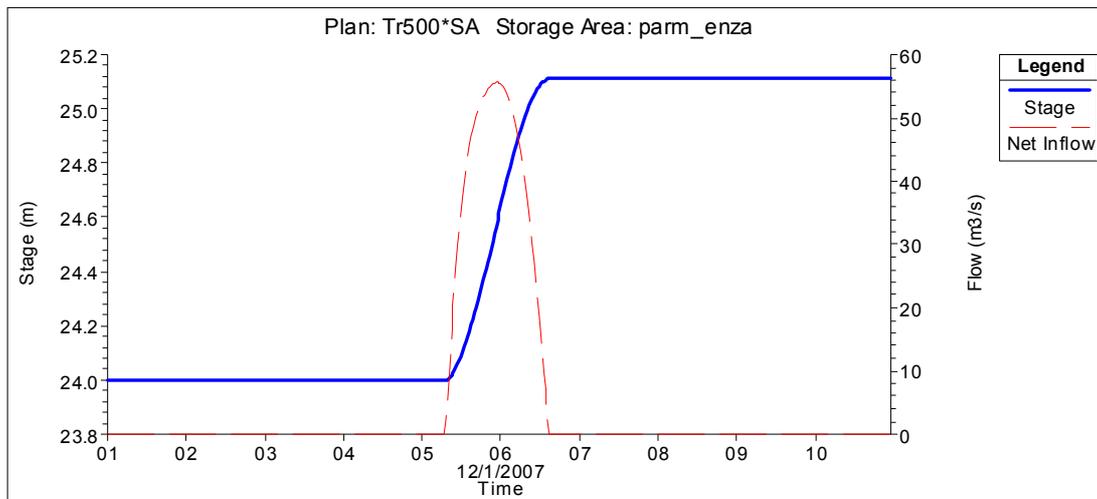
**Grafico 41** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto chia\_ardaB



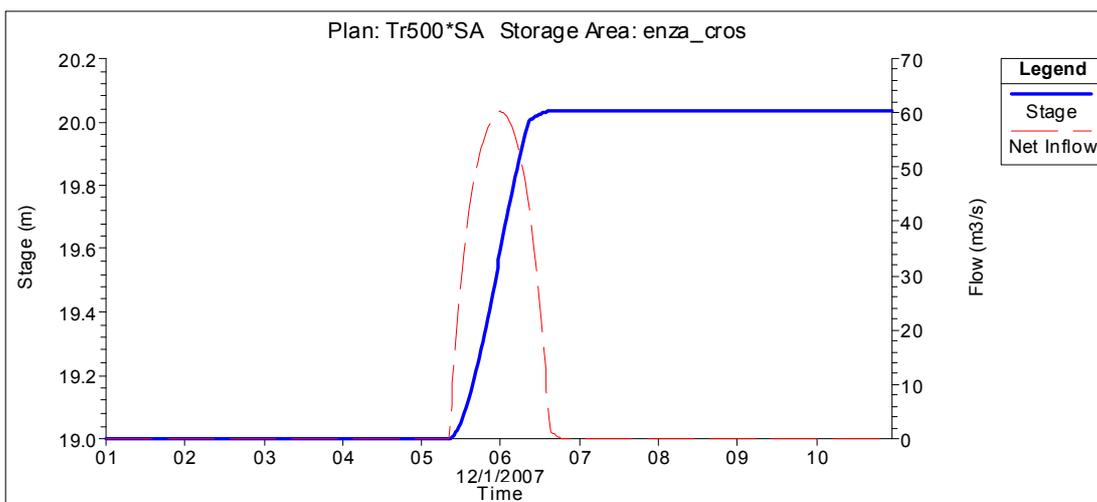
**Grafico 42** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto adda\_ogliB



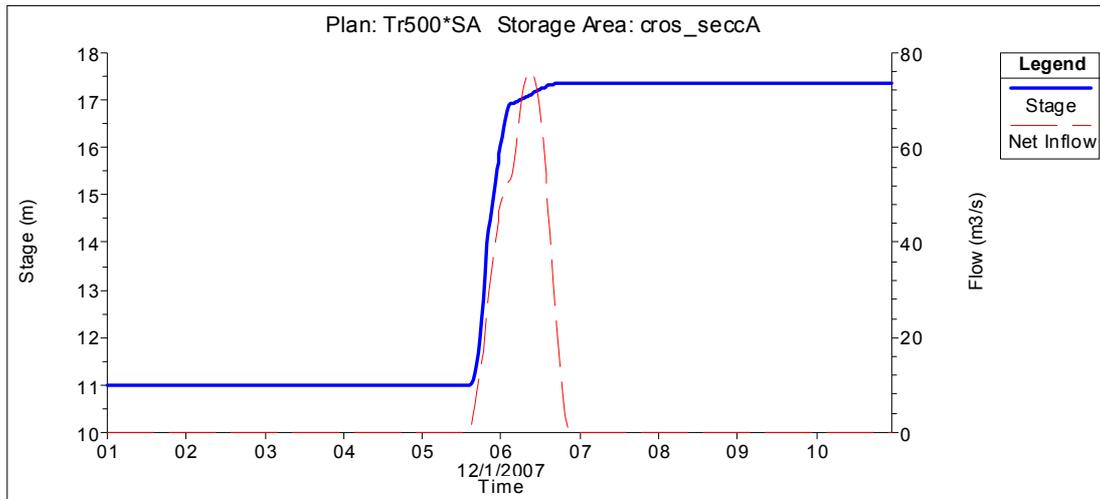
**Grafico 43** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto adda\_ogliC



