Relazione Idraulica e analisi di pericolosità idraulica Conseguente alla possibile esondazione del Fiume Agogna in corrispondenza del suo attraversamento dell'abitato di Borgomanero

- Maggio 2011 -

AUTORI

Prof. Ing. Baldassare Bacchi
Prof. Ing. Marco Pilotti

OGGETTO DELLA RELAZIONE

Il Comune di Borgomanero con determina dirigenziale n. 86/su n. Reg. Gen. 798 del 8-06-2006 affidava ai Proff. Ingg. Baldassare Bacchi e Marco Pilotti lo studio della sicurezza idrologico idraulica delle aree del proprio centro abitato con l'obiettivo di verificare, a scala un po' più puntuale, la validità delle determinazioni effettuate dallo studio Hydrodata s.p.a per conto dell'Amministrazione Provinciale di Novara nel giugno 2003. Tale studio aveva come obiettivo l'identificazione di dettaglio delle condizioni idrauliche di deflusso dell'evento di piena duecentennale nel tratto di Torrente Agogna tra le sezioni 172 e 122 del PAI (con riferimento alle codifiche adottate da Hydrodata in un precedente studio del gennaio 2000 sui Torrenti Terdoppio e Agogna sempre per conto della provincia di Novara). Successivamente, con Determina Dirigenziale n.188/SU del 27.11.2007 l'incarico veniva esteso al tratto d'alveo compreso tra il cosiddetto Ponte Rosso della Ferrovia Borgomanero-Gragnano fino al P.te S. Marco, limite settentrionale dell'abitato. A seguito degli studi precedenti, L'Autorità di Bacino del Po con Nota Prot. (4220/PU) 1168 (3.1), *Verifica della sicurezza idraulica del centro abitato di Borgomanero (NO) dal Ponte San Marco al Ponte di Cureggio*, rendeva nota al Comune di Borgomanero e alla Regione Piemonte la propria determinazione a variare le portate di progetto del tratto urbano dell'Agogna da 370 m^3/s a 280 m^3/s, intendendosi che il valore precedente è da assumersi a valle della confluenza del T. Sizzone. In questo nuovo contesto, con determina 99/SU del 18 Agosto 2010 comunicata agli scriventi in data 14 dicembre 2010, viene richiesto lo studio con modello bidimensionale della situazione che sia determina nel centro urbano a seguito di una piena che abbia colmo 200-ennale pari al nuovo valore di 280 m^3/s. Contestualmente, in data 23-05-2011 Prot. 23578 veniva perfezionato l'incarico di rideterminazione dell'idrogramma sulla scorta del nuovo valore di progetto.
Nel seguito si dà conto delle elaborazioni effettuate in accordo con quanto previsto dalla lettera d'incarico e dei risultati ottenuti.

Lo studio idraulico si è avvalso delle elaborazioni compiute nell'ambito della relazione idrologica che accompagna la presente relazione, nell'ambito della quale è stata ridefinita la portata al colmo per evento a tempo di ritorno duecentennale e l'idrogramma di riferimento corrispondente. Nell'ambito della relazione idrologica si proceduto ad una verifica di transito in condizioni di moto permanente e monodimensionale della portata duecentennale. Si è là mostrato che l'alveo dell'Agogna è ampiamente insufficiente a contenere tali portate, in particolar modo per effetto dell'azione di rigurgito esercitata dai ponti. D'altro canto, si è anche osservato che lo schema monodimensionale è inadeguato a consentire una perimetrazione delle zone soggette ad inondazione. Per questa ragione in questo studio si è optato per un'approccio bidimensionale in moto vario, che può efficacemente tener conto dell'effetto di laminazione dell'onda di piena nel corso della propagazione in alveo come pure consente di ridistribuire i volumi esondati nelle zone circostanti l'alveo, sulla base della topografia locale. Si è prevista la seguente articolazione dello studio:

1. Realizzazione di una altimetria bidimensionale in grado di rappresentare la zona soggetta a simulazione della propagazione e dell'allagamento.
2. Individuazione delle condizioni di deflusso nel tronco fluviale di interesse.
3. Valutazione della pericolosità e del rischio idraulico alla quale è soggetta l'area di interesse.

La relazione seguente documenta le metodologie seguite nella preparazione dello studio idraulico ed espone i risultati conseguiti.

1 Normativa di riferimento

Si riporta nel seguito l'elenco delle principali norme considerate nel corso della esecuzione di studi di perimetrazione di aree soggette a rischio di inondazione.

Normativa nazionale

D.P.R n. 8/1972: trasferimento alle Regioni delle competenze in merito alla pianificazione temitonale (PRG) a alle opere idrauliche di IV e V categona
D.P.R. n. 616/1977: trasferimento alle Regioni delle competenze in materia di sistemazione idropologica, conservazione del suolo, di vincolo idrogeologico e delle opere idrauliche di III categoria.
Legge 18 maggio 1989 n. 183 e successive modificazioni: norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo; istituzione delle Autorità di Bacino per la redazione dei Piani di Bacino
D.P.R 18 luglio 1995: atto di indirizzo e Coordinamento concernente i criteri per la redazione dei piani di bacino
Circolare LL. PP. n. 218/24/3 del 9 gennaio 1996: istruzioni applicative per la redazione della relazione geologica e della relazione geotecnica,
Decreto Ministero Lavori Pubblici - 14 febbraio 1997: direttive tecniche per l'individuazioni e la perimetrazione da parte della Regioni delle aree a rischio idrogeologico.
Legge 3 agosto 1998, n. 267: perimetrazione aree a rischio idrogeologico molto elevato per l'incolumità delle persone e per la sicurezza delle infrastrutture e del patrimonio ambientale e culturale.
DPCM del 24 maggio 2001, pubblicato su G.U. 183 dell'8 agosto 2001: approvazione Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) - "Interventi sulla rete idrografica e sui versanti" adottato con deliberazione dell'Autorità di Bacino del Po n. l8 del 26 aprile 2001

Delibere dell'Autorità di bacino del fiume Po

Delibera n. 19 del 9 novembre 1995: programma di redazione del Piano di Bacino del Po per Stralci relativi a settori funzionali.
Delibera n. 1 del 5 febbraio 1996 - Piano Stralcio delle fasce fluviali: adozione del Progetto di Piano Stralcio fasce fluviali ai sensi dell'art. 17 comma 6-ter della L. l83/89.
Delibera n. 26 dell'11 dicembre 1997 - Piano Stralcio delle fasce fluviali: adozione del Piano Stralcio delle fasce fluviali ai sensi dell'art. 17, comma 6-ter e art, 18, comma 10, della L, 183/89.
Deìibera n. 2 dell'11 maggio 1999 - Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico - "Norne generali per l'assetto della rete idrografica e dei versanti" - Comuni interessati dalla delimitazione delle aree in dissesto.
Delibera n. 18 del 26 aprile 2001 - Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico *(PAI)* - "Interventi sulla rete idrografica e sui versanti"

Normativa regionale

Circ. P.G.R. 8 maggio 1996, n. 7/LAP “L.R. 5 dicembre 1977, n. 56, e successive modifiche e integrazioni - Specifiche tecniche per l'elaborazione degli studi geologici a supporto degli strumenti urbanistici.”
D.G.R. 28 luglio 2009, n. 2-11830 “Indirizzi per l’attuazione del PAI: sostituzione degli allegati 1 e 3 della D.G.R. 45-6656 del 15 luglio 2002 con gli allegati A e B.”
D.G.R. 7 aprile 2011, n. 31-1844 (con allegato A), che sostituisce l'allegato A della DGR del 2009 con un nuovo Allegato A e conferma l'allegato B del 2009.

2 Studi idraulici precedenti

Nel caso in esame, gli studi pregressi presi in considerazione per la perimetrazione delle aree a rischio esondazione dell'Agogna sono il PAI dell'Autorità di Bacino del Po e il successivo studio commissionato dalla Provincia di Novara (*Studio idrodinamico di dettaglio e messa a punto del Piano per l'assetto idrogeologico a scala provinciale dei Torrenti Agogna e Terdoppio*, *Hydrodata*, 2000). Questi studi, tuttavia, non presentano un livello di dettaglio adeguato alla identificazione puntuale delle modalità di esondazione nella zona oggetto della presente relazione. Più in particolare, quindi, lo studio precedente di riferimento è costituito dalla *Verifica delle fasce del Torrente Agogna nel territorio del Comune di Borgomanero*, redatto da *Hydrodata* nel 2002, la cui finalità è l'identificazione di dettaglio delle condizioni idrodinamiche di deflusso dell'evento di piena duecentennale nel tratto di Torrente Agogna in corrispondenza del centro abitato di Borgomanero compreso tra le sezioni 117 e 122 del PAI. In particolare, lo studio si è concentrato sulla zona compresa tra via Pertini e via Cureggio, a valle del ponte del Torrione.
Lo studio era stato svolto mediante utilizzo di un codice di simulazione idrodinamica, il MIKE 11 HD, reso possibile dal rilievo di 13 nuove sezioni nell'area in esame e dalla quotatura per punti sparsi del piano campagna compreso all'interno dell'ansa del T. Agogna. In tale zona, quindi, si è affiancato al modello monodimensionale e stazionario uno schema quasi 2-D, che, previa l'introduzione di opportune ipotesi e di un ramo di deflusso golenale in destra idrografica, ha consentito di stimare le profondità della corrente alle diverse progressive. Sono stati valutati gli effetti della rimozione dei ponti presenti nel tratto in esame e del loro adeguamento. Inoltre, si è valutato l'effetto della realizzazione degli argini già proposti nel corso del precedente studio *Hydrodata*. A tale proposito, può essere utile osservare che risulta assai difficile pensare ad un intervento di miglioramento sostanziale del ponte del Torrione, che riveste natura monumentale e, nella sua struttura, risale probabilmente al tardo medioevo ed è attorniato da costruzioni che rendono non semplice la realizzazione di un *by-pass*. D'altro, canto, proprio tale ponte costituisce uno degli ostacoli fondamentali al deflusso, come verrà evidenziato più avanti nel presente studio.
Lo studio *Hydrodata* partiva dall'assunto che l'onda di piena duecentennale fosse caratterizzata da un colmo di 370 mc/s, valore che, come si evince dalla relazione idrologica, pare a noi irrealistico e contrastante con le testimonianze di piena occorsa nel corso del secolo scorso. Inoltre, una portata di tale entità non potrebbe neppure pervenire alla prima sezione analizzata dallo studio (a valle del Ponte di Via Mazzini) anche per l'azione di filtro esercitata dai ponti presenti a monte, che divengono insufficienti per portate inferiori.
Oltre a questi studi gli scriventi hanno già portato a termine per il Comune di Borgomanero lo studio della sicurezza idrologico idraulica delle aree del centro abitato con l'obiettivo di verificare, a scala più puntuale, la validità delle determinazioni effettuate dallo studio Hydrodata s.p.a per conto dell'Amministrazione Provinciale di Novara nel giugno 2003 (determina dirigenziale n. 86/su n. Reg. Gen. 798 del 8-06-2006). Successivamente, con Determina Dirigenziale n.188/SU del 27.11.2007 l'incarico veniva esteso al tratto d'alveo compreso tra il cosiddetto Ponte Rosso della Ferrovia Borgomanero-Gragnano fino al P.te S. Marco, limite settentrionale dell'abitato.
Nell'ambito di questi studi, dopo accurate valutazioni idrologico idrauliche, si perveniva alla conclusione della impossibilità che la portata di progetto di riferimento per l'abitato di Borgomanero fossero i 370 m^3/s adottati da Hydrodata nei suoi studi e che le aree a rischio andassero opportunamente ridefinite tramite schemi di calcolo più idonei allo studio della propagazione di piena su piane alluvionali piuttosto che in alvei comunque incassati. A seguito degli studi precedenti effettuati dagli scriventi, L'Autorità di Bacino del Po con **Nota Prot. (4220/PU) 1168 (3.1), Verifica della sicurezza idraulica del centro abitato di Borgomanero (NO) dal Ponte San Marco al Ponte di Cureggio**, comunicava al Comune di Borgomanero e alla Regione Piemonte la propria determinazione a variare le portate di progetto del tratto urbano dell'Agogna da 370 m^3/s a 280 m^3/s, intendendosi che il valore precedente è da assumersi a valle della confluenza del T. Sizzone. In questo nuovo contesto, con determina 99/SU del 18 Agosto 2010 comunicata agli scriventi in data 14 dicembre 2010, viene richiesto lo studio con modello bidimensionale della situazione che sia determina nel centro urbano a seguito di una piena che abbia colmo 200-ennale pari al nuovo valore di 280 m^3/s.

3 Realizzazione di un modello di elevazione del terreno per la zona in studio

Il primo passo nella realizzazione di un modello idraulico di propagazione di piena nelle aree alluvionali è la realizzazione di un modello digitale di elevazione del terreno (*DEM*) che rappresenti al meglio, in relazione agli obiettivi dello studio e alle disponibilità economiche, la topografia del terreno circostante l'alveo e che costituisca l'altimetria sulla quale avviene la propagazione della parte di piena che fuoriesce dall'alveo. Il livello di accuratezza verticale necessario deve essere rapportato ai tiranti massimi temibili nel corso dell'esondazione. Laddove questi abbiano altezze massime dell'ordine del metro, come nel caso in esame, parrebbe opportuno non commettere errori nella stima della quota relativa del terreno superiori a 10-20 cm, valori comunque comparabili con le approssimazioni del calcolo numerico. Dal punto di vista della risoluzione orizzontale, il modello di elevazione del terreno deve avere una risoluzione che sia comparabile alla dimensione lineare tipica che caratterizza l'ambiente in cui avviene il deflusso; in questo caso, le strade del centro storico di Borgomanero. Si deve sottolineare che, mentre il raggiungimento del secondo obiettivo è facilmente conseguibile, riversandosi solo sulla pesantezza computazionale della simulazione, il primo vincolo menzionato può essere assai arduo.
Infatti, in generale, la costruzione di un modello di elevazione del terreno in ambito urbanizzato può farsi disponendo di un rilievo aereo-fotogrammetrico tridimensionale, nel quale compaiano le polilinee quotate anche verticalmente dei manufatti posti a quota terreno nell'ambiente urbano. In questo caso, se il rilievo aereo-fotogrammetrico è stato costruito con sufficiente precisione, si ha a disposizione una densità così elevata di punti da consentire un'ottima ricostruzione altimetrica. Tuttavia, anche in situazioni ottimali, possono comparire manufatti lineari, di esiguo spessore, tali cioè da essere insignificanti nella determinazione della quota media di una cella di calcolo anche di pochi mq, ma assolutamente determinanti nel condizionare la modalità di deflusso e di sviluppo di un allagamento. Si pensi, ad esempio, al caso di un muretto alto alcune decine di centimetri e spesso 15-20 cm. Esso può impedire, e incanalare, la propagazione di una corrente di altezza ad esso comparabile portando a risultati fisici reali completamente diversi da quelli numerici.
L'ambiente urbano, evidentemente, è pieno di elementi di questo tipo, che è illusorio pensare di riuscire a descrivere compiutamente. Per questa ragione, anche pensando di partire da un rilievo ottimale e prescindendo dalle possibilità idrodinamiche del codice utilizzato, a fronte di battenti limitati è sostanzialmente impossibile poter rappresentare in maniera assolutamente fedele il processo di allagamento. Prescindendo però dalla rappresentazione del dettaglio, l'immagine d'assieme che si ottiene è tuttavia di grande rappresentatività e una qual certa verifica della sua qualità può essere ottenuta tramite le tracce di piene storiche, ricordi dei residenti e visione critica del territorio.
Nel caso in esame, purtroppo, non si disponeva di un aereofotogrammetrico tridimensionale del territorio comunale. Quale sub-ottimo, si è quindi chiesto all'Amministrazione di condurre una battitura topografica tradizionale di alcune centinaia di punti lungo il reticolo stradale. Il Comune ha attivato un proprio tecnico di fiducia che ci ha fornito un rilievo planoaltimetrico denominato 'Torrente Agogna Nord' ed un altro 'Torrente Agogna Sud' effettuato dallo studio Fasola, che è stato georeferenziato con riferimento ai due chiodi GPS su basamento di granito a monte ed a valle del Ponte Rosso. Onde arricchire la densità dei punti rilevati, questi due rilievi sono stati uniti al precedente rilievo effettuato dallo studio Sacco & Curti avente in comune con i suddetti rilievi 'A' e 'C' gli spigoli del Ponte Rosso e del Ponte di via Scuole.
Si noti che, a causa di una diversa scelta del sistema di riferimento nelle due battiture, le stesse non risultavano sovrapponibili. Per fare ciò è stato necessario effettuare una rototraslazione, ottenendo un insieme di punti la cui accuratezza verticale si ritiene sia contenuta entro la decina di centimetri. Nella Figura 1 degli Allegati si mostrano i punti complessivamente presenti nel rilievo e, nella successiva Figura 2, quelli che compaiono all'interno del riquadro, di coordinate $26000 < y < 28600$ e $19480 < x < 20440$ nel sistema trasferito agli scriventi. Quest'ultima zona è propriamente quella corrispondente alla zona oggetto delle presenti indagini.

