

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

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

**INDIRIZZO PROTEZIONE DEL SUOLO E DEL TERRITORIO**

**TESI DI LAUREA**

in

Costruzioni Idrauliche e Protezione Idraulica del Territorio M

**PROPOSTE DI AGGIORNAMENTO DEI CRITERI  
UTILIZZATI NEL P.A.I. DELL'AUTORITA' DI BACINO  
DEL PO PER L'IDENTIFICAZIONE DELLE AREE A  
RISCHIO DI INONDAZIONE: IL CASO DI STUDIO DEL  
TORRENTE STIRONE**

CANDIDATO  
Marco Pincella

RELATORE  
Chiar.mo Prof. Armando Brath

CORRELATORI

Chiar.mo Prof. Attilio Castellarin  
Dott. Ing. Alessio Domeneghetti

Anno Accademico 2010/11

Sessione II



## SOMMARIO

1	<b>INTRODUZIONE</b> .....	5
2	<b>GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONALE</b> .....	10
2.1	Il PAI e il concetto di rischio idraulico.....	10
2.2	Il piano stralcio delle fasce fluviali.....	14
2.3	Direttiva 2007/60/CE.....	18
3	<b>OBIETTIVI E STRUTTURA DELL'INDAGINE</b> .....	21
3.1	Perimetrazione delle aree potenzialmente interessabili da allagamento statico	21
3.2	Perimetrazione delle aree potenzialmente allagabili e interessate da allagamento dinamico.....	24
4	<b>DATI E STRUMENTI</b> .....	28
4.1	Caso di studio: Torrente Stirone.....	28
4.2	Strumenti di analisi di dati georeferenziati: il GIS.....	31
4.3	Informazione topografica disponibile.....	34
4.4	Informazione idrologico-idraulica.....	35
4.5	Confronto tra le basi dati altimetriche disponibili.....	37
4.6	Fascia C torrente Stirone.....	44
5	<b>MODELLO NUMERICO IDRAULICO QUASI BIDIMENSIONALE</b> ...	50
5.1	Il programma di calcolo HEC - RAS.....	50
5.2	Creazione della geometria del sistema.....	52
5.3	Definizione della sollecitazione idraulica.....	55
5.4	Idrogramma sintetico TR 200 anni.....	57
5.4.1	Procedura di costruzione degli idrogrammi sintetici.....	57
5.4.2	Stima indiretta della curva di riduzione dei colmi di piena.....	59

5.4.3	Stima regionale dei rapporti di riduzione e della posizione del picco.....	60
5.4.4	Applicazione del metodo di costruzione degli idrogrammi sintetici.....	62
5.5	Calibrazione degli idrogrammi sintetici degli affluenti.....	64
5.6	Modellazione e creazione delle brecce arginali .....	67
5.7	Modellazione delle brecce e risultati del modello.....	73
6	<b>MODELLO BIDIMENSIONALE PER LA SIMULAZIONE DEGLI SCENARI DI ALLAGAMENTO.....</b>	<b>78</b>
6.1	Modello numerico utilizzato .....	78
6.2	Definizione del dominio di calcolo.....	80
6.3	Definizione scenari di inondazione.....	86
7	<b>RISULTATI E DISCUSSIONE.....</b>	<b>96</b>
7.1	Allagamento statico .....	96
7.1.1	Lato destro .....	100
7.1.2	Lato sinistro .....	103
7.2	Allagamento dinamico .....	105
8	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>120</b>
9	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>	<b>124</b>

# 1 INTRODUZIONE

Le esondazioni fluviali sono fenomeni naturali impossibili da scongiurare in senso assoluto. Inoltre alcune attività, come la crescita degli insediamenti umani e l'incremento delle attività economiche nelle pianure alluvionali, nonché la riduzione della naturale capacità di ritenzione idrica del suolo a causa dei suoi vari usi e i cambiamenti climatici, contribuiscono ad aumentarne la probabilità ed aggravarne gli impatti negativi (v. ad es. "Flood Directive" 2007/60/CE del Parlamento Europeo, 2007).

Le alluvioni rappresentano ad oggi un problema di grande attualità, a livello nazionale e sovranazionale, e la definizione di strategie di intervento per la protezione dei territori soggetti ad allagamenti costituisce una questione di grande interesse tecnico e scientifico.

Il presente trattato affronta il problema delle esondazioni fluviali andando ad analizzare una metodologia innovativa per la determinazione delle aree soggette a rischio d'inondazione durante eventi di piena e andando a studiare gli eventuali effetti dinamici pericolosi, correlati a questi fenomeni.

Il lavoro svolto nasce dalla recente esigenza di istituire un quadro per la valutazione e la gestione dei rischi alluvionali, un'esigenza che si è concretizzata a livello Comunitario con gli adempimenti richiesti ai Paesi Membri dalla Direttiva 2007/60/CE (Consiglio Comunità Europea), precedentemente richiamata, e descritta in dettaglio nel capitolo successivo. Detta direttiva, con lo scopo di ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche connesse con le alluvioni, prevede, per i Paesi Membri, la redazione di una mappatura della pericolosità e del rischio (elemento innovativo nel panorama nazionale) alluvionale, per la pianificazione a lungo termine della gestione di quest'ultimo.

La definizione delle mappe, che deve essere ultimata entro la fine del 2013, necessita quindi di un metodo attendibile per la determinazione dei territori a rischio allagamento.

A livello nazionale e in particolare per il bacino del Fiume Po, i quadri conoscitivi e le misure per la mitigazione del rischio di alluvione, contenuti nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I) approvato nel 2001, costituiscono un importante e fondamentale punto di riferimento per l'attuazione della Direttiva Comunitaria.

Lo strumento principale del P.A.I. per il conseguimento degli obiettivi di difesa dal rischio idraulico, di mantenimento e recupero dell'ambiente fluviale, è la delimitazione delle fasce fluviali che, di fatto, consiste in una mappatura della pericolosità idraulica associata ai fenomeni di inondazione fluviale.

Infatti, nell'ambito di detta delimitazione, l'Autorità di Bacino del Po ha definito dei criteri per l'individuazione delle aree soggette ad allagamento, in base alle differenti condizioni di piena di un corso d'acqua, descritti in dettaglio nel secondo capitolo. In particolare l'area di interesse ai fini del presente studio è la porzione di territorio interessata da fenomeni alluvionali per piena catastrofica, ovvero la cosiddetta "Fascia C": questa comprende al suo interno tutte le aree potenzialmente allagabili in seguito al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quella di riferimento, piena con tempo di ritorno pari a 200 anni, o al verificarsi di rottura del sistema arginale.

Il criterio utilizzato nel P.A.I. per la delimitazione di questa zona è di tipo altimetrico, in quanto il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno adiacente al corso d'acqua sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena catastrofica. La precisione associata a questo tipo di criterio è legata quindi all'attendibilità dei dati idrologici, geomorfologici, idraulici e topografici disponibili ed utilizzati in fase di perimetrazione. Quest'ultimo elemento è particolarmente determinante in quanto, tanto più è scarsa la disponibilità di rilievi geometrici aggiornati sulla morfologia degli alvei e delle aree di esondazione e quanto meno attendibili o dettagliate sono le quote di piano campagna, tanto più la delimitazione delle aree allagabili può essere affetta da imprecisioni e inesattezze.

Il presente lavoro di Tesi di Laurea ha come scopo principale quello di determinare un criterio che consenta una maggiore precisione, rispetto a quella che contraddistingue la metodologia adottata nel P.A.I., nella definizione delle porzioni di territorio potenzialmente allagabili per piene catastrofiche.

Il corso d'acqua preso come riferimento nel presente studio per l'implementazione e la verifica della metodologia proposta è il Torrente Stirone, un affluente sinistro del Fiume Taro e, come tale, compreso nel bacino idrografico del Fiume Po.

Come sarà meglio descritto nel seguito dell'elaborato, la metodologia prende a riferimento un ipotetico scenario alluvionale caratterizzato da un evento di piena particolarmente gravoso (c.d., tempo di ritorno 200 anni) e, con riferimento specifico al corso d'acqua in esame, ipotizza la formazione di numerosi fenomeni di rottura arginale, andando successivamente a determinarne le conseguenze in termini di area potenzialmente allagabile e di effetti dinamici provocati dall'allagamento stesso attraverso un opportuno modello matematico dei fenomeni di allagamento. Gli argini di un corso d'acqua infatti, per quanto ben progettati e monitorati, non possono garantire, come qualsiasi altra opera idraulica, un livello di sicurezza assoluto per il territorio circostante, in quanto non possono essere esclusi eventi di collasso arginale.

Lo studio utilizza un criterio per la determinazione delle aree allagabili che si fonda sull'applicazione in cascata di due diversi codici di calcolo: un primo codice preposto alla modellazione dei fenomeni di propagazione delle onde di piena all'interno dell'alveo dello Stirone ed alla schematizzazione dei diversi scenari di rotta arginale ipotizzati; un secondo codice di calcolo, ovvero un modello idraulico bidimensionale agli elementi finiti, utilizzato per simulare numerosi scenari di allagamento e analizzare le modalità di deflusso delle acque esondate nei territori prospicienti il Torrente Stirone. L'applicazione in cascata significa che i risultati forniti dal primo modello di simulazione sono utilizzati come dati in ingresso al secondo modello, vengono pertanto trascurati fenomeni di rigurgito da lato campagna in conseguenza dell'altezza rilevante dei manufatti arginali sul piano campagna nel tratto di interesse del Torrente Stirone.

I risultati ottenuti attraverso l'applicazione di questa metodologia vengono successivamente analizzati sotto due punti di vista principali.

Il primo aspetto trattato riguarda l'allagamento statico, ovvero l'allagamento in termini di altezze idriche raggiunte. In particolare, la massima estensione delle aree potenzialmente inondabili determinata nel presente studio viene messa a confronto con l'estensione dell'attuale fascia C dello Stirone: detto confronto permette di porre in relazione i due differenti criteri utilizzati nella determinazione di tali aree e di valutare attendibilità e precisione del criterio semplificato, di natura prevalentemente altimetrica, adottato nell'ambito del P.A.I..

Il secondo aspetto trattato riguarda l'analisi sotto il punto di vista dinamico dei risultati ottenuti. Il fenomeno di una breccia arginale porta infatti alla formazione di un flusso in uscita dalla stessa che si disperde nelle campagne esterne alle arginature secondo modalità e dinamiche strettamente legate alla morfologia del territorio; questa dispersione porta ad una diminuzione della portata specifica con conseguente calo della pericolosità per le zone coinvolte. Lo scopo di questa seconda fase di analisi è quello di arrivare a valutare una distanza di rispetto dagli argini oltre la quale non sono più ritenuti pericolosi gli effetti dinamici dell'onda di breccia, tramite l'introduzione di un'adeguata soglia di intensità idraulica.

Il lavoro compiuto è descritto secondo le varie fasi in cui si è svolto e si articola nei successivi sette capitoli.

Nel secondo capitolo viene descritta la gestione del rischio alluvionale a livello nazionale secondo quanto fatto a scala di bacino del Po dall'Autorità di Bacino del Po nell'ambito del P.A.I. e della suddivisione in fasce e, a livello Comunitario, secondo quanto previsto dalla Direttiva 60/07/CE.

Nel terzo capitolo viene descritta, in sintesi, la struttura dell'analisi svolta e i principali obiettivi posti alla base dello stesso.

Nel quarto capitolo viene inquadrata la zona oggetto dello studio fornendo una descrizione degli aspetti geomorfologici e idrologici che la riguardano e dei dati planimetrici a disposizione. Particolare attenzione viene rivolta al confronto fra le

varie informazioni altimetriche a disposizione, in quanto la precisione di questo dato è fondamentale per l'attendibilità dei risultati finali.

Il quinto capitolo descrive il modello di simulazione dell'onda di piena con tempo di ritorno duecentennale nell'alveo dello Stirone, la simulazione dei fenomeni di rotta arginale, e i risultati forniti dal modello stesso.

Nel sesto capitolo viene invece descritto il modello di simulazione bidimensionale, utilizzato in cascata al modello precedente, utilizzato per determinare l'evoluzione dell'allagamento nel dominio spaziale di interesse.

Nel settimo capitolo vengono descritti e analizzati, dal punto di vista statico e dinamico, i risultati del modello di allagamento.

L'ottavo capitolo contiene infine le considerazioni conclusive, sulla base dei risultati ottenuti, riguardanti la metodologia svolta e descritta nell'ambito di questo lavoro.

## **2 GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONALE**

### **2.1 Il PAI e il concetto di rischio idraulico**

Il “Piano stralcio per l’Assetto Idrogeologico” (PAI), approvato con DPCM 24 maggio 2001, ha rappresentato, per l’Autorità di bacino del fiume Po, l’atto di pianificazione conclusivo e unificante di tutti gli strumenti di pianificazione per la difesa del suolo dal rischio idraulico e idrogeologico, precedentemente approvati.

Il PAI contiene per l’intero bacino:

- la delimitazione delle fasce fluviali sui corsi d’acqua principali del bacino(v. anche paragrafo 2.2);
- l’individuazione e perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico, nella parte del territorio collinare e montano;
- la definizione degli interventi a carattere non strutturale, costituiti dagli indirizzi e dalle limitazioni d’uso del suolo nelle aree a rischio idraulico e idrogeologico;
- l’individuazione del quadro degli interventi strutturali a carattere intensivo ed estensivo sui versanti e sui corsi d’acqua.

Il PAI rappresenta uno strumento di pianificazione fondamentale per assicurare tramite la programmazione di opere strutturali, vincoli, direttive, la difesa del suolo rispetto al dissesto di natura idraulica e idrogeologica per tutta l’area del bacino del fiume Po. La ricerca di questi obiettivi passa obbligatoriamente attraverso la definizione e valutazione del rischio idraulico al quale commisurare le suddette azioni di difesa.

Secondo la definizione del PAI, riconosciuta in sede nazionale e internazionale, i diversi fattori che compongono il rischio idraulico connesso a scenari di inondazione si riassumono nella seguente espressione:

$$R = E \times H \times V$$

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 indica il periodo tempo preso a riferimento, in genere la vita utile del manufatto.

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.

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

Un'applicazione in forma quantitativa dell'equazione del rischio necessita di dati puntuali di elevato dettaglio non sempre disponibili, per questo nell'ambito del PAI è stata definita una metodologia speditiva per la valutazione del rischio. Alla formula del rischio sono state inserite le seguenti semplificazioni:

- l'entità E degli elementi a rischio è 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 stimata come valore medio riferito a ogni singola tipologia di elemento a rischio;
- la pericolosità H è valutata tramite un indicatore correlato allo stato di dissesto presente all'interno dell'unità territoriale di riferimento, espresso tramite valori parametrici di densità superficiale.

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

$$R = S \times E \times V$$

Dove S è il nuovo 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 sono aggregati poi in quattro classi a valore crescente (1=Moderato, 2=Medio, 3=Elevato, 4=Molto Elevato), i limiti di ciascuna classe sono stati individuati attraverso procedure d'analisi statistica della distribuzione dei valori ottenuti. Questa procedura di valutazione viene applicata per ogni unità territoriale di riferimento ovvero per ogni comune del bacino.

Le misure di intervento individuate nell'ambito del PAI sono indirizzate alla riduzione del prodotto  $E \times V$ . Questo si può attuare attraverso una diminuzione della vulnerabilità con interventi non strutturali (attività di monitoraggio, previsione e sorveglianza, regolamentazione dell'uso del suolo per le aree soggette ai fenomeni connessi alla dinamica fluviale, delimitazione fasce fluviali) o con interventi a carattere strutturale (prevalentemente opere idrauliche di difesa e di sistemazione) volti a ridurre la pericolosità idraulica.

Per quanto riguarda le opere strutturali, costituite principalmente dai rilevati arginali che si sono andati sviluppando nel corso del tempo lungo l'asta del fiume Po e che oggi hanno raggiunto un limite strutturale non significativamente aumentabile, si sottolinea il fatto che non possono garantire un livello di sicurezza assoluto: anche se ben monitorato e mantenuto nel tempo il sistema arginale, come qualsiasi opera idraulica, se sollecitato da eventi estremi può cedere. L'entità di tale rischio che, in quanto connesso a scenari di mancata efficienza di un'opera idraulica, viene definito residuale, interessa diverse migliaia di km<sup>2</sup> di pianura padana fortemente antropizzata e deve essere dunque preso in considerazione, valutato e gestito con opportuni interventi di mitigazione.

Nel PAI, coerentemente con la definizione di rischio idraulico precedentemente richiamata, si identificano anche i concetti di pericolosità idraulica residuale connessa a scenari di inondazione per tracimazione o per rottura del rilevato arginale. Il rischio residuale idraulico è quindi il prodotto della pericolosità residuale per il danno sociale ed economico potenziale, rappresentato dagli elementi a rischio e dalla loro vulnerabilità.

Si sottolinea infine come il presente lavoro, ipotizzando uno scenario di rotta arginale, si inserisca nella problematica generale di gestione del rischio idraulico residuale e, in particolare, nelle linee progettuali strategiche di intervento per il miglioramento delle condizioni di sicurezza dei territori di pianura lungo l'asta del fiume Po individuate dall'AdB-Po che prevedono la valutazione e la gestione del rischio residuale in fascia C.

## **2.2 Il piano stralcio delle fasce fluviali**

Uno degli strumenti principali del PAI per il conseguimento degli obiettivi di difesa dal rischio idraulico, di mantenimento e recupero dell'ambiente fluviale, è la delimitazione delle fasce fluviali. Questa viene formalizzata nel Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF, 1998) che è stato successivamente completato dal secondo Piano Stralcio.

Gli obiettivi principali che caratterizzano il Piano sono:

- definire il limite dell'alveo di piena e delle aree inondabili e individuare gli interventi di protezione dei centri abitati, delle infrastrutture e delle attività produttive che risultano a rischio;
- 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;
- favorire l'evoluzione morfologica naturale dell'alveo, riducendo al minimo le interferenze antropiche sulla dinamica evolutiva;
- raggiungere condizioni di uso del suolo compatibili con le caratteristiche dei sistemi idrografici, funzionali a conseguire effetti di contenimento dei deflussi di piena;
- 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;
- ridurre le interferenze antropiche con la dinamica evolutiva degli alvei e dei sistemi fluviali.

Per l'individuazione del metodo di delimitazione delle fasce fluviali, pregiudiziale per l'individuazione delle stesse, sono state condotte delle analisi fluviali: per i corsi d'acqua principali, nei tratti di pianura e di fondovalle montano, è stata condotta una

valutazione delle modalità di deflusso delle portate di piena per assegnati tempi di ritorno (20, 100, 200, 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'alveo fluviale e la parte del territorio limitrofo, costituente nel complesso la regione fluviale, sono divisi nella seguente articolazione in fasce (Figura 2.1):

- **Fascia di deflusso della piena (Fascia A)**, 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 di esondazione (Fascia B)**, esterna alla precedente, 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 esistenti o programmate di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata.
- **Area di inondazione per piena catastrofica (Fascia C)**, 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.

Per la delimitazione delle suddette fasce sono state prese le seguenti assunzioni:

- Fascia A: fissato in 200 anni il tempo di ritorno ( $T_{rit}$ ) per la piena di riferimento e determinato il livello idrico corrispondente, si assume come delimitazione convenzionale della fascia la porzione ove defluisce almeno l'80% di

tale portata. All'esterno di tale fascia la velocità della corrente deve essere minore o uguale a 0.4 m/s.

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 ci 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 B: 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 ( $T_{rit}$  200 anni) ovvero sino alle opere idrauliche esistenti o programmate di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata. Pertanto la fascia B è generalmente delimitata dagli argini maestri (coincide con il piede esterno dell'argine) anche nelle situazioni in cui l'argine sia inadeguato al contenimento della piena di riferimento.
- Fascia C: si assume come portata di riferimento la massima piena storicamente registrata, se corrispondente a un TR superiore a 200 anni, o in assenza di essa, la piena con TR di 500 anni. Per i corsi d'acqua non arginati la delimitazione dell'area soggetta ad inondazione viene eseguita con gli stessi criteri adottati per la fascia B.

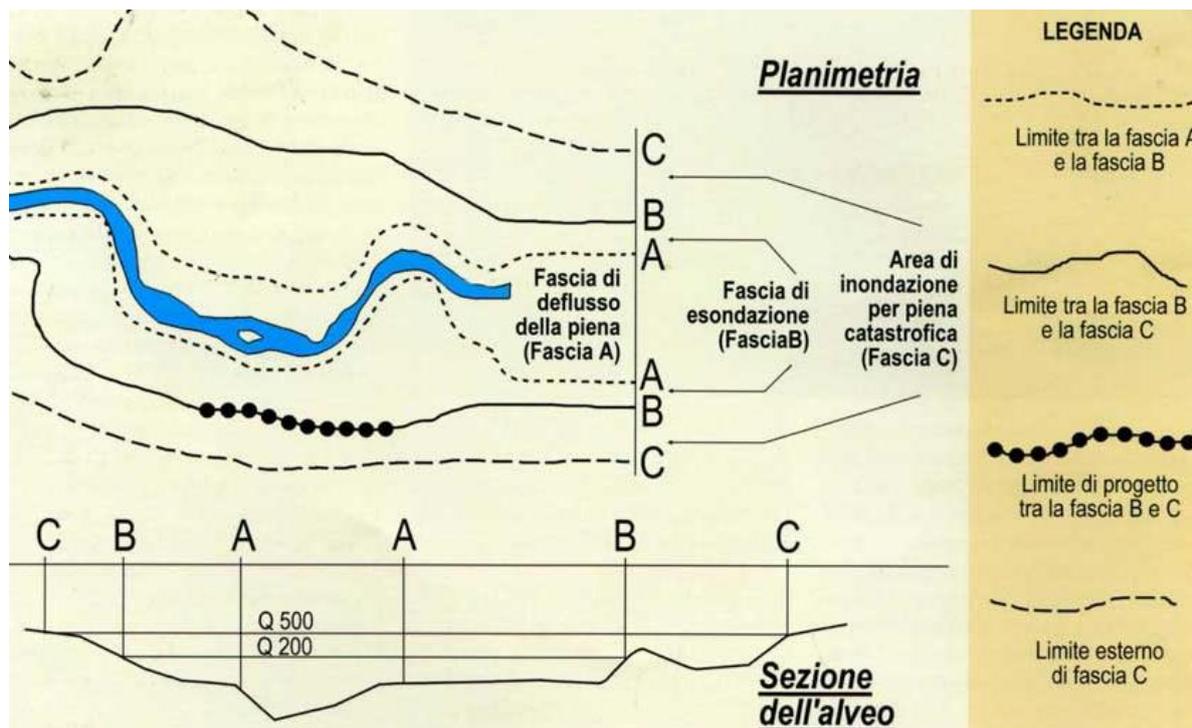
Per i corsi d'acqua arginati l'area è delimitata unicamente nei tratti in cui lo rendano possibile gli elementi morfologici disponibili; in tali casi la delimitazione è definita in funzione della più gravosa delle seguenti due ipotesi (se entrambe applicabili) in relazione alle altezze idriche corrispondenti alla piena :

- altezze idriche corrispondenti alla quota di tracimazione degli argini,
- altezze idriche ottenute calcolando il profilo idrico senza tenere conto degli argini.

Per l'asta del Fiume Po la Fascia C, delimitata dal PSFF 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 catastofica (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 coincide con quello della B, viene rappresentato convenzionalmente solo il limite della Fascia B.

Dalle definizioni e dalle assunzioni descritte precedentemente si può notare come l'individuazione delle tre fasce ha un grado di approssimazione legato alla attendibilità dei dati idrologici, geomorfologici, idraulici e topografici disponibili.



**Figura 2.1** Rappresentazione schematica dell'articolazione in fasce fluviali

### **2.3 Direttiva 2007/60/CE**

La Direttiva 2007/60/CE pone agli Stati membri “l’obbligo di istituire un quadro per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni volto a ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l’ambiente, il patrimonio culturale e l’attività economiche connesse all’interno della Comunità Europea”.

La Direttiva indica la necessità di privilegiare un approccio di pianificazione a lungo termine che viene scandito in tre tappe successive che possono essere ricondotte a tre diversi livelli di approfondimento. Gli Stati membri devono svolgere queste tre fasi di analisi con delle tempistiche indicate e per ogni distretto idrografico ovvero per ogni bacino idrografico presente nel territorio.

Le tre fasi di attuazione della Direttiva sono:

**Fase 1** – Gli Stati membri devono, sulla base delle informazioni disponibili o di quelle facili da ottenere, procedere ad una valutazione preliminare del rischio alluvionale. Questa deve comprendere mappe in scala del distretto idrografico, descrizioni delle alluvioni significative avvenute in passato e una valutazione delle potenziali conseguenze negative di future alluvioni per la salute umana, l’ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche. L’obiettivo è quello di integrare fin da subito tutti i dati conoscitivi sulla pericolosità, la vulnerabilità ed il rischio rimandando alle fasi successive tutti gli approfondimenti conoscitivi necessari per fornire un quadro di maggior dettaglio sulle condizioni di rischio.

Gli Stati membri sono tenuti a completare questa fase di valutazione preliminare entro il 22 Dicembre 2011.

**Fase 2** – Gli Stati membri predispongono, per le zone del distretto idrografico per le quali esiste un rischio potenziale significativo di alluvioni, o per le quali si possa ritenere probabile che questo si generi (individuate sulla base delle valutazioni preliminari della fase 1) delle mappe di pericolosità da alluvione e delle mappe del rischio nella scala più appropriata.

Tali mappe contengono la perimetrazione delle aree geografiche che potrebbero essere interessate da alluvioni secondo i seguenti scenari:

- a) Scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi;
- b) Media probabilità di alluvione (tempo di ritorno probabile  $\geq 100$  anni);
- c) Elevata probabilità di alluvioni se opportuno.

Per ciascuno degli scenari precedenti devono essere indicati : portata della piena, livello delle acque, velocità del flusso o flusso d'acqua se opportuno.

Gli Stati sono tenuti a completare le mappe della pericolosità e quelle del rischio di alluvione entro il 22 Dicembre 2013.

**Fase 3** – Sulla base delle mappe ottenute nella fase precedente, gli Stati membri stabiliscono piani di gestione del rischio di alluvioni coordinati a livello di distretto idrografico. Gli obiettivi di tali piani sono volti a ridurre la probabilità di accadimento delle alluvioni e all'attenuazione di potenziali conseguenze negative sulla salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e l'attività economica.

I piani di gestione riguardano tutti gli aspetti della gestione del rischio alluvionale e in particolare la prevenzione, la protezione e la preparazione, comprese le previsioni di alluvione e i sistemi di allertamento. La definizione delle tre misure è riportata al punto 2.2 della "Comunicazione Europea in materia di prevenzione, protezione e gestione delle alluvioni" (luglio 2004):

**Prevenzione:** evitare di costruire abitazioni ed impianti industriali in zone già a rischio di inondazione o che potranno esserlo; tenendo conto del rischio di inondazioni per l'edilizia futura e promuovendo una pianificazione adeguata del territorio e buone pratiche nel settore agricolo e forestale;

**Protezione:** adottare misure, sia strutturali che non strutturali, per ridurre il verificarsi di inondazioni e/o il loro impatto in una specifica località;

**Preparazione:** informare la popolazione sui rischi di inondazione e su cosa fare nel caso si verificano tali fenomeni.

Fra le misure di prevenzione e protezione individuate dalla Direttiva 2007/60/CE vi sono la promozione di pratiche sostenibili di utilizzo del suolo, il miglioramento di ritenzione delle acque nonché l'inondazione controllata di certe aree in caso di fenomeno alluvionale.

Gli Stati membri sono tenuti a ultimare e pubblicare i piani di gestione del rischio alluvionale entro il 22 Dicembre 2015.

Si ritiene importante sottolineare che il lavoro di tesi svolto si inserisce perfettamente in quelli che sono gli obiettivi della Direttiva Europea 2007/60/CE. Come illustrato precedentemente, infatti, la seconda fase di attuazione della direttiva prevede la creazione di mappe della pericolosità e del rischio alluvionale.

La redazione di tali elaborati necessita di un metodo per identificare le zone interessate da fenomeni alluvionali e le caratteristiche che li definiscono, come il livello di acqua o la velocità del flusso.

### **3 OBIETTIVI E STRUTTURA DELL'INDAGINE**

#### **3.1 Perimetrazione delle aree potenzialmente interessabili da allagamento statico**

Il presente lavoro ha lo scopo di proporre un metodo per l'identificazione delle aree potenzialmente allagabili durante eventi di piena particolarmente gravosi associati a una rotta nei rilevati arginali di un corso d'acqua, analizzandone l'efficacia. La finalità è quella di aggiornare la mappatura già effettuata nell'ambito del P.A.I. (2001) dell'AdB-Po dei territori a rischio inondazione determinata su basi puramente altimetriche (vedi Capitolo 2).

In questo paragrafo verranno illustrati sinteticamente il metodo utilizzato e gli obiettivi raggiunti dal il punto di vista dell'allagamento statico, ovvero considerando solamente le altezze idriche raggiunte durante le possibili esondazioni.

Lo studio effettuato si concentra su di un unico corso d'acqua, il torrente Stirone, un affluente di sinistra del fiume Taro.

La prima parte del lavoro è stata la raccolta di informazioni idrologico-idrauliche riguardanti il torrente in esame e di informazioni planimetriche della zona prospiciente lo stesso. In questa fase è stato utilizzato un supporto GIS per la visualizzazione dei dati disponibili e per poter l'attuazione sugli stessi dei confronti e delle analisi. In particolare è stato svolto un confronto fra le varie informazioni altimetriche, costituite da modelli digitali delle quote del terreno (DEM), allo scopo di determinare la più rappresentativa.

Dopo aver raccolto le informazioni necessarie lo studio si è svolto con l'applicazione in cascata di due diversi codici di calcolo: un primo codice preposto alla modellazione dei fenomeni di propagazione delle onde di piena nel corso d'acqua ed alla schematizzazione dei diversi scenari di rotta arginale, un secondo codice di calcolo, ovvero un modello idraulico bidimensionale alle differenze finite, utilizzato per simulare alcuni scenari di allagamento e analizzare le modalità di deflusso delle acque esondate nei territori prospicienti la breccia.

Per primo è stato quindi implementato il modello di simulazione della propagazione dell'onda di piena all'interno dell'alveo, consistente in un codice che risolve le equazioni del moto vario mediante uno schema numerico alle differenze finite.

Sono stati inseriti nel programma Hec-Ras della *US Army Corps of Engineers* (ASACE – *Hydrologic Engineering Center* 2001), che rappresenta lo stato dell'arte in quanto a riproduzione del comportamento idraulico di complessi sistemi di corsi d'acqua naturali, tutti i dati relativi alla geometria del Torrente Stirone e sono state definite le condizioni al contorno secondo le informazioni idrologiche a disposizione. Si sottolinea che la scelta è ricaduta su una sollecitazione idraulica particolarmente gravosa, associata ad un tempo ritorno più che bisecolare, per il Torrente Stirone ed una contemporanea condizione di piena per i fiumi Taro e Po.

Dopo aver effettuato alcune simulazioni e calibrato l'apporto idrico degli affluenti, sono state create delle brecce in entrambi i rilevati arginali, di destra e di sinistra, del corso d'acqua. In totale, si sono simulati sei fenomeni di rotta arginale, schematizzando la formazione di tre brecce per ogni lato, ubicate in maniera da rappresentare integralmente il possibile ventaglio di situazioni verificabili lungo l'asta dello Stirone: una breccia nel tratto pedecollinare, una nel tratto vallivo, una nel tratto intermedio.

Come detto sono state effettuate varie simulazioni considerando la possibilità di formazione di una sola rotta arginale alla volta e sono stati memorizzati gli idrogrammi in uscita da ciascuna di queste. Tali idrogrammi rappresentano la portata uscente dalla breccia in funzione del tempo e costituiscono l'informazione in ingresso al secondo modello di simulazione.

Detto modello consiste in un codice di calcolo che risolve le equazioni del moto vario bidimensionale attraverso uno schema numerico agli elementi finiti, che consente un'efficiente riproduzione dei fenomeni di inondazione, sia in termini di identificazione dell'area complessivamente sommersa che in termini di riproduzione della dinamica dell'allagamento.

Il programma usato è il TELEMAC 2D (Galland et al. 1991), un software che si avvale di una griglia di calcolo a maglia (o *mesh*) triangolare, di tipo non strutturato,

che ricopre l'intera area potenzialmente allagabile e che contiene in ogni nodo la quota del terreno fornita dal DEM utilizzato. Sono state definite due mesh di calcolo, in quanto il dominio spaziale è costituito dall'area alla destra dello Stirone e dall'area nel lato sinistro. Successivamente sono state definite le condizioni iniziali e al contorno del modello di simulazione. In questa fase si sono utilizzati gli idrogrammi ricavati dal modello precedente, imponendo che in corrispondenza della porzione di contorno della griglia di calcolo in cui è ubicata la rotta arginale ci sia in ingresso proprio la portata determinata in precedenza.

In totale si sono simulati dodici scenari di allagamento, sei per il lato destro e sei per il sinistro. I risultati forniti dal modello sono, per ogni nodo della mesh di calcolo, il tirante idrico, la velocità del flusso, l'impulso (prodotto velocità-tirante idrico) e altre variabili come il numero di Froude. I valori di ciascuna di queste variabili sono disponibili in funzione del tempo trascorso dall'inizio della formazione della breccia con un intervallo temporale di mezzora.

Il programma consente inoltre di creare delle mappe dell'andamento delle varie variabili all'interno del dominio spaziale e nel tempo. Queste mappe sono state esportate in ambiente GIS per poter essere analizzate ed elaborate.

Per quanto riguarda l'allagamento statico l'informazione di interesse è il tirante idrico nel dominio spaziale, in particolare la massima estensione dell'allagamento raggiunta durante tutte le simulazioni svolte di uno stesso lato.

Il passo successivo è stato quindi quello di creare, dalle mappe importate dal programma di simulazione bidimensionale, che rappresentano l'involuppo di tutte le massime altezze idriche determinate nelle simulazioni. Quest'operazione consente quindi di individuare un contorno esterno all'interno del quale sono comprese tutte le aree potenzialmente allagabili secondo le condizioni idrauliche simulate in questo lavoro, definendo un'area, a partire dai rilevati arginali dello Stirone, che è stata successivamente confrontata con l'estensione della fascia C così come definita nell'ambito del P.A.I..

Il confronto fra le due aree a rischio inondazione fornisce le indicazioni circa l'affidabilità e la precisione dei due metodi di definizione che le hanno determinate concludendo questa parte di analisi.

### **3.2 Perimetrazione delle aree potenzialmente allagabili e interessate da allagamento dinamico**

Dopo aver effettuato il confronto fra la massima estensione delle aree potenzialmente allagabili, determinata con il metodo qui descritto e l'estensione della fascia C, i risultati in uscita dal modello bidimensionale di simulazione sono stati analizzati dal punto di vista dinamico dell'inondazione.

Il principale obiettivo di questa fase di studio è la definizione di una distanza di rischio dagli argini del torrente Stirone, che racchiuda al suo interno le aree interessate da un effetto dinamico pericoloso provocato dall'onda di piena in uscita da un eventuale breccia arginale.

Lo scopo è quello di determinare una relazione semplificata che consenta una valutazione di questa distanza sulla base della geometria della breccia e delle condizioni idrauliche che caratterizzano il corso d'acqua. A questo proposito è stata presa in esame una procedura messa a punto dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (2003) che determina la distanza di sicurezza definendo un adeguato valore soglia di un indice di rischio  $i_r$ .

Questo indice viene definito nella procedura come il prodotto fra la velocità e il tirante idrico, ovvero come portata specifica per unità di larghezza del fronte di propagazione dell'onda di breccia a campagna:

$$i_r = \frac{Q}{L} = v * h$$

Dove:

- $v$  e  $h$  sono la velocità del fronte e il tirante idrico, variabili in funzione della distanza dal corpo arginale,
- $Q$  è la portata in uscita dalla breccia;

- $L$  è la larghezza del fronte di propagazione.

Questa definizione dell'indice di rischio coincide con la definizione di impulso data precedentemente. Impulso anche disponibile come variabile in uscita tra i risultati del modello di simulazione bidimensionale. Proprio i valori dell'impulso determinati da ogni singola breccia simulata sono stati quindi utilizzati per effettuare un confronto con la procedura dei Bacini Romagnoli, in particolare con la definizione della distanza di pericolo.

La procedura definisce una relazione empirica che lega le caratteristiche geometriche della breccia, con la portata massima in uscita dalla stessa e l'intensità idraulica per calcolare la distanza di sicurezza dall'argine:

$$d = \frac{\frac{q_{max}}{i_r} - 1}{2 \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{2} \right)} L_b$$

Dove:

- $d$  è la distanza di pericolo dal fronte della breccia (m);
- $L_b$  è la larghezza della breccia (m);
- $\alpha$  è l'angolo di dispersione della portata di breccia ( $^{\circ}$ );
- $q_{max}$  è la portata massima specifica in uscita dalla breccia ( $\text{m}^2/\text{s}$ );
- $i_r$  è l'indice di rischio ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

La procedura indica come valore soglia per l'intensità idraulica  $0,35 \text{ m}^2/\text{s}$ , utilizzato anche nel presente lavoro.

L'analisi svolta sugli effetti dinamici ha considerato due diverse distanze di sicurezza, la cui unica differenza è la maniera di valutare la portata massima in uscita dalla breccia  $q_{max}$ . La prima distanza chiamata "*distanza proposta*" è calcolata utilizzando i risultati forniti dal modello di simulazione della propagazione dell'onda di piena all'interno dell'alveo. Sono state prese a riferimento le portate massime in uscita dalle brecce secondo le simulazioni effettuate. Per ogni idrogramma in uscita sono state calcolate le distanze di sicurezza che quindi variano in base all'ubicazione della breccia.

La seconda distanza chiamata “*distanza Out Bacini Romagnoli*” è stata calcolata valutando la portata massima in uscita dalle brecce secondo le indicazioni contenute dalla stessa procedura.

Questa, tramite delle analisi mediante modelli di moto vario, costruisce una relazione empirica di regressione fra la portata massima uscente dalla breccia arginale e i parametri che vi influiscono:

$$q_{max} = 0.15 \left( \frac{Q_{max}}{L_b} \right)^{0.5} P^{1.25}$$

Dove:

- $q_{max}$  è la portata massima specifica in uscita dalla breccia ( $m^2/s$ );
- $Q_{max}$  è la portata massima in alveo, presa pari alla  $Q_{200}$  dello Stirone ( $m^3/s$ );
- $L_b$  è la larghezza della breccia (m);
- $P$  è la profondità della breccia (m).

Questa relazione è stata quindi utilizzata per calcolare la portata massima in uscita dalla breccia e valutare così la distanza di sicurezza Out Bacini Romagnoli.

Per entrambe le distanze determinate sono state create delle zone d’influenza a partire da ciascuna breccia che si espandessero secondo l’angolo di dispersione  $\alpha$  scelto fino alla distanza in questione. A questo proposito è stato scelto di porsi nella situazione più cautelativa, in quanto per la scelta di  $\alpha$  la procedura indica un criterio morfologico:  $90^\circ$  per tratti di corso d’acqua rettilinei,  $120^\circ$  per tratti in esterno curva e  $60^\circ$  per tratti in interno curva, per tenere conto del confinamento della dispersione a campagna. La scelta è ricaduta sull’angolo di  $60^\circ$  poiché è quello che garantisce una dispersione minore degli effetti dinamici e quindi una situazione più gravosa per i territori prospicienti la breccia.

La fase successiva dello studio consiste nel determinare, per ognuno dei dodici scenari di rotta arginale simulato, i valori massimi degli impulsi raggiunti in tutto l’arco temporale della simulazione e nel considerare solo i nodi della griglia di calcolo che hanno un valore di impulso maggiore o uguale al valore soglia di  $0,35 m^2/s$ .

Successivamente è stata calcolata la densità di tali nodi all'interno delle zone di influenza create a partire da ciascuna breccia secondo le due distanze di sicurezza determinate. La densità è stata valutata in termini di rapporto fra il numero di nodi della griglia di calcolo, con valore di impulso maggiore della soglia, e il numero di nodi totali compresi all'interno della zona di influenza creata.

La stessa operazione di valutazione della densità è stata inoltre effettuata per altre distanze, sia inferiori che superiori a quelle calcolate precedentemente.