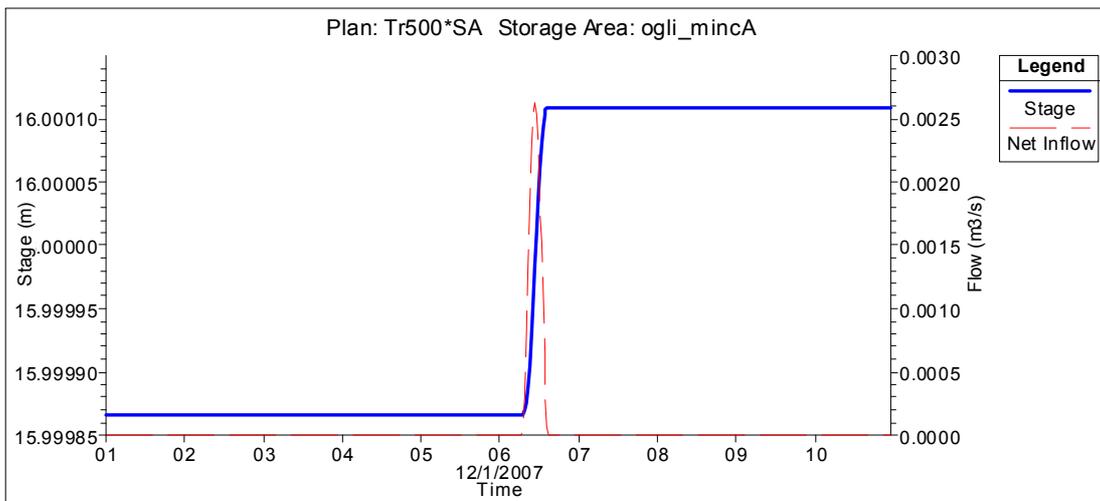
**Grafico 44** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto parm\_enza



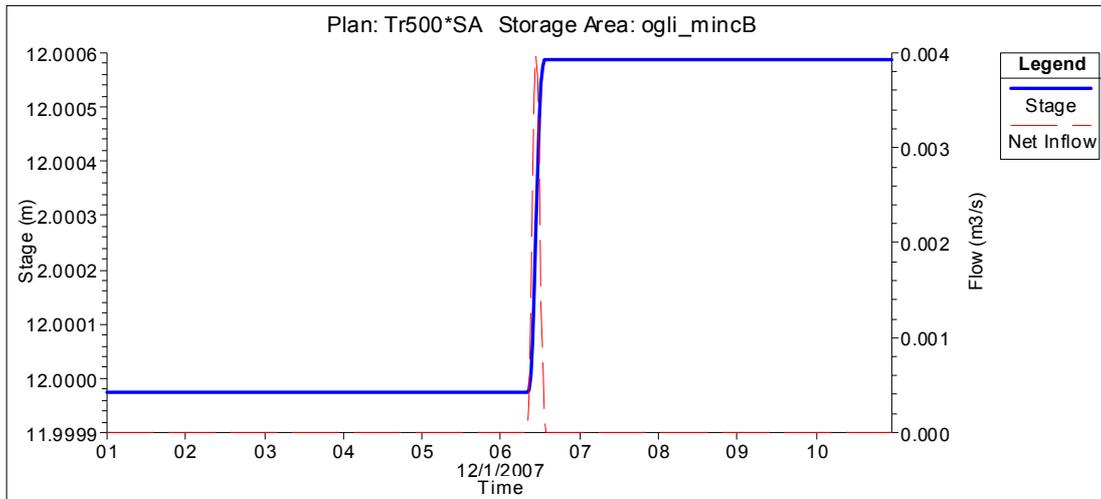
**Grafico 45** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto enza\_cros