All'interno del set di punti sopra mostrato, mediante reiterate analisi locali si sono individuati ed eliminati diverse decine di punti con quote verticali incongruenti con la topografia circostante. Inoltre, al fine di consentire l'interpolazione separata dei punti posti all'interno dell'alveo e di quelli posti sulla piana circostante,

sono stati estratti i punti che costituiscono il perimetro dell'Agogna, che sono stati arricchiti da punti derivanti dalla descrizione altimetrica del thalweg, così come presente nel modello monodimensionale. In Figura 3 si mostrano i due set di punti e nella Figura 4 si mostra un confronto tra il profilo altimetrico longitudinale della linea d'asse dell'Agogna estratta dal rilievo in oggetto e quella invece ottenuta dal monodimensionale. Come si nota l'accordo finale è ottimo.
Partendo da questo doppio set di punti si sono ricostruiti, con un algoritmo di kriging, due diversi modelli di elevazione del terreno con passo orizzontale di 4 m. Il primo, escludendo i punti d'alveo. Il secondo, al contrario, eliminando i punti della piana circostante l'alveo. Infine, il modello di elevazione finale è stato ottenuto dall'unione dei due modelli. Per le zone esterne all'alveo si sono considerati i punti del primo modello mentre per quelle interne i punti del secondo. Il risultato ottenuto è mostrato in Figura 5, con sovrapposti il reticolo viario e l'edificato. Ai fini della successiva simulazione, considerando la necessità di contenere i tempi di calcolo senza tuttavia sacrificare il dettaglio topografico, il modello di elevazione utilizzato per la simulazione è stato infine aggregato a 8 m di dimensione lineare della cella elementare, dicretizzando la stessa con una matrice di 320 righe e 120 colonne, che copre un'estensione di circa 2560 m x 960 m, su un'area di 2,457 kmq.

4 Modellazione del processo di propagazione ed esondazione dell'onda di piena.

Le caratteristiche idrauliche del tratto di alveo in esame, compreso tra il primo ponte della ferrovia a monte dell'abitato di Borgomanero e il secondo ponte della Ferrovia, a valle dell'abitato in località Cureggio, sono già state inquadrate mediante lo studio di moto permanente monodimensionale lungo questo tratto di Agogna riportato nella relazione idrologica redatta ai sensi della comunicazione del Dirigente della Divisione Urbanistica e Territorio, Comune di Borgomanero, Prot. 23578 del 23/05/2011; studio che ha permesso di individuare lo stato di criticità complessiva a fronte di un evento estremo quale quello posto a base dello studio, ma anche nei riguardi di eventi di minore entità. Si sono così individuate alcune zone che appaiono insufficienti dal punto di vista idraulico, già a fronte di portate inferiori a quelle di picco di seguito considerate.
Al fine di rendere possibile la perimetrazione della zona inondata, si è proceduto ad effettuare simulazioni numeriche di moto vario con un codice adatto alla soluzione delle equazioni delle acque basse bidimensionali. La modellazione della propagazione della piena 'di verifica' parte dalla imposizione della portata in funzione del tempo lungo il contorno di monte del dominio, e determina le aree interessate progressivamente dalla esondazione, senza rimanere confinato alla sola zona dell'alveo inciso. Il codice di calcolo fornisce le mappe inviluppo di massimo tirante e di massima velocità nel corso delle simulazione. Infine, le mappe così ottenute, che già si potrebbero prestare ad una prima perimetrazione delle zone a diverso rischio di allagamento, sono state utilizzate, mediante un codice che implementa alcuni criteri precedentemente elaborati, per definire classi precise di pericolosità idraulica (si badi bene, non di rischio idraulico), sulla base di una funzione che contemperi la velocità, il tirante e la spinta dinamica esercitata su di una persona dalla corrente esondante.

Il codice di calcolo utilizzato in questo lavoro è *FLO2D*, sviluppato da O'Brien (O'Brien e altri, 1993). Questo codice è suggerito dalla Federal Emergency Management Agency americana (*FEMA*), all'interno del piano *NFIP* (*National Flood Insurance Program*) per la perimetrazione di aree a rischio di inondazione e, con opportuni accorgimenti, di colata detritica su conoide. La scelta è ricaduta su questo codice in quanto esso costituisce uno strumento ampiamente utilizzato a livello internazionale ed è stato da noi precedentemente utilizzato con soddisfazione in studi di perimetrazione similari. Una breve descrizione del codice, peraltro ampiamente documentato in letteratura e su *web*, è riportata in appendice I

Al fine di rendere possibili le simulazioni si devono precisare informazioni che riguardano la scabrezza idraulica del dominio. A tale proposito si è utilizzato il valore dell'indice n di Manning pari a n= 0.05 ($m^{-1/3}s$) per le zone fuori alveo ed un valore variabile tra n= 0.0333 ($m^{-1/3}s$) e n= 0.02 ($m^{-1/3}s$) per l'alveo inciso. Questi valori di scabrezza leggermente differenti rispetto a quelli adottati nel monodimensionale sono stati adattati al fine di ottenere con il codice bidimensionale un comportamento compatibile con quello precedentemente individuato mediante utilizzo del diverso codice monodimensionale. Per quanto riguarda le strade, è stato

generato un elenco di celle corrispondenti al reticolo stradale cui è stato assegnata la scabrezza n= 0.014 ($m^{-1/3}s$).

Per quanto riguarda le onde di piena utilizzate per la modellazione si deve considerare quanto segue.
Nel *Progetto di Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)*, *Interventi sulla rete idrografica e sui versanti*, Legge 18 Maggio 1989, n. 183, art. 17, comma 6-ter, adottato con deliberazione del Comitato Istituzionale n.1 in data 11.05.1999, 1. *Articolazione in fasce degli alvei fluviali*, viene precisata quale suddivisione si debba seguire per la individuazione di aree a diverso livello di pericolosità a seguito di esondazione di un corso d'acqua. In particolare, si precisa che l'alveo fluviale e la parte di territorio limitrofo, costituente nel complesso la regione fluviale, sono oggetto della seguente articolazione in fasce:

- 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;
- 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.

I limiti della fascia A e della fascia B vengono evidenziati nella cartografia del Piano con la dicitura *"di progetto"* nei casi in cui essi si identifichino con il perimetro di nuove opere idrauliche (ad esempio arginature).
Per quanto riguarda le assunzioni per la delimitazione delle fasce fluviali, per quanto riguarda la fascia di deflusso della piena (Fascia A), nei corsi d'acqua non ramificati generalmente si assume la delimitazione sulla seguente base:

- fissato in 200 anni il tempo di ritorno (TR) della 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 quanto riguarda la fascia di esondazione (Fascia B),

- si assume come portata di riferimento la piena con TR di 200 anni. Il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena indicata ovvero sino alle opere idrauliche esistenti o programmate di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata. La delimitazione sulla base dei livelli idrici va integrata con: - le aree sede di potenziale riattivazione di forme fluviali relitte non fossili, cioè ancora correlate, dal punto di vista morfologico, paesaggistico e talvolta ecosistemico alla dinamica fluviale che le ha generate; - le aree di elevato pregio naturalistico e ambientale e quelle di interesse storico, artistico, culturale strettamente collegate all'ambito fluviale.

Infine, per quanto riguarda la fascia di inondazione per piena catastrofica (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, tenendo conto delle aree con presenza di forme fluviali fossili. 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.

Nel caso in esame, la determinazione dell'idrogramma di verifica a tempo di ritorno duecentennale da utilizzare per la perimetrazione delle aree di alta pericolosità secondo quanto previsto dal Piano per l'Assetto Idrogeologico del bacino padano (*PAI*) rappresenta un problema di notevole difficoltà, soprattutto a causa della assenza di stazioni idrometriche cui sia associata una scala delle portate, che consenta di prendere a riferimento della progettazione idraulica la serie delle portate osservate.
Per tale ragione, e come ampiamente dettagliato nella allegata relazione idrologica, appare chiaro che la determinazione dell'onda da assumere quale base delle verifiche idrauliche operate in questo studio si deve condurre sulla base dei valori regionalizzati di portata al colmo, della analisi della serie pluviometriche presenti nelle stazioni più prossime ed infine sulla scorta di una articolata modellazione idrologica degli eventi intensi. In realtà, la sola modellazione idrologica non consente di determinare le possibili portate alla sezione di monte del tratto oggetto di studio. Essa non può evidentemente tenere conto degli effetti di laminazione che appaiono possibili qualora quella portata si vada trasferendo lungo un reticolo che presenta numerosi punti di insufficienza. Al fine di precisare il valore di portata al colmo si renderebbe invece necessario uno studio idraulico-idrologico complessivo del bacino di monte che tenga conto di tutti i principali elementi che contribuiscono alla formazione delle piene in questo specifico sistema idrografico. Studio che deve perciò basarsi sulla costruzione di modelli afflussi-deflussi e su schemi idraulici di propagazione delle piene la cui entità travalica totalmente i limiti del presente studio. Per tale ragione, come ampliamente illustrato nella relazione idrologica, si è fatto riferimento alla piena desunta dall'analisi afflussi-deflussi del sistema idrografico dell'Agogna.

Da quanto emerge dalla relazione idrologica allegata, le portate al colmo di riferimento per la verifica delle zone ricadenti in Fascia A e in Fascia B per il tratto urbano del T. Agogna sono cautelativamente pari a quelle riassunte nella seguente Tabella seguente

	Fascia A (m^3/s)	Fascia B T =200 (m^3/s)	Fascia C T = 500 (m^3/s)
SEZIONE			
da P.te Ferrovia a monte della confl. Lagone	**182**	**228**	**260**
Dalla confluenza Lagone al P.te Cureggio	**224**	**280**	**320**

L'idrogramma 200-ennale, adottabile per la determinazione della zona ricadente in Fascia B, consta di un'onda, schematizzata nel modo indicato in figura 6, che approssima l'onda ottenuta mediante simulazione idrologica della risposta del bacino. L'onda rappresentata in linea gialla rappresenta l'onda imposta alla progressiva del *Ponte Rosso* mentre quella rossa è l'idrogramma che si aggiunge a partire dal punto di ingresso della T. Grua. Da quel punto in poi l'idrogramma è quindi quello rappresentato con linea di colore rosa. L'idrogramma è stato semplificato esclusivamente per ragioni computazionali, ritenendo che i dettagli omessi e la coda successiva poco aggiungano ai risultati della simulazione.
Per quanto riguarda la definizione dell'idrogramma da utilizzarsi per la individuazione delle zone ricadenti in Fascia A, si è utilizzato un idrogramma, dedotto dal precedente, caratterizzato da forma e durata pari a quella sopra prevista per la fascia B, dove si è però variato il valore della portata al picco. Per la perimetrazione della fascia A si è assunto un valore pari all'80% di quella utilizzata per la fascia B. Il colmo risulta quindi di circa 220 m^3/s.
Lo studio riguarda, come anticipato, il tratto di F. Agogna compreso il ponte ferrovia a monte di Borgomanero e il Ponte di Cureggio. In realtà, la necessità di imporre una condizione al contorno, ha fatto si che lo studio di moto permanente sia stato esteso fino ad una sezione a valle del Ponte di Cureggio, laddove è presente un salto di fondo sul quale si può assumere che la corrente passi in condizioni critiche (si veda allegato fotografico: 7 -Zona dal ponte della Ferrovia al guado di Cureggio).

Infine, prima di passare ai risultati, è importante osservare che l'alveo del T. Agogna è interessato da diversi ponti nel tratto considerato dal presente studio. In Figura 7 tali ponti sono mostrati sia dal punto di vista fotografico, sia dal punto di vista della schematizzazione geometrica frontale che è stata operata all'interno del codice monodimensionale Hec Ras. La scala delle portate per questi manufatti idraulici è stata calcolata con Hec Ras e utilizzata quale base per la modellazione di detti ponti all'interno di Flo2D.

5 Risultati della simulazione del processo di allagamento in moto vario con il modello bidimensionale

La simulazione condotta con Flo2D consente di ottenere la mappa delle massime profondità e delle massime velocità raggiunte nel corso dell'evento. Queste due mappe di inviluppo sono quelle normalmente poste a base di ogni considerazione in merito alla pericolosità idraulica.
Si deve preliminarmente osservare che nell'ambito delle simulazioni in ambiente urbano si pone il problema di determinare quale parte del volume di piena venga invasato all'interno del perimetro dell'edificato. Infatti, se le case costituissero una cortina impermeabile, il volume invasato sarebbe solo quello presente lungo le strade. D'altro canto, la presenza di cortili e di locali interrati spesso fa si che il volume invasabile all'interno degli edifici sia tutt'altro che trascurabile. Nello studio qui presentato il problema è stato risolto nel seguente modo. Per ogni scenario di piena considerato sono state fatte due simulazioni: la prima, supponendo l'edificato permeabile nella misura dell'80%. La seconda supponendolo invece totalmente impermeabile, ad eccezione del reticolo viario e degli spazi aperti presenti al suo interno e connessi al reticolo viario. Infine, si è considerata quale simulazione finale quella ottenuta come media delle due. Le mappe relative a ciascun evento sono nel seguito state costruite procedendo secondo questa procedura.
In figura 8, 9 e 10 si riportano le mappe di massima profondità e di massima velocità registrate nel corso dell'evento posto a base della definizione della Fascia A (Fig. 8a e 8b), della Fascia B (Fig. 9a e 9b) e della Fascia C (Fig. 10a e 10b).