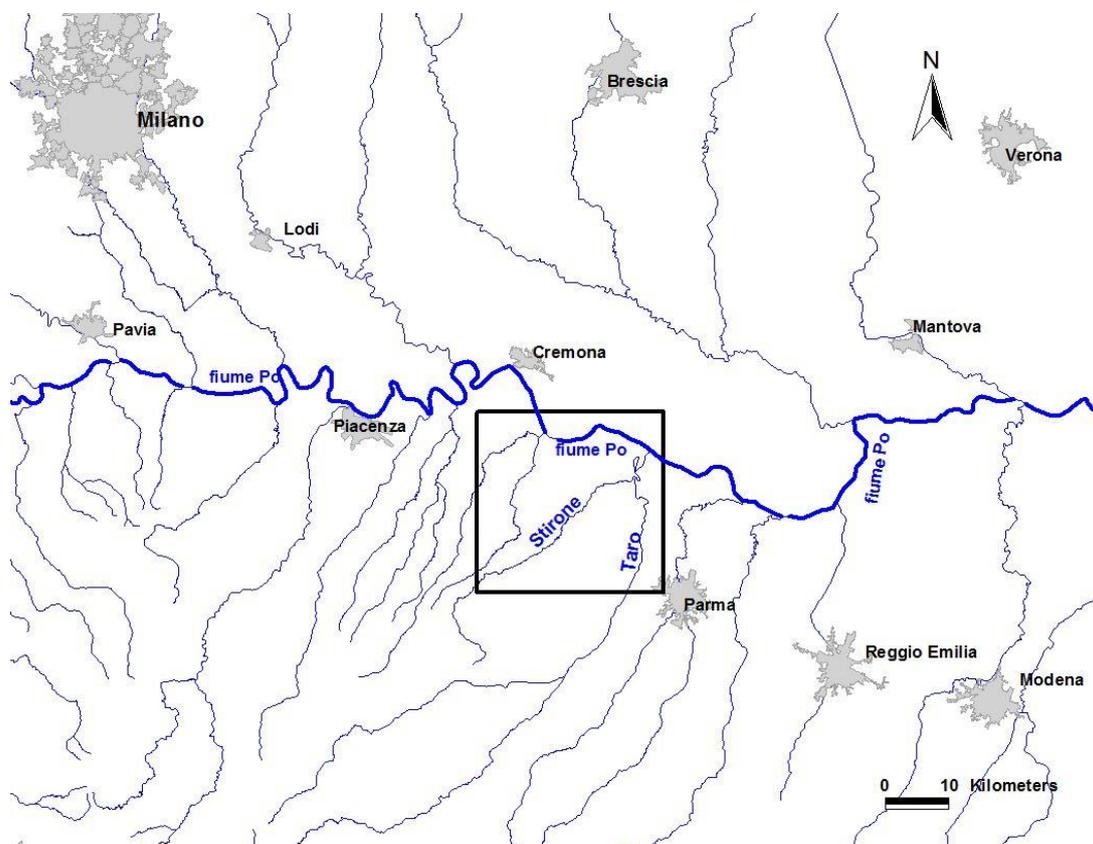
Lo scopo di quest'ultima analisi è quello di ottenere, per ogni scenario di breccia arginale simulato, un grafico che leghi la densità dell'impulso in relazione alla distanza dal fronte della breccia. L'andamento di questa relazione è stato quindi utilizzato per effettuare una valutazione sulle due distanze di sicurezza determinate, in modo da stabilire quale delle due è più rappresentativa per la definizione di una fascia di sicurezza attorno agli argini.

Attraverso un software GIS sono stati inoltre creati due buffer che illustrano graficamente l'andamento delle due distanze di sicurezza in funzione della posizione della breccia lungo il tratto di torrente Stirone in esame.

## 4 DATI E STRUMENTI

### 4.1 Caso di studio: Torrente Stirone

Per effettuare l'analisi delle aree allagabili in caso di esondazione è stato scelto come soggetto dello studio il torrente Stirone. Si tratta di un corso d'acqua situato in Emilia Romagna tra le provincie di Parma e di Piacenza (Figura 4.1). Lo Stirone, essendo un affluente di sinistra del fiume Taro, a sua volta tributario del fiume Po, fa parte del bacino idrografico di quest'ultimo. La Stirone ha origine nell'Appennino parmense, sulla Piana di Maneia, fianco orientale del monte Santa Cristina e Guardia, sopra Pellegrino Parmense. La quota della sorgente è di 695 m s.l.m.. Esso scorre nella parte occidentale della provincia di Parma e per un certo tratto segna il confine con quella di Piacenza. Durante il suo corso i principali centri abitati attraversati sono Salsomaggiore Terme, la periferia ovest di Fidenza (anticamente passava per il centro storico) e il centro abitato di Soragna. Sfocia nel Taro presso l'abitato di Fontanelle a 4 km dalla foce del Fiume Taro in Po.



**Figura 4.1** Rappresentazione schematica della posizione dell'area di studio all'interno del bacino idrografico del fiume Po.

La lunghezza complessiva dello Stirone è di circa 60 km, ma per lo studio effettuato è stato preso in esame solo il tratto vallivo, a partire all'incirca dalla città di Fidenza, per una lunghezza complessiva di 29 km. Per quanto riguarda la larghezza assunta dall'alveo essa varia da poche decine di metri, nel tratto pedecollinare e nella porzione media del bacino dove l'alveo risulta particolarmente incassato, fino ai 100 metri nel tratto prossimo all'abitato di Fidenza.

Lo Stirone presenta un bacino idrografico di limitata estensione territoriale, 302 Km<sup>2</sup> con sezione di chiusura a confluenza in Taro, e riceve i contributi di numerosi affluenti, tra i quali i più importanti sono il torrente Rovacchia ed il torrente Ghiara, entrambi di sponda destra.

Il suo regime fluviale è quello tipico dei torrenti appenninici, caratterizzato da una distribuzione delle portate annue con due massimi, uno autunnale ed uno primaverile, e due minimi, uno estivo ed uno invernale. Nei periodi delle maggiori precipitazioni è possibile la formazione di piene brevi ed intense, non trascurabili ai fini del processo erosivo, mentre nei periodi estivi si assiste ad una drastica riduzione della portata, tanto che l'alveo appare asciutto e caratterizzato solo da pozze permanenti che, tuttavia, assicurano la sopravvivenza agli organismi acquatici.

L'assetto geomorfologico dello Stirone ha subito forti modifiche a causa delle eccessive escavazioni di ghiaia, avvenute negli anni 50-60 per l'avvio della costruzione dell'A1 (Autostrada del Sole) che hanno provocato un abbassamento della quota del fondo alveo.

L'attuale assetto può essere riassunto dividendo il corso d'acqua in tre tratti:

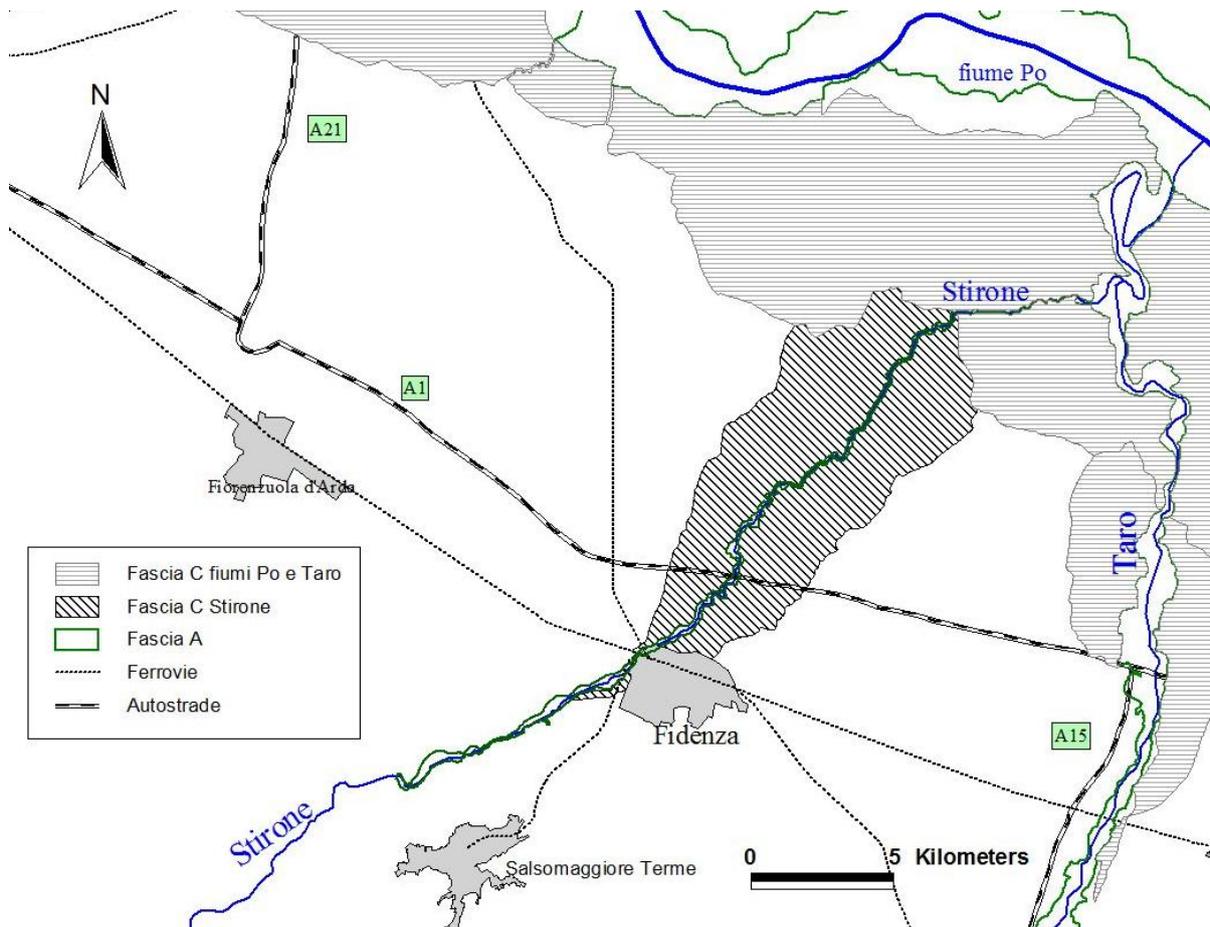
- Tra lo sbocco vallivo e Fidenza l'alveo manifesta forti evidenze di erosione di fondo: sensibile riduzione di larghezza dell'alveo inciso (e conseguente trasformazione in senso monocursale) e disattivazione di tutte le barre laterali, ora trasformate in golene vegetate, a quote fino a 3 m superiori rispetto all'alveo di magra. L'abbassamento d'alveo, che ha raggiunto nel tratto valori massimi dell'ordine dei 3 - 4 m, può essere valutato in media intorno a 1.50 m.
- Tra Fidenza e Soragna l'alveo è vincolato da arginature, parallele e continue, adiacenti alle sponde; a valle del ponte dell'autostrada A1 non si hanno

significative variazioni anche se il confronto, per le caratteristiche tipologiche del corso d'acqua, risulta poco significativo. Tra il ponte dell'A1 e Soragna si osserva la trasformazione in golene stabili e vegetate delle barre laterali presenti, con passaggio a condizioni maggiormente vincolate in relazione a un presumibile approfondimento dell'alveo. Nel tratto sono diffusi fenomeni di erosione spondale, che interessano le opere di sponda e le arginature, alternati a fenomeni di locale deposito con parzializzazione della sezione, causa di nuove instabilità.

- Tra Soragna e la foce, l'alveo è vincolato da arginature continue, parallele e prossime alle sponde e manifesta una generale tendenza alla instabilità della sezione con evidenti dissesti di sponda che coinvolgono in alcuni tratti i rilevati arginali.

Per quanto riguarda le opere di difesa nel tratto di interesse, da Fidenza all'immissione in Taro, sono costituite da arginature continue in destra e sinistra; le fasce golenali delimitate dagli argini sono generalmente ampie e ben definite fino a Castellina di Soragna, per poi diventare di modesta consistenza in prossimità della confluenza.

In tutto il tratto in esame la fascia A del torrente Stirone, così come definita dall'AdB-Po, comprende la zona dell'alveo tra i due rilevati arginali, la fascia B ha la stessa estensione non essendo presenti golene chiuse o molto ampie. Per quanto riguarda la fascia C dello Stirone la delimitazione è descritta più nel dettaglio nel paragrafo 4.6. Nell'area di studio sono presenti inoltre la fascia C del fiume Po che interessa anche la parte finale del corso dello Stirone e la fascia C del fiume Taro (Figura 4.2).



**Figura 4.2** Rappresentazione schematica dell'area di studio e delle fasce fluviali al suo interno

## 4.2 Strumenti di analisi di dati georeferenziati: il GIS

Per tutta l'area dello Stirone e della zona prospiciente sono disponibili varie informazioni da dati geografici geo-referenziati ( di coordinate note in un dato sistema geodetico), che per essere rappresentati e analizzati necessitano di un sistema GIS.

L'acronimo GIS è usato 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: relative alla rappresentazione cartografica degli oggetti rappresentati; quali la forma (punto, linea, poligono), la dimensione e la posizione geografica;
- Topologiche: riferite alle relazioni reciproche tra gli oggetti (connessione, adiacenza, inclusione etc.);
- Informative: riguardanti i dati (numerici, testuali ecc...) associati ad ogni oggetto.

Queste informazioni vengono gestite attraverso un database relazionale, mentre la loro elaborazione è supportata da una vasta gamma di funzionalità.

L'aspetto caratterizzante il GIS è quello geometrico: esso memorizza la posizione del dato impiegando un sistema di proiezione reale che definisce la posizione geografica dell'oggetto e può gestire contemporaneamente i dati provenienti da diversi sistemi di riferimento (es. UTM o Gauss Boaga).

Le informazioni territoriali sono codificate 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, ciascuna associate a informazione relative all'elemento rappresentato; la dimensione del pixel (detta anche *pixel-size*), generalmente espressa nell'unità di misura della carta (metri, chilometri ecc.), 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 ( ad esempio un modello digitale delle quote del terreno).

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.

Tutti questi approcci sono complementari e rappresentano uno strumento completo per tutte le applicazioni a carattere geografico. Esistono vari software per la gestione di tali approcci. Nel presente studio è stata utilizzata l'applicazione ArcView (ESRI, Environmental Systems Research Institute) in grado di svolgere qualsiasi operazione GIS inclusi la produzione cartografica, la gestione di dati, l'analisi geografica, l'editing di dati e l'elaborazione di dati geografici. I dati vengono visualizzati in diversi *layers* o piani.

### 4.3 Informazione topografica disponibile

I dati topografici, del bacino del torrente Stirone e delle zone limitrofe, a disposizione per il lavoro sono:

- **Idrografia:** planimetria di tutti i corsi d'acqua del bacino del Po e informazioni associate. Sono stati utilizzati in particolare i dati sul torrente Stirone e i fiumi Taro e Po. L'idrografia è in formato *shapefile* di ArcView.
- **Planimetria delle fasce fluviali:** informazioni topografiche sulla suddivisione in fasce A, B e C delle aree prospicienti tutti i corsi d'acqua del bacino del fiume Po, così come definite dall'Autorità di Bacino di fiume Po. Anche queste in formato *shapefile*.
- **Rilievo topografico delle sezioni:** database contenente i dati su 80 sezioni del Torrente Stirone rilevate nel 1974. Il rilievo di ogni punto della sezione è costituito da una distanza progressiva e dalla corrispondente quota in m s.l.m. che, messe insieme, disegnano il profilo trasversale dell'alveo fluviale. Sono presenti anche il codice e il nome della sezione stessa e la distanza progressiva. Per lo studio sono state utilizzate nel modello quasi bidimensionale (Hec-Ras) le sezioni dalla 1, sezione di confluenza dello Stirone nel Taro fino alla 67 ovvero a valle dell'immissione del torrente Ghiara nei pressi di Fidenza presa come sezione di monte.
- **Planimetria delle sezioni:** layer di ArcView contenente la traccia in pianta delle sezioni sopracitate e di tutte le altre sezioni rilevate nel bacino del fiume Po. Nello *shapefile* sono presenti anche i dati di ogni sezione come il nome, il codice, il nome del rilievo, la distanza dalla sorgente e le coordinate nel sistema di riferimento UTM32.
- **DEM (Digital Elevation Model):** modello digitale delle quote del terreno in formato raster. Per l'area di studio sono disponibili due differenti modelli con risoluzioni diverse che sono stati messi a confronto per testare la loro affidabilità (v. paragrafo 4.5).
- **Planimetri delle ferrovie, delle autostrade, dei capoluoghi e dei ceti medi** presenti nell'area di studio.

#### **4.4 Informazione idrologico-idraulica**

Per una corretta quantificazione dei volumi esondabili dal torrente Stirone, durante un eventuale evento alluvionale, è necessario fare riferimento a dati idraulici affidabili per poter poi creare un modello di propagazione dell'onda di piena in alveo che riproduca fedelmente i fenomeni che interessano il tratto di corso d'acqua in esame.

I dati utilizzati nel presente lavoro sono stati presi da quelli forniti dall'Autorità di Bacino del fiume Po, contenuti nella "Direttiva sulle piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica". La scelta di questi dati è opportuna anche per avere un confronto attendibile tra le aree allagabili, determinate nel presente lavoro, e l'estensione della fascia C definita dall'AdB-Po. La direttiva utilizzata contiene infatti i valori delle precipitazioni intense nelle diverse aree del bacino e quelli delle portate di piena sui corsi d'acqua principali interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali (nell'ambito del Piano Stralcio delle Fasce Fluviali – PSFF ).

Le informazioni di interesse per questo studio sono i valori delle portate di piena al colmo con assegnato tempo di ritorno ( $T_r$ ) per il torrente Stirone e per il fiume Taro (Tabella 1). Queste sono state determinate dall'AdB-Po (direttiva sulle piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica, AdB-Po 2001) con procedure differenti in relazione alla disponibilità di serie storiche di dati idrologici rappresentativi. Se nella sezione di interesse è presente una stazione strumentata e si dispone di misure di portata al colmo la stima della portata di progetto viene fatta con analisi statistiche dirette. Nel caso contrario, assenza di misure per la sezione in esame, la stima è effettuata con modelli regionali o con analisi statistica delle osservazioni pluviometriche relative al bacino idrografico sotteso dalla sezione di interesse.

Tali informazioni sono state utilizzate nel presente lavoro come condizioni iniziali e al contorno per il modello numerico quasi bidimensionale necessario a riprodurre il comportamento dello Stirone durante eventi di piena.

Bacino	Corso d'acqua	Progr. (km)	Sezione Cod.	Sezione Denom.	Superficie (km <sup>2</sup> )	Q20 (m <sup>3</sup> /s)	Q100 (m <sup>3</sup> /s)	Q200 (m <sup>3</sup> /s)	Q500 (m <sup>3</sup> /s)	Idrometro Denomin.
Taro	Stirone	26.056	83	Roncadello	112	330	530	610	720	
Taro	Stirone	36.016	60	Fidenza	147	380	570	680	800	
Taro	Stirone	60.494	2	Confl. in Taro	302	480	730	870	1020	
Taro	Taro	83.004	111	Fornovo di Taro	1207	1150	1500	1680	1840	
Taro	Taro	103.867	74	Viarolo	1368	1210	1560	1730	1910	
Taro	Taro	117.164	50	San Quirico	1476	1240	1600	1800	1960	S. Quirico
Taro	Taro	136.984	5	Gramignazzo	2040	1570	2150	2390	2700	

**Tabella 1** – Valori stimati delle portate al colmo di piena per il bacino del Taro (Taro,Stirone) con assegnato tempo di ritorno (ad es. Q200 indica il quantile di piena associato ad un tempo di ritorno pari a 200 anni)..

#### 4.5 Confronto tra le basi dati altimetriche disponibili

I dati topografici di tipo altimetrico a disposizione per l'area di studio sono costituiti da due DEM (*Digital Elevation Model*) di diversa derivazione. Si tratta di modelli digitali del terreno ovvero immagini in formato raster le cui celle (pixel) contengono un valore di quota del terreno invece che di luminosità. Per tutta l'area in esame si è in grado quindi di conoscere la quota assoluta con una certa risoluzione, variabile in relazione alle dimensioni di una singola cella e quindi in relazione al tipo di DEM.

Il modello digitale delle quote del terreno rappresenta l'informazione più importante in ingresso al modello 2D creato per le simulazioni delle aree allagabili. Infatti la griglia di calcolo di tale modello infatti viene costruita sulla base del DEM: ogni nodo della griglia contiene la quota del terreno in quel punto. Per questo motivo è stato deciso di dedicare spazio all'analisi e al confronto dei dati altimetrici disponibili per individuare i più realistici.

I dati disponibili sono:

- ASTER GDEM 30(Global Digital Elevation Model): modello digitale delle quote del terreno globale, rilevato dal satellite ASTER della NASA. Questo DEM ha una risoluzione di 30 metri ([www.gdem.aster.ersdac.or.jp](http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp));
- DEM SRTM 90 (Shuttle Radar Topography Mission): progetto congiunto tra NASA e NGA ( National Geospatial-Intelligence Agency del Dipartimento della Difesa statunitense) che nel febbraio del 2000 ha portato alla mappatura di circa l'80 % della superficie terrestre. Il DEM SRTM, attualmente distribuito dal servizio geologico americano (USGS – United States Geological Survey), è fornito con risoluzione di 1 arcosecondo (circa 30 metri, variabili con la latitudine) per gli Stati Uniti e relativi territori, mentre ne viene distribuita una versione “degradata” a risoluzione di 3 arcosecondi (90 metri, variabili) per l'intero globo. La risoluzione disponibile per l'area di studio è di 90 metri (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- DTM LiDAR (Light Detection and Ranging): si tratta di un modello digitale del terreno (DTM) elaborato sulla base di un sistema a scansione laser da aeromobile. Questo tipo di rilievo permette di raggiungere un'elevata risoluzione planimetrica, pari a 2 metri, e una precisione altimetrica pari a 30 cm e non è disponibile per tutta l'area

di studio ma solo per l'alveo del fiume Po (in tutta l'area delimitata dagli argini maestri). Il rilievo LiDAR è in grado di coprire però unicamente la parte di suolo non sommersa dall'acqua in quanto questa ne riflette la scansione laser. Per quanto riguarda quindi la parte di alveo fluviale sommerso è stato effettuato un rilievo batimetrico ad integrazione. L'unione di questi due rilievi ci porta ad avere a disposizione un modello digitale del terreno dell'alveo del fiume Po ad alta risoluzione e precisione (Camorani et al. 2006).

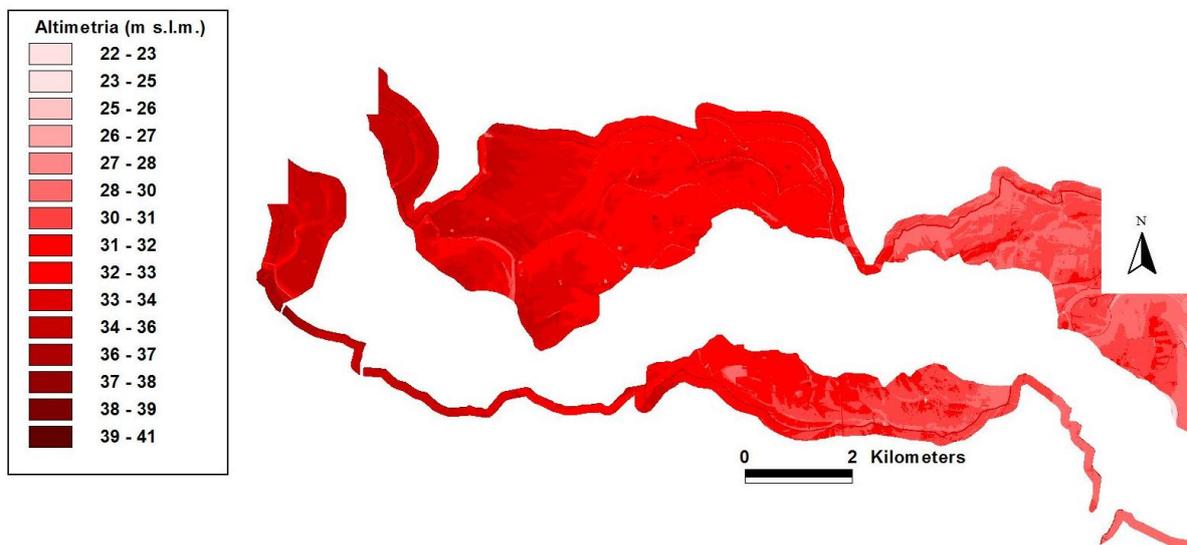
- Vertici Rete GPS7 Emilia Romagna: si tratta di un raffittimento primario a 7 km della Rete Geodetica Fondamentale Nazionale IGM 95. L'informazione è diversa dai precedenti modelli digitali del terreno: in questo caso il dato è disponibile solo in determinati punti dell'area di studio di cui si conosce la quota con un elevata precisione (s.q.m. 6 cm). La regione Emilia Romagna rende disponibili queste informazioni in particolari monografie (Figura 4.3) in cui sono presenti le coordinate dei punti, la quota e una descrizione del vertice che ne facilita l'individuazione.

 <b>Regione Emilia Romagna</b>		<b>PROVINCIA DI PARMA</b>	
Raffittimento Primario a 7 km della Rete Geodetica Fondamentale Nazionale IGM 95			
Vertice GPS	<b>PR008</b>		
<b>Comune</b> S.Secondo Parmense  Località: Case Pizzo		<b>Descrizione</b> <i>Centrino cementato sul manufatto di intubazione del fosso in via Pizzo all'ingresso al n°civ.5 in loc.Pizzo com. di S.Secondo Parmense.</i>	
<b>Data di Rilievo:</b>	<b>DICEMBRE 2003</b>		
Coordinate Ellissoidiche WGS84	Coordinate Cartografiche WGS84	Coordinate Geografiche Roma 40	Coordinate Gauss-Boaga
Lat. = 44° 57' 10.95306"	Nord =	Lat. =	Nord = 4978483,28
Long. = 10° 13' 30.35812"	Est =	Long. =	Est = 1596663,77
Quota ell. = 72,97			Quota s.l.m.= 34,29 **
			** Valori stimati tramite ondulazione N= <b>38,68</b>

**Figura 4.3** Esempio di monografia di un vertice della rete GPS7 dell' Emilia Romagna.

I primi due DEM sono disponibili gratuitamente in rete dal sito del servizio geologico americano (USGS)<sup>1</sup> selezionando l'area di interesse. Entrambi sono stati scaricati in formato *geotiff* e in coordinate UTM32. Il confronto è stato quindi effettuato fra queste due tipologie di DEM e le altre informazioni altimetriche (DTM LiDAR e vertici GPS7), considerate, per la loro elevata precisione e affidabilità, come campione di riferimento.

Il primo confronto è stato fatto con il rilievo LiDAR dell'alveo del fiume Po. Considerando la scarsa affidabilità di un DEM satellitare, come l'SRTM 90 e l'ASTER GDEM 30 su un terreno sommerso dall'acqua, si è deciso di scartare dal rilievo di precisione dell'alveo fluviale la fascia A del fiume Po in modo da poter effettuare il confronto solo con le terre emerse, cioè con le zone golenari e gli argini maestri (Figura 4.4). Il DTM è qui rappresentato con una scala monocromatica che va dal rosso scuro per le quote maggiori (fino a 40 m s.l.m.) al rosso chiaro per le quote inferiori (22 m s.l.m.).

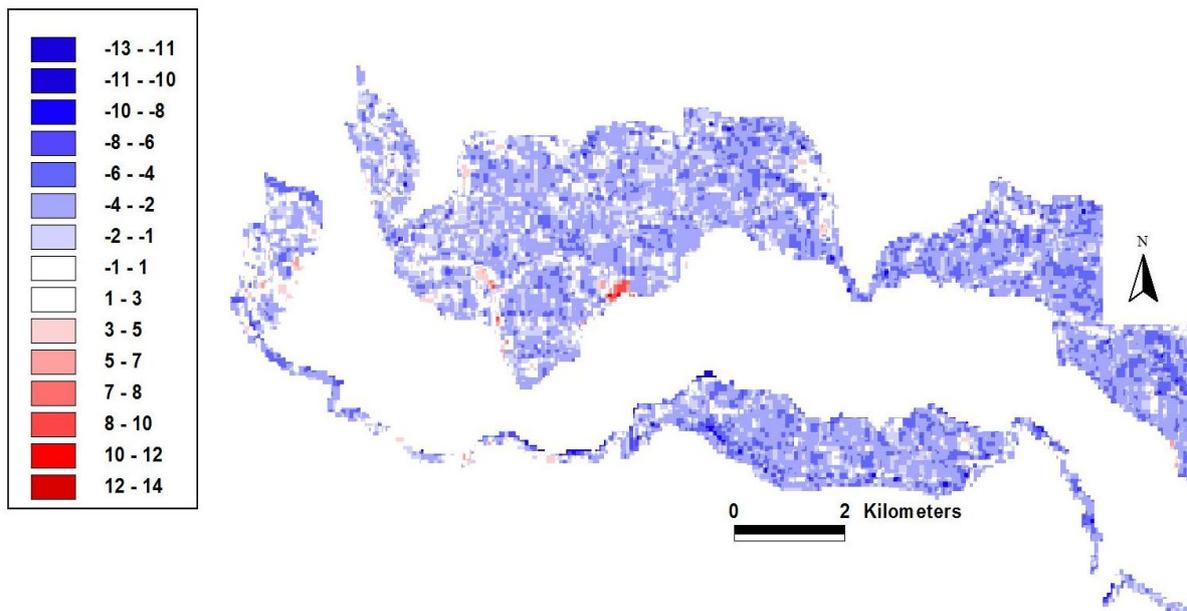


**Figura 4.4** Modello digitale del terreno (DTM) del tratto di fiume Po dell'area di studio considerata e privo della rispettiva fascia A.

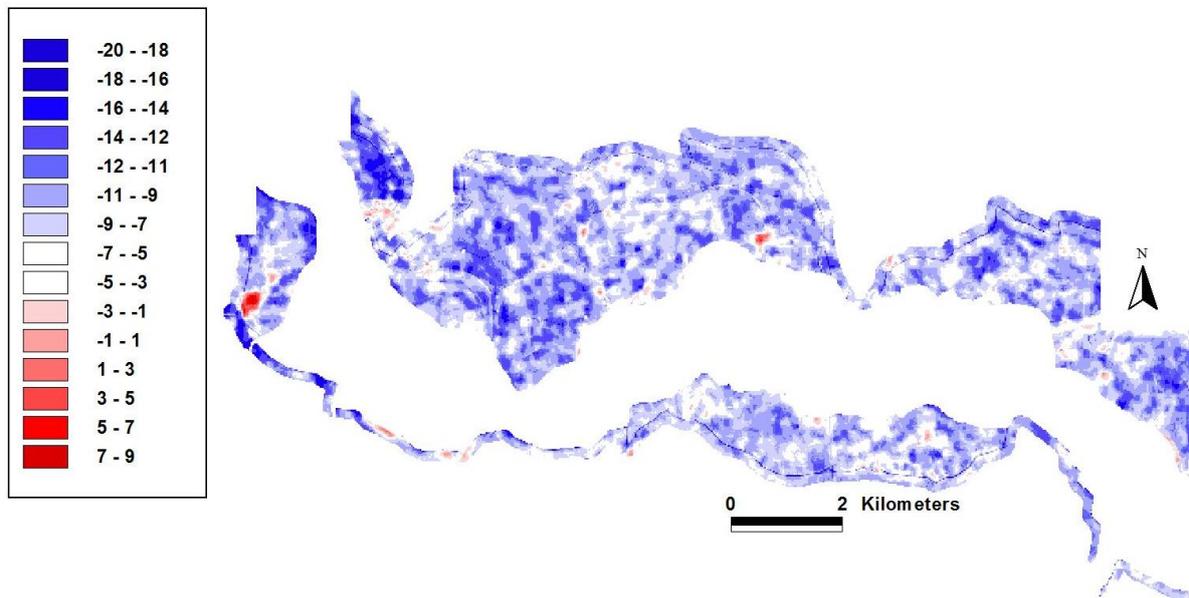
<sup>1</sup> <http://demex.cr.usgs.gov>

Lo strumento utilizzato per effettuare l'analisi è stato il programma ArcView. Il primo passo è stato quindi quello di convertire i due DEM scaricati dal formato *geotiff* al formato *grid*, lo stesso in cui è disponibile il rilievo LiDAR. Questo è un formato di tipo *raster* basato su una griglia di celle quadrate organizzate in righe e in colonne, in cui ciascuna cella è riferita a una collocazione geografica attraverso coordinate x e y. Le dimensioni di tali celle corrispondono alla risoluzione dei DEM disponibili. Per ottimizzare il confronto si è quindi deciso di trasformare il *grid* del LiDAR che ha ogni cella di dimensione 2m nella risoluzione molto inferiore dei due DEM confrontati, pari a 90 metri per il confronto con l'SRTM90 e di 30 metri per quello con l'ASTER GDEM.

Per l'analisi ci si è avvalsi di un apposita funzione di ArcView (Menu Analysis, comando Map Calculator). Questa permette di fare la "sottrazione" tra due *grid* restituendo in uscita un terzo *grid* le cui celle contengono proprio la differenza fra le quote di ogni punto. L'operazione è stata effettuata due volte: il LiDAR è stato sottratto al modello SRTM90 (Figura 4.5) e al modello ASTER GDEM (Figura 4.6).



**Figura 4.5** Risultato della sottrazione tra il modello SRTM90 e il DTM LiDAR. Il modello è rappresentato in scala dicromatica che varia tra il rosso scuro per le differenze positive maggiori (13.78 m s.l.m.) al blu scuro per le differenze negative maggiori ( -13.25 m s.l.m.).



**Figura 4.6** Risultato della sottrazione tra il modello ASTER GDEM 30 e il DTM LiDAR. Il modello è rappresentato in scala dicromatica che varia tra il rosso scuro per le differenze positive maggiori (9.08 m s.l.m.) al blu per le differenze negative maggiori ( - 20.328 m s.l.m. ).

Il confronto può essere effettuato osservando le statistiche dei risultati ottenuti che indicano il valore massimo, il minimo, la media e la deviazione standard della differenza fra i modelli (Tabella 2). Si noti che il modello ASTER tende a sottostimare le quote in misura molto maggiore rispetto al modello SRTM. Le differenze negative sono infatti rispettivamente di circa 20 metri per il primo e di circa 13 per il secondo. Anche la media, con un valore negativo di circa 8 metri, evidenzia una netta sottostima delle altezze da parte del DEM ASTER, a differenza del modello SRTM che invece ha un valore negativo di circa 2 metri.

Secondo questa prima analisi risulta quindi essere più preciso, per quanto riguarda l'informazione altimetrica, il modello digitale del terreno con la risoluzione minore: il DEM SRTM 90.

DEM	Differenza massima (m)	Differenza minima (m)	Media (m)	Deviazione Standard
ASTER	9,08	-20,33	-8,40	2,57
SRTM	13,78	-13,25	-1,83	1,92

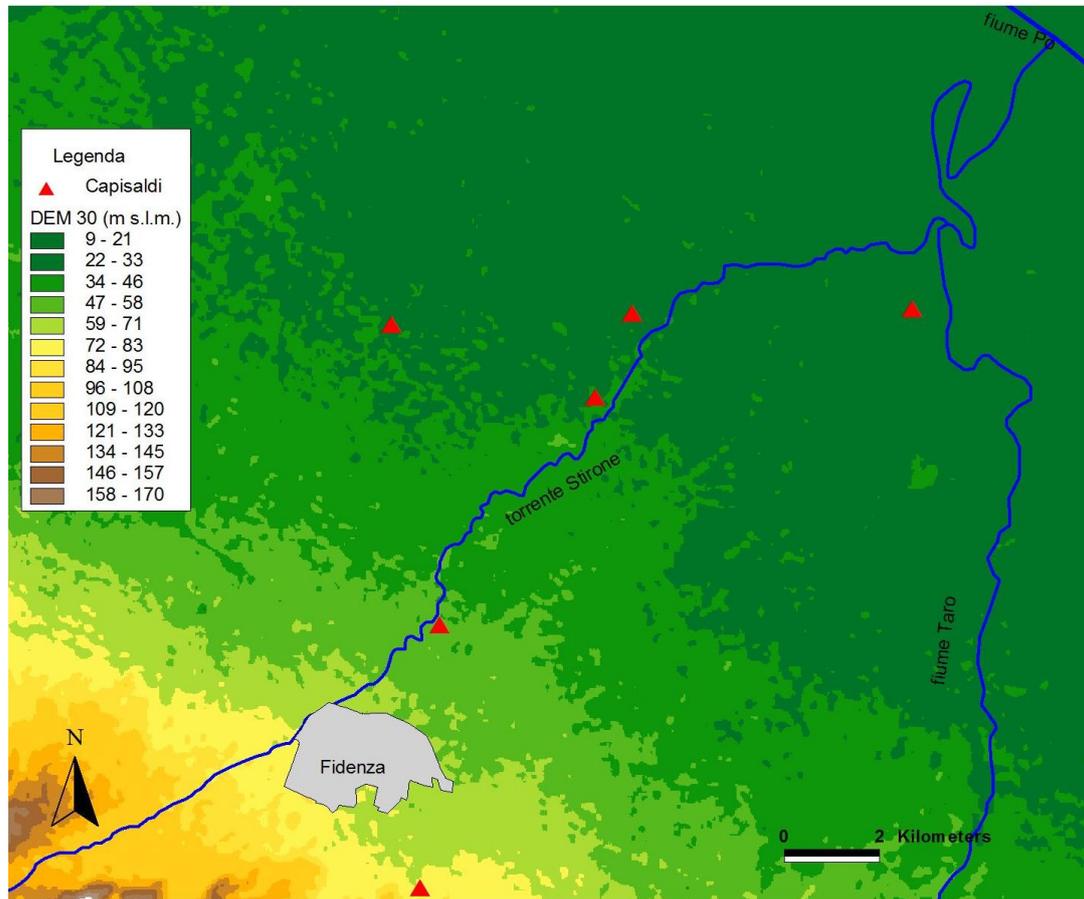
**Tabella 2** Statistiche dei file *grid* risultanti dalla confronto fra il DTM LiDAR dell'alveo del fiume Po e i DEM ASTER e SRTM.

La seconda analisi è stata effettuata mettendo a confronto ciascuno dei due modelli digitali del terreno in esame con i vertici della rete GPS7 dell'Emilia Romagna, le cui monografie, illustrate precedentemente, sono disponibili gratuitamente nel database topografico regionale<sup>2</sup>. In particolare sono state ricavate le differenze fra le quote dei punti dei DEM aventi le stesse coordinate dei capisaldi della rete GPS, con le quote riportate in metri sul livello del mare (m s.l.m.) nelle monografie degli stessi punti.

Nell'area di studio sono stati presi sei vertici della rete GPS (Figura 4.7): questi hanno le coordinate espresse nei sistemi di riferimento WGS84 oppure in Gauss-

<sup>2</sup> <http://archiviocartografico.regione.emilia-romagna.it>

Boaga. Il primo passo è stato quindi quello di trasformarle nel sistema di riferimento di entrambi i DEM in esame ovvero in coordinate UTM 32.



**Figura 4.7** Disposizione nell'area di studio dei sei vertici della rete GPS7 dell'Emilia Romagna usati per lo studio. Il DEM rappresentato è l'ASTER GDEM con risoluzione 30 metri.

La seconda operazione consiste nell'estrarre dai due *grid* le quote dei punti aventi le stesse coordinate dei vertici GPS7. Questo si può fare sempre usando una funzione di ArcView (menu *Grid Analyst*, comando *Extract X,Y, and Z values for point theme from grid theme*) che consente di ricavare le coordinate x,y,z dei punti di interesse dai due *grid*, che corrispondono rispettivamente alle coordinate est, nord e quota in metri sul livello del mare dei vertici GPS7.

In Tabella 3 sono riportate le coordinate dei sei punti, la quota da monografie e le due quote calcolate sulla base dei DEM da studiare.

Coordinate UTM 32 (m)			Quote (m s.l.m.)		
Comune	Est	Nord	Quota vertice GPS	Quota ASTER GDEM (30 m)	Quota SRTM DEM (90 m)
S.Secondo Parmense	596718	4978664	34,29	26,0	32,0
Soragna	590384	4978556	39,82	32,0	38,0
Soragna	589546	4976645	42,19	31,0	40,0
Fidenza	586043	4971465	66,55	52,0	59,0
Fidenza	585592	4965480	89,12	75,0	82,0
Busseto	584941	4978303	39,90	29,0	40,0

**Tabella 3** Coordinate dei punti dei vertici della rete GPS7 usati per l'analisi e delle rispettive quote nei DEM in esame.

Anche da questa seconda analisi emerge chiaramente il fatto che le quote del modello ASTER GDEM si discostino maggiormente dal valore “vero” dei vertici GPS7 rispetto alle quote del modello digitale del terreno SRTM.

In seguito a questi due confronti è stato scelto di utilizzare come DEM di riferimento per la costruzione del modello 2D, l'SRTM 90, perché nonostante la sua risoluzione planimetrica sia inferiore rispetto a quella del modello ASTER, il dato altimetrico risulta essere più preciso. Come spiegato all'inizio del paragrafo è proprio quest'ultimo a rivestire un'importanza maggiore in quanto la griglia di calcolo è costruita su di esso. Il risultato finale sarà quindi tanto più affidabile quanto più precise sono le quote del terreno usate per il modello di calcolo.

#### 4.6 Fascia C torrente Stirone

Un dato molto importante tra quelli elencati precedentemente è la planimetria delle fasce fluviali del torrente Stirone. Questa informazione è disponibile in formato *shapefile* di ArcView e contiene il contorno georeferenziato delle fasce A, B e C e i dati connessi come area, perimetro e codice. Sono disponibili inoltre le planimetrie delle fasce fluviali dei fiumi Po e Taro che interessano l'area in esame.