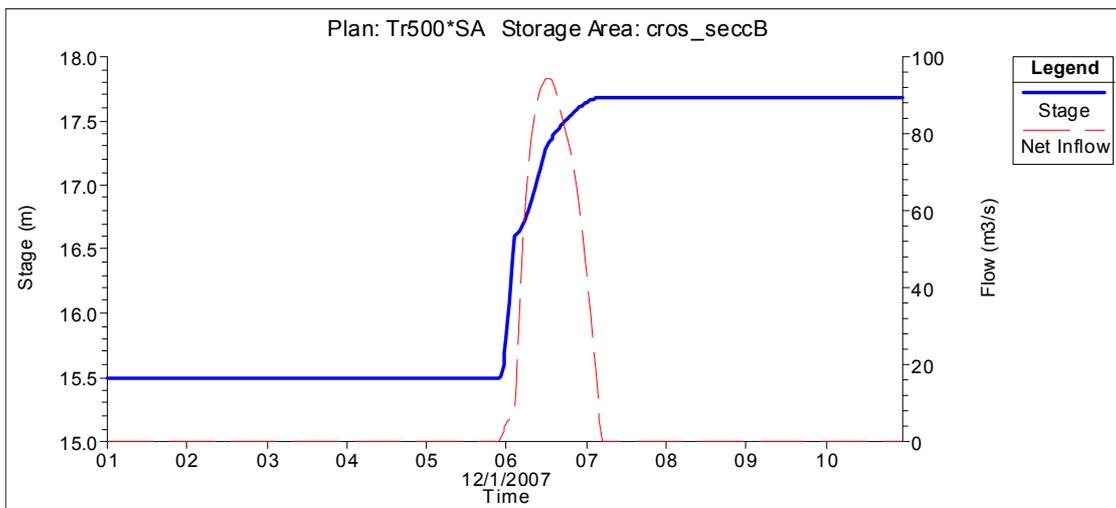
**Grafico 46** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto cros\_seccaA



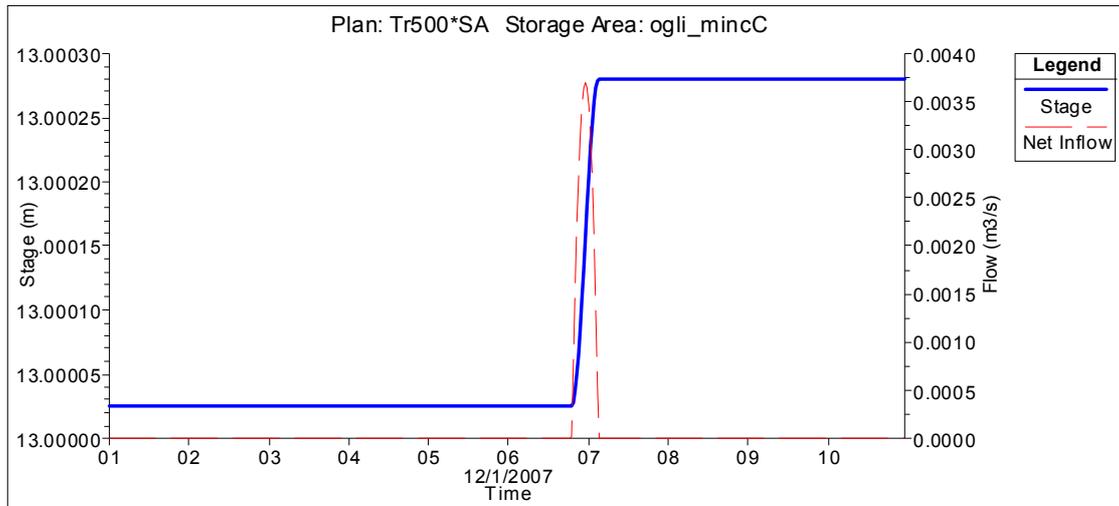
**Grafico 47** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto ogli\_mincaA