6 Evidenza storica di eventi di allagamento del centro storico di Borgomanero

Una importante conferma dei risultati ottenuti si è avuta da colloqui avuti con cultori di storia locale i quali ci hanno mostrato documenti che attestano come, in passato, si siano verificati a Borgomanero eventi comparabili a quelli che si evincono dalle simulazioni compiute. In uno di questi documenti si legge:
Nell'agosto del 1924 [probabilmente l'evento più significativo del XX secolo] *ad esporsi fu invece una infernale bufera, con grandinate tempestose, piogge torrenziali, diluviali rovesci, straripamenti dell'Agogna quali a memoria d'uomo non si verificarono. Riporto letteralmente quanto il Corriere di Novara del 17 agosto 1924 scriveva sotto il titolo in grassetto "Il nubifragio devastatore in Provincia" a proposito di Borgomanero. "Il grosso e industre borgo fu colpito gravemente dal disastro. Le vie invase dalle acque melmose dell'Agogna, che percorsero tutto il paese, inondando case, negozi, arrecando gravi danni, e furono trasformate in altrettanti canali, l'acqua raggiungendo in alcuni punti l'altezza superiore al metro…. Nessuna disgrazia alle persone, quantunque molti, specie nella parte basse del paese, abbiano dovuto salvarsi saltando dalle finestre…Quanto ai danni sarebbero enormi. Soltanto per Borgomanero si parla di un milione".*
Questa interessantissima testimonianza evidenzia alcuni aspetti di grande valore. In primo luogo, in occasione di piene rilevanti l'abitato di Borgomanero può essere invaso dalle acque. Queste imboccano i Viali principali, percorrendoli con discreta velocità (*trasformate in altrettanti canali…*) e da qui giungendo ad allagare le abitazioni in tutta la parte più depressa dell'abitato. A tale proposito è interessante osservare che il punto individuato come maggiormente critico dalle simulazioni è quello in sinistra del ponte di viale Mazzini. In quella posizione si sono storicamente osservati i massimi tiranti, attestati all'interno di una abitazione da una lapide posta alla quota di circa 115 cm rispetto al piano stradale (si veda Figura 12). La posizione del punto in cui è stata presa la fotografia è quella mostrata in Figura 14, all'interno del cerchio. Come si nota si ha totale corrispondenza tra la zona che la simulazione individua come a massima pericolosità e quella storicamente dimostratasi tale.

E' anche interessante osservare che nel corso dell'evento del 1924 l'acqua arrivò nella Piazza principale del paese (è qua testimoniato l'avvenuto allagamento dell'interrato di alcuni negozi), per poi deviare in destra verso via Mazzini, come attestato dalla simulazione dell'evento corrispondente alla portata duecentennale.
Si potrebbe osservare che l'evento del 1924 avvenne in una situazione in cui l'alveo non aveva la conformazione attuale, essendo probabilmente lo stesso caratterizzato allora da considerevoli depositi di fondo e dalla mancanza dei muraglioni oggi presenti. Tuttavia, si deve anche ricordare che non erano allora presenti i numerosi ponti che si sono aggiunti in seguito, i quali sono i veri fattori limitanti il deflusso nel tratto considerato dell'alveo dell'Agogna. Quasi immancabilmente, inoltre, in occasione di eventi eccezionali le luci dei ponti diventano significativi elementi di intralcio al deflusso di materiale flottante (alberi, ramaglia…) inevitabilmente trasportati verso valle dall'onda di piena. Questi fattori potrebbero contribuire fortemente a limitare la scala di portata dei ponti, suggerendo nella loro modellazione un approccio cautelativo.
Se la piena del 1924 è ricordata come la più importante, sebbene ormai quasi dimenticata, qualche memoria resta ancora di almeno altre 3 piene. Nel 1911 una grossa piena erose parte delle sponde a valle del ponte di via Mazzini mentre nel 1952 si verificarono erosioni in vari punti. Ma la piena più importante dopo quella ricordata del 1924 è stata certamente quella del 1968. All'epoca subito a monte del ponte di via Garibaldi c'era la presa della roggia Molinera che, essendo rimasta con la presa aperta, riversò molta acqua verso la zona depressa di via Mazzini. Altra acqua, esondata a monte del ponte Icom, secondo diverse testimonianze, arrivò anch'essa in via Mazzini percorrendo il Corso Garibaldi fino alla piazza per poi deviare, seguendo la naturale morfologia del territorio, verso la zona più depressa di Via Mazzini.

7 Definizione delle classi di pericolosità e mappatura delle aree ricadenti in esse

L'Allegato B della *D.G.R. 28 luglio 2009, n. 2-11830 "Indirizzi per l'attuazione del PAI: sostituzione degli allegati 1 e 3 della D.G.R. 45-6656 del 15 luglio 2002 con gli allegati A e B"*, prevede, al punto 12.1, la possibilità per tronchi significativi dell'asta idrografica di utilizzare quale criterio di perimetrazione l'analisi congiunta dei tiranti e delle velocità raggiunte in ciascun punto nel corso dell'evento duecentennale. A tal fine si suggerisce la possibilità di utilizzare il diagramma di graduazione della pericolosità suggerito dal collega Prof. Renzo Rosso alla Regione Liguria. Nel seguito, anche sulla base di molteplici esperienze precedenti di chi scrive, si seguirà un percorso del tutto analogo, utilizzando le mappe di massima velocità e di massima profondità registrate nel corso della simulazione per definire le mappe di pericolosità idraulica. Si prenderà però a base un diagramma leggermente diverso da quello citato nell'Allegato B, ma che presenta il notevole vantaggio di essere stato derivato sulla base di un approccio razionale e quantitativo che individua la pericolosità misurando gli effetti dell'evento alluvionale nei confronti della persona fisica investita dalla corrente idrica, piuttosto che valutazioni intuitive o estrapolate da situazioni diverse. Nel seguito si illustra la base teorica del procedimento adottato.

Le metodologie utilizzate in questo studio consentono, in linea di principio, l'individuazione esaustiva delle possibili situazioni di pericolosità dipendenti dalle condizioni idraulico-idrologiche e dalla topografia del territorio. La classificazione della pericolosità idraulica è stata condotta sulla base della analisi congiunta del massimo tirante idrico registrato nel corso dell'evento e della spinta dinamica esercitata su di una persona, secondo la metodologia inizialmente presentata in Pilotti e Bacchi (2002) e quindi da Pilotti (2004). Nei lavori citati si suggerisce di costruire un indicatore di spinta contemperando la massima spinta idrodinamica su di un individuo e il massimo livello come indicatore di un possibile rischio di annegamento. Si suggerisce, eventualmente, di completare tale indicatore con un indicatore della spinta idrodinamica sull'edificato e con un indicatore del pericolo connesso al trascinamento di autovetture.

Vulnerabilità delle persone

Da questo punto di vista, la vulnerabilità durante un evento di piena è sostanzialmente connesa a due variabili: in primo luogo, i tiranti alti, che possono causare l'annegamento. Si richiederà dunque che sia, ai fini di un assegnato livello di sicurezza

$$Y \le Y_s \qquad (1)$$

dove il valore di tirante di soglia sarà da fissare in base a ragionevoli criteri. In secondo luogo, la capacità di trasporto e di spinta che la corrente è in grado di esercitare, la quale può trascinare una persona, indurre collassi strutturali o veicolare oggetti flottanti in grado di ledere la vita umana. Prescindendo dalla grande complessità dei processi reali, sarebbe quindi possibile definire una funzione di vulnerabilità basandosi sulla misura della capacità di trasporto medio della corrente costituita dallo sforzo esercitato al fondo

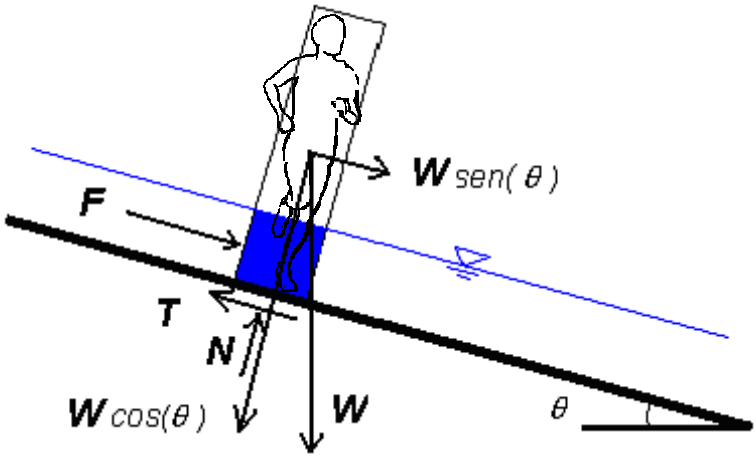
$$\tau_o = \gamma Y i \qquad (2)$$

dove si è considerato il tirante in luogo del raggio idraulico e dove γ e *i* rappresentano rispettivamente il peso specifico del liquido e la pendenza locale, oppure sulla espressione

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D A U^2 \qquad (3)$$

che fornisce la forza idrodinamica scaricata dalla corrente in condizioni stazionarie su di un oggetto, la cui superficie ortogonale alla direzione della corrente ha area *A*, e C_D è il coefficiente di trascinamento (*drag*), con valore variabile, tra l'altro, in funzione della forma dell'oggetto investito dal flusso. In realtà appare preferibile utilizzare quale strumento per la definizione della vulnerabilità la (3) in luogo della (2). In effetti, le due quantità sono legate tra loro e la prima è indicativa di una capacità di trasporto media della corrente, laddove la (3) è invece una espressione esplicità di una azione localizzata.

Ai fini della applicazione della (3) si è fatto riferimento ad una situazione idealizzata. Si è cioè schematizzata la persona, in posizione eretta, investita dalla corrente,come un cilindro di raggio R appoggiato al pendio di inclinazione θ.



La forza F è l'azione idrodinamica esercitata dalla corrente di profondità Y e densità ρ_f, approssimativamente integrata per tenere conto del possibile carattere plastico del fluido nel caso di colate detritiche

$$F = \frac{1}{2}\rho_f C_D A U^2 + 4RY\tau_c \qquad (3a)$$

dove τ_c è lo sforzo critico proprio dei fluidi plastici e il contributo deriva dalla integrazione dello sforzo critico sulla sezione retta circolare di raggio R del cilindro. W rappresenta il peso dell'oggetto mentre N rappresenta l'effetto della spinta di Archimede. Ai fini del calcolo si è fatto riferimento ad una persona tipo, assunta di altezza h e di peso assegnato. Per il calcolo della spinta di galleggiamento si è definita una funzione di volume corporeo in funzione del tirante Y, schematizzando il corpo umano come costituito da due cilindri di altezza h/2 e raggio r (le gambe) seguite da un cilindro di altezza h/2 e raggio R. Per il calcolo della (3a) l'area frontale è la sezione del cilindro di diametro 2R e altezza Y. Sotto queste ipotesi si ottiene una variazione del peso secco e del peso immerso (ossia depurato del contributo archimedeo) al variare di Y. La persona tipo presa a riferimento nella definizione della nostra funzione di vulnerabilità ha altezza 1.7 m. Se si pone r= 0.06 m e R = 0.11, si ottiene un andamento che pare ragionevole ed un peso complessivo di 71.5 Kg. Si ottiene inoltre l'andamento con Y del volume immerso, V, espresso dalla relazione approssimante

$$V = -0.0022Y^3 + 0.0233Y^2 + 0.0097Y$$

e la conseguente espressione del peso immerso,

$$w = 71.5g + g\rho_f (0.0022Y^3 - 0.0233Y^2 - 0.0097Y) \qquad (3b)$$

Considerando il caso generale di una superficie di inclinazione θ, Il peso si scompone in direzione parallela e normale al versante, dando luogo ad una componente destabilizzante, $Wsen(\theta)$, ed una normale al pendio, $Wcos(\theta)$. Nella approssimazione fatta, sul cilindro agisce una forza di attrito alla Coulomb esercitata alla base, data da $T=f_s\ wcos(\theta)$, dove f_s è il coefficiente di attrito e w è dato dalla (3b). In definitiva la condizione di equilibrio alla traslazione nella direzione della corrente è espressa dalla relazione

$$F + Wsen(\vartheta) \le f_s w\cos(\vartheta) \qquad (3c)$$

Si è adottata la verifica alla traslazione considerando che una persona può maggiormente influire, con il proprio assetto, sulla propria stabilità rotatoria rispetto al punto di appoggio, di quanto non possa fare su quella traslatoria. In definitiva, nella schematizzazione adottata, quest'ultima ci pare maggiormente rappresentativa.
In definitiva, la relazione (3c) permette di individuare, nel piano profondità della corrente Y, velocità U, la zona di stabilità e quella di instabilità, seppure procedendo da una schematizzazione approssimata del problema reale. Essa presenta il grande vantaggio di tenere in conto esplicito

1. la pendenza locale del punto in cui la relazione viene applicata

oltre ad una serie di fattori importanti, nel caso specifico delle colate detritiche, quali:

1. la densità della colata
2. lo sforzo critico (*yield stress*) del fluido caratteristico della colata

Si noti che, tuttavia, qualora tali fattori vengano a mancare (ad esempio, situazione di allagamento in pianura, con ρ_f= 1000 Kg/m^3 e τ_c =0), la relazione è ancora valida e fornisce la bipartizione dello spazio Y,U, che copre il tipico campo delle velocità nei processi di allagamento, ad esempio entro i 2.5 m/s. Agendo sul coeffciente di attrito statico, cui vengono assegnati due valori limite ragionevoli, si ottiene una tripartizione dello spazio Y-U, che consente di distinguere una zona certamente di stabilità, una seconda di instabilità incipiente ed infine una terza di chiara instabilità. La prima funzione di vulnerabilità può quindi essere definita come una funzione in una scala a tre valori, ad esempio 0,1 e 2, dove 0 corrisponde a vulnerabilità nulla, 1 vulnerabilità probabile e 2 vulnerabilità certa,

$$v_1(Y,U,\vartheta,\rho_f,\tau_c) \equiv \begin{cases} 0 & se \quad \dfrac{F+Wsen(\vartheta)}{w\cos(\vartheta)} \le f_{s_\inf} \\ 1 & se \quad f_{s_\inf} \le \dfrac{F+Wsen(\vartheta)}{w\cos(\vartheta)} \le f_{s_\sup} \\ 2 & se \quad \dfrac{F+Wsen(\vartheta)}{w\cos(\vartheta)} \ge f_{s_\sup} \end{cases} \qquad (3d)$$

La definizione di una prima funzione di vulnerabilità è stata fatta considerando l'effetto congiunto della spinta dinamica esercitata dalla corrente solido-liquida su di una persona e l'effetto di galleggiamento che porta ad una diminuzione del peso immerso, e trova corpo nella relazione (3c) e (3d). E' ora importante tenere conto di un terzo fattore, puramente statico, ovvero la profondità della corrente. Infatti, per velocità nulle la (3c) porta ad individuare una situazione di pericolo (i.e., instabilità) solo se per quella profondità per cui il peso immerso dell'individuo tipo si annulla. In acqua chiara, tale profondità è circa 1.7m, ovvero circa pari all'altezza dell'individuo tipo preso a riferimento. Poichè il rischio di trascinamento si accompagna a quello del possibile annegamento, (che, secondo i dati *FEMA* è la causa primaria di morte in caso di allagamento), è chiaro che si rende necessario integrare il criterio (3c) mediante una ulteriore funzione di vulnerabilità, funzione del solo tirante. Nel seguito tale funzione è stata ricondotta ad una ripartizione in 5 classi, facendo riferimento a classi di pericolosità a gravità crescente (1= trascurabile; 2=moderato/a; 3=medio/a; 4=elevato/a; 5=molto elevato/a), alle quali sono attribuite le seguenti definizioni:

1. Trascurabile P1: per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono trascurabili, anche alla luce del tempo di ritorno associato all'evento; qualora la velocità sia nulla tale classe corrisponde a tiranti inferiori a 0.1 m
2. Moderato P2 (colore verde): per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali; qualora la velocità sia nulla tale classe corrisponde a tiranti inferiori a 0.4 m
3. Medio P3 (colore giallo): per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, e, in generale, pregiudicano solo limitatamente l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche; qualora la velocità sia nulla tale classe corrisponde a tiranti compresi tra 0.4 m e 0.6 m.
4. Elevato P4 (colore arancione): per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale; qualora la velocità sia nulla tale classe corrisponde a tiranti compresi tra 0.6 m e 1 m.
5. Molto elevato P5 (colore rosso): per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche. ; qualora la velocità sia nulla tale classe corrisponde a tiranti superiori a 1 m

Si deve sottolineare che la funzione è riferita al rischio per la vita umana e non tanto in riferimento ai danni che un assegnato tirante può indurre alle cose. In questo senso, una profondità < di 0.4 m è una profondità tale da non destare preoccupazione per la sicurezza, se non in particolarissime situazioni tali comunque da non suggerire una classificazione specifica del territorio. Si tratta comunque di situazioni in cui il rischio può essere prontamente abbattuto anche con interventi locali (e.g., piccoli sopraelevamenti delle rampe di accesso a seminterrati e interventi similari). Una profondità tra 0.4 e 1.2 m può essere più insidiosa, raggiungendo locali e spazi che a priori si direbbero ben protetti e potendo costituire un pericolo per bambini non custoditi. Infine, una profondità maggiore di 1.2 m costituisce una profondità pericolosa sia per gli animali che per la vita umana.

