



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Geoscienze

TESI DI LAUREA MAGISTRALE  
IN  
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**SULLA MITIGAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ  
IDRAULICA DEL TORRENTE ALPONE: ANALISI  
DEGLI EFFETTI DI UNA CASSA DI LAMINAZIONE  
IN LOCALITÀ  
BROGNOLIGO-COSTALUNGA**

ON THE HYDRAULIC HAZARD MITIGATION OF THE  
ALPONE RIVER: ANALYSIS OF THE EFFECTS OF A  
RETENTION BASIN AT BROGNOLIGO-COSTALUNGA

Padova, 14 marzo 2014

Relatore: Dr. Andrea D'Alpaos  
Dr. Luca Carniello  
Prof. Dario Zampieri  
Ing. Umberto Anti

Candidato: Filippo Salin

ANNO ACCADEMICO 2013/2014



## **Sommario**

Nella presente tesi si sono analizzati gli effetti di una cassa di laminazione costruita in località Brognoligo-Costalunga (provincia di Verona), sulla mitigazione della pericolosità idraulica del torrente Alpone. Nel dettaglio sono stati analizzati gli effetti dell'opera sulla laminazione di una piena causata da una pioggia della durata di 24 ore, attraverso l'utilizzo sia di un modello matematico agli elementi finiti a fondo fisso sia di un'interfaccia grafica, necessaria per poter visualizzare i risultati delle simulazioni.

Si sono inoltre analizzati i benefici che l'opera porta al territorio limitrofo al corso d'acqua, evitando il ripetersi di eventi catastrofici come quelli del novembre 2010.

## **Abstract**

In this thesis we analyzed the effects of a retention basin at Brognoligo-Costalunga (Verona's province), on the hydraulic hazard mitigation of the Alpone river. In particular, we analyzed the effect of the retention basin on the mitigation of a flood due to a 24-hour rain, by using a full-fledged finite element model of the complete shallow water equations, under the assumption of a fixed bed, and a software providing a graphical interface for the visualization of the results.

We also analyzed the benefits that the retention basin leads to the adjacent territory to the watercourse, avoiding the recurrence of catastrophic events like that occurred in November 2010.



# Indice

1. Introduzione.....	pag. 9
2. Inquadramento generale del torrente Alpone.....	pag. 11
2.1. Inquadramento geologico della Val d’Alpone.....	pag. 12
2.1.1. Geologia della Val d’Alpone.....	pag. 12
2.1.2. Successione litostratigrafica.....	pag. 17
2.1.3. Assetto strutturale.....	pag. 23
2.2. Inquadramento generale del corso del torrente Alpone.....	pag. 27
2.3. Il materasso alluvionale.....	pag. 30
2.4. Erosione, trasporto e sedimentazione.....	pag. 31
3. Rischio idraulico nel bacino del torrente Alpone.....	pag. 33
3.1. Profilo storico dei principali eventi di piena.....	pag. 37
3.1.1. La piena del novembre 2010.....	pag. 40
3.2. Mitigazione del rischio idraulico nel bacino del torrente Alpone.....	pag. 45
4. Modello di propagazione delle piene.....	pag. 47
4.1. Il modello bidimensionale.....	pag. 47
4.1.1. Equazioni bidimensionali del moto.....	pag. 47
4.2. Transizione asciutto-bagnato: la media di fase.....	pag. 48
4.3. Gli elementi monodimensionali.....	pag. 52
4.3.1. Elementi monodimensionali “canale”.....	pag. 52
4.3.2. Elementi monodimensionali “speciali”.....	pag. 54
4.3.2.1. Tronchi speciali soglia.....	pag. 55
4.3.3. Condizioni al contorno.....	pag. 57

5.	Opere di mitigazione della pericolosità idraulica.....	pag. 59
5.1.	Mitigazione delle piene per invaso.....	pag. 59
5.2.	Cassa di espansione.....	pag. 61
5.2.1.	Cassa provvista di sfioratore longitudinale.....	pag. 65
5.2.2.	Posizionamento della cassa.....	pag. 69
6.	Schematizzazione del dominio di calcolo.....	pag. 73
6.1.	Incidenze.....	pag. 74
6.1.1.	File principali.....	pag. 74
6.2.	Costruzione del modello.....	pag. 77
6.2.1.	Nodi.....	pag. 77
6.2.2.	Canali.....	pag. 78
6.2.3.	Cassa.....	pag. 81
6.2.3.1.	Perimetro.....	pag. 81
6.2.3.2.	Maglie.....	pag. 82
6.2.4.	Argini fluviali.....	pag. 83
6.3.	Controlli.....	pag. 84
6.4.	Il reticolo di calcolo.....	pag. 86
7.	Risultati delle simulazioni: Analisi dello stato di fatto.....	pag. 89
7.1.	Condizioni al contorno.....	pag. 89
7.2.	Propagazione della piena associata a una precipitazione di durata pari a 24 ore.....	pag. 90
8.	Risultati delle simulazioni: Analisi dei benefici attesi dalla cassa di espansione.....	pag. 105
8.1.	Dimensionamento della cassa.....	pag. 105
8.2.	Dimensionamento dello sfioratore.....	pag. 108
9.	Applicazione di un caso reale: la piena del 2010.....	pag. 117

10. Conclusioni.....pag. 119

Bibliografia.....pag. 121

Ringraziamenti

Allegato 1: Carta litologica

Allegato 2: Carta tematica della Regione Veneto



# 1. Introduzione

Le recenti e sempre più frequenti alluvioni che negli ultimi anni stanno flagellando la Regione Veneto, ed in particolare la zona nel veronese nei pressi di San Bonifacio dove vivo, rendono necessarie delle analisi atte a poter proteggere il più possibile la popolazione da questi eventi. Per molti anni le piene dei corsi d'acqua sono state sporadiche ed associate ad eccezionali eventi meteorici, quindi il problema della difesa del territorio dalle piene è stato, in alcuni casi, sottovalutato. Tuttavia, negli ultimi anni, sono stati sempre più numerosi gli eventi che hanno messo in crisi il sistema idraulico della zona: sembra infatti sia sufficiente una pioggia copiosa e continua perché immediatamente i corsi d'acqua superino i livelli di guardia e raggiungano, spesso superando, le quote arginali. Dal 2010 in avanti la parte orientale del veronese ha già vissuto due alluvioni e almeno altrettanti momenti critici legati principalmente al torrente Alpone e ai suoi due affluenti principali, il torrente Tramigna e il torrente Chiampo. Alla luce di questi eventi, nel 2012 la Regione Veneto si è attivata per ovviare al problema, prevedendo un bacino di laminazione in località Colombaretta (nel comune di Monteforte d'Alpone) con lo scopo di rendere sostenibili le portate di piena con tempo di ritorno di 70 anni ma che però non potrà essere attivo prima dalla fine del 2015. Nel frattempo sono stati messi in atto tutta una serie di accorgimenti secondari volti a ridurre la pericolosità dell'Alpone. Proprio questo spirito atto ad abbassare la pericolosità, e di conseguenza il rischio idraulico, del torrente mi ha spinto ad analizzare gli effetti di una seconda cassa di espansione, che in futuro potrebbe anche lavorare accoppiata alla prima, nei pressi dell'abitato di Brognoligo-Costalunga, frazione di Monteforte d'Alpone circa 7 km più a nord del comune di San Bonifacio (VR). La cassa, in destra idrografica del torrente Alpone, andrebbe ad accogliere l'acqua eccedente un livello di sicurezza stabilito lungo il corso dell'Alpone stesso, così da evitare tracimazioni o rotte arginali più a valle, che andrebbero ad interessare i centri abitati creando danni ingenti. In questo modo sarebbe possibile aumentare il livello di sicurezza, riducendo la

probabilità di accadimento delle drammatiche situazioni che sono ancora fresche nella memoria degli abitanti della zona di Monteforte d'Alpone.

In questa tesi si presenta il progetto dell'opera che inizialmente ha richiesto un approfondito studio del corso dell'Alpone e delle aree limitrofe all'alveo, del bacino idrografico e delle portate dovute a precipitazioni piovose con diverse durate orarie. Si presentano quindi le analisi atte a dimensionare opportunamente l'opera, valutandone gli effetti benefici sul territorio.

## 2. Inquadramento generale del torrente Alpone

L'area d'interesse della presente tesi si estende nel settore centro-meridionale della valle del torrente Alpone. Dal punto di vista geografico essa costituisce la più orientale di una serie di valli sub-parallele presenti in provincia di Verona e marca l'estrema propaggine dei Monti Lessini. La valle si sviluppa con andamento da nord a sud ed è percorsa dall'omonimo torrente, presenta una forma allungata e stretta nella parte più settentrionale, larga e aperta nella seconda parte, fino all'ingresso nella pianura veneta. Confina ad est con la Valle del Chiampo, che si trova in territorio vicentino, a ovest con la Val Tramigna e con la Val d'Illasi e a sud con appunto con la pianura veronese, limite che per praticità si può far corrispondere al percorso della Strada Regionale 11.

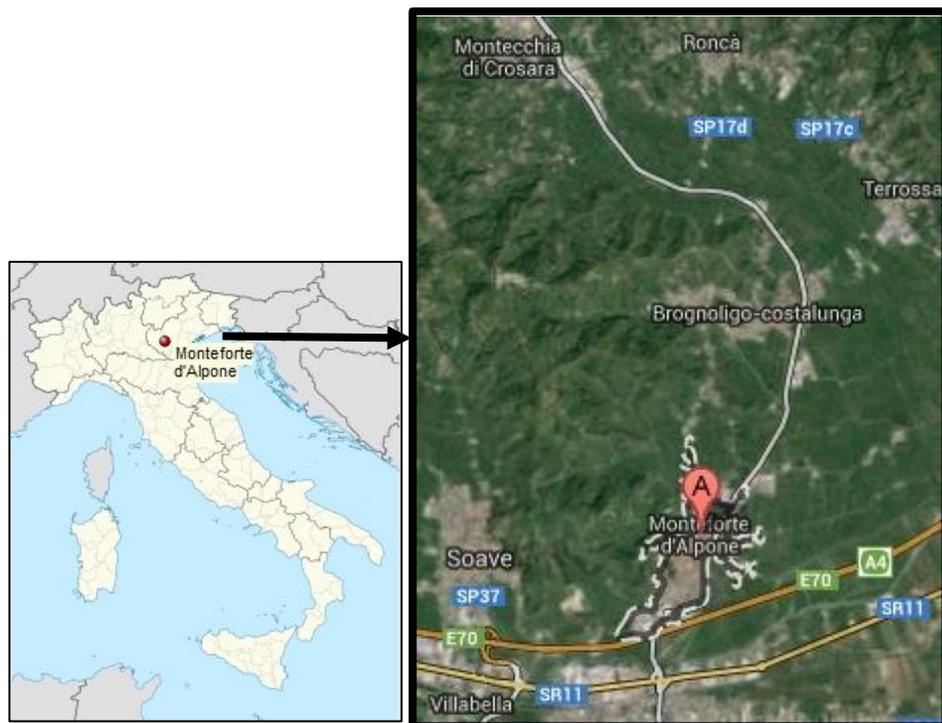


Figura 1. Localizzazione di Monteforte d'Alpone (immagine da Google Maps).

Gli studi intrapresi nell'ambito di questa tesi si sono concentrati nelle vicinanze dell'abitato di Brognoligo-Costalunga, che si trova circa 7 km a nord del comune

di San Bonifacio. Nel dettaglio, la zona di interesse è compresa tra Costalunga e il comune di Monteforte d'Alpone e come punto focale ha il torrente Alpone, oggetto appunto della mia tesi. L'Alpone è un torrente che nasce nelle Prealpi venete, esattamente nella zona di Bolca, che si trova nel comune di Vestenanova. Il torrente nasce sulle pendici del monte Purga di Bolca a 550 m sul livello del mare. Ha una lunghezza di 38 km con un bacino idrografico di 283 km<sup>2</sup> (Regione Veneto, 2013) e sbocca nell'Adige nei pressi di Albaredo d'Adige. Negli ultimi anni è *salito alla ribalta della cronaca* per la sua esondazione del novembre 2010, che ha allagato Monteforte d'Alpone e Soave, e per quella meno importante della primavera 2013. Questo lavoro di tesi fa parte di un progetto volto a contribuire alla protezione delle zone alluvionate da futuri episodi simili. Infatti, su proposta dell'Autorità di Bacino del fiume Adige e della Regione Veneto, nel 2012, è iniziata una campagna di studi per la fattibilità di una serie di bacini di espansione volti proprio a questo scopo.

## ***2.1. Inquadramento geologico della Val d'Alpone***

### ***2.1.1. Geologia della Val d'Alpone***

L'area di cui mi sono occupato si trova nella parte più orientale dei Monti Lessini che, a loro volta, fanno parte dell'unità tettonica delle Alpi Meridionali. Quest'unità si costituisce di nuclei ercinici, che in molti casi hanno subito metamorfismo, e da sedimenti permo-mesozoici e terziari che non si presentano metamorfosati, bensì piegati e fagliati per effetto delle deformazioni tettoniche verificatesi dall'Eocene al Plio-Quaternario. Le Alpi sono definite come una catena post-collisionale a vergenza africana e si estendono, con andamento W-E, per circa 700 km, dal Canavese al Bacino Pannonico (Castellarin & Vai, 1982). Un sistema neogenico di fratture sub-verticali ad andamento principalmente trascorrente rappresenta l'elemento tettonico, a vergenza europea, che le separa dall'Australpino. Questa struttura è conosciuta come Lineamento Periadriatico, o Linea Insubrica, ed è composta, procedendo da occidente verso oriente, dalla Linea del Canavese (ad andamento SW-NE), dalla Linea del Tonale, con

andamento W-E), dalla Linea delle Giudicarie (ad andamento SSW-NNE) e dalla Linea Pusteria-Gailtal-Caravanche (ad andamento WNW-ESE). Nell'area posta a meridione della Linea Insubrica si possono individuare diverse zone strutturali che presentano un andamento approssimativamente meridiano e quindi pressoché normale al Lineamento stesso (Castellarin & Vai, 1982).

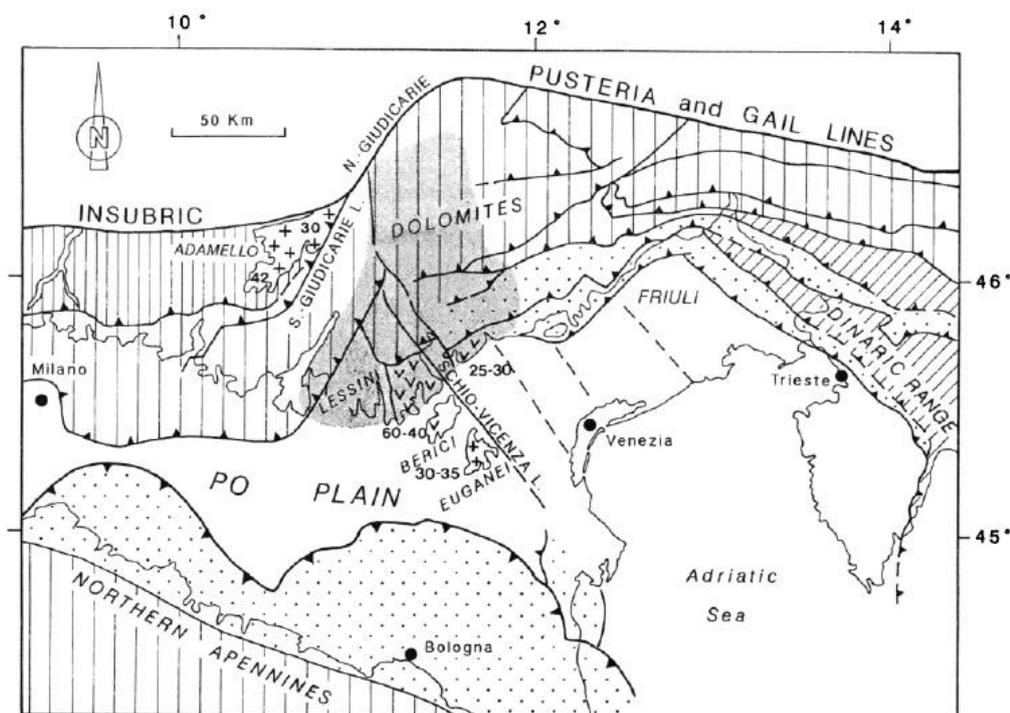


Figura 2. Mappa strutturale del settore centro-orientale delle Alpi Meridionali (Zampieri, 1995). L'area grigia rappresenta l'estensione della Piattaforma di Trento affiorante, con i Monti Lessini.

Le principali zone strutturali sono di seguito elencate: Zona Canavese-Ivrea-Verbano, Zona Lombarda, Zona Giudicariense, Zona Dolomitico-Lessinea e Zona Carnico Friulana. Da un punto di vista paleogeografico e paleostrutturale la Piattaforma di Trento e il Bacino Lombardo sono divisi dalla Linea delle Giudicarie sud, la prosecuzione all'interno del Sudalpino dell'omonimo tratto del lineamento insubrico.

Nel Permiano e nel Triassico la regione Mediterranea faceva parte di un unico blocco continentale che comprendeva l'Africa, l'Europa e l'America Meridionale

ed era limitato verso oriente dall'Oceano della Paleotetide (Laubsher & Bernoulli, 1977; Channel et al., 1979). All'interno di questo continente vi si potevano trovare bacini marini anche di notevole estensione. Nel Permiano inferiore su questa paleogeografia si imposta una fase di *rifting*, accompagnata da estese manifestazioni vulcaniche a chimismo acido che hanno dato luogo alla Piattaforma porfirica atesina (Bosellini, 1965). Una successiva fase di *rifting* avvenuta durante il Giurassico, collegabile all'apertura dell'oceano Ligure-Piemontese, determina l'annegamento delle diverse aree e la loro suddivisione, procedendo da ovest verso est, in: Alto del Canavese, Alto dell'Arbostora, Bacino Lombardo, Piattaforma di Trento, Bacino Bellunese, Piattaforma Friulana. Gli attuali Monti Lessini corrispondono proprio alla parte sud-occidentale della Piattaforma di Trento.

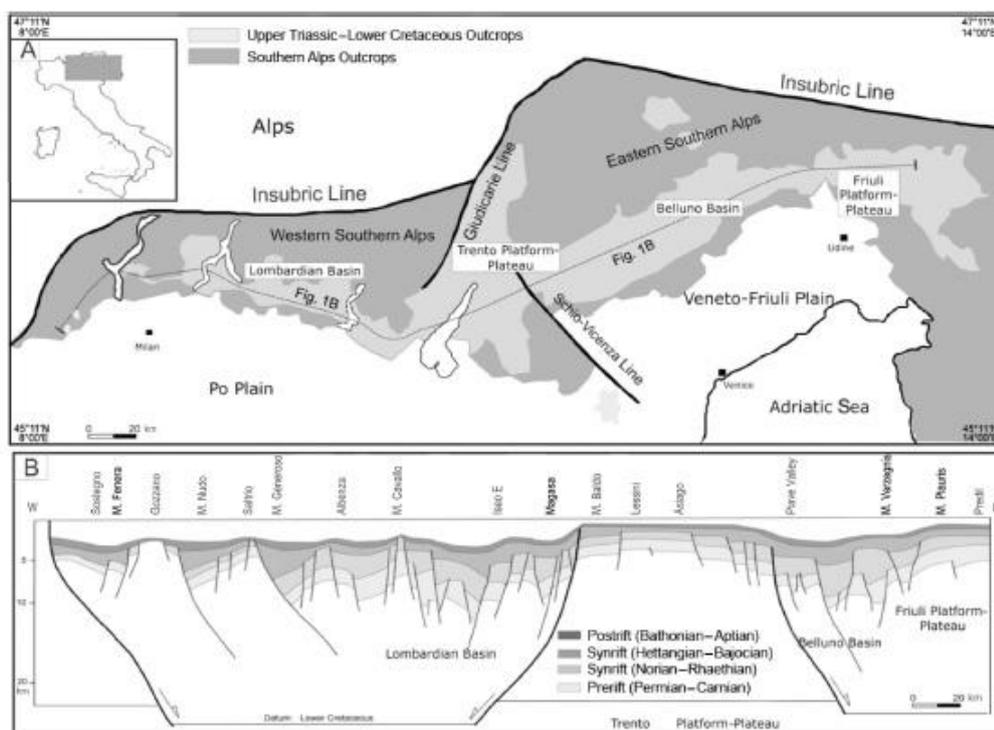


Figura 3. Mappa tettonica dei Monti Lessini tra Verona e Vicenza (Masetti et al. 2012).

Nel tardo Giurassico la Piattaforma di Trento sprofonda divenendo un plateau pelagico, che nel Cretaceo inferiore raggiunge la massima profondità marina, prima dell'inversione tettonica che porta alla chiusura della Neotetide. Nel tardo Cretaceo-Paleogene una deformazione compressiva (con orientazione dell'asse di raccorciamento N0-30°) interessa solo la parte centrale e occidentale delle Alpi Meridionali, producendo compressione pura nel settore occidentale (Alpi bergamasche) e transpressione nel settore centrale, che corrisponde alla Linea delle Giudicarie. Nel medio Eocene (Lutetiano) una compressione (con asse orientato N50-90°E) crea pieghe e sovrascorrimenti con direzione NW-SE (fase Dinarica). Il Flysch friulano è strettamente collegato con questa fase, a cui risulta essere contemporaneo. Nel tardo Miocene un'ulteriore fase compressiva (Valsuganese) coinvolge anche il basamento. La parte centro orientale viene interessata nel Plio-Quaternario da una nuova fase (con orientazione N0-30°W). L'unità tipica è rappresentata dal Gruppo dei Calcari Grigi, avente spessore di parecchie centinaia di metri, risultante dalla deposizione all'inizio del Giurassico di sedimenti di acqua bassa in un ambiente di piattaforma carbonatica di tipo bahamiano.

La piattaforma era delimitata verso ovest da una serie di faglie normali immergenti ad ovest e propagatesi con meccanismo retrogradazionale verso la parte interna, cioè verso est (Castellarin, 1972). Nella storia evolutiva della Piattaforma si possono riconoscere almeno un paio di episodi di annegamento abortito, a cui fanno seguito fasi di ricostruzione, coronati dall'annegamento definitivo, iniziato nel Bajociano (Giurassico medio) che corrisponde alla deposizione del Rosso Ammonitico. In questa fase la piattaforma diventa un plateau pelagico sul quale nel Cretacico inferiore si ha la sedimentazione della Maiolica che rappresenta la fase di massimo approfondimento del bacino e la conclusione della fase di margine passivo e che va a ricucire le strutture tettoniche che separavano la Piattaforma di Trento dal Bacino Lombardo. Il successivo deposito emipelagico della Scaglia Rossa (Cretacico superiore), un calcare marnoso di colore rosato o rosso, rappresenta l'inizio dell'inversione dei

movimenti tra le placche e l'ingresso nel bacino di sedimenti terrigeni provenienti da nord.

Come appena accennato, nel margine meridionale dei Lessini affiorano sia rocce sedimentarie che rocce vulcaniche. Le prime, tutte pelagiche, sono il Rosso Ammonitico (Dogger-Malm), calcare rosso compatto caratterizzato da resti di Ammoniti, la Maiolica (Biancone) (Cretaceo inferiore), calcare compatto di colore bianco a grana finissima, frattura concoide, contenente lenti e noduli di selce, la Scaglia Rossa (Cretaceo superiore), costituita da calcari micritici rosati e rossi, selciferi con frattura concoide e con alternanza di marne e di calcari marnosi, presenta inoltre stratificazione molto fitta. Il tetto dell'unità è marcato da un caratteristico *hard-ground* riconoscibile in tutta l'area (Premoli Silva & Luterbacher, 1966), associato ad un'estesa lacuna stratigrafica che copre parte del Maastrichtiano e praticamente per intero il Paleocene (Massari & Medizza, 1973). L'*hard-ground* è ricoperto dai prodotti di un'attività vulcanica, che viene associata a tettonica distensiva. Infatti, durante il Paleogene si ha un vulcanesimo eruttivo di tipo basico e ultrabasico, che si prolunga con fasi alterne fino all'Oligocene. Questo magmatismo è associato ad una situazione geodinamica di rift intracontinentale con assottigliamento della crosta, aumento del gradiente termico e risalita di materiale proveniente dal mantello superiore (De Vecchi et al., 1976). I materiali vulcanici si raccolsero all'interno di un graben limitato a ovest dalla faglia di Castelvero (Barbieri et al., 1991). Proprio in prossimità di questa linea, che presenta orientazione NNW-SSE, lungo la Val d'Alpone si riscontra il massimo valore di subsidenza, grazie al quale fu possibile la deposizione di materiale vulcanico con spessori fino a 500 m (Zampieri, 1995). L'attività eruttiva si caratterizza per essere discontinua con fasi di breve durata.

I prodotti risultanti da questo fenomeno sono principalmente lave, ialoclastiti e materiale piroclastico formati principalmente in ambiente subacqueo, con intercalati corpi discontinui di calcari di età Eocenica media ("Marmi di Chiampo") (Barbieri et al., 1991). Nell'ultima fase di attività nell'Eocene medio la maggior parte delle colate avvenne in ambiente subaereo. Questo si può spiegare con la mancanza di bilanciamento tra la grande quantità di materiale

basaltico e la subsidenza del graben che comporta l'emersione della dorsale e lo sconfinamento oltre la linea di Castelvevo dei prodotti subaerei (Barbieri et al., 1991). L'emersione spiega il motivo per cui nell'area non sono presenti depositi più vecchi dell'Eocene medio, a differenza di quanto avviene nella parte più orientale dei Lessini. L'ultima fase eruttiva è anche la fase più importante rispetto ai fenomeni di vulcanesimo che hanno interessato l'area, caratterizzata da potenti colate prima subacquee, poi subaeree, con spessori complessivi fino a 400 m e i cui punti di eruzione sono individuabili sul Monte Calvarina, nel territorio dei comuni di Roncà, San Giovanni Ilarione e Montecchia di Crosara (VR), e sul Monte Faldo, nel comune di Trissino (VI). Nell'Eocene medio, l'attività vulcanica si va esaurendo e si riscontra una fase trasgressiva in cui si sedimentano le Marne di Priabona, con potenze dell'ordine di 90 m, poi di calcareniti bioclastiche, con potenze di 200-250 m, databili Oligocene (Calcareniti di Castelgomberto). Depositi sedimentari Miocenici si trovano solo ad est della valle del Chiampo.

### ***2.1.2. Successione litostratigrafica***

La successione litostratigrafica affiorante dell'area occidentale dei Lessini comprende sia rocce sedimentarie che vulcaniche collocabili in una finestra temporale che va dal Cretaceo superiore all'Eocene. Per completezza viene indicata nella sua totalità, anche se nello specifico della zona studiata al di sotto della coltre di detrito eluviale di versante, affiorano solamente epiclastiti e vulcanoclastiti di ambiente subacqueo e colate basiche subaeree.

#### ***Scaglia Rossa*** (Cretaceo superiore)

Calcarei micritici a grana fine con colorazione oscillante dal rosato al rosso mattone. Presenta frequenti noduli e lenti di selce. Caratterizzata da frattura concoide e da alternanza di marne e di calcari marnosi, mostra inoltre stratificazione molto fitta.

### *Epiclastiti e Vulcanoclastiti (Paleogene)*

Depositi di materiale vulcanico, spesso risedimentato e stratificato (epiclastiti), che presentano una granulometria molto eterogenea. Si mostrano in forma di lenti di dimensioni ridotte sia per quanto riguarda lo spessore che l'estensione e sono formati da clasti alterati, irregolari e spigolosi, talvolta rotondeggianti, molto vari per quanto riguarda le dimensioni, immersi in una matrice fine. Gli affioramenti presentano spesso un forte grado d'alterazione che attribuisce loro un colore sulle tonalità del rosso scuro e del bruno. Hanno scarsa stratificazione e anche la cementazione risulta essere abbastanza limitata. Inoltre sono molto friabili e fratturati e mostrano una patina d'alterazione che conferisce una colorazione scura sul rosso-verde. L'alterazione è ben visibile anche sui fenocristalli ed è più marcata sui bordi rispetto all'interno, in certi casi è così spinta da creare delle cavità riempite da materiale terroso. L'individuazione di piccoli strati di pillow lava, annegati in matrice siltosa di colore giallastro e recanti la peculiare fessurazione radiale, e la presenza di alcune ialoclastiti ci danno chiare indicazioni sull'origine in ambiente subacqueo di tali depositi. A questi depositi possono essere intercalati livelli di breccie d'esplosione (vulcanoclastiti) con geometria lenticolare e tessitura caotica.



Figura 4. Affioramento di epiclastiti.

#### ***Calcari Nummulitici*** (Eocene medio)

Calcari relativamente compatti, ben stratificati ed eteropicamente intercalati ai prodotti vulcanici, costituiti da calcarenite bioclastica di colore biancastro-giallastro. Sono molto ricchi di fossili e appunto devono il loro nome ai Nummuliti, fossili a forma di moneta (dal latino: nummus che significa moneta). Presentano un'abbondante presenza di altri macro e microfossili quali ad esempio Ostree, Coralli, Molluschi, Bivalvi e Gasteropodi.

#### ***Basalti delle colate*** (Paleogene)

Depositi di materiale vulcanico iposilicico con tessitura afirica e scarsi fenocristalli. Risultano essere frequentemente alterati e corposamente argillificati. Si presentano come colate basaltiche di ambiente subaereo, molto compatte e con evidenza di cavità vacuolari da degassazione. Mostrano fessurazione colonnare e talvolta esfoliazione cipollare, spesso presentano superfici d'alterazione dal tipico aspetto terroso e dal colore variabile tra il rosso ed il bruno. All'interno di ogni colata affiorante sono riconoscibili tre diversi livelli: inferiore, medio e superiore.

Il primo è composto da breccie variamente alterate, il secondo risulta essere molto compatto e occupa il volume maggiore nella colata, l'ultimo invece è caratterizzato dalla massiccia presenza cavità vucolari legate alla degassazione.



Figura 5. Breccia appartenente al livello inferiore delle colate.



Figura 6. Affioramento del livello medio di una colata.



Figura 7. Panoramica di un affioramento del livello superiore delle colate.

### ***Basalti dei camini*** (Paleogene)

Caratteristiche strutture composte da materiale basaltico, molto compatto e resistente all'erosione, presentano peculiare fessurazione colonnare e mancanza di fenomeni di degassazione. Hanno una forma circolare o ellittica di dimensioni ridotte. La maggior resistenza all'erosione li rende facilmente individuabili all'interno del contesto di vulcanoclastiti in cui si impostano. Per quel che concerne la loro genesi bisogna rifarsi alla fase tettonica distensiva dell'area nel corso del Paleogene, in cui le faglie e le fratture diventano vie preferenziali di risalita magmatica, con successiva alimentazione di colate.