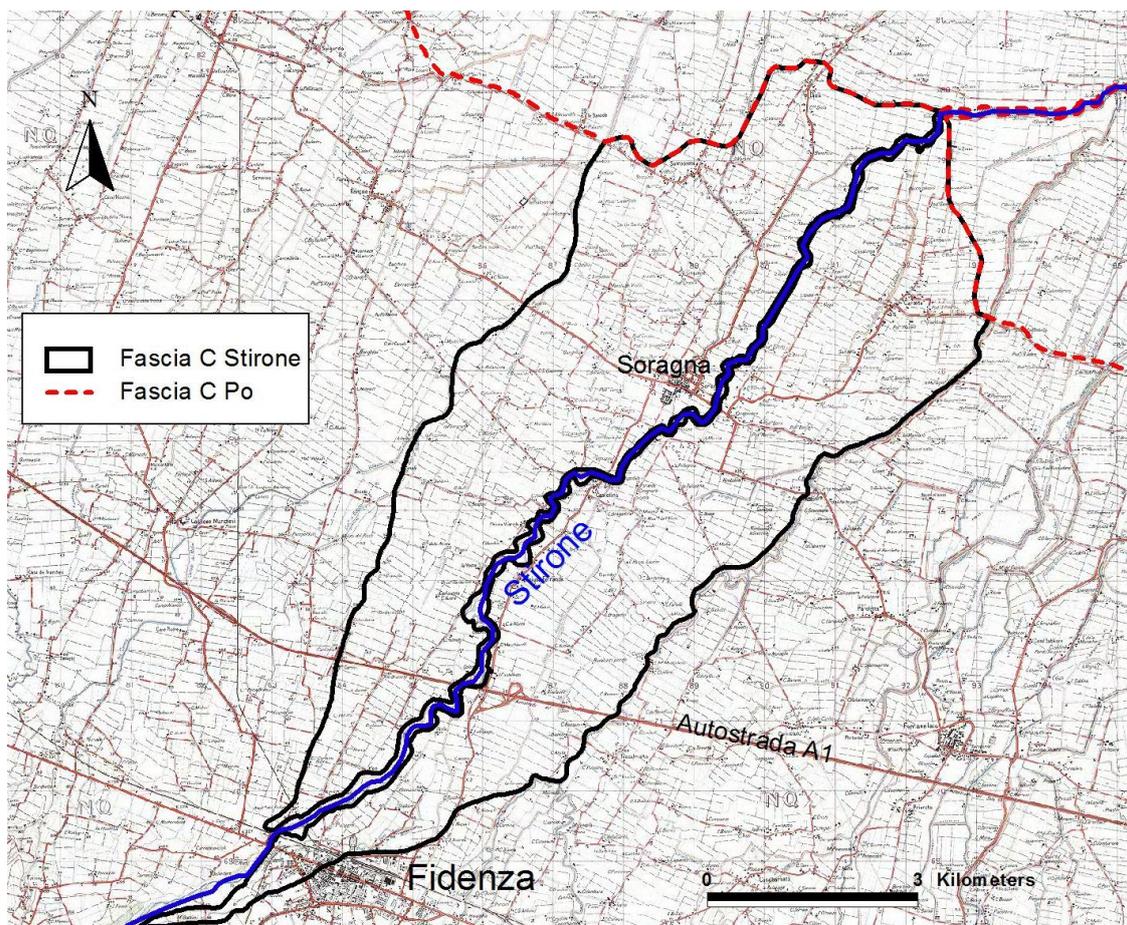
Come già descritto in precedenza, la delimitazione della fascia A coincide quella della fascia B in quanto non sono presenti golene chiuse o sufficientemente ampie per definirne una. Il limite esterno di queste due fasce è identificato con il piede esterno dell'argine maestro.

Il dato che riveste maggiore importanza è però quello dell'estensione della fascia C, area di inondazione per piena catastofica, che si estende all'esterno dei rilevati arginali del torrente Stirone; questa è infatti l'area che verrà successivamente confrontata con quella determinata nell'ambito del presente studio, con l'utilizzo della metodologia di simulazione descritta.

L'estensione della fascia C viene delimitata nel PAI come quella porzione di territorio potenzialmente inondabile in seguito a fenomeni di tracimazione o rottura arginale. Per i corsi d'acqua arginati questa viene identificata raccordando le altezze idriche corrispondenti alla quota di tracimazione degli argini con la topografia dei territori esterni (paragrafo 2.2).

Per quanto riguarda il caso specifico del torrente Stirone, la fascia C si estende sul lato destro a partire da poco dopo la confluenza del torrente Ghiara, mentre sul lato sinistro dalla città di Fidenza, che quindi è in parte compresa nella zona di allagamento. Nei pressi della parte finale dello Stirone verso la confluenza in Taro i territori all'esterno dei rilevati arginali del torrente rientrano invece nella perimetrazione della fascia C del fiume Po (Figura 4.8).

I maggiori centri abitati compresi nell'area di allagamento sono la città di Fidenza e Soragna. Va tenuta in considerazione, ai fini della definizione dell'area allagabile, anche la presenza dell'autostrada A1 che attraversa longitudinalmente tutta la fascia C con, parallelamente a questa, il rilevato della ferrovia della linea Alta Velocità Milano-Roma. Queste opere civili, data la loro importanza in termini di dimensioni e di altezza del rilevato, possono influenzare le dinamiche di allagamento.



**Figura 4.8** Perimetro della fascia C del torrente Stirone e del fiume Po rappresentato su cartografia IGM 25000.

Analizzando nel dettaglio l'andamento della fascia C dello Stirone si può notare come questo segua più che dei confini dettati dal raccordo tra le altezze idriche in caso di piena con l'altimetria dei territori circostanti, dei confini dati da altri corsi d'acqua presenti nella zona, soprattutto nella zona centrale nei pressi dell'abitato di Soragna (Figura 4.9).



**Figura 4.9** Immagine tratta da Google Earth della zona centrale della fascia C del Torrente Stirone

In effetti il perimetro della fascia C, definito dall'AdB-Po, segue sul lato destro l'andamento del torrente Rovacchia, affluente destro dello Stirone stesso e dotato di argini di difesa. Proprio questi rilevati arginali sono stati quindi considerati un limite altimetrico all'eventuale allagamento in caso di esondazione dello Stirone.

Per il lato sinistro invece il perimetro della fascia C segue un altro corso d'acqua minore denominato Scolo Fontana (Figura 4.10 Figura **4.11**). In questo caso però si tratta di un canale di bonifica non dotato di una difesa arginale continua, che quindi può non rappresentare in sé un ostacolo alla propagazione dei fenomeni di inondazione dell'acque eventualmente esondate dal Torrente Stirone. A questo proposito si pensi ad esempio al caso in cui al moento dello straripamento dello Stirone lo Scolo Fontana si trovi in condizioni di sofferenza idraulica a causa di un rigurgito da valle.

Va sottolineato il fatto che il supporto topografico a disposizione nello studio, ovvero il modello digitale del terreno SRTM con risoluzione 90 metri, non consente proprio per il suo basso livello di dettaglio di risolvere la variazione di quota dovuta alla presenza degli ostacoli sopra citati (vedi paragrafo 6.2).

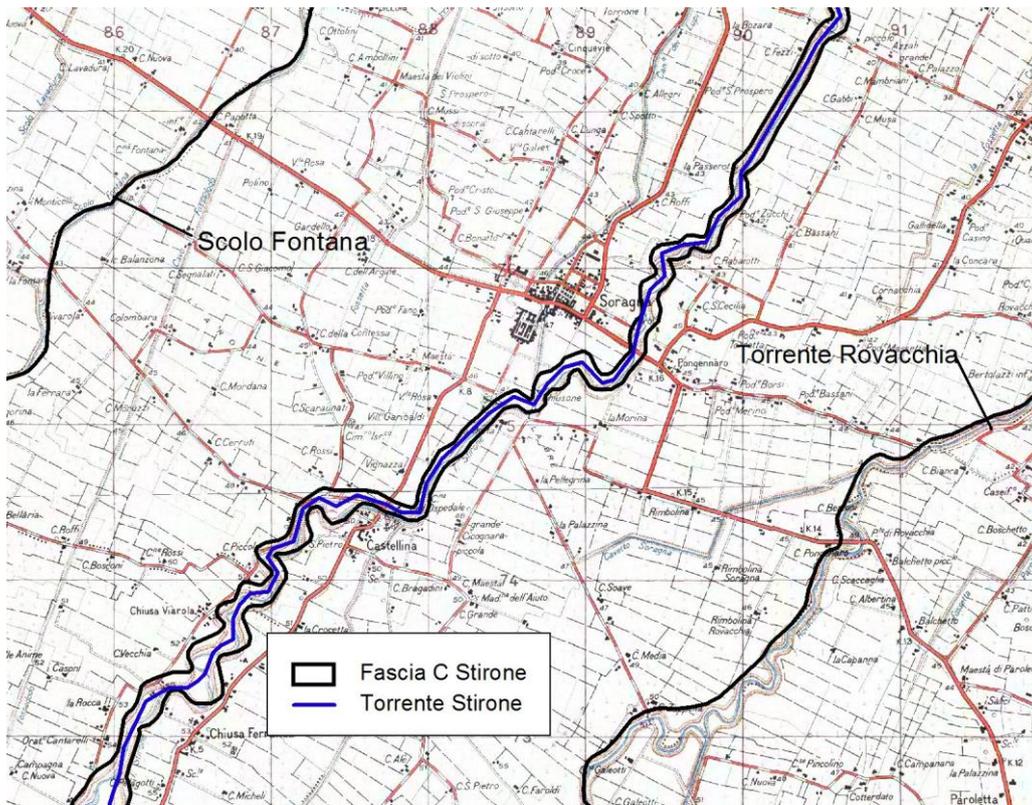


Figura 4.10 Andamento della fascia C dello Stirone delimitata da torrente Rovacchia e Scolo Fontana

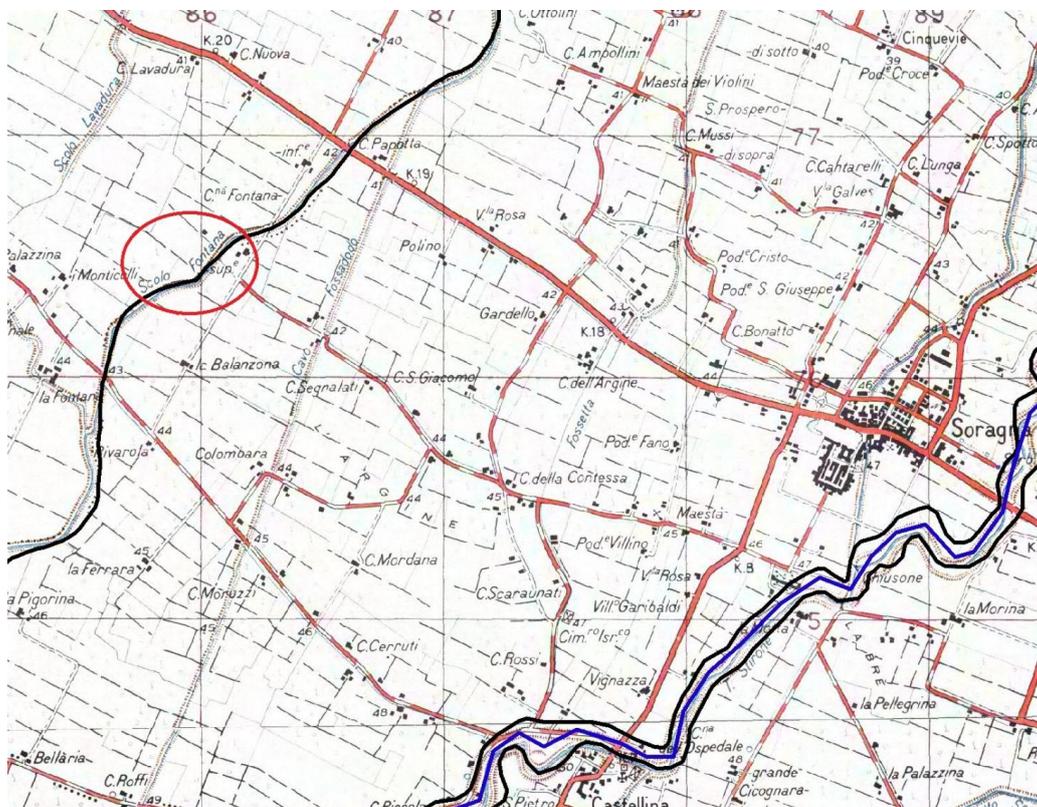


Figura 4.11 Particolare della parte sinistra della fascia C del torrente Stirone delimitata dallo scolo fontana.



## **5 MODELLO NUMERICO IDRAULICO QUASI BIDIMENSIONALE**

### **5.1 Il programma di calcolo HEC - RAS**

Un'attendibile quantificazione dei volumi di piena esondabili dal torrente Stirone in occasione di un possibile evento alluvionale deve necessariamente appoggiarsi su di una corretta riproduzione dei fenomeni idraulici di propagazione delle onde di piena in alveo (Di Baldassare et al. 2009). A tal fine, il tratto in esame dell'asta fluviale dello Stirone è stato schematizzato attraverso un opportuno programma di calcolo, che risolve le equazioni complete del moto mediante uno schema numerico alle differenze finite. L'utilizzazione di detto programma di calcolo ha permesso di raggiungere una fedele riproduzione della propagazione in alveo di onde di piena di assegnata frequenza probabile, fornendo utili indicazioni riguardo all'evoluzione temporale dei livelli e delle portate fluviali durante l'evento di piena considerato. Tali indicazioni sono state successivamente utilizzate nella fase di modellazione dei fenomeni di rotta del rilevato arginale.

Per il presente studio si è deciso di utilizzare come software per la parte di modellazione numerico idraulica il codice di calcolo HEC-RAS (River Analysis System), sviluppato dall'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, essenzialmente dovuta alla sua natura freeware. Questo garantisce la riproducibilità e, dunque la verificabilità delle elaborazioni presentate, con evidenti vantaggi in termini non solo di trasparenza, ma anche di confronto e approfondimento dei risultati conseguiti.

HEC-RAS consente di simulare il moto dell'acqua all'interno di canali naturali o artificiali, sia in moto permanente che in moto vario, tenendo conto dell'influenza sul

moto di eventuali manufatti come ponti, briglie, sfioratori; possono essere modellati sia singoli canali sia reti di canali naturali o artificiali.

Il modello viene definito quasi bidimensionale (quasi 2D) in quanto, nonostante le equazioni usate per la descrizione del moto siano di tipo monodimensionale cioè utilizzano la linea di fondo alveo come unica variabile spaziale (ascissa curvilinea), vi è la possibilità di collegare delle golene laterali rendendo così schematizzabile una realtà bidimensionale.

Il presente lavoro utilizza la funzione di HEC-RAS che consente il calcolo del profilo idrico in moto vario (unsteady flow) attraverso la risoluzione con uno schema implicito alle differenze finite delle equazioni di De Saint Venant:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q_e = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + g A \left( \frac{\partial x}{\partial x} + S_f \right) = 0 \end{cases}$$

Dove  $x$  rappresenta la generica ascissa curvilinea;  $t$  il generico istante di tempo;  $Q$  è la portata;  $A$  l'area bagnata della sezione trasversale;  $q_e$  il termine sorgente cioè la portata per unità di lunghezza dovuta agli apporti laterali;  $V$  la velocità media della corrente;  $z$  la quota del fondo rispetto a un riferimento orizzontale e  $S_f$  la pendenza motrice o cadente. Queste due equazioni rappresentano la prima la legge di conservazione della massa d'acqua (equazione di continuità) e la seconda la conservazione del momento, e sono entrambe basate sulle seguenti ipotesi fondamentali:

- 1) Corrente gradualmente variata o lineare che implica una distribuzione idrostatica delle pressioni lungo una generica sezione verticale;
- 2) Sezioni trasversali piani e verticali ovvero la linea del carico piezometrico della corrente coincide con quella del pelo libero,
- 3) Fluido incomprimibile.

Si tratta di un sistema di due equazioni alle derivate parziali non lineare del primo ordine generalmente non integrabile analiticamente che viene risolto in HEC –RAS

con il codice di calcolo 1D UNET (Barkau, 1997) che consiste in una risoluzione alle differenze finite secondo uno schema implicito a quattro punti comunemente chiamato *box-scheme*. Il codice di calcolo differenzia il flusso nel canale principale e nelle golene e richiede per essere utilizzato l'inserimento della caratterizzazione geometrica dell'alveo in esame, delle eventuali opere civili interagenti con esso e delle opportune condizioni iniziali e al contorno.

Il software consente di dividere queste informazioni in diverse tipologie di file: le caratteristiche geometriche vengono salvate in un *geometry* file, le condizioni al contorno e iniziali del moto vario in un *unsteady* file. L'associazione di due di questi file costituisce un *plan* che consente di simulare un determinato scenario e l'implementazione di più *plan* consente di confrontarli in base alle differenti caratteristiche.

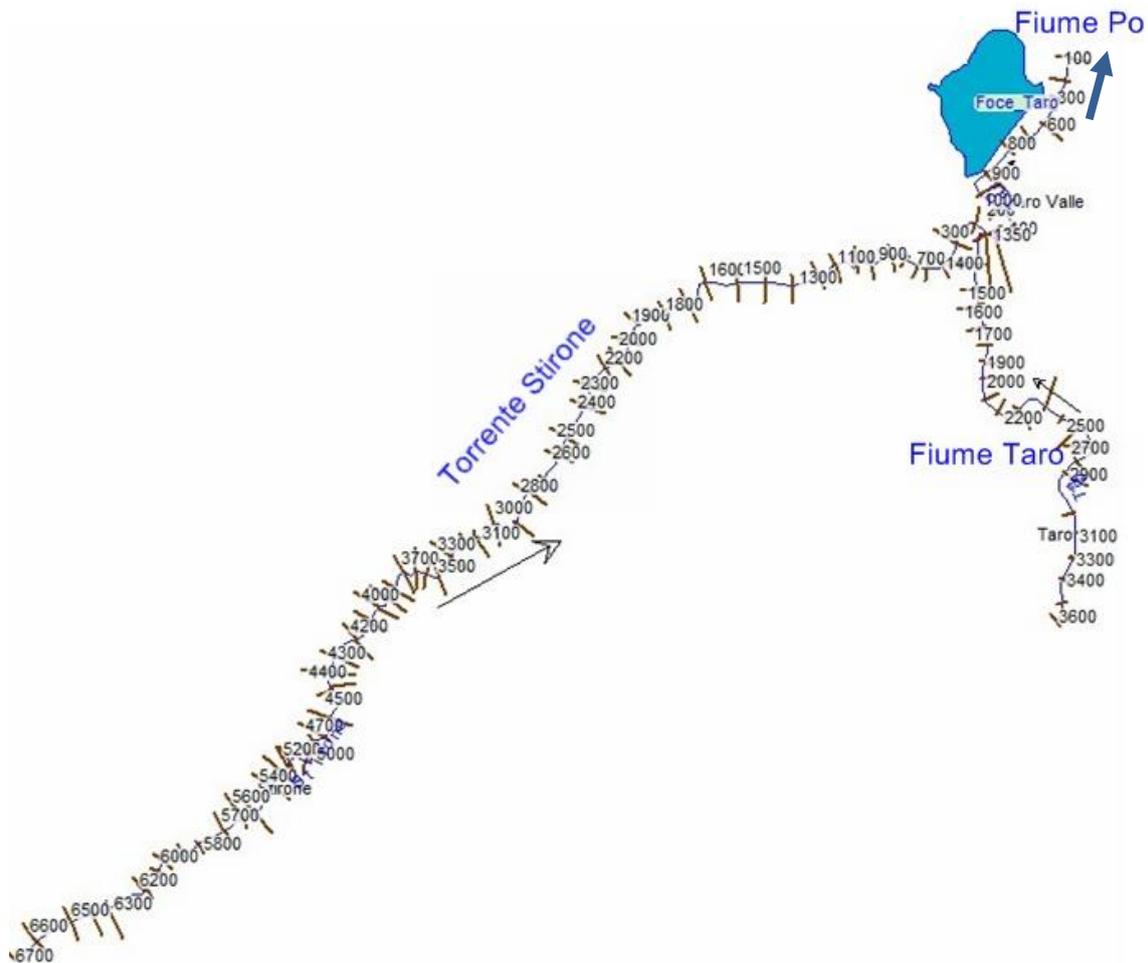
## **5.2 Creazione della geometria del sistema**

La prima fase per implementare il modello numerico consiste nel creare la geometria del sistema ossia nel disegnare l'alveo da analizzare tracciando il sistema di corsi d'acqua, le loro connessioni e la direzione dello scorrimento. Questi vengono identificati dal programma mediante linee che possono essere del tutto schematiche o possono rispecchiare il reale andamento del corso d'acqua. Nel caso del presente lavoro i corsi d'acqua interessati sono il torrente Stirone e il fiume Taro. Quest'ultimo era già stato schematizzato in HEC-RAS precedentemente ed è stato quindi utilizzato il suo *geometry* file, a cui è stato aggiunto lo Stirone. L'andamento del torrente Stirone rispecchia quello reale in quanto la linea di fondo alveo è stata importata dai dati georeferenziati disponibili.

Successivamente i due corsi d'acqua sono stati uniti attraverso la creazione di una *junction* cioè attraverso un'apposita funzione di HEC-RAS che consente l'unione di due canali (Figura 5.1).

La caratterizzazione morfologica dei due corsi d'acqua si completa con la definizione delle sezioni trasversali: queste sono identificate da un numero progressivo crescente

da valle verso monte, usato dal codice di calcolo per posizionarle all'interno dell'asta fluviale a cui appartengono. Le sezioni del fiume Taro (dalla sezione 36 a monte fino alla sezione 1 di confluenza nel fiume Po) come tutto il resto dei dati geometrici, sono già implementati nel programma mentre le sezioni del torrente Stirone sono state prese dal rilievo del 1974 messo a disposizione dall'AdB-Po.



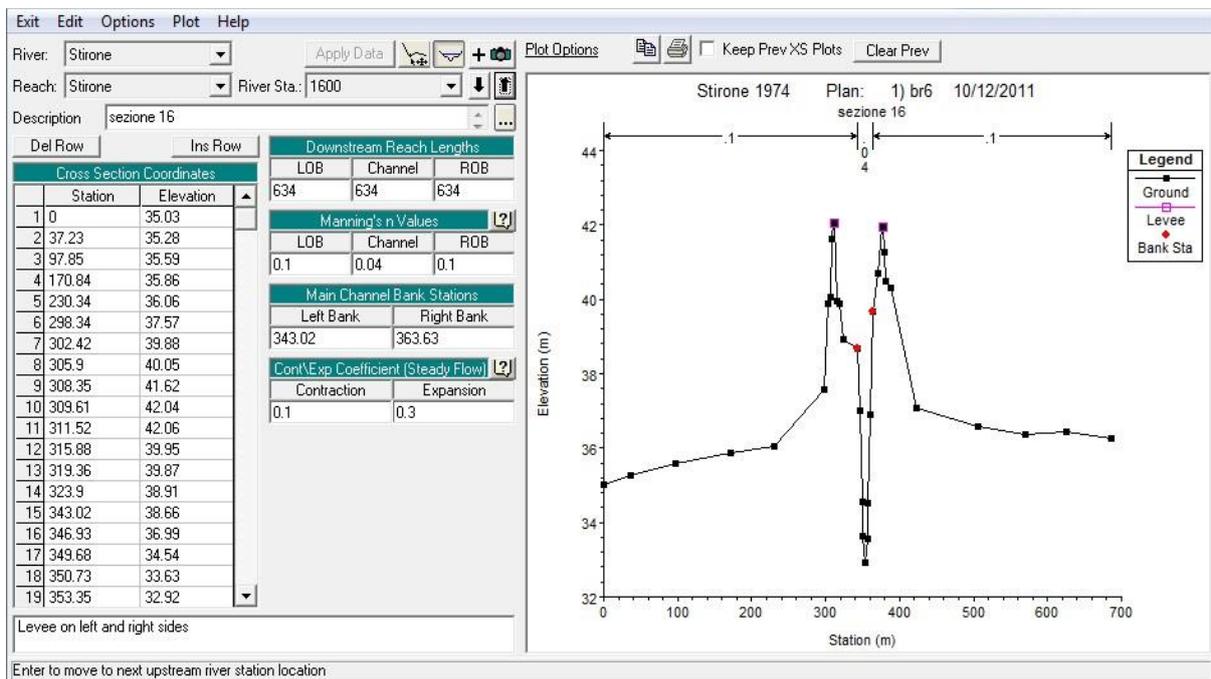
**Figura 5.1** Geometry file dell'area di studio.

L'interesse del presente lavoro è quello di determinare l'area allagabile in caso di esondazioni fluviali e farne un confronto con la perimetrazione della fascia C già esistente. Per questo motivo la caratterizzazione idraulica dello Stirone è stata effettuata a partire dalla zona in cui tale fascia C inizia cioè nei pressi delle città di Fidenza (paragrafo 4.6). Le sezioni prese in esame e inserite nel codice di calcolo

partono quindi dalla sezione 1 in corrispondenza dell'immissione dello Stirone nel Taro fino ad arrivare alla sezione 67 presa come sezione di monte che si trova prima dell'inizio della fascia C, per una distanza totale di 28,8 km.

Per ogni sezione inserita nella geometria del sistema sono stati definiti i limiti del canale principale (*main channel*) per distinguerlo dalle aree golenali (*bank stations*) e sono stati definiti i punti caratterizzanti gli argini (*levee*), indicando le progressive e le quote di questi punti (Figura 5.2). A completamento sono state indicate le distanze tra una sezione e la successiva e sono stati definiti i dati di scabrezza dell'alveo e delle due aree golenali espressi attraverso il coefficiente di Manning (n).

I dati relativi alle scabrezze sono stati presi secondo indicazioni tabellari (v. ad es. Chow 1959) con valore differente tra il canale principale dell'alveo ( $n=0.04$ ) e le zone golenali ( $n=0.1$ ).



**Figura 5.2** Finestra di *editing* per la costruzione di una sezione trasversale e rappresentazione grafica della sezione stessa.

### 5.3 Definizione della sollecitazione idraulica

La simulazione della propagazione dell'onda di piena in alveo effettuata con il software HEC-RAS necessita, come già menzionato precedentemente, della definizione, oltre che della geometria del sistema, delle opportune condizioni iniziali e al contorno del sistema: le prime consistono nei valori iniziali ovvero al primo istante temporale di calcolo delle variabili dipendenti come il livello o la portata idrica; le seconde definiscono invece le variabili nelle sezioni di monte del sistema e nelle sezioni di valle.

Nel presente studio, come condizioni al contorno, sono state definite le portate idriche in funzione del tempo (idrogramma di piena o *Flow Hydrograph*) per la sezione di monte (sezione 67) del torrente Stirone e per la sezione di monte del fiume Taro (sezione 36). Per le condizioni di valle cioè all'immissione del Taro nel fiume Po, è stato definito il livello idrico in funzione del tempo (*Stage Hydrograph*). Un'ulteriore condizione al contorno è data da un apporto laterale (*Lateral inflow*) del torrente Stirone che simula l'immissione di un affluente. Questo apporto deriva da una procedura di calibrazione iterativa, che verrà descritta nel dettaglio successivamente, necessaria per imporre che l'idrogramma sintetico di valle per lo Stirone coincida con l'idrogramma simulato dal modello numerico.

Come già specificato in precedenza, dato l'interesse del presente lavoro nel determinare l'area alleghibile in caso di esondazione fluviale e di farne un confronto con la fascia C corrispondente a piena catastrofica, la scelta della sollecitazioni idrauliche è ricaduta su un evento di piena particolarmente gravoso; in particolare si è scelto di fare riferimento, per quanto riguarda il torrente Stirone ad una piena con tempo di ritorno di 200 anni ( $Q_{200}$ ) la cui portata al colmo è stata ricavata dalla Direttiva sulla Piena di Progetto dell'AdB-Po (vedi paragrafo 4.4). In questa Direttiva sono forniti i valori di portata al colmo per la sezione di Fidenza (sezione 60), usata per costruire l'idrogramma sintetico di monte e il valore della portata al colmo per la sezione di confluenza in Taro (sezione 2), utilizzato per la procedura di calibrazione degli apporti laterali.

Per quanto riguarda il fiume Taro, per la sezione di monte, il valore di portata al colmo, ricavato sempre dalla Direttiva Piene, è stato preso pari alla metà della Q20 (portata con tempo di ritorno ventennale). In questo caso non è stato necessario procedere alla costruzione dell'idrogramma di piena perché il valore di portata al colmo è stato considerato costante durante tutto l'arco di tempo della simulazione.

L'ultima condizione al contorno è rappresentata dalla condizione di valle per il fiume Taro (confluenza in Po). In coerenza con quanto detto precedentemente, anche qui è stato scelto uno scenario gravoso corrispondente a una condizione contemporanea di piena del fiume Po. Per questo è stata scelta la condizione di livello costante nel tempo pari all'altezza dell'argine maestro del Po in prossimità dell'immissione del Taro, diminuito del franco di sicurezza, pari a 1 metro, e dunque una condizione corrispondente ad una piena contemporanea in Po con tempo di ritorno prossimo a 200 anni. La quota arginale è stata desunta dai dati altimetrici ad alta precisione a disposizione e confrontata anche con il profilo di piena fornito dalla Direttiva Piene.

Un riassunto delle condizioni al contorno e dei loro valori usati nell'implementazione del modello è fornito in Tabella 4.

<b>Tratto corso d'acqua</b>	<b>Codice Sezione</b>	<b>Condizione al contorno</b>	<b>Valore</b>
Stirone Monte	Sez. 67	Idrogramma di progetto (Q <sub>200</sub> )	680 (m <sup>3</sup> /s)
Taro monte	Sez. 36	Portata costante	700 (m <sup>3</sup> /s)
Taro valle	Sez. 2	Livello costante	32 (m)

**Tabella 4.** Riassunto delle sollecitazioni idrauliche scelte come condizioni al contorno per il modello numerico

## 5.4 Idrogramma sintetico TR 200 anni

Per l'analisi di molti problemi relativi alla protezione idraulica del territorio, oltre che alle portate al colmo temibili lungo la rete idrografica è necessario valutare anche i volumi delle piene e la loro distribuzione temporale. Un esempio di questi problemi è proprio la definizione delle aree inondabili.

Per trattare queste problematiche si fa riferimento alla definizione di onda di piena sintetica con assegnato tempo di ritorno; a tale proposito si precisa che non è possibile attribuire un valore della probabilità di non superamento ad un onda di piena nel suo complesso ma solo ad alcuni parametri caratteristici della stessa come la portata al colmo.

Nel caso del presente studio sono state utilizzate le portate al colmo con assegnato tempo di ritorno fornite dall'AdB-Po per la costruzione di idrogrammi sintetici con un metodo statistico. Questo metodo prevede la costruzione di una curva di riduzione dei colmi di piena (Maione et al. 2000) ovvero dei quantili delle massime portate medie in assegnate durate. Per le sezioni strumentate la curva di riduzione può essere ottenuta dall'analisi statistica delle massime portate medie in assegnate durate estratte dalle onde di piena storiche. Nel caso in cui non siano presenti sezioni con dati idrometrici come nel caso del presente studio, la stima degli idrogrammi sintetici viene fatta a partire da una stima regionale della legge di riduzione dei colmi di piena e della posizione del picco all'interno di ciascuna durata.

Di seguito si riporta la metodologia di costruzione degli idrogrammi di piena sintetici, procedura che nel presente studio è stata effettuata con il programma di calcolo *Matlab*.

### 5.4.1 Procedura di costruzione degli idrogrammi sintetici

La procedura si basa sulla stima delle curve di riduzione dei colmi di piena ossia dei quantili delle massime portate medie in assegnate durate:

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

Questa curva può essere ottenuta dall'analisi statistica delle massime portate medie in assegnate durate, estratte dalle onde di piena storiche, se si hanno sezioni strumentate; altrimenti con una stima indiretta descritta successivamente.

Ottenuta la curva di riduzione dei colmi di piena, la costruzione dell'idrogramma sintetico si effettua imponendo che la massima portata media in ciascuna durata coincida con quella prevista dalla curva medesima; la forma dell'idrogramma è definita da un coefficiente  $r$  esprimente la posizione del picco ( $0 \leq r \leq 1$ ), calcolato come rapporto tra l'ampiezza dell'intervallo temporale che precede il picco e la durata  $D$  in riferimento alla finestra temporale in cui ricade il massimo valore della portata media di assegnata durata (Figura 5.3). Per ciascuna durata si calcola il valore di  $r$  per tutti gli idrogrammi storici; si calcola poi il valor medio  $r_D$  che viene quindi impiegato per la costruzione dell'idrogramma sintetico.

Le condizioni che definiscono tale idrogramma sono:

$$\int_{-r_D D}^0 Q(\tau; T) d\tau = r_D \overline{Q_D}(T) D \quad \int_0^{(1-r_D)D} Q(\tau; T) d\tau = (1-r_D) \overline{Q_D}(T) D$$

Le espressioni dei due rami dell'idrogramma  $Q(t, T)$ : ramo sinistro prima del colmo e ramo destro dopo il colmo si ottengono derivando le equazioni scritte in precedenza rispetto alla durata  $D$ :

$$Q(t; T) = \frac{\frac{d}{dD} (r_D \overline{Q_D}(T) D)}{\frac{d}{dD} (r_D D)}, \quad t = -r_D D \quad (r_D D_f \leq t \leq 0)$$

$$Q(t; T) = \frac{\frac{d}{dD} ((1-r_D) \overline{Q_D}(T) D)}{\frac{d}{dD} ((1-r_D) D)}, \quad t = (1-r_D) D \quad (0 \leq t \leq (1-r_D) D_f)$$

Ottenuta quindi la curva di riduzione dei colmi di piena e la posizione media del picco è possibile costruire l'idrogramma sintetico con tempo di ritorno assegnato.

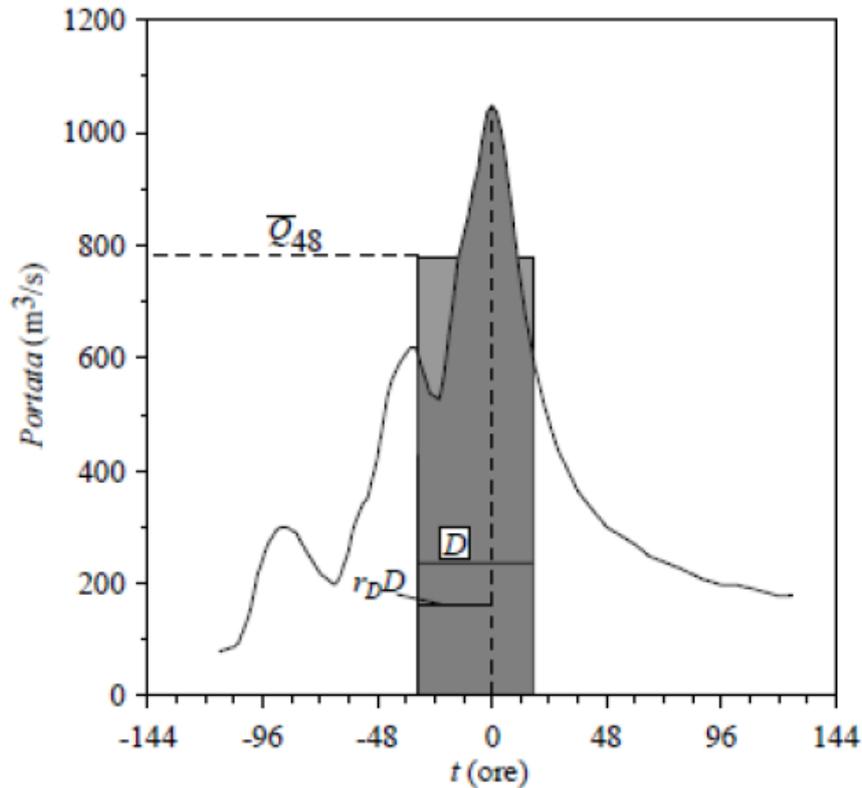


Figura 5.3 Posizione del picco  $r_D$ .

#### 5.4.2 Stima indiretta della curva di riduzione dei colmi di piena

Nel caso di assenza di dati storici si può procedere a una stima indiretta della curva di riduzione dei colmi di piena. Per questa operazione è conveniente porre in relazione i quantili  $\overline{Q}_D(T)$  con quelli della portata al colmo  $Q_0(T)$  per mezzo del rapporto di riduzione  $\varepsilon_D(T)$ :

$$\overline{Q}_D(T) = \varepsilon_D(T) Q_0(T) \quad \varepsilon_D(T) = \frac{\overline{Q}_D(T)}{Q_0(T)}$$

I quantili  $\overline{Q}_D(T)$  possono essere ottenuti una volta identificata e tarata la funzione  $\varepsilon_D(T)$  e valutata la distribuzione di probabilità delle portate al colmo.

In generale il rapporto di riduzione dipende dalla durata  $D$ , dal tempo di ritorno  $T$  e da un insieme di parametri rappresentativi delle caratteristiche del bacino idrografico che influenzano il fenomeno di piena.

Un approccio di tipo deduttivo al problema della caratterizzazione della legge di riduzione dei colmi di piena è stato proposto in letteratura tra gli altri da Bacchi e Brath.

Tale impostazione, di tipo stocastico, fa uso delle proprietà degli attraversamenti di un generico valore di soglia da parte dei processi stocastici stazionari a parametro temporale continuo e delle loro integrazioni su finestre temporali di differente ampiezza (Bacchi e Brath, 1990);

Da questa impostazione si ricava per il rapporto di riduzione l'espressione:

$$\varepsilon_D \approx \sqrt{\Gamma(D)} = \sqrt{\frac{\theta}{2D} \left[ 2 + e^{-\frac{4D}{\theta}} - \frac{3\theta}{4D} \left( 1 - e^{-\frac{4D}{\theta}} \right) \right]}$$

in cui la funzione  $\Gamma(D)$  è la funzione di varianza, ovvero il rapporto tra la varianza del processo aggregato alla scala  $D$  e quella del processo istantaneo. Il parametro  $\theta$  è la scala temporale di fluttuazione, cioè l'integrale della funzione di autocorrelazione del processo istantaneo.

Bacchi e Brath (1990) hanno proposto per le grandezze statistiche coinvolte nella loro formulazione una procedura di calibrazione che utilizza l'informazione idrologica più comunemente disponibile ed è suscettibile di una regionalizzazione.

### 5.4.3 Stima regionale dei rapporti di riduzione e della posizione del picco

Il parametro  $\theta$  può essere determinato, come detto precedentemente, sulla base di formule di stima regionali. Nell'ambito di questo lavoro si è fatto riferimento in particolare a formule ottenute e tarate sulla base delle onde di piena storiche registrate in 14 stazioni idrometeorologiche dell'Italia Centrosettentrionale appartenenti prevalentemente al bacino del fiume Po (tra cui anche il fiume Taro) e a quello

dell'Arno, tutte caratterizzate da almeno 20 anni di osservazioni (N. Ravanini tesi di laurea Specialistica 2003).

Il modello regionale ha esaminato vari indici morfologici come l'area drenata, la lunghezza dell'asta principale, l'altitudine media del bacino rispetto alla sezione di chiusura o combinazioni di tali grandezze.

La formula di stima regionale ottenuta è:

$$\theta = 0.0953 L^{1.21}$$

Dove L, lunghezza dell'asta principale, è risultato essere l'indice morfologico più significativo. Con la precedente espressione si determina quindi l'andamento del rapporto di riduzione stimato.

Per quanto riguarda la posizione del picco  $r_D$ , si è fatto riferimento ad un altro lavoro condotto su una serie sintetica di 50 anni di portate orarie riferite al fiume Secchia, affluente di destra del Po che scorre tra le province di Reggio Emilia e Modena (Pollicino, 2007).

L'andamento che meglio approssima  $r_D$  è di tipo esponenziale a due parametri:

$$r_D = r_{D\lim} + (0,5 - r_{D\lim}) \cdot e^{-\frac{D}{k}}$$

Per i parametri  $R_{D\lim}$  e K sono stati utilizzati dei valori valutati sulla base di varie applicazioni del metodo di costruzione indiretta dell'idrogramma sintetico.

Si ricorda inoltre come la posizione del picco sia solamente un fattore di forma per la costruzione dell'idrogramma ma questa non influisce sulla stima dei volumi idrici interessati dall'onda di piena.