**Grafico 48** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto ogli\_minCB



**Grafico 49** Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto cros\_seccB

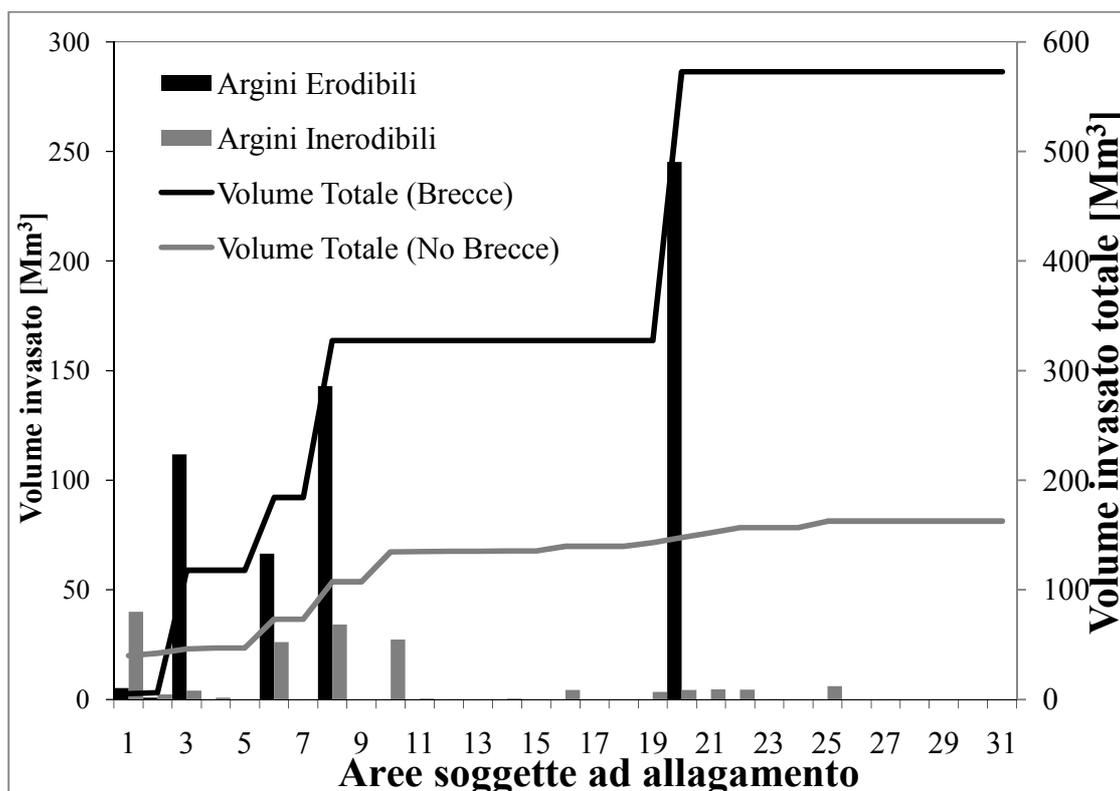


**Grafico 50 Andamento nel tempo di tirante e portata nella configurazione con argini inerodibili nel comparto ogni\_minC**



## 8 ANALISI DEI RISULTATI

Il confronto tra i risultati ottenuti dalla simulazione condotta nell'ipotesi di possibili breccie arginali (argini erodibili) e quelli relativi alla condizione ipotetica di argini inerodibili, evidenzia, per quest'ultimo caso, un netto calo dei volumi idrici tracimati (Tabella 11 e Grafico 51). Il volume complessivamente esondato si riduce di circa il 70%, ridistribuendosi tuttavia in un numero maggiore di comparti, tale da impedire pericolosi allagamenti dei comparti posti sulla sinistra idraulica e del comparto parm\_enza che invece sono osservabili nel primo scenario. Tale redistribuzione comporta un aumento dei volumi invasati nei comparti più a monte in destra idraulica, aumento che è comunque da considerarsi modesto.



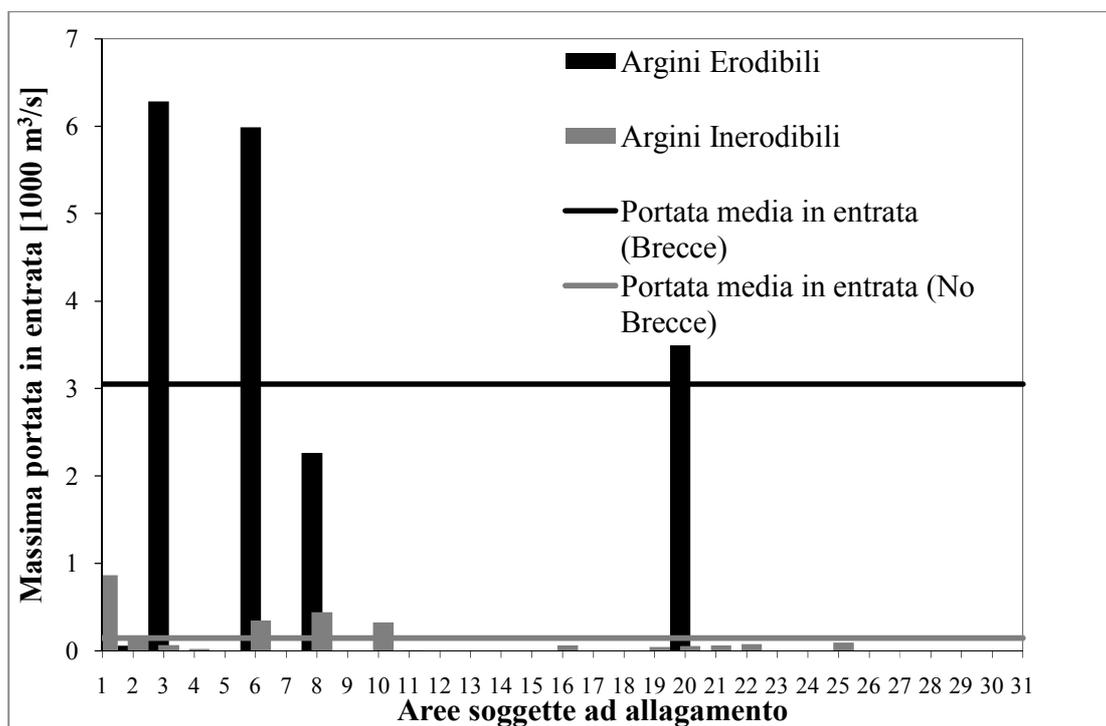
**Grafico 51** Confronto tra i volumi idrici (invasati nei comparti idraulici e quello complessivamente invasato) nella configurazione con argini erodibili e inerodibili