### ***Basalti dei filoni*** (Paleogene)

Caratteristiche strutture composte da materiale basaltico, solitamente compatto e senza bolle da degassazione. Nella maggior parte dei casi mostrano un aspetto terroso con colorazione sulle tonalità del marrone-bruno, dovuto a fenomeni di alterazione. Si possono ritrovare all'interno delle formazioni dei calcari Eocenici e delle vulcaniti e sono caratterizzati dallo scarso spessore e da una marcata

ramificazione. Dal momento che si parla di filoni, quindi di materiali intrusi in una roccia preesistente, è anche evidente il loro essere discordanti. Sporadici i filoni lungo le superfici di strato (*sills*). Avendo una resistenza diversa dal materiale vulcanico incassante, generalmente più tenero, si individuano perché possono creare delle sporgenze nel versante.

### **Depositi quaternari:**

#### ***Detrito eluviale di versante***

Depositi di materiale derivante dall'alterazione delle litologie presenti nell'area. Si trova praticamente nel luogo d'origine, senza aver subito trasporto, e la sua composizione varia a seconda delle rocce da cui deriva. Lo spessore non è costante e frequentemente risulta difficile distinguerlo per fenomeni antropici. Si presenta prevalentemente allo stato sciolto o debolmente cementato, con granulometria che oscilla dalle argille fino alle brecce.

#### ***Depositi colluviali***

Depositi formati alla base dei rilievi montuosi, con composizione derivate dalle rocce che costituiscono i rilievi sovrastanti. I sedimenti che li compongono sono principalmente limosi e argillosi, con frammenti litoidi di diversa dimensione. La deposizione direttamente alla base del punto d'origine presuppone la quasi totale assenza di fenomeni di trasporto, fatta esclusione per il ruscellamento dalle pareti stesse. L'accumulo di questo materiale avviene all'interno di depressioni naturali che si vanno intercalando, verso valle, con il deposito eluviale e con il cuscino alluvionale.

#### ***Depositi alluvionali di fondovalle***

Depositi formati per erosione, trasporto in acqua e deposizione in ambiente continentale, sono spesso stratificati con livelli di sabbie e ghiaie medio-fini intervallati a livelli limosi e argillosi. Si possono trovare prevalentemente lungo i corsi d'acqua e la loro composizione ne rispecchia l'origine, infatti si può notare

una sostanziale differenza tra la parte orientale a carattere vulcanico e quella occidentale e meridionale a carattere più sedimentario.

### ***2.1.3. Assetto strutturale***

I principali lineamenti strutturali dell'area lessinea sono rappresentati da un complicato sistema di faglie e fratture la cui disposizione può essere assimilata alla forma di un ventaglio che si apre a partire da un'area a nord di quella in questione. L'andamento risente comunque delle orientazioni prevalenti dei sistemi strutturali collocati ad oriente e ad occidente dei Lessini: rispettivamente della Linea Schio-Vicenza e dal sistema Giudicariense. Nello specifico questo sistema segna il confine tra il Bacino Lombardo e la Piattaforma di Trento e mostra un andamento NNE-SSW. All'interno di esso si possono vedere segni perlomeno di due distinti periodi d'attività: uno distensivo, databile Giurassico e inizio Cretaceo, e un secondo transpressivo, databile Miocene. Per quanto riguarda la Linea Schio-Vicenza essa mostra un andamento NW-SE (Semenza, 1974) e rappresenta la separazione tra la pianura veneto-friulana e l'area montuosa dei Lessini. Nei Monti Lessini il carattere strutturale più importante è rappresentato dalla Linea di Castelvero.

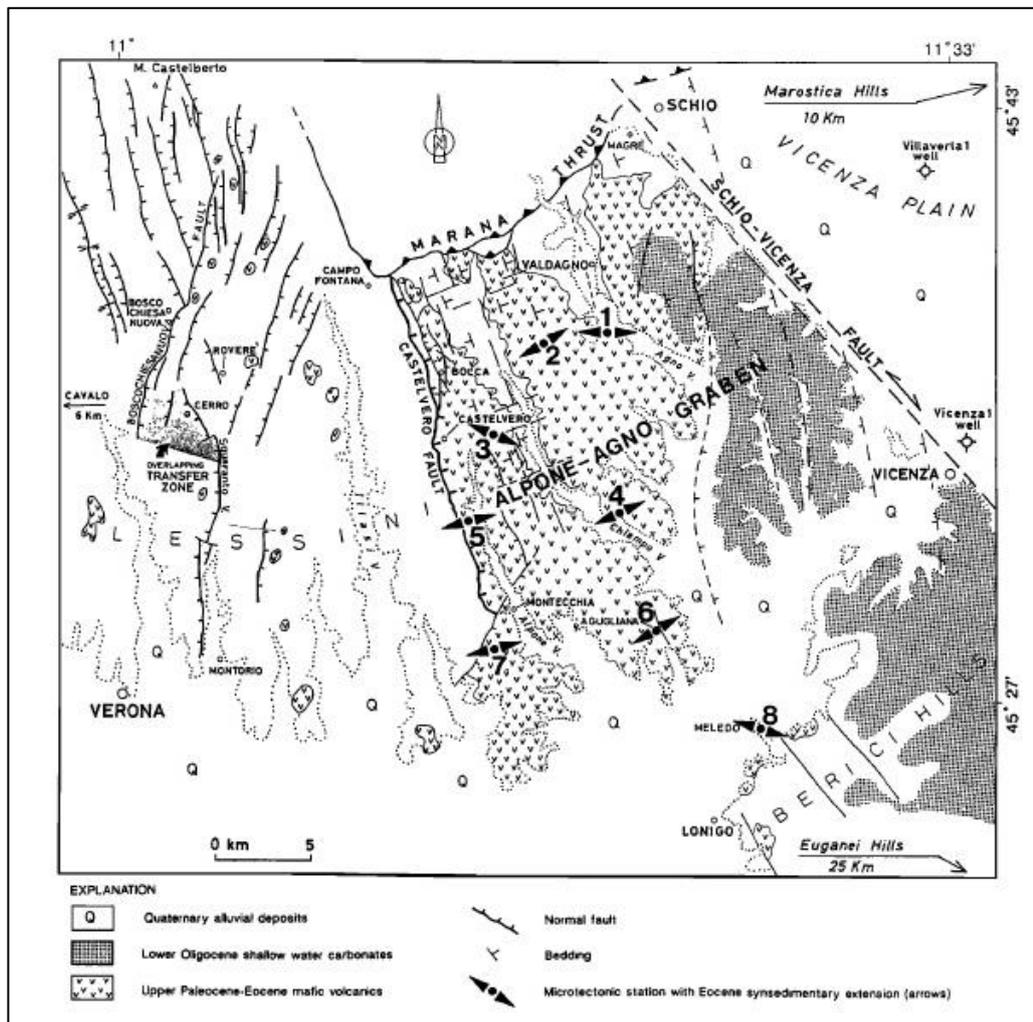


Figura 8. Assetto strutturale dei Lessini orientali (Zampieri, 1995).

La Linea separa i Lessini centrali, a carattere sedimentario, da quelli orientali, a carattere magmatico e corrisponde ad una faglia normale prodotta dall'estensione crostale in campo di stress rappresentato da  $\sigma_1$  (direzione di massimo stress) in posizione verticale e  $\sigma_3$  (direzione di minimo stress) orizzontale, con direzione ENE-WSW (Zampieri, 1995). L'estensione è collegata ai fenomeni di vulcanesimo avvenuti nel Paleogene che, a loro volta, sono alla base della formazione della struttura a semigraben, nota appunto con il nome di semigraben Alpone-Agno, che nella parte meridionale presenta valori massimi di subsidenza pari a 500 m (Zampieri, 1995). Dal punto di vista strutturale il semigraben è stato

interpretato secondo due modelli. Il primo vede la Faglia di Castelvero come la parte sommitale, ad alto angolo, di una struttura listrica più grande che presenta immersione ENE (Figura 9a).

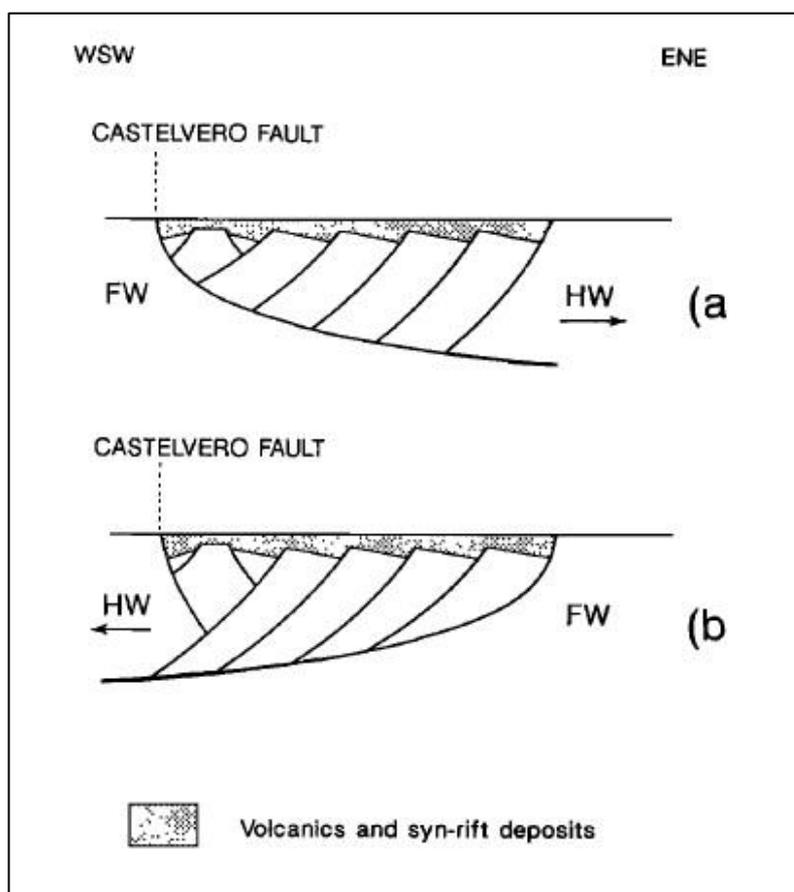


Figura 9. Modelli dell'Alpone-Agno Graben basato su una geometria listrica di faglie normali.  
a) immersione ENE, b) immersione WSW (Zampieri, 1995).

In questo contesto ci sarebbe stata una separazione in blocchi per rotazione, con tipica geometria a domino. Il secondo appare più credibile sotto un'ottica geometrica e presenterebbe la faglia di Castelvero come antitetica ad una faglia listrica principale con immersione WSW che però non affiora (Figura 9b). Questo modello implica l'esistenza di un sistema estensionale di semigraben limitato da faglie listriche normali con immersione verso WSW, che avrebbe portato ad una rotazione dei singoli blocchi verso ENE. In seguito i blocchi avrebbero subito

subsidenza differenziata che avrebbe portato a zone più o meno depresse, successivamente riempite da materiale vulcanico. Studi microstrutturali sui piani di faglia e sull'orientazione dei dicchi hanno dato conferme a quest'ultimo modello. Gli studi effettuati su stazioni microtettoniche situate nelle vulcaniti e nei calcari Eocenici, hanno portato all'evidenza che quasi tutti i piani di faglia mostrano perlomeno due fasi sovrainposte di movimento. Una prima di tipo estensionale che ha portato ad una distensione con direzione da ENE-WSW a E-W, una seconda di tipo trascorrente che ha riattivato le faglie normali con movimento orizzontale in un campo di stress con asse di compressione orizzontale da N-S a WNW-ESE. In conclusione la cinematica del semigraben Alpone-Agno mostra quindi inizialmente una fase estensionale eocenica, seguita da una o più probabilmente due, fasi di compressione (Zampieri, 1995).

Gli effetti della compressione neogenica si sono sviluppati nell'area in maniera differente nel tempo e nella direzione di trasporto tettonico: il sistema Dinarico si è sviluppato nel Paleogene, il sistema Sudalpino si è sviluppato durante l'Oligo-Miocene (Pliocene nel settore est) e il sistema Appenninico nel Pliocene-Quaternario. Durante la fase Dinarica l'area lessinea apparteneva all'avampaese della catena orientata NW-SE. Tra la catena e l'area lessinea si sviluppò un'avanfossa riempita dal flysch. Pertanto è verosimile che i Lessini corrispondessero ad un rialzo periferico orientato NW-SE e soggetto ad inarcamento con estensione (Doglioni e Bosellini, 1987).

Una segmentazione dell'avampaese accompagnò la coeva deformazione della pianura padana verso la catena del Sudalpino: la deposizione di 6000 m di spessore di avanfossa accompagnò infatti l'impilamento dei sovrascorrimenti del settore Sudalpino occidentale, mentre un spazio di accomodamento molto inferiore è stato fornito successivamente (Serravaliano-Messiniano) dall'attivazione della parte orientale. La disattivazione della parte ovest del Sudalpino e la forte flessione regionale verso gli Appennini (che ha prodotto fino a 7-8 mila m di sedimenti nei depocentri di avanfossa) segna l'evoluzione tardo Messiniano-Quaternario dell'avampaese della placca Adriatica. Durante tutto questo intervallo di tempo la flessione dell'Adriatico centrale ha continuato ad

agire sia verso il sistema Dinarico che verso quello Appenninico. Questo ha condotto come risultato il rigonfiamento della placca Adriatica, che si è sviluppato nel settore meridionale tra i segmenti attivi con segno opposto, Albanese e Sudappenninico; al contrario, ulteriori piegamenti nel settore orientale del Sudalpino, che era ancora attivo, sono stati inibiti dal conflitto con la catena Nord-Appenninica. In generale ciò si manifesta con un'evoluzione tettonica frammentata post-Eocenica dell'avampese Adriatico, controllata sia dall'attività diacrona dei segmenti della catena, che dalla loro influenza coeva reciproca. L'effetto dell'interferenza tra segmenti della catena di segno opposto è stato un sistema multiplo di avanfesse ad evoluzione differenziata non controllato esclusivamente dalla catena alle loro spalle (Fantoni et al., 2004).

In conclusione, l'effetto finale delle vicende descritte è l'attuale assetto dei Monti Lessini, che rappresentano un blocco crostale di avampese delle tre catene che hanno controllato la storia geologica dell'alto Adriatico. Infatti, i Lessini si presentano come un tavolato inclinato verso la catena Nord-Appenninica (deformazione appenninica), incastrato tra il Sudalpino centro-occidentale e il Sudalpino orientale (deformazione Alpina), interessato da un sistema di profonde fratture (deformazione dinarica), che hanno controllato lo sviluppo delle valli con disposizione a ventaglio aperto verso sud

## ***2.2. Caratteri idrografici del bacino del torrente Alpone***

Il torrente Alpone rientra nel bacino idrografico dei Lessini, la permeabilità delle cui rocce è stata oggetto di studi condotti già agli inizi del secolo scorso (Fabiani, 1913, 1921) sotto gli auspici dell'Ufficio Idrografico del Regio Magistero alle Acque. Il bacino dei Lessini è composto da una sequenza di corsi d'acqua con andamento divergente verso sud, che vanno ad incidere una serie di valli strette e lunghe definiti da Sauro (1973) canyon fluvio carsici. In questo modo il complesso montuoso risulta scolpito in una sequenza di falangi che si incuneano nella pianura veronese orientale. L'Alpone è un tributario di sinistra del fiume Adige, nel quale affluisce nei pressi del comune di Albaredo d'Adige. Date le caratteristiche geologiche del bacino, la valle dell'Alpone si differenzia

notevolmente dai canyon fluviocarsici dei Lessini centrali ed occidentali. Per quanto concerne la valle principale del torrente, essa presenta una forma stretta ed allungata, i torrenti secondari invece tendono ad essere corti, con bacino ristretto e tendono a confluire con angolo acuto rispetto all'asse del corso principale. Tra questi vanno segnalati il Rio delle Carbonare e la Roggia Vienega che si trovano nelle vicinanze della zona di cui mi sono occupato in dettaglio. Il torrente presenta un bacino idrografico iniziale abbastanza ampio ma poco profondo, percorso da una serie di corsi d'acqua che compongono un sistema a forma di ventaglio che poi dà origine ad un unico corso. Il limite occidentale del bacino è impostato sui calcari della Scaglia Rossa, mentre tutto il restante bacino insiste sulle unità basaltiche e vulcanoclastitiche che a sud del Monte Purga di Bolca sono predominanti. Risulta quindi evidente il netto predominio, di un substrato di rocce impermeabili o semipermeabili, basaltiche e vulcanoclastitiche, rispetto a quelle permeabili, cioè le rocce calcaree. Nella parte alta del suo tracciato l'Alpone incide rocce basaltiche con numerose cascate, corrispondenti a nuclei compatti di colate o a filoni, mentre scendendo tende ad occupare maggiormente la valle che si apre e che assumere il classico fondo pianeggiante, formato da depositi alluvionali. L'Alpone continua a scorrere verso gli abitati di Montecchia di Crosara e Roncà, ubicati circa 10 km più a nord di Brognoligo-Costalunga, unendosi con numerosi torrenti che scendono dalle brevi valli laterali. Procedendo verso sud anche la valle tende sempre più ad allargarsi e il letto del corso d'acqua tende a diventare pensile. Avvicinandosi al comune di San Bonifacio l'Alpone riceve le acque del torrente Chiampo, che proviene dal vicentino, e più in basso anche del torrente Tramigna, proveniente a sua volta dall'abitato di Soave. Come vedremo in seguito proprio questa confluenza, unitamente al "Ponte della Motta" poco più a valle, crea non pochi problemi da un punto di vista idraulico.

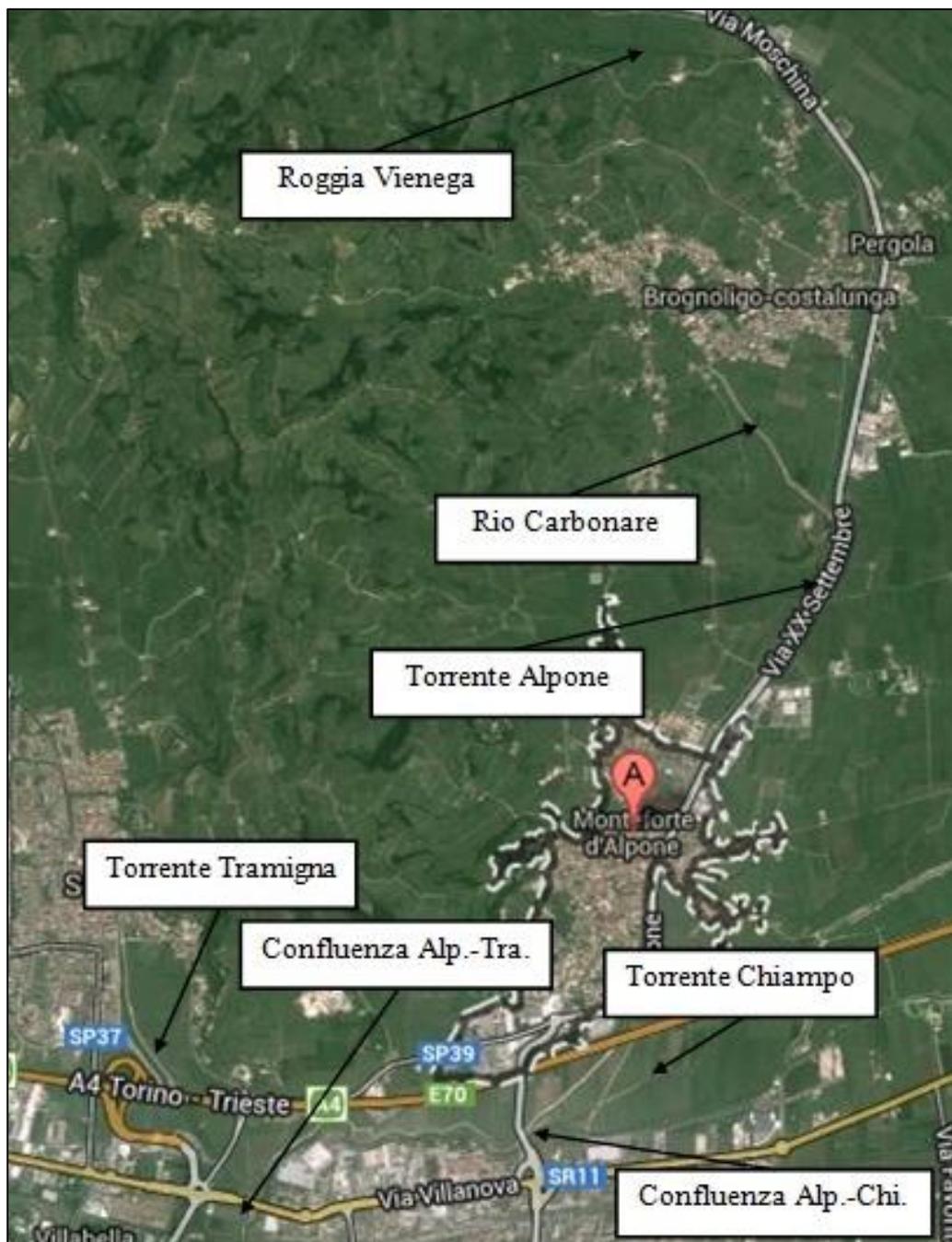


Figura 10. Mappa della parte terminale del torrente Alpone con i suoi affluenti (immagine da Google Maps).

Per quanto riguarda le sorgenti di alimentazione dell'Alpone, in massima parte presentano un livello di base corrispondente alla roccia basaltica che funge da

livello di risorgenza delle acque circolanti nell'acquifero delle rocce calcaree sovrastanti (Scaglia Rossa), affioranti nelle parti elevate del bacino a causa della struttura tettonica. Infatti, le rocce calcaree cretache fanno parte del letto della faglia di Castelvero (spalla del graben) e si trovano dunque in posizione topograficamente più elevata rispetto alle vulcaniti, presenti all'interno del graben. In alcuni casi le sorgenti coincidono con dicchi e filoni che funzionano da sbarramento alla circolazione sotterranea delle acque. Le sorgenti sono fortemente legate alle precipitazioni, che si infiltrano facilmente nelle formazioni calcaree, ma date le dimensioni ridotte dell'acquifero restano spesso in secca (Fabiani, 1913). Il nome torrente attribuito all'Alpone si spiega dunque col suo regime torrentizio, caratterizzato da piene in corrispondenza dei periodi piovosi, pur garantendo sempre una portata minima. La geologia del bacino, formato in gran parte da rocce impermeabili e solo in piccola parte da acquiferi con circolazione carsica è dunque il fattore predominante che determina le caratteristiche idrologiche dell'Alpone.

### ***2.3. Il materasso alluvionale dell'Alpone***

Il materasso alluvionale su cui scorre il torrente Alpone presenta spessori massimi di poco superiori ai 100 m ed è costituito principalmente da argille e da argille limose con occasionali lenti sabbiose e con alternanze in profondità di strati ghiaiosi e sabbiosi. I livelli di sabbie e ghiaie compaiono a circa 90 metri di profondità e non si può escludere che abbiano un'origine esterna alla valle dell'Alpone, magari legata alla conoide fluvio-glaciale dell'Adige che dai Monti Lessini si allungava fino ai Colli Berici. Sono ipotizzabili varie riattivazioni della conoide che hanno bloccato ripetutamente il deflusso dell'Alpone, si sono così formate zone lacustri testimoniate da deposizione di materiale fine con alcune inclusioni di materiale humico. All'interno del materasso alluvionale si riscontra la presenza di una falda freatica anche se, alla luce delle caratteristiche di permeabilità dei materiali che lo compongono, è più appropriato definirla falda di saturazione. I materiali dei primi metri presentano bassa permeabilità, quindi l'acqua che si trova nei primi 5-10 m di profondità non è altro che acqua di

saturatione che permea il terreno. Scendendo in profondità ghiaie e sabbie prendono il posto delle argille e sono ricche di falde in pressione. Nell'area sono riscontrabili anche alcuni pozzi artesiani, situazione dovuta all'intersezione del piano campagna da parte della superficie piezometrica.

#### ***2.4. Erosione, trasporto e sedimentazione***

Per poter stimare il quantitativo del materiale che ogni anno viene spostato dal corso d'acqua bisogna prima quantificare l'erosione media annua. In questo modo è possibile capire e quantificare il volume di materiale spostato dalle acque e altresì quantificare i volumi che sedimentano lungo il corso d'acqua stesso. I fattori ambientali e antropici sono alla base dell'erosione al suolo. I fattori ambientali sono rappresentati dalle condizioni climatiche e pluviometriche, dalle condizioni geologiche e dalla vegetazione spontanea, quelli antropici invece sono le sistemazioni agricole, idrauliche, la cementazione e il restringimento dell'alveo fluviale nelle vicinanze dei centri abitati e l'impermeabilizzazione del territorio attraverso l'utilizzo di cementi e asfalti. Questi fattori possono presentare dei valori molto diversi all'interno dello stesso bacino, talvolta anche di difficile valutazione. Per l'analisi si è fatto ricorso alla formula proposta da Wischmeyer e Smith nel 1960 (Regione Veneto, 1992):

$$A = RKLSCP \quad \text{TON/HA/ANNO}$$

che viene indicata con la sigla USLE (Universal Soil Loss Equation), dove  $A$  rappresenta la quantità media di terreno erosa su base annua per unità di superficie,  $R$  è il fattore pioggia che rappresenta la forza erosiva della pioggia,  $K$  indica il fattore di erodibilità del suolo (stima l'erosione di un suolo standard con pendenza del 9% e lungo al massimo 22.13 m),  $L$  è il fattore di lunghezza del versante (rapporto tra il terreno perso dal campo in esame con una stabilità lunghezza rispetto ad uno standard con le stesse caratteristiche),  $S$  rappresenta il fattore di pendenza del versante (rapporto tra il terreno perso dal campo in esame

con una stabilita pendenza rispetto ad uno standard con le stesse caratteristiche),  $C$  denota il fattore di copertura vegetale e delle tecniche di coltivazione (rapporto tra il terreno perso dal campo in esame con una stabilita copertura rispetto ad uno standard con le stesse caratteristiche),  $P$  è il fattore delle tecniche sistematorie (rapporto tra il terreno perso dal campo dove si effettuano tecniche di conservazione e quella di un terreno coltivato a solchi lungo la massima pendenza). Alla luce della difficoltà sopra richiamate, riguardo la definizione di certi parametri, è stato necessario introdurre dei valori medi. Il risultato è stata una stima media di terreno eroso annualmente pari a 1.5 mm nell'intero bacino. Valore congruo considerando il quadro geologico, pluviometrico e morfologico della Val d'Alpone, che corrisponde ad una stima nell'ordine dei 420'000  $m^3/anno$  di materiale che subisce trasporto fluviale. Il materiale è rappresentato principalmente da terreni fini, limi e argille di origine basaltica e vulcanoclastica, che rappresentano le formazioni principali della zona. Durante il trasporto, al diminuire della competenza, il materiale viene in parte depositato nuovamente lungo le rive del corso d'acqua stesso. Ovviamente si tratta principalmente di materiale grossolano che va a rivestire l'alveo di ghiaie e sabbie, il materiale più sottile invece continua a subire trasporto.

### **3. Rischio Idraulico nel bacino del torrente Alpone**

Alla luce degli ingenti danni inflitti ai beni e alla perdita di vite umane, il dissesto idrogeologico rappresenta un problema attuale e di notevole importanza per il nostro Paese. In Italia è molto diffuso e si presenta in maniera diversa a seconda della geomorfologia del territorio, ad esempio sotto forma di frane, esondazioni, dissesti morfologici. Tra i fattori che influiscono sulla predisposizione ad alluvioni e frane possiamo elencare sia quelli naturali, legati alla conformazione del territorio, sia quelli legati all'azione dell'uomo. Gli effetti antropici comportano, infatti, modifiche al territorio, che conseguentemente aumentano la possibilità di accadimento degli eventi, e incrementano la concentrazione di beni e persone nelle aree possibilmente a rischio, con risultati catastrofici. L'attività umana nel suo complesso ha sicuramente aggravato il dissesto ed evidenziato la fragilità del territorio italiano. La frequenza con cui si ripresentano questi episodi ha portato a considerare, oltre alla fase di emergenza, anche una fase di prevenzione e previsione, incentrata sull'individuazione delle condizioni di rischio e sugli interventi da realizzare. Da un punto di vista analitico il rischio idrogeologico è espresso da una formula che lega pericolosità, vulnerabilità e valore esposto (Dipartimento della Protezione Civile):

$$\text{Rischio} = \text{pericolosità} \times \text{vulnerabilità} \times \text{valore}$$

La pericolosità rappresenta la probabilità che in un determinato luogo si verifichi un evento dannoso di una determinata intensità entro un certo periodo di tempo, ovvero il tempo di ritorno. Il tempo di ritorno indica il tempo che mediamente intercorre tra due eventi di intensità pari a quella considerata e rappresenta la probabilità di non superamento legata ad un fenomeno naturale. Tutti gli interventi effettuati per la messa in sicurezza di un corso d'acqua non possono prescindere da questo concetto, per un corretto dimensionamento degli interventi stessi. La pericolosità è quindi una funzione della frequenza di accadimento dell'evento e, nel caso delle alluvioni, si può stimare con buona approssimazione

la probabilità di accadimento di un determinato evento con un certo tempo di ritorno. In conclusione la pericolosità non è altro che un confronto tra l'entità dell'episodio statisticamente possibile, ad esempio la precipitazione, e la possibilità di contenere lo stesso evento da parte di opere artificiali, quali ad esempio argini, casse d'espansione, o di fattori naturali, come l'ampiezza del corso d'acqua. Per la quantificazione della pericolosità idraulica è necessario considerare sia tutti i parametri che definiscono la portata, quali ad esempio la superficie del bacino, l'altezza idrometrica, l'intensità di pioggia, sia quelli inerenti la geometria del corso d'acqua e della valle in cui scorre.

La vulnerabilità indica la capacità del sistema di sopportare gli effetti in funzione dell'intensità dell'evento. Rappresenta il livello di perdite di un certo elemento risultante dal presentarsi di un fenomeno di una certa "magnitudo", espressa in una scala da zero (nessun danno) a uno (distruzione totale). Il valore esposto, o esposizione, indica l'elemento che deve sopportare l'evento e viene rappresentato dal numero di presenze umane o dal valore delle risorse naturali ed economiche esposte appunto ad un determinato pericolo. Essa quindi quantifica il danno subito dal bersaglio in funzione delle difese locali o delle caratteristiche di tipologia dei bersagli.

Infine l'esposizione al rischio prende in considerazione il valore economico di cose, persone, infrastrutture e beni, anche in funzione della destinazione d'uso.