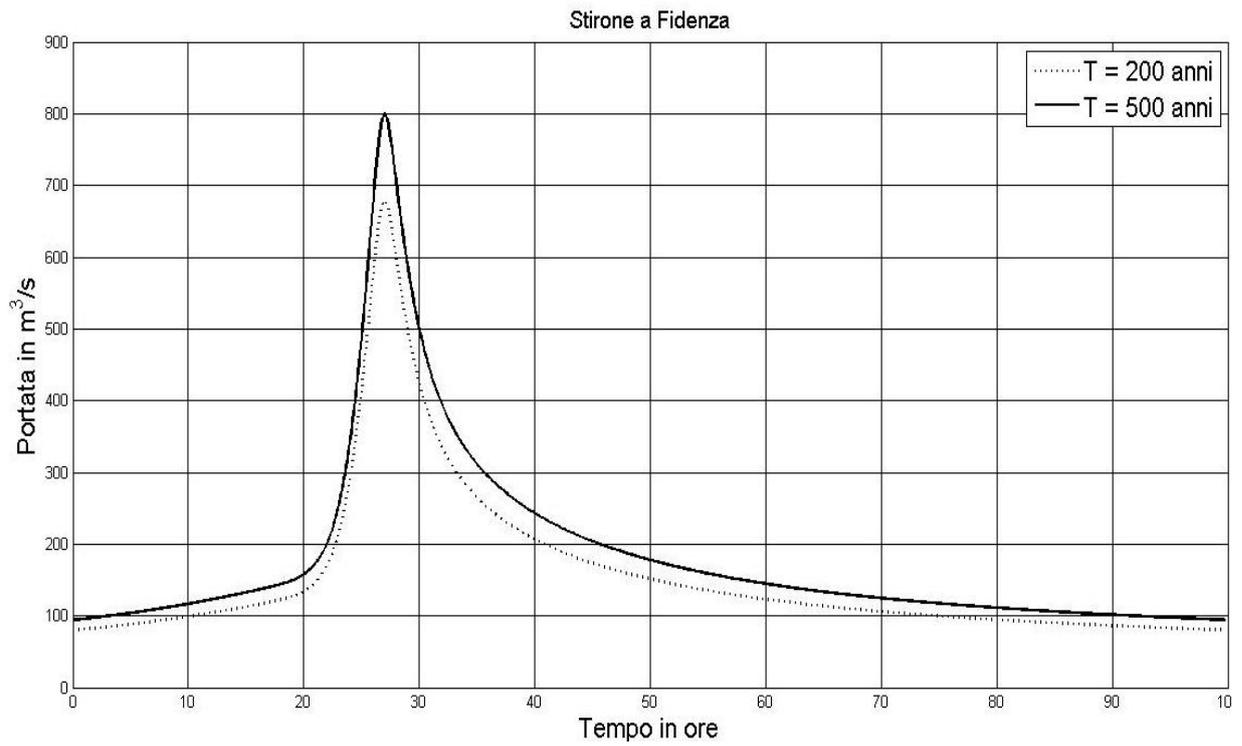
#### 5.4.4 Applicazione del metodo di costruzione degli idrogrammi sintetici

Per applicare il metodo statistico di costruzione dell'idrogramma sintetico di piena si è utilizzato il programma di calcolo Matlab. Il codice di calcolo effettua tutte le operazioni descritte in precedenza necessarie alla stima indiretta della curva di riduzione del colmo di piena e successivamente procede alla creazione degli idrogrammi così ottenuti e anche alla scrittura di un file di testo contenente la portata idrica, per assegnato tempo di ritorno, in funzione del tempo in ore.

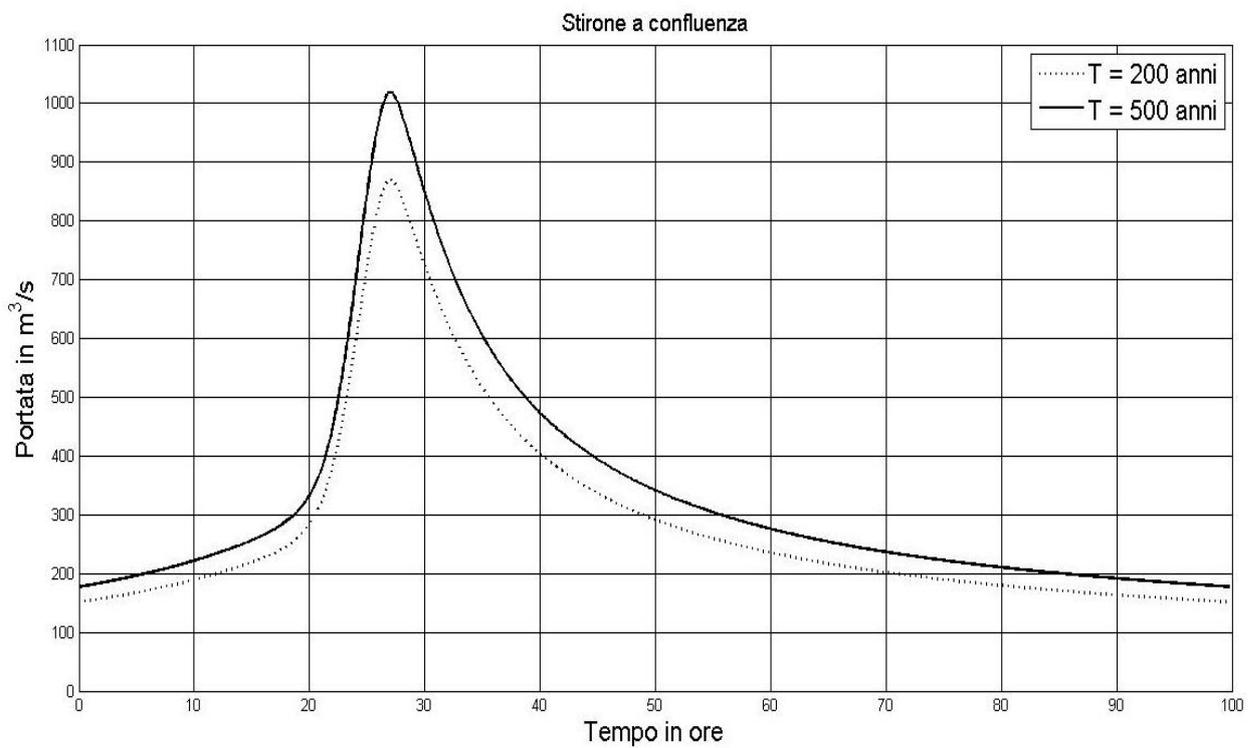
Il calcolo è stato effettuato in riferimento alle portate al colmo con tempo di ritorno pari a 200 anni e 500 anni per le sezioni di monte (sezione 67) e di valle (sezione 2) del torrente Stirone. Inserendo nel programma la lunghezza dell'asta fluviale per la specifica sezione in analisi si ottiene con la formula regionale la stima del rapporto di riduzione che porta alla costruzione degli idrogrammi sintetici.

L'operazione ha consentito di ottenere gli idrogrammi di piena usati come condizioni al contorno sotto forma di *flow hydrograph* necessarie all'implementazione del modello numerico in HEC-RAS.

I grafici delle curve ottenute per i tempi di ritorno pari a 200 e 500 anni sono riportati nelle Figure 5.4 e 5.5.



**Figura 5.4** Idrogrammi sintetici con tempo di ritorno di 200 e 500 anni riferiti alla sezione 67 del torrente Stirone.



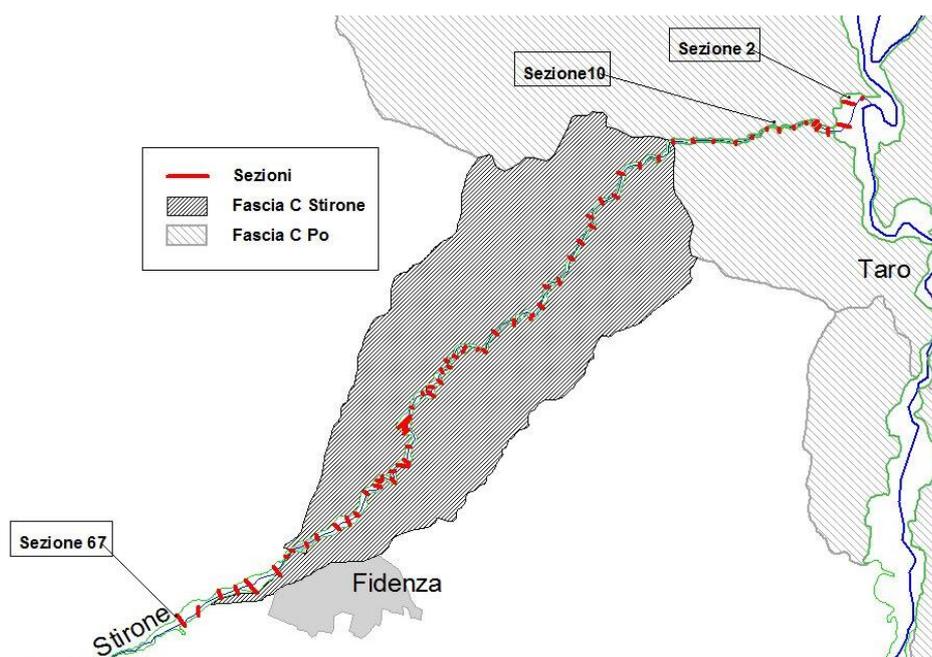
**Figura 5.5** Idrogrammi sintetici con tempo di ritorno di 200 e 500 anni riferiti alla sezione 2 del torrente Stirone.

## 5.5 Calibrazione degli idrogrammi sintetici degli affluenti

Una volta definiti gli idrogrammi sintetici riguardanti la sezione di monte del torrente Stirone e la sezione di confluenza in Taro si è proceduto effettuando la calibrazione degli idrogrammi degli affluenti. Questa operazione è necessaria per rappresentare in maniera ancora più accurata l'evento di piena interessante il tratto di Stirone in esame.

Effettuando una prima simulazione con le condizioni al contorno descritte nel paragrafo 5.3 e senza apporti laterali (*lateral inflow*), l'onda di piena con  $T_{rit}$  di 200 anni, inserita come condizione di monte (sezione 67), viene laminata dal programma di simulazione numerica di propagazione HEC-RAS e arriva alla sezione di valle (sezione 2) con una forma diversa dall'onda sintetica ( $T_{rit}$  200) ricavata precedentemente (Figura 5.7).

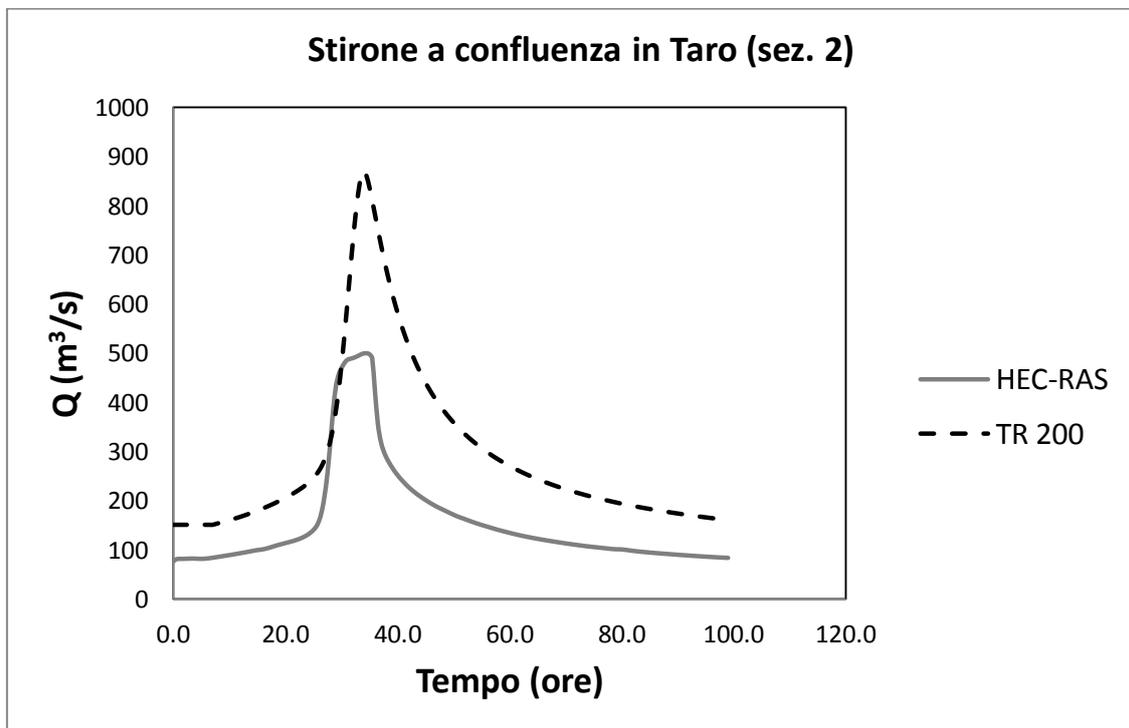
La differenza fra le due onde di piena fornisce un'indicazione sui volumi idrici apportati dagli affluenti dello Stirone nel tratto considerato. Per una corretta simulazione del comportamento reale in caso di piena, in coerenza con i dati forniti dalla Direttiva Piena, si è deciso di schematizzare l'apporto idrico degli affluenti con un'immissione laterale concentrata. Questa è stata situata nella sezione 10 (Figura 5.6), ovvero in corrispondenza dell'immissione del torrente Rovacchia, considerato l'affluente più importante nel tratto considerato dello Stirone.



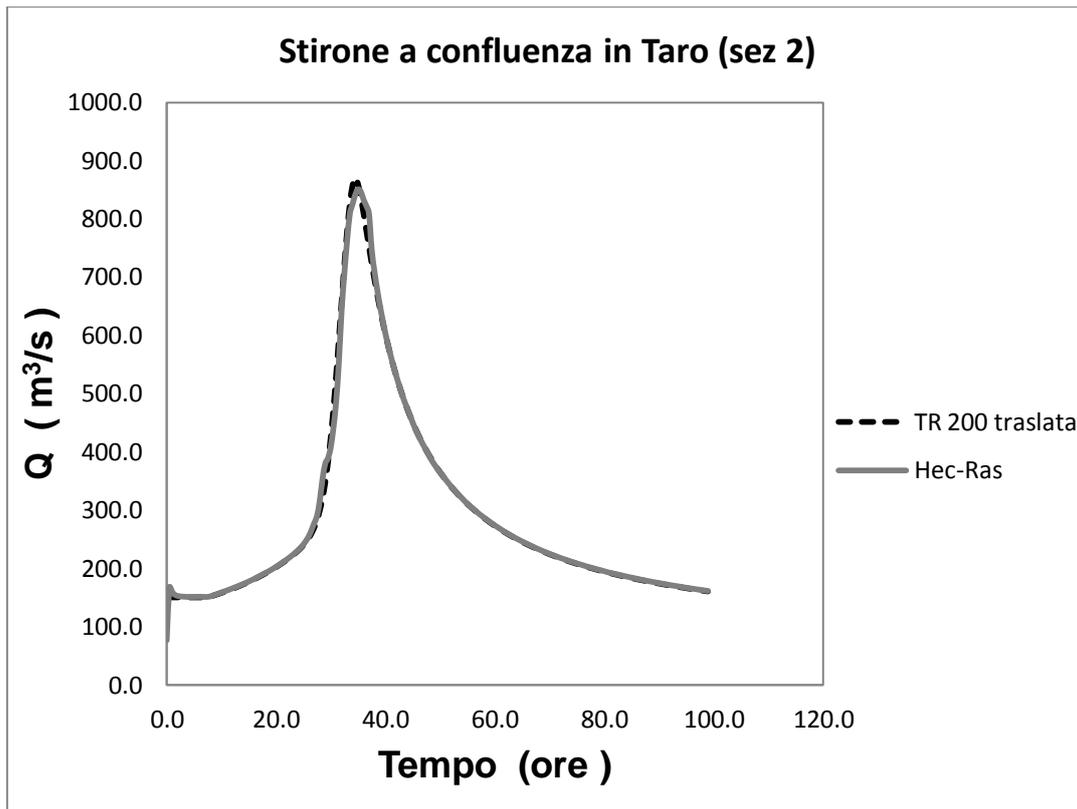
**Figura 5.6** Rappresentazione schematica delle sezioni dello Stirone utilizzate.

La fase successiva è stata quindi la determinazione dell'entità di tale apporto laterale con un procedimento di calibrazione svolto in maniera iterativa. Ad ogni step si è proceduto con una simulazione in HEC-RAS per ottenere l'idrogramma risultante in corrispondenza della sezione 2 e al confronto con l'idrogramma sintetico costruito come descritto precedentemente (Trit 200) e successivamente, in base alla differenza fra i due, si effettua una stima del *lateral inflow*. Questo iter è stato ripetuto fino al raggiungimento di un grado di precisione soddisfacente.

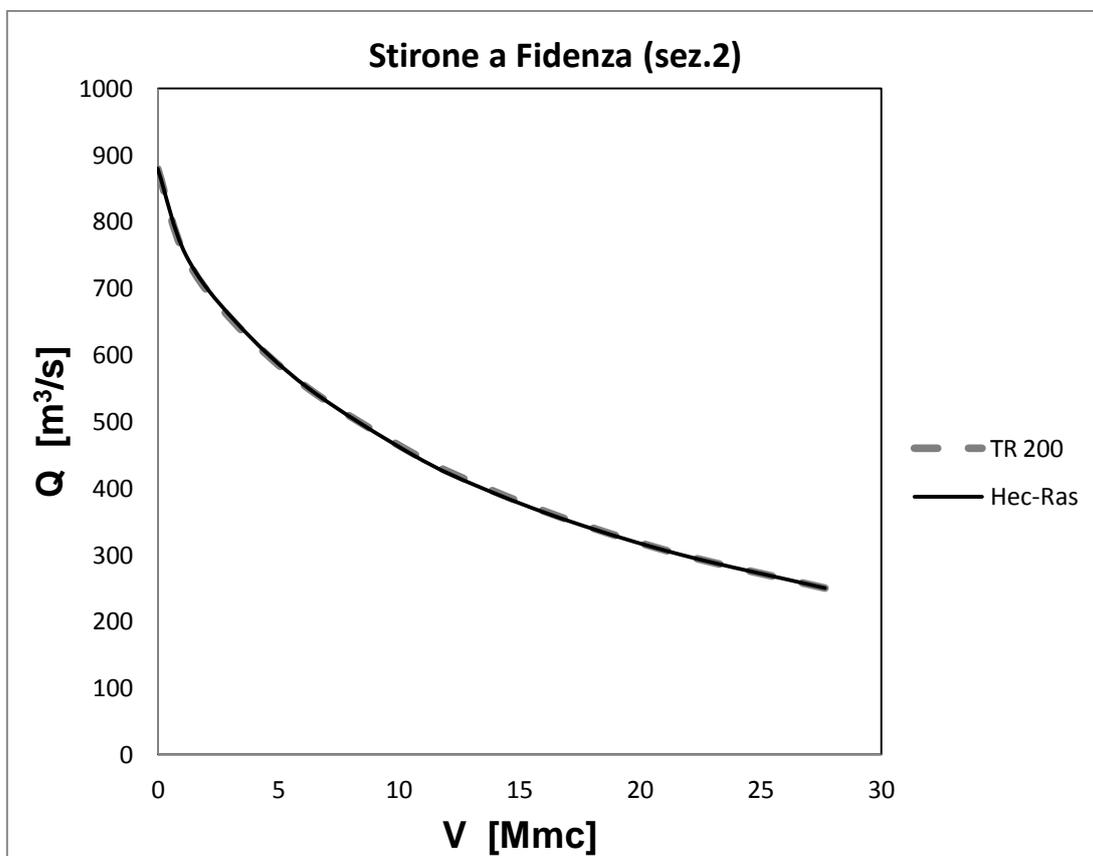
Il risultato ottenuto dopo tre iterazioni, soddisfacente in termini di forma dell'onda di piena (Figura 5.8), che appare pressoché coincidente, è stato confrontato anche in termini di volumi laminati. Per fare ciò sono state messe a punto due curve portata – volume laminato in cui, per i due ideogrammi messi a confronto, sono stati calcolati i volumi laminati in corrispondenza di una serie di valori di portata presi in ordine decrescente dalla portata massima degli idrogrammi (Figura 5.9).



**Figura 5.7** Confronto fra idrogramma sintetico (TR 200) e idrogramma simulato (HEC-RAS) prima dell'operazione di calibrazione degli affluenti.



**Figura 5.8** Confronto fra idrogramma sintetico (TR 200) e idrogramma simulato (HEC-RAS) dopol'operazione di calibrazione degli affluenti.



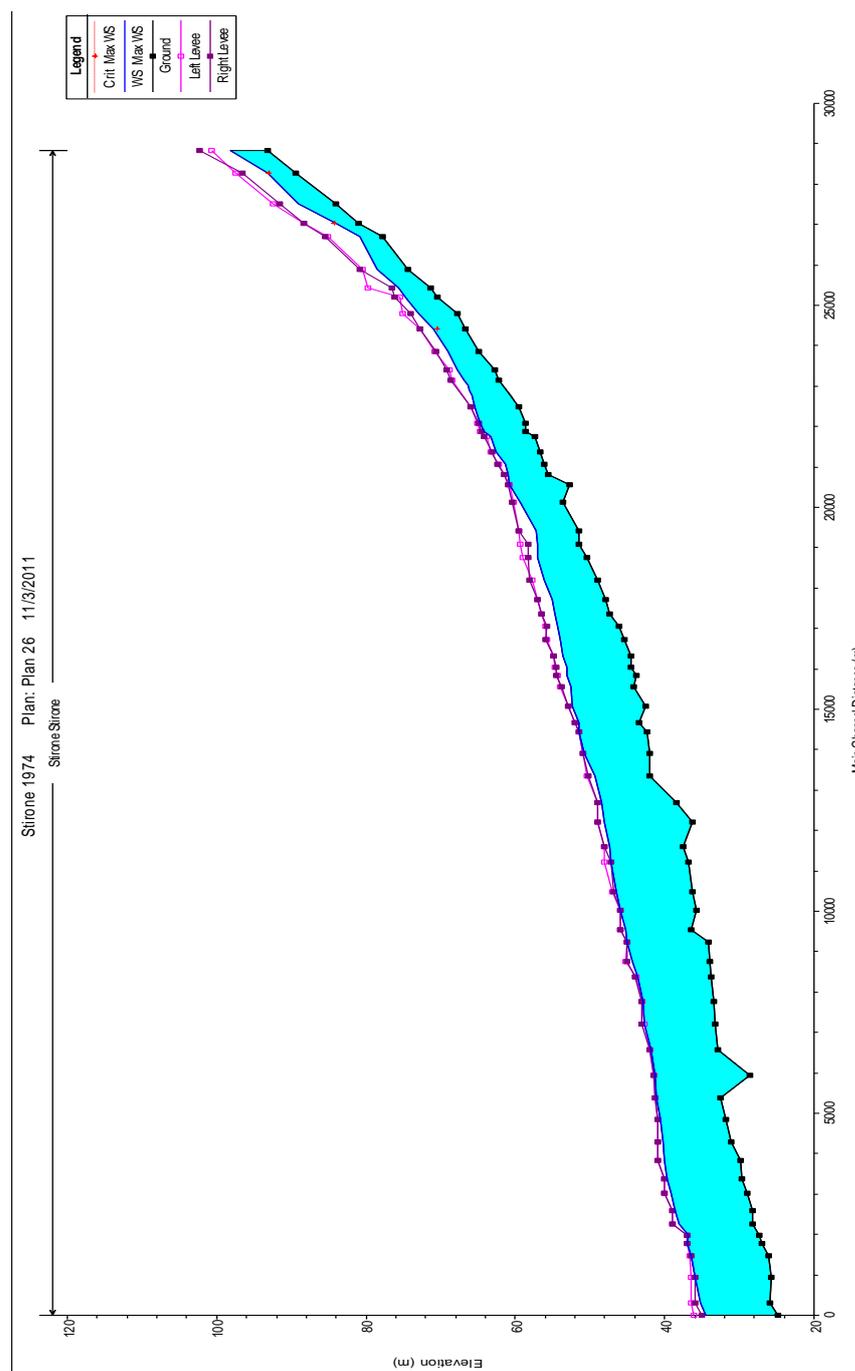
**Figura 5.9** Andamento dei volume laminati ricavati dall'idrogramma sintetico (TR 200) e dall'idrogramma simulato (HAC-RAS) relativi alla sezione 2.

## 5.6 Modellazione e creazione delle brecce arginali

Dopo aver inserito nel programma di simulazione HEC-RAS la descrizione della geometria del sistema fluviale in esame e la definizione delle condizioni al contorno già descritte precedentemente si è proceduto alle simulazioni per poter determinare il profilo di piena interessante il torrente Stirone (Figura 5.10). Le simulazioni consentono infatti di visualizzare con passo temporale costante scelto di 30 minuti, stesso passo temporale che definisce gli idrogrammi di piena in ingresso, il livello idrico in tutte le sezioni e la portata nelle sezioni in cui viene richiesto. La durata totale della varie simulazioni, sempre pari alla durata dell'idrogramma di piena in ingresso è di 99 ore (4 giorni e 3 ore).

Sono state effettuate varie simulazioni in quanto rappresentando il massimo livello raggiunto durante l'evento (*max water surface*) questo, soprattutto nella parte finale del corso, era confrontabile o di poco (qualche decina di cm) superiore all'altezza degli argini maestri dello Stirone. Questa condizione è stata gestita aumentando l'altezza del rilevato arginale creando così un argine fittizio che permette però il mantenimento all'interno dell'alveo della portata transitante.

La situazione finale prevede quindi che il profilo idrico della piena duecentennale sia interamente contenuto entro il limite fisico dei rilevati arginali, consentendo in questo modo di ottenere una sollecitazione idraulica caratterizzata da un tempo di ritorno pari o superiore a 200 anni per tutte le sezioni dello Stirone considerate nello studio.



**Figura 5.10** Andamento del profilo di piena simulato nelle 67 sezioni che compongono il tratto di torrente Stirone in esame.

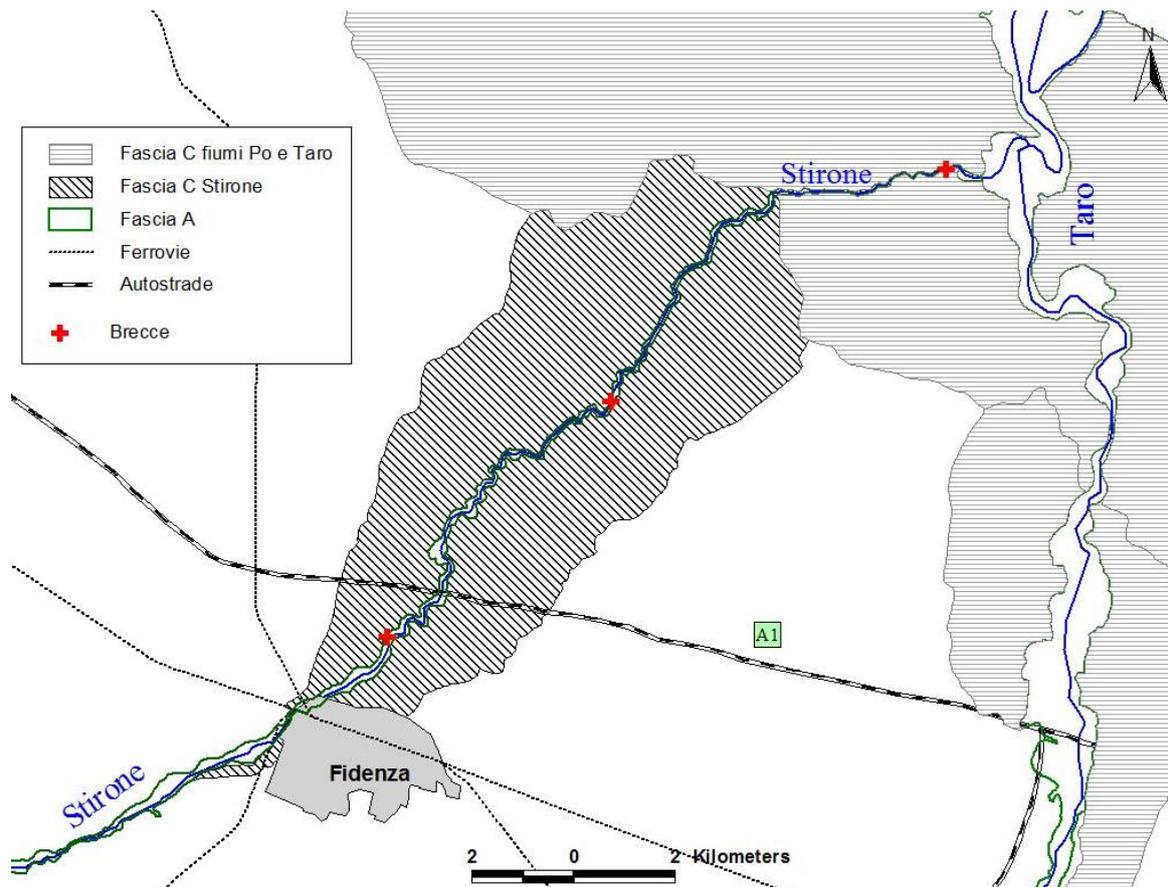
Dopo aver raggiunto la configurazione arginale finale, il passo successivo è stata quindi la creazione delle brecce per poter quantificare i volumi in uscita e utilizzarli come dati di ingresso al modello numerico bidimensionale che riproduce l'evoluzione nel tempo dei fenomeni di allagamento nella zona di studio.

Si è scelto di ubicare le brecce in maniera tale da riuscire a rappresentare al meglio le diverse caratteristiche dell'alveo e delle condizioni di piena variabili lungo il corso d'acqua.

Per questo motivo il tratto di torrente Stirone in esame è stato idealmente suddiviso in tre parti ed è stata creata una breccia per lato in ogni parte (Figura 5.10):

- Due brecce di monte: ubicate nel tratto pedecollinare dello Stirone, quello più a monte dell'intero tratto considerato, tra le sezioni 53 e 54, subito dopo la città di Fidenza;
- Due brecce intermedie: nella zona centrale del tratto in esame nei pressi dell'abitato di Soragna, ubicata tra le sezioni 26 e 27;
- Due brecce di valle: nella parte terminale del corso dello Stirone presso l'abitato di Fontanelle, poco prima dell'immissione in Taro. Questa si trova tra le sezioni 6 e 7.

La scelta della sezioni tra le quali inserire la breccia in ogni tratto del corso d'acqua è stata effettuata dopo aver visualizzato i risultati delle simulazioni di propagazione dell'onda di piena, individuando le sezioni fluviali maggiormente sollecitate e in situazioni gravose, dove il massimo tirante idrico calcolato si avvicina di più alla quota sommitale degli argini.

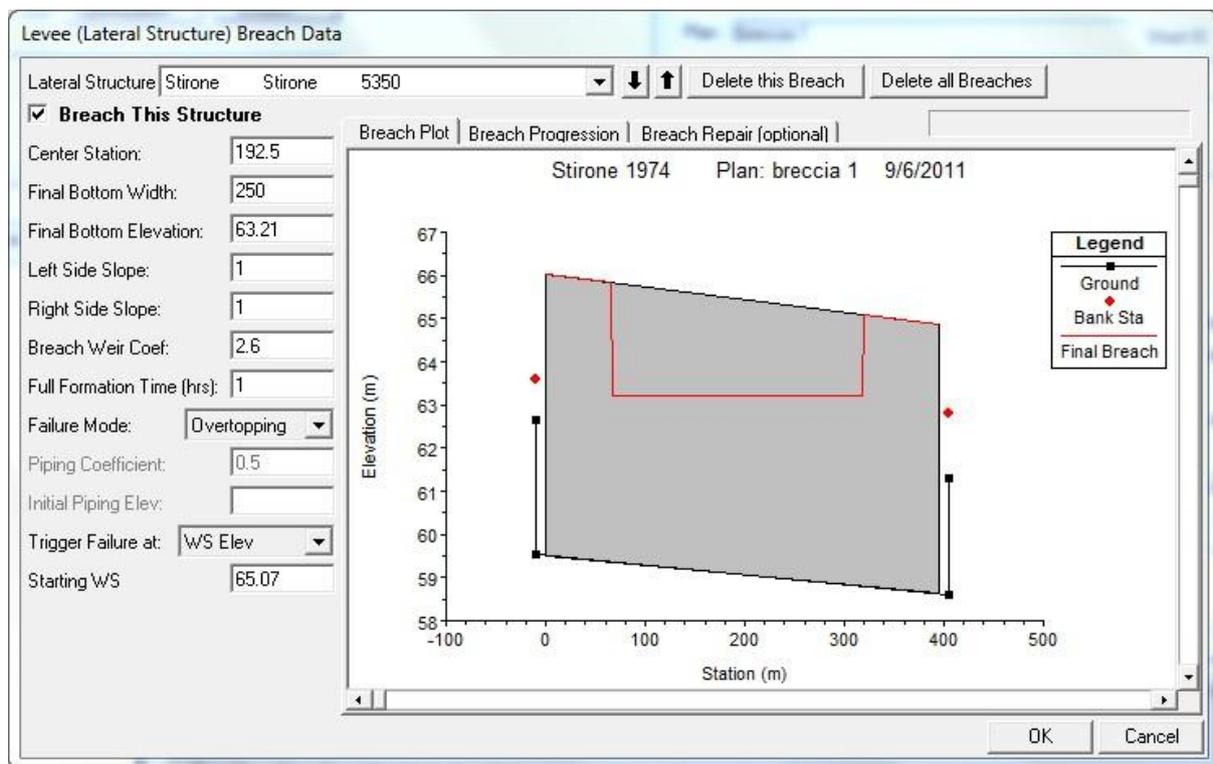


**Figura 5.11** Rappresentazione schematica dell'area di studio e ubicazione delle brecce modellate in Hec-RAS.

Dopo aver scelto la posizione delle brecce si è proceduto alla loro creazione dal punto di vista modellistico. In questa fase si sono create delle strutture laterali (*lateral Structure*), ovvero elementi longitudinali che rappresentano i rilevati arginali su cui creare le brecce (*Breach*). Una lateral structure è caratterizzata da diversi parametri, come la sua collocazione in termine di *river station* (numero identificativo della posizione all'interno del corso d'acqua), la collocazione in destra o sinistra idraulica e tutte le dimensioni che la caratterizzano. Sono state create quindi tra le sezioni individuate precedentemente sei strutture laterali (tre per lato) con dimensioni coincidenti a quelle degli argini.

Il programma di simulazione permette inoltre di creare all'interno delle *lateral structure* delle brecce. In termini del tutto generali, una breccia nel rilevato arginale può essere schematicamente identificata sulla base di quattro parametri: la sua posizione rispetto all'ascissa curvilinea di riferimento, misurata lungo l'asse fluviale,

$X$  (in m o km); la larghezza complessiva,  $L$  (in m); la profondità rispetto al coronamento arginale  $Z$  (in m); il tempo di formazione a partire dall'istante di tracimazione,  $T$  (in ore). L'editor del programma permette di configurare questi ed altri parametri (Figura 5.11).



**Figura 5.12** Finestra di editor per la creazione di una breccia all'interno di una Lateral Structure.

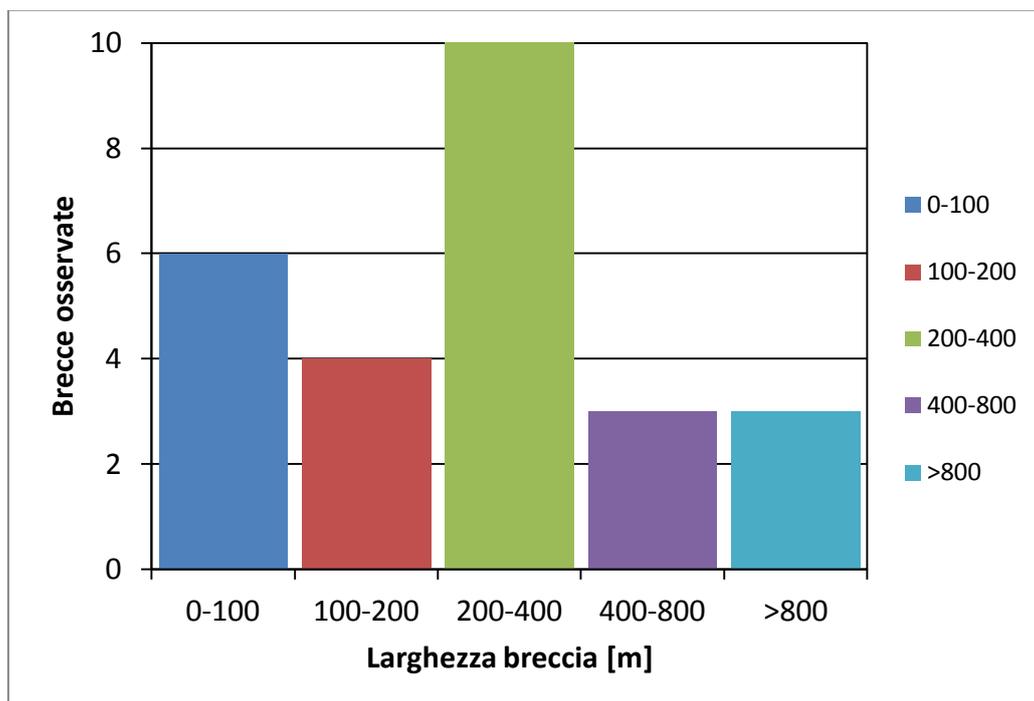
Per il primo parametro, l'ubicazione rispetto all'ascissa fluviale, è stata presa la metà tra le due sezioni di monte e valle tra cui si estende il rilevato arginale. La larghezza complessiva è stata scelta in seguito all'analisi della casistica storica delle rotte verificatesi nel Po (Figura 5.12), nel periodo 1801-1951, effettuata dall'AdB-Po sulla base dei dati riportati dallo studio di Govi e Turitto del (Govì e Turitto, 2000). Come larghezza per le simulazioni è stata quindi presa la dimensione media dei dati riportati nello studio pari a 250 m.

Il tempo di formazione è stato preso pari a un'ora sulla base degli studi riportati da Aureli e Mignosa (Aureli e Mignosa, 2006).

Per quanto riguarda l'estensione verticale della breccia, è stato imposto che la sua formazione avesse inizio al raggiungimento di un tirante idrico pari all'altezza del relativo argine o, nel caso questo non accadesse come nelle due brecce di monte, è stato presa come quota di inizio formazione quella massima raggiunta durante la simulazione (*Max Water Surface*). Per la quota di fondo si è assunta la maggiore tra quella del piano golenale e del piano campagna prospicienti l'argine maestro. L'estensione verticale è data quindi dalla differenza fra le due quote sopra citate.

Si sottolinea il fatto che, soprattutto nel tratto finale dello Stirone, il piano golenale risulta essere pensile rispetto al piano campagna ma l'eventuale effetto dinamico associato a questa differenza di quota non può essere modellata.

Un riassunto delle caratteristiche geometriche così determinate delle sei brecce create è fornito nella Tabella 5.



**Figura 5.13** Frequenza dell'ampiezza delle rotte arginali del Po (fonte AdB-Po, DISTART, 2008).

Nome	sez.	Lato	Quota profondità breccia (m s.l.m.)	Quota inizio formazione (m s.l.m.)	Profondità (m)	Larghezza (m)	Tempo di formazione (ore)
Breccia 1	5350	destro	63.21	65.07	1.86	250	1
Breccia 2	2650	destro	43.99	47.14	3.15	250	1
Breccia 3	650	destro	35.44	36.99	1.55	250	1
Breccia 4	5350	sinistro	63.3	64.7	1.4	250	1
Breccia 5	2650	sinistro	44.67	47	2.33	250	1
Breccia 6	650	sinistro	34.58	37.09	2.51	250	1

**Tabella 5** Riassunto delle caratteristiche geometriche delle sei breccie simulate.

### 5.7 Modellazione delle breccie e risultati del modello

Una volta definite le caratteristiche delle breccie sono state effettuate le simulazioni per determinare i volumi idrici in uscita. Il programma di simulazione schematizza le breccie create nelle Lateral Structure come se fossero degli sfioratori superficiali (Hydraulic Reference Manual 2001) non rigurgitati regolati dall'equazione dello stramazzo che, scritta nella forma più generale, assume la seguente espressione:

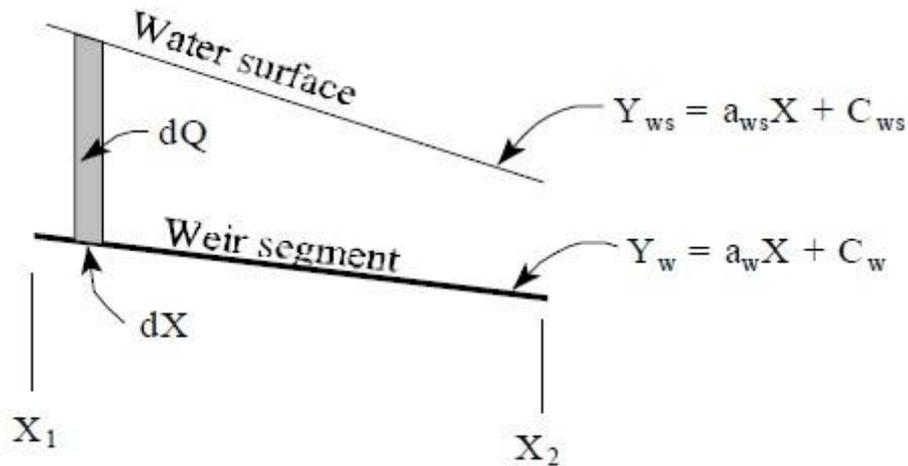
$$Q = C L H^{\frac{3}{2}}$$

Dove:

- Q è la portata in uscita dalla soglia;
- C è un coefficiente dello stramazzo con valori tipici compresi fra 2,6 e 4,2 dipendenti dalla forma della soglia;
- L è la lunghezza della soglia,
- H è l'altezza del fluido indisturbato a monte della soglia.