In Figura 13, con riferimento ad una situazione già prima considerata di allagamento in area di pianura, ad opera di acqua chiara, si riporta la funzione di vulnerabilità finale, sintesi della (3d) e della funzione di vulnerabilità v_2 sopra definita verbalmente per il solo tirante, ovvero definita in funzione dei valori assunti dalle variabili in ciascun punto del conoide come:

$$v_3(Y,U,\vartheta,\rho_f,\tau_c) = \max(v_1, v_2) \qquad (4)$$

La vulnerabilità è quindi determinata come quella massima suggerita dai due criteri presi singolarmente, dove pare cautelativo assumere i valori dati dall'inviluppo dei massimi nel corso dell'evento simulato.

Come anticipato, l'applicazione di tale criterio è stata fatta utilizzando le mappe inviluppo di massima velocità e di massima profondità raggiunte nel corso dell'evento. La conseguente classificazione ha consentito di pervenire alle due mappe riportate nella figura seguente, dove le classi cromatiche sono P1, bianco, P2, verde P3, giallo, P4, arancione e P5, rosso.

8 Commento dei risultati e osservazioni in merito a specifici quesiti posti dalla Amministrazione Comunale

Ai fini pianificatori si dovranno prendere a riferimento le mappe di pericolosità idraulica mostrate in figura 11a, 11b e 11c. La simulazione condotta con Flo2D consente di ottenere la mappa delle massime profondità e delle massime velocità raggiunte nel corso dell'evento, compatibilmente con: 1) la capacità del modello numerico di rappresentare la complessità dei fenomeni in gioco, e quindi la precisione di calcolo, 2) la precisione nella rappresentazione geometrica delle aree inondate e 3) la precisione con la quale si possono attribuire i coefficienti di resistenza al moto in ambienti così complessi come le aree urbane. Queste due mappe di inviluppo sono quelle normalmente poste a base di ogni considerazione in merito alla pericolosità idraulica.
Innanzitutto si deve osservare che, in ambienti di piane alluvionali, ben difficilmente si può parlare di 'fasce fluviali'. Questa definizione, coniata per semplicità per gli ambiti delle vallate contornate da monti o limitate da terrazzamenti naturali insormontabili per le piene, perde qui ogni senso.
Infatti, le acque che fuoriescono in tratti, spesso ben identificabili, di qualche decina (o pochissime centinaia) di metri, si riversano nella piana circostante seguendo percorsi abbastanza ben individuabili che, in ambiente urbano, assumono l'andamento di vere e proprie fiumare costrette nelle strade. La corrente, in dipendenza dell'entità dell'esondazione, può assumere localmente velocità e tiranti anche elevati ma che tendono a manifestarsi - specialmente questi ultimi – solo nelle zone più depresse. Più che una 'fascia' viene a crearsi intorno all'alveo un'area caratterizzata da 'isole' a pericolosità più elevata, di norma, connesse tramite aree a bassa pericolosità. Il che rappresenta esattamente la situazione reale che viene a determinarsi.

Per quanto riguarda la fascia A (figura 11a), si osserva che l'abitato di Borgomanero risulta sostanzialmente esente da zone di elevata pericolosità, fatta salva la zona di stretta competenza dell'alveo. Procedendo da monte, si vede che i punti maggiormente suscettibili di esondazione sono quelli immediatamente a valle della passerella pedonale, posta poco a monte del Ponte Araldo, in zona occupata da verde pubblico; quindi la zona in sinistra del ponte di Via Mazzini a causa del rigurgito del ponte. Sempre procedendo verso valle, la piccola zona in sinistra in corrispondenza delle piscine in merito alla quale si presenteranno tra poco specifiche osservazioni. Più a valle, si conferma l'elevata propensione all'esondazione in destra del ponte del Torrione, che tuttavia coinvolge, a parte l'edificio di un vecchio molino, un'ampia zona di ortaglie e di prati di trascurabile vulnerabilità. Sulla sinistra del ponte del Torrione si evidenzia la possibilità della formazione di deflussi di acque con battenti limitati sulla sede stradale, individuando quindi le zone di valle con livelli di pericolosità moderata.

Venendo ora alla mappa corrispondente all'evento duecentennale (figura 11b), la zona interessata dall'esondazione riguarda anche il centro storico dell'abitato. L'esondazioni iniziano a manifestarsi in corrispondenza dei tratti in cui l'Agogna è caratterizzata dalle minime pendenze. Questi punti sono quello già ricordato subito a valle della passerella a monte del ponte Araldo e la zona in sinistra a monte del ponte del Torrione. Infine, nella zona a valle del ponte di via Pertini, l'esondazione è generalizzata ma risulta ben contenuta, in destra, dall'andamento altimetrico del terreno. Quest'ultima comunque non comporta rischi per le aree perché la loro vulnerabilità è pressoché nulla.
L'esondazione è invece quasi generalizzata in corrispondenza dei ponti Icom, di Via delle scuole, di Via Mazzini e Torrione. L'esondazioni che avvengono nella parte nord del paese creano una situazione caratterizzata da tiranti elevati nella zona di parcheggio in fregio al fiume e imboccano quindi il reticolo viario

del paese determinando un deflusso lungo le strade che porta all'allagamento delle strade di destra di Via Roma. Pervenendo nella piazza principale del paese, il deflusso prosegue in destra verso Via Mazzini, con una modalità che corrisponde esattamente alle testimonianze storiche relative all'evento del 1924. Per quanto riguarda la zona allagata in destra a valle del ponte di via Mazzini (si veda la zona individuata con il numero 1 in figura 14), valgono le considerazioni nel seguito presentate. In corrispondenza e a valle del ponte del Torrione, la situazione precedentemente osservata per la fascia A si presenta rafforzata dai maggiori volumi esondati.

La situazione relativa alla Fascia C rafforza le osservazioni già presentate. Di nuovo si evidenzia che in questo caso il deflusso attraverso il borgo si incanala anche lungo una direttrice posta un po' più a nord, che, come attestato dalle informazioni storiche raccolte relative all'idrografia antica dei luoghi, corrisponde con tutta probabilità al tracciato antico di un ramo dell'Agogna, poi confluito nella cosiddetta *Roggia della Madonna*.

Tornando all'immagine della pericolosità idraulica corrispondente alla Fascia B, e con specifico riferimento alla zona individuata con il numero 1 in figura 14, si deve osservare che in tale zona è in corso un significativo riporto terra (si veda Figura 15) che è intenzione della Amministrazione Comunale concludere quanto prima. Poiché tale riporto alzerà il livello del terreno di almeno 2 metri è da intendere chiaramente che tale zona, dove il massimo tirante sarebbe di 1.3 m, si troverà esente da pericolo di esondazione e sarà quindi a pericolosità sostanzialmente nulla. In sostanza le quote utilizzate nella costruzione del modello di elevazione del terreno, sono relative a rilievi effettuati in anni precedenti al riporto menzionato e quindi restituiscono, in quel punto, una immagine della pericolosità che non corrisponde alla situazione attuale e futura della zona.

E' qua il caso di dire che il citato Allegato B della *D.G.R. 28 luglio 2009, n. 2-11830 "Indirizzi per l'attuazione del PAI: sostituzione degli allegati 1 e 3 della D.G.R. 45-6656 del 15 luglio 2002 con gli allegati A e B",* introduce le aree a pericolosità medio-moderata (e non già solo a pericolosità elevata) all'interno delle aree inondabili per tempo di ritorno di 200 anni, con l'obiettivo di introdurre maggiori elementi di flessibilità nelle analisi. Coerentemente a questa linea di pensiero, in considerazione del carattere del tutto eccezionale dell'evento B, si ritiene ragionevole considerare modesto il pericolo idraulico nelle zone classificate in verde, dove il tirante massimo è di 40 cm, corrispondenti a livello quantificato come moderato sulla base dei ragionamenti riportati al punto 7. Conseguentemente, pare cautelativo e nel contempo ragionevole utilizzare a base degli atti pianificatori la mappatura del pericolo idraulico mostrata in Figura 14, che riproduce la Figura 11b con esclusione delle zone a pericolo moderato. Tali zone risulterebbero sostanzialmente a rischio Em, moderato, anche qualora la classificazione venisse fatta secondo il criterio assai cautelativo proposto da Rosso ed adottato al punto 12.1 dell'allegato B. Tale affermazione è sostanziata nel confronto mostrato in Figura 16, dove la classe verde della mappa di sinistra corrisponde sostanzialmente alla classe verde ottenuta con l'applicazione del citato criterio del Prof. Rosso.
Infine, si osserva che il comparto indicato in Figura 14 e numerato come 2 si presenta in zona di pericolosità quasi del tutto trascurabile. Infatti il comparto è delimitato perimetralmente da una cortina continua di muri, ad eccezione della zona di ingresso allo stesso, dove, comunque, sarà necessario realizzare un sistema d'accesso con un presidio che consenta di chiudere a tenuta il cortile centrale qualora si verifichino gli eventi eccezionali oggetto di questa perimetrazione.

9 Indicazioni generali

Parallelamente alla attività di perimetrazione della pericolosità idraulica, in prossimità di un corso d'acqua capace di piene significative come l'Agogna appare comunque opportuno attenersi a norme precauzionali. Infatti, si deve osservare che nessun argine è in grado di garantire una totale protezione nei confronti di qualunque piena. Ogni argine viene pensato per fornire uno specifico livello di protezione e può quindi essere tracimato a fronte di eventi maggiori rispetto a quello preso a riferimento. Evento questo che, nel caso specifico, appare assai improbabile ma non statisticamente impossibile. Inoltre, affinché un argine possa garantire nel tempo il livello di protezione per cui è stato pensato è necessario prevedere un adeguato

programma di manutenzione. In definitiva, quindi, a fini precauzionali, nella fase di realizzazione di eventuali interventi di urbanizzazione/ristrutturazione nelle zone coperte dalla classificazione di Figura 11b appare comunque opportuno prevedere interventi che aumentino la capacità di difesa passiva degli edifici.
Alcuni accorgimenti necessari ad una mitigazione del rischio, da valutare nei singoli casi, potranno essere

- la ridefinizione del piano campagna in modo da colmare, almeno parzialmente, le zone maggiormente depresse e il divieto di realizzazione di nuovi volumi interrati.
- Realizzare le superfici abitabili, le aperture e gli accessi ai piani interrati ad una quota minima di 50 cm rispetto al piano campagna ridefinito.
- Realizzare opere drenanti per evitare le sottopressioni idrostatiche nei terreni di fondazione e prevedere fondazioni opportune per evitare eventuali fenomeni di cedimento e di rigonfiamento dei suoli coesivi.

Appare inoltre fondamentale mantenere pulita da vegetazione la zona di alveo e delle sponde a monte dell'abitato, al fine di evitare che in occasione di eventi estremi la vegetazione sradicata e trascinata dalla corrente ostruisca le luci dei ponti, inducendo effetti di rigurgito maggiori di quelli qui previsti. Parallelamente a ciò si deve garantire la pulizia del tratto d'alveo urbano dell'Agogna, con il taglio di tutta la vegetazione arborea presente in alveo e l'eliminazione delle aree di deposito che riducono le sezioni disponibili al deflusso nel corso d'acqua. Per le rogge ancora in funzione, seppure periodica, gli organi competenti devono presentare al Comune lo schema idraulico di funzionamento, e il piano di emergenza per evitare l'allagamento dell'abitato attraverso queste vie preferenziali.

10 Conclusioni

Lo studio illustra le metodologie seguite nell'inquadramento della pericolosità idraulica connessa ad esondazioni del F. Agogna in territorio di Borgomanero.
In primo luogo, si sono definite le caratteristiche dell'onda di piena da utilizzare a base dello studio, caratterizzata, per quanto riguarda la definizione dell'evento di riferimento, da un tempo di ritorno di 200 anni. Tale onda, utilizzata per la perimetrazione delle aree ricadenti in Fascia B, è stata modificata per definire due eventi aggiuntivi, il cui colmo è stato ottenuto nel primo caso per riduzione del 20 % del valore di colmo (definizione della fascia A) e nel secondo prendendo a riferimento una portata al colmo corrispondente a tempo di ritorno di 500 anni. Per precisare l'estensione delle eventuali zone inondate è stata poi condotta una serie di simulazioni di propagazione bidimensionale dell'onda di piena. Tale fase ha richiesto preliminarmente la costruzione di un modello di elevazione del terreno per la porzione di territorio in esame. Al termine delle simulazioni si è ottenuta la mappa inviluppo di massima velocità e di massimo tirante sulla porzione del territorio comunale. Tale informazione ha consentito di costruire la mappa di classi di pericolosità idraulica associata ad ogni parcella elementare nel quale è stato suddiviso il territorio, sulla base di un criterio razionale, cautelativo e a base fisica, sostanzialmente ispirato all' Allegato B della *D.G.R. 28 luglio 2009.*
La determinazione delle Fasce a partire dalle mappe di inviluppo delle massime profondità e delle massime velocità ha portato alla graduazione della pericolosità rappresentata in Figura 14.

Riteniamo che il procedimento seguito sia doverosamente cautelativo e nel contempo si conformi allo stato dell'arte in merito alle metodologie di perimetrazione delle aree a rischio di inondazione. La metodologia basata su schemi bidimensionali di propagazione delle piene, appoggiandosi ad una descrizione topografica realistica del territorio, consente di individuare naturalmente la direzione di deflusso delle acque esondanti, come ben evidenziato dalla capacità di riprodurre l'effetto del più eclatante dell'evento storico del 1924. La qualità dei risultati è in larga parte conseguenza del modello di elevazione del terreno. Per quanto, quindi, la base di supporto di partenza non sia stata ottimale, non potendo avvalersi di un aereofotogrammetrico tridimensionale di appoggio, si ritiene comunque che la rappresentazione topografica risultante della zona prospiciente l'alveo e della piana circostante l'Agogna sia stata sufficientemente precisa, al meglio dell'informazione topografica disponibile alla data dello studio. In definitiva, può essere che particolarità geometriche del territorio, magari non colte appropriatamente nel modello di elevazione costruito (e.g., il singolo muretto separatore di calcestruzzo o altri particolari similari), possano condizionare localmente i

risultati. Tale fatto, purtroppo inevitabile nella modellazione su aree pianeggianti e complesse, riteniamo non possa tuttavia condizionare il senso generale delle indicazioni che emergono dal presente studio.

Bibliografia

Federal Emergency Management Agency. "Engineering principals and practices for retrofitting flood prone residential buildings," chapter 4 (draft), Washington, D.C.,1994.

O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T., Two dimensional water flood and mudflow simulation *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCEE, 119(2), 244-261, 1993.

Pilotti M. e Bacchi B., Nota su alcuni possibili criteri per la zonazione della pericolosità idraulica in aree di conoide, *Technical Report dell'Università di Brescia*, n° xx, 2002.

Pilotti M., Linee guida sulla valutazione del rischio su conoide alluvionale, con specifico riferimento alla colata detritica che ha investito il conoide del T. Rossiga in data 29/11/2002, IREALP - Regione Lombardia - attività nell'ambito del Progetto *CatchRisk*, Programma Interreg III B – Spazio Alpino, 2004.