ID Comparto	Comparto	Collocazione	Volume invasato [Mm <sup>3</sup> ]	
			Argini erodibili	Argini inerodibili
1	staf_vers	Dx. Idraulica	5.24262	39.91052
2	vers_po	Dx. Idraulica	0.85943	2.15492
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	111.7934	4.03469
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	0	0.8463
5	po_tido	Dx. Idraulica	0	0
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	66.40359	26.23406
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0	0.00504
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	143.0353	34.04523
9	treb_nure	Dx. Idraulica	0	0
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	0	27.31637
11	nure_chia	Dx. Idraulica	0	0.41163
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	0	0.06613
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0	0.00054
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	0	0.35962
15	arda_ongi	Dx. Idraulica	0	0
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	0	4.37699
17	ongi_taro	Dx. Idraulica	0	0
18	taro_parm	Dx. Idraulica	0	0
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	0	3.33749
20	parm_enza	Dx. Idraulica	245.2778	4.40434
21	enza_cros	Dx. Idraulica	0	4.63348
22	cros_seccA	Dx. Idraulica	0	4.53645
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica	0	0.00005
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica	0	0.00004
25	cros_seccB	Dx. Idraulica	0	6.10238
26	cros_seccC	Dx. Idraulica	0	0
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica	0	0.00008
28	secc_panaA	Dx. Idraulica	0	0
29	secc_panaB	Dx. Idraulica	0	0
30	pana_poA	Dx. Idraulica	0	0
31	pana_poB	Dx. Idraulica	0	0

	<b>Volume invasato [Mm<sup>3</sup>]</b>	
<b>TOTALE VOLUME INVASATO</b>	572.61214	162.77635

**Tabella 11 Confronto tra i volumi idrici invasati nei comparti idraulici nelle configurazioni con argini erodibili ed inerodibili**

Anche lo studio delle portate (v. Grafico 52) evidenzia le ricadute positive dell'ipotesi di laminazione controllata dell'evento di piena cinquecentennale sui comparti più coinvolti (sia in termini di deflusso massimo verso le singole aree che in termini di deflusso medio). Aspetto tuttavia negativo e che merita di essere sottolineato è rappresentato da un maggior coinvolgimento nel processo di tracimazione dei comparti staf\_vers e lamb\_addaC nello scenario privo di brecce arginali.

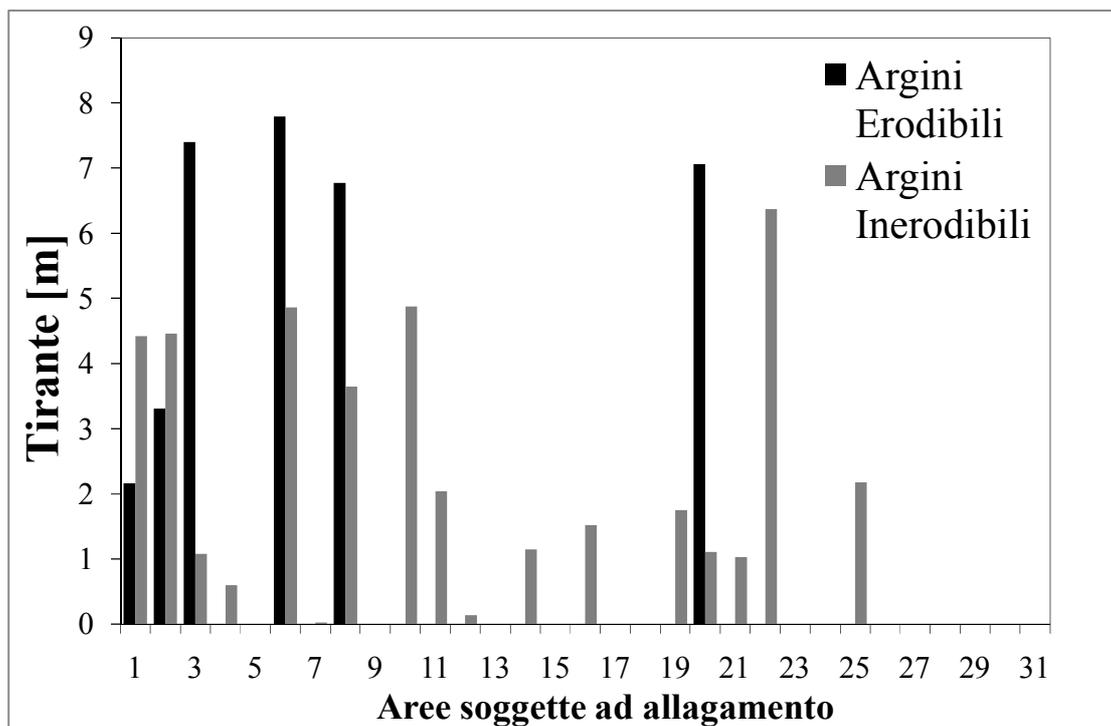


**Grafico 52 Confronto delle massime portate in ingresso nei comparti idraulici e della portata media ottenute con le configurazioni con argini erodibili e inerodibili**