Questa equazione generale considera però che l'altezza del pelo libero sia costante lungo tutta la lunghezza della breccia, cioè che la soglia sia parallela al pelo libero. Nel caso di una breccia laterale il pelo libero presenta un'inclinazione, così come la sommità della breccia può presentare una pendenza. In Figura 5.14 è riportato un

tratto di breccia con andamento del pelo libero e della soglia entrambi inclinati e non paralleli e delle rispettive equazioni.



**Figura 5.14** Rappresentazione schematica delle pendenze della breccia e del pelo libero con rispettive equazioni.

Le costanti  $a_{ws}$  e  $a_w$  rappresentano l'entità della pendenza rispettivamente del pelo libero e della soglia della breccia. Le costanti  $C_{ws}$  e  $C_w$  rappresentano invece le quote iniziali. L'equazione generale per il calcolo della portata in uscita dallo stramazzo scritta precedentemente diventa quindi per soglie inclinate con pelo libero inclinato:

$$dQ = C(Y_{ws} - Y_w)^{\frac{3}{2}} dx$$

Tale equazione integrata tra le due ascisse  $x_1$  e  $x_2$  diventa:

$$Q_{x_1-x_2} = \frac{2C}{5 a_1} ((a_1 x_2 + C_1)^{5/2} - (a_1 x_1 + C_1)^{5/2})$$

Avendo assunto:

$$a_1 = a_{ws} - a_w \text{ e } C_1 = C_{ws} - C_w$$

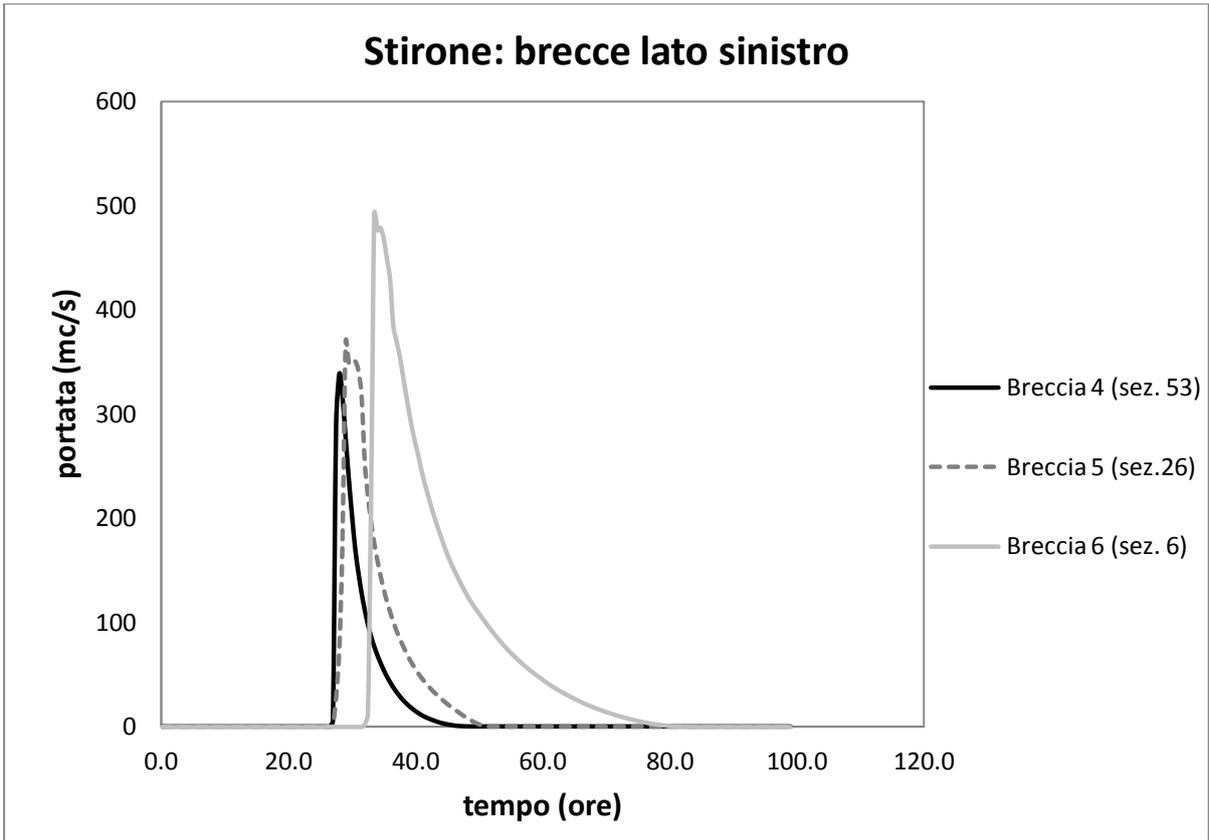
L'equazione scritta sopra è valida fintantoché  $a_1$  è diverso da zero. Quando questo accade significa che pelo libero e andamento della soglia sono paralleli e si può quindi utilizzare l'equazione generale dello stramazzo.

Questo è il metodo utilizzato in default dal programma HEC-RAS per simulare la portata in uscita da una breccia.

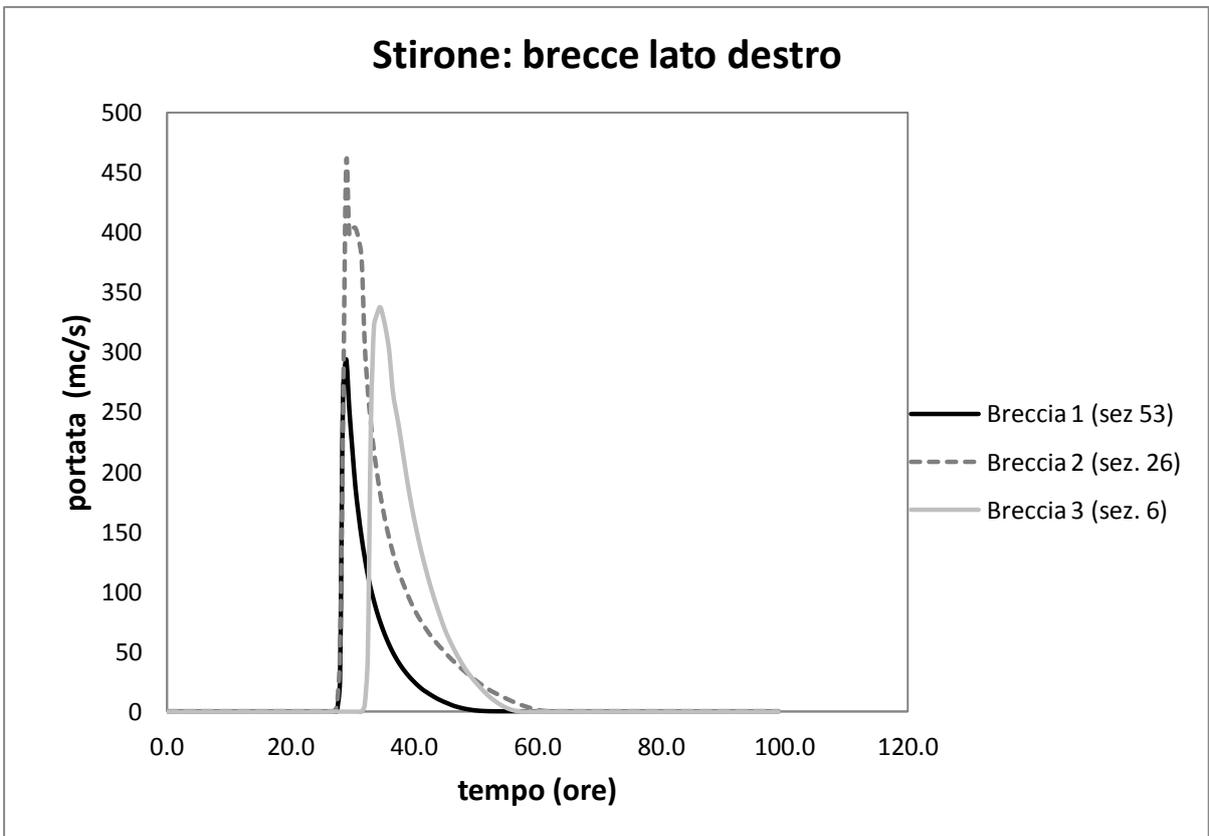
Nel presente studio sono state effettuate sei simulazioni di moto vario corrispondenti ciascuna a una delle brecce descritte precedentemente ma prese singolarmente, ovvero è stata considerata la possibilità di formazione di una sola breccia alla volta per ogni simulazione.

I risultati delle simulazioni in termini di idrogrammi scolmati, cioè delle portate esondate nel tempo, sono riportati nelle Figure 5.15 e 5.16, rispettivamente per le brecce situate nel lato sinistro e nel lato destro dello Stirone. Le Figure 5.17 e 5.18 rappresentano invece i volumi cumulati in funzione del tempo.

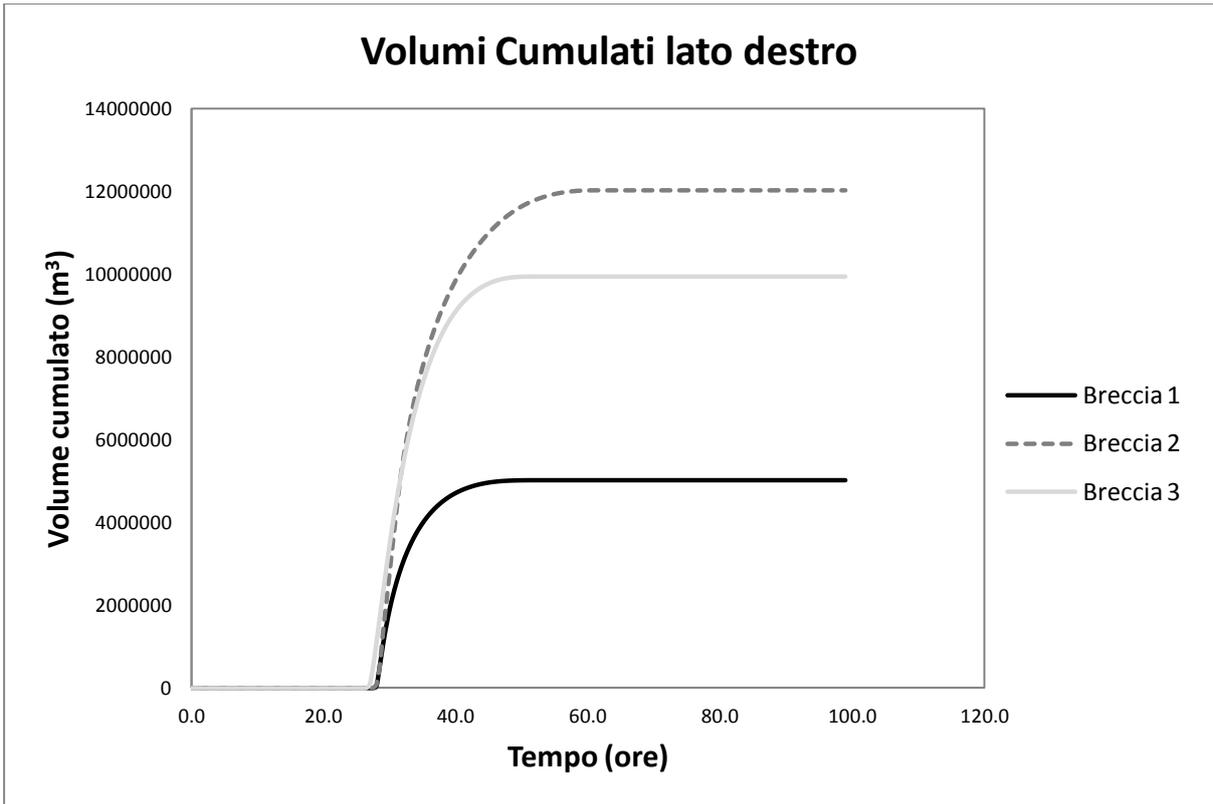
Gli idrogrammi ottenuti, sintetizzanti i fenomeni di rotta arginale ed i corrispondenti sfiori, sono stati adottati come sollecitazioni in input nel modello bidimensionale, che simula i fenomeni di allagamento nella zona oggetto di questo studio.



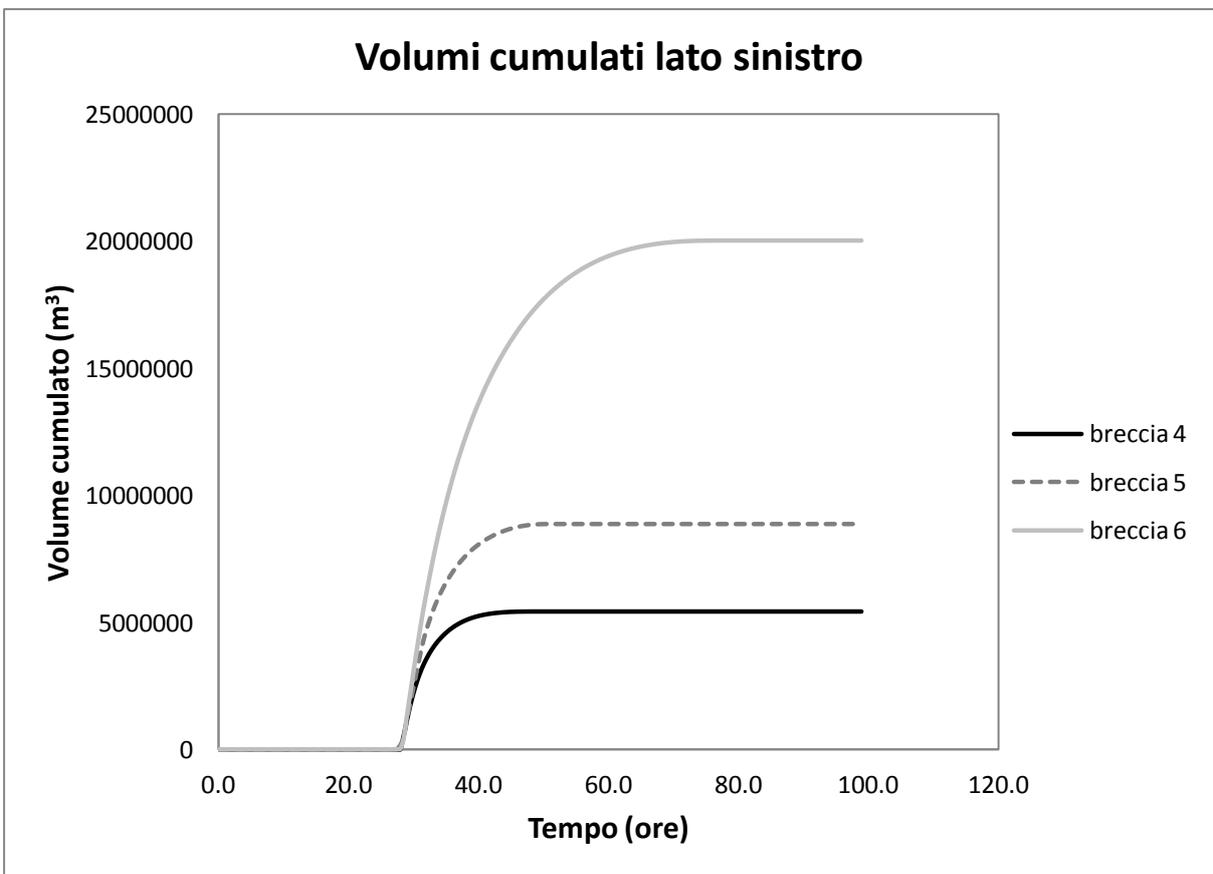
**Figura 5.15** Idrogrammi scolamati in corrispondenza delle sezioni 4,5,6 del lato sinistro dello Stirone.



**Figura 5.16** Idrogrammi scolamati in corrispondenza delle sezioni 1,2,3 del lato destro dello Stirone.



**Figura 5.17** Volumi cumulati in uscita dalle breccie 1,2,3 del lato destro dello Stirone.



**Figura 5.18** Volumi cumulati in uscita dalle breccie 3,4,5 del lato destro dello Stirone.

## **6 MODELLO BIDIMENSIONALE PER LA SIMULAZIONE DEGLI SCENARI DI ALLAGAMENTO**

### **6.1 Modello numerico utilizzato**

Il modello numerico utilizzato per la simulazione degli scenari di allagamento appartiene alla categoria dei modelli puramente 2D. La differenza sostanziale con il modello quasi bidimensionale (quasi 2D), descritto nel capitolo precedente, e usato per la simulazione della propagazione dell'onda di piena all'interno dell'alveo, sta nella schematizzazione del sistema fisico.

Mentre nel modello quasi 2D l'area oggetto di studio viene schematizzata come un insieme di canali e serbatoi connessi mediante opportune relazioni funzionali e all'interno dei quali il fenomeno di propagazione è strettamente monodimensionale, nel modello 2D non vengono effettuate a priori schematizzazioni del sistema fisico. I modelli appartenenti a quest'ultima categoria si propongono di integrare le equazioni del moto vario bidimensionale a superficie libera, in forma completa o semplificata, tenendo conto della effettiva topografia dell'area di studio.

Il vantaggio dell'uso di tali modelli 2D sta nella minore schematizzazione a priori del sistema in esame e quindi nella minore soggettività del modello; di contro, nel modello 2D, l'algoritmo numerico impiegato per la soluzione delle equazioni assume un'importanza rilevante ed il modello deve quindi essere opportunamente ottimizzato per trovare il giusto compromesso tra qualità del risultato ottenuto e l'onerosità computazionale, in termini soprattutto di tempi di calcolo e di occupazione di memoria.

Come detto in precedenza i modelli puramente 2D possono essere suddivisi in due distinti sottogruppi: i modelli semplificati e quelli completi. I primi introducono alcune semplificazioni del sistema di equazioni del moto vario bidimensionali (trascurano i termini inerziali), i secondi invece risolvono le equazioni in forma completa.

In questo ambito si è deciso di utilizzare un modello puramente 2D che risolve le equazioni di moto vario in forma completa con una tecnica numerica agli elementi finiti. Il programma utilizzato per la risoluzione di tali equazioni è il TELEMAC-2D, un software sviluppato dalla National Hydraulics and Environment Laboratory (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement - LNHE) del Research and Development Directorate of the French Electricity Board (EDF-R&D).

TELEMAC-2D (Galland et al.) risolve, tramite un metodo agli elementi finiti basato su una griglia di calcolo a base triangolare, le equazioni di Saint Venant nelle due direzioni dello spazio: queste rappresentano la conservazione della massa d'acqua (equazione di continuità) e la conservazione del momento nelle due direzioni orizzontali (x e y):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}(h) + h \text{div}(\mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + F_x + \frac{1}{h} \text{div}(h \nu_t \text{grad}(u))$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + F_y + \frac{1}{h} \text{div}(h \nu_t \text{grad}(v))$$

Dove:

- T è il tempo;
- X e Y sono le coordinate spaziali orizzontali;
- h è il tirante idrico;
- $\mathbf{u}$  è il vettore velocità mediato sulla verticale, di componenti orizzontali (u, v);
- $\nu_t$  un coefficiente che tiene conto della viscosità turbolenta e della dispersione;
- g è l'accelerazione di gravità;
- Z è la quota della superficie libera ( $Z=h+Z_f$ , con  $Z_f$  quota del fondo);
- F di componenti ( $F_x, F_y$ ), è la risultante dei termini sorgente (forza di Coriolis, forza d'attrito e azione del vento).

Queste equazioni vengono risolte discretizzando il dominio spaziale con una tecnica agli elementi finiti, mentre la risoluzione nel tempo è ottenuta con una tecnica alle

differenze finite sviluppata secondo la teoria dei passi frazionari. Gli elementi finiti sono costruiti su una *mesh* di calcolo triangolare che ha la caratteristica di essere non strutturata e può quindi essere raffittita al fine di rappresentare accuratamente gli elementi determinati importanti variazioni di quota localizzate come argini o rilevati stradali e ferroviari.

I risultati forniti dal programma sono, in ogni nodo della mesh di calcolo, l'entità del tirante idrico ( $h$ ) e le due componenti orizzontali della velocità media ( $u,v$ ). Questi risultati possono essere visualizzati graficamente e analizzati attraverso dei software grafici ausiliari al programma TELEMAC-2D.

## **6.2 Definizione del dominio di calcolo**

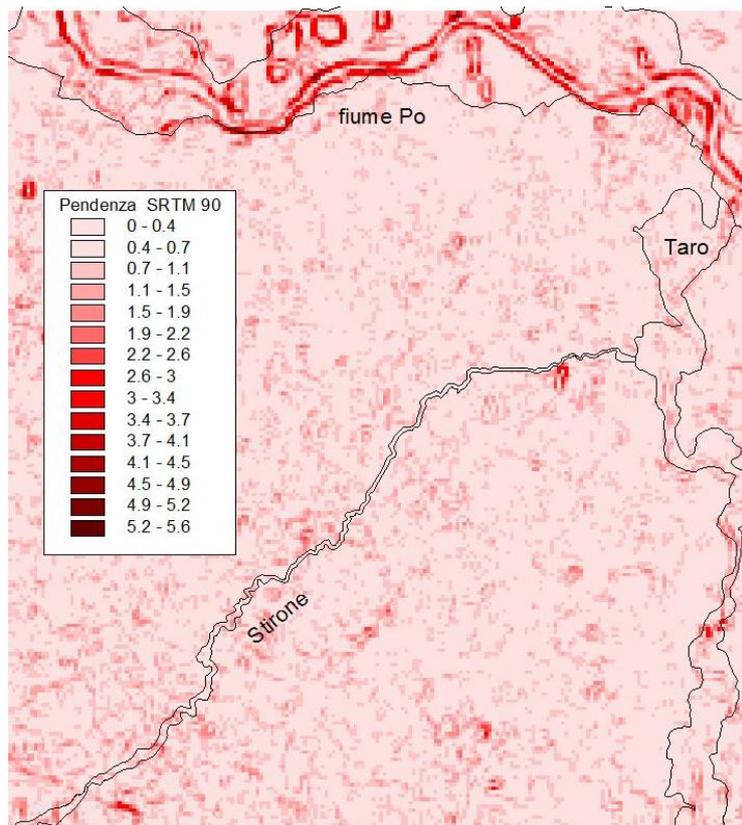
Uno degli scopi di questo lavoro è quello di effettuare un confronto fra l'area allagata, in seguito a fenomeni di breccia arginale, la cui estensione viene determinata con l'utilizzo in cascata dei due modelli numerici sopra descritti (quasi 2D e modello puramente bidimensionale), con l'estensione delle aree potenzialmente allagabili (Fascia C) definita dall'AdB-Po. Per questo motivo, non conoscendo a priori l'entità dell'estensione dell'allagamento simulato dal programma di calcolo 2D, si è scelto di prendere un dominio spaziale che comprendesse interamente la fascia C del torrente Stirone e che avesse un'estensione più ampia in modo da evitare effetti di bordo o che l'area fosse troppo piccola rispetto alla zona allagata determinata durante le simulazioni. Va sottolineato come la scelta di un'area eccessivamente estesa comporti però un aumento dell'onerosità computazionale, che si traduce anche in un aumento dei tempi di calcolo.

La prima fase è rappresentata dalla creazione della mesh di calcolo, (*geometry file*), che rappresenta il file di input necessario al programma di simulazione TELEMAC-2D per effettuare il calcolo agli elementi finiti e determinare le soluzioni in ogni nodo della mesh stessa. Questa costituisce infatti il dominio spaziale di integrazione ed è

essenzialmente una “rete”, composta da una serie di elementi triangolari ciascuno delimitato da tre nodi, costruita sulla base dell’informazione topografica disponibile.

Come già detto nel paragrafo precedente la mesh può essere non strutturata, consentendo il raffittimento delle maglie di calcolo per la definizione con maggior precisione delle variazioni di quota importanti e localizzate, date dall’eventuale presenza nel dominio spaziale di rilevati arginali, stradali, ferroviari e di altri ostacoli; a questo proposito si ricorda che l’informazione topografica utilizzata come base per la costruzione della mesh di calcolo è il modello digitale delle quote del terreno SRTM90 (vedi paragrafo 4.5). Il DEM in questione, data la sua risoluzione planimetrica pari a 90 m, non consente di individuare con precisione delle variazioni di quota localizzate dovute alla presenza nel dominio di rilevati di piccola dimensione rispetto alla suddetta risoluzione. Nella Figura 6.1 viene illustrata la pendenza calcolata del DEM attraverso la funzione di ArcView *derive slope* che mostra con una scala monocromatica rossa i gradi della pendenza del grid. Si nota come il DEM non sia in grado di rilevare con precisione i rilevati stradali e ferroviari presenti nell’area di studio, che possono invece influire sulle dinamiche di allagamento.

In seguito a queste considerazioni è stato deciso di costruire una mesh di calcolo con ampiezza della maglia costante in tutta la sua estensione data l’impossibilità di un raffittimento per la bassa risoluzione del DEM usato.



**Figura 6.1** Raffigurazione della pendenza calcolata del DEM SRTM90. La scala monocromatica rossa rappresenta l'andamento della pendenza in gradi.

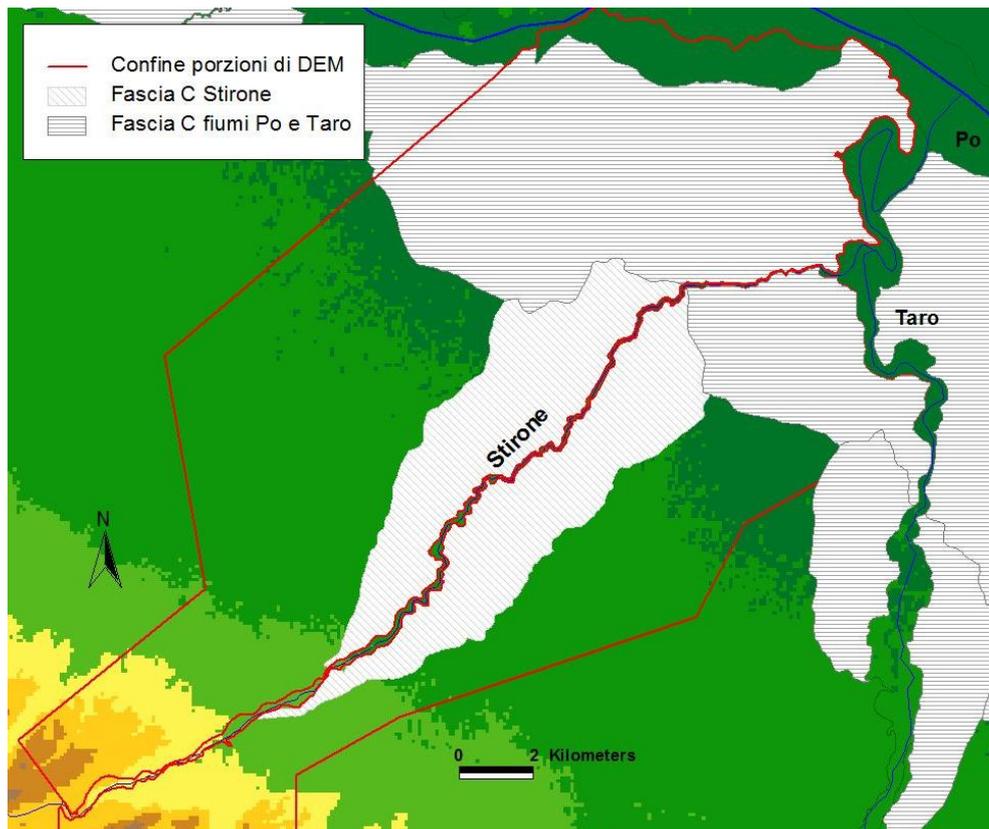
Per effettuare le simulazioni degli scenari di allagamento si sono considerati i due lati del torrente Stirone separatamente, creando una griglia di calcolo per il lato destro e una per il lato sinistro.

Il primo passo è consistito nella delimitazione di due porzioni, una per lato fluviale, del DEM utilizzato come base per la mesh. In questa operazione sono stati quindi creati due poligoni per effettuare una *clip* (funzione di ArcView che consente di ritagliare un file grid intersecandolo con il confine di un poligono) del DEM, determinando così le due aree di studio (Figura 6.2).

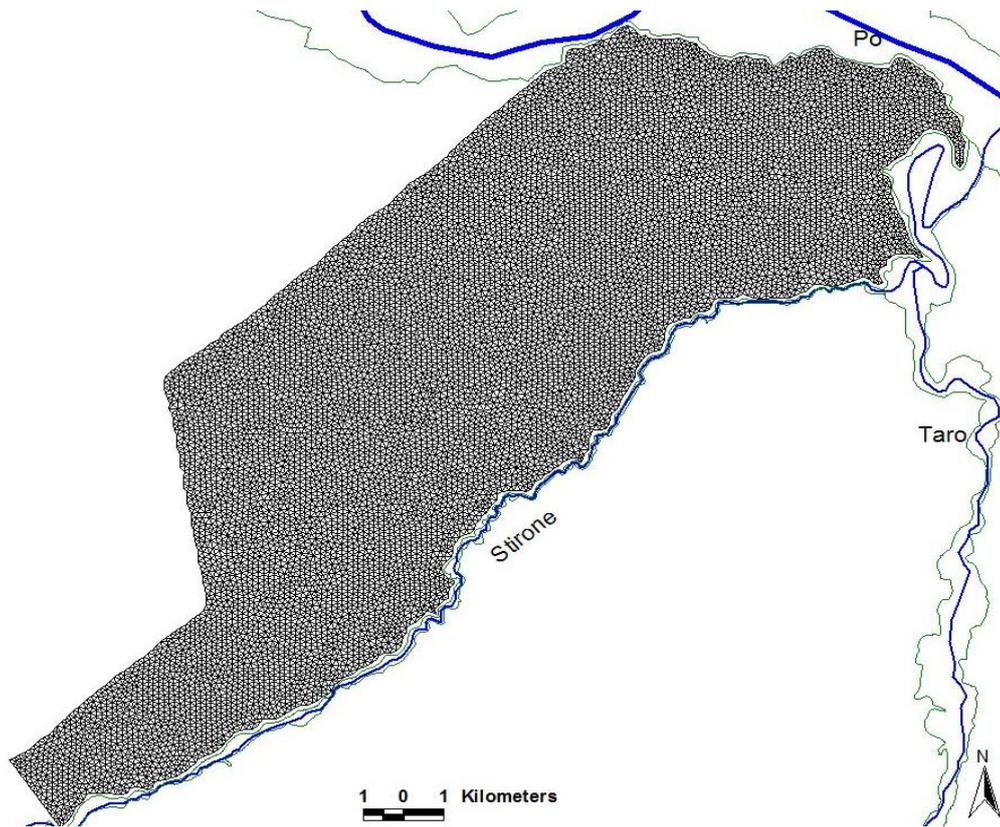
Le due porzioni di DEM vengono poi utilizzati come base per la costruzione delle due rispettive mesh di calcolo, ciascuna con una maglia di ampiezza costante pari a 150 m. La scelta di tale distanza è dovuta a un giusto compromesso fra risoluzione, quindi precisione dei risultati in uscita dal modello, e costo computazionale, in termine soprattutto dei tempi di calcolo. Si precisa inoltre che, data la risoluzione non elevata

del DEM utilizzato, scegliere una dimensione dei triangoli della maglia inferiore alla risoluzione stessa sarebbe inutile ai fini della precisione del risultato.

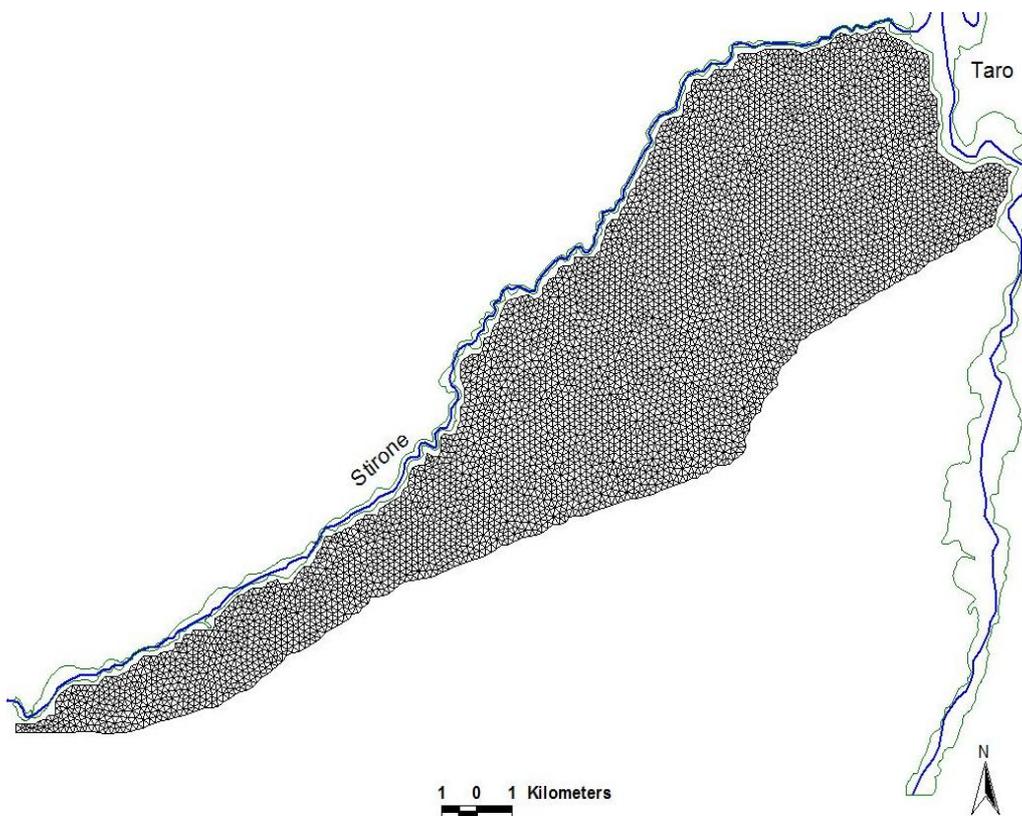
Le Figure 6.3 e 6.4 illustrano le due griglie di calcolo utilizzate mentre in Tabella 6 vengono riassunte le caratteristiche più importanti.



**Figura 6.2** Rappresentazione schematica delle due aree considerate come dominio spaziale per il modello 2D.



**Figura 6.3** Mesh di calcolo usata per il lato sinistro.



**Figura 6.4** Mesh di calcolo usata per il lato destro.

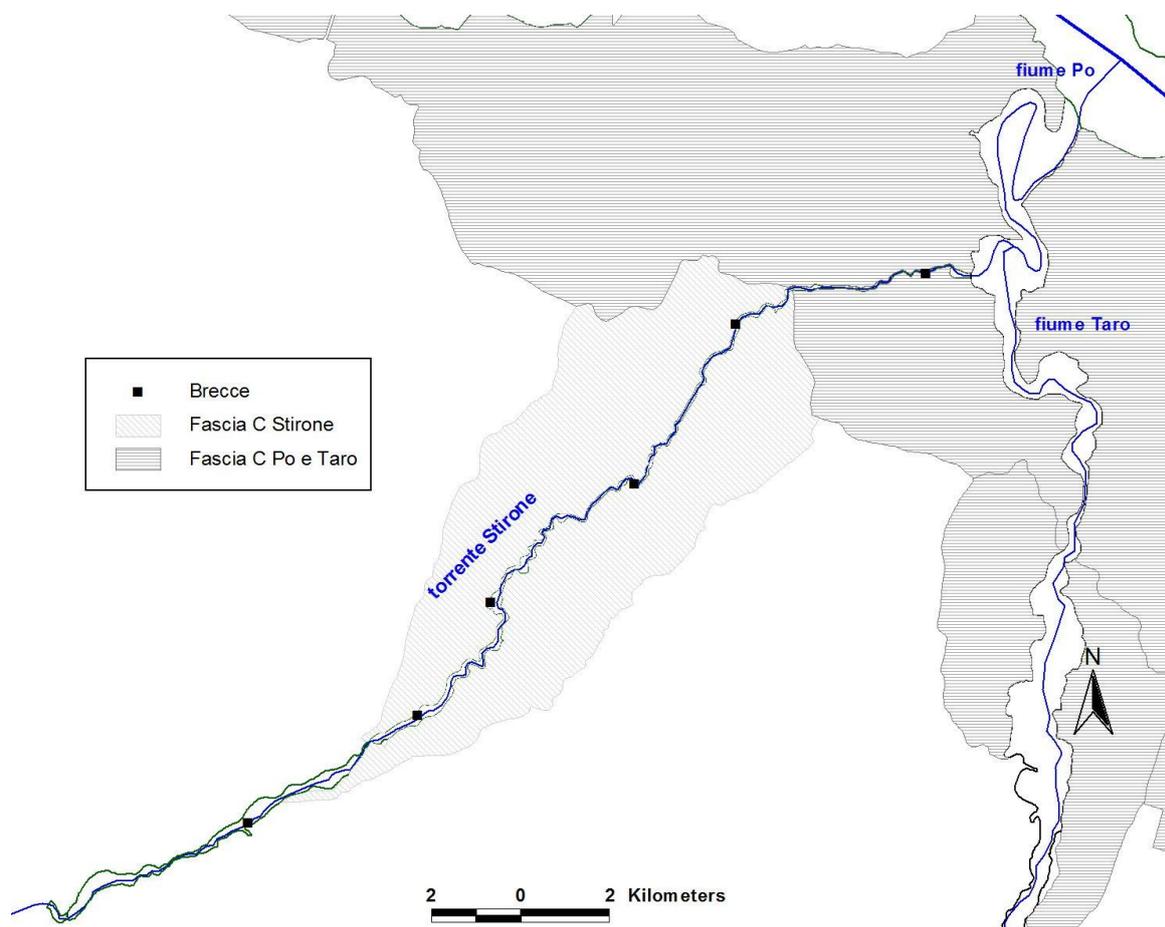
	<b>N° nodi mesh</b>	<b>N°elementi mesh</b>	<b>Quota max (m s.l.m.)</b>	<b>Quota min (m s.l.m.)</b>	<b>Dim. massima (m)</b>	<b>Dim. minima (m)</b>
<b>Lato destro</b>	4865	9274	210	27	210	61
<b>Lato sinistro</b>	9723	18908	185	24	234	55

**Tabella 6** Riassunto delle caratteristiche delle due mesh di calcolo utilizzate.

### 6.3 Definizione scenari di inondazione

Il modello idraulico quasi bidimensionale descritto nel capitolo precedente ha permesso di calcolare gli idrogrammi scolmati da 3 breccie per lato del torrente Stirone, queste sono state usate per creare gli scenari di inondazione in cui per ognuno di essi è stato simulato l'allagamento causato da una breccia alla volta.

In totale sono state effettuate dodici simulazioni, sei per lato, scegliendo di ubicare le rotte arginali ogni 5 km lungo i circa 30 km di lunghezza dell'asta fluviale dello Stirone (Figura 6.59).



**Figura 6.5** Rappresentazione schematica dell'area di indagine e ubicazione delle breccie modellate dal modello bidimensionale di allagamento.

Per ciascuno scenario gli idrogrammi delle portate esondate vengono utilizzati come condizioni al contorno, in particolare:

- Per le prime due brecce di monte sono stati utilizzati gli idrogrammi delle brecce 1 e 4 rispettivamente del lato destro e sinistro;
- Per le due brecce intermedie sono stati utilizzati gli idrogrammi delle brecce 2 e 5 rispettivamente del lato destro e sinistro;
- Per le due brecce di valle sono stati utilizzati gli idrogrammi delle brecce 3 e 6 rispettivamente del lato destro e sinistro.

Le brecce sono state numerate in maniera crescente da monte verso valle indicando il lato idraulico sulla quale sono poste (es. breccia5\_dx è la quinta breccia da monte sul lato destro).