Il rischio rappresenta di conseguenza il numero atteso di perdite in termini di vite umane, di feriti, di danni a proprietà, attività economiche, risorse naturali ed ecosistemi, dovuti ad un particolare evento dannoso. In pratica il rischio non è altro che il prodotto della probabilità di accadimento di un evento per le dimensioni del danno atteso. Va specificato che comunque la valutazione del rischio non ha un carattere assoluto, bensì relativo al bersaglio scelto. Attraverso l'analisi di rischio si possono stimare i valori di sicurezza per la popolazione, sia che essa rappresenti il bersaglio sia che il bersaglio sia una risorsa naturale, di conseguenza si possono anche identificare le precedenze negli interventi. Il livello di sicurezza andrebbe quindi migliorato continuamente fino a riuscire a portarlo ad un livello accettabile per la comunità. Nello specifico, nel caso di rischio

idraulico, il bersaglio riguarda le vite umane e le opere, la pericolosità invece la probabilità di avvenimento di esondazioni e allagamenti così come la loro entità, intesa come altezza della lamina d'acqua sul territorio circostante. Per i corsi d'acqua significativi, come l'Alpone, quest'altezza dipende dalla stima delle portate con un determinato tempo di ritorno. Il livello di rischio può essere suddiviso in basso (danni economici e sociali limitati), medio (eventuali danni a edifici e infrastrutture, con possibili problemi per l'agibilità degli edifici stessi e per le attività produttive), alto (eventuali problemi per l'incolumità degli esseri umani, danni strutturali agli edifici e alle infrastrutture, prolungata sospensione delle attività sociali ed economiche collegata all'inagibilità degli edifici) ed elevato (eventuali vittime, gravi danni ad edifici ed infrastrutture, compromissione delle attività sociali ed economiche). Nello specifico dell'area dell'Alpone il rischio, dopo i recenti avvenimenti, è stato portato al livello più elevato. Effettivamente l'Alpone, che viene associato al torrente Chiampo in un unico sistema, raffigura una seria fonte di pericolo per molti centri urbani, per il ricco sistema artigianale ed industriale, per le infrastrutture (fra tutte la linea ferroviaria Milano-Venezia, l'Autostrada Milano-Venezia, la Strada Regionale n. 11 e le stesse zone industriali) e anche per l'estesa area agricola.



Figura11. Dettaglio degli effetti dell'alluvione (Regione Veneto 2010).

Oltre alla grande quantità di pioggia, in caso di eventi di piena, ci sono altri elementi molto sfavorevoli: per prima cosa la preponderanza di rocce impermeabili nel bacino dell'Alpone che sfavoriscono l'assorbimento a favore del ruscellamento verso il corso d'acqua, quindi il profilo molto inclinato dell'alveo e, infine, la sua caratteristica di essere pensile per buona parte del tratto finale. Non va dimenticata la fragilità dal punto di vista idrogeologico dell'intera area dei Lessini, che si esprime con un dissesto diffuso, causa anche di abbondante trasporto solido legato ai movimenti franosi e ai cedimenti delle scarpate dei corsi d'acqua. L'Alpone, oltre a presentare un restringimento della sezione liquida per il passaggio delle piene nei pressi di Monteforte, subisce gli effetti dell'idrometria di valle che, in prossimità delle confluenze con il torrente Chiampo e il torrente Tramigna, nel comune di San Bonifacio, crea dei fenomeni di rigurgito, i quali a loro volta vanno a limitare il deflusso delle acque. Nello specifico, l'intersezione con quest'ultimo presenta dei problemi a livello altimetrico: la sommità arginale dell'Alpone si trova ad una quota più alta rispetto a quella del Tramigna. Nei momenti di piena, dunque, parte dell'acqua proveniente dall'Alpone tende a risalire il corso del Tramigna, ostacolandone il regolare deflusso. In passato, proprio per evitare di mettere in pericolo l'abitato di Soave con questo flusso contrario, la confluenza era munita di porte vinciane che dovevano chiudere lo sbocco del torrente.

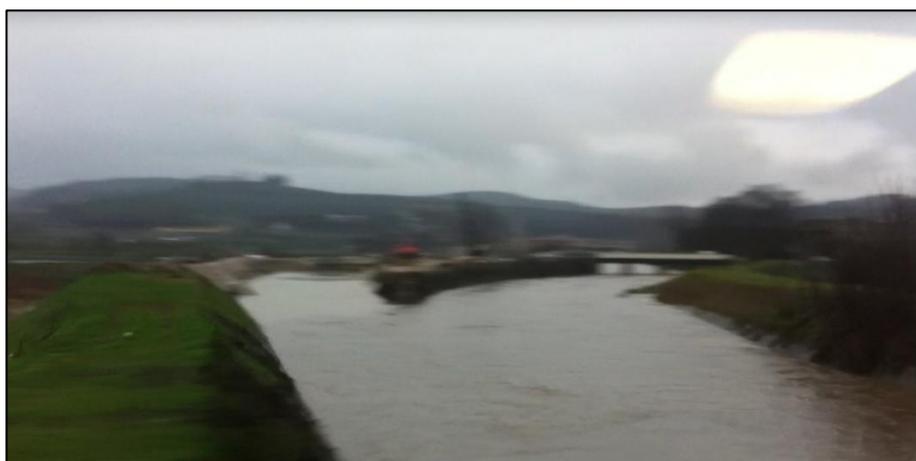


Figura 12. Dettaglio della confluenza tra il Tramigna (a sinistra) e l'Alpone (a destra), durante un evento di piena.

Inoltre, questa confluenza, che in epoca romana era molto più verso valle, è stata spostata nell'attuale posizione nel corso del XIX secolo per poter recuperare terreni paludosi, soggetti ad esondazioni, in favore dell'edilizia e dell'agricoltura. La scelta è stata abbastanza infelice poiché a poca distanza dall'intersezione si trova il "Ponte della Motta", opera probabilmente di epoca medievale sottoposta a tutela archeologica sia per quanto riguarda le parti orizzontali che quelle murarie verticali, che restringe l'alveo del fiume, creando un ostacolo che non permette di scaricare correttamente le acque. Il livello idrometrico, in questo modo, rischia di aumentare a tal punto da tracimare o rompere gli argini più a monte.



Figura 13. Ponte della Motta durante la piena del 2010 (immagine da [www.meteoweb.eu](http://www.meteoweb.eu)).

### ***3.1. Profilo storico dei principali eventi di piena***

Nella storia del torrente Alpone si possono trovare vari episodi legati ad eventi di piena, evidenziati nella carta tematica della Regione Veneto del 2012 (Allegato 2). Il primo evento testimoniato visibile in carta risale al novembre 1966 in cui si registrano tracimazioni diffuse dalla sponda sinistra del corso d'acqua in

prossimità dell'abitato di Brognoligo-Costalunga. Bisogna poi andare fino al 1985 per trovare un altro evento significativo. Anche in questo caso si registrano tracimazioni diffuse dallo stesso punto. Sette anni più tardi, nell'ottobre 1992, si registrano ancora tracimazioni diffuse dalla sponda sinistra dell'Alpone nei pressi di Brognoligo-Costalunga, ma non solo. Il problema principale infatti è molto più a valle, dove si registra una rotta del margine sinistro del Chiampo, legata anche ai problemi di rigurgito alla confluenza con l'Alpone, sopra richiamati. Nel 2010 avviene l'evento più catastrofico della storia dell'Alpone, non tanto per i livelli idrometrici registrati ma per i danni inflitti alle aree limitrofe: il torrente tracima in moltissimi punti del medio corso con sormonti da lievi a significativi. Inoltre, si registrano rotte e collassi di manufatti, che riguardano anche gli affluenti principali Tramigna e Chiampo-Aldegà. L'acqua dapprima rompe l'argine destro dell'Alpone in prossimità della confluenza con il Chiampo e poi allaga i vigneti, l'Autostrada Milano-Venezia e la parte più bassa di Monteforte.



Figura 14. Dettagli delle rotte arginale dell'Alpone e dell'Autostrada MI-VE nel 2010 (Regione Veneto 2010).



Figura 15. Panoramica e dettaglio di Monteforte d'Alpone nel 2010 (Regione Veneto 2010).

Da qui defluisce verso ovest allagando tutti i terreni fino a Soave, dove anche il Tramigna causa il crollo di un muro di sponda proprio in centro al paese, allagandone una vasta zona. Non vengono risparmiate nemmeno le zone subito ad est, dove si riscontrano allagamenti dovuti alla tracimazione del Chiampo e ad una rotta arginale dell'Aldegà. Ultimo evento in ordine di tempo si registra nel maggio 2013, quando le piogge abbondanti causano la tracimazione degli argini da parte dell'Alpone che allaga la Strada Regionale 11, così come parte del paese di Monteforte e una vasta area agricola compresa tra la ferrovia e il corso d'acqua stesso. Anche il Tramigna rompe nuovamente gli argini e allaga Soave per la seconda volta in tre anni.



Figura 16. Fasi di allagamento della Strada Regionale 11 nel 2013 nei pressi della confluenza Alpone-Tramigna (immagine da fanpage.it).

### 3.1.1. La piena del novembre 2010

La sera dell'1 novembre 2010, a causa delle abbondanti piogge, molti corsi d'acqua concentrati nel padovano, nel vicentino e nel veronese hanno allagato abitati e campagne. Per quanto riguarda la provincia di Verona, le aree più colpite sono state quelle dei comuni di Soave e soprattutto Monteforte. Qui i torrenti Tramigna e Alpone, esondando e rompendo gli argini, hanno causato danni ingenti. L'Alpone ha subito pesantemente gli effetti dell'eccezionale fenomeno meteorico che ha interessato il Veneto, ma che non ha risparmiato nemmeno gli affluenti torrente Chiampo e torrente Tramigna, facendo registrare straordinari livelli idrometrici. Infatti, come si può osservare nella figure della Regione Veneto, a dispetto delle numerose rotte avvenute più a monte, la stazione sull'Alpone a San Bonifacio (linea verde di Figura 17) ha registrato livelli di massima piena molto maggiori rispetto a quelli riscontrati negli anni antecedenti (linea verde tratteggiata). Addirittura il colmo di piena del Chiampo (linea rossa) presso San Vito Veronese ha eguagliato il massimo storico (linea rossa tratteggiata) ed i suoi livelli idrometrici, come quelli dell'Alpone, hanno raggiunto picchi tali da ricadere nella zona cieca degli strumenti (situazione indicata dalle frecce).

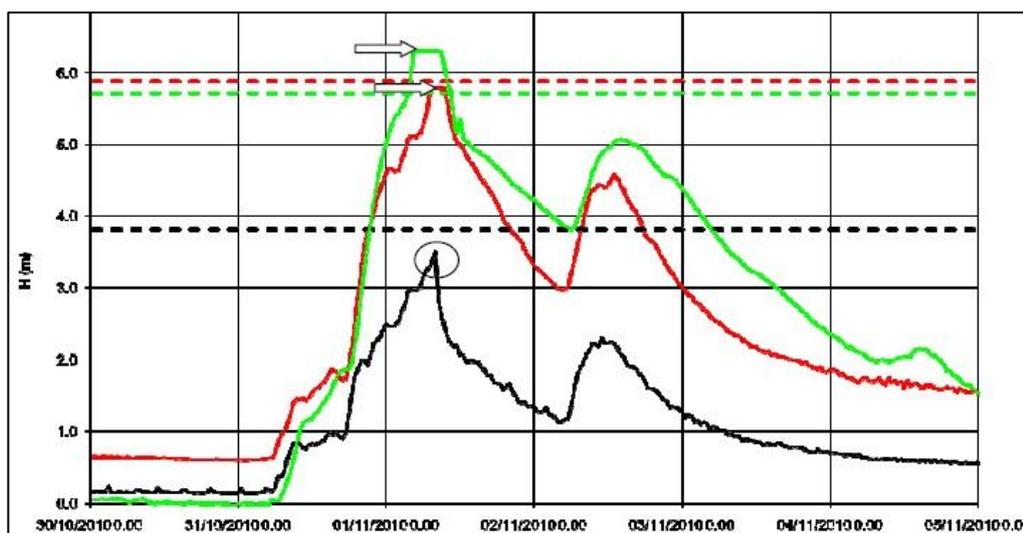


Figura 17. Propagazione della piena del torrente Alpone nel 2010 (Regione Veneto 2010).

Il torrente Alpone è stato interessato da numerose rotte arginali, la prima delle quali è avvenuta nell'abitato di Monteforte e risulta facilmente riconoscibile dall'idrogramma registrato dal sensore del paese, in cui è ben visibile un forte calo verso le 8:00 (evidenziato dal cerchio). Queste rotte hanno mitigato i colmi registrati nelle stazioni di San Bonifacio e di San Vito più a valle. Grazie alle foto e ai dati tratti dalla pubblicazione della Regione Veneto, è possibile quindi analizzare le cause che hanno portato a questo evento disastroso. A partire da domenica 31 ottobre e fino a martedì 2 novembre una perturbazione di origine atlantica porta piogge copiose e persistenti, anche a carattere di rovescio, sulle aree prealpine e pedemontane del Veneto. In queste zone, come è ben visibile dalle raffigurazioni, sono stati superati praticamente ovunque i 300 mm di pioggia complessivi e sono stati localmente registrati picchi superiori ai 500 mm.

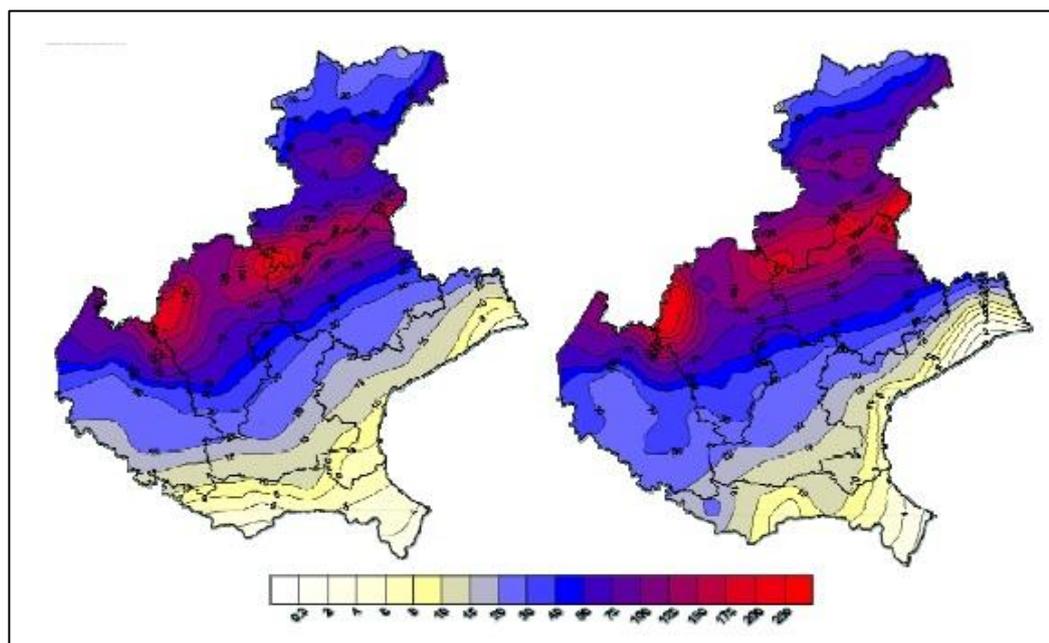


Figura 18. Precipitazioni del 31 ottobre (sinistra) e 1 novembre 2010 (destra)  
(Regione Veneto 2010).

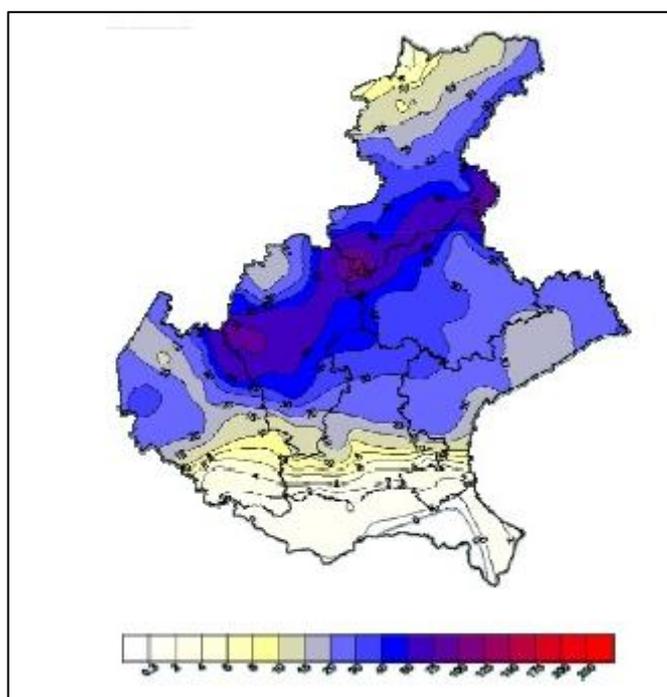


Figura 19. Precipitazioni del 2 novembre 2010 (Regione Veneto 2010).

Anche nella parte più settentrionale della pianura si sono superati i 200 mm mentre, procedendo verso sud, le precipitazioni si sono attestate attorno ai 10 mm. Inoltre la perturbazione, arrivando a lambire le coste africane, ha comportato l'afflusso persistente di correnti calde sciroccali sul Veneto, sia sulle aree costiere che in quota. Questo fenomeno ha indotto un innalzamento del limite della neve dai 2000 ai 2200-2400 m, con conseguente scioglimento della neve e innalzamento dell'apporto ai corsi d'acqua. Analizzando le precipitazioni medie areali su base giornaliera della zona in esame si possono riscontrare valori di precipitazione massima superiori al doppio (in certi casi vicini al triplo) rispetto alla media. Infatti per il 31 ottobre riscontriamo valori su base giornaliera tra i 197 e i 146.2 mm/24h (corrispondenti a quantitativi molto abbondanti e molto elevati) rispetto ad una media oscillante tra i 138.8 e 71 mm/24h, mentre per il giorno successivo tra i 230.2 e i 163.2 mm/24h contro una media fra 149.5 e 67.4 mm/24h. Il 2 novembre, giorno in cui le precipitazioni iniziano a calare, si possono osservare tra gli 89.6 e i 76.2mm/24h contro una media altalenante dai

50.6 ai 37 mm/24h. Guardando l'evento nel suo complesso notiamo valori massimi tra i 501.6 e i 385.6 mm/24h contro una media tra i 338.9 e i 175.3 mm/24h. Bisogna considerare il fatto che, oltre ai valori massimi locali estremamente elevati, anche i valori medi areali nelle diverse aree del Veneto sono stati assai significativi, a riprova del fatto che le precipitazioni sono state molto abbondanti su aree vaste e non solo su singoli siti. I quantitativi estremi sopra indicati sono da associare principalmente alla persistenza delle precipitazioni, più che alla sola intensità. Questo è deducibile dal fatto che i quantitativi orari spesso non hanno superato i 15 mm e comunque mai i 25/30 mm (Regione Veneto, 2010). Va evidenziato però che in alcune aree prealpine e pedemontane queste precipitazioni, con bassi quantitativi orari, si sono protratte ininterrottamente per parecchie ore, determinando quindi le quantità molto corpose sopra descritte.

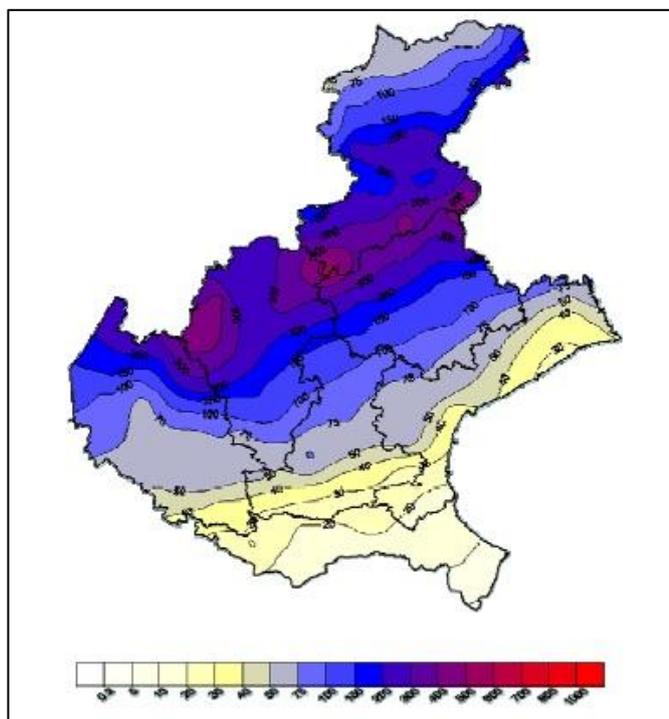


Figura 20. Precipitazione complessiva dell'intero evento (Regione Veneto 2010).

Andando a confrontare questo evento alluvionale con i dati storici disponibili, lo si può immediatamente inserire tra i 2-3 eventi (almeno per gli ultimi 50 anni), più forti e copiosi riguardanti le aree prealpine e pedemontane del Veneto che, per definizione, sono le più piovose della regione. In particolare, nelle aree prealpine e pedemontane di Verona e Vicenza sono stati riscontrati valori massimi che, nelle 24 e 48 ore, hanno oltrepassato quelli degli eventi catastrofici dell'ottobre 1992 e del novembre 1966. Ad esempio a San Bortolo (VR) sui Lessini orientali sono stati registrati valori nelle 24 ore molto prossimi ai massimi storici del 4-5 ottobre 1992. Per meglio mettere in relazione questo evento con quello dell'ottobre 1992 e con quello del novembre 1966 si richiamano in questa sede due grafici tratti dalla pubblicazione della Regione Veneto riguardante l'alluvione del 2010, in cui si mettono in risalto le differenze pluviometriche tra i diversi eventi sull'intero territorio regionale.

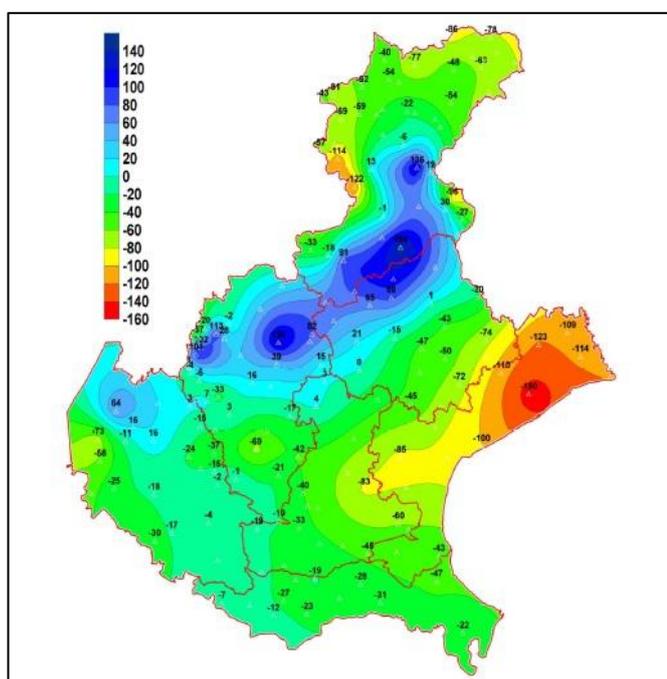


Figura 21. Differenze di precipitazione (mm) tra l'evento del 2010 e quello del 1992 (Regione Veneto, 2010).

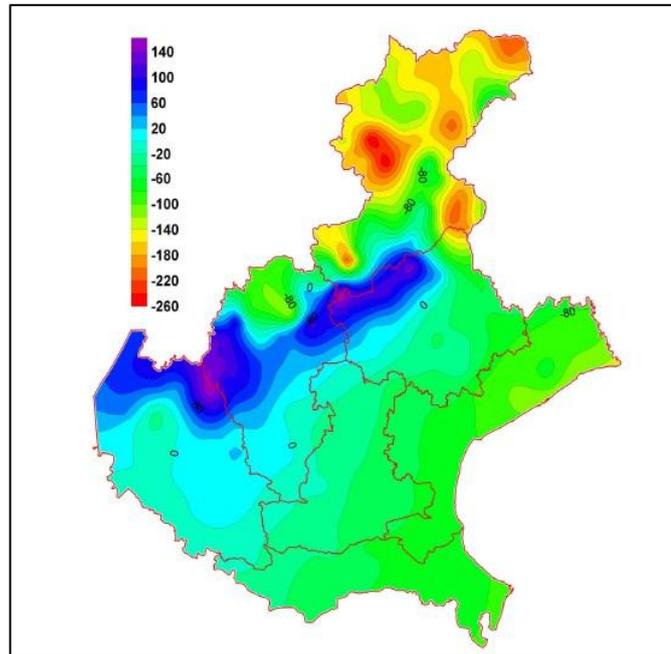


Figura 22. Differenza di precipitazione (mm) tra l'evento del 2010 e quello del 1966 (Regione Veneto, 2010).

A riprova di quanto detto fino ad ora sull'eccezionalità dell'evento del 2010, se andiamo ad analizzare i tempi di ritorno delle precipitazioni, ci rendiamo conto che sono nell'ordine dei 30 anni per quanto riguarda le piogge nelle 24 ore, e superano i 50 per quelle di 2 e 3 giorni.

### ***3.2. Mitigazione del rischio idraulico del bacino del torrente Alpone***

Gli interventi adottabili per cercare di contenere il rischio idraulico e quindi aumentare il livello di sicurezza dell'Alpone si possono suddividere in tre categorie (Regione Veneto 2012): 1) l'adattamento delle caratteristiche degli alvei e delle opere ad essi legate alle massime portate che si possono prevedere, 2) l'abbassamento dei colmi di piena attraverso bacini di laminazione per far sì di allungare i tempi di ritorno delle tracimazioni e 3) la risoluzione delle criticità locali. Andando quindi nello specifico, all'interno della delibera della Regione

Veneto n. 15 del 2012 c'è una sezione sulla "Realizzazione di un'opera di invaso sul torrente Alpone, in località Colombaretta, nel comune di Montecchia di Crosara (VR)" in cui è stata appunto prevista la costruzione di un opera di invaso sul torrente da circa  $900'000 m^3$ , con lo scopo di abbassare i colmi di piena e proteggere il più possibile la vallata da eventi alluvionali futuri. Inoltre, nei prossimi mesi si cercherà di risolvere anche il nodo legato al Ponte della Motta, che verrà smontato, restaurato e ricollocato in un luogo più idoneo. Per finire, verranno realizzate delle opere con il fine di disconnettere da un punto di vista idraulico l'Alpone e il Tramigna, eliminando i problematici fenomeni di inversione di flusso. Alla luce dell'interconnessione dei tre corsi d'acqua, non si può pensare di risolvere i problemi senza intervenire anche sugli altri, infatti la Regione ha previsto la realizzazione di altri bacini di laminazione: uno sul Chiampo a Montebello Vicentino da circa  $2 \times 10^6 m^3$  e uno sul Tramigna sfruttando una zona di espansione naturale da circa  $700'000 m^3$  (bacino di San Lorenzo). In questa tesi, invece, si è studiata l'efficacia di una cassa di espansione più a valle rispetto al bacino previsto dalla Regione, e da utilizzare congiuntamente alle opere sopra richiamate, per poter aumentare ulteriormente il livello di sicurezza. La cassa principale è dimensionata su portate con un tempo di ritorno di 70 anni. Se si considerasse anche la presenza della cassa qui analizzata, si renderebbero sostenibili anche portate con tempi molto superiori ai 100 anni, superando abbondantemente il milione di  $m^3$  complessivi di invaso.

## 4. Modello di propagazione delle piene

La propagazione di un'onda di piena in un alveo con tratti molto larghi, si può comprendere attraverso l'utilizzo di schemi di calcolo bidimensionali con fondo fisso. Gli stessi schemi possono essere utilizzati anche per rappresentare la propagazione sul territorio attiguo delle onde di sommersione causate da sormonti o crolli degli argini, a patto che vengano adattate in maniera opportuna le equazioni del moto e che la modellazione delle aree in oggetto tenga conto dell'importanza degli effetti delle differenti strutture presenti sulla diffusione stessa dell'onda. Con il perfezionamento del modello uni-bidimensionale a fondo fisso si può ricreare quindi il comportamento idraulico del territorio in esame, tenendo conto delle strutture presenti e anche del reticolo idrografico minore.

### 4.1. Il modello bidimensionale

#### 4.1.1. Equazioni bidimensionali del moto

Il modello matematico poggia sulla soluzione delle equazioni di De Saint Venant che descrivono il moto bidimensionale di una corrente a pelo libero, restando vere le ipotesi di fondo non erodibile, di velocità distribuite in maniera uniforme sulla verticale e di pressioni distribuite in modo idrostatico. Queste equazioni vengono risolte servendosi di uno schema numerico agli elementi finiti su una griglia triangolare, sfruttata per schematizzare la zona studiata. Il modello trova la soluzioni di dette equazioni del moto e dell'equazione di continuità. Va specificato che le equazioni del moto risultano essere mediate lungo la verticale secondo la direzione di  $x$  e  $y$ :

$$\begin{aligned}\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{Y} \right) - \left( \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{Y} \right) - \left( \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\tau_{wy}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} &= 0\end{aligned}\tag{1.1}$$

dove  $q$  indica la portata unitaria integrata lungo la verticale con le sue componenti  $q_x$  e  $q_y$  che rispecchiano le due direzioni orizzontali,  $t$  denota il tempo,  $R_{ij}$  rappresentano gli sforzi di Reynolds sul piano orizzontale dove  $i$  e  $j$  denotano  $x$  o  $y$ ,  $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$  denota lo sforzo tangenziale al fondo rappresentato dalla seguente equazione (1.2) e  $\tau_w = (\tau_{wx}, \tau_{wy})$  invece lo sforzo dovuto al vento che agisce sulla superficie rappresentato dall'equazione (1.3),  $\rho$  è la densità del fluido,  $h$  rappresenta l'altezza della superficie libera,  $x$  e  $y$  rappresentano le ascisse spaziali orizzontali correnti e  $g$  indica l'accelerazione gravitazionale. Inoltre  $Y$ ,  $\eta$  e  $H$ , riscontrabili anche nelle successive equazioni, rappresentano, in un istante generico e per tutti gli elementi, la parte di dominio allagato, il volume d'acqua per unità di superficie e un'equivalente profondità d'acqua, immessa per rappresentare le conseguenze dei termini dissipativi nel momento in cui il tirante raggiunge dimensioni paragonabili a quelle delle irregolarità del terreno.

Inoltre,

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gY \left( \frac{|q|}{k_s^2 H^{10/3}} \right) q \quad (1.2)$$

$$\tau_w = \rho_a c_d U_{wind}^2 \quad (1.3)$$

nelle quali  $K_s$  rappresenta il coefficiente di scabrezza di Strickler,  $U_{wind}$  la velocità del vento e  $c_d$  il coefficiente di resistenza espresso da:

$$c_d = c_{d0} (1 - e^{-\epsilon_w U_{wind}}) \quad (1.4)$$

dove  $c_{d0}$  e  $\epsilon_w$  rappresentano delle costanti decise in maniera appropriata.