			Massima portata in entrata [m <sup>3</sup> /s]	
ID Comparto	Comparto	Collocazione	Argini erodibili	Argini inerodibili
1	staf_vers	Dx. Idraulica	217.46	862.74
2	vers_po	Dx. Idraulica	57.45	165.86
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	6285.16	64.79
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	0	22.22
5	po_tido	Dx. Idraulica	0	0
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	5990.47	347.14
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0	0.16
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	2263.5	441.33
9	treb_nure	Dx. Idraulica	0	0
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	0	323.37
11	nure_chia	Dx. Idraulica	0	7.81
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	0	4.19
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0	0.03
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	0	5.17
15	arda_ongi	Dx. Idraulica	0	0
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	0	59.74
17	ongi_taro	Dx. Idraulica	0	0
18	taro_parm	Dx. Idraulica	0	0
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	0	42.34
20	parm_enza	Dx. Idraulica	3494.18	55.62
21	enza_cros	Dx. Idraulica	0	60.24
22	cros_seccA	Dx. Idraulica	0	76.21
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica	0	0
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica	0	0
25	cros_seccB	Dx. Idraulica	0	94.41
26	cros_seccC	Dx. Idraulica	0	0
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica	0	0
28	secc_panaA	Dx. Idraulica	0	0
29	secc_panaB	Dx. Idraulica	0	0
30	pana_poA	Dx. Idraulica	0	0
31	pana_poB	Dx. Idraulica	0	0

**Tabella 12 Confronto tra le portate massime in ingresso nei comparti idraulici nelle configurazioni con argini erodibili e inerodibili**

Analizzando infine il Grafico 53 si nota che anche il confronto tra i tiranti conferma la tendenza già rilevata, ossia una diminuzione dell'ordine anche di tre metri in corrispondenza dei comparti più critici, ossia quelli che nel primo scenario con breccie arginali subiscono un pericoloso allagamento (barre nere in Grafico 53). Opposta tendenza si osserva nei massimi tiranti raggiunti nei compartimenti di monte (aree 1 e 2) dove, nel caso di scenario con argini inerodibili, i livelli idrici raggiunti sono maggiori rispetto al caso in cui sia ammessa la formazione di breccie arginali.



**Grafico 53 Confronto tra i tiranti massimi nei comparti idraulici nelle configurazioni con argini erodibili e inerodibili**

ID Comparto	Comparto	Collocazione	Tirante [m]	
			Argini erodibili	Argini inerodibili
1	staf_vers	Dx. Idraulica	2.16	4.42
2	vers_po	Dx. Idraulica	3.31	4.46
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	7.4	1.08
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	0	0.6
5	po_tido	Dx. Idraulica	0	0
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	7.79	4.86
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0	0.03
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	6.77	3.65
9	treb_nure	Dx. Idraulica	0	0
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	0	4.88
11	nure_chia	Dx. Idraulica	0	2.04
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	0	0.14
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0	0
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	0	1.15
15	arda_ongi	Dx. Idraulica	0	0
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	0	1.52
17	ongi_taro	Dx. Idraulica	0	0
18	taro_parm	Dx. Idraulica	0	0
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	0	1.75
20	parm_enza	Dx. Idraulica	7.06	1.11
21	enza_cros	Dx. Idraulica	0	1.03
22	cros_seccA	Dx. Idraulica	0	6.37
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica	0	0
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica	0	0
25	cros_seccB	Dx. Idraulica	0	2.18
26	cros_seccC	Dx. Idraulica	0	0
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica	0	0
28	secc_panaA	Dx. Idraulica	0	0
29	secc_panaB	Dx. Idraulica	0	0
30	pana_poA	Dx. Idraulica	0	0
31	pana_poB	Dx. Idraulica	0	0

**Tabella 13 Confronto fra i tiranti massimi nei comparti idraulici nelle configurazioni con argini erodibili e inerodibili**



## 9 CONCLUSIONI

Nell'ambito del lavoro di Tesi Specialistica si è posto come obiettivo lo studio della difesa delle aree di pianura prospicienti il tratto medio inferiore del Fiume Po dalla propagazione di un evento di piena al limite della prevedibilità, definito in questo contesto come un evento avente tempo di ritorno pari a cinquecento anni. Tale studio è stato condotto attraverso l'analisi di alcune politiche di intervento per la mitigazione del rischio alluvionale alternative al sovrizzo e ringrosso arginale. Detto studio inoltre ricade all'interno delle linee strategiche redatte dall' AdB-Po per la mitigazione del rischio residuale, ossia quello che permane anche in presenza di opere di difesa progettate e verificate con riferimento ad un ben preciso tempo di ritorno (nel caso in esame  $T_{rit} = 200$  anni).