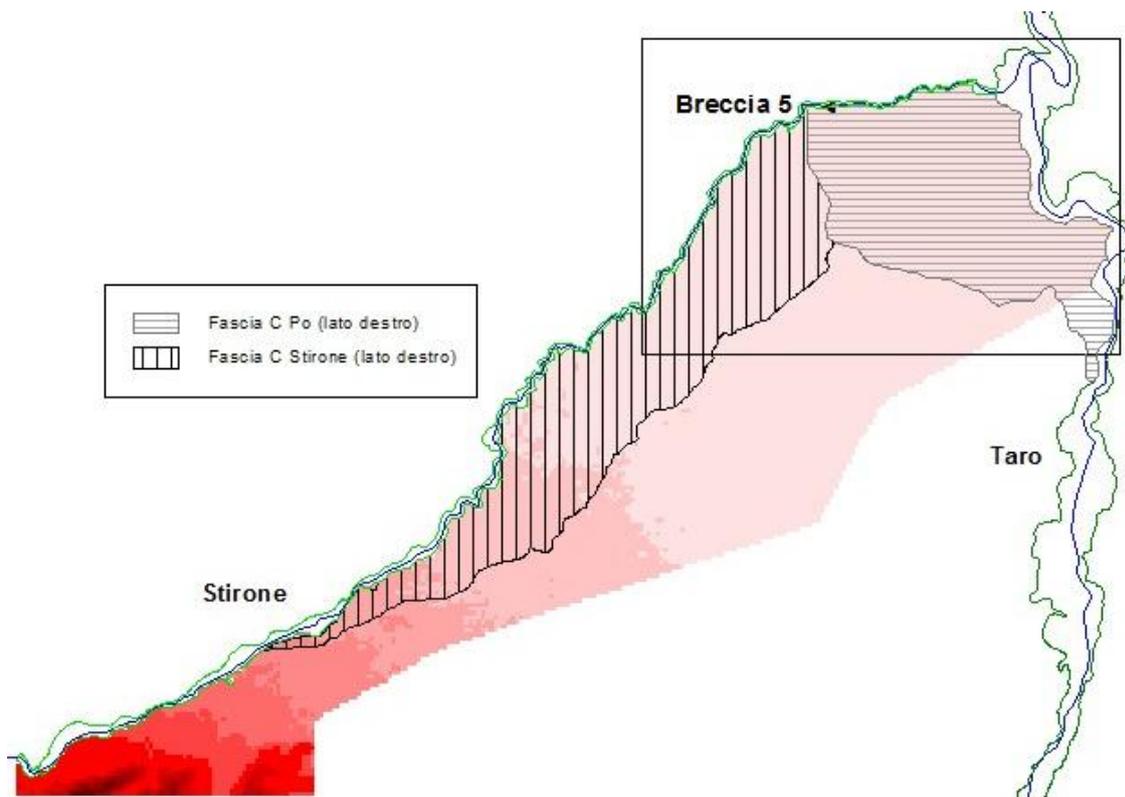
L'attribuzione degli idrogrammi di piena come condizioni al contorno è avvenuta assegnando ai tre nodi della mesh che si trovano in corrispondenza dell'ubicazione della rotta arginale, lunghezza totale di 300 metri, la condizione di portata imposta e inserendo successivamente nel programma i valori della portata in funzione del tempo. Per tutto il resto del contorno della mesh è stata invece imposta un condizione di *Solid boundary*, schematizzando cioè il confine come un muro. Queste condizioni vengono salvate nel *boundary conditions file* che, unito al *geometry file* contenente la mesh di calcolo creata, vengono gestiti dallo *steering file*, che contiene a sua volta le specifiche della simulazione: condizioni iniziali, durata della simulazione, metodo risolutivo, scabrezza dell'area allagabile e altre variabili.

Le simulazioni sono state condotte attribuendo come condizione iniziale, ai nodi descrittivi il dominio di calcolo, altezze idriche e velocità identicamente nulle. Solo nei tre nodi costituenti la breccia è stato imposto un tirante idrico trascurabile ai fini della simulazione dell'allagamento, ma necessario per esigenze di calcolo. Cautelativamente i fenomeni di infiltrazione nel terreno sono stati trascurati.

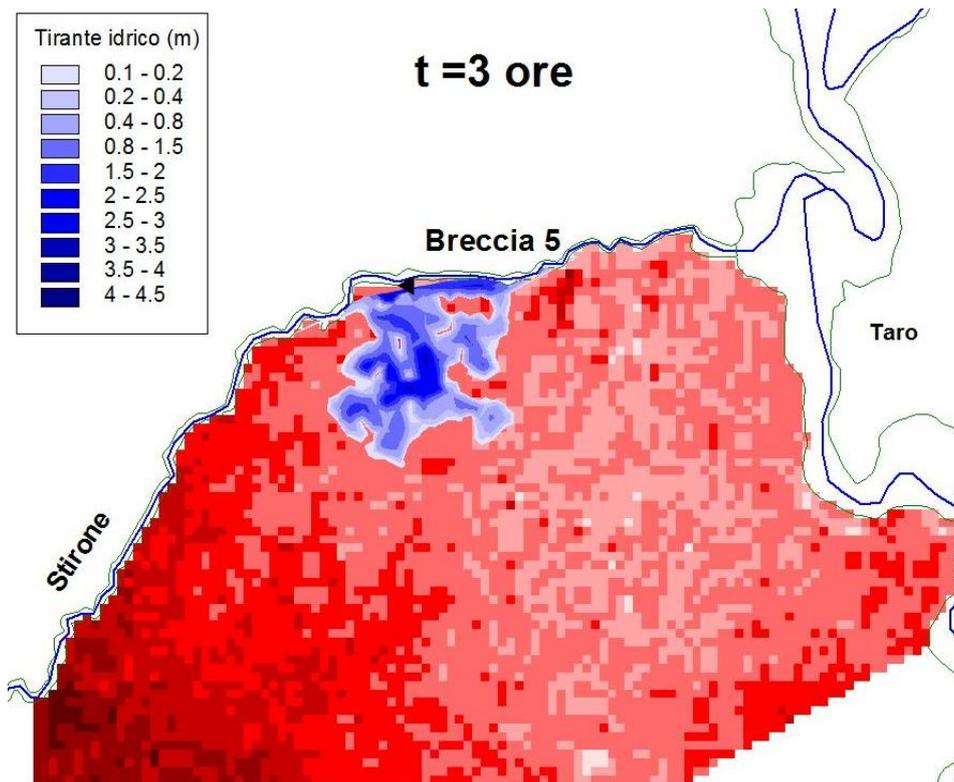
Infine, non essendo possibile effettuare una calibrazione del valore della scabrezza dell'area allagabile, il valore del coefficiente di Gauckler-Strickler è stato assunto pari al valore utilizzato solitamente per le aree golenali caratterizzate da un vegetazione prevalentemente erbosa ( $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ).

Il codice di calcolo 2D valuta la variazione nel tempo delle grandezza idrometriche come ad esempio l'altezza, il vettore velocità, il numero di Froude, la velocità scalare in ciascuno dei nodi del dominio di calcolo. Tali valori possono poi essere opportunamente mappati al fine di rappresentare i risultati delle simulazioni numeriche in termini di estensione delle aree inondate, tiranti idrici o velocità scalare.

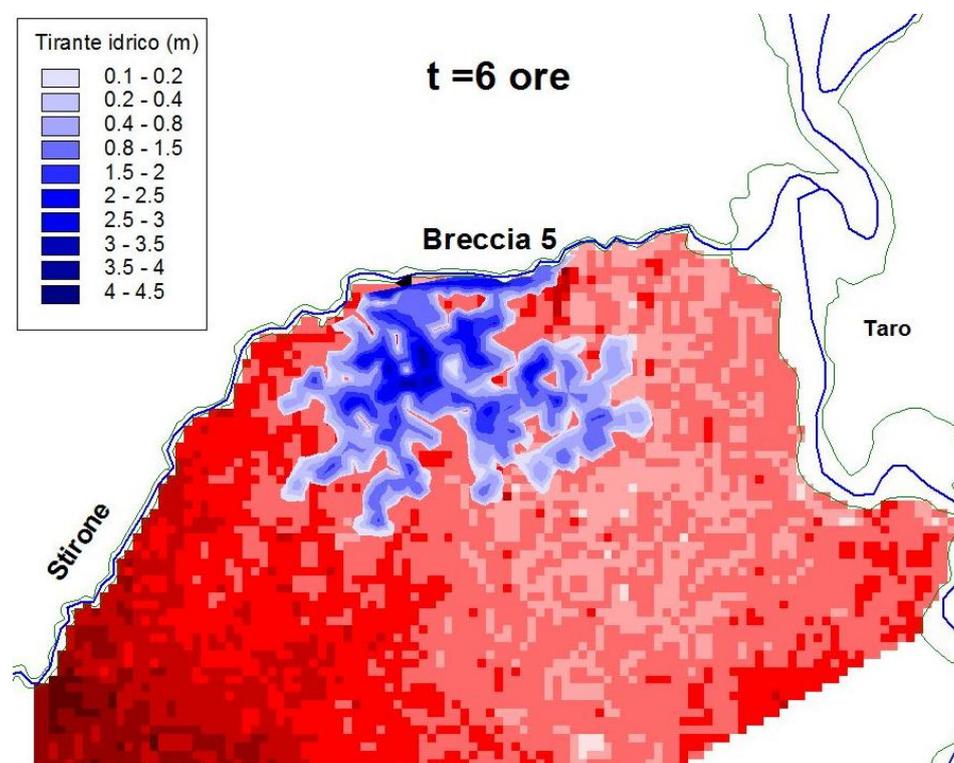
A titolo esemplificativo si riportano di seguito i risultati della simulazione della breccia5\_dx: la Figura 6.6 illustra la posizione della breccia e la zona dove si sviluppa l'allagamento (mostrando anche l'estensione della fascia C), le Figura 6.7-6.10 mostrano invece i risultati della simulazione, in termini di altezze di acqua con una scala monocromatica che va dal blu chiaro al blu scuro, in corrispondenza di determinati istanti temporali ( $t = 3 \text{ h}$ ,  $6 \text{ h}$ ,  $12 \text{ h}$ ,  $24 \text{ h}$ ), dove si è assunto come istante iniziale ( $t=0$ ) il momento dell'innesco della rotta arginale.



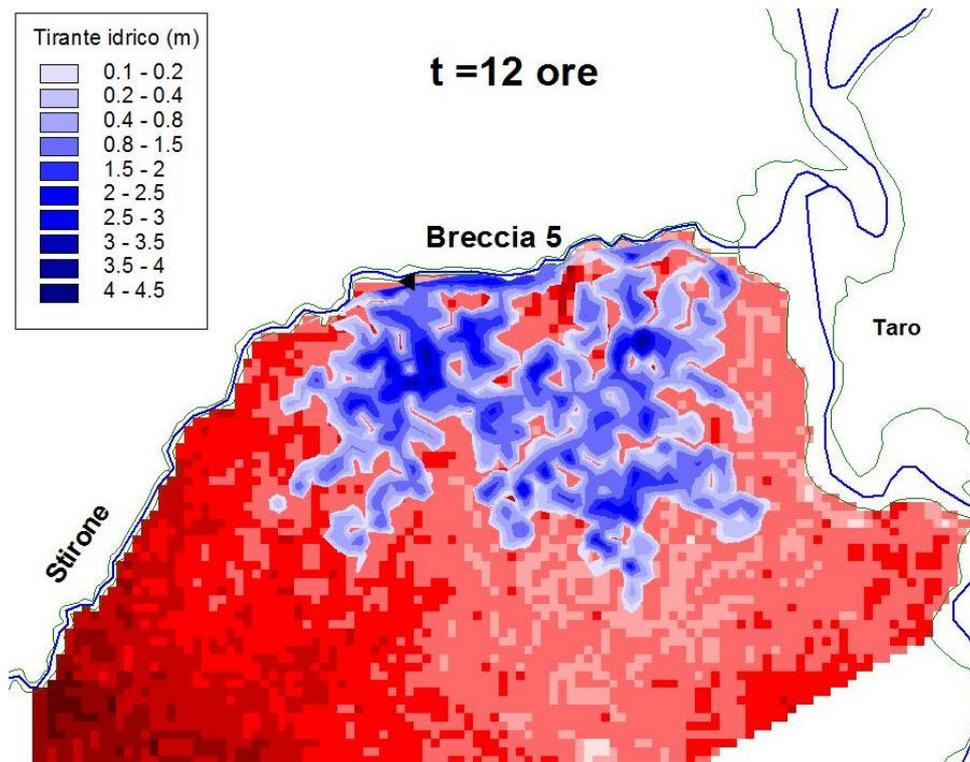
**Figura 6.6** Rappresentazione schematic della zona destra di allagamento e della posizione delle breccia 5\_dx rispetto ad essa.



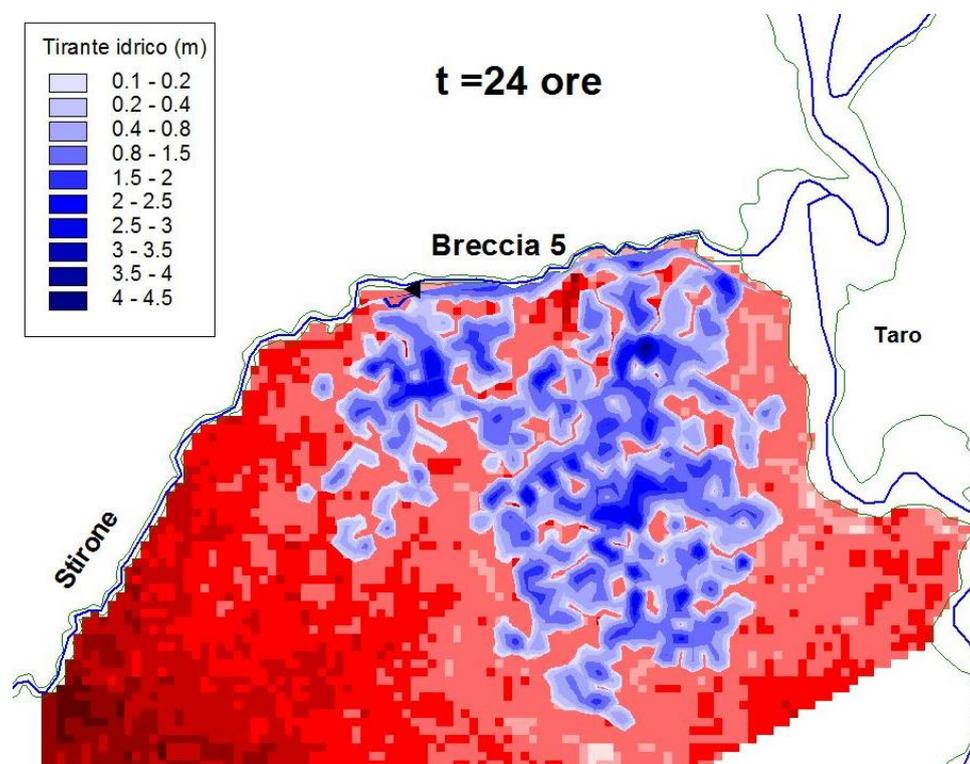
**Figura 6.7** Estensione dell'inondazione a 3 ore dall'innesco della rotta arginale rappresentata sul DEM e valori correnti del tirante idrico.



**Figura 6.8** Estensione dell'inondazione a 6 ore dall'innesco della rotta arginale rappresentata sul DEM e valori correnti del tirante idrico.



**Figura 6.9** Estensione dell'inondazione a 12 ore dall'innesco della rotta arginale rappresentata sul DEM e valori correnti del tirante idrico.



**Figura 6.10** Estensione dell'inondazione a 24 ore dall'innesco della rotta arginale rappresentata sul DEM e valori correnti del tirante idrico.

Gli idrogrammi delle portate in uscita dall'asta dello Stirone attraverso la breccia hanno una durata complessiva di 99 ore ma la parte in cui la portata esondata è maggiore di zero ha una durata minore e variabile a seconda della posizione della breccia (vedi Capitolo 5, Figure 5.14 e 5.15). In particolare le durate effettive degli idrogrammi variano fra le 22 e le 51 ore.

Tuttavia, l'inondazione nel dominio di calcolo continua anche quando l'asta del torrente Stirone non sversa più acqua. Per tale motivo, al fine di rappresentare compiutamente la dinamica dell'inondazione e di coinvolgere tutta l'area potenzialmente allagabile, la simulazione di moto vario 2D è stata estesa per una durata complessiva maggiore, variabile a seconda della posizione della breccia e della durata effettiva dell'idrogramma relativo.

In particolare si è scelto di estendere le simulazioni per un totale di 48, 72, 96 ore rispettivamente per le brecce nel tratto di monte, medio e di valle dello Stirone. Questo perché gli idrogrammi tendono mediamente ad aumentare di durata spostandosi da monte a valle e perché le caratteristiche altimetriche del territorio impongono una durata maggiore per le simulazioni di brecce prospicienti ad aree pianeggianti rispetto a quelle prospicienti aree molto pendenti, dove l'allagamento tende rapidamente a spostarsi verso valle rendendo perciò inopportuna una simulazione troppo prolungata (vedi Figure 6.11 e 6.12).

Un'ulteriore estensione della simulazione, oltre i tre giorni per le brecce di valle, è stata ritenuta non opportuna perché dopo questo intervallo di tempo dall'innescò della rotta arginale devono essere presi in considerazione i fenomeni di infiltrazione e di collettamento da parte del reticolo minore che, come detto, sono stati cautelativamente trascurati nel modello numerico. Inoltre, una eccessiva durata della simulazione, comporterebbe un aumento considerevole dei tempi di calcolo. A questo proposito si riportano in Tabella 7 le durate, per ognuno dei dodici scenari di allagamento, dei tempi di calcolo necessari, in relazione alla durata della simulazione e alla grandezza della mesh utilizzata espressa con il numero dei nodi totali.

Breccia	Durata effettiva idrogramma (ore)	Durata simulazione (ore)	N° nodi mesh di calcolo	Durata calcoli simulazione (hh'mm)
Breccia1_dx	25	48	4865	0'40
Breccia2_dx	25	48	4865	0'40
Breccia3_dx	34	72	4865	1'00
Breccia4_dx	34	72	4865	1'00
Breccia5_dx	26	96	4865	1'20
Breccia6_dx	26	96	4865	1'20
Breccia1_sx	22	48	9723	1'30
Breccia2_sx	22	48	9723	1'30
Breccia3_sx	25	72	9723	2'30
Breccia4_sx	25	72	9723	2'30
Breccia5_sx	51	96	9723	3'30
Breccia6_sx	51	96	9723	3'30

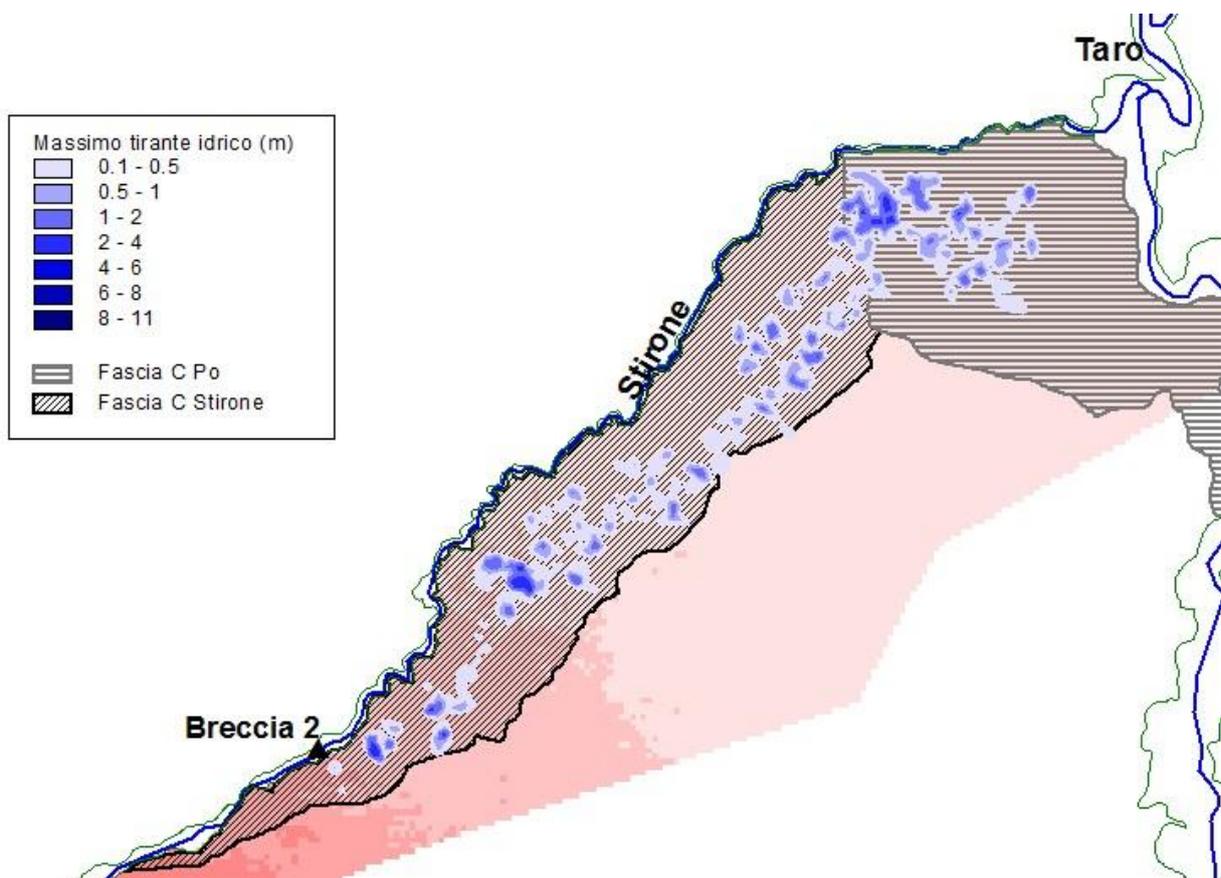
**Tabella 7** Riassunto delle durate effettive degli idrogrammi e delle rispettive durate delle simulazioni di allagamento e dei tempi necessari al calcolo utilizzando un processore Pentium Dual-Core 2,30 GHz e con 4,00Gb di memoria RAM installata.

Come già accennato in precedenza il programma di simulazione 2D degli allagamenti consente di mappare, oltre che il tirante idrico, anche altre variabili come le velocità, il numero di Froude, la *rate* o impulso (prodotto della velocità per il tirante idrico). Proprio quest'ultimo verrà utilizzato per individuare la fascia in cui si possono risentire gli effetti dinamici della breccia arginale (vedi Capitolo 3).

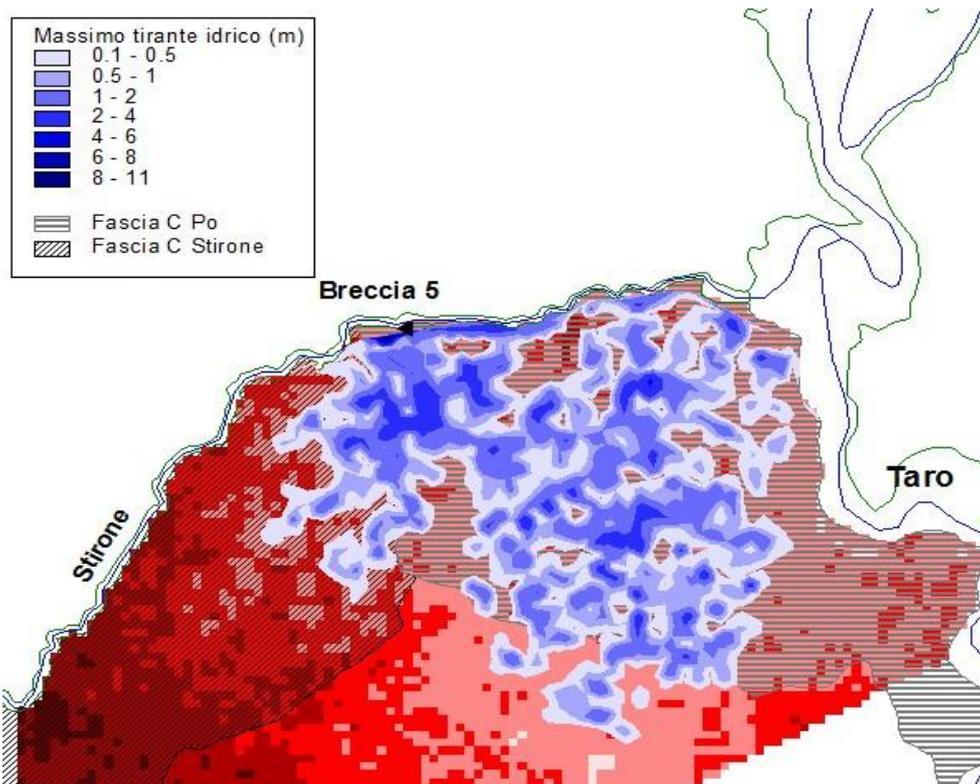
Il programma consente inoltre di elaborare questi risultati e di creare delle mappe del risultato di queste elaborazioni. Una funzione utilizzata durante questo studio è quella che permette di calcolare il massimo di una delle variabili mappate durante tutto l'arco della simulazione; questo permette di determinare per ogni nodo della mesh di calcolo il valore massimo di una grandezza raggiunto in tutto l'arco della simulazione, cioè di creare un involuppo dei massimi. Questa funzione è molto utile per capire quali

punti del dominio spaziale sono maggiormente sollecitati e, calcolando il massimo del tirante idrico, per effettuare un confronto con la fascia C (vedi capitolo successivo).

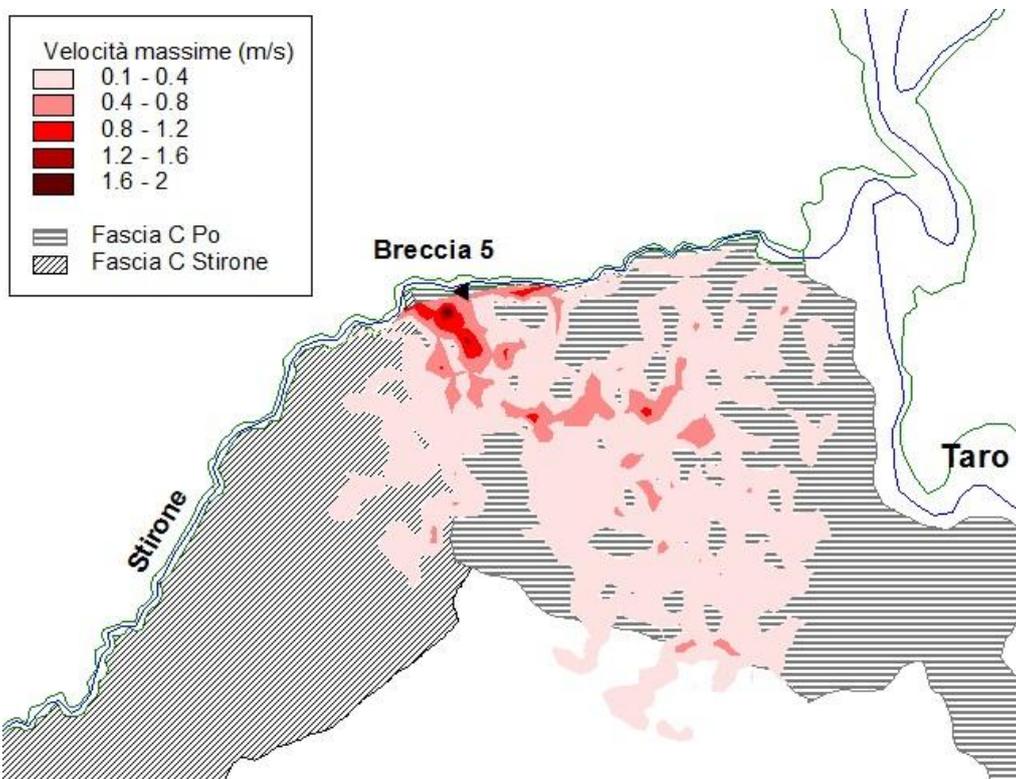
A titolo esemplificativo si riportano di seguito (Figure 6.11 e 6.12) gli inviluppi dei massimi tiranti idrici raggiunti durante le simulazioni della Breccia2\_dx e della Breccia5\_dx in cui si notano anche le notevoli differenze, in termini di dispersione dell'area allagata, fra un breccia situata nel tratto più a monte dell'asta dello Stirone dove il terreno prospiciente l'alveo presenta una pendenza non trascurabile e una breccia situata nel tratto finale caratterizzato da una pendenza minore. Si riportano inoltre, per la Breccia5\_dx, gli inviluppi delle massime velocità e del massimo impulso raggiunti durante la simulazione.



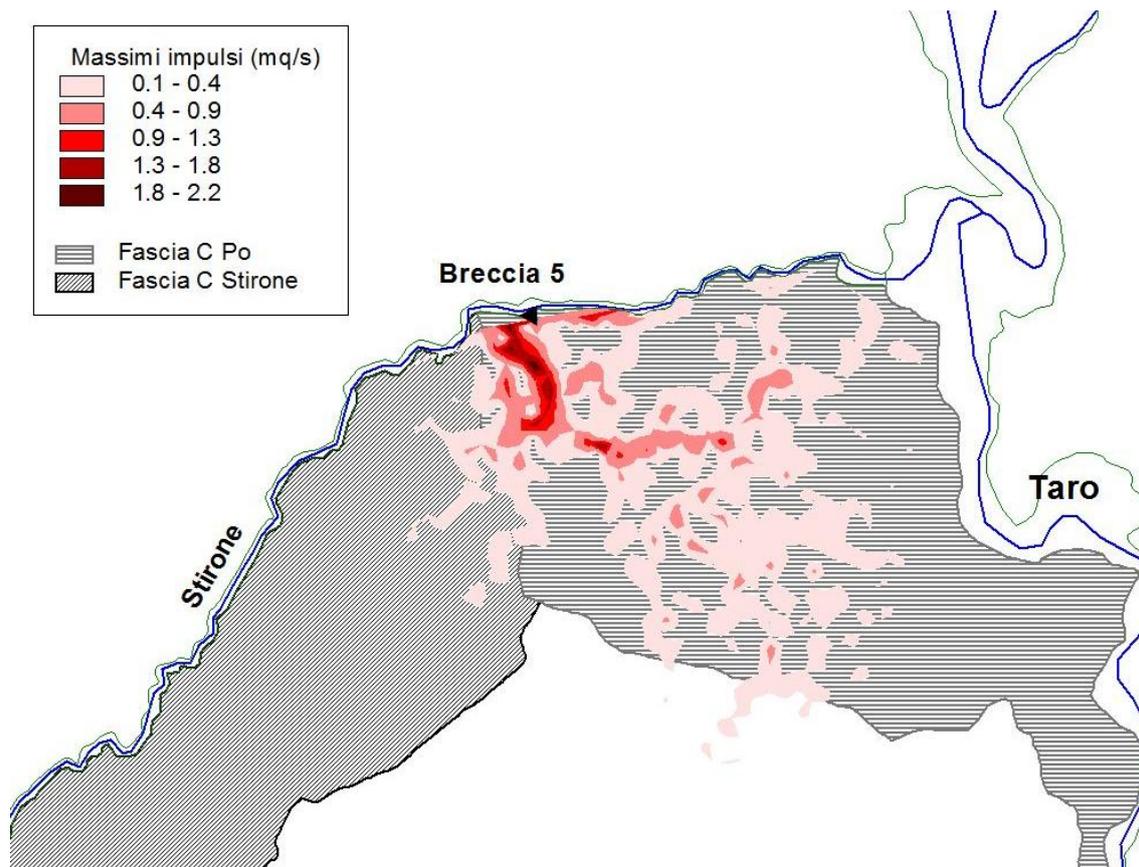
**Figura 6.11** Inviluppo massime altezze idriche raggiunte durante la simulazione della Breccia 2 lato destro.



**Figura 6.12** Inviluppo massime altezze idriche raggiunte durante la simulazione della Breccia 5 lato destro.



**Figura 6.13** Inviluppo delle massime velocità raggiunte durante la simulazione della Breccia 5 lato destro.



**Figura 6.14** Involuppo del massimo impulso raggiunto durante le simulazioni della Breccia 5 lato destro.

## 7 RISULTATI E DISCUSSIONE

### 7.1 Allagamento statico

In questo paragrafo vengono analizzati i risultati in uscita al modello 2D sotto l'aspetto statico dell'allagamento, ovvero considerando solamente l'altezza idrica raggiunta nei vari punti del dominio spaziale durante le simulazioni di breccie arginali. Si ricorda che lo scopo di questo lavoro è quello di determinare un metodo innovativo per la determinazione delle aree allagabili in caso di fenomeni alluvionali e successivamente farne un confronto con la fascia C definita nel PSFF dall'AdB-Po (vedi Capitolo 2) ai fini di valutare il possibile utilizzo della metodologia proposta per aggiornare la mappatura già esistente .

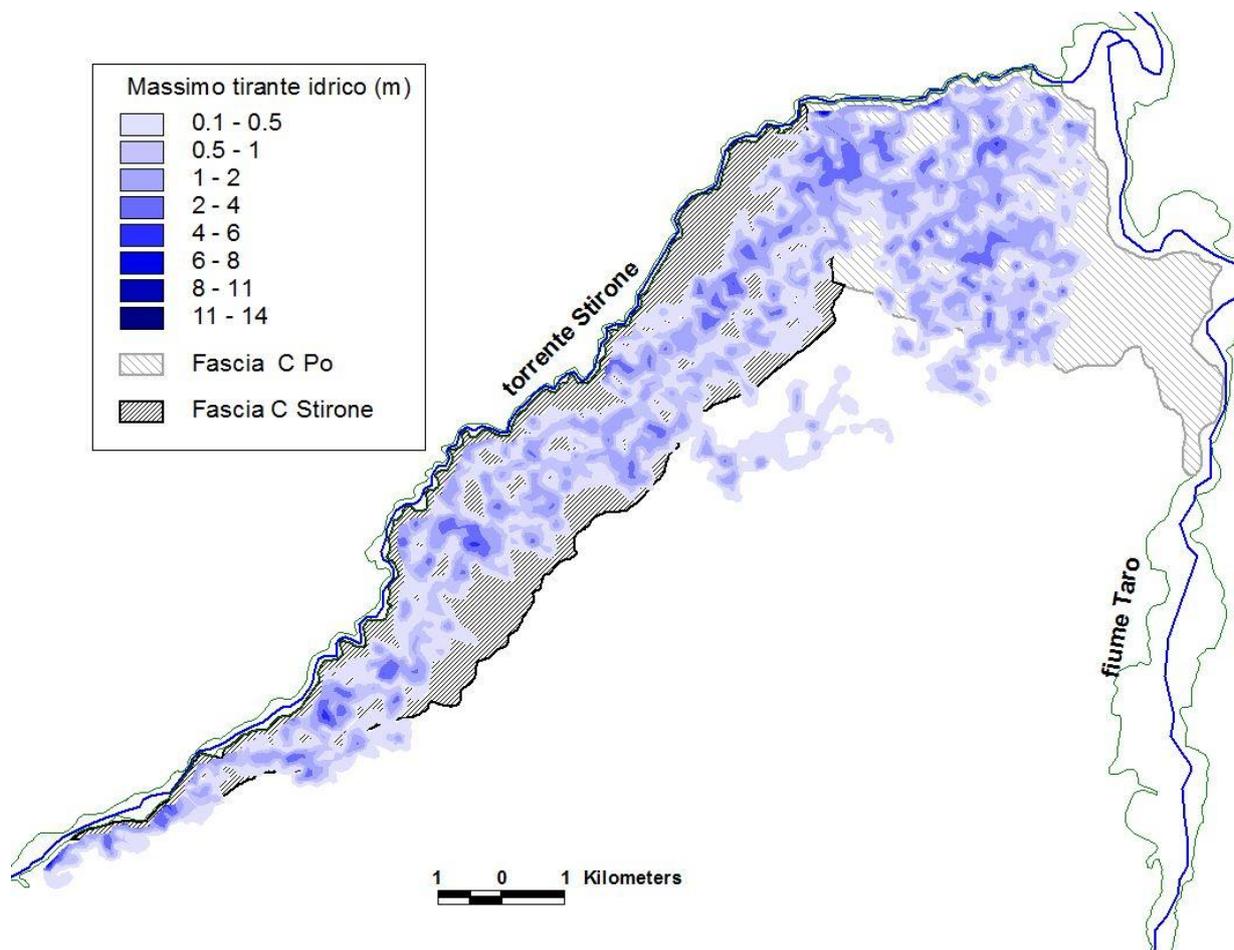
La fascia C rappresenta infatti quella porzione di territorio prospiciente l'alveo fluviale interessata da eventi di piena catastrofica, ovvero maggiore della piena di riferimento ( $Tr = 200$  anni), che comporti una o più rotte degli argini (per sormonto o per cedimento del corpo arginale). I risultati in uscita al modello 2D verranno quindi raffrontati con l'estensione della fascia C del torrente Stirone, preso come corso d'acqua di riferimento per il presente studio, per valutare le eventuali differenze o congruenze.

Per effettuare una perimetrazione di tutti i territori potenzialmente allagabili in caso di rotte arginali per i due lati dello Stirone è stata attuata un'operazione di involuppo dei risultati in uscita dal modello di simulazione 2D. Tali risultati mostrano infatti il massimo tirante idrico raggiunto in ogni nodo della griglia di calcolo durante ogni simulazione di breccia. L'involuppo consiste nel confrontare tali risultati e nel considerare, per ogni nodo, il valore massimo di altezza idrica fra tutti i massimi ottenuti durante le sei simulazioni per lato. Questa operazione consente di valutare quali porzioni di territorio prospiciente l'alveo fluviale dello Stirone vengono allagati in caso di rotte arginali e di valutarne il tirante idrico massimo secondo le simulazioni.

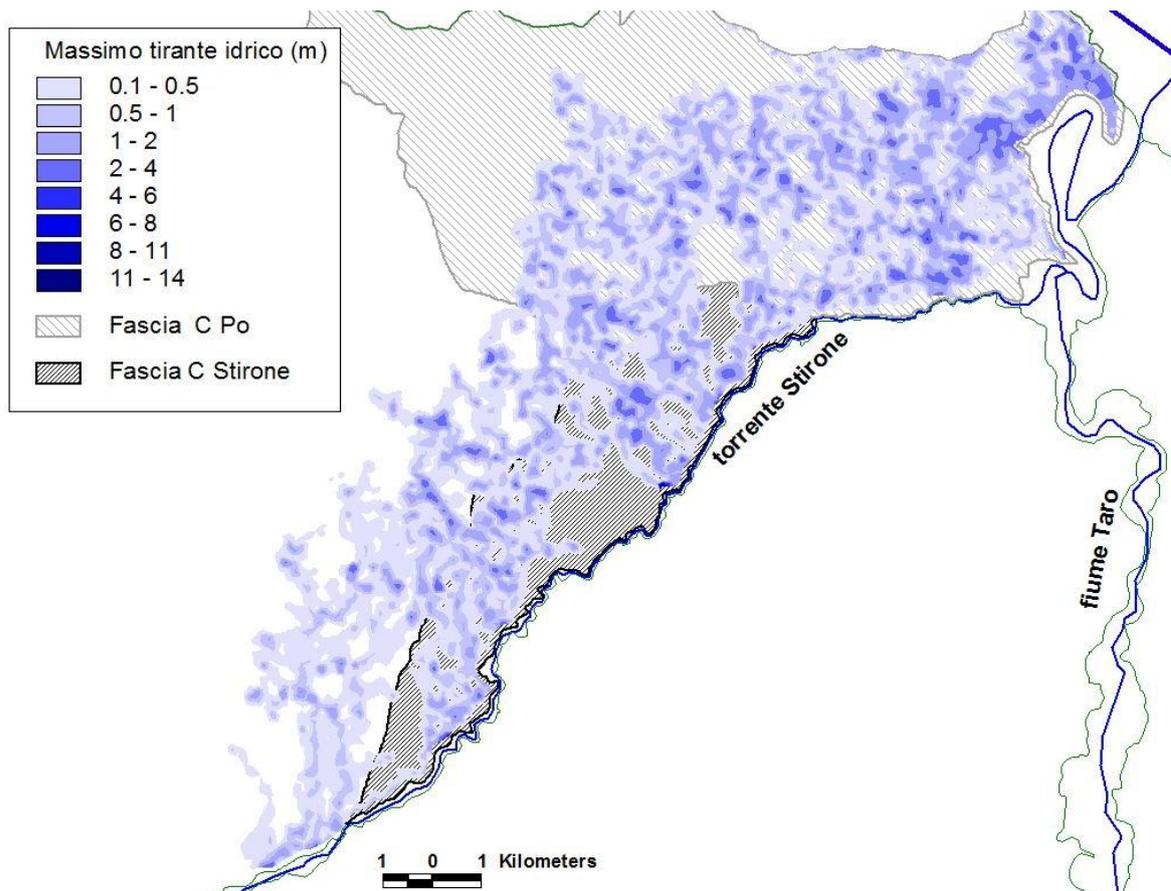
Tali rotte non rappresentano la totalità dei casi possibili di ubicazione della breccia lungo tutto il tratto di corso d'acqua in esame, in quanto sono solo sei per ogni lato, ma l'involuppo dei massimi tiranti idrici raggiunti consente comunque di individuare

un limite esterno oltre il quale, secondo la metodologia qui proposta, non c'è la presenza di terreni allagati.

Di seguito si riportano nelle Figure 7.1 e 7.2 gli inviluppi dei massimi tiranti idrici raggiunti durante gli scenari di simulazione, rispettivamente per il lato sinistro e per il lato destro del torrente Stirone. Le immagini riportano, in una scala monocromatica blu, l'altezza d'acqua raggiunta partendo dal valore minimo di 10 cm considerato come valore soglia per definire un territorio allagato. Per facilitare il confronto nelle immagini che seguono vengono anche riportate le aree delimitate come fascia C del Fiume Po e del Torrente Stirone.