## ***4.2. Transizione asciutto-bagnato: la media di fase***

Nel momento in cui una sottile lama d'acqua si propaga sul terreno, assumono grande importanza le irregolarità che caratterizzano la superficie e che implicano un passaggio transitorio tra parti di suolo asciutte e bagnate, coesistenti all'interno

della stessa area. I parametri  $\eta$  e  $H$ , descritti nel paragrafo 4.1., vanno a modificare le equazioni di continuità e del moto e dipendono da una grandezza caratteristica  $\alpha_r$ , con dimensioni di una lunghezza, messa direttamente in relazione all'altezza e alla distribuzione delle irregolarità superficiali delle parti con cui viene schematizzato il campo di moto in oggetto. Solitamente questa superficie è rappresentata dalla quota media dei componenti, tralasciando quindi l'influenza delle singole irregolarità del terreno. La procedura è applicabile solo nel caso di tiranti d'acqua maggiori rispetto alle irregolarità stesse, ma non è rappresentativa per piccoli tiranti, in quanto non si andrebbero a valutare correttamente le resistenze al moto e il volume d'acqua presente nell'elemento all'istante  $t$ . Rappresentando la superficie in questo modo, si avrebbe un immediato passaggio asciutto-bagnato, che è causa di problemi numerici negli schemi bidimensionali classici a griglia fissa. Per ovviare alla difficoltà si ipotizza, all'interno di questo innovativo schema, l'esistenza di un range di profondità nel quale, mentre evolve la piena, si presentino condizioni variabili tra gli estremi completamente asciutto e completamente bagnato. Lo scopo è di tradurre la transizione asciutto-bagnato in una variazione graduale all'interno di ogni singolo elemento da un valore di invaso quasi nullo, nel caso la quota dell'acqua dell'elemento sia più bassa di quella minima delle irregolarità, ad un valore riguardante la grandezza totale dell'elemento, nel caso di quota idrometrica superiore o uguale alla massima quota del terreno. Viene introdotto il parametro  $\alpha_r$  per indicare l'indice dell'ampiezza delle irregolarità, uguale alla differenza tra la quota dell'asperità più alta e di quella media  $h_f$ , presa come altezza dell'elemento stesso (Figura 23).

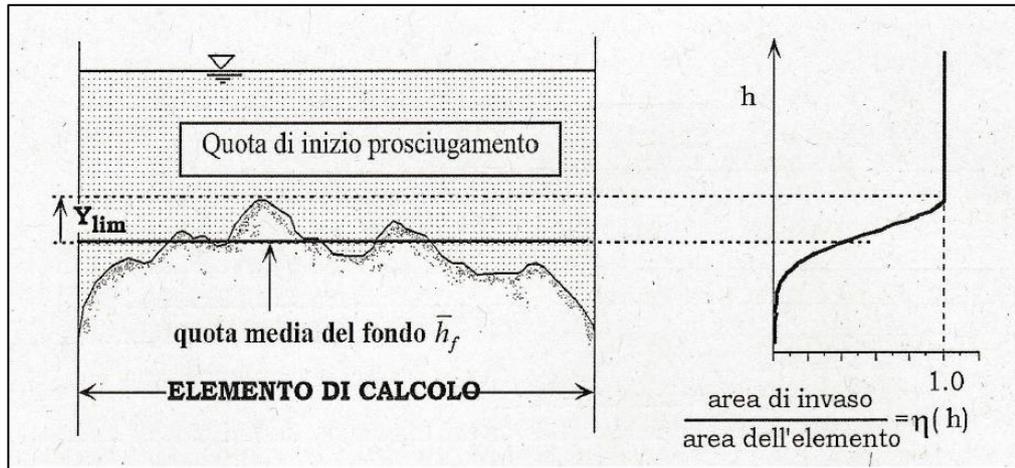


Figura 23. Percentuale di area bagnata  $\eta$  in funzione della quota della superficie libera.

Per tradurre il concetto in linguaggio matematico utilizziamo una funzione di fase:

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 & z > h_f \\ 0 & z \leq h_f \end{cases} \quad (1.5)$$

nella quale  $h_f$  rappresenta la quota del fondo e  $x = (x, y, z)$  il vettore delle coordinate spaziali. Indicando con  $\langle \rangle$  l'operazione di media di fase, facciamo coincidere una  $F(x, t) = \langle \phi(x) f(x, t) \rangle$  mediata con una variabile generica del campo di moto  $f(x, t)$ . Il tutto corrisponde a questo significato:

$$F(x, t) = \frac{1}{A} \int_A \varphi(x) f(x, t) d(A) \quad (1.6)$$

dove  $A$  rappresenta l'area dell'elemento di calcolo.

Ora andiamo a definire  $\vartheta(x)$  e  $\eta$ :

$$\vartheta(x) = \langle \varphi(x) \rangle \quad (1.7)$$

$$\eta = \vartheta(x, y, h) \quad (1.8)$$

che sono, nell'ordine, la parte dell'area  $A$  che si trova sopra alla superficie del terreno e la parte bagnata di  $A$  e dove con  $h$  si va ad indicare la quota della superficie libera. Alla luce delle difficoltà pratiche nel dare un valore al parametro  $\alpha_r$ , ci si è adoperati per trovar un'interpretazione alternativa:  $\vartheta(x)$  si può esprimere come la probabilità  $P$  che, all'interno elemento  $A$ , la quota del fondo  $h_f$  non superi la generica quota  $z$ :

$$\vartheta(x) = P(h_f \leq z) \quad (1.9)$$

così facendo  $\partial \vartheta(x) / \partial z$  diventa la funzione densità di probabilità della quota del fondo di  $A$ , quindi la stima delle irregolarità non diventa altro che la deviazione standard della quota stessa del fondo:

$$\alpha_r = 2\sigma_b \quad (1.10)$$

Associando l'andamento delle asperità ad una gaussiana, riusciamo ad ottenere un valore accettabile di  $\alpha_r$  anche senza essere in possesso di stime specifiche. Con questo procedimento si è riusciti a teorizzare a tal punto il significato di  $\alpha_r$  da riuscire a rappresentare anche le conseguenze delle irregolarità di grandi dimensioni, tali da influire pesantemente sulla velocità di avanzamento del fronte di sommersione. Nel dettaglio, in certi casi, raddoppiando  $\alpha_r$  si ottiene una velocità di avanzamento quattro volte più grande, in altri riducendo  $\alpha_r$  a valori centimetrici si ottiene invece un forte rallentamento. Da qui si può facilmente intuire come l'ipotesi di un terreno praticamente piatto, fatta in quasi tutti i modelli bidimensionali, non porti a stime veritiere sulla velocità di avanzamento dell'allagamento quando le irregolarità prendano un certo peso, principalmente nei primi momenti dell'allagamento stesso. Quindi i termini  $\eta$ ,  $Y$  e  $H$  si possono così esprimere (Defina, 2000):

$$\eta = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{2D}{\alpha_r} \right) \right] \quad (1.11)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta dz = \alpha_r \left( \eta \frac{D}{\alpha_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4(D/\alpha_r)^2} \right) \quad (1.12)$$

$$H \cong Y + 0.27\sqrt{Y\alpha_r} e^{-2Y/\alpha_r} \quad (1.13)$$

dove  $er f$  rappresenta l'errore e  $D = h - z_f$  è la profondità media che risulta dalla discrepanza di quota tra il pelo libero e il fondo.

### ***4.3. Gli elementi monodimensionali***

#### ***4.3.1. Elementi monodimensionali “canale”***

La rete idrografica minore, oltre ad essere molto importante nel drenaggio del territorio limitrofo a quella principale, si delinea come via preferenziale nella propagazione dell'allagamento e, attirando a sé l'acqua esondata, aumenta la velocità del fronte. La rete secondaria andrebbe schematizzata con elementi bidimensionali, ma l'operazione presenta alcuni problemi sia perché potrebbe portare a considerare elementi molto piccoli che vanno ad appesantire la costruzione del reticolo sia perché potrebbe compromettere stabilità ed accuratezza della soluzione numerica, sempre che non si utilizzino piccoli passi di integrazione temporali. La soluzione sta nell'utilizzare all'interno del modello sia elementi bidimensionali che unidimensionali, che servono a rappresentare la rete minore. In dettaglio questi ultimi si comportano come canali “in pressione”, se le aree limitrofe sono sommerse, altrimenti come canali a pelo libero. La Figura 24 descrive il concetto: la parte superiore del canale, che per comodità viene considerato a sezione rettangolare, è associata agli elementi bidimensionali che si allargano fino all'asse. Di conseguenza la parte inferiore viene associata ad un elemento unidimensionale che si comporta come canale “in pressione” fino ad un eventuale abbassamento del livello dell'acqua.

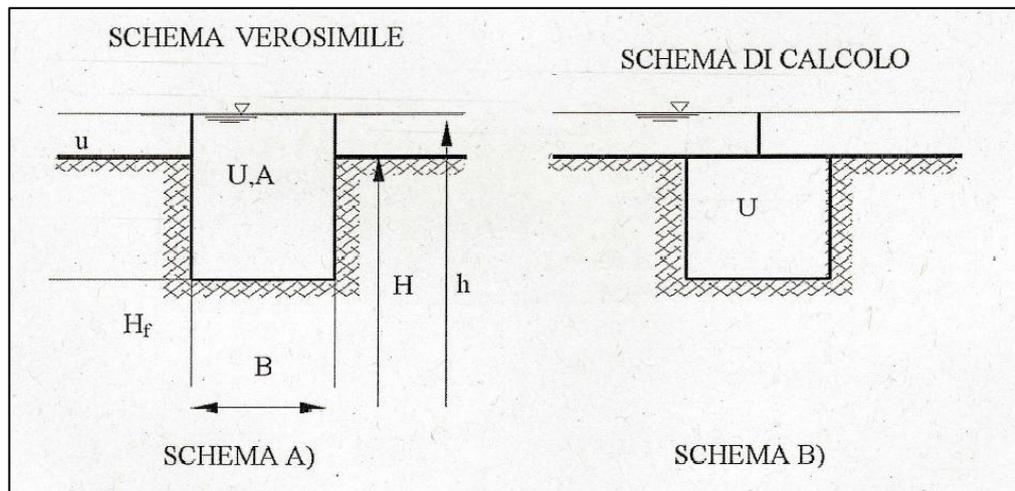


Figura 24. Schema di calcolo dell'elemento monodimensionale "canale".

In questa situazione è possibile introdurre o eliminare elementi unidimensionali senza che il reticolo di calcolo bidimensionale subisca delle variazioni. Circostanza per cui anche le equazioni subiscono delle semplificazioni, infatti nelle sezioni trasversali compatte che hanno velocità pressoché uniforme si può trascurare l'inerzia convettiva. L'equazione del moto e di continuità assume questa forma:

$$\frac{\partial h}{\partial s} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q|Q|}{k_s^2 R_H^{4/3} A^2} = 0 \quad (1.14)$$

$$\eta(h) \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (1.15)$$

nelle quali  $s$  rappresenta l'ascissa curvilinea che traccia l'asse del canale,  $A$  delinea l'area della sezione trasversale,  $Q$  descrive la portata che attraversa la sezione,  $R_h$  è il raggio idraulico. Nell'eventualità in cui elementi bidimensionali e unidimensionali si sovrappongano nel modello, bisogna tener conto che una parte della portata passante negli unidimensionali è già stata conteggiata nei bidimensionali. La parte di portata  $\Delta Q$  si esprime con:

$$\Delta Q = B[Y_L(v_L \cdot s) + Y_R(v_R \cdot s)]/2 \quad (1.16)$$

dove  $B$  rappresenta la larghezza del canale,  $Y$  è il volume d'acqua per unità di superficie,  $v$  delinea il vettore velocità inerente agli elementi bidimensionali,  $s$  indica il versore della direzione dell'asse del canale e i pedici  $L$  ed  $R$  indicano la sinistra e la destra del canale. La portata da valutare nel bilancio di massa nodale è  $Q_a = Q - \Delta Q$  e l'equazione di continuità diviene:

$$\left(1 - \frac{\eta_L + \eta_R}{2}\right) B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_a}{\partial s} = 0 \quad (1.17)$$

nella quale  $\eta$  non è altro che la frazione bagnata dell'elemento bidimensionale adiacente. Se gli elementi adiacenti sono assenti o asciutti  $\eta_L = \eta_R = 0$  e quindi  $Q_a = Q$ , se  $\eta_L = \eta_R \cong 1$  non si ha l'effetto dell'invaso.

#### ***4.3.2. Elementi monodimensionali “speciali”***

Nella propagazione, oltre ai canali secondari, bisogna considerare l'importanza del ruolo svolto dagli argini, dalle diverse opere di regolazione e dai rilevati (ad esempio stradali e ferroviari) che si comportano come degli sbarramenti che rallentano l'allagamento. Se il fluido li oltrepassa, diventano delle soglie che possono però cedere e andare ad aprire delle brecce negli argini dei corsi d'acqua dalle quali fuoriesce una grande quantità d'acqua che va a rendere più gravoso l'allagamento. Per poter descrivere fedelmente questa situazione e anche i fenomeni locali, quali cedimenti delle opere di difesa o operazioni di regolazione, il modello uni-bidimensionali di cui sopra viene arricchito di nuovi elementi unidimensionali speciali: i tronchi. Questi permettono di descrivere il comportamento principalmente delle arginature che non sarebbe possibile ricorrendo solamente agli elementi bidimensionali, pena l'appesantimento delle operazioni di calcolo. Le arginature vengono associate a soglie sfioranti che mostrano, una volta caratterizzate da un punto di vista geometrico e da un coefficiente di portata, la portata nel caso in cui la variazione del livello

idrometrico causi la tracimazione, sia in condizioni di efflusso libero che rigurgitato. Con l'utilizzo dei tronchi speciali si ha la possibilità di descrivere le conseguenze di un cedimento che vada ad aprire una breccia nell'argine o nel rilevato e che gradualmente si vada ingrandendo a causa della forza erosiva dell'acqua in uscita. Si può inoltre andare a descrivere il comportamento di salti di fondo o di soglie, di tratti di canali in pressione (ad esempio sottopassi) e di paratoie (controllate in automatico da livello o direzione di flusso). Come ultima possibilità si può considerare anche l'effetto delle portate causate dagli apporti pluviometrici indirizzati al suolo, è sufficiente inserire l'idrogramma pertinente nel nodo del reticolo destinato a questo scopo. Tutti i dispositivi descritti fino ad ora sono definiti attraverso una serie di parametri che vanno immessi nel relativo file prima di ogni simulazione, va però detto che si possono anche far cambiare durante la simulazione stessa, così da ricreare eventi imprevisi e improvvisi quali cedimenti o malfunzionamenti delle idrovore.

#### **4.3.2.1. Tronchi speciali soglia**

Questi elementi monodimensionali permettono di delineare il comportamento di un argine o di una traversa. Ognuno di essi interconnette due nodi del sistema bidimensionale (Figura 25) e l'acqua sfiorante oltre il tronco viene quantificata attraverso le altezze idrometriche relative ai nodi a monte e a valle.

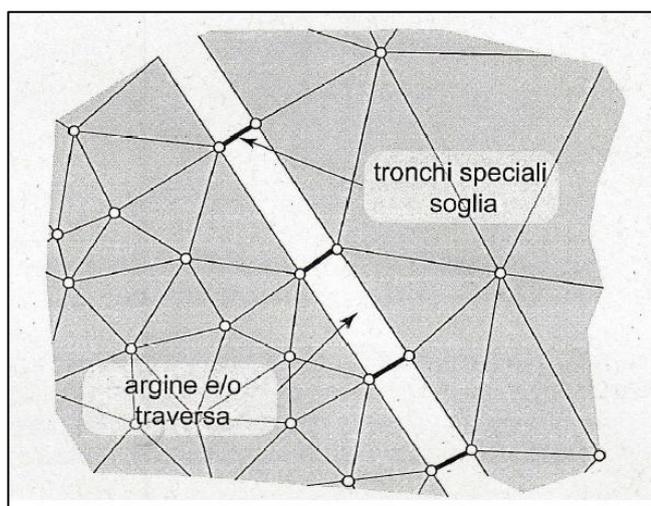


Figura 25. Schema di inserimento dei tronchi speciali soglia.

I tronchi speciali quindi uniscono o dividono zone distinte del dominio in funzione del verificarsi di un flusso libero, rigurgitato o nullo sulla soglia. I suddetti elementi presentano due nodi alle estremità:  $n_1$  e  $n_2$ . Se il flusso si dirige da  $n_1$  a  $n_2$ , per le condizioni di continuità, si avrà una portata uscente dal primo pari alla portata che entra nel secondo:  $Q_1 = -Q_2$ . Per calcolare invece l'energia specifica precedente e successiva la soglia, vanno tralasciati i carichi cinetici e si prende in considerazione solo  $h$  (carico gravitazionale), l'acqua che sfiora è legata solo al coefficiente di portata della soglia  $C_q$  e alla larghezza dello sfioro  $B$ . La fuoriuscita di acqua dalla soglia può essere di due tipi: libera o rigurgitata.

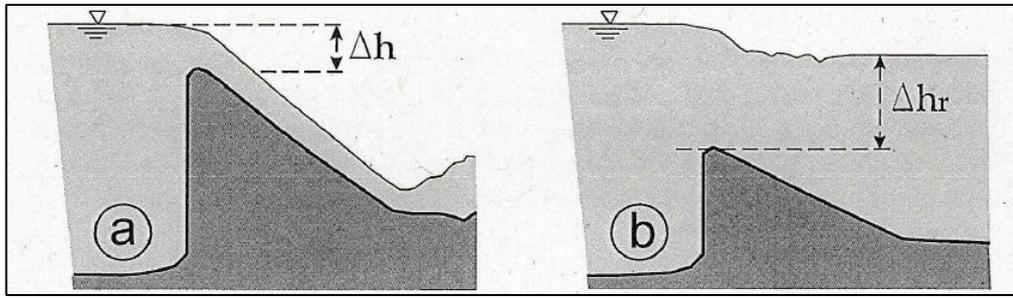


Figura 26. Efflusso al di sopra di una soglia a pelo libero (a) e rigurgitato (b).

Nel primo caso a valle ci deve essere un livello più basso rispetto all'altezza dello sfioro aumentata di  $2/3$  del carico idraulico, quindi la portata specifica è:

$$q_L = C_{qL} B \sqrt{2g} \Delta h^{3/2} \quad (1.18)$$

nel secondo caso invece, in cui il livello a valle è più alto rispetto a prima, la portata è:

$$q_R = C_{qR} B \sqrt{2g} \Delta h \left[ \max(\Delta h_R, 0) + \frac{2}{3} \Delta h \right] \quad (1.19)$$

dove  $q_L$  e  $q_R$  sono la portata per unità di larghezza,  $C_{qL}$  e  $C_{qR}$  delineano i coefficienti di portata per efflusso libero, il primo, e per efflusso rigurgitato, il secondo. Bisogna considerare il fatto che ai tronchi si può assegnare un valore  $h_{tr}$  che rappresenta la quota di sfioro e che può essere costante o variabile nel tempo. Anche seguendo questa procedura si possono mostrare gli effetti di una breccia, è sufficiente appunto collegare al tronco una tabella che delinea l'evoluzione di  $h_{tr}$  col trascorrere del tempo.

### ***4.3.3. Condizioni al contorno***

Resta ancora da affrontare il discorso legato all'assegnazione sia delle condizioni iniziali sia di quelle al contorno, operazione fondamentale affinché sia unica la soluzione al problema di Cauchy. Affrontare da un punto di vista idrodinamico la propagazione delle onde di piena nel territorio in condizioni di moto lento implica l'introduzione di un idrogramma delle portate a monte e di una scala delle portate, o di un livello prestabilito, a valle. Durante le fasi di modellazione della propagazione bisogna quindi imporre una condizione iniziale di moto stazionario che viene rappresentato da una piccola portata nei settori di ingresso e da un livello prestabilito a valle. Raggiungere le condizioni di moto permanente, che si verificano se le condizioni al contorno si mantengono costanti nel tempo, su fondo perfettamente asciutto del corso d'acqua in esame presenta alcune difficoltà numeriche: la condizione iniziale asciutta impone di utilizzare un passo  $\Delta t$  di integrazione molto ristretto rispetto a quello scelto per riprodurre la diffusione della piena. Un modo per aggirare il problema è far bagnare l'alveo asciutto con una piccola quantità d'acqua, inferiore a quella di moto permanente, e aumentarla poi gradualmente fino ad arrivare a regimazione.



## **5. Opere di mitigazione della pericolosità idraulica**

Le portate fluenti in un corso d'acqua rappresentano una risorsa di notevole interesse per usi ai quali l'acqua stessa può destinarsi, potendo allo stesso tempo risultare una fonte di pericolo nel caso di importanti eventi di piena. In quest'ultimo frangente esistono varie tecniche per la protezione dalle inondazioni delle zone limitrofe al tratto vallivo di un corso d'acqua ma le principali e più efficaci ricadono essenzialmente in due categorie: la sistemazione dell'alveo e la moderazione delle onde di piena. Nel primo gruppo rientrano tutte quelle opere, quali ad esempio i rialzi arginali o la ricalibratura dell'alveo, che hanno come fine quello di aumentare la capacità del corso d'acqua stesso, nel secondo invece ricadono le tecniche di invaso per ottenere la laminazione delle onde di piena. Appare evidente che, da un punto di vista della mitigazione della pericolosità idraulica, la laminazione svolga un ruolo preponderante proprio per la sua capacità di abbassare in modo importante le portate che transitano nel corso d'acqua. Questo non esclude il fatto che i risultati migliori si possano ottenere abbinando le due strategie.

### ***5.1. Laminazione delle piene per invaso***

Le opere strutturali più adeguate alla protezione dagli eventi alluvionali sono rappresentate dalle casse d'espansione e dai serbatoi ad uso esclusivo di piena. Queste opere permettono di trattenere momentaneamente una frazione del volume dell'onda di piena in ingresso, abbassandone il colmo e permettendo così un deflusso verso valle in sicurezza. I serbatoi sono capacità di invaso ottenute realizzando uno sbarramento del corso d'acqua (ad esempio con una diga), usualmente nella parte alta o medio alta di un bacino idrografico, dove la valle si presenta più stretta e dove le caratteristiche topografiche, geologiche e geomorfologiche lo consentano. Infatti la scelta della località più adatta per la costruzione della diga dipende da un accurato esame delle condizioni topografiche, per la necessità di trovare una località dove la valle si restringa dopo essersi allargata a monte per garantire la necessaria capacità di invaso, e

condizioni geologiche, integrate con esplorazioni del sottosuolo per escludere elementi che costituiscano una pregiudiziale alla realizzazione o alla stabilità del manufatto. L'azione moderatrice del serbatoio risulta tanto più efficace quanto più a valle è la sua ubicazione rispetto al territorio da difendere. Le casse di espansione, invece, sono capacità di invaso poste, in genere, lateralmente al corso d'acqua, disponibili nel tratto medio-vallivo del corso d'acqua: esse possono trattenere parte del volume dell'onda di piena di un certo livello che proviene da monte, lasciando transitare a valle onde di piena con colmi ridotti in condizioni di maggior sicurezza. Sono realizzate arginando superfici di grande estensione, destinate appunto ad essere occupate dalle acque. Diventa quindi fondamentale anteporre un attento e approfondito studio idrologico. Gli invasi artificiali (serbatoi e casse d'espansione) costituiscono interventi strutturali efficaci sia nella regolazione per l'utilizzazione (es. serbatoi a scopo idroelettrico, irriguo, acquedottistico) sia nella moderazione delle piene per la difesa del territorio (serbatoi e casse d'espansione), permettendo di modificare la successione degli afflussi naturali rispetto ai deflussi richiesti, per l'utilizzazione, o tollerati, nel caso della difesa, in uscita dall'invaso. Le diverse finalità potrebbero, in linea teorica, anche coesistere nei "serbatoi a scopo multiplo", fissando rigidi criteri di gestione nell'ottica del primato della difesa idraulica sugli altri possibili usi, i quali dovrebbero lasciare a disposizione della laminazione volumi diversi a seconda della stagione. In realtà, per lo meno all'interno del panorama italiano, nei serbatoi realizzati, la moderazione delle piene è spesso risultata finalità secondaria rispetto a quella dell'utilizzazione idraulica, in quanto viene lasciata a disposizione della laminazione di una possibile onda di piena, una capacità molto limitata. Inoltre esiste un'antitesi di esercizio, difficilmente eliminabile, tra un invaso destinato all'utilizzazione (ad esempio idroelettrica) che dovrebbe essere mantenuto il più possibile pieno, ed un invaso ad uso di piena, che dovrebbe essere mantenuto il più possibile vuoto, per essere in grado di ricevere e trattenere i colmi delle piene in arrivo. In Italia sono pochi i serbatoi ad uso esclusivo di piena: un esempio è fornito dal serbatoio di Montebello Vicentino (capacità circa 5 milioni di m<sup>3</sup>) a valle della confluenza tra i fiumi Agno e Guà. Questo bacino



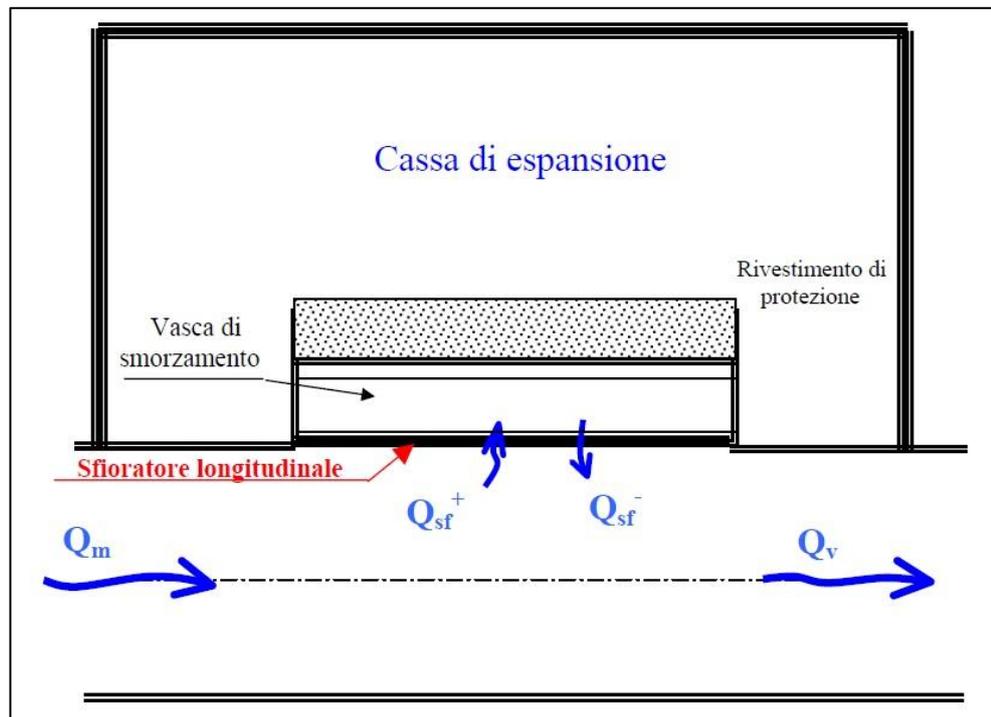


Figura 28. Cassa munita di sfioratore longitudinale.

2) oppure attraverso una presa di derivazione, rappresentata da una traversa in corsi d'acqua di piccola larghezza, munita di uno sfioratore e di una bocca limitatrice di portata per derivare una parte della portata all'interno della cassa. Nel secondo caso abbiamo due sfioratori: uno per l'ingresso (IN) e uno (OUT) che scarica l'eventuale eccesso di portata nel caso in cui il livello all'interno della cassa ecceda un determinato valore.

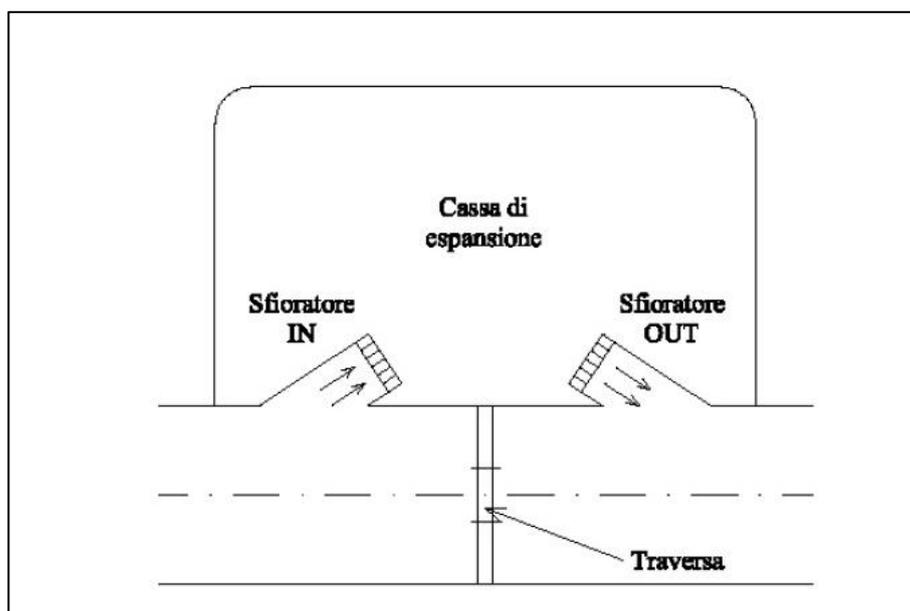


Figura 29. Cassa con due distinti sfioratori per l'ingresso e l'uscita dell'acqua.

Dal punto di vista della costruzione bisogna tener conto di alcuni accorgimenti: gli sfioratori devono prevedere adeguati diaframmi per evitare il pericolo di sifonamento e una vasca di smorzamento alla base del profilo, seguito da un livello di protezione composto da massi di adatte dimensioni appoggiati su uno strato di misto di fiume, a sua volta rafforzato con un geotessile.