Figure relative alla Relazione Idraulica

- Maggio 2011 -

AUTORI

Prof. Ing. Baldassare Bacchi
Prof. Ing. Marco Pilotti

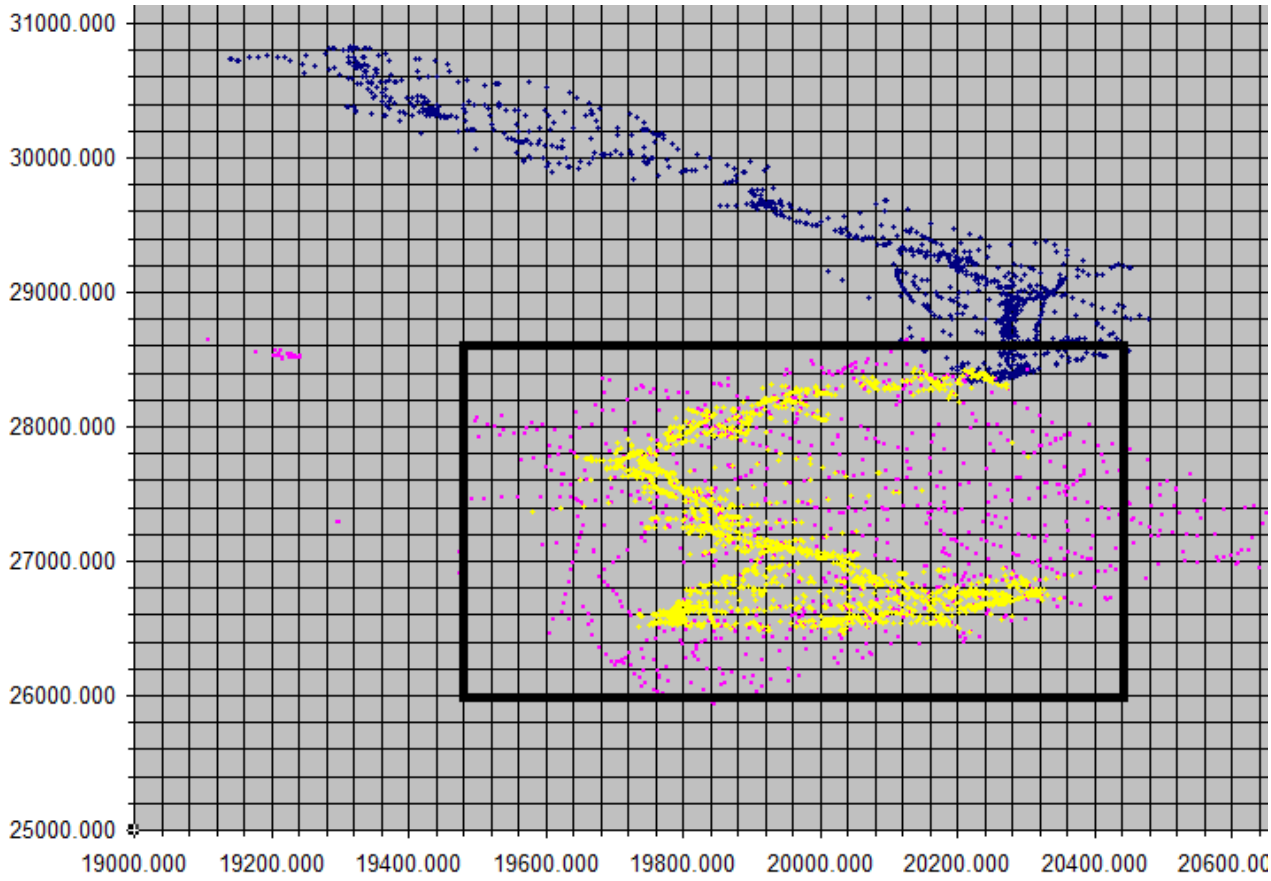


Figura 1: punti complessivamente disponibili per la realizzazione del modello di elevazione del terreno.

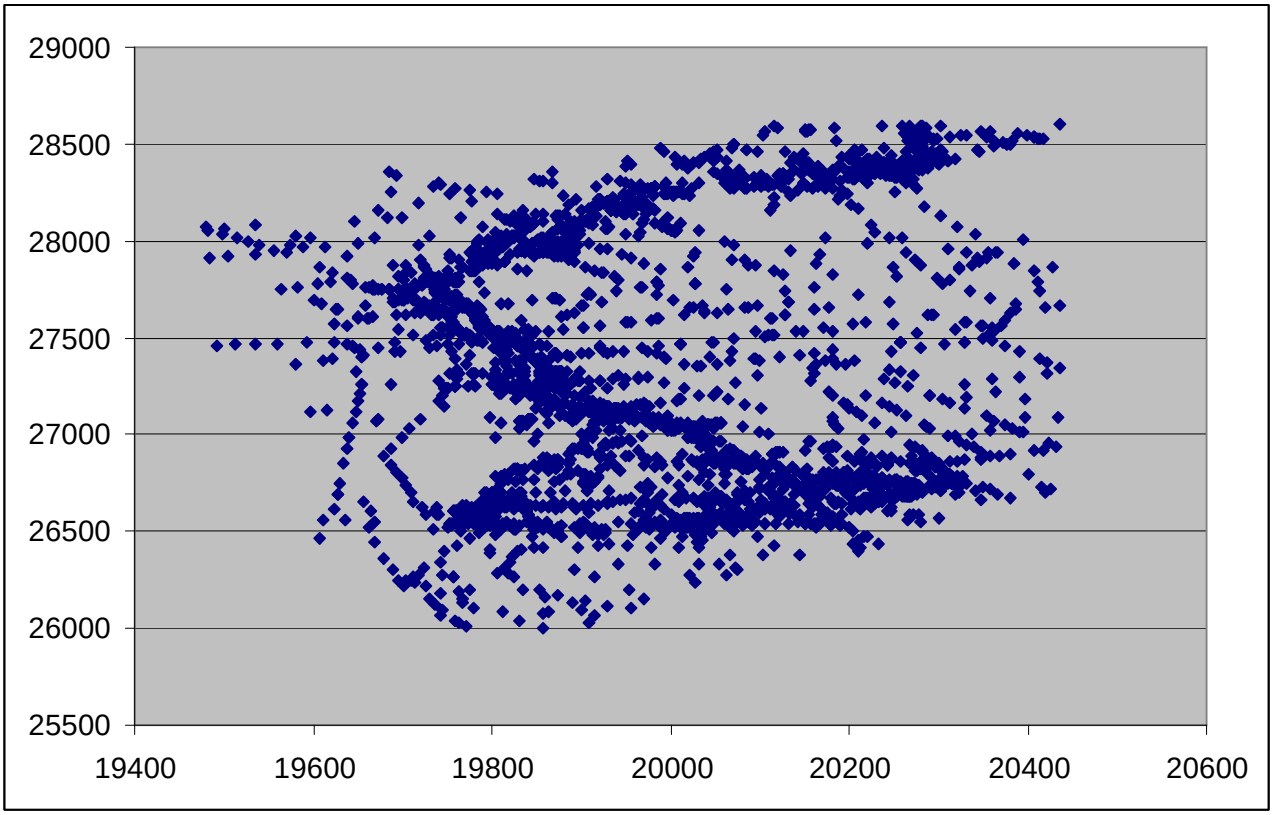


Figura 2: punti considerati relativamente alla zona delle indagini.

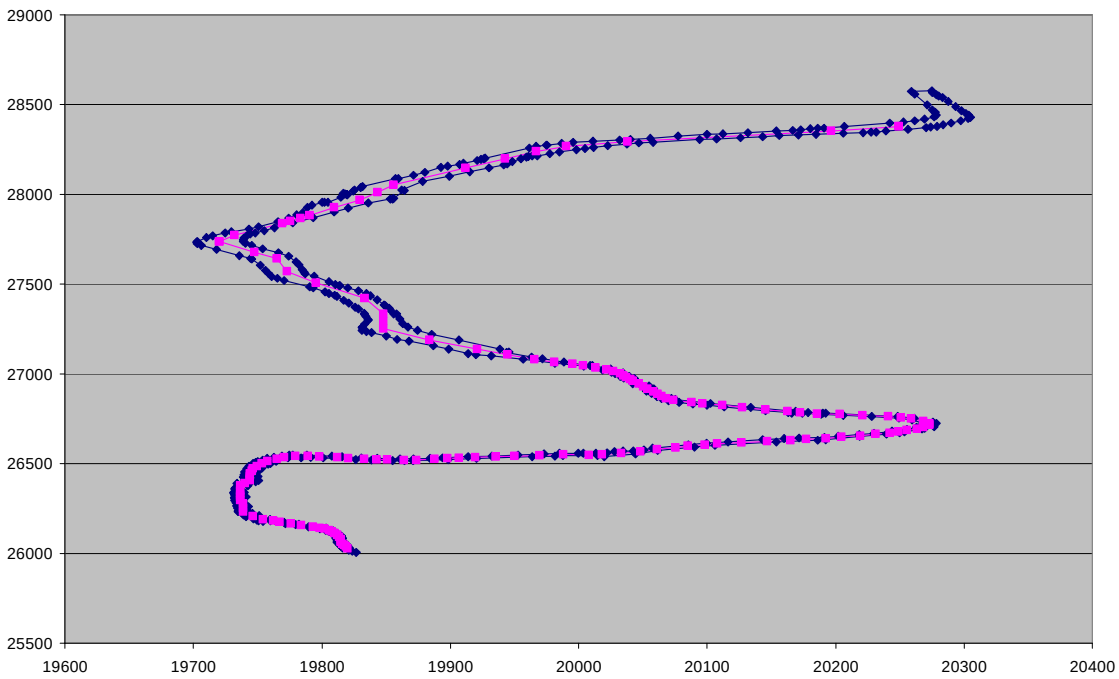


Figura 3: punti interni all'alveo.

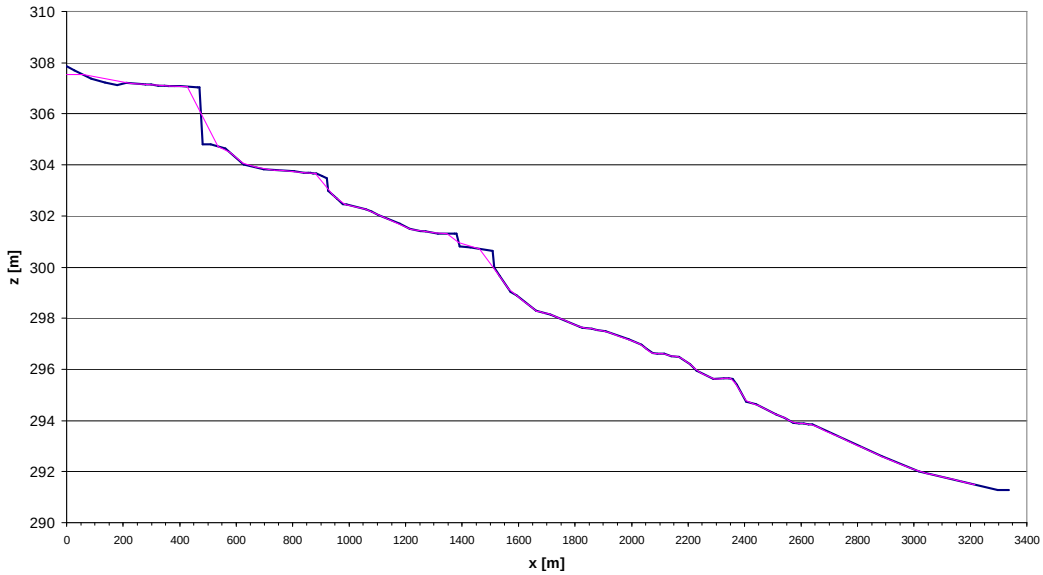


Figura 4: profilo altimetrico dell'Agogna evinto dalla batimetria e corrispondente profilo longitudinale utilizzato nel modello monodimensionale.

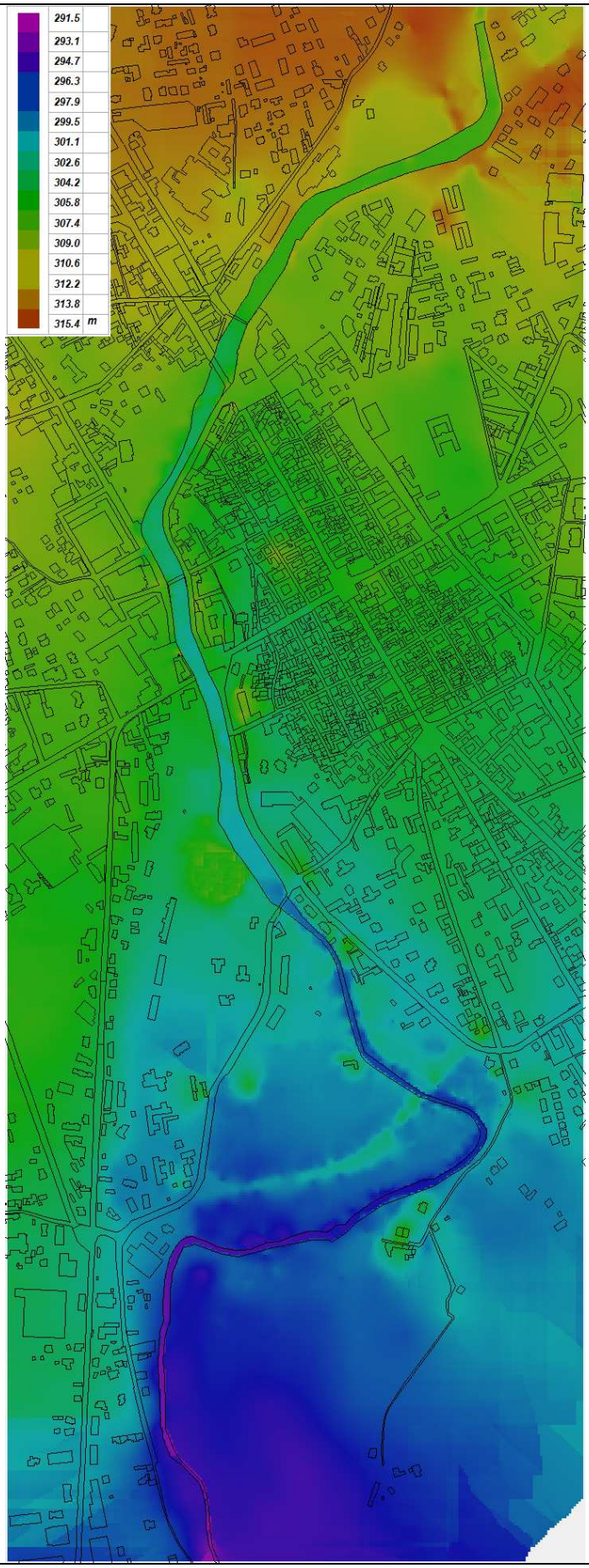


Figura 5: modello di elevazione del terreno rappresentato a fasce cromatiche per la zona studiata.