**Figura 7.1** Inviluppo delle massime altezze idriche raggiunte nelle sei simulazioni di rotta arginale per il lato destro del Torrente Stirone.



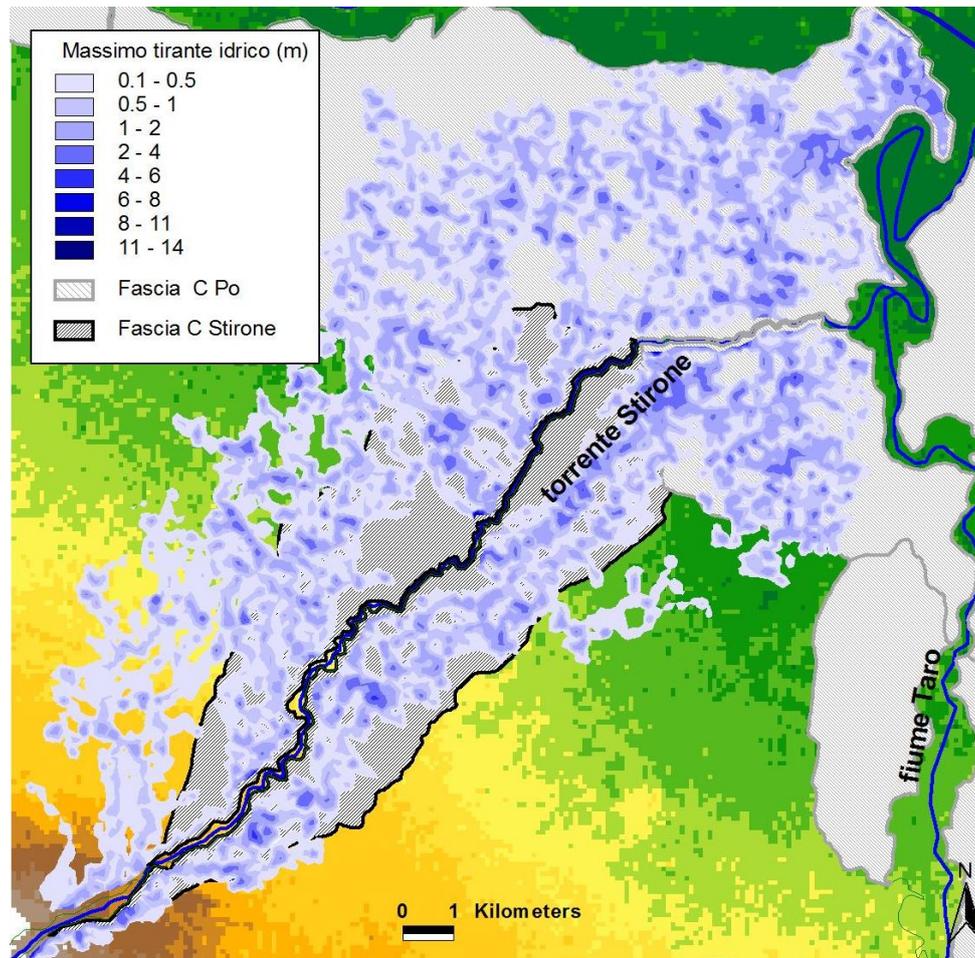
**Figura 7.2** Inviluppo delle massime altezze idriche raggiunte nelle sei simulazioni di rotta arginale per il lato sinistro del Torrente Stirone.

Analizzando i risultati si possono notare notevoli differenze fra l'estensione dell'area allagata per quanto riguarda il lato destro e il lato sinistro.

Il disperdersi dell'allagamento dipende dalla soluzione delle equazioni del pelo libero sulla base dell'altimetria del terreno. E' quest'ultima ad esercitare il controllo maggiormente significativo sulla direzione media del flusso dell'acqua esondata dalle brecce, quando si considerino zone poste ad elevata distanza dalla breccia nel manufatto arginale ed è questa che causa per il lato sinistro una dispersione dell'allagamento maggiore rispetto all'altro lato.

L'altimetria della zona di studio in effetti ha un'inclinazione media in direzione Nord-Est (Figura 7.3), che determina quindi un andamento del flusso nella stessa direzione; questo fa sì che l'inviluppo delle massime altezze idriche nella parte destra del

torrente si mantenga più prossimo all'alveo fluviale, in quanto confinato dalla pendenza del terreno, mentre l'inviluppo nella parte sinistra tenda a distanziarsi in maniera maggiore dall'asta dello Stirone, in quanto la pendenza è divergente rispetto al corso d'acqua.



**Figura 7.3** Rappresentazione degli inviluppi dei massimi tiranti idrici in entrambi i lati del torrente Stirone in relazione alla altimetria dell'area di studio rappresentata secondo una scala cromatica che va dal verde scuro per i terreni con quote più basse al marrone scuro per le quote maggiori.

Per la discussione analitica del confronto fra gli inviluppi di allagamento ottenuti dalle simulazioni numeriche e l'estensione della fascia C è lecito, anche sulla base delle considerazioni precedenti, considerare separatamente i due lati idraulici del torrente Stirone.

### 7.1.1 Lato destro

Per quanto riguarda il lato destro, l'area interessata dall'allagamento si mantiene nella sua quasi totalità compresa all'interno del perimetro della fascia C definita dall'AdB-Po.

Dovendo quindi definire un limite esterno che includa tutte le aree soggette ad allagamento per rotta arginale secondo le simulazioni svolte, questo sarebbe pressoché coincidente con il limite esterno della fascia C già esistente; esistono tuttavia porzioni di territorio esterno al perimetro della fascia C che secondo il modello bidimensionale vengono allagate: tali discordanze possono essere spiegate sulla base dei due criteri usati per mappare le aree potenzialmente allagabili.

Il criterio usato per la definizione della fascia C è puramente altimetrico in quanto vengono raccordati i tiranti idrici corrispondenti a una piena catastrofica con il limite fisico del bacino. Nel caso particolare dello Stirone, l'AdB-Po ha definito come area potenzialmente allagabile per il lato destro, tutta la porzione di territorio compresa fra il torrente Stirone e il rilevato arginale del torrente Rovacchia, affluente sinistro dello Stirone stesso (vedi Capitolo 4 paragrafo 4.6) che costituisce un ostacolo altimetrico al diffondersi dell'allagamento.

Il criterio usato nell'ambito del presente lavoro sfrutta invece i risultati in uscita dal modello bidimensionale di allagamento. Questo, come già descritto più volte, utilizza l'informazione altimetrica disponibile come base su cui calcolare la direzione del flusso d'acqua risolvendo le equazioni di moto vario.

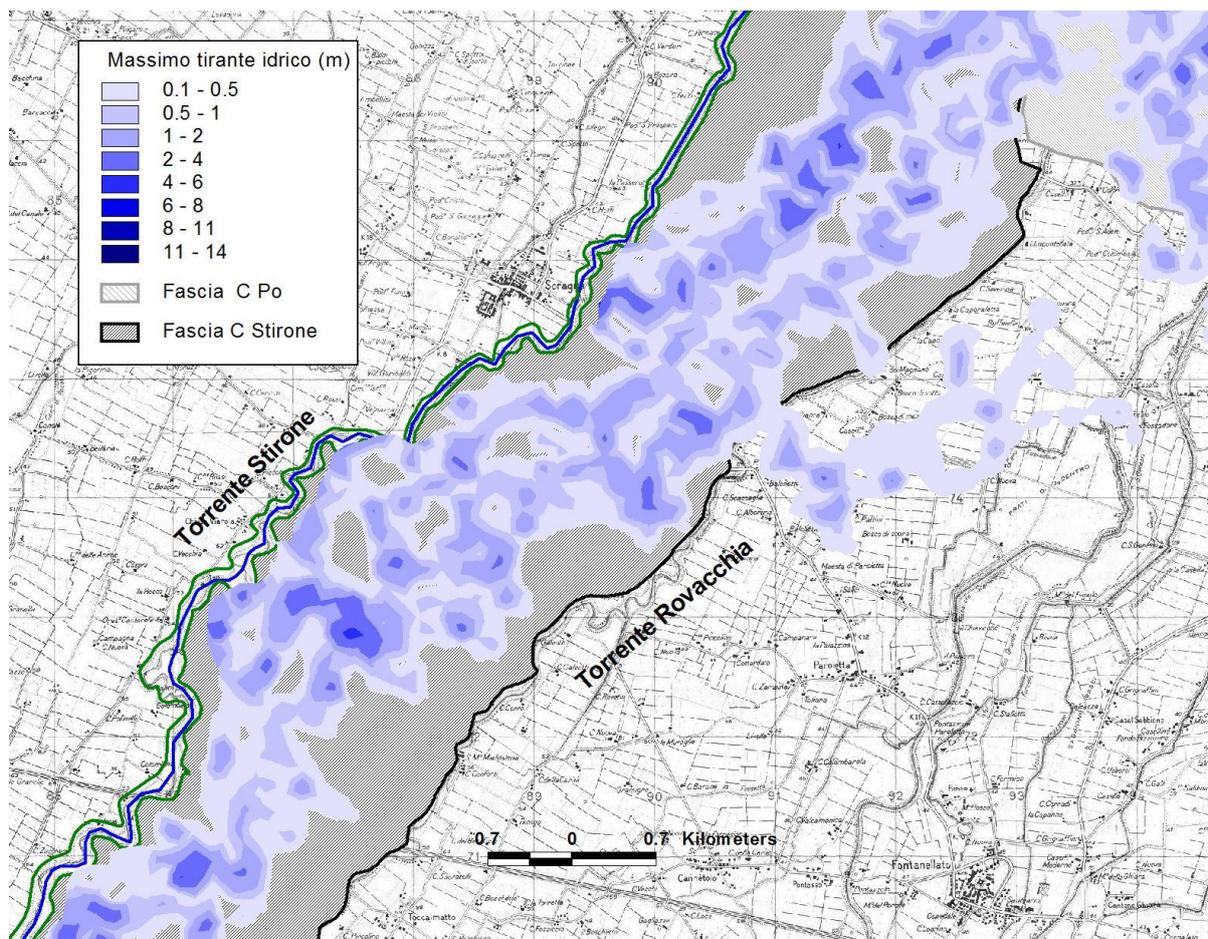
Le differenze fra l'involuppo dei massimi tiranti idrici simulati e la fascia C dello Stirone nella parte destra sono costituite da una porzione di territorio allagata al di fuori del confine esterno della fascia nei pressi dell'abitato di Soragna (Figura 7.4). Il modello in questo caso non riesce a rilevare l'ostacolo altimetrico costituito dal rilevato arginale del torrente Rovacchia e determina quindi un flusso idrico che lo oltrepassa.

Il problema alla base di questa discordanza è quindi la modesta risoluzione e limitata attendibilità del DEM utilizzato per la costruzione della griglia di calcolo. La

risoluzione in pianta del grid è di 90 metri, non sufficientemente piccola per rilevare la presenza dell'argine di dimensioni planimetriche ridotte (vedi Figura 7.5).

La correttezza del risultato in uscita dal modello di simulazione risulta essere quindi influenzata negativamente dalla scarsa qualità del rilievo altimetrico utilizzato. Per contro, la realizzazione di uno studio su vasta scala spaziale, come ad esempio quello richiesto dagli aggiornamenti della mappatura della pericolosità idraulica previsti tra gli adempimenti richiesti dalla EC2007/60, non è pensabile possa ricorrere a simulazioni condotte con modelli 2D su mesh di calcolo ad elevatissima risoluzione (~1m), per evidenti problemi pratici.

Altre zone allagate dal modello, oltre il confine fisico del Rovacchia, si trovano anche nel tratto più a valle dello Stirone (lato destro) ma, in questo caso, i terreni interessati si trovano nella porzione di territorio compresa nella fascia C del fiume Po e quindi non possono essere confrontati con i risultati del modello che simula il comportamento del solo Stirone.



**Figura 7.4** Particolare dell'involuppo dei massimi tiranti idrici simulati confrontato con la fascia C.



**Figura 7.5** Fotografia del rilevato arginale del torrente Rovacchia (fonte: Google Earth).

### **7.1.2 Lato sinistro**

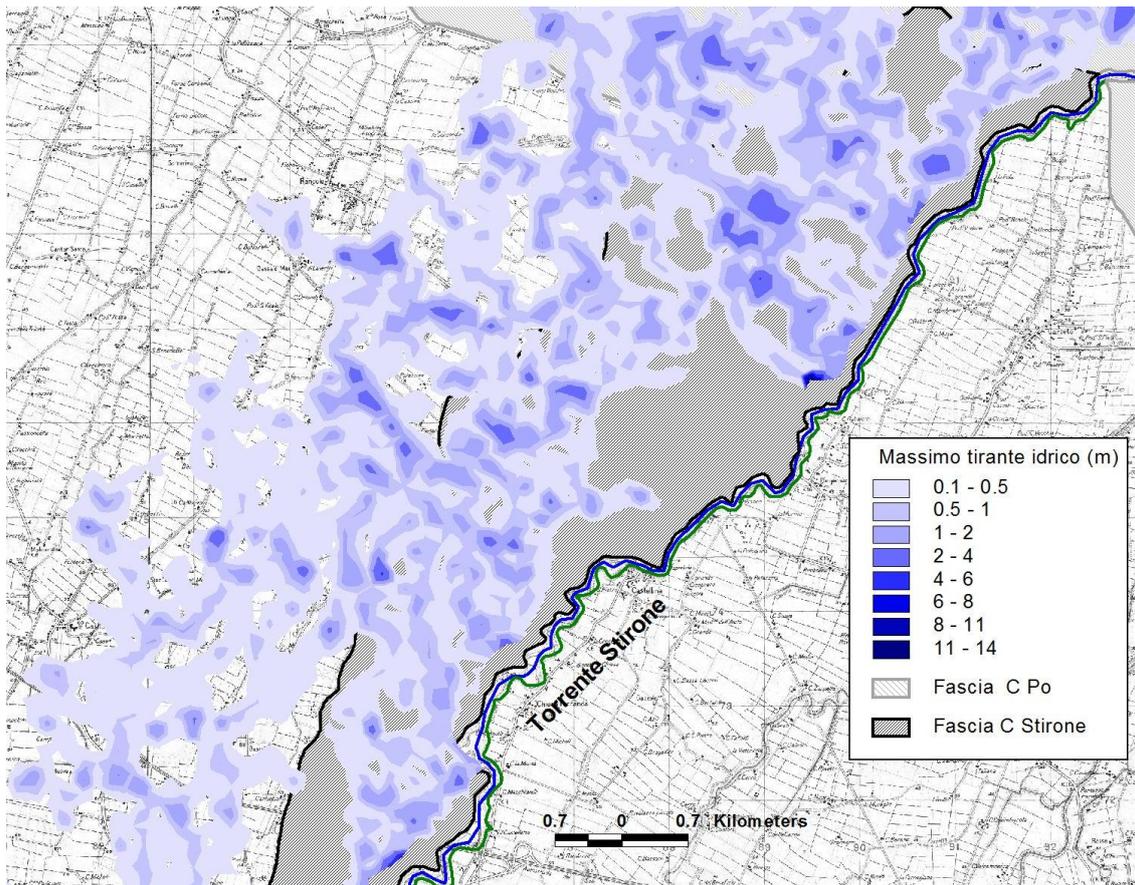
Andando ad analizzare l'area alla sinistra del torrente Stirone si nota che l'involuppo dei massimi tiranti idrici raggiunti durante le simulazioni ha un'estensione notevolmente maggiore rispetto a quella della fascia C.

Dovendo definire un limite esterno che includa tutte le aree soggette ad allagamento per rotta arginale secondo il modello bidimensionale, questo sarebbe più distante dall'asta dello Stirone rispetto al confine di fascia C.

Entrando più nel dettaglio, si sottolinea che anche per questo lato il criterio utilizzato per definire l'area della fascia C è stato quello di considerare come confine esterno un corso d'acqua. La quasi totalità della fascia C sinistra segue infatti il corso dello Scolo Fontana (vedi Capitolo 4 Paragrafo 4.6), canale utilizzato a scopi di bonifica e irrigui.

I risultati in uscita dal modello di simulazione mostrano che l'allagamento interessa terreni che si trovano anche oltre questo canale (Figura 7.6), arrivando ad una distanza dall'asta del torrente che, nei pressi dell'abitato di Soragna, raggiunge quasi i 6 km, il doppio rispetto alla distanza del confine della fascia C. La differenza con il lato opposto sta nel fatto che lo Scolo Fontana non presenta dei rilevati arginali di difesa importanti (vedi la foto in Figura 7.7), non esiste quindi un ostacolo fisico (barriera altimetrica) al propagarsi del flusso d'acqua nel caso in cui lo Scolo Fontana si trovi in condizioni di sezione piena.

La delimitazione della fascia C in questo lato dello Stirone confrontata con i risultati ottenuti nel presente lavoro sembra essere poco cautelativa. Si sottolinea tuttavia che il DEM utilizzato non rileva, sempre a causa della sua scarsa risoluzione, la presenza dello Scolo Fontana: tale canale, pur non rappresentando un ostacolo altimetrico al diffondersi dell'esondazione, può contribuire al collettamento dei volumi idrici dell'allagamento provocando uno smorzamento dello stesso.



**Figura 7.6** Rappresentazione della fascia C del Torrente Stirone in sinistra idraulica a cui è sovrapposto l'involuppo dei massimi tiranti idrici raggiunti durante le simulazioni (in scala monocromatica blu).



**Figura 7.7** Fotografia dello Scolo Fontana in cui si nota l'assenza di rilevati arginali importanti (fonte: Google Earth)

## 7.2 Allagamento dinamico

In questo paragrafo vengono illustrati i risultati del modello bidimensionale di simulazione in termini di velocità dell'acqua e di impulso ossia del prodotto fra il tirante idrico e la velocità. I valori di queste due variabili sono disponibili, così come il tirante idrico descritto precedentemente, per ogni nodo della griglia di calcolo utilizzata nel modello. I valori dell'impulso vengono utilizzati inoltre per effettuare un confronto con i risultati dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (2003) sulla definizione di una distanza di pericolo in relazione agli effetti dinamici derivanti da fenomeni di rotte arginali (vedi Capitolo 3).

Per quanto riguarda la velocità dell'acqua in uscita dalle breccie, il modello bidimensionale ne calcola per ogni nodo il valore in funzione del tempo. Per ogni scenario di inondazione viene memorizzata la velocità, così come le altre variabili idrologiche, a intervalli di mezzora durante tutto l'arco della simulazione; anche in questo caso è stata effettuata un'operazione di inviluppo dei massimi per visualizzare le zone maggiormente sollecitate in termini di velocità di flusso.

Quest'operazione è stata svolta calcolando per ognuno dei dodici scenari simulati il massimo valore di velocità durante tutta la durata della simulazione, ottenendo così la mappatura dei massimi per ogni breccia arginale.

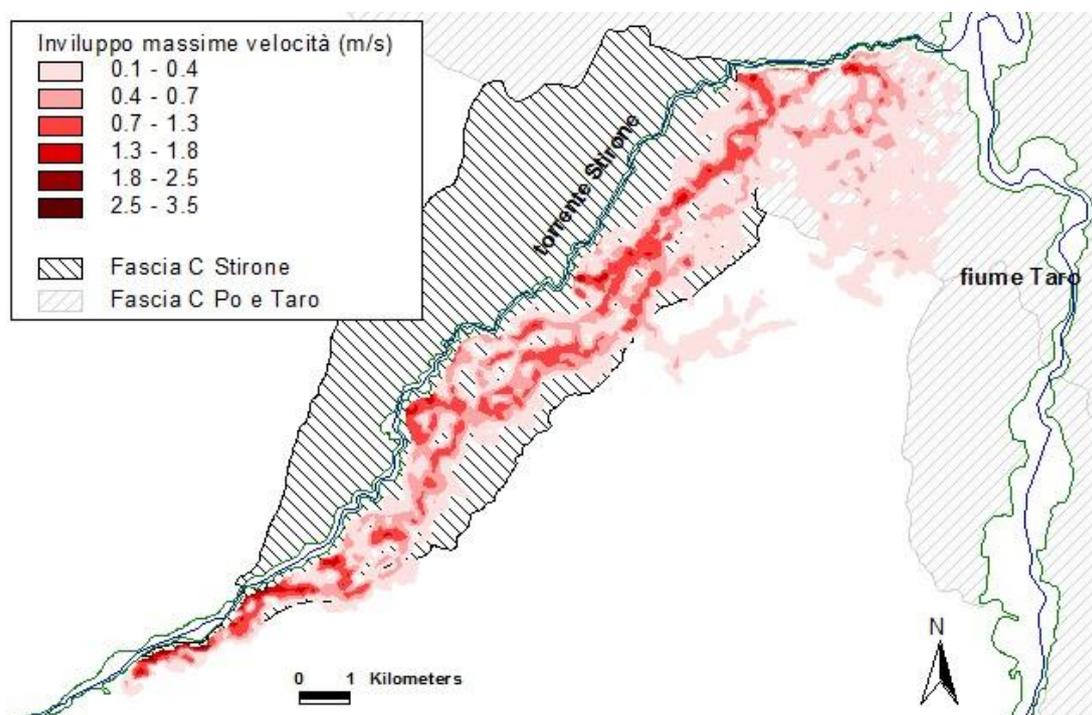
L'inviluppo è stato creato considerando, per ogni nodo delle due mesh di calcolo, il valore massimo di velocità fra tutti i massimi memorizzati precedentemente; il risultato permette di visualizzare, per ogni lato dello Stirone, la variazione di velocità in termini generali su tutto il dominio spaziale di integrazione non solo quindi della singola breccia.

Anche per le velocità valgono le stesse considerazioni fatte per il tirante idrico: l'inviluppo non mostra tutti i massimi possibili derivanti da una posizione casuale della breccia in tutta la lunghezza del torrente Stirone in esame. Le breccie simulate sono sei per ogni lato, non tutte le possibili ubicazioni di rotta sono state quindi prese in considerazione, ma il numero di breccie simulate è sufficiente per mostrare l'andamento delle velocità in relazione alla distanza dagli argini.

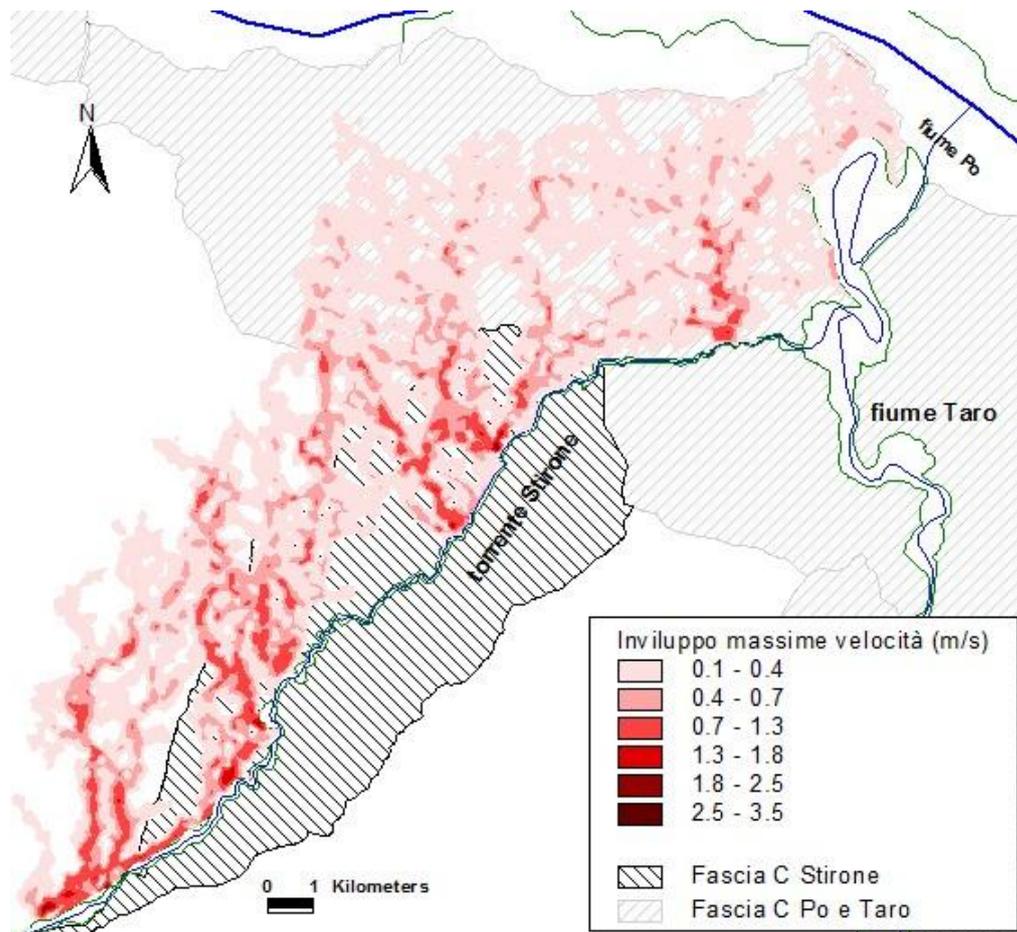
Di seguito si riportano nelle Figure 7.8 e 7.9 gli inviluppi delle massime velocità raggiunte durante gli scenari di simulazione rispettivamente per il lato sinistro e per il lato destro del torrente Stirone. Le immagini illustrano, in una scala monocromatica rossa, le velocità del flusso idrico raggiunte partendo dal valore minimo di 0,1 m/s in rosso chiaro fino ai 3,5 m/s in rosso scuro.

Analizzando l'intensità della velocità si nota, in entrambi i lati del torrente, che questa diminuisce all'aumentare della distanza dal rilevato arginale: questo effetto si poteva prevedere in quanto la larghezza del fronte di propagazione dell'onda, in uscita dalla breccia, aumenta notevolmente con l'allontanarsi dalla breccia stessa, causando così una diminuzione della portata specifica e quindi della velocità.

La mappatura dell'involuppo della velocità permette inoltre di distinguere facilmente i flussi originati dalle breccie che tendono a canalizzarsi seguendo le linee di massima pendenza e interessando le zone più depresse del territorio. Si nota anche che, proprio in virtù di una pendenza del terreno maggiore, le velocità determinate nella zona valliva della Stirone, nei pressi della confluenza in Taro, sono inferiori rispetto alle velocità dei flussi idrici situati più a monte.



**Figura 7.8** Involuppo delle massime velocità (m/s) simulate dal modello per il lato destro del Torrente Stirone.



**Figura 7.9** Inviluppo delle massime velocità (m/s) simulate dal modello per il lato sinistro del Torrente Stirone.

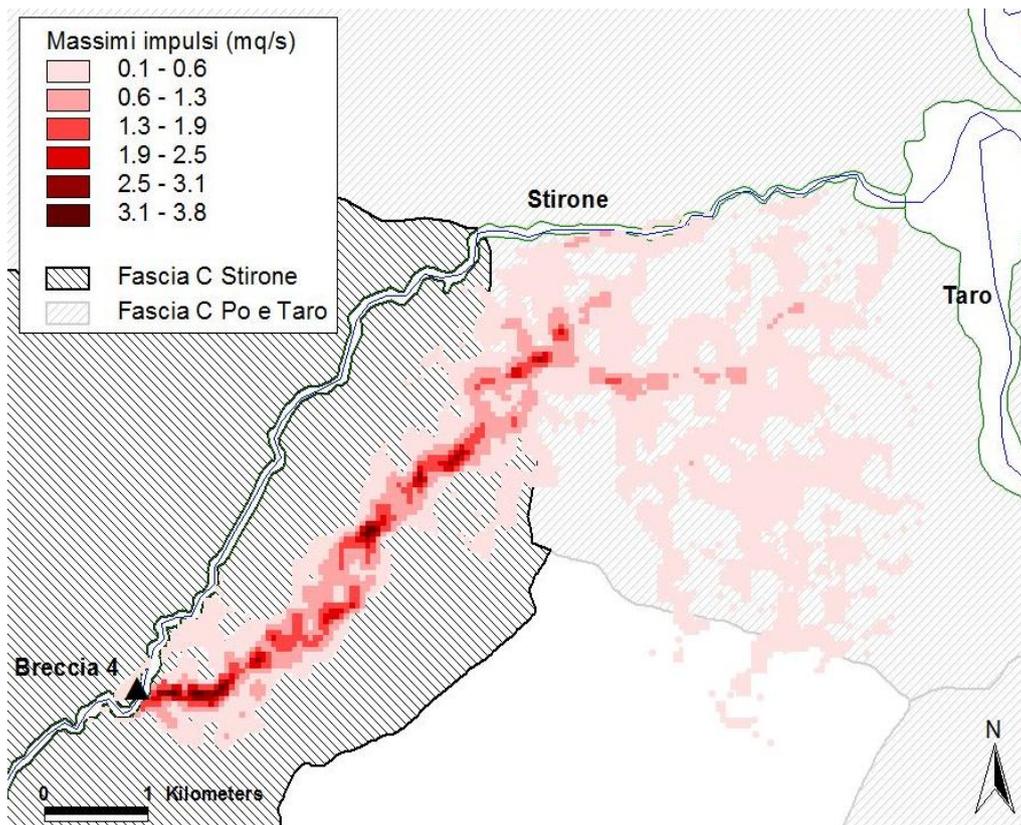
La seconda variabile studiata per valutare gli effetti dinamici è l'impulso (I), definito come il prodotto fra la velocità (v) del fronte di propagazione dell'onda e il tirante idrico (h) ovvero come portata specifica per unità di larghezza del fronte (Q/L) di propagazione dell'onda di breccia a campagna:

$$I = \frac{Q}{L} = v * h$$

Questa variabile è stata presa a riferimento per la costruzione di una distanza di rispetto oltre la quale non sono più ritenuti pericolosi i fenomeni dinamici dell'onda di breccia.

In questo caso, a differenza di tirante e velocità, non è stata effettuata un'operazione di involuppo dei valori di tutte le brecce simulate in quanto il calcolo di una distanza di pericolo per la valutazione degli effetti dinamici deve essere fatto per una singola breccia arginale. Per questo motivo sono stati estratti i massimi valori di impulso su tutto l'arco della simulazione per ogni singola breccia, calcolando l'impulso stesso come prodotto fra valori di velocità e tirante contemporanei.

Nella Figura 7.10 viene rappresentato, a titolo di esempio, uno dei dodici scenari simulati, relativo alla Breccia4\_dx, in cui è rappresentato l'andamento dei massimi impulsi con una scala monocromatica rossa.



**Figura 7.10** Rappresentazione dei massimi impulsi del flusso in uscita dalla Breccia 4 del lato destro del torrente Stirone.

Dall'analisi dei risultati si osserva che per tutti gli scenari di rotta arginale i valori massimi di impulso sono situati nei pressi della breccia e che, allontanandosi dalla stessa, l'intensità del prodotto velocità – tirante diminuisce. Questo effetto è dovuto alla dispersione del fronte di propagazione dell'onda che causa una diminuzione di portata specifica e quindi di intensità degli effetti dinamici ad essa associati. Si sottolinea come la dispersione dipenda dalla morfologia del territorio prospiciente la rotta arginale e che sono possibili dei confinamenti del flusso dovuti alla pendenza del terreno.

Come si nota anche in Figura 7.10 i flussi in uscita dalle brecce nelle zone più montane del dominio si mantengono più confinati e, di conseguenza, con valori di impulsi maggiori, mentre, nelle zone pianeggianti, la dispersione aumenta notevolmente causando la diminuzione drastica dell'impulso.

L'interesse di questo lavoro, per quanto riguarda gli effetti dinamici, è quello di definire una distanza di pericolo all'interno della quale tali effetti risultano essere non trascurabili e creare un buffer di pericolosità attorno ai tratti arginali del torrente Stirone.

La definizione di tale distanza si è basata sul lavoro dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (2003) che ha messo a punto una procedura per individuare la fascia di pericolo attraverso delle espressioni empiriche basate sulla geometria della breccia, la massima portata in alveo, e l'angolo di dispersione della portata uscente dalla rotta (vedi Capitolo 3).

La procedura identifica un indice di rischio ( $i_r$ ) che coincide con la definizione di impulso data precedentemente; viene inoltre identificato un valore soglia di questo indice pari a  $0,35 \text{ m}^2/\text{s}$ , al di sopra del quale gli effetti dinamici non sono trascurabili.

Definito questo valore, nota la portata in alveo e la geometria della breccia, la distanza di pericolo è definita nella procedura dei Bacini Romagnoli secondo la seguente espressione:

$$d = \frac{\frac{q_{\max}}{i_r} - 1}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} L_b$$

Dove:

- $d$  è la distanza di pericolo dal fronte della breccia (m);
- $L_b$  è la larghezza della breccia (m);
- $\alpha$  è l'angolo di dispersione della portata di breccia ( $^\circ$ );
- $q_{\max}$  è la portata massima in uscita dalla breccia per unità di larghezza ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

La portata massima in uscita dalle brecce  $q_{\max}$  viene valutata, nella procedura dei Bacini Romagnoli, con l'ausilio di una relazione empirica che lega le caratteristiche geometriche della breccia profondità e larghezza alla portata massima in alveo.

Nel presente lavoro si sono calcolate due distanze di sicurezza differenti: la prima chiamata *d Out Bacini Romagnoli*, viene valutata sulla base della portata massima in uscita dalla breccia calcolata con la relazione empirica sopra citata, dove la portata

massima in alveo considerata per il calcolo è la stessa Q200, ricavata dalla Direttiva Piene, utilizzata come condizione al contorno nel modello idraulico quasi 2D (Capitolo 5); la seconda distanza, chiamata *d proposta*, è stata calcolata usando come portata massima in uscita dalla breccia quella simulata dal modello quasi bidimensionale di propagazione dell'onda di piena nell'alveo dello Stirone utilizzato nel presente lavoro (Capitolo 5).

L'angolo di dispersione è stato scelto pari a 60° decidendo di porsi nella situazione più cautelativa possibile. La procedura dei Bacini Romagnoli prevede infatti un criterio morfologico per la scelta di tale angolo, proponendo un angolo di 90° per i tratti di alveo fluviale rettilinei, 60° per i tratti in interno curva, 120° per i tratti in esterno curva. La scelta ricade quindi sulla situazione più gravosa dal punto di vista dell'impulso dinamico: un angolo di dispersione più basso causa infatti una minore attenuazione degli effetti dinamici rispetto al caso di angoli superiori.

Nella Tabella 8 vengono mostrate le due differenti distanze di pericolo in relazione alle caratteristiche geometriche delle sei brecce utilizzate nel modello quasi 2D e delle portate massime in uscita dalle stesse (portate per unità di larghezza della breccia) valutate attraverso i due metodi sopra citati.

Nome	Lato	Profondità (m)	Larghezza (m)	Q max alveo (m <sup>3</sup> /s)	qmax Bacini Romagnoli (m <sup>2</sup> /s)	qmax HR (m <sup>2</sup> /s)	d OUT Bacini Romagnoli (m)	d proposta (m)
breccia 1	destro	1.86	250	680	0.53	1.17	116	511
breccia 2	destro	3.15	250	795	1.12	1.83	479	913
breccia 3	destro	1.55	250	870	0.48	1.35	83	618
breccia 4	sinistro	1.4	250	680	0.38	1.35	17	621
breccia 5	sinistro	2.33	250	795	0.77	1.40	260	652
breccia 6	sinistro	2.51	250	870	0.88	1.97	330	1002

**Tabella 8** Riassunto delle caratteristiche geometriche delle brecce e delle portate in uscita valutate secondo le due procedure esposte.

La distanza calcolata seguendo la valutazione di portata in uscita dalle rotte arginali proposta nella procedura Bacini Romagnoli è risultata essere inferiore rispetto a quella proposta nel presente lavoro.

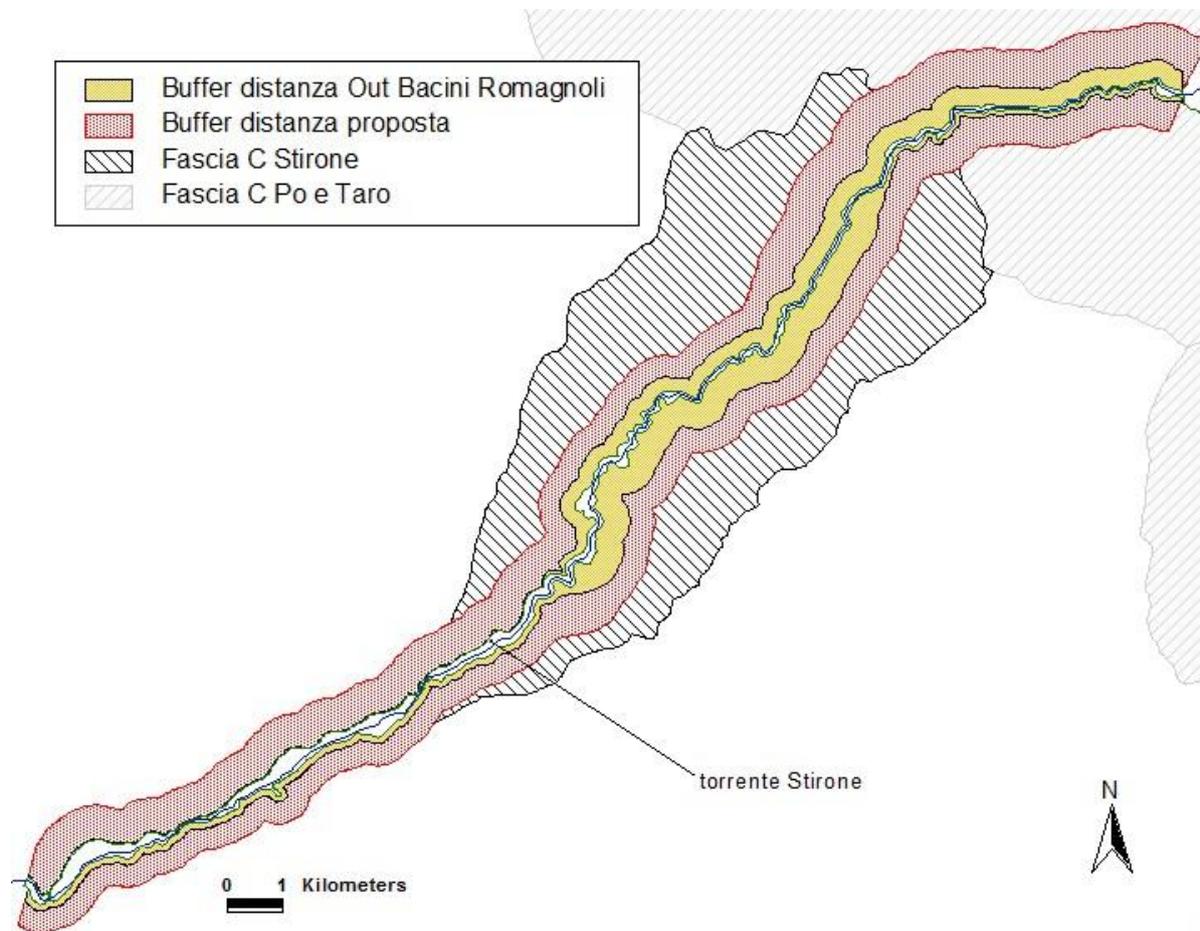
Attraverso il programma di elaborazione di dati GIS è stato possibile costruire dei buffer di pericolosità, attorno ai tratti arginali, basati sulle distanze calcolate precedentemente. Si sono ottenuti due buffer per lato dello Stirone: il primo definito secondo la distanza *Out Bacini Romagnoli* e il secondo attraverso la distanza *d proposta*.

Il tratto del Torrente Stirone preso in esame nel presente lavoro è stato suddiviso nelle tre parti (monte, medio, valle) utilizzate per la scelta della posizione delle brecce del modello quasi 2D (Capitolo 5) e, per ciascuna di queste si è fatto riferimento alla distanza di pericolo corrispondente (vedi Tabella 8). Usando una funzione di ArcView (Buffer Selected Features) le tracce dei rilevati arginali, destro e sinistro, sono state traslate di una quantità pari alla distanza di pericolo calcolata, ottenendo dei buffer che seguono l'andamento degli argini stessi.

Data la variabilità nei valori della distanza di pericolo stimati lungo il corso d'acqua, l'andamento dei buffer presentava delle discontinuità in corrispondenza del cambio di tratto: dette discontinuità sono state raddrizzate manualmente cercando di massimizzare il raggio della curva di raccordo.

Il risultato di questa elaborazione è mostrato in Figura 7.11 in cui si nota l'estensione maggiore del buffer calcolato sulla *d proposta*, in rosso, rispetto al buffer calcolato con la distanza *d Out Bacini Romagnoli*, in giallo. L'estensione di quest'ultimo buffer è particolarmente ridotta nel tratto montano dello Stirone: ciò perché a parità di larghezza della breccia (250 m per tutte le sei brecce) la portata massima in alveo è quella corrispondente alla sezione 67 (680 m<sup>3</sup>/s) inferiore rispetto a quella dei tratti medio e di valle (rispettivamente di 795 e 870 m<sup>3</sup>/s); le profondità delle brecce montane, inoltre, sono piccole. Questi fattori influiscono notevolmente sul calcolo della portata uscente dalla breccia secondo la formula dei Bacini Romagnoli (Capitolo 3) e quindi sulla distanza di pericolosità.