Lo studio ha preso in considerazione e riprodotto attraverso una schematizzazione concettuale le esondazioni all'esterno delle arginature maestre che si verificherebbero in conseguenza ad un evento estremo, quale quello preso in esame, nei comparti idraulici prospicienti l'asta fluviale. Detti comparti sono costituiti dalle zone di pianura latitanti l'asta fluviale, classificate dall'Autorità di Bacino come Fascia C e suddivise in base alla presenza degli affluenti principali del fiume Po e delle principali infrastrutture viarie e ferroviarie situate in tale fascia.

Il punto di partenza è stato un modello numerico quasi - bidimensionale precedentemente sviluppato (DISTART - AdB-Po, 2008) con il software HEC-RAS, la cui schematizzazione geometrica comprendeva unicamente l'alveo del Fiume (corrispondente alle Fasce A e B secondo la denominazione adottata dall'AdB-Po) e le cui condizioni iniziali e al contorno permettevano di rappresentare un evento con tempo di ritorno pari a duecento anni. Si è proceduto dunque alla definizione di nuove sollecitazioni di progetto, volte a riprodurre nelle sezioni strumentate del Po gli idrogrammi sintetici con tempo di ritorno di cinquecento anni messi

a punto dal D.I.I.A.R. (Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento, DIIAR, 2001) del Politecnico di Milano. Il modello stesso è stato poi conseguentemente aggiornato e modificato. Il risultato consiste in un nuovo modello matematico idraulico di tipo quasi - bidimensionale che, attraverso una schematizzazione concettuale, riproduce il comportamento idraulico in occasione di eventi di piena al limite della prevedibilità per tutte e tre le Fasce Fluviali considerate nel Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico redatto dall'AdB-Po (Fasce A, B C, v. PAI, 1999).

I diversi comparti idraulici in cui è stata suddivisa la Fascia C sono stati inseriti nel modello e geometricamente descritti in termini di curve di riempimento, ricavate a partire dal DTM del Bacino del Po attraverso opportune elaborazioni in ambiente GIS (*Geographic Information System*).

Una volta predisposto il modello sono state condotte due tipologie di simulazioni. Una prima serie è stata dedicata alla definizione in maniera iterativa dei punti critici degli argini maestri, ovvero quelli nei quali si prevedeva avvenisse la tracimazione, e alla modellazione in essi della formazione di brecce, decisive per una corretta riproduzione del fenomeno di esondazione all'esterno delle arginature maestre nell'attuale configurazione; bisogna infatti considerare che le arginature maestre vengono comunemente progettate con il solo fine di contenere le portate di piena in alveo, e che dunque un'eventuale tracimazione induce fenomeni erosivi che solitamente portano all'apertura di una breccia nel manufatto (rotta arginale).

Un'ulteriore simulazione ha permesso di valutare l'evoluzione del fenomeno sotto l'ipotesi di un intervento di consolidamento degli argini maestri nei tratti critici (interessati dai sormonti) e quindi di rotta arginale impedita.

Il confronto dei risultati ottenuti ha evidenziato i benefici associati ad una laminazione controllata dell'evento di piena preso in esame all'esterno delle

arginature. In questo contesto il termine "controllata" è da intendersi associato al fenomeno di rotta arginale inibito per lo scenario ipotetico. I benefici di tale controllo si hanno in termini di riduzione (a volte anche considerevole) di volumi invasati, di portate esondate e di tiranti attesi nei comparti idraulici.

Lo strumento modellistico predisposto nell'ambito della Tesi di Laurea Specialistica si presta ad essere utilizzato a supporto dell'identificazione su ampia scala delle zone della Fascia C meno "sensibili", in quanto meno vulnerabili ai fenomeni di allagamento. Questo ulteriore passaggio costituisce il punto di partenza per delineare le strategie ottimali di laminazione controllata in Fascia C degli eventi al limite della prevedibilità al fine della riduzione del rischio idraulico nelle aree di pianura prospicienti il Po, aspetto che verrà affrontato in sviluppi successivi del presente lavoro.



## **10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

AdB-Po, [www.adbpo.it](http://www.adbpo.it) . Sito ufficiale dell'Autorità di Bacino del Fiume Po.

AdB-Po, (1999). PROGETTO DI PIANO DI STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (PAI), Interventi sulla rete idrografica e sui versanti, 1999.

AdB-Po – DISTART, (2008). ATTIVITA' DI STUDIO , RICERCA E SUPPORTO TECNICO-SCIENTIFICO NELL'AMBITO DEL PROGETTO STRATEGICO PER IL MIGLIORAMENTO DELLE CONDIZIONI DI SICUREZZA IDRAULICA DEI TERRITORI DI PIANURA LUNGO L'ASTA PRINCIPALE DEL FIUME Po (Contratto di Ricerca tra Autorità di Bacino Fiume Po e Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, Rilevamento, Territorio dell'Università di Bologna, Resp. scient. Prof. A. Brath), Relazione Finale, Autorità di Bacino Fiume Po, Parma.