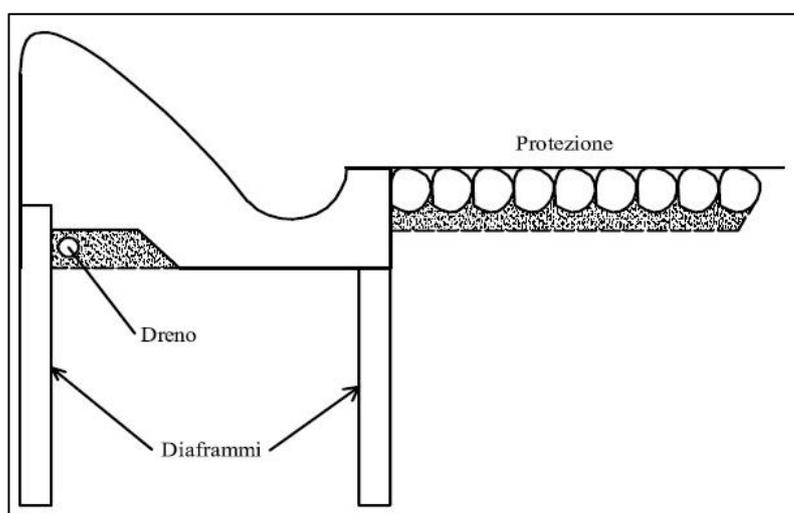


Figura 30. Sezione dello sfioratore.

La cassa, per avere a disposizione sufficiente capacità efficace, necessita inoltre di un'ampia estensione poiché il tirante dell'acqua al suo interno solitamente è di pochi metri. In aggiunta le aree interessate dalla cassa non devono presentare insediamenti e devono avere un basso valore dal punto di economico per far sì di limitare i costi d'esproprio, oppure devono riguardare aree demaniali di pertinenza del corso d'acqua, naturalmente soggette ad allagamento, che non abbiano particolari colture di pregio. L'area ovviamente deve essere il più pianeggiante possibile per permettere il contenimento della massima altezza degli argini di conterminazione della cassa. In caso contrario, si rende necessaria una suddivisione dell'area stessa con arginature secondarie, creando una serie di casse collegate da opportuni sfioratori di efflusso. In questa situazione la cassa più a monte sarà ad una quota più elevata rispetto a quella più a valle e presenterà uno sfioratore di INPUT. L'ultima invece avrà la possibilità di rendere al fiume l'eccesso di portata attraverso uno sfioratore di OUTPUT.

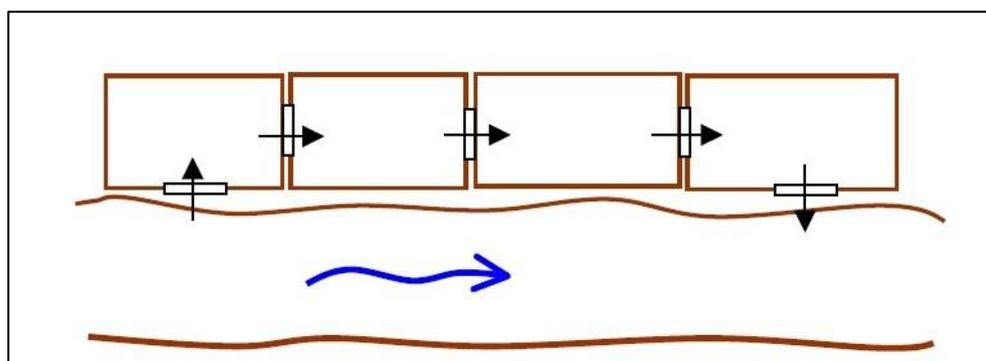


Figura 31. Casse di espansione in serie.

Se il corso d'acqua dovesse presentare ampie zone golenali (come ad esempio il fiume Po') sarebbe possibile sfruttarle al massimo prevedendo una serie di più casse, tutte indipendenti tra loro, singolarmente connesse al fiume attraverso un proprio sfioratore.

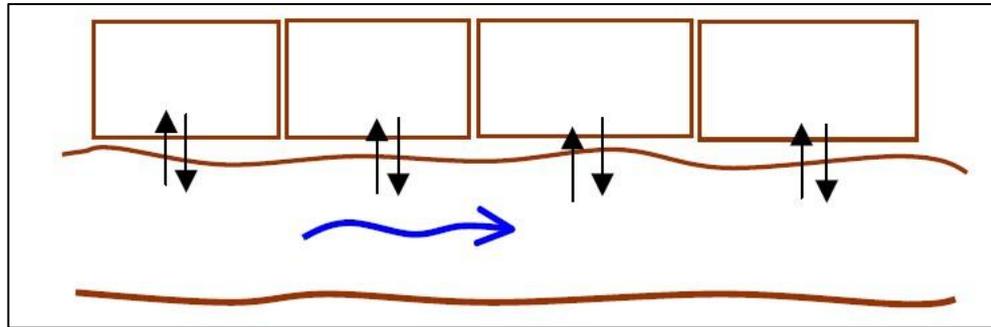


Figura 32. Serie di casse indipendenti.

La progettazione di una cassa d'espansione deve prevedere, oltre che caratterizzazioni da un punto di vista geologico, idrogeologico e geomorfologico, studi per valutare l'impatto sull'ambiente circostante e sull'ecosistema esistente. In generale queste opere tendono comunque a sfruttare il più possibile la morfologia del territorio, andando così a limitare la costruzione di nuovi argini artificiali. Ad esempio possono venire utilizzate aree di cava dismesse, arginature naturali legate a dorsali o massicciate già esistenti. Va aggiunto che tali opere creano ambienti umidi adatti allo sviluppo di vegetazione e di vari biotipi.

### ***5.2.1. Cassa provvista di sfioratore longitudinale***

Per quanto riguarda il funzionamento di una casa di espansione la quale sia provvista di uno sfioratore longitudinale, come nel caso in esame, esso può essere schematicamente descritto come segue. La portata comincia a sfiorare all'interno della cassa per  $t = t_1$ , quando l'altezza di valle  $h_v$  (il moto di corrente lenta è comandato da valle) è tale per cui  $h_v > h_p$  ( $h_p$  = altezza del petto dello sfioratore). Quando aumenta la portata  $Q_m$  proveniente da monte, aumenta il carico  $(h_v - h_p)$  sullo sfioratore e quindi aumenta anche  $Q_{sf}$  (portata sfiorata) fino al suo valore massimo in corrispondenza al colmo dell'onda di piena,  $Q_m^{MAX}$ , per  $t = t_c$  (trascurando gli effetti inerziali, altrimenti prima osservo  $Q_m^{MAX}$  e poi  $h_v^{MAX}$ , ovvero  $(h_v - h_p)^{MAX}$ ). Successivamente inizia a calare  $Q_m$ , diminuisce il

carico ( $h_v - h_p$ ) e diminuisce anche la portata entrante,  $Q_{sf}$ , sempre attraverso lo sfioro libero. Indicando con  $h_c$  l'altezza del pelo libero nella cassa, ad un certo punto per ( $t = t_2$ ), il livello invasato può raggiungere quello del petto dello sfioratore e diventare quindi un efflusso rigurgitato all'interno della cassa stessa, dato che nel fiume si ha ancora  $h_v > h_p$ . Se il livello dell'acqua all'interno aumenta ulteriormente, diminuisce  $Q_{sf}$ , fino a quando per  $t = t_3$ ,  $h_c = h_v$  si annulla. Per  $t > t_3$  diminuisce  $h_v$ , si verifica  $h_c > h_v$  e quindi si ha  $Q_{sf} < 0$ , cioè si avrà un flusso dalla cassa al corso d'acqua. Pertanto la portata del fiume  $Q_v$  a valle sarà maggiore di quella che arriva da monte,  $Q_m$ .

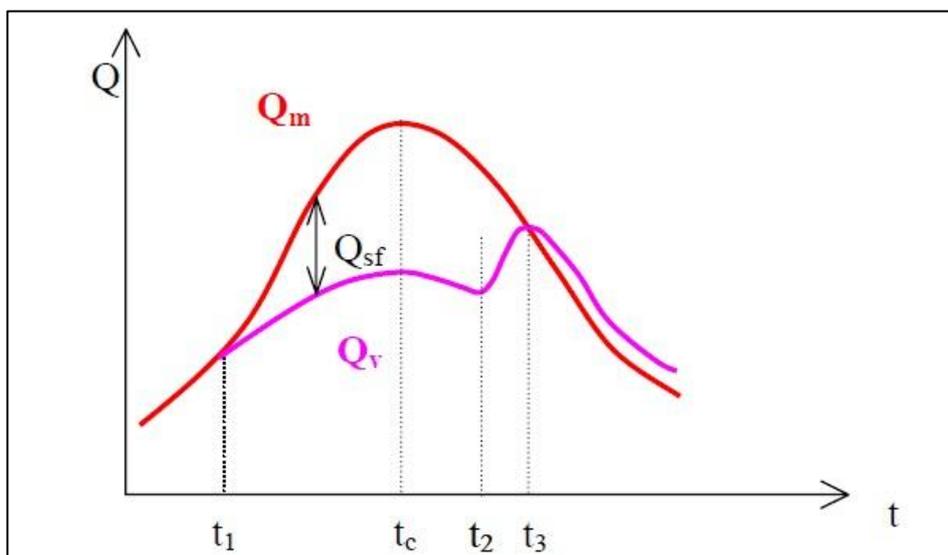


Figura 33. Funzionamento di una cassa di laminazione.

L'idrogramma di  $Q_v$  dipende dalle caratteristiche dello sfioratore longitudinale, lunghezza ( $L_{sf}$ ) e quota del petto ( $h_p$ ), e dal volume  $V_0$ . Andando ad analizzare le differenze al variare della lunghezza dello sfioratore,  $L_{sf}$ , lasciando inalterate le altre variabili, si può notare che se  $L < L_{OTTIMA}$ , sfioratore sottodimensionato, sfiorano nella cassa valori di  $Q_{sf}$  ridotti e quindi, non sfruttando tutto il volume  $V_0$  disponibile, non ottengo un effetto ottimale di laminazione. Se  $L > L_{OTTIMA}$ , sfioratore sovradimensionato, sfiorano nella cassa valori di  $Q_{sf}$  maggiori e quindi,

una volta riempita la cassa, si instaura un efflusso di tipo rigurgitato con annullamento della  $Q_{sf}$  e conseguente aumento della  $Q_v$ . Nel caso di  $L = L_{OTTIMA}$ , sfioratore ottimale,  $Q_v$  presenta due colmi uguali (uno che corrisponde al colmo dell'onda  $Q_m$  e l'altro nel momento in cui il riflusso attraverso lo sfioratore risulta essere massimo) e la laminazione dell'onda di piena è la massima ottenibile, con il risultato di avere il volume invasato uguale alla capacità utile  $V_0$ .

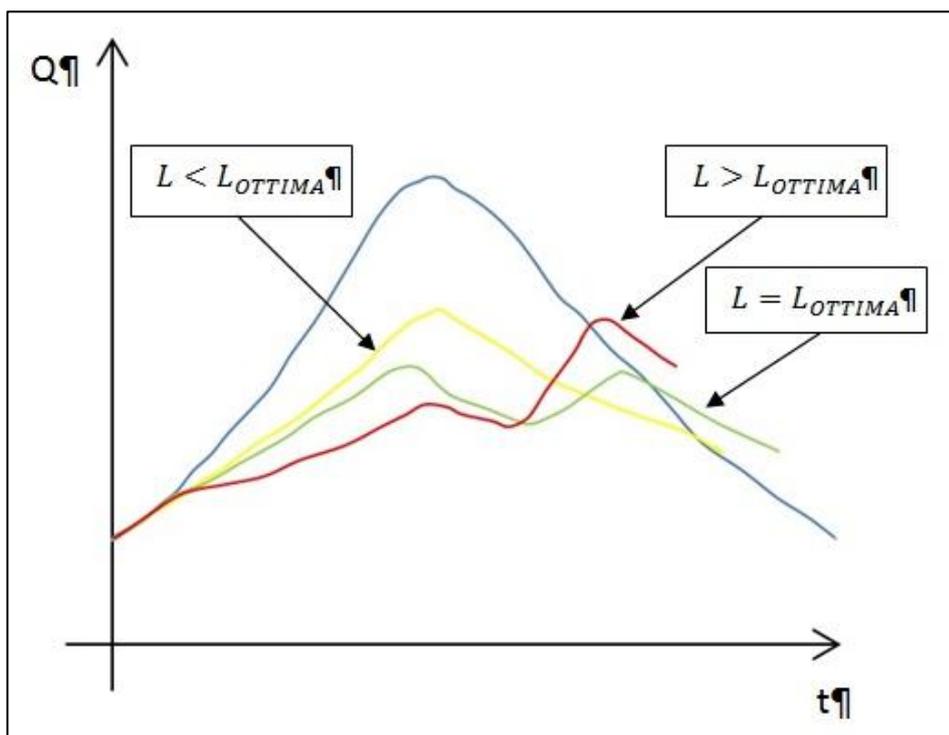


Figura 34. Laminazione prodotta da una cassa di espansione con sfioratore longitudinale.

Analoghi ragionamenti sono applicabili anche a quelle casse provviste di struttura di derivazione con sfioratori però distinti di ingresso e uscita dell'acqua dalla cassa stessa.

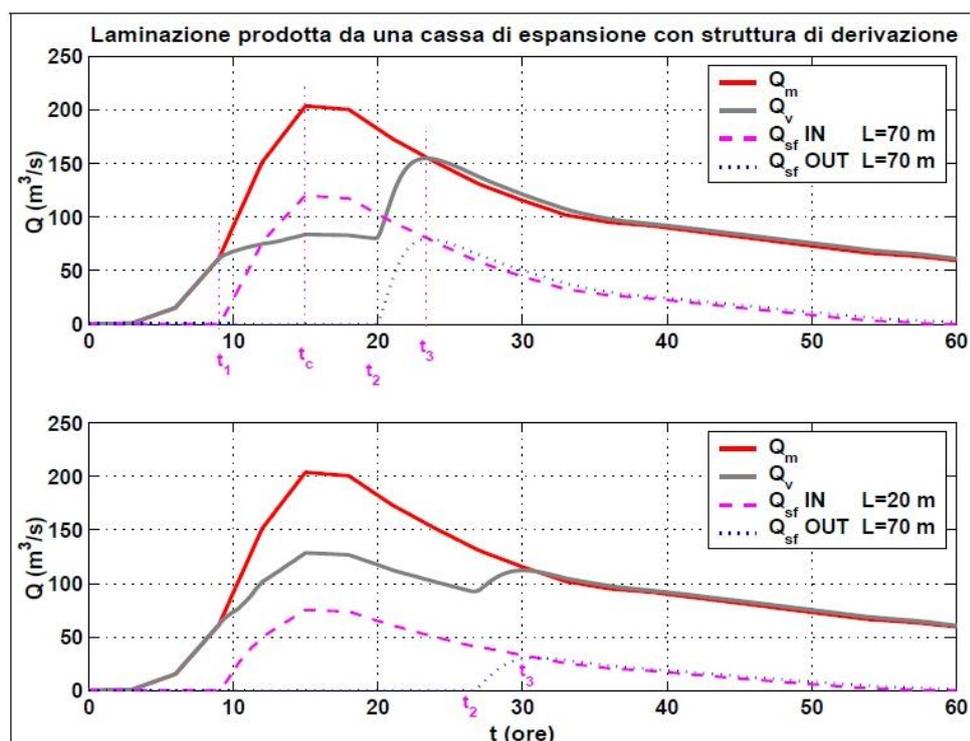


Figura 35. Laminazione prodotta da una cassa di espansione con struttura di derivazione.

La portata che fluisce all'interno della cassa dal corso d'acqua, mediante lo sfioratore longitudinale, viene calcolata con la seguente formula:

$$Q_{sf} = C_q L \sqrt{2g} (h - h_p)^{\frac{3}{2}}$$

Per poter calcolare la lunghezza  $L$  dello sfioratore viene presa in considerazione la seconda teoria di De Marchi (1934): nel caso di moto di corrente lenta, l'energia specifica  $H$  rimane costante su tutto lo sfioratore longitudinale interessato dalla sottrazione di portata e pari all'energia di valle ( $H = H_v$ ), il carico  $h - h_p$  aumenta da monte verso valle, mentre i termini cinetici e la portata vanno diminuendo.

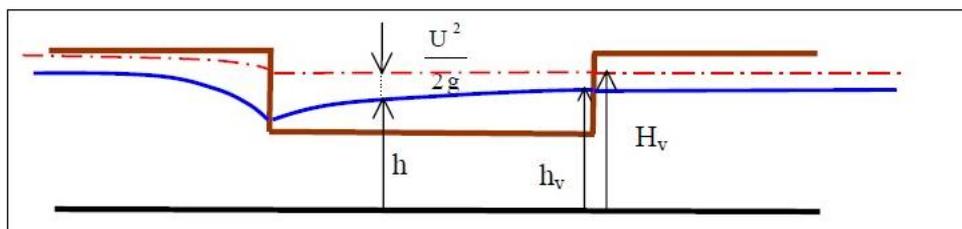


Figura 36. Teoria di De Marchi per il calcolo di L dello sfioratore.

Per quanto riguarda il riempimento, avviene in modo statico con il pelo dell'acqua sempre orizzontale (modello zero-dimensionale), mentre per il moto vario all'interno del corso d'acqua, si può assimilare ad una successione di moti permanenti, regolato dalle condizioni di valle rispetto allo sfioro longitudinale.

### 5.2.2. Posizionamento della cassa

Una volta che è stato scelto di risolvere il problema della zona oggetto dello studio attraverso una cassa di espansione, non resta che deciderne il posizionamento ideale lungo il corso del torrente Alpone, per far sì di proteggere l'abitato di Monteforte d'Alpone da future inondazioni. Due sono gli elementi fondamentali da considerare in questa fase: il primo è che la cassa va posizionata dove sia presente una vasta area pianeggiante e libera da insediamenti che offra già delle arginature in modo da facilitarne la messa in opera e da limitarne l'impatto ambientale ed economico; il secondo è verificare dove sono avvenute tracimazioni, sormonti e rotte arginali nella storia, per poi potersi posizionare più a monte. Analizzando la carta Geografica della zona e la Carta prodotta dalla Regione Veneto che presenta uno schema delle criticità dell'evento del 2010 e degli episodi precedenti (Allegato 2), ci si rende conto che solo due aree rispondono alle nostre esigenze: una appena a sud dell'abitato di Brognoligo-Costalunga e una più a nord lungo il corso dell'Alpone.



Figura 37. Posizione delle aree adatte ad accogliere la cassa di laminazione (immagine da Google Maps).

Nella presente tesi si è scelto di posizionare la cassa a sud dell'abitato di Brognoligo-Costalunga. Qui si trova, infatti, un pianoro naturale dalla forma che richiama quella di un triangolo, già delimitato sul lato ovest dagli argini del torrente Alpone e su quello a est da quelli di un piccolo corso d'acqua denominato Rio delle Carbonare, interamente occupato da vigneti e libero da insediamenti umani, fatta eccezione per due rustici disabitati. La costruzione di una massicciata sul lato a nord, quello che si affaccia sull'abitato, unitamente a delle piccole opere di innalzamento e irrobustimento degli argini del Rio delle Carbonare e di costruzione dello sfioratore, sarebbe stata sufficiente ad ottenere la cassa. In realtà il bacino presenta un naturale innalzamento dal vertice basso salendo verso Brognoligo-Costalunga e quindi sarebbe bastato un piccolo approfondimento del fondo per avere una buona capacità di invaso. Però non è opportuno prevedere lo

scavo del bacino in quanto comporterebbe l'esproprio dell'area invece della servitù di allagamento (con costi pari a 350.000 euro/ha invece di 80.000 circa, oltre all'impatto sociale).



## 6. Schematizzazione del dominio di calcolo

Inizialmente è stato scelto un tratto sufficientemente lungo da essere rappresentativo del torrente Alpone. La sezione interessata dallo studio va approssimativamente dal limite meridionale del territorio comunale di Montecchia di Crosara (circa 6 km più a nord dell'abitato di Brognoligo-Costalunga) fino alla confluenza con il torrente Chiampo. La prima operazione che si è resa necessaria, è stata quella di descrivere la forma del corso d'acqua e la conformazione del territorio circostante. Per fare questo si è reso necessario analizzare la cartografia, le ortofoto e tutta una serie di dati. Prima tutto si sono utilizzate delle ortofoto della zona che, in seguito, sono state mosaicate per essere unite e ottenerne quindi una sola di grandi dimensioni che contenesse interamente l'area di interesse per facilitarne l'utilizzo. Oltre alle ortofoto sono stati utilizzati la Carta Tecnica Regionale scala 1:5000, spesso sovrapposta all'ortofoto per avere un quadro più completo; le sezioni dei tre corsi d'acqua (torrente Alpone, Rio delle Carbonare e Roggia Vienega) con i rispettivi idrogrammi di piena per diverse durate di precipitazione. Gli idrogrammi sono divisi per tempi di ritorno (Tr 10, 20, 30, 50, 70, 100, 200, 300 anni), ognuno dei quali a sua volta è suddiviso per la durata in ore delle precipitazioni (6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60 ore) e per la forma dello ietogramma (M01: uniforme, M02: monotono crescente, M03: monotono decrescente, M04: triangolare isoscele, M05: doppio colmo, M06: random). Ci si è inoltre avvalsi del rilievo dei corsi d'acqua con le relative sezioni, delle quali si può vedere l'esatto posizionamento, assieme a quelle degli argini e degli assi, all'interno della CTR. Nei progetti di questo genere per la realizzazione e il dimensionamento di casse d'espansione si fa riferimento a piogge orarie con tempo di ritorno pari a 70 anni, durata 24 ore e si considerano gli idrogrammi di piena più gravosi per il sistema, quindi M02 (monotono crescente) e M05 (doppio colmo). La raccolta di tutti questi dati di tipo geografico e idrologico è stata necessaria per poter costruire un modello matematico per la zona oggetto di indagine. Per la creazione del reticolo di calcolo e la successiva analisi e

visualizzazione dei risultati si è utilizzato il software Incidenze, un'interfaccia grafica messa a disposizione dal Dipartimento di ICEA dell'Università di Padova.

## **6.1. Incidenze**

Come anticipato, Incidenze è un'interfaccia grafica che consente di modificare, creare, leggere file di tipo .GEO (file di geometria) sia del modello 1D che 2D; di tipo .SIM (file di simulazione); di tipo .CNT (file contenenti poligoni per la creazione del reticolo di calcolo). Oltre a questi si possono importare anche file raster .ECW, vettoriali .DXF di Autocad e .SHP di ESRI ArcView, di quote .XYZ (file che si mostrano come triplete di numeri che rappresentano le coordinate x, y e z di un punto conosciuto), .TIN (file di triangolazione) e caricare file di output che provengono dall'elaborazione del 2DEF, modello numerico. Questi output si possono vedere in grafici a video e si possono stampare in formato digitale o cartaceo.



Figura 38. Incidenze.

### **6.1.1. File principali**

Incidenze presenta una barra dei menù, che si trova nella parte alta dello schermo e che contiene una sequenza di comandi tra cui si possono trovare:

- File: presenta comandi per l'apertura, la creazione e la modifica dei file di geometria, di simulazione e di contorno, comandi per importare ed esportare file di vario tipo, per stampare in diversi formati, per caricare i risultati ed infine per uscire.
- Visualizza: permette la visualizzazione delle proprietà degli elementi che compongono il reticolo di calcolo (nodi, maglie, canali, tronchi) e dei file accessori (.SIM,.CNT,.XYZ,.OUT, .DXF,.ECW,.TIN).
- Modifica: permette di modificare gli elementi del reticolo di calcolo (nodi, maglie, canali, tronchi) e i file accessori (.SIM,.CNT,.XYZ,.OUT, .DXF,.ECW,.TIN).
- Risultati: permette di mettere in evidenza i parametri e i risultati delle simulazioni e del modello 1D e 2D, con le relative rappresentazioni grafiche, inoltre permette di esportare i file di restart e dei risultati in forma di quote xyz.
- Strumenti: presenta strumenti quali palette, restringimento della banda di calcolo, controlli sul reticolo di calcolo e sul contorno, sottomesh e liste di elementi, con le relative operazioni possibili.
- Utility: presenta comandi per la creazione e la modifica del reticolo di calcolo partendo direttamente dai dati.
- ? : presenta la guida in linea, da cui è stata presa parte della descrizione, informazioni sul programma e About Incidenze.

Appena al di sotto si trova una barra degli strumenti che contiene:

- nuovo: permette di creare nuovi file Geo, Sim e Cnt.
- apri: permette di aprire file Geo, Sim e Cnt già esistenti.
- salva: permette di salvare i file.
- stampa: permette di stampare con una stampante o attraverso grafici.
- grafici: permette di creare grafici di rappresentazione dei risultati secondo livelli, portate, profili 1D e 2D.
- puntatore: permette di attivare il puntatore nella parte attiva dello schermo.
- zoom in, zoom finestra e pan: permettono di zoomare e di spostarsi nella parte attiva dello schermo.

- misura: permette di misurare area, perimetro, numero di maglie, quota media, area e volume allagati del poligono considerato.
- help: permette di accedere alla guida in linea.

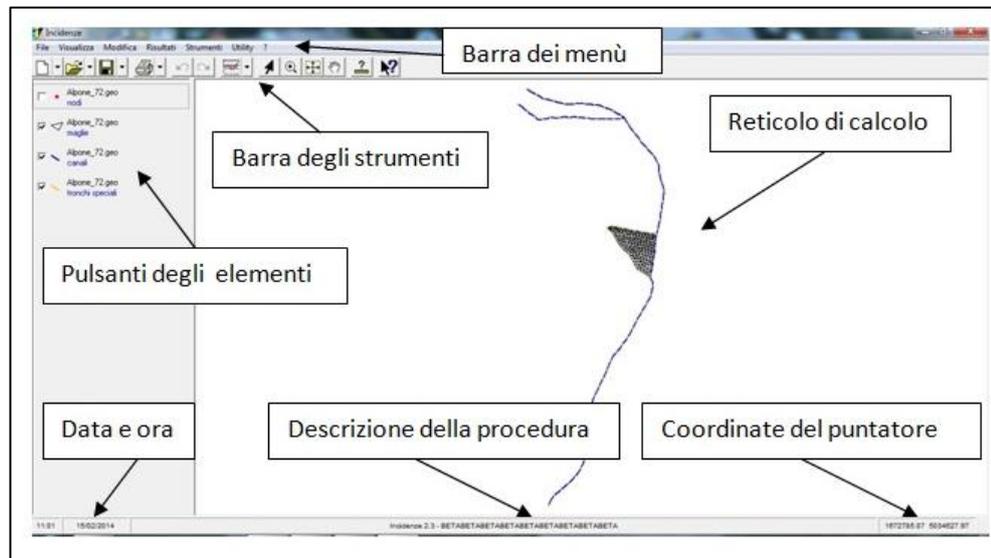


Figura 39. Schermata di Incidenza.

Lo schermo risulta ulteriormente diviso in due zone. Nella parte di sinistra si trovano i pulsanti degli elementi che compongono il reticolo uni-bidimensionale, quali nodi, canali, maglie, tronchi speciali, quelli dei file raster, vector e di triangolazione e anche quelli di simulazione, dei risultati, delle quote e dei contorni. Da qui si possono attivare anche le finestre delle proprietà e si possono evidenziare i layer che interessano. La parte destra invece presenta le dimensioni maggiori ed è quella attiva, dinamica. Qui si trova il reticolo di calcolo uni-bidimensionale, che può essere spostato, ingrandito e modificato. Per concludere nella parte inferiore si trovano le scritte che appaiono all'attivazione dei vari comandi e che descrivono la procedura da eseguire e, più a destra, la coordinate del puntatore. A sinistra invece data e ora.

## **6.2. Costruzione del modello**

Viene qui descritta passo dopo passo la procedura per la creazione del modello. In questo modo vengono creati, ad ogni salvataggio, dei file di tipo Geo.

### **6.2.1. Nodi**

Per prima cosa è necessario sovrapporre l'ortofoto mosaicata alla CTR, una volta fatta questa operazione si può iniziare a lavorare sul programma. Il primo passo è importare un raster in formato .ECW (il mosaico) e un file vector in formato .DXF (CTR con indicati l'asse e le sezioni).



Figura 40. Dettaglio della sovrapposizione del file .ECW con il .DXF.

È quindi necessario introdurre nel modello informazioni relative alla forma e alla geografia dell'Alpone e delle zone limitrofe. La prima operazione consiste nel creare una serie di nodi sull'asse del fiume. I nodi vanno inseriti approssimativamente ogni 50 m, cercando di avere una sezione circa a metà distanza tra due nodi successivi. Tale procedura è necessaria a monte, dove il

tracciato è più complicato e quindi le sezioni sono abbastanza fitte. Spostandosi verso valle, il fiume presenta minore variabilità spaziale e quindi anche le sezioni possono essere distanziate fino a raggiungere circa i 150 m. E' quindi necessario inserire dei nodi intermedi (senza sezione) per mantenere la spaziatura di partenza. Ovviamente, dove le sezioni per vari motivi sono più ravvicinate, i nodi vengono posizionati ad una distanza inferiore a 50 m. Analogamente si è proceduto per gli altri due corsi d'acqua: il Rio delle Carbonare e la Roggia Vienega.

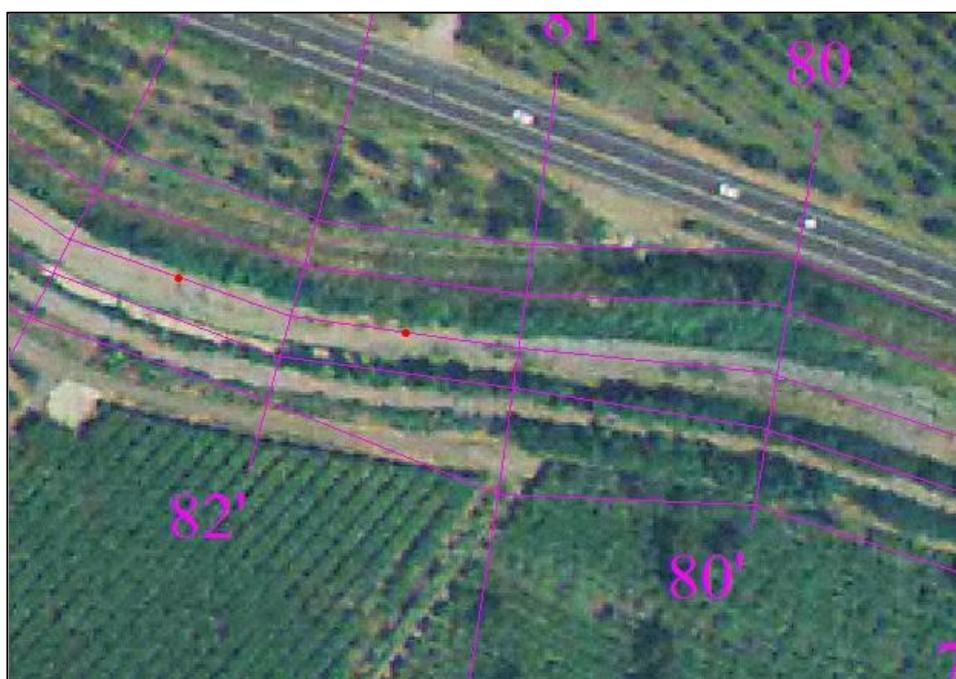


Figura 41. Fase di inserimento dei nodi.