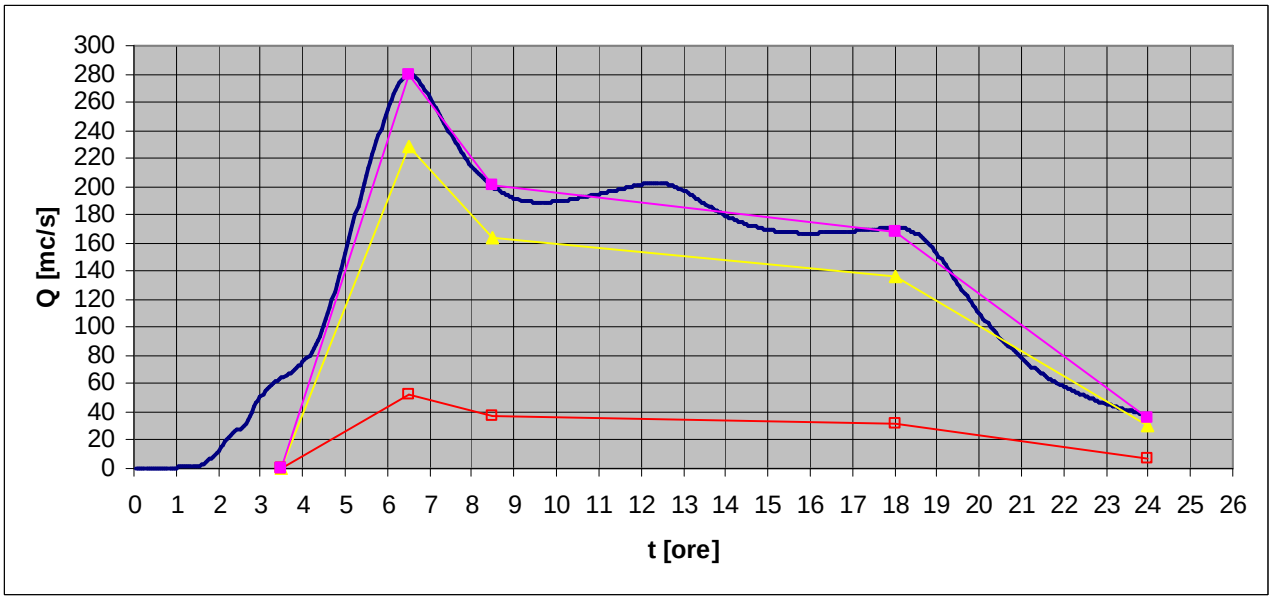
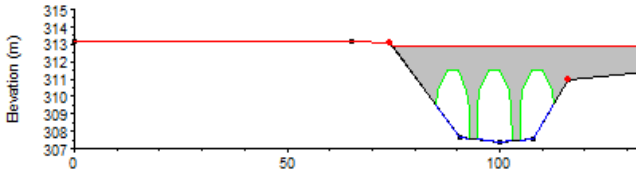
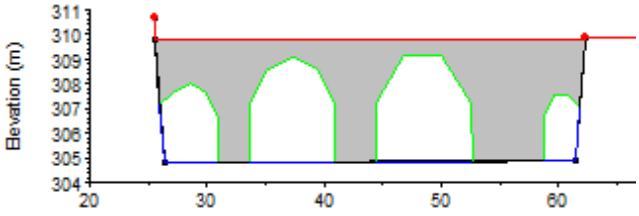


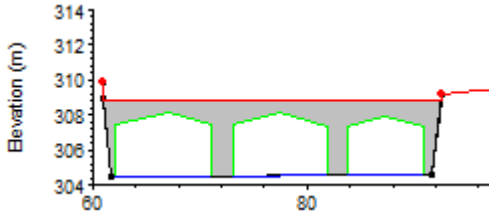
Figura 6: idrogramma utilizzato per la individuazione delle aree ricadenti in zona B.



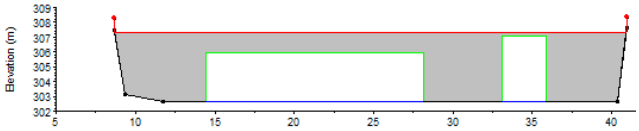
Ponte Rosso



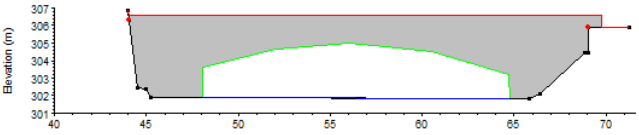
Ponte Araldo



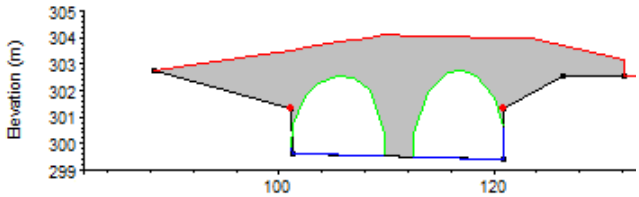
Ponte Icom



Ponte delle Scuole



Ponte di Via Mazzini



Ponte Torrione

Figura 7: i ponti presenti nel tratto studiato e la loro schematizzazione geometrica tratta da *Hec Ras.*

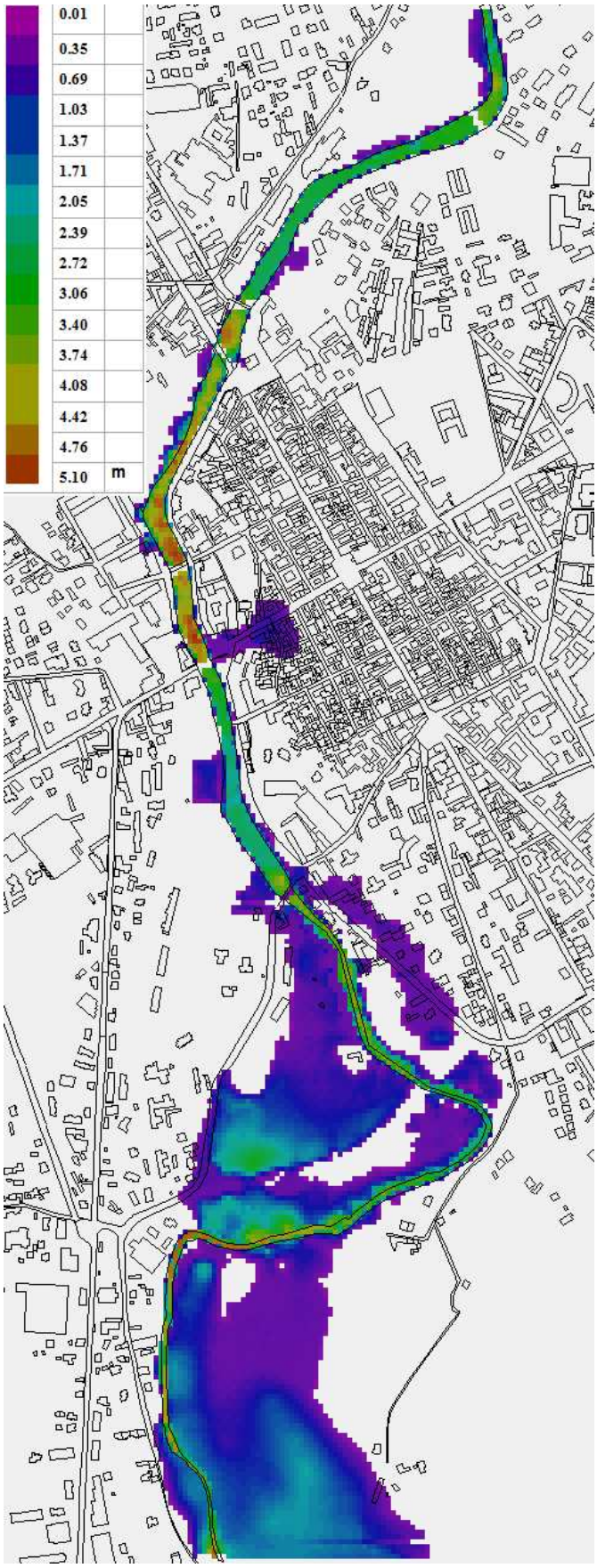


Figura 8a: mappa di massima profondità registrata nel corso dell'evento posto a base della definizione della Fascia A.

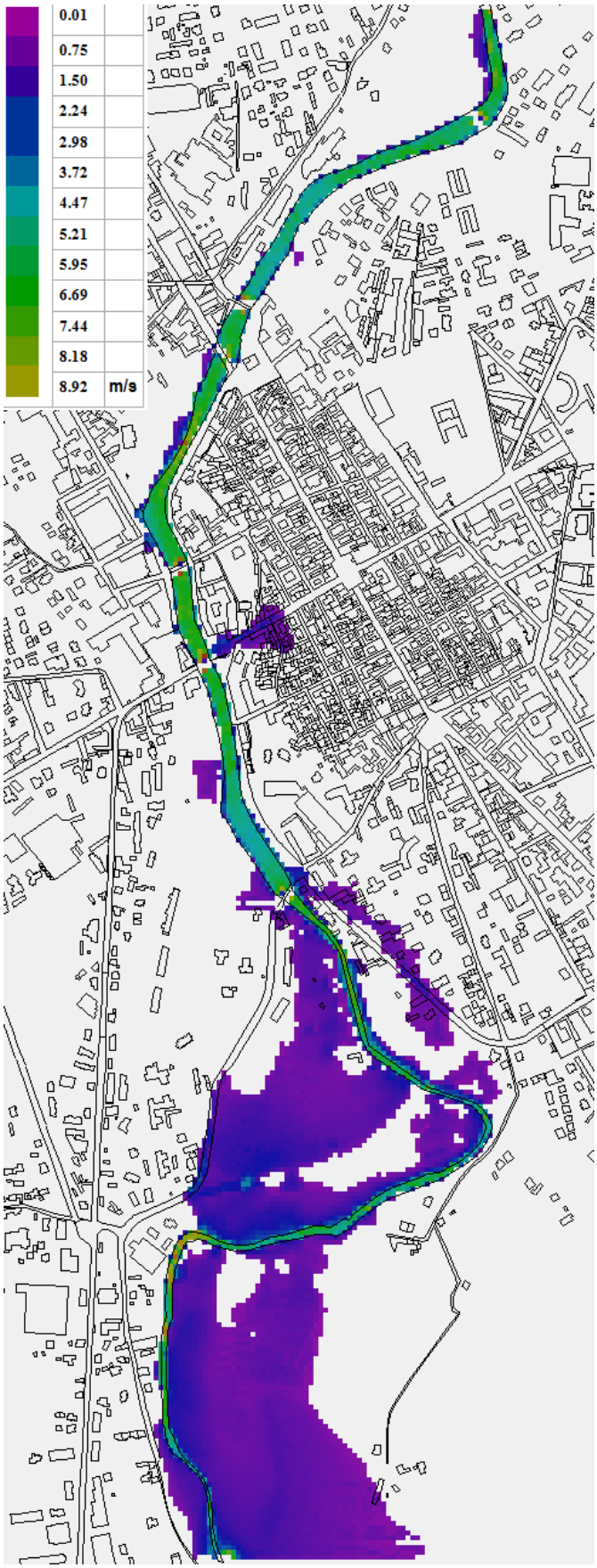


Figura 8b: mappa di massima velocità registrata nel corso dell'evento posto a base della definizione della Fascia A.

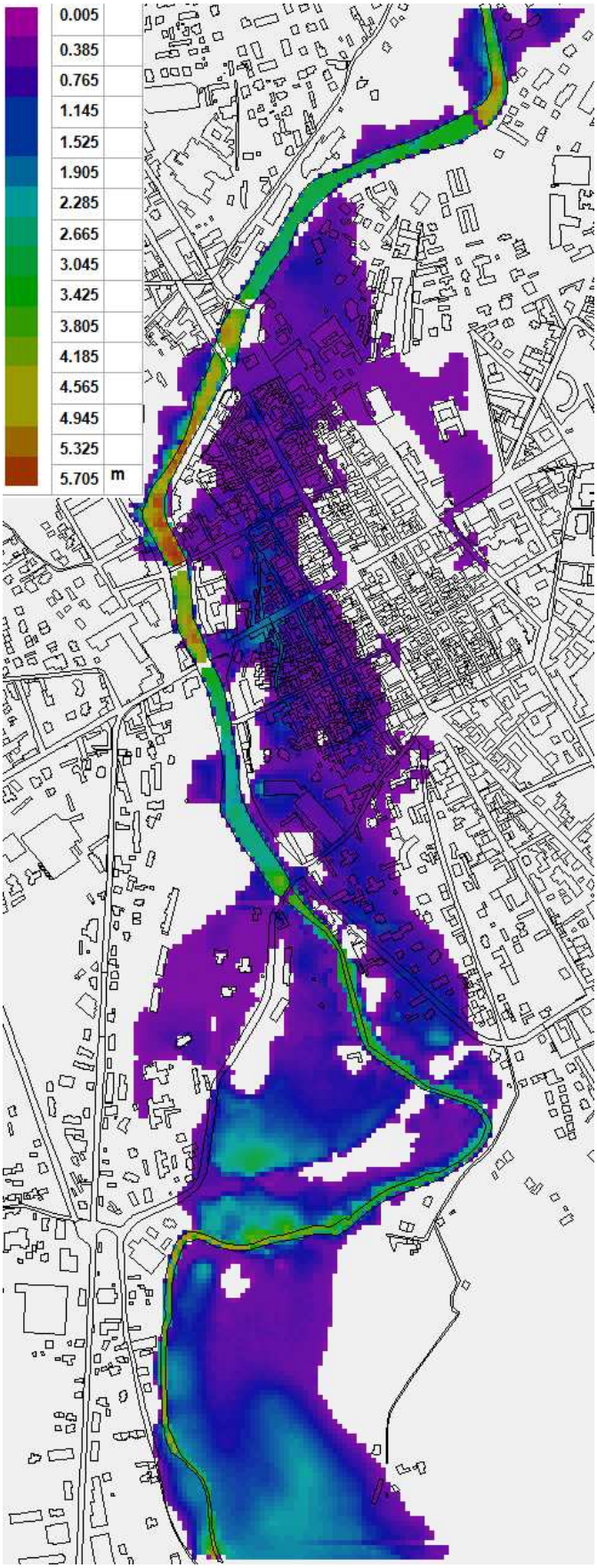


Figura 9a: mappa di massima profondità registrata nel corso dell'evento posto a base della definizione della Fascia B.

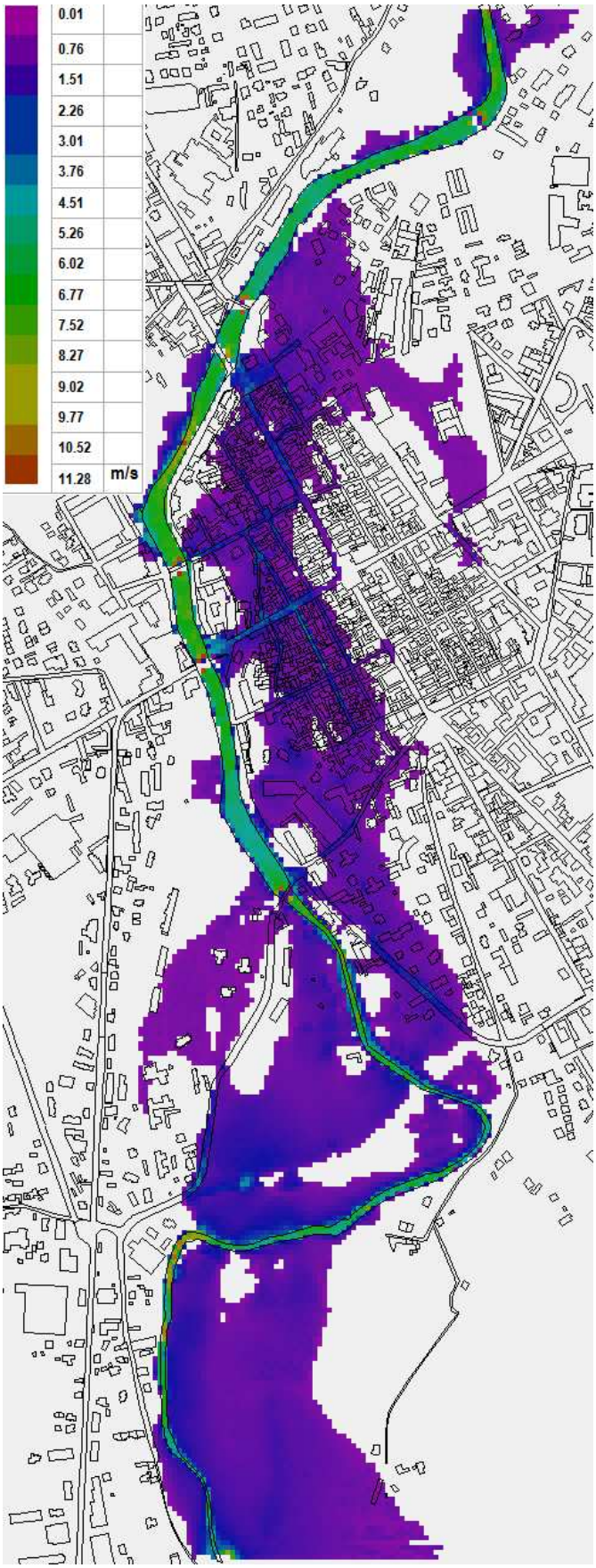


Figura 9b: mappa di massima velocità registrata nel corso dell'evento posto a base della definizione della Fascia B.