La *d proposta* non risente di tali effetti poiché la portata in uscita dalle brecce è il risultato delle simulazioni svolte attraverso il modello numerico idraulico quasi 2D.



**Figura 7.11** Rappresentazione schematica dei buffer di pericolosità valutati secondo le due differenti modalità proposte.

Dopo aver determinato i buffer di pericolosità attorno ai tratti arginali, è stato effettuato un confronto fra le distanze di sicurezza e i risultati, in termini di impulso, in uscita al modello bidimensionale di simulazione degli allagamenti.

Il calcolo della distanza oltre la quale gli effetti dinamici non vengono considerati pericolosi, è stato effettuato prendendo un valore soglia dell'indice di rischio  $i_r$ , ovvero dell'impulso, pari a  $0,35 \text{ m}^2/\text{s}$ .

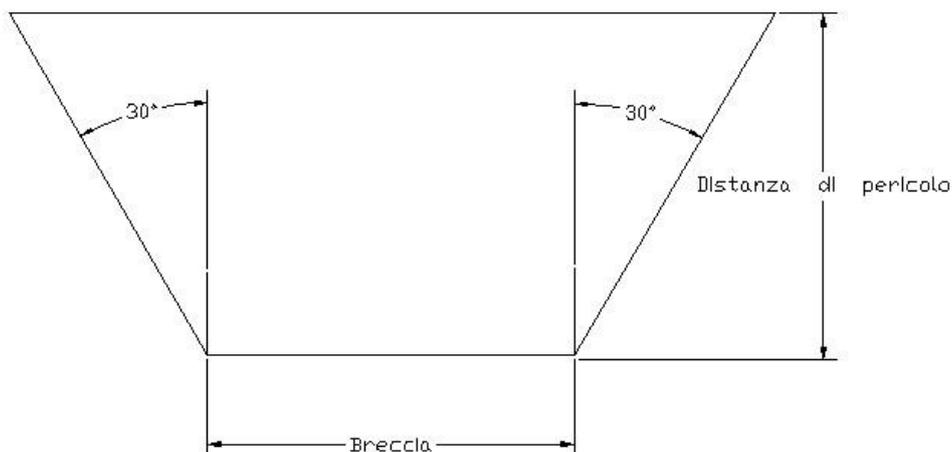
Fra tutti i valori massimi di impulso calcolati dal modello per ognuno dei dodici scenari, sono stati considerati solo quelli maggiori del valore soglia, in modo da poter valutare l'attendibilità delle due distanze di pericolo calcolate precedentemente

rispetto alla simulazione effettuata. Il confronto è possibile in quanto in entrambe le procedure di calcolo della distanza di pericolo si è considerato, per il torrente Stirone, un evento di piena con tempo di ritorno duecentennale, lo stesso considerato nelle condizioni al contorno del modello bidimensionale di simulazione degli allagamenti.

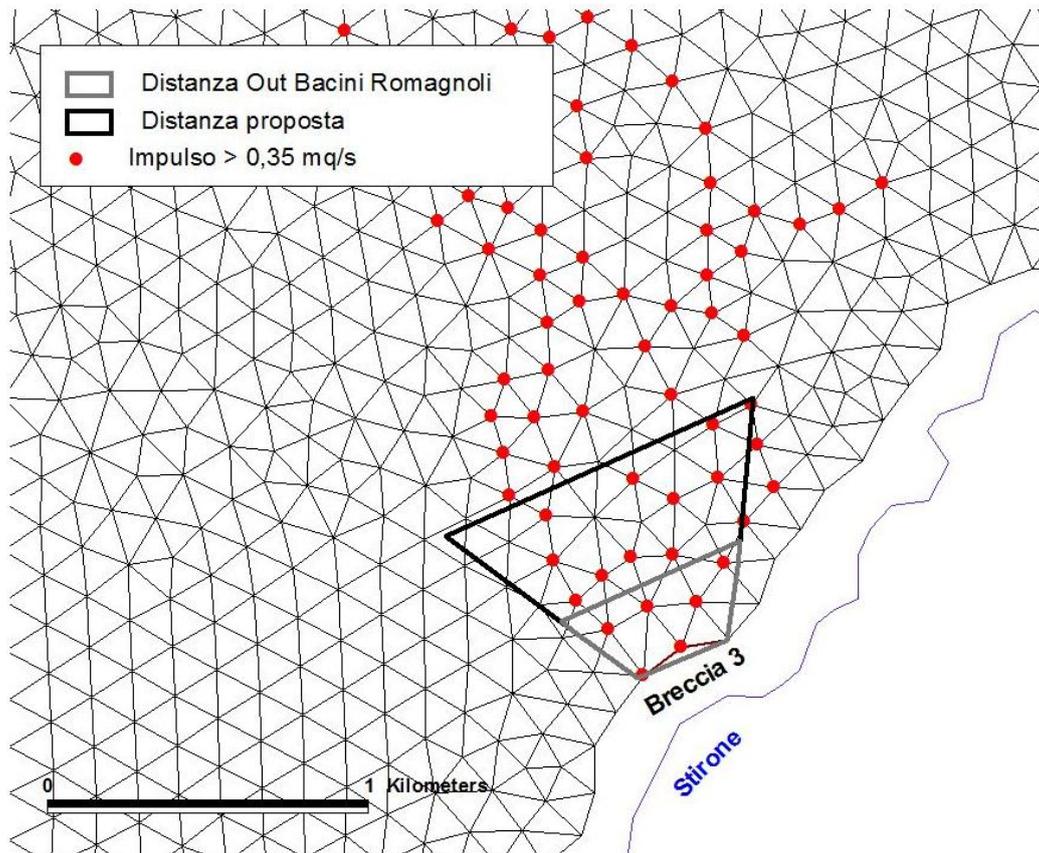
Il confronto è stato effettuato su sei dei dodici scenari simulati: per ogni rotta arginale modellata sono stati evidenziati i nodi della mesh di calcolo con valore di impulso maggiore del valore soglia di  $0,35 \text{ m}^2/\text{s}$ . Con l'ausilio del programma ArcView sono stati poi costruiti dei poligoni che, avendo come base la breccia in esame, considerano il territorio compreso tra due rette aventi pendenza di  $30^\circ$  rispetto alla perpendicolare alla breccia e la distanza di pericolo in esame (Figura 7.12).

Il risultato è un trapezio la cui estensione ricopre la porzione di spazio circostante la breccia secondo un angolo di espansione totale di  $60^\circ$  ovvero, lo stesso angolo considerato nel calcolo della distanza di sicurezza secondo la formula empirica della procedura Bacini Romagnoli.

Per ogni breccia sono stati costruiti due trapezi con altezza corrispondente rispettivamente alla *distanza Out Bacini romagnoli* e alla *distanza proposta* (Figura 7.13). Successivamente sono stati identificati tutti i nodi della mesh di calcolo compresi all'interno di ciascun trapezio e, fra questi, è stato rilevato il numero di nodi che presenta un valore di impulso maggiore dell'indice di rischio soglia.



**Figura 7.12** Schema dei poligoni costruiti per il confronto fra le distanze di sicurezza calcolate e gli impulsi in uscita dal modello bidimensionale

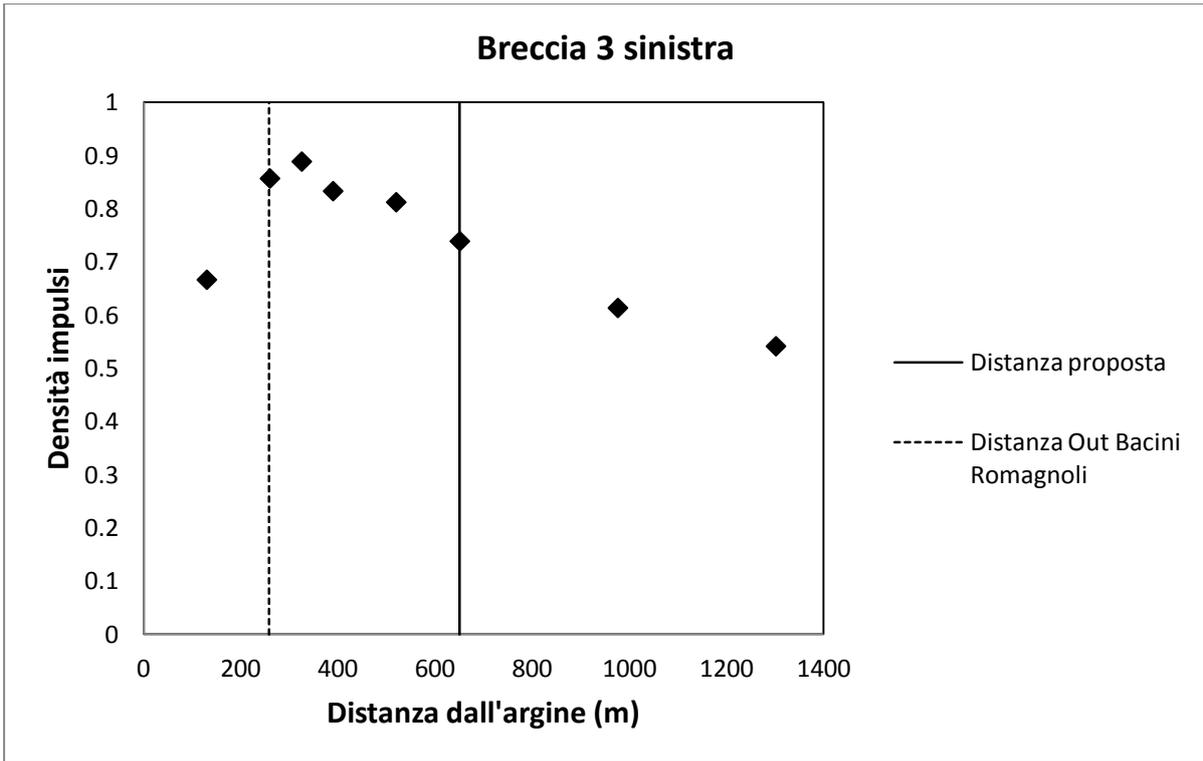


**Figura 7.13** Rappresentazione schematica dei poligoni costruiti a partire dalla breccia 3 lato sinistro per effettuare il confronto con gli impulsi in uscita dal modello bidimensionale di simulazione. In rosso sono evidenziati i nodi della mesh di calcolo che hanno un valore di impulso maggiore della soglia.

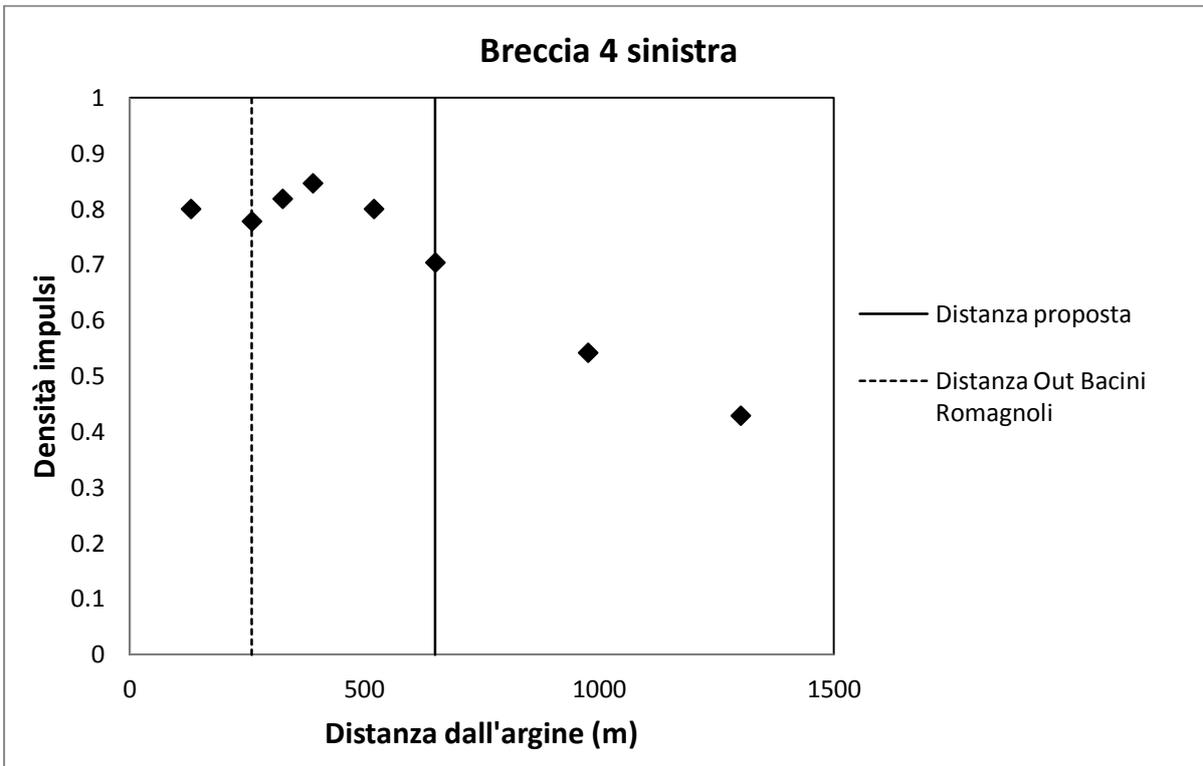
Il rapporto fra i nodi della griglia con valore di impulso massimo superiore a  $0,35 \text{ m}^2/\text{s}$  ed il numero totale dei nodi che ricadono all'interno dello stesso poligono rappresenta la densità dell'impulso in quell'area.

Questa densità è stata usata come indicatore dell'affidabilità delle due distanze di sicurezza determinate. L'operazione di calcolo della densità è stata quindi effettuata per altre distanze, inferiori e maggiori rispetto alle due distanze da verificare, con lo scopo di determinare l'andamento della densità dell'impulso allontanandosi dagli argini.

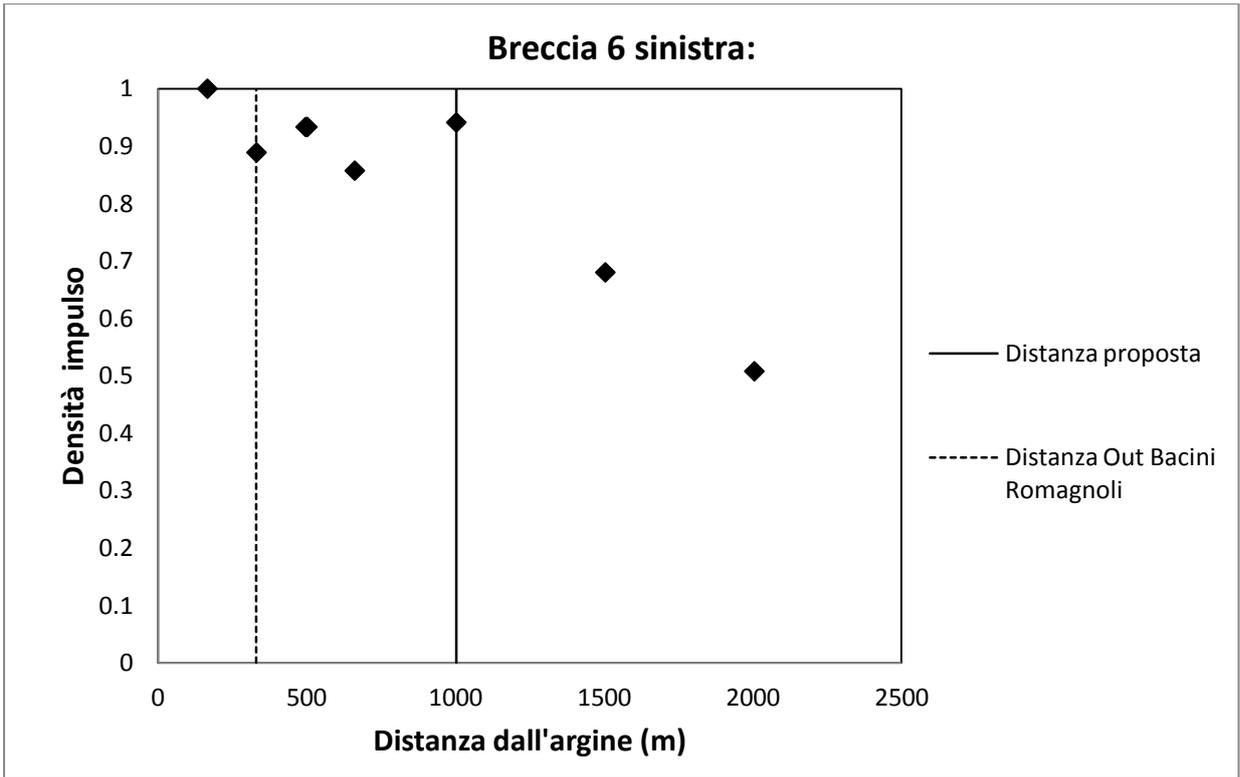
Per ognuna delle sei breccie prese in considerazione, è stato ottenuto un grafico che mostra l'andamento della densità dell'impulso, determinata sulla base dei risultati in uscita al modello bidimensionale, rispetto alla distanza misurata dal rilevato arginale del torrente Stirone (Figure 7.14 – 7.19).



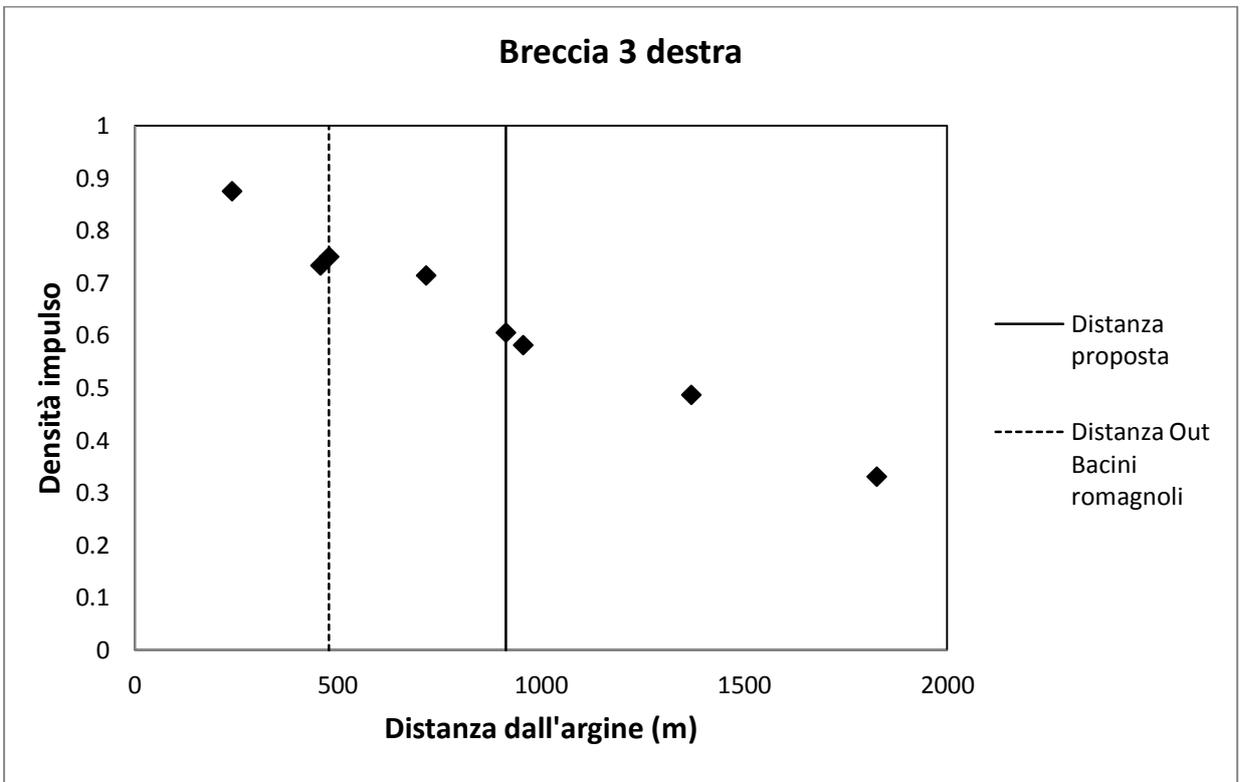
**Figura 7.14** Grafico densità dell'impulso in uscita dalla breccia 3 sinistra in funzione della distanza dall'argine.



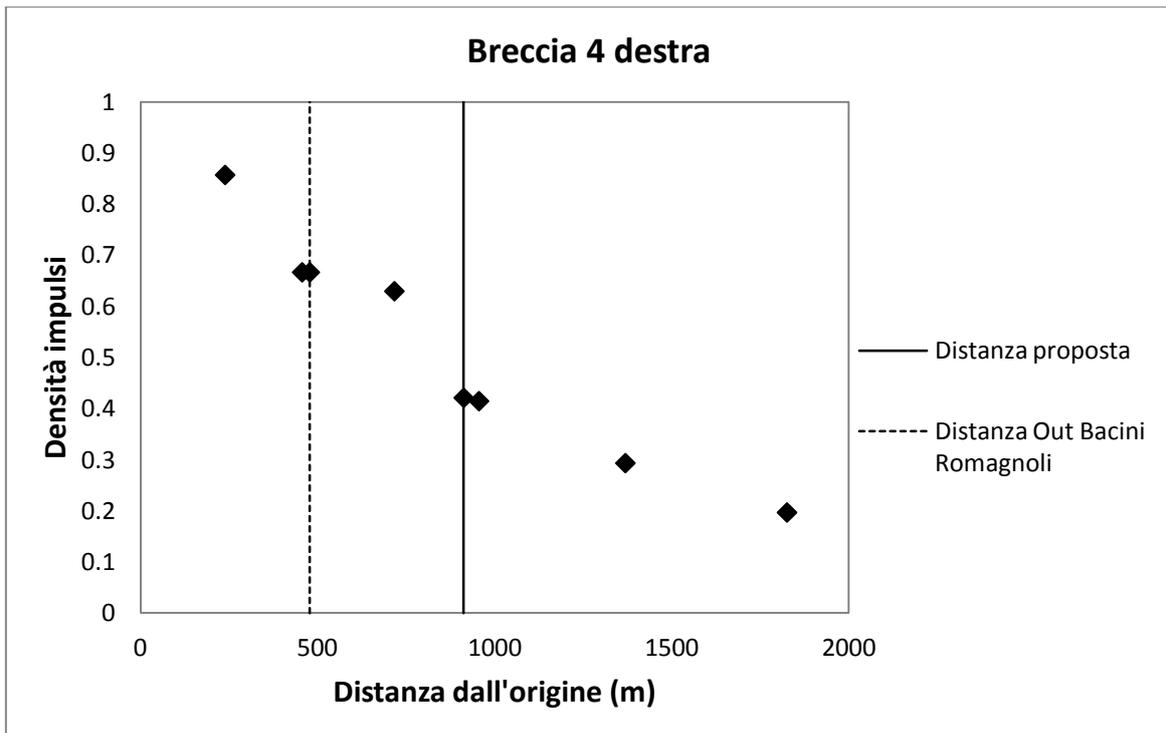
**Figura 7.15** Grafico densità dell'impulso in uscita dalla breccia 4 sinistra in funzione della distanza dall'argine



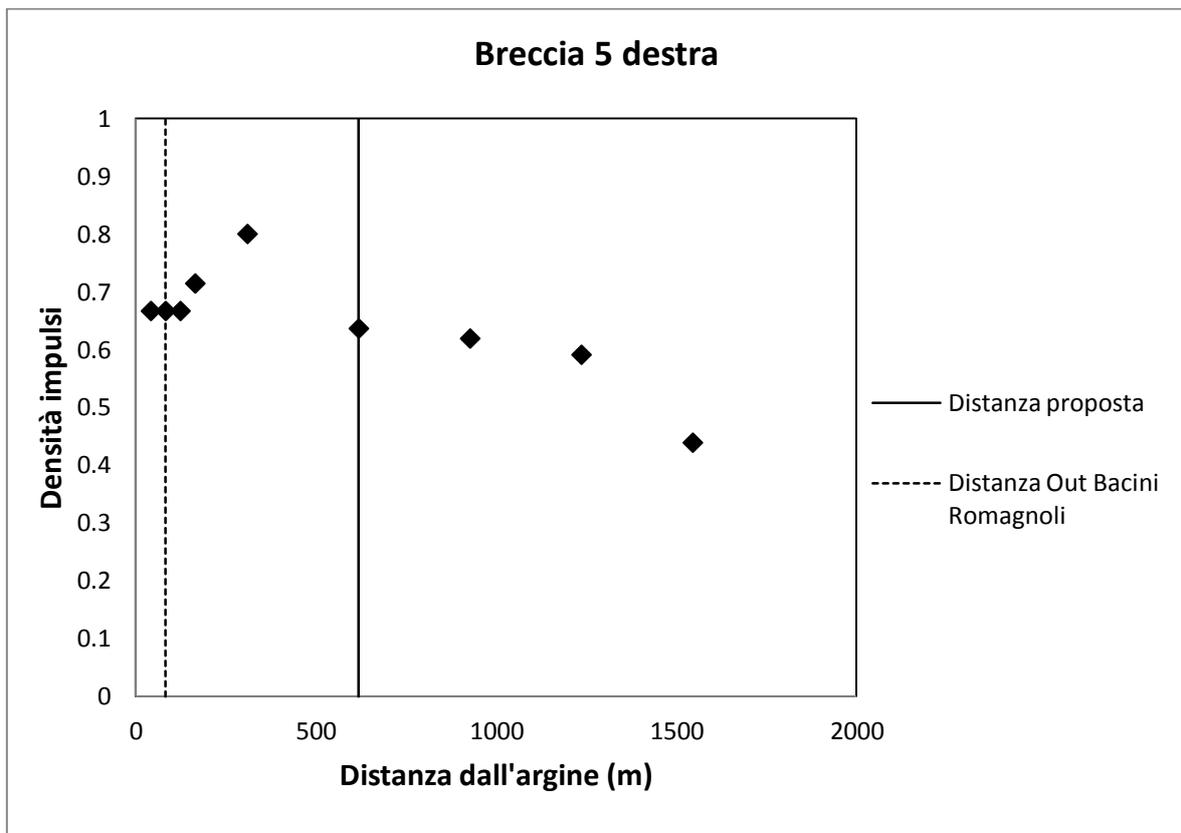
**Figura 7.16** Grafico densità dell'impulso in uscita dalla breccia 6 sinistra in funzione della distanza dall'argine.



**Figura 7.17** Grafico densità dell'impulso in uscita dalla breccia 3 destra in funzione della distanza dall'argine.



**Figura 7.18** Grafico densità dell'impulso in uscita dalla breccia 4 destra in funzione della distanza dall'argine.



**Figura 7.19** Grafico densità dell'impulso in uscita dalla breccia 4 destra in funzione della distanza dall'argine.

L'andamento della densità dell'impulso in funzione della distanza è differente nelle sei breccie analizzate, ma in tutte i valori maggiori si trovano nei pressi del rilevato arginale per poi diminuire con l'aumentare della distanza dallo stesso. Questo è dovuto sia al fatto che la densità, per come è stata calcolata, presenta il massimo per valori del numero dei nodi totali della griglia tendenti a zero, sia perché effettivamente l'impulso è maggiore nello spazio circostante la breccia.

Il confronto fra la *distanza Out Bacini Romagnoli* e la *distanza proposta* può essere fatto determinando quale delle due comprende i valori più elevati di densità: oltre una certa distanza infatti la densità tende a diminuire drasticamente in tutte le breccie analizzate.

La *distanza out Bacini Romagnoli* è inferiore rispetto alla *distanza proposta* e sembra essere poco cautelativa in quanto allontanandosi ulteriormente dalla breccia si trovano valori ancora alti di densità di impulso; la *distanza proposta* comprende generalmente la maggior parte degli impulsi più alti e per distanze maggiori la densità tende a diminuire.

Sulla base dei risultati ottenuti con la simulazione dell'allagamento attraverso il modello bidimensionale e sulla base dell'analisi svolta successivamente sull'andamento della densità dell'impulso in funzione della distanza dalla breccia, si è osservato che il valore di distanza più rappresentativo e più cautelativo è quello della *distanza proposta*.

## 8 CONCLUSIONI

In questa Tesi si è posto come obiettivo quello di analizzare un metodo per la valutazione dei territori potenzialmente allagabili durante eventi di piena di elevata intensità con lo scopo di aggiornare la già esistente mappatura delle aree a rischio inondazione effettuata nell'ambito del P.A.I. (Piano Stralcio per l'Assetto idrogeologico, 2001) dell'Autorità di Bacino del Po (AdB-Po, 2001).

Lo studio nasce anche sulla base di una recente normativa della Comunità Europea (Direttiva 60/CE/2007) che impone agli Stati Membri la redazione di una mappatura dettagliata delle aree allagabili durante fenomeni alluvionali con determinati tempi di ritorno.

In questo ambito, come già ampiamente descritto, si è preso in considerazione un evento di piena particolarmente gravoso caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 200 anni che interessa un corso d'acqua appartenente al bacino idrografico del fiume Po, il Torrente Stirone (affluente di sinistra del Fiume Taro). Lo studio ha ipotizzato la formazione di brecce nei rilevati arginali andando a determinare l'estensione dell'allagamento così determinato e l'entità degli effetti dinamici correlati.

La metodologia utilizzata e analizzata prevede l'applicazione in cascata di due diversi codici di calcolo: un primo codice preposto alla modellazione dei fenomeni di propagazione delle onde di piena nel corso d'acqua ed alla schematizzazione dei diversi scenari di rotta arginale; un secondo codice di calcolo utilizzato per simulare alcuni scenari di allagamento e analizzare le modalità di deflusso delle acque esondate nei territori prospicienti la breccia.

I risultati ottenuti sono stati analizzati sotto due punti di vista differenti. Il primo riguarda l'estensione massima dell'allagamento simulato con l'applicazione dei due modelli di simulazione. Il secondo è quello inerente i possibili effetti dinamici causati dalla propagazione dell'onda di piena in uscita dalla rotta arginale.

Per quanto riguarda l'allagamento statico sono stati confrontati i risultati in termini di inviluppo dei massimi tiranti idrici nell'area dello studio con l'estensione della fascia C determinata nell'ambito del PAI dall'Autorità di Bacino del fiume Po. Questa

dovrebbe infatti comprendere tutti i territori potenzialmente allagabili in seguito a fenomeni di piena superiori a quella di progetto dei rilevati arginali ( $TR=200$  anni) e che causano esondazioni per tracimazione o per rotta degli argini stessi. La fascia C di Po è stata determinata attraverso criteri semplificati di natura altimetrica.

L'analisi dei risultati ottenuti ha evidenziato i benefici associati all'utilizzo di un modello di simulazione bidimensionale, che consente una mappatura dettagliata dei territori allagati e dell'entità dell'allagamento stesso in termini di altezza idrica. Il modello simula anche l'andamento dell'esondazione in relazione al tempo trascorso dalla rotta arginale, fornendo così indicazioni preziose ai fini della protezione civile dei territori prospicienti il corso d'acqua.

Dal confronto con la fascia C emerge tuttavia un chiaro limite per l'utilizzo della metodologia qui proposta per territori di grande estensione: il modello di simulazione bidimensionale, infatti, necessita di un'informazione altimetrica dettagliata del dominio spaziale su cui si desidera indagare.

La ridotta precisione delle descrizioni altimetriche delle aree di indagine, che usualmente si prendono a riferimento per condurre studi su vasta scala spaziale, come quello oggetto del presente elaborato si ripercuote sull'affidabilità dei risultati delle simulazioni che possono non tener conto di eventuali ostacoli presenti nel dominio (rilevati di strade, autostrade, ferrovie o argini di altri corsi d'acqua) e che influenzano invece il diffondersi dell'inondazione. Inoltre se da un lato l'utilizzo di un modello delle quote del terreno con un alta risoluzione garantisce un'affidabilità maggiore dei risultati, dal lato opposto provoca un aumento considerevole dell'onerosità computazionale in termini di memoria utilizzata e soprattutto di tempi di calcolo che ne limitano l'applicabilità a larga scala.

L'applicazione del metodo proposto su larga scala, ad esempio per l'intera asta medio inferiore del fiume Po, effettuata con un'informazione altimetrica molto dettagliata può quindi richiedere tempi di calcolo eccessivamente elevati. Un impiego del modello di simulazione bidimensionale per indagini più mirate, che interessino dei tratti di corso d'acqua e quindi porzioni di territorio potenzialmente allagabile di

dimensioni inferiori, consente di ottenere delle informazioni sull'estensione degli allagamenti molto precise e con dei tempi di calcolo non eccessivi.

Per quanto riguarda l'analisi dei risultati sotto l'aspetto dinamico dell'allagamento, sono stati effettuati dei confronti con una procedura messa a punto dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (Direttiva di norme tecniche relative alle valutazioni idrologiche ed idrauliche, 2003).

La procedura ha lo scopo di individuare una fascia di rischio, attorno ai rilevati arginali, all'interno della quale si possono risentire gli effetti dinamici provocati dalla corrente idrica in uscita da una breccia. La valutazione di questa fascia si può effettuare secondo tale procedura conoscendo le caratteristiche geometriche della breccia, la portata massima in alveo e definendo un adeguato indice di rischio corrispondente a un valore soglia di impulso ovvero al prodotto velocità tirante idrico: la procedura permette perciò una valutazione speditiva e applicabile anche su larga scala per la determinazione di aree potenzialmente a rischio, dal punto di vista degli effetti dinamici.

Effettuando un confronto con i risultati ottenuti attraverso il modello bidimensionale di simulazione, in termini di impulso, è emerso che la distanza di pericolo calcolata mediante l'applicazione della procedura risulta essere poco cautelativa in quanto valori importanti di impulso sono presenti con un alta densità anche oltre detta distanza.

La stessa procedura dei Bacini Romagnoli è stata applicata utilizzando, come portata massima in uscita dalle brecce arginali quella determinata con il modello, quasi 2D, Hec-Ras utilizzato per la simulazione dei fenomeni di propagazione dell'onda di piena nel corso d'acqua, invece che sulla base della sola portata massima in alveo.

La distanza di pericolo ottenuta con questo secondo metodo di valutazione, confrontata allo stesso modo con i risultati del modello bidimensionale in termini di impulso, è risultata essere più rappresentativa per la costruzione di una fascia di sicurezza attorno agli argini: la densità degli impulsi superiori a una certa soglia diminuisce notevolmente oltre questa distanza.

Questo a conferma del fatto che l'impiego di un adeguato codice numerico di calcolo per lo studio della propagazione dei fenomeni di piena lungo un corso d'acqua e la simulazione di eventuali fenomeni di rotta arginale, consente una maggior precisione nella determinazione delle portate in uscita dalle breccie rispetto all'adozione di relazioni empiriche.

La distanza di sicurezza così determinata può essere utile nella definizione di una cartografia delle zone di rispetto attorno ad argini in cui gli effetti dinamici prodotti da un eventuale breccia non possono essere trascurati.

In conclusione, il criterio proposto in questa Tesi, per la determinazione di aree potenzialmente soggette ad allagamento, può avere delle applicazioni importanti per la definizione sia dell'allagamento dal punto di vista statico, individuando le zone maggiormente sollecitate e i tempi di arrivo dell'esondazione; sia come supporto per l'identificazione degli effetti dinamici connessi a fenomeni di rotta arginale.

Il limite maggiore all'applicazione del presente metodo è l'onerosità computazionale elevata qualora lo si voglia applicare su vasta scala mantenendo una certa affidabilità e precisione nei risultati.

I maggiori elementi di interesse, invece, sono dati dalla possibilità di sviluppo di questi modelli numerici di simulazione che, unitamente alla crescita delle capacità di calcolo dei calcolatori, possono portare a una conoscenza più dettagliata dei complessi fenomeni alluvionali con ovvi benefici nella gestione del rischio idraulico.

## 9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AdB-Po, (2005). *Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta medio – inferiore del fiume Po*. Relazione tecnica.
- AdB-Po, (2001). *Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI). Interventi sulla rete idrografica e sui versanti*. Autorità di Bacino del Fiume Po, Parma.
- AdB-PO, (2001). *Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi Bacino del Taro*.
- Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, (2003). *Piano stralcio per il rischio idrogeologico. Direttiva di norme tecniche relative alle valutazioni idrologiche ed idrauliche*.
- F.Aureli, P.Mignosa, C.Ziveri, A.Maranzoni (2006) *Fully-2D and quasi-2D modelling of flooding scenarios due to embankment failure*, River Flow 2006, Taylor & Francis Group, London. ISBN: 0-415-40815-6
- B. Bacchi, A. Brath, (1990), *Stima delle leggi di attenuazione delle massime portate in assegnata durata*. L'Energia Elettrica, 67 (4), 157-170.
- Barkau L. Robert, (1992), *UNET, One-Dimensional Unsteady Flow Through. a Full Network of Open Channels, Computer Program*; St. Louis, MO.
- G. Di Baldassarre, A. Castellarin, A. Montanari, A. Brath (2009), *Probability-weighted hazard maps for comparing different flood risk management strategies: a case study*, Nat Hazards, 50, 479-496.
- G. Camorani, A. Castellarin, A. Brath (2006), *Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems*. Phys Chem Earth 30:561–574
- JC Galland, N Goutal, JM Hervouet (1991) *TELEMAC: a new numerical model for solving shallow water equations*. Adv Water Resour 14(3):138–148.

- M. Govi, O.Turitto, (2000). *Casistica storica sui processi di interazione delle correnti di piena del Po con arginature e con elementi morfotopografici del territorio adiacente*. Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere.
- M.S. Horritt, G. Di Baldassarre, P.D. Bates, A. Brath (2007) *Comparing the performance of 2-D finite element and finite volume models of floodplain inundation using airborne SAR imagery*. Hydrol Process 21:2745–2759
- Hydrologic Engineering Center, (2001), *Hydraulic Reference Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- U. Maione, P. Mignosa, M. Tomirotti, (2000), *Idrogrammi sintetici per il progetto di opere di difesa idraulica del territorio*. Atti del XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Genova, 12-15 settembre 2000, 397-405.
- U. Majone, P. Mignosa & M. Tomirotti, (2003), *Regional estimation of synthetic design hydrographs*, Intl. J. River Basin Management, 1(2), 151-163.
- U. Majone, P. Mignosa, & M. Tomirotti, (2006), *Applicazione del metodo dell' idrogramma sintetico ad alcuni casi di studio*, Atti del XXX Conv. di Idr. e Costruz. Idrauliche, pp.12.
- G. Pollicino, (2007), *Digitalizzazione e analisi numeriche di serie idrometriche per corsi d'acqua emiliano romagnoli*. Rapporto interno. Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio, Bologna.
- N. Ravanini, (2003), *Una tecnica statistica di derivazione delle onde di piena di progetto. Applicazione al bacino del torrente Samoggia*. Tesi di laurea Specialistica Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Bologna.
- Telemac 2D, (2010), *2D hydrodynamics TELEMAC-2D software Version 6.0 User Manual*. Research and Development Directorate of the French Electricity Board (EDF-R&D)



## **RINGRAZIAMENTI**

E alla fine eccoci qui. Non mi sembra vero ma anche questa è fatta e direi che è stata dura ma ne è valsa la pena perché sono proprio contento di quello che ho fatto e perché dopo lunghi anni di università sono giunto (purtroppo perché adesso si spera di andare a lavurar e non si può più fare il bellissimo mestiere dello studente universitario) alla fine di questo fantastico viaggio.

Quindi via con i ringraziamenti...

Prima di tutto vorrei ringraziare il mio relatore il professor Brath e soprattutto i grandissimi correlatori prof. Castellarin e Ing. Domeneghetti che mi hanno permesso di realizzare questa tesi al meglio e sono stati super collaborativi e di grandissimo aiuto in questi mesi di lavoro (non potevo essere più fortunato). Un grazie enorme va quindi a voi.

Non volendo poi dimenticare nessuno farò dei ringraziamenti generali anche perché le singole persone preferisco ringraziarle di persona.

Ringrazio quindi tutta la mia famiglia (mamma, papà e sorella, nonni e nonne) che mi sono stati vicino in questi anni e che mi hanno supportato sempre anche quando i dubbi su quello che stavo facendo, che ci sono stati e molti, si sono posti davanti a me...grazie di tutto!!

Un ringraziamento speciale va a Camilla per la quale non esistono parole scritte per ringraziarla a sufficienza e quindi non le scrivo ma le dirò poi a voce.

Ringrazio poi tutti gli amici e tutte le persone e i personaggi che in questi lunghi anni di università ho incontrato lungo le strade (o sotto i portici bolognesi) che mi hanno condotto fino a qui. Un grazie particolare va ai ragazzi di Mantova agli Oriani Boyz e alla coppia di Mascarella con i quali ho condiviso gran parte di questi anni universitari (grazie anche per la Play che è stata un'ottima distrazione in questi giorni duri...).

Infine volevo mandare un grazie particolare al Torrente Stirone, che non ho mai visto e forse non vedrò mai, ma è stato molto nei miei pensieri ultimamente. Grazie anche a te e spero che non esonderai mai davvero!!!