### **6.2.2. Canali**

Tutti i nodi presenti su ognuno dei tre corsi d'acqua devono essere uniti tra loro, creando un canale monodimensionale tra due nodi successivi. Una volta eseguita l'operazione è quindi necessario attribuire le caratteristiche idrauliche e morfologiche a ciascun tratto di canale.

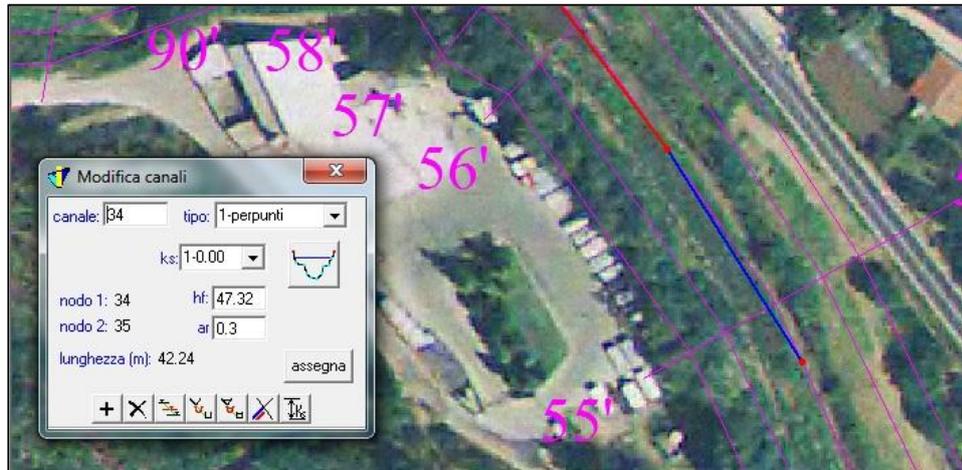


Figura 42. Costruzione dei canali.

Inserendo le informazioni ricavate dalle sezioni, elaborate poi in un foglio Excel, si costruisce, per punti, la sezione trasversale del canale, in ogni tratto.

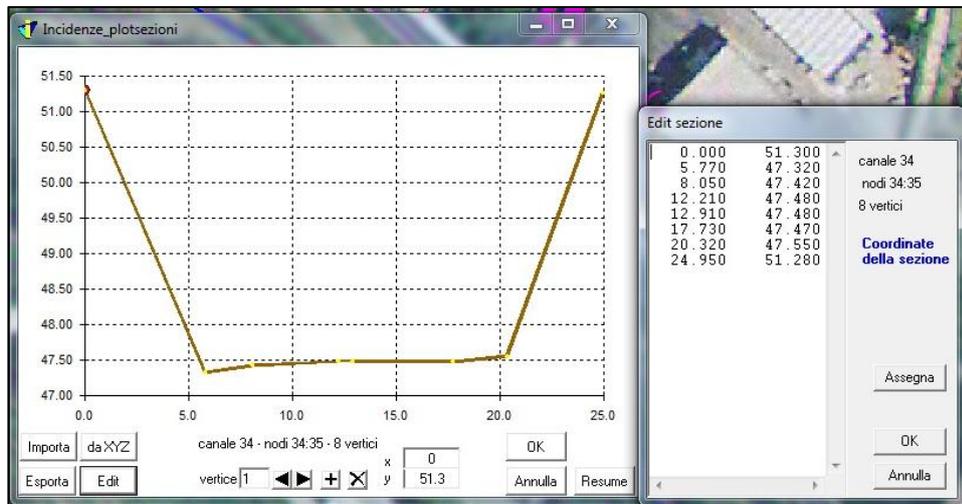


Figura 43. Dettaglio della costruzione per punti del canale.

Vanno poi inseriti i valori del coefficiente di Strickler,  $K_s$ , (coefficiente di scabrezza che dipende dalla natura del materiale che costituisce l'alveo) e il parametro  $\alpha_r$ , che rappresenta le macroscabrezza.

	Strickler $K_s$ ( $m^{1/3}/s$ )
<u>Condotti chiusi, canalette</u>	
Materiali molto lisci (vetro, plastica, metalli)	100 - 110
Cemento lisciato, cemento-amianto, legno piallato	90 - 100
Grès ceramico (fognature, condottipuliti)	100
" " (condotti incrostati)	-
<u>Canali di struttura muraria o rivestiti</u>	
Intonaco cementizio regolare, mattoni in vista	70 - 90
Asfalto	65 - 75
Intonaco grezzo, muratura ordinaria, gunite	45 - 60
Muratura di pietrame, intonaco alterato e depositi	35 - 60
Pietrame irregolare o a secco	30 - 45
Muratura scadente, depositi di limo	-
<u>Canali in terreno naturale</u>	
Terra nuda regolare	50 - 60
Terreno erboso regolare, lievi depositi	35 - 55
Vegetazione limitata, ghiaia pulita	35 - 45
Cattiva manutenzione (cespugli, terreno scavato meccanicamente, roccia scavata)	20 - 40
Folta vegetazione, stato di abbandono, irregolarità di percorso	10 - 20

Figura 44. Tabella del coefficiente di scabrezza.

Per i tratti di canale che al loro interno non sono caratterizzati dalla presenza di una sezione rilevata, è necessaria una interpolazione appoggiandosi al tratto subito a monte e subito a valle.

### **6.2.3. Cassa**

#### **6.2.3.1. Perimetro**

L'area scelta per accogliere la cassa va delimitata, disegnando per punti il perimetro.

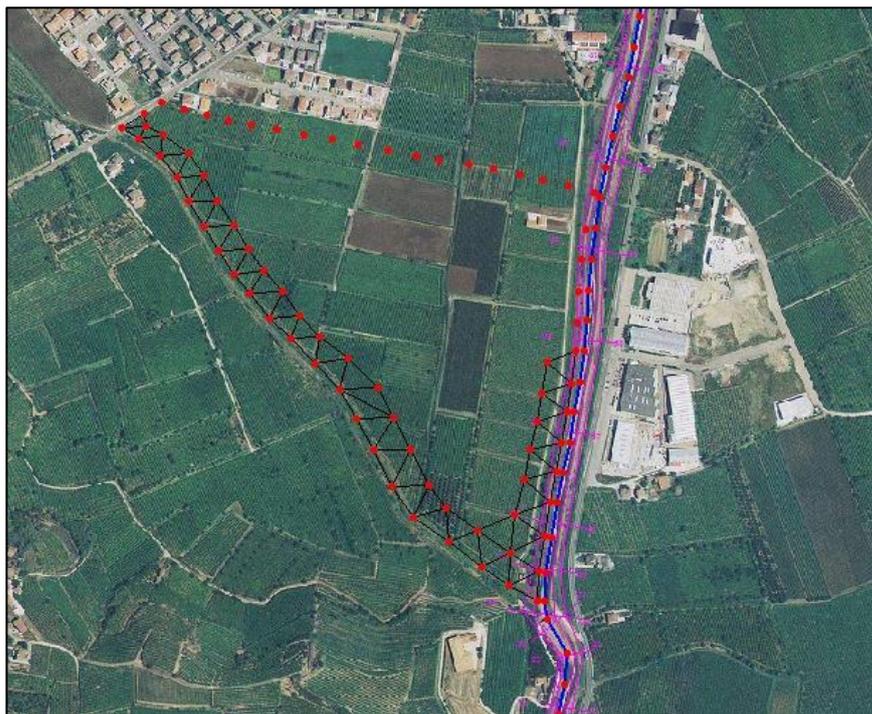


Figura 45. Costruzione del perimetro della cassa.

Va tenuto conto del fatto che il lato che si affaccia sull'abitato di Brognoligo-Costalunga deve essere delimitato da una massicciata, per gli altri due lati si sfruttano gli argini esistenti dei corsi d'acqua. Il passo successivo è di aggiungere sul lato esterno dei nodi paralleli a quelli appena inseriti lungo il perimetro e poi unirli a quelli esistenti attraverso dei tronchi speciali. Questi rappresentano il rilevato arginale e, come tali, rendono necessario specificare alcune caratteristiche: Categoria argine/traversa; coefficiente di portata (scelto a priori); larghezza sfioro (misurato direttamente su Incidenze a metà tra due tronchi successivi); e quota sfioro (reale per gli argini realmente esistenti, scelta a priori per quelli da costruire o modificare).

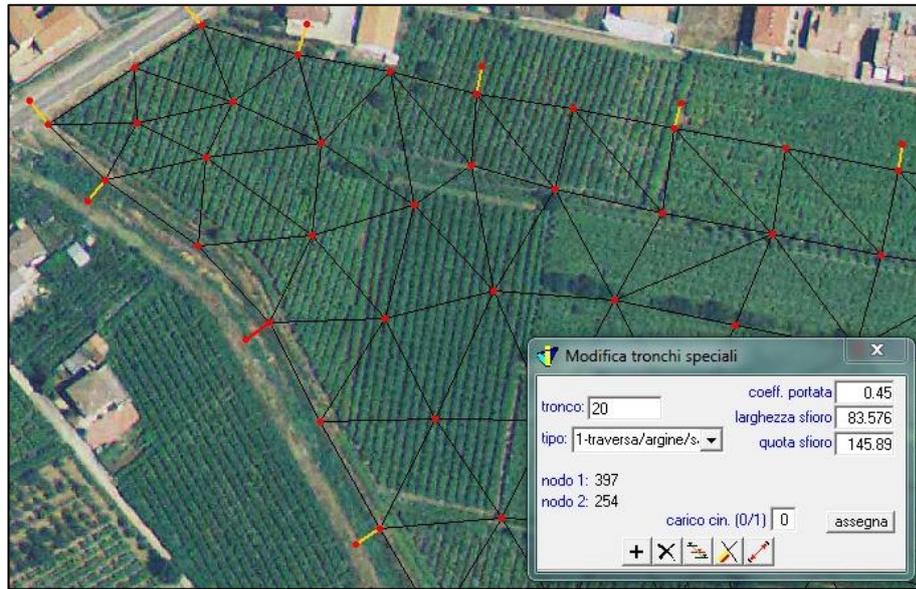


Figura 46. Dettaglio dei tronchi speciali.

Per posizionare la massicciata bisogna considerare che è consuetudine dimensionare le opere di difesa idraulica su eventi con tempo di ritorno di 70 anni. Con questa considerazione l'invaso dovrebbe avere una capacità di circa  $10^6 \text{ m}^3$ . Analizzando la quota degli argini dell'Alpone e del Rio delle Carbonare è ragionevole ipotizzare circa 3-4 metri di tirante massimo nella cassa. Per raggiungere la capacità ottimale servono quindi all'incirca  $3 \times 10^5 \text{ m}^2$  di superficie. La posizione della massicciata rispecchia questi ragionamenti, compatibilmente con l'ambiente circostante.

### 6.2.3.2. Maglie

All'interno della cassa vanno aggiunti dei nodi, posizionandoli in maniera tale da creare delle maglie triangolari una volta uniti tra loro. La maglia viene creata appunto unendo tra loro, in senso antiorario, tre nodi vicini e successivamente è necessario assegnarle un valore di  $K_s$  e del coefficiente  $\alpha_r$ . Per quanto riguarda la quota del fondo è necessario riferirsi alla CTR. Se all'interno della CTR si trova un punto quotato che ricade dentro a una maglia, è possibile utilizzare

direttamente quel valore della quota, in caso contrario si rende necessaria una interpolazione tra le maglie quotate al fine di quotare le restanti maglie.

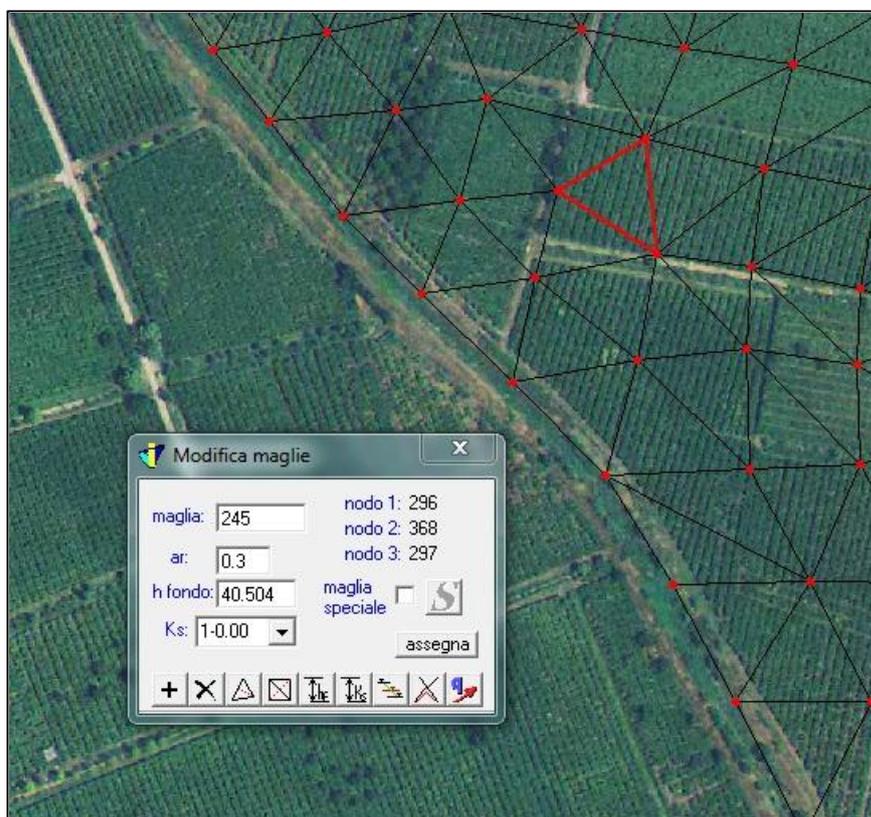


Figura 47. Costruzione delle maglie con la relativa tabella delle caratteristiche.

#### ***6.2.4. Argini fluviali***

Il modello matematico da allestire richiede di specificare le caratteristiche delle arginature dei corsi d'acqua schematizzati, al fine di poter individuare riduzioni dei franchi arginali, sormonti dei rilevati arginali e inondazioni dei territori circostanti alla rete fluviale. Per fare questo si aggiungono dei nodi parallelamente a quelli esistenti nei tre corsi d'acqua, su entrambi i lati, e poi si collegano tali nodi con dei tronchi speciali, che permettono così di schematizzare i rilevati arginali. Anche in questo caso si inserisce il coefficiente di portata, si misura e si inserisce la lunghezza dello sfioro e, utilizzando i profili, si immette la quota dello sfioro stesso. Lungo l'Alpone, verso lo spigolo basso della cassa, andrà

posizionato lo sfioratore che permette l'ingresso dell'acqua nella cassa stessa. Per stabilire le caratteristiche e le dimensioni dello sfioratore stesso, saranno necessari studi sulle onde di piena.

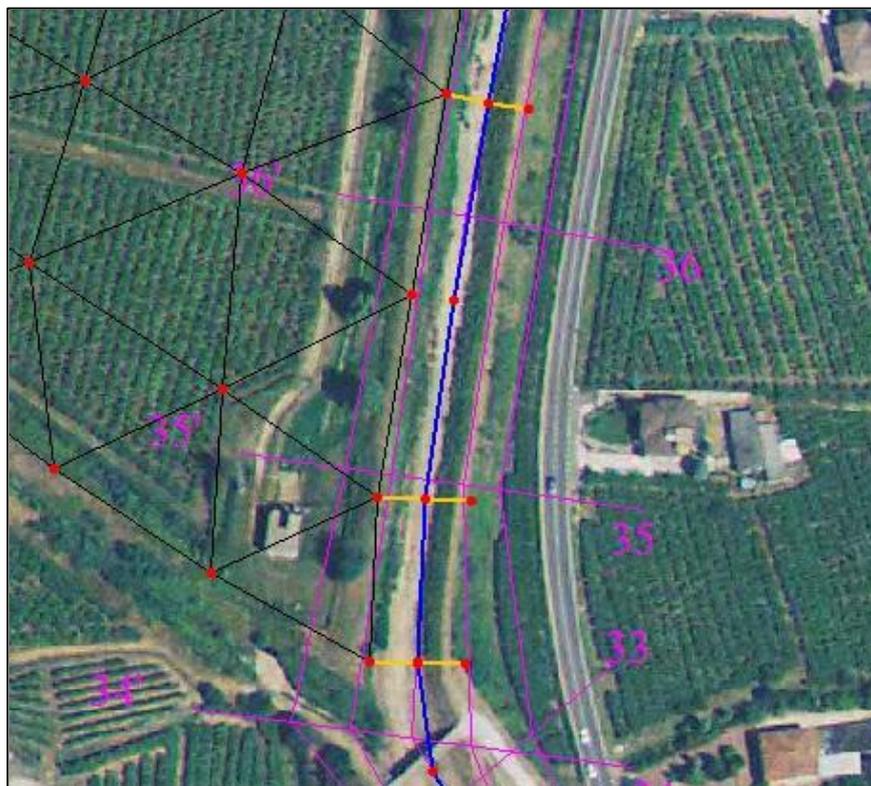


Figura 48. Dettaglio degli argini fluviali.

### ***6.3. Controlli***

Terminate tutte queste operazioni si può considerare conclusa la parte inerente la messa a punto del modello. Prima di passare alle fasi di modellazione delle piene è consigliabile eseguire un controllo. Il programma ci dà la possibilità di controllare che non ci siano errori (ad esempio nodi isolati o doppi, maglie di area nulla o invertite o sovrapposte, canali nulli o sovrapposti o sconnessi) che potrebbero in seguito compromettere il corretto funzionamento del modello e le relative analisi. Nel caso vengano riscontrati dei problemi ci viene indicata la posizione e il genere di inesattezza da correggere.

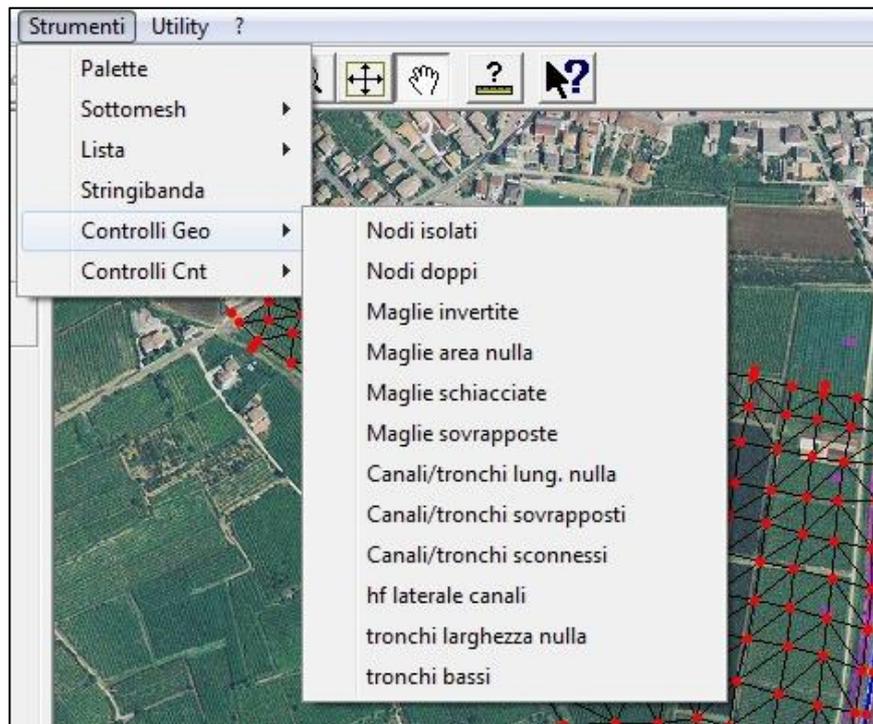


Figura 49. Fase di controllo.

#### 6.4. *Il reticolo di calcolo*

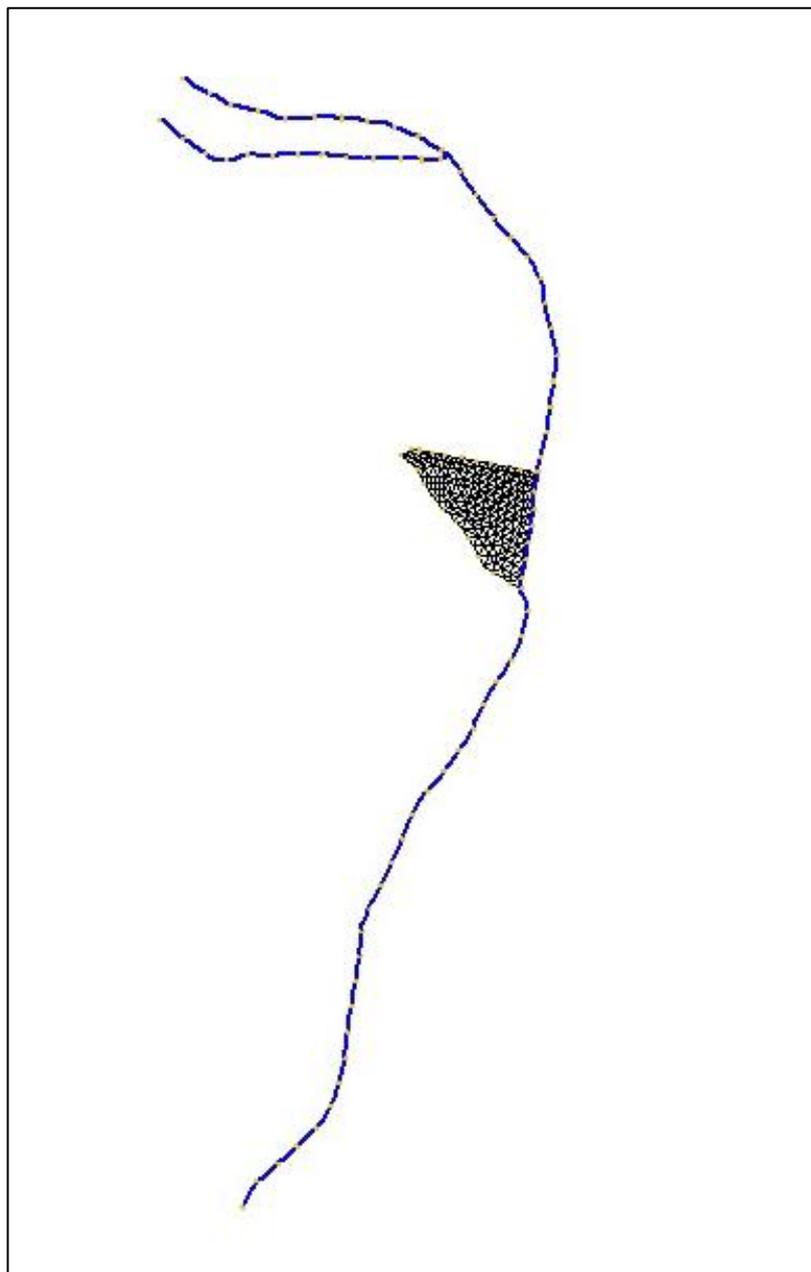


Figura 50. Rappresentazione del reticolo di calcolo che schematizza il tratto del torrente Alpone tra Montecchia di Crosara e la confluenza con il torrente Chiampo.

Alla fine delle operazioni appena descritte, si ottiene il reticolo di calcolo raffigurato in Figura 50. Il reticolo è costituito da 538 nodi, 206 tronchi canale, 164 tronchi speciali e 295 maglie.



## ***7. Risultati delle simulazioni: Analisi dello stato di fatto***

Una volta allestito il modello matematico si può iniziare ad analizzare la situazione attuale del sistema, considerando la risposta del sistema all'idrogramma di progetto, in primis, e ad una piena ricostruita sulla base dell'evento del 2010, in assenza della cassa di espansione.

### ***7.1. Condizioni al contorno***

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, con riferimento alla situazione di progetto, sono stati imposti a monte gli idrogrammi ottenuti per un tempo di ritorno pari a 70 anni e una durata di precipitazione pari a 24 ore, per il torrente Alpone, la Roggia Vienega e il Rio delle Carbonare.

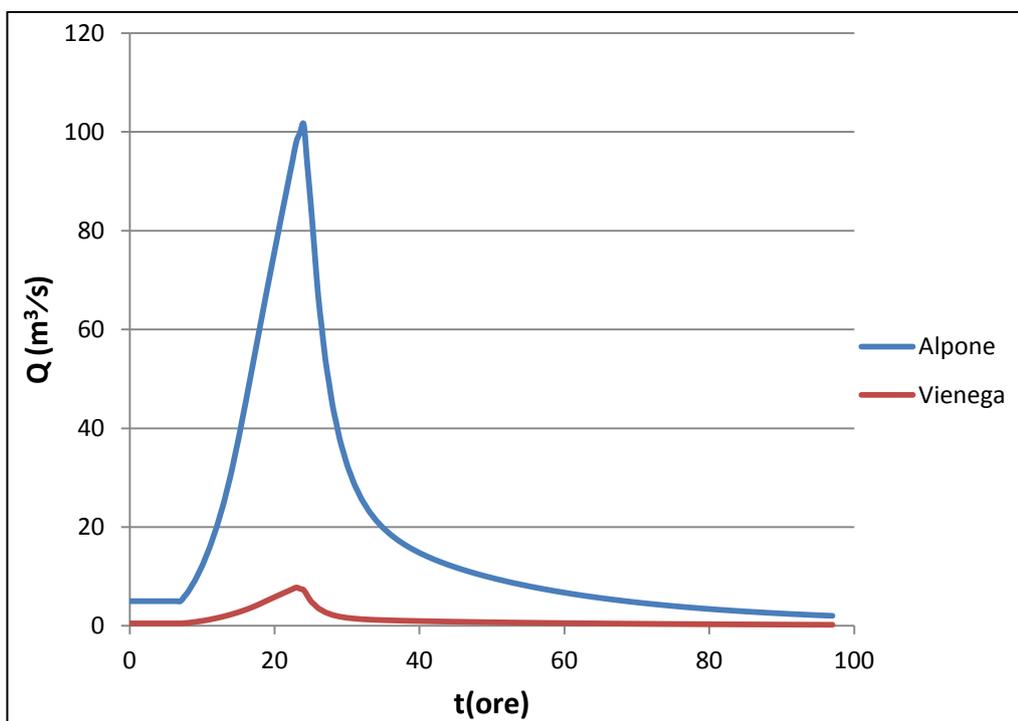


Figura 51. Andamento delle portate liquide, imposte come condizioni al contorno, nelle sezioni iniziali dei corsi d'acqua che costituiscono il reticolo di calcolo.

Con riferimento alla condizione di valle, invece, imposta nella sezione più a valle del reticolo di calcolo, si è imposto un livello pari a 35.00 m s.m.m., ovvero un livello circa 1 m inferiore al livello dell'arginatura nella sezione di valle considerata. Con riferimento a questa condizione di valle, è opportuno sottolineare che si è optato per non imporre una scala delle portate innanzitutto perché il torrente Alpone in condizioni di piena è fortemente rigurgitato dal Chiampo, e quindi sarebbe stato necessario riprodurre non soltanto il corso dell'Alpone ma anche il corso del Chiampo verso valle per avere una condizione al contorno significativa. D'altro canto, poiché l'interesse della presente tesi è concentrato sul dimensionamento di una cassa di espansione che si trova più di 4 km a monte della sezione di valle sopra citata, si è ritenuto che l'effetto della condizione al contorno imposta con il livello a valle, tendesse a ridursi in modo significativo verso monte, non avendo pertanto un'influenza rilevante sul dimensionamento della cassa stessa.

## ***7.2. Propagazione della piena associata ad una precipitazione di durata pari a 24 ore***

Si è inizialmente considerata la propagazione di onde di piena relative a precipitazioni di durata pari a 24 ore, con idrogrammi M02 e M05, per quanto riguarda la condizione attuale. Non avendo a disposizione misure per procedere ad una taratura del modello matematico, si sono considerati diversi valori del coefficiente di Strickler, rappresentando così diversi scenari.

L'analisi dei risultati inizia con l'analisi delle portate fluenti in funzione del tempo in alcune sezioni caratteristiche.