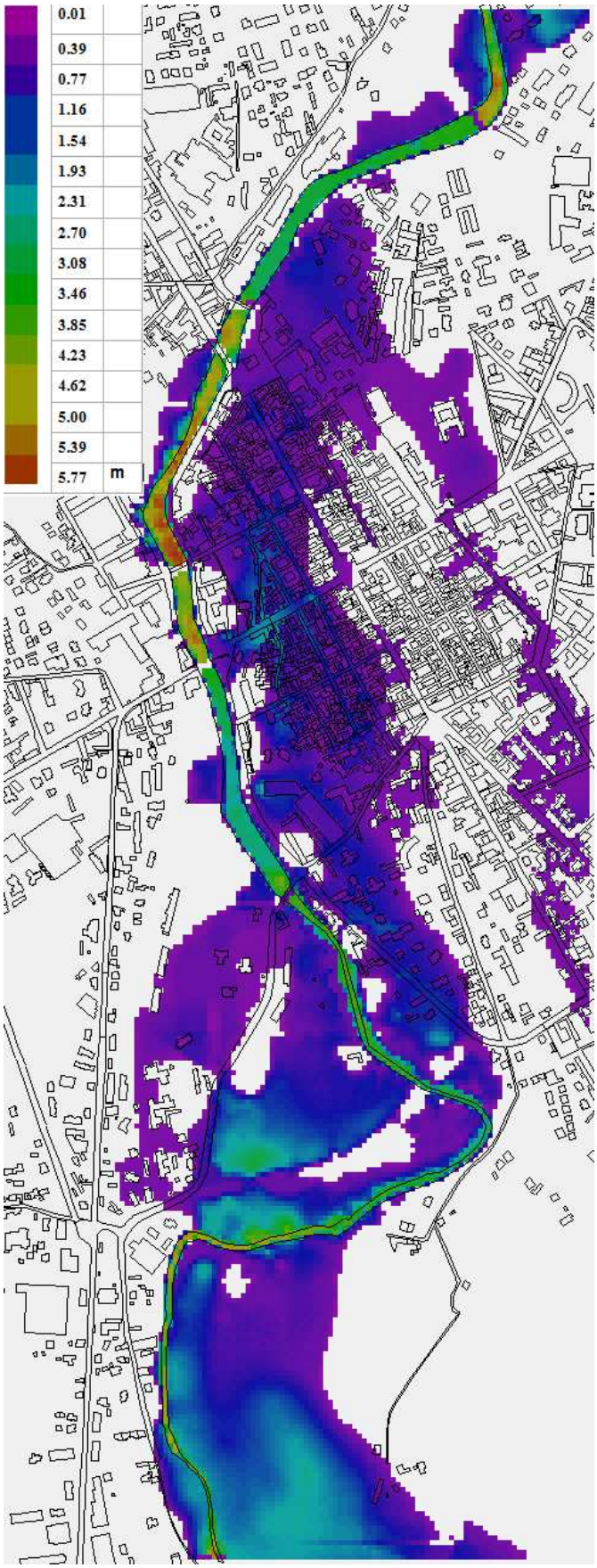


Figura 10a: mappa di massima profondità registrata nel corso dell'evento posto a base della definizione della Fascia C.

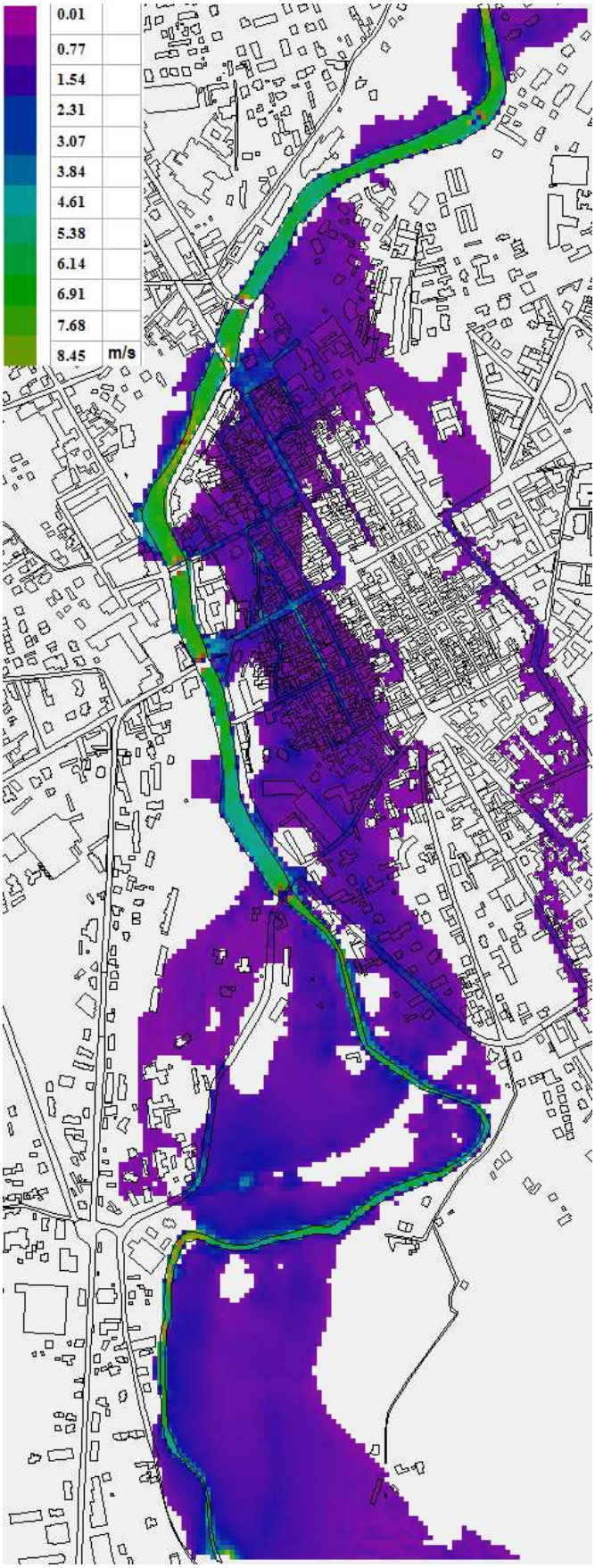


Figura 10b: mappa di massima velocità registrata nel corso dell'evento posto a base della definizione della Fascia C.

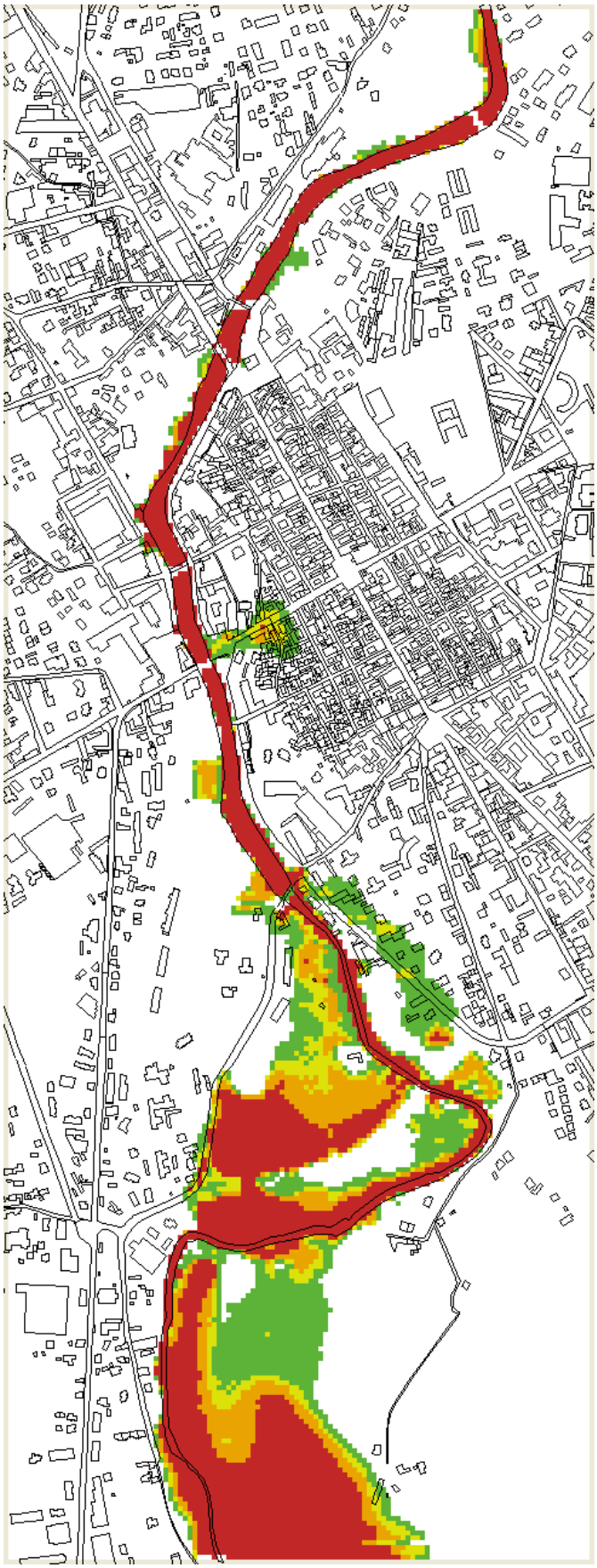


Figura 11a: mappa di classazione della pericolosità in seguito all'evento posto a base della definizione della Fascia A (1, bianco= trascurabile; 2, verde=moderato/a; 3, giallo =medio/a; 4, arancione =elevato/a; 5, rosso =molto elevato/a).

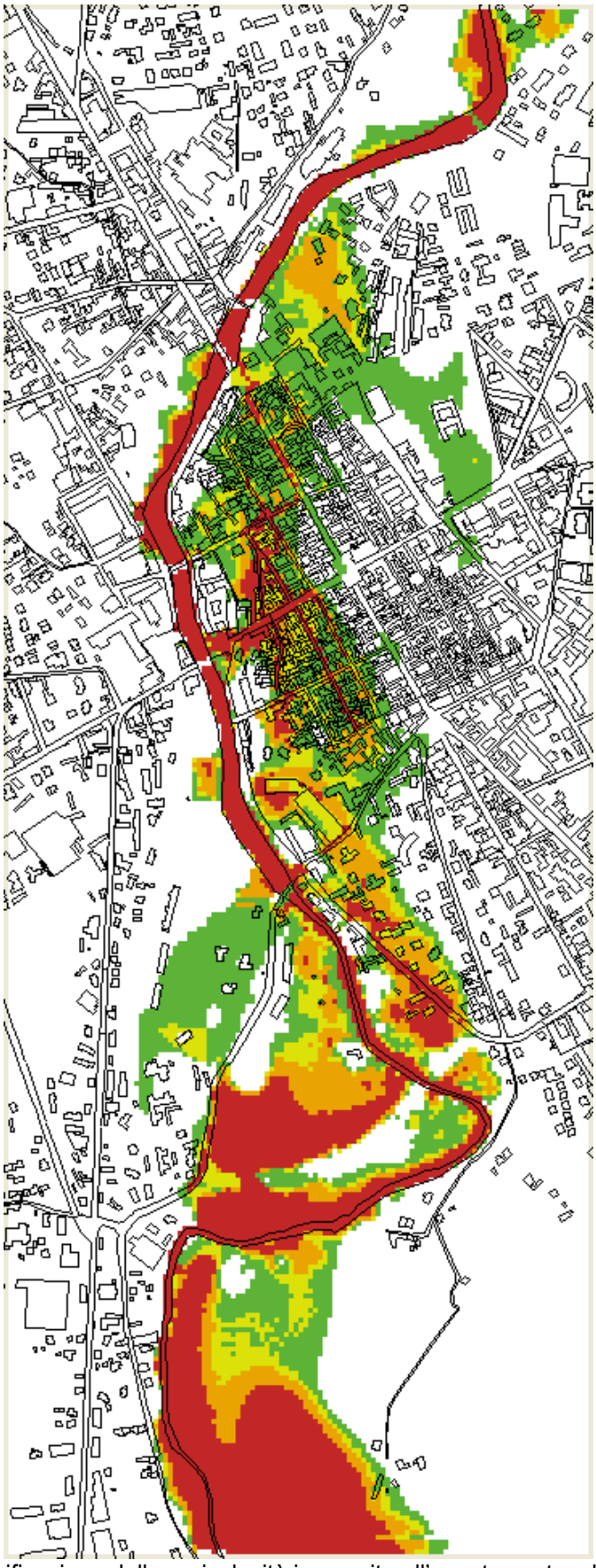


Figura 11b: mappa di classificazione della pericolosità in seguito all'evento posto a base della definizione della Fascia B (1, bianco= trascurabile; 2, verde=moderato/a; 3, giallo =medio/a; 4, arancione =elevato/a; 5, rosso =molto elevato/a).