Balacchi, V. (2007). ANALISI DEGLI EFFETTI DI LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA CONSEGUIBILI ATTRAVERSO LA GESTIONE OTTIMALE DEL SISTEMA DI GOLENE CHIUSE DEL FIUME PO. Tesi di Laurea Specialistica, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.

Brath A., Castellarin A., Di Baldassarre G., Domeneghetti A. (2010). NUOVI INDIRIZZI PER LA DIFESA DAL RISCHIO IDRAULICO LUNGO L'ASTA FLUVIALE DEL FIUME PO. *Biologia Ambientale*, 24 (1): 1-18.

Brath A., Di Baldassarre G. (2006). MODELLI MATEMATICI PER L'ANALISI DELLA SICUREZZA IDRAULICA DEL TERRITORIO. *L'Acqua*, 6, 39-48.

D'Andrea, D. (2010). DIFESA IDRAULICA DELLE AREE DI PIANURA DALLE PIENE AL LIMITE DELLA PREVEDIBILITÀ: ASTA MEDIO INFERIORE DEL FIUME PO. Tesi di Laurea Specialistica, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.

Galletti, L. (2007). PREDISPOSIZIONE DI UN MODELLO NUMERICO IDRAULICO QUASI – BIDIMENSIONALE DEL CORSO MEDIO INFERIORE DEL FIUME PO SULLA BASE DI UN RILIEVO TOPOGRAFICO LASER SCANNING. Tesi di Laurea Specialistica, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.

Govi M., Turitto O. (2000). CASISTICA STORICA SUI PROCESSI DI INTERAZIONE DELLE CORRENTI DI PIENA DEL PO CON ARGINATURE E CON ELEMENTI MORFOTOPOGRAFICI DEL TERRITORIO ADICENTE. Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere.

Hashimoto, R., Stedinger, J.R., Loucks, D.P. (1982). RELIABILITY, RESILIENCY, AND VULNERABILITY CRITERIA FOR WATER RESOURCE SYSTEM PERFORMANCE EVALUATION, *Water Resources Research*, 18, 14–20.

Majone M., Tomirotti M. (2006). EVENTI DI PIENA IMPREVEDIBILI. XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche – IDRA2006.

Tanda M. G., Mignosa P., Tomirotti M., Gardelli R., Adami S. (2001). CARATTERIZZAZIONE IDROLOGICA DELL’ASTA PRINCIPALE DEL FIUME PO NEL TRATTO CHE VA DALLA CONFLUENZA DELLA DORA BALTEA ALL’INCILE DEL PO DI GORO. Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento (D.I.I.A.R.)

Vis, M., Klijn, F., De Bruijn, K. M., Van Buuren, M. (2003). RESILIENCE STRATEGIES FOR FLOOD RISK MANAGEMENT IN THE NETHERLANDS, *International Journal of River Basin Management*, 1: 1, 33 – 40.

## Ringraziamenti

Come al solito mi sono ridotto proprio all'ultimo per fare le cose, ma dai ringraziamenti proprio non potevo esimermi.

Direi che i primi a beneficiare di codeste attenzioni non possono che essere le due straordinarie persone che mi hanno seguito nella preparazione e redazione di questo lavoro, ossia il prof. Castellarin e l'ing. Domeneghetti, i quali si sono prodigati in lungo e in largo per me. Quindi a loro un primo grazie.

Ovviamente non può mancare la parte familiare, che mi è sempre stata accanto in questi anni di università quando per me non è stato particolarmente facile. Per cui grazie mamma, grazie papà e grazie Laura per l'affetto che mi avete sempre dimostrato.

Un grazie anche agli amici tutti, ma in particolare Giosi, Bruno e Davide, i quali mi hanno convinto a non lasciare questa facoltà anche se sommerso dalle difficoltà "analitiche e fisiche". Probabilmente senza il vostro consiglio non sarei mai arrivato fin qui. Grazie.

And, last but not least, non può mancare il ringraziamento e la dedica alla persona che mi ha cambiato (e in meglio) la vita, che mi è sempre stata affianco (anche ora quando la stampa della tesi ha assunto i connotati di una lotta contro il tempo) e mi ha aiutato a farmi capire quanto valgo. A te Elisa che ci sei sempre, che non mi hai mai lasciato solo e che sei semplicemente l'amore della mia vita. Grazie veramente di cuore per tutto ciò che hai fatto e per quello che tu sei per me (quindi anche grazie a Gerusalemme che ci ha fatti incontrare).

Infine voglio ringraziare tutte le persone che mi hanno aiutato in ogni modo e che qui non ho avuto il tempo di menzionare. A voi grazie.

P.s.

Grazie anche a me, perché in fondo sono stato bravo anch'io.

Peace



# APPENDICE A

## COMPARTI DI FASCIA C – DESTRA IDRAULICA