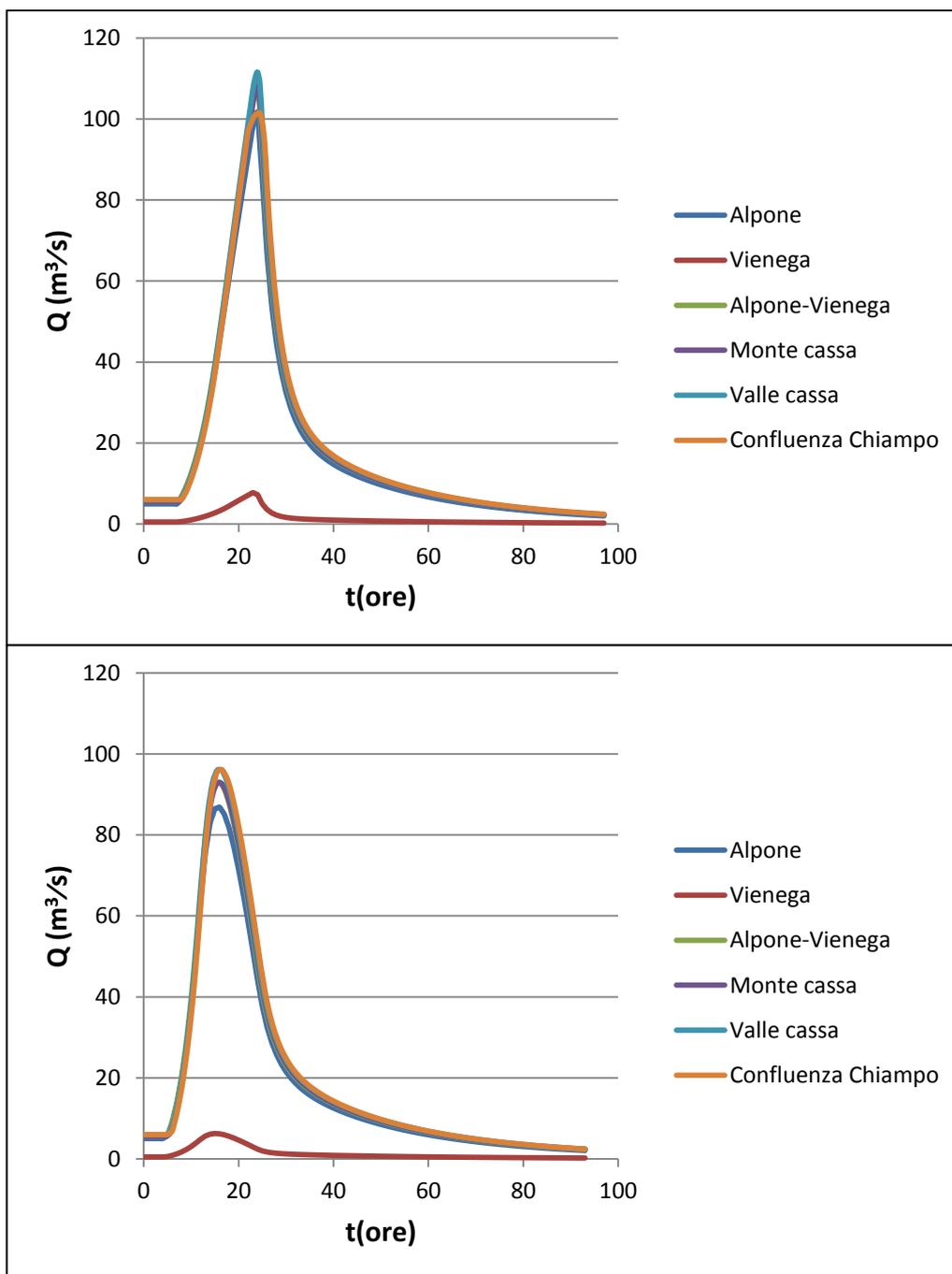


Figura 52 Andamento delle portate a moto vario in alcune sezioni caratteristiche del sistema considerato, indicate in Figura 53, nel caso in cui vengano imposti come condizioni al contorno nelle sezioni iniziali, gli idrogrammi di tipo M02 (sopra) e M05 (sotto), e nel caso in cui si assuma per il coefficiente di Strickler un valore di  $K_s=30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

La Figura 52 riporta l'andamento delle portate in alcune sezioni caratteristiche, indicate in Figura 53, ottenuta considerando un valore di  $K_s=30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

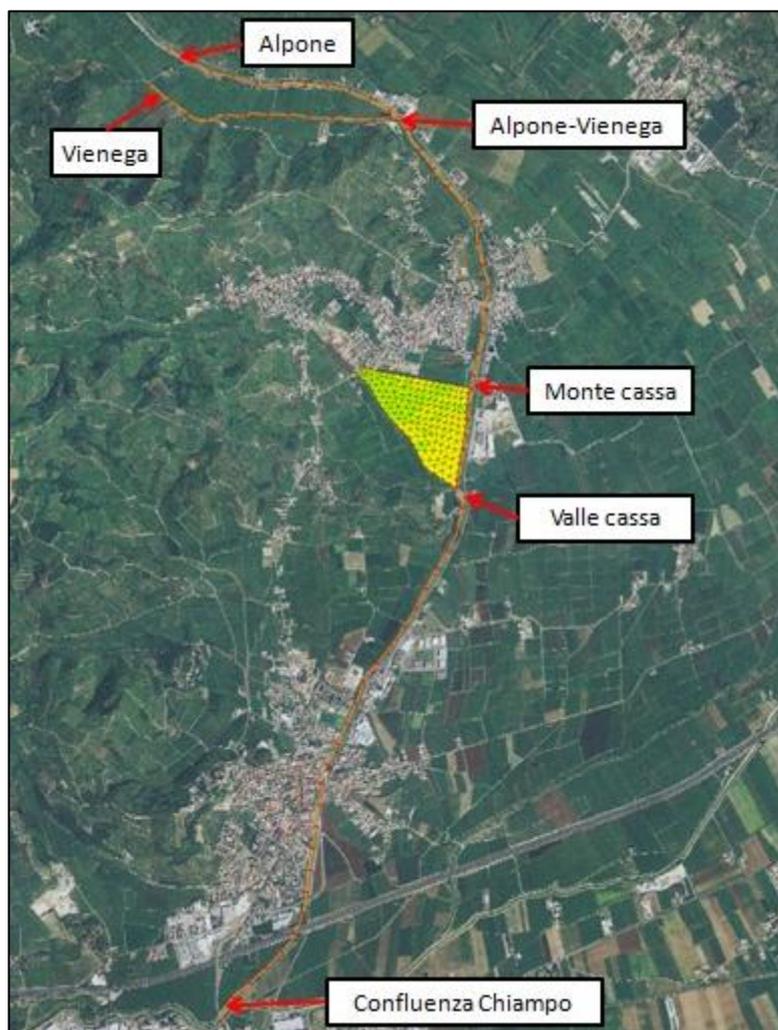


Figura 53. Rappresentazione del reticolo di calcolo su ortofoto, nella quale è indicata l'ubicazione di alcune sezioni caratteristiche considerate nelle analisi.

Se si prende in considerazione, ad esempio, il moto vario ottenuto imponendo a monte un idrogramma di tipo M02 per una pioggia di durata pari a 24 ore, è subito evidente che la portata imposta a monte sull'Alpone, che prima di raggiungere la sezione immediatamente a monte della cassa in progetto, si arricchisce per il contributo della Roggia Vienega, mentre a valle della cassa si somma anche alla portata del Rio delle Carbonare (per una portata totale pari a circa  $110 \text{ m}^3/\text{s}$ ), non

è in grado di transitare in sicurezza fino alla confluenza tra Alpone e Chiampo. La portata calcolata nella sezione di valle (confluenza Alpone-Chiampo), infatti, presenta un picco di portata attorno al valore  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , dovuta all'incapacità dell'alveo dell'Alpone di contenere le portate in transito, generando una fuoriuscita delle stesse sul territorio circostante, come evidenziato in Figura 54.

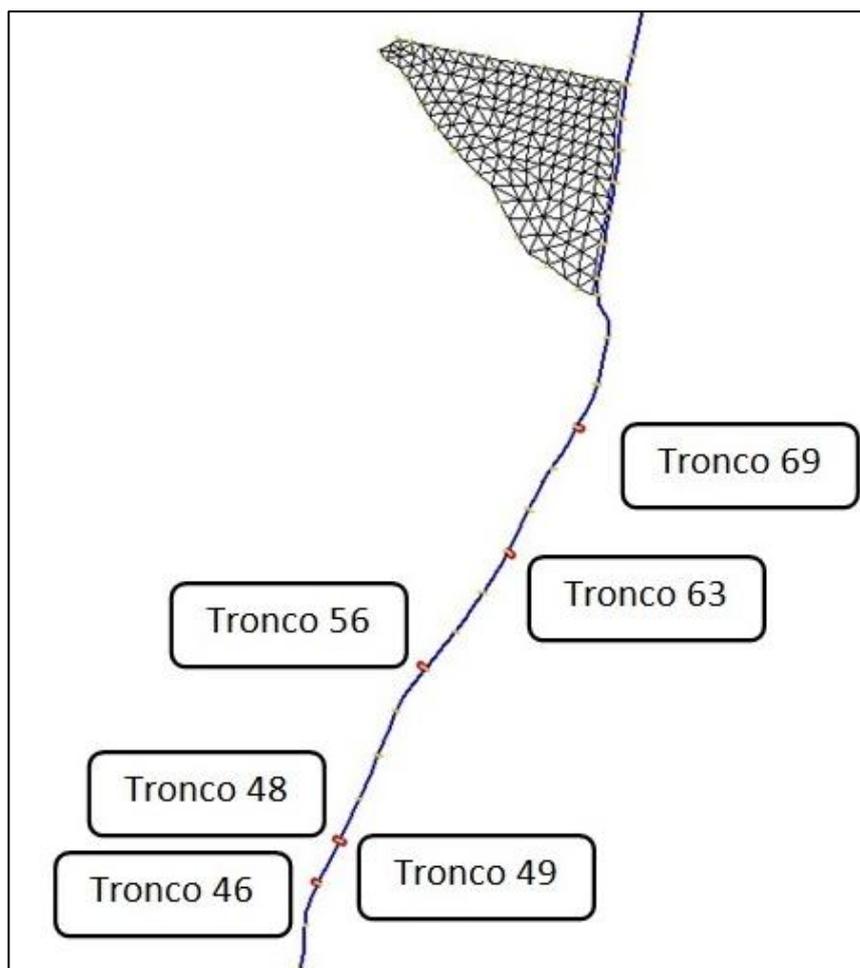


Figura 54. Mappa nella quale sono evidenziate le sezioni in corrispondenza alle quali si verificano sormonti delle strutture arginali (evidenziate in rosso) nel tratto dell'Alpone a valle della zona in cui si è qui proposto di realizzare una cassa di espansione.

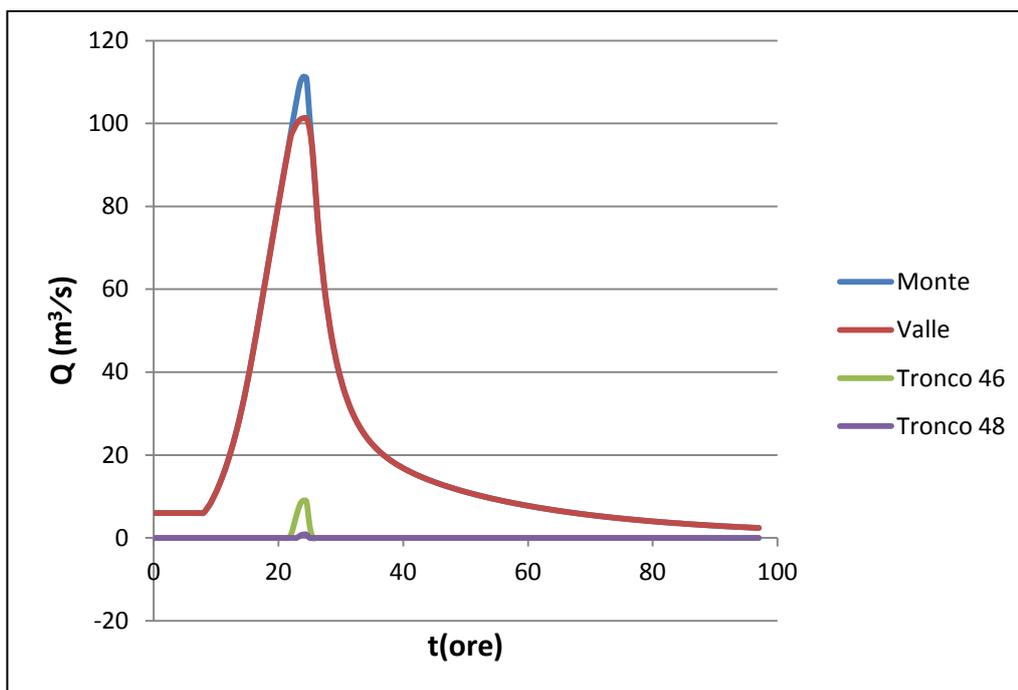


Figura 55. Andamento delle portate a moto vario in alcune sezioni caratteristiche del sistema considerato, indicate in Figura 53, e delle portate tracimate nelle sezioni indicate in Figura 54, nel caso in cui venga imposto come condizioni al contorno nelle sezioni iniziali, un idrogramma di tipo M02 e nel caso in cui si assuma per il coefficiente di Strickler un valore di  $K_s=30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

Nel grafico in Figura 55 sono evidenziate le portate fuoriuscite in corrispondenza dei tronchi sopra indicati (vedi Figura 54), la cui somma corrisponde alla differenza tra la portata nella sezione in corrispondenza alla zona a valle della cassa e la portata calcolata alla confluenza tra l'Alpone e il Chiampo.

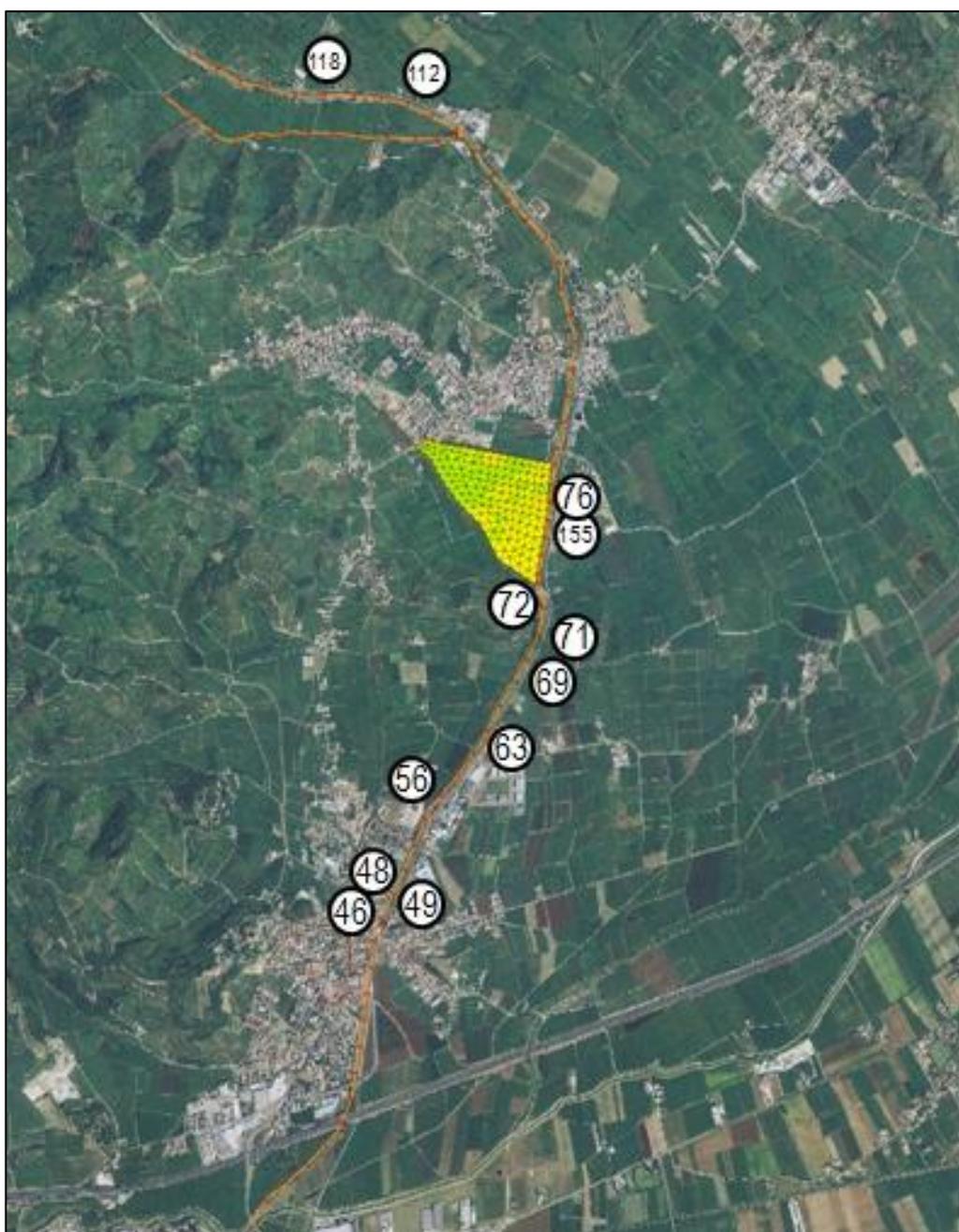


Figura56. Rappresentazione del reticolo di calcolo su ortofoto, nella quale è indicata l'ubicazione di alcuni tronchi speciali (utilizzati per rappresentare i rilevati arginali) considerati nelle analisi.

Il confronto tra le fuoriuscite osservate con il modello per la simulazione sopra descritta e quelle evidenziate nella *Carta evento del novembre 2010 ed episodi*

precedenti: schema delle criticità (Allegato 2), se pur relative ad una piena diversa, suggeriscono che il valore di  $K_s=30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  sia troppo elevato per rappresentare correttamente la condizione del corso d'acqua. Sono quindi state eseguite le stesse simulazioni assumendo diversi valori del coefficiente di scabrezza,  $K_s$ , ed in particolare, valori del coefficiente di scabrezza secondo Strickler pari a 25, 20, 15  $\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ . L'analisi dei risultati delle diverse simulazioni evidenzia differenze rilevanti, in particolare con riferimento alle portate che possono transitare a valle lungo il corso dell'Alpone. Questo è spiegabile considerando che valori decrescenti del coefficiente di scabrezza, comportano resistenze via via crescenti e conseguentemente un aumento dei livelli idrometrici massimi lungo il corso d'acqua, facendo quindi aumentare la possibilità che si verifichino sormonti delle strutture arginali.

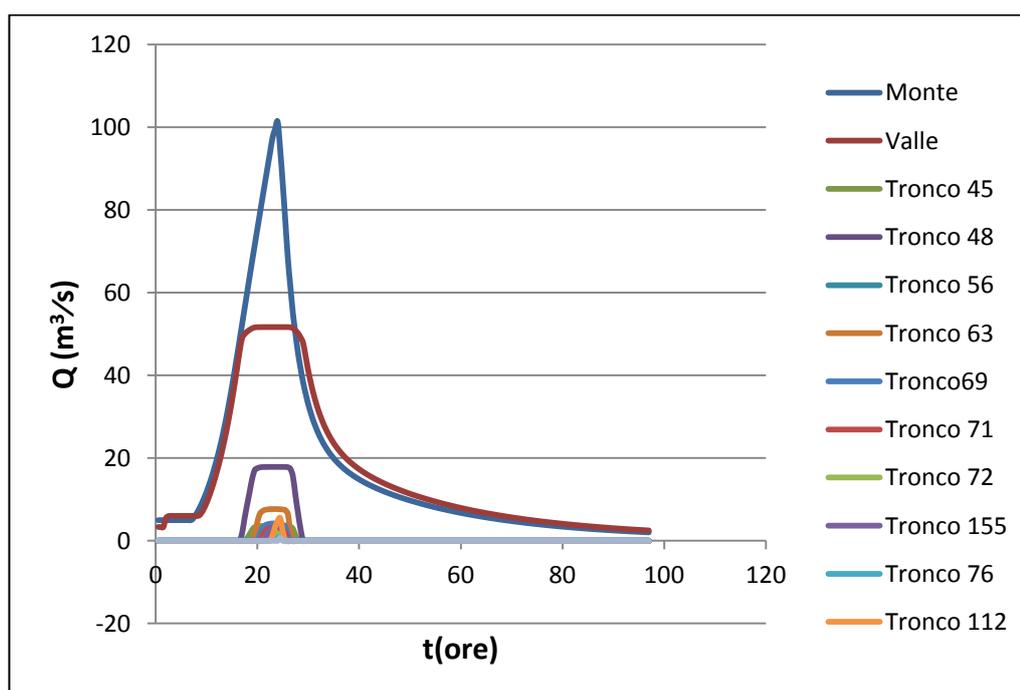


Figura 57. Andamento delle portate a moto vario in alcune sezioni caratteristiche del sistema considerato, indicate in Figura 53, e delle portate tracimate nelle sezioni indicate in Figura 56, nel caso in cui venga imposto come condizioni al contorno nelle sezioni iniziali, un idrogramma di tipo M02 e nel caso in cui si assuma per il coefficiente di Strickler un valore di  $K_s=15 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

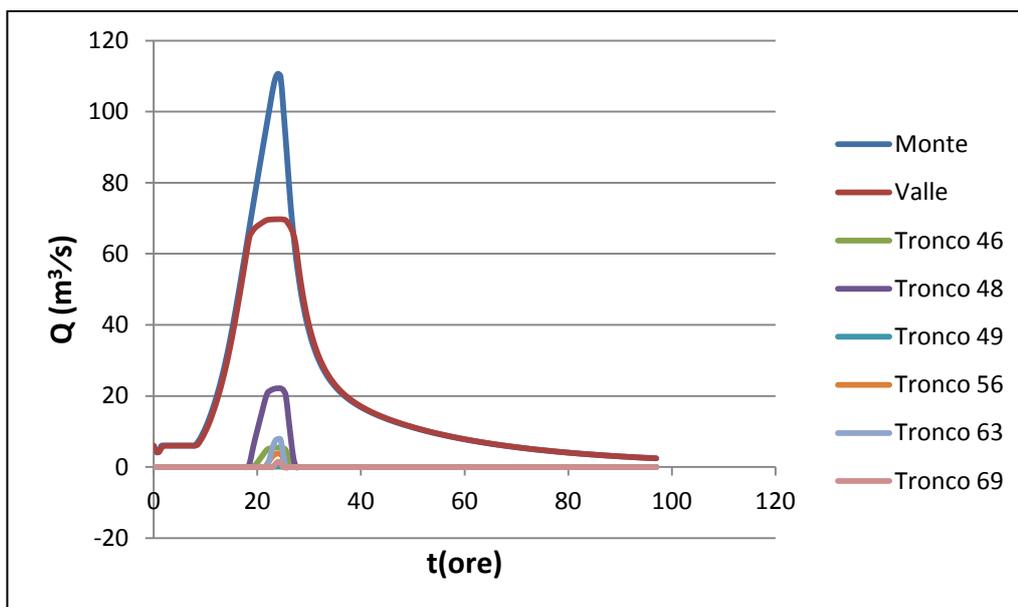


Figura58. Andamento delle portate a moto vario in alcune sezioni caratteristiche del sistema considerato, indicate in Figura 53, e delle portate tracimate nelle sezioni indicate in Figura 56, nel caso in cui venga imposto come condizioni al contorno nelle sezioni iniziali, un idrogramma di tipo M02 e nel caso in cui si assuma per il coefficiente di Strickler un valore di  $K_s=20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

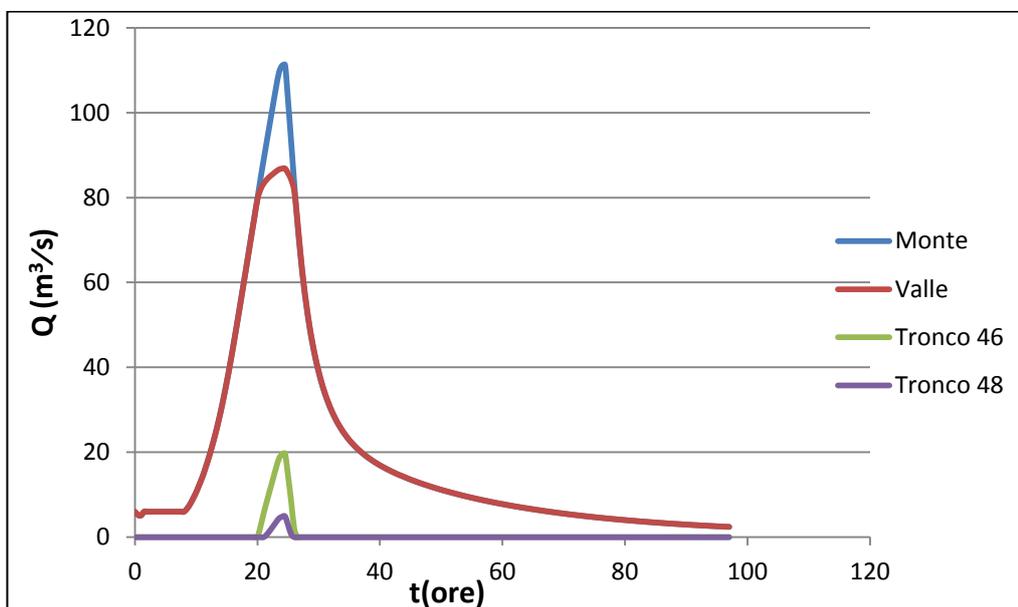


Figura 59. Andamento delle portate a moto vario in alcune sezioni caratteristiche del sistema considerato, indicate in Figura 53, e delle portate tracimate nelle sezioni indicate in Figura 56, nel caso in cui venga imposto come condizioni al contorno nelle sezioni iniziali, un idrogramma di tipo M02 e nel caso in cui si assuma per il coefficiente di Strickler un valore di  $K_s=25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

Il comportamento del torrente Alpone può essere anche studiato analizzando l'andamento dei profili delle massime quote idrometriche che si realizzano lungo il corso del torrente Alpone. Su Incidenze, all'interno dello strumento "grafici", c'è la possibilità di estrarre profili 1D e 2D.

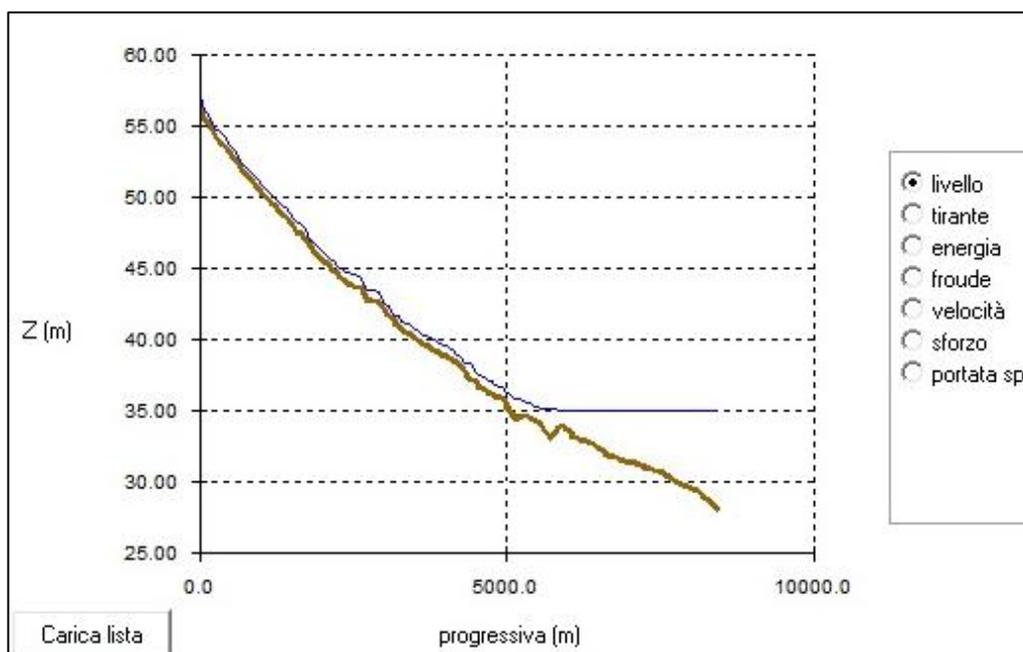


Figura 60. Esempio di profilo 1D del tratto del torrente Alpone che va dalla sezione di monte (si veda la Figura 53) alla sezione di valle in corrispondenza con la confluenza con il torrente Chiampo.

Il profilo mostra un esempio dell'andamento del pelo libero in condizioni di magra assieme all'andamento del profilo del fondo.

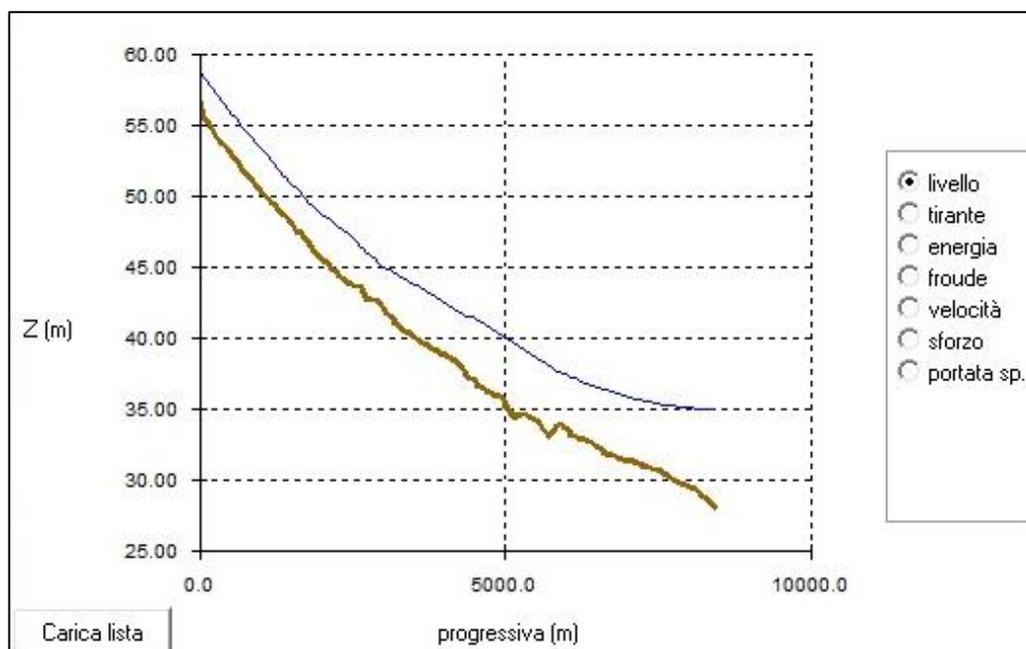


Figura 61. Profilo del fondo del tratto del torrente Alpone che va dalla sezione di monte (si veda la Figura 53) alla sezione di valle in corrispondenza con la confluenza con il torrente Chiampo, rappresentato assieme all'involuppo dei massimi livelli idrometrici ottenuti, nella condizione attuale, imponendo nelle sezioni di monte idrogrammi di tipo M02 e assumendo per il coefficiente di Strickler un valore di  $K_s=20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

La Figura 61 mostra il profilo del fondo e l'involuppo delle quote idrometriche massime lungo il torrente Alpone, dalla sezione di monte alla sezione di valle, nel caso dell'idrogramma di progetto M02 per un valore del coefficiente di Strickler pari a  $20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ . Analoghi profili longitudinali delle quote idrometriche massime possono essere determinati per la condizione attuale e per i diversi valori del coefficiente  $K_s$  ( $30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ ,  $25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  e  $20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ ) e per le diverse situazioni di progetto del nel caso di un valore di  $K_s$  pari a  $20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  (valore ragionevole tra i più gravosi all'interno di quelli considerati). Assieme al profilo del fondo, si sono determinati anche i profili dei rilevati arginali (in destra e sinistra idrografica), dalla sezione di monte alla sezione di valle. Sono stati quindi raccolti tutti i dati relativi ai profili considerati in un foglio Excel, dal quale si è proceduto a costruire un grafico che contenesse tutte le informazioni utili, come evidenziato in Figura 62.