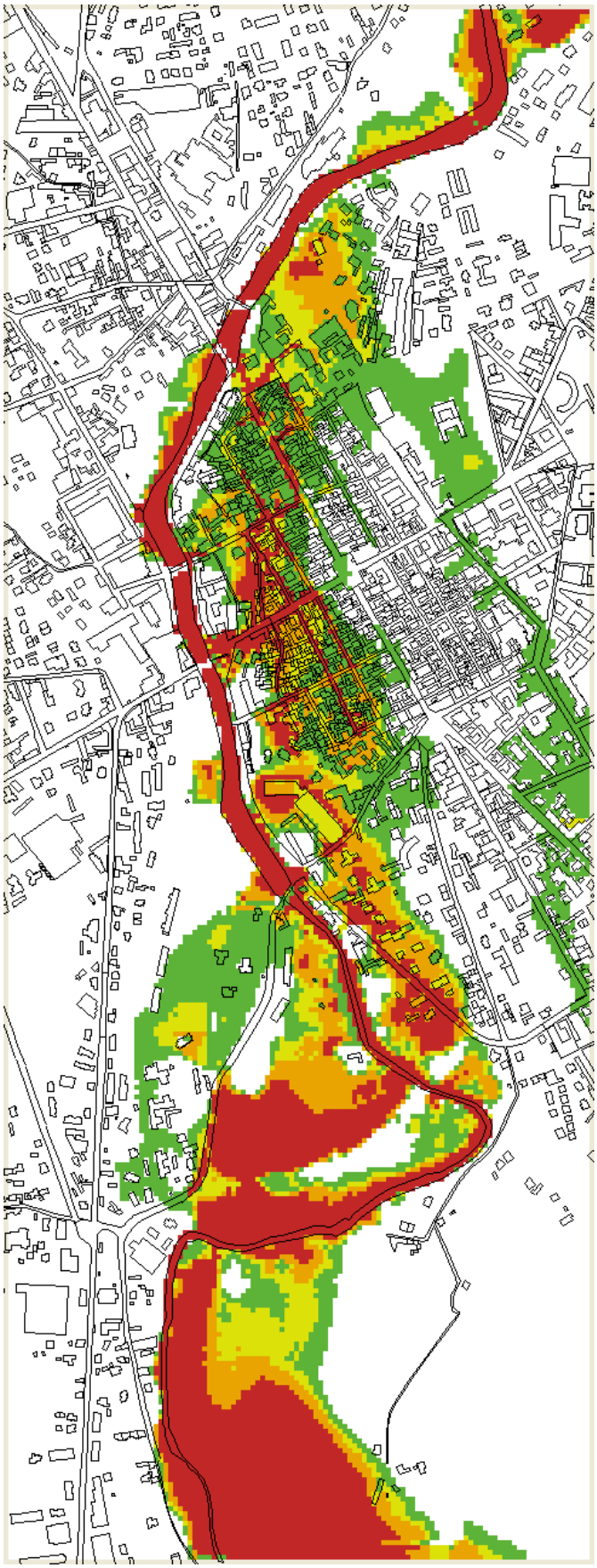


Figura 11c mappa di classazione della pericolosità per l'evento posto a base della definizione della Fascia C

Figura 12 fotografia che attesta il raggiungimento di una profondità dell'acqua di circa 1.2 m durante l'evento del 1924 nella zona che risulta massimamente sollecitata anche nella simulazione numerica

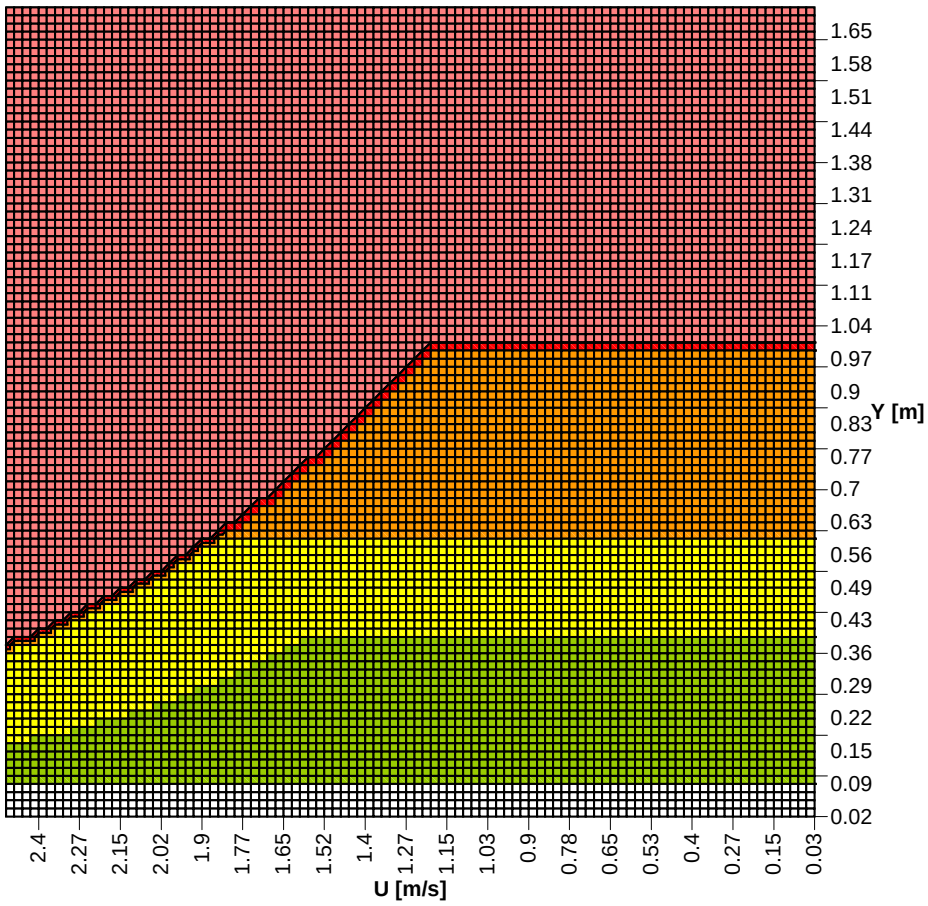


Figura 13: superficie di pericolosità idraulica nel piano massima velocità-massimo tirante, con suddivisione in cinque classi di pericolosità a gravità crescente (1, bianco= trascurabile; 2, verde=moderato/a; 3, giallo =medio/a; 4, arancione =elevato/a; 5, rosso =molto elevato/a). Campo di stabilità calcolato sulla base della spinta dinamica su di una persona, relativamente ad una corrente di sola acqua (ρ= 1000 Kg/m3 e τc =0.Soglie di attrito fs_sup = 0.4 e fs_inf = 0.18)

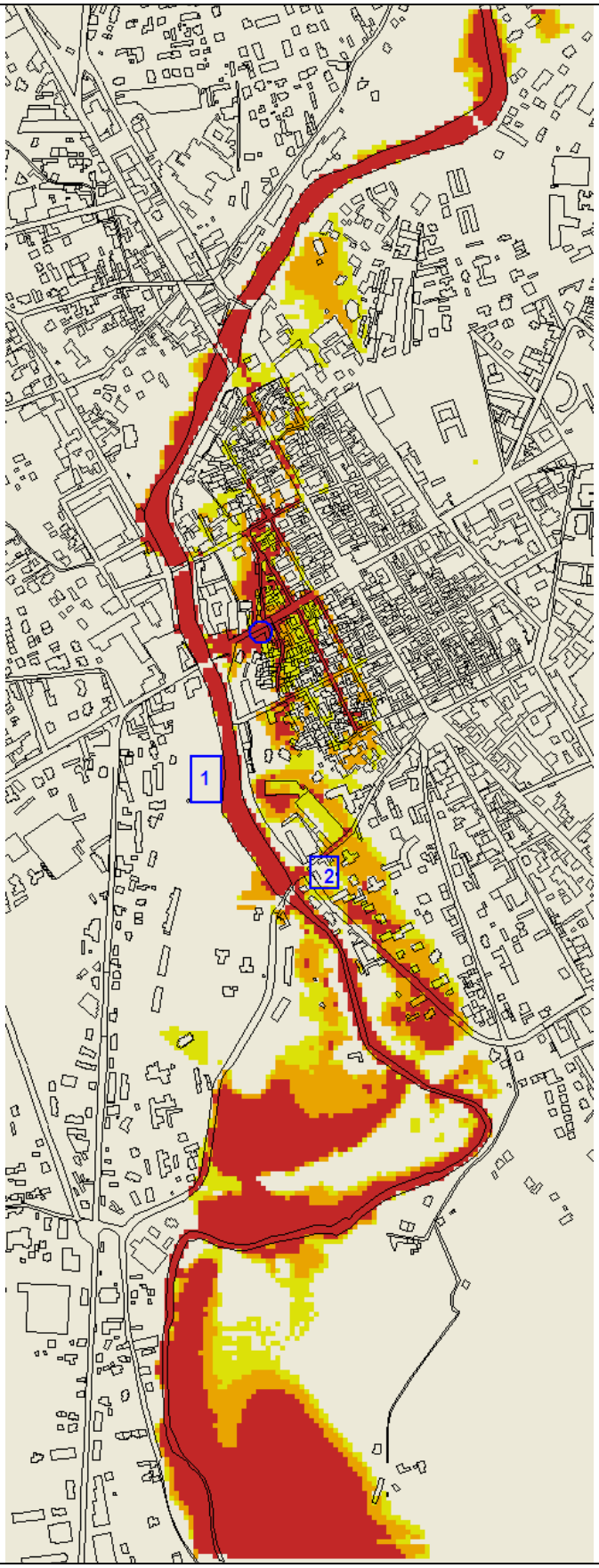


Figura 14: mappa di classificazione della pericolosità in seguito all'evento posto a base della definizione della Fascia B con esclusione delle zone a pericolosità moderata (3, giallo =medio/a; 4, arancione =elevato/a; 5, rosso =molto elevato/a).

Figura 15. Fotografia che attesta l'avanzamento dei lavori di riempimento nella zona indicata come 1 in Figura 14.

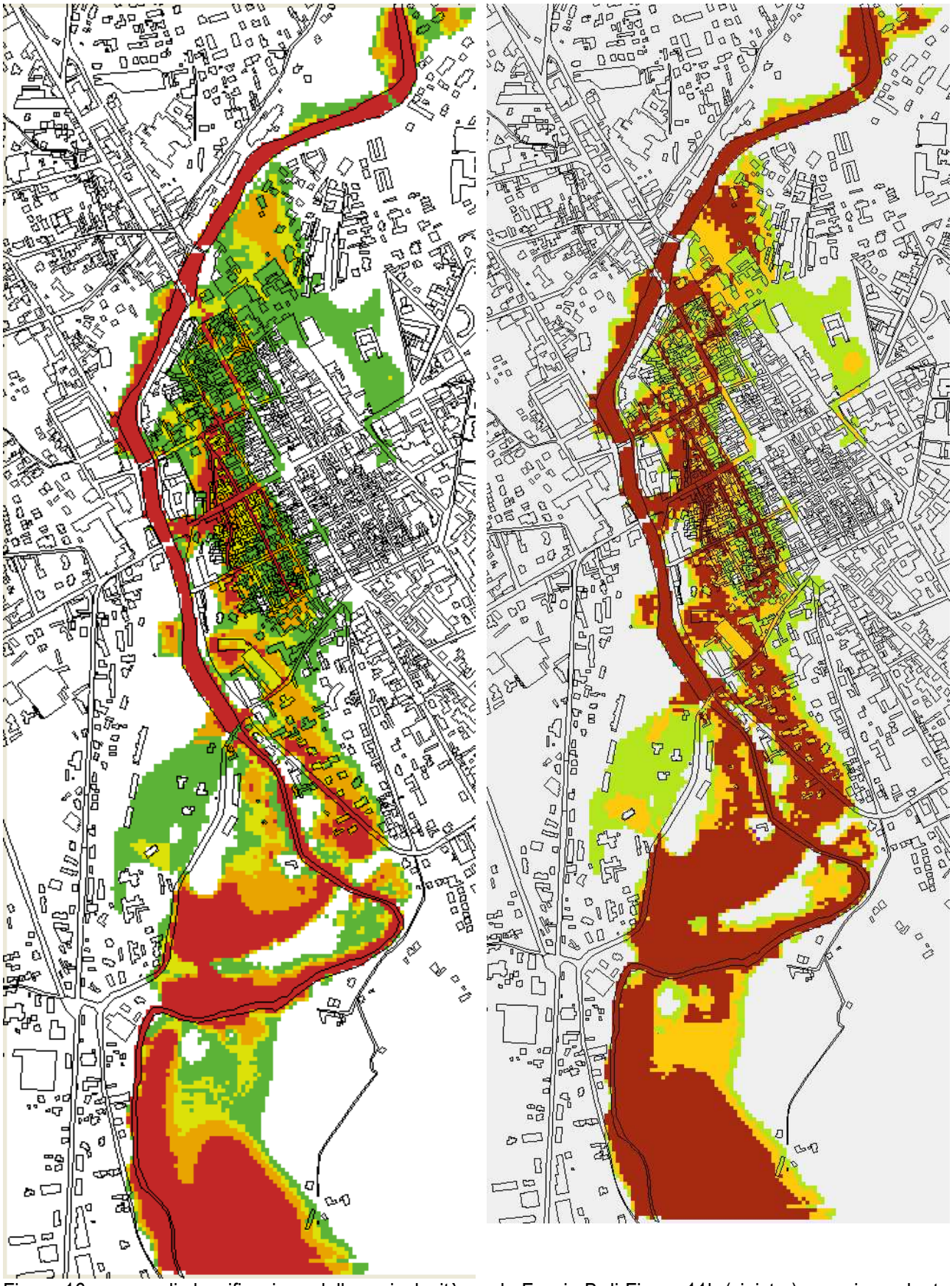
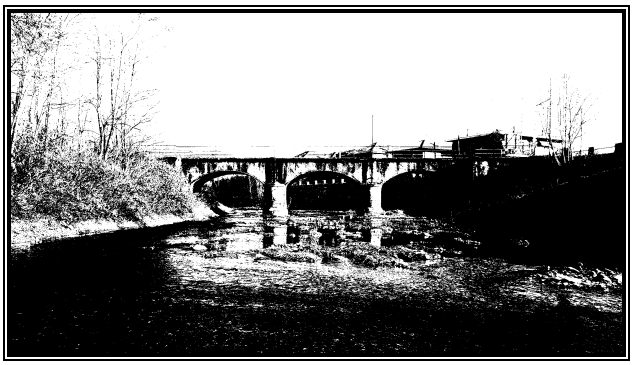


Figura 16: mappa di classificazione della pericolosità per la Fascia B di Figura 11b (sinistra) e corrispondente mappa ottenuta con la procedura cautelativa proposta dal Prof. Renzo Rosso (destra). La classe Em, corrispondente alla pericolosità moderata corrisponde alla campitura verde chiara, che si sovrappone ampiamente alla zona in campitura verde chiaro della mappa di sinistra.

Documentazione fotografica relativa all'Agogna in Comune di Borgomanero



1. ***Tratto compreso tra ponte località San Marco e il ponte della Ferrovia per Domodossola***

vista dal ponte verso monte

vista del ponte da valle in sinistra idrografica

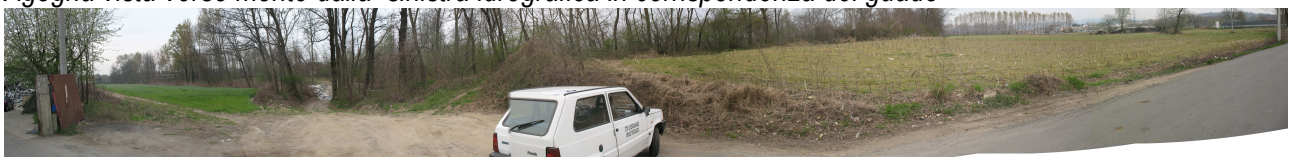
Soglia con vista a 180 ° lato (sinistra:valle)

guado visto dalla sinistra idrografica, verso valle

guado visto dalla sinistra idrografica, verso valle

guado visto da monte e dalla sinistra idrografica

Agogna vista verso monte dalla sinistra idrografica in corrispondenza del guado



Vista del guado dalla sinistra idrografica

Agogna vista verso valle in sinistra idrografica in corrispondenza dello scarico della pesca sportiva

Sponda sinistra dell'Agogna a monte del ponte della Ferrovia per Domodossola

immissione dell'Agogna vecchia nell'Agogna. Vista verso monte

1. ***Ponte della ferrovia per Domodossola a monte di Borgomanero***

vista verso valle da monte

vista dall'immissione dell'Agogna vecchia nell'Agogna

dal ponte verso monte

viste da valle

tratto a valle

2. ***Tratto a monte del ponte dell'Ospedale***

tratto a monte

tratto a valle

tratto a valle con ponte Ospedale

3. ***Zona a monte del ponte dell'Oratorio***

vista a valle verso ponte di corso Mazzini

4. ***Zona a valle del ponte di corso Mazzini***

vista verso Ponte del Torrione

vista verso monte in direzione del ponte di corso Mazzini

5. ***Zona del ponte del Torrione***

6. ***Zona della passerella c.na Tabuloni***

vista a monte

vista a valle

vista a valle

7. ***Zona del ponte della Ferrovia al guado di Cureggio***

vista dal ponte verso monte

vista dal ponte verso valle

vista del ponte da valle

vista da valle, dalla soglia sezione di controllo.

viste verso valle

8. ***Agogna vecchia nel tratto immediatamente a monte della confluenza nell'Agogna***

9. ***La zona a valle del ponte di Via Mazzini oggetto del quesito dell'Amministrazione Comunale***

9A

9B

9C

9D

9E

9F