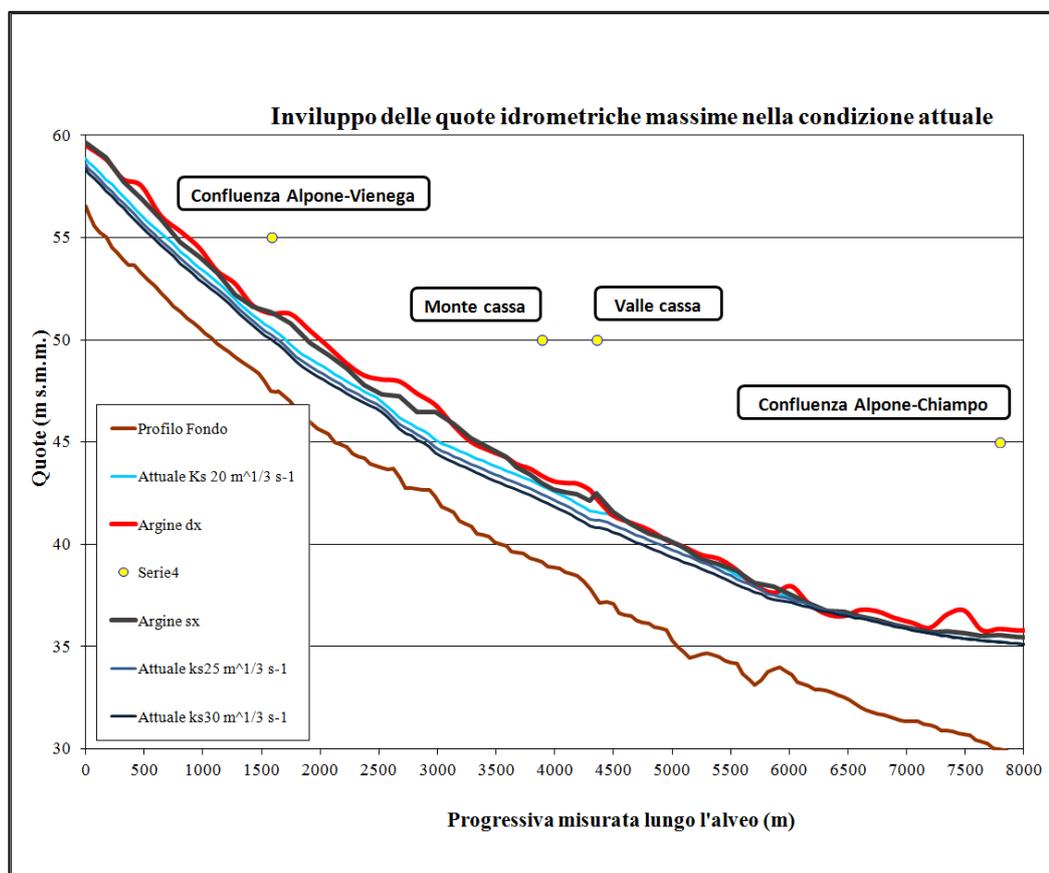


Figura 62. Profilo del fondo del tratto del torrente Alpone che va dalla sezione di monte (si veda la Figura 53) alla sezione di valle in corrispondenza con la confluenza con il torrente Chiampo, e confronto tra gli inviluppi dei massimi livelli idrometrici ottenuti, nella condizione attuale, imponendo nelle sezioni di monte idrogrammi di tipo M02 e assumendo per il coefficiente di Strickler i valori  $K_s=20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ ,  $K_s=25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  e  $K_s=30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

La linea marrone rappresenta il fondo dell'alveo, le linee tendenzialmente a quote più elevate (rossa e nera) indicano, rispettivamente, le quote dell'argine destro e dell'argine sinistro, mentre le linee colorate rappresentano gli inviluppi delle quote idrometriche massime, nel caso attuale, per diversi valori del coefficiente  $K_s$ . La linea più in basso rappresenta il caso con  $K_s$  pari a  $30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ , all'estremo opposto troviamo la linea che rappresenta il caso con  $K_s$   $20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ . Si nota che a valle, le quote idrometriche massime raggiungono e poi superano le quote arginali. In corrispondenza a questi punti si ha quindi la fuoriuscita delle acque dal torrente Alpone (si noti che i pallini gialli rappresentano la posizione di alcuni nodi di riferimento, procedendo da destra verso sinistra, questi nodi sono collocati

presso la confluenza tra l'Alpone e il Vienega, a monte della cassa e subito a valle e alla sezione di chiusura, ovvero la confluenza tra l'Alpone e il Chiampo).

I risultati fin qui presentati si riferiscono al sistema quando esso è forzato con l'idrogramma di tipo M02 che presenta picchi di portata più gravosi rispetto all'idrogramma M05, per il quale valgono sostanzialmente ragionamenti analoghi.

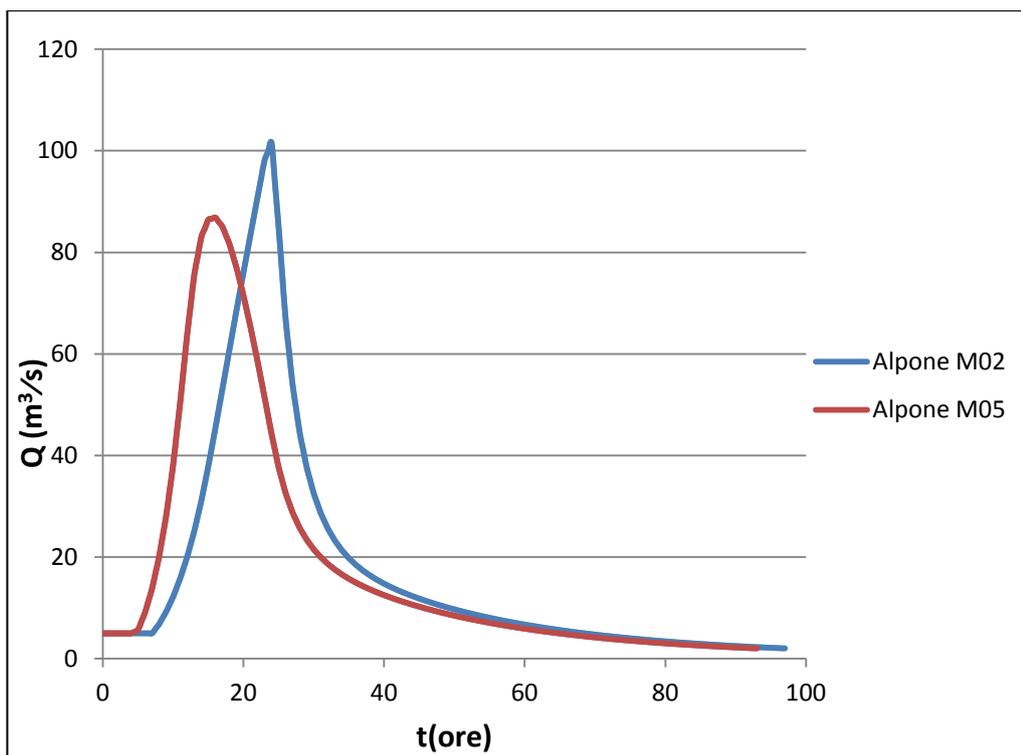


Figura 63. Grafico in cui si vede la differenza tra l'idrogramma M02 e M05.

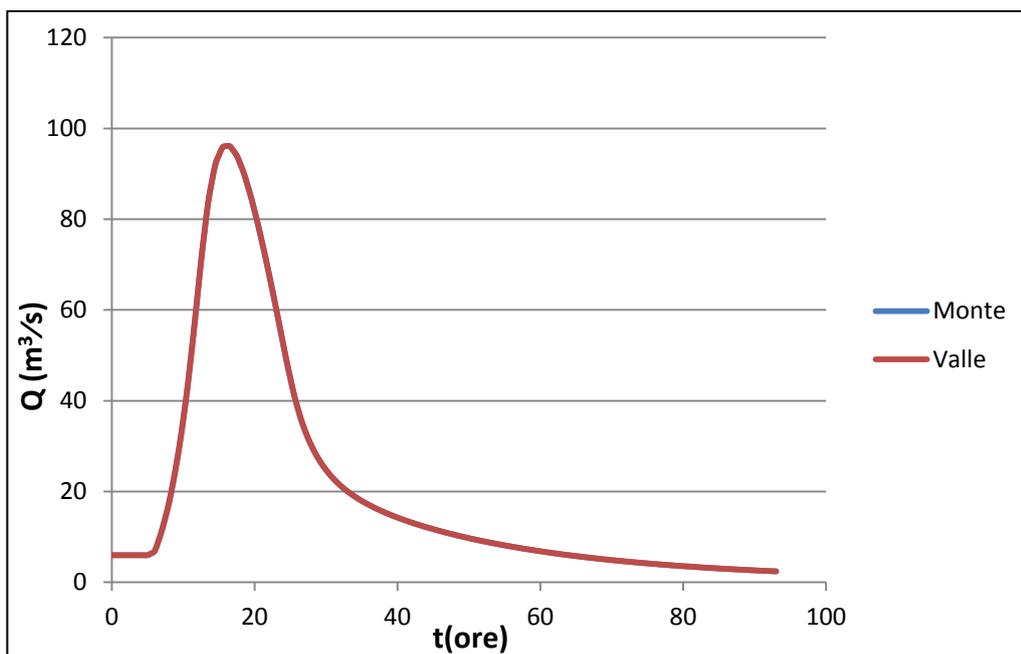


Figura 64. Grafico delle portate tracimate del moto vario per un idrogramma M05 con un valore di  $K_s=30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  (si noti come la portata di monte coincide con quella di valle, in assenza di tracimazioni).

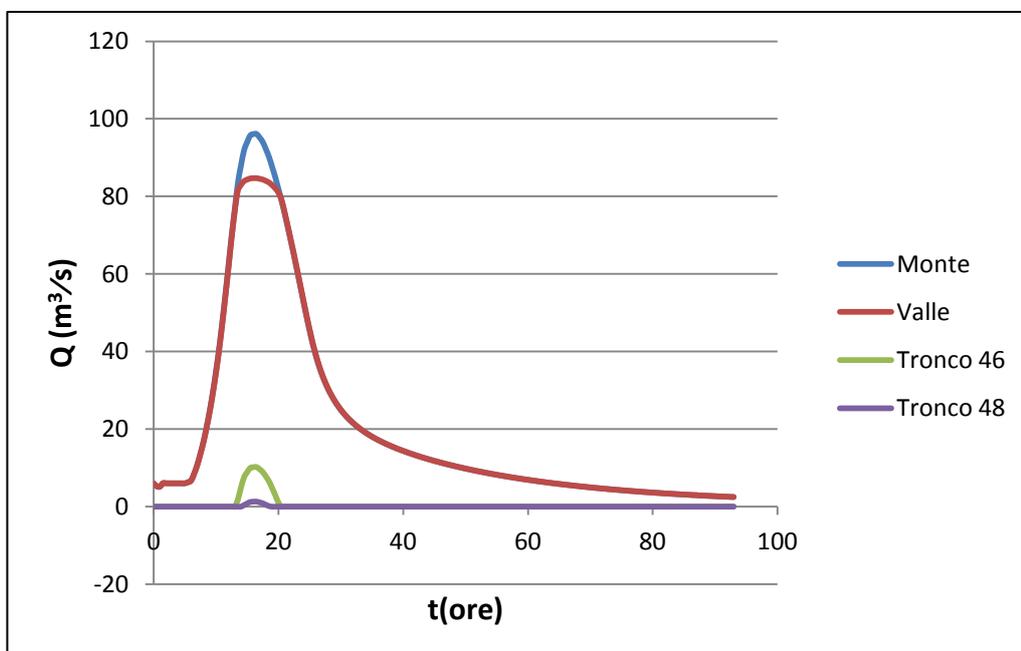


Figura 65. Grafico delle portate tracimate del moto vario per un idrogramma M05 con un valore di  $K_s=25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

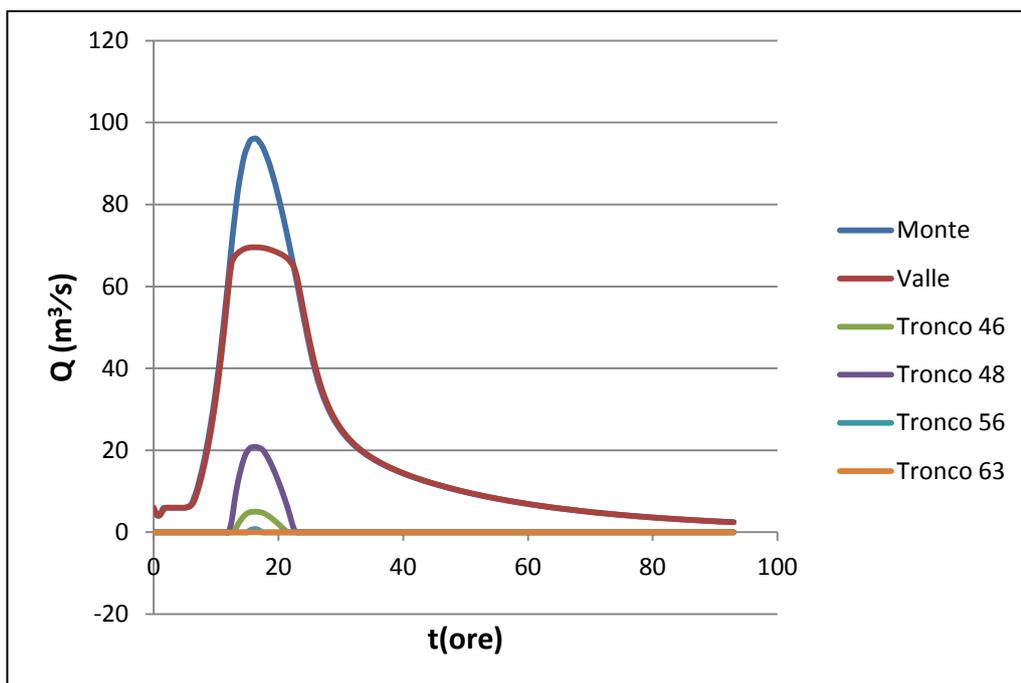


Figura 66. Grafico delle portate tracimate del moto vario per un idrogramma M05 con un valore di  $K_s=20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

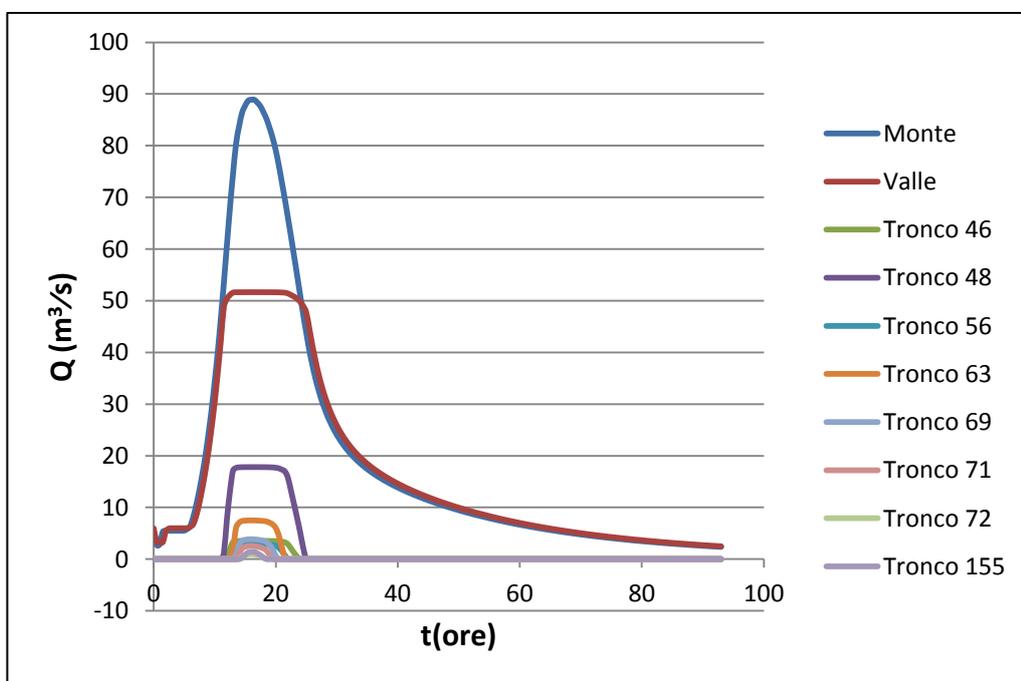


Figura 67. Grafico delle portate tracimate del moto vario per un idrogramma M05 con un valore di  $K_s=15 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

Si può, infatti, notare che il picco di portata è notevolmente più basso rispetto al caso in cui si consideri l'idrogramma M02. Tuttavia, per quanto riguarda il progressivo aumento delle differenze di portata tra monte e valle al diminuire del coefficiente di Strickler, le osservazioni sono analoghe a quelle portate per il caso precedente: al diminuire del coefficiente  $K_s$  aumenta la portata tracimata.

## ***8. Risultati delle simulazioni: Analisi dei benefici attesi dalla cassa di espansione***

Dopo aver analizzato i risultati del moto vario sull'Alpone, è evidente che il sistema non può sopportare le portate di piena di progetto generate da piogge orarie di 24 ore che quindi causano esondazioni. Per ovviare a questo problema si è analizzato l'effetto di una cassa d'espansione che, abbassando il colmo di piena, renda sopportabili le portate evitando così che l'acqua esondi causando danni al territorio limitrofo.

### ***8.1. Dimensionamento della cassa***

Per procedere al dimensionamento della cassa è necessario definire le caratteristiche dell'opera di sfioro, essendo il volume della cassa sostanzialmente determinato, in quanto si è sfruttata per intero l'area in corrispondenza all'abitato di Brognoligo-Costalunga. Per prima cosa è necessario capire quale sia la capacità di invaso della cassa di laminazione, servendoci in prima approssimazione di semplici ragionamenti e delle informazioni ottenute dalla geometria del sistema.

La quota media del fondo della cassa,  $Z_{MEDIA}$ , è pari a 38.15 m, mentre l'area occupata dalla cassa stessa è pari a 300'800 m<sup>2</sup> (circa  $3 \times 10^5$  m<sup>2</sup>). Inoltre, la quota minima dell'argine dell'Alpone in destra idrografica, a margine della cassa, è di 42.20 m. Immaginando un franco di 1.20-1.50 m, è possibile quindi ricavare il massimo valore del tirante all'interno della cassa, che risulta pari circa a 2.50-2.80 m. Moltiplicando questo valore per l'area occupata dalla cassa si ottiene una stima per eccesso del massimo volume invasabile, pari a circa 840'000 m<sup>3</sup> (circa  $8.4 \times 10^5$  m<sup>3</sup>).

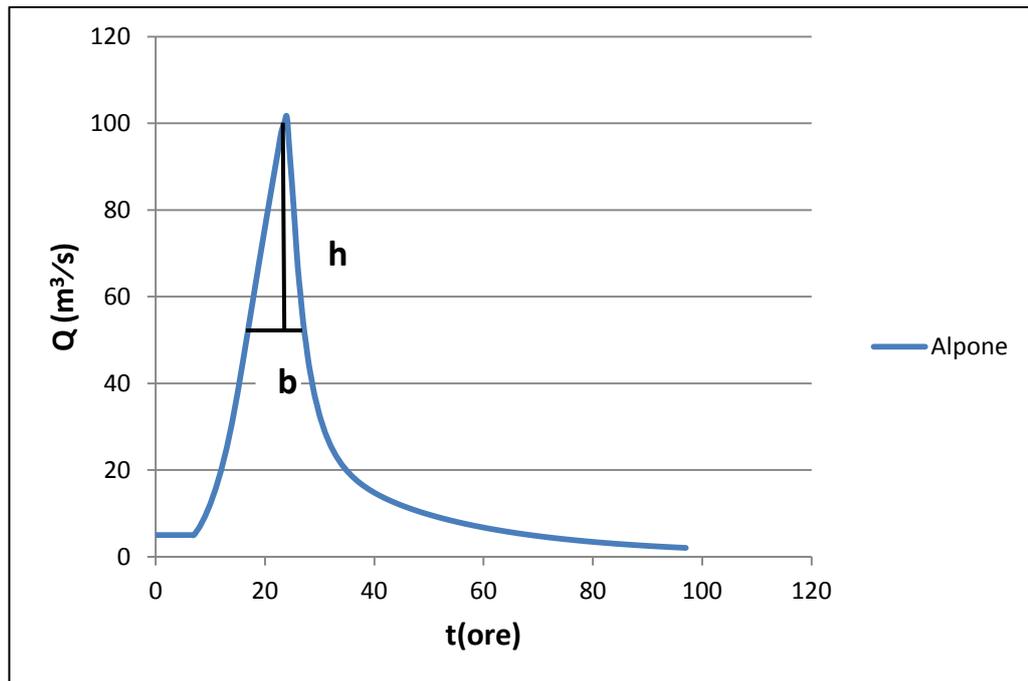


Figura 68. Grafico delle portate del moto vario per un idrogramma M02 con un valore di  $K_s=20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

Considerando l'andamento nel tempo delle portate liquide a monte della cassa, e assimilando la parte sommitale dell'idrogramma alla forma di un triangolo, si associa la linea orizzontale in Figura 68 alla base e quella verticale all'altezza. Noto il volume, per tentativi successivi, immaginando il caso di una derivazione a portata costante, si ottiene quindi con dei semplici passaggi matematici che l'altezza equivale a circa  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  da cui si ricava la massima portata che transiterebbe a valle nel caso ideale di una derivazione costante,  $Q_{MAX\_valle}$ , pari a circa  $55 \text{ m}^3/\text{s}$ . Fissata una lunghezza dello sfioratore,  $L$ , sufficientemente grande da consentire una derivazione il più vicino possibile quella ottimale ( $L=100 \text{ m}$ ), è necessario determinare la quota del petto dello sfioratore. La quota del petto dello sfioratore risulterà verosimilmente inferiore alla quota della superficie libera, in una sezione dell'Alpone a monte della cassa stessa, all'istante  $i$  cui si manifesta in quella sezione la portata  $Q_{MAX\_valle}=55 \text{ m}^3/\text{s}$ . Al tempo  $t=17.5$  ore, nella sezione sopra citata, in corrispondenza ad una portata pari a  $55 \text{ m}^3/\text{s}$  i risultati del modello

indicano un valore della quota idrometrica per a circa 40.90 m s.m.m.. Tale quota fornisce indicazioni sulla quota di partenza da assegnare allo sfioratore e da affinare con tentativi successivi.

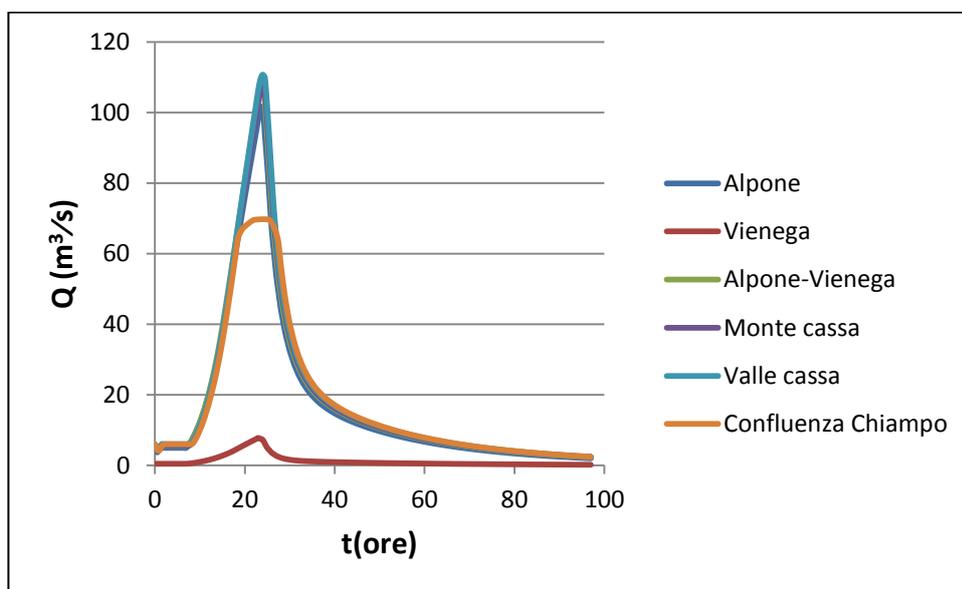


Figura 69. Grafico delle portate del moto vario per un idrogramma M02 con un valore di  $K_s=20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ , da cui ad esempio si possono ricavare i dati necessari per il dimensionamento della cassa.

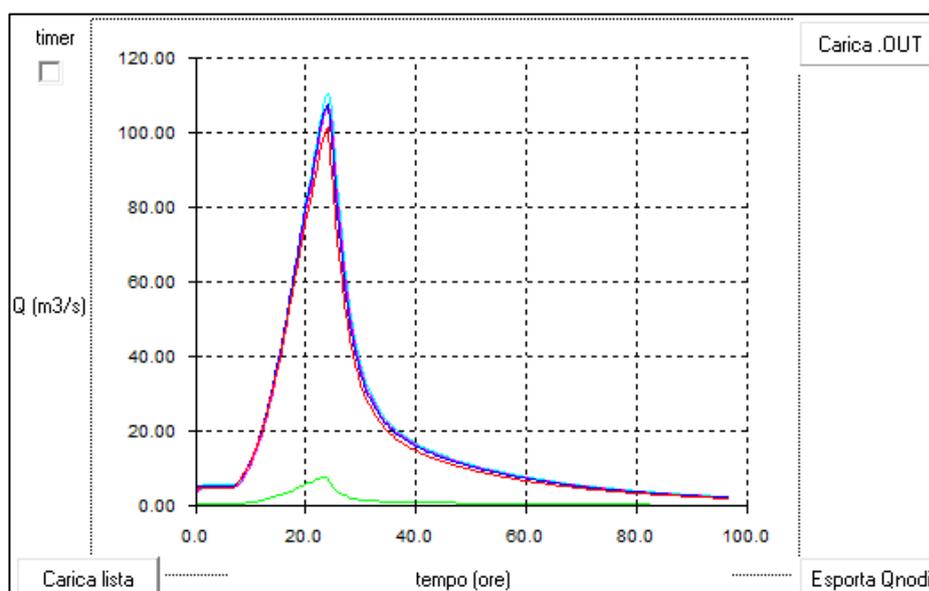


Figura 70. Plot delle portate relativo al grafico delle portate del moto vario per un idrogramma M02 con un valore di  $K_s=20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

## 8.2. Dimensionamento dello sfioratore

Il dimensionamento dello sfioratore, ed in particolare della quota del petto dello stesso, essendo fissata la lunghezza della soglia, deve essere tale da consentire che la cassa si riempia completamente consentendo di ottenere il massimo effetto di laminazione.

Il primo tentativo prevede una lunghezza dello sfioratore di 100 m e una quota di 40.75 m s.m.m..

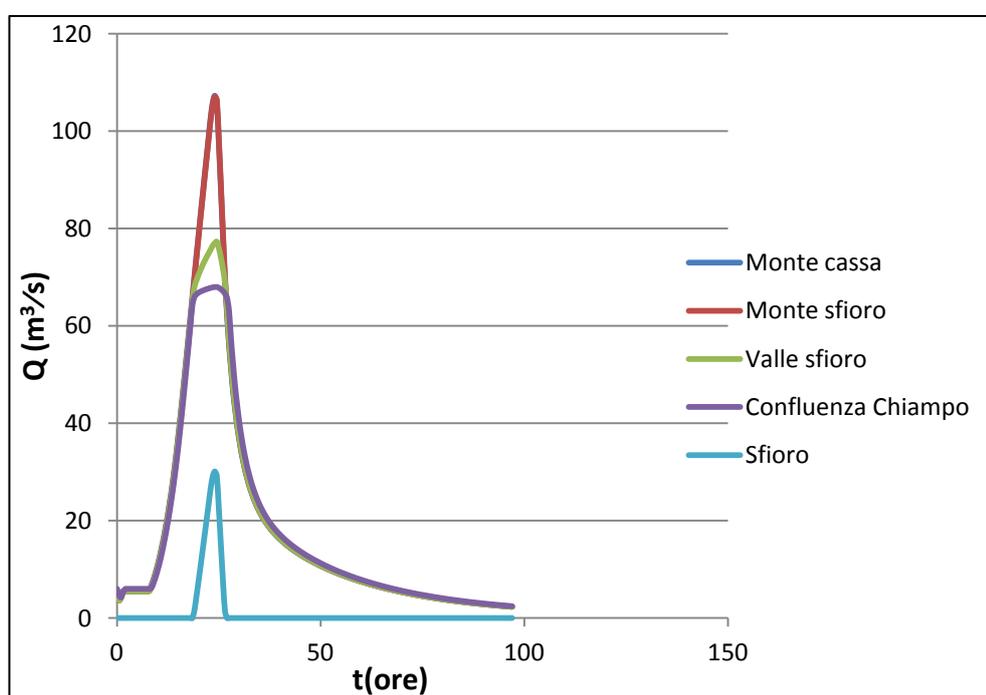


Figura 71. Andamento delle portate con sfioratore lungo 100 m e a quota 40.75 m s.m.m..

Dal confronto tra le portate in alcune sezioni caratteristiche di Figura 71 risulta evidente che la quota della soglia è troppo elevata: la cassa non si riempie in modo ottimale (non sfruttando il volume a disposizione) e gli effetti di laminazione sono inferiori a quelli desiderati. Inoltre, a valle della cassa si registrano ancora delle fuoriuscite. È necessario quindi procedere con un altro tentativo, abbassando la quota dello sfioratore a 40.50 m s.m.m..

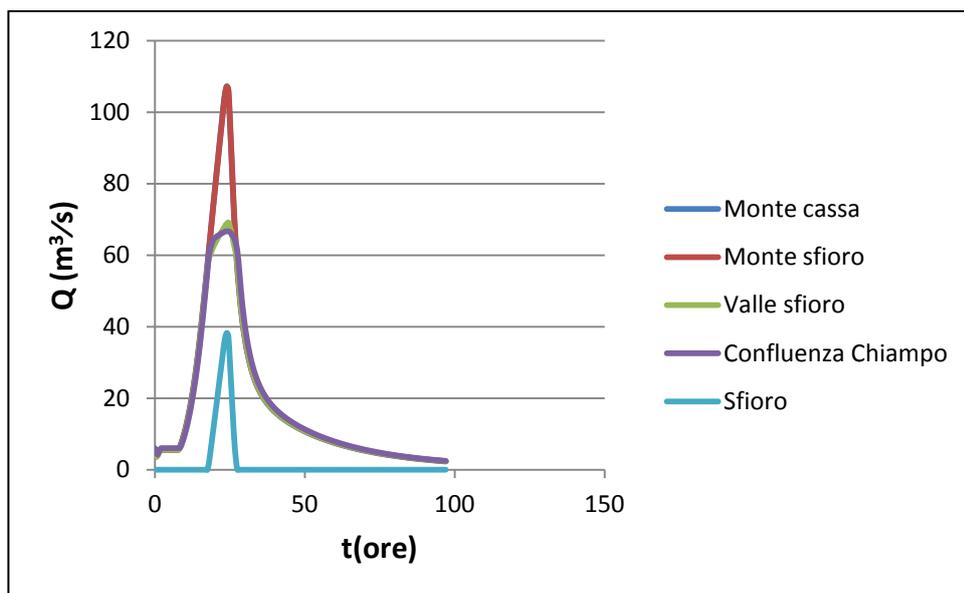


Figura 72. Andamento delle portate con sfioratore lungo 100 m e a quota 40.50 m s.m.m..

Anche in questo caso la cassa non funziona in modo ottimale, e a valle si registra una fuoriuscita in una sezione compresa tra la cassa e la sezione di chiusura. È necessario quindi procedere con un altro tentativo, abbassando la quota dello sfioratore a 40.00 m s.m.m..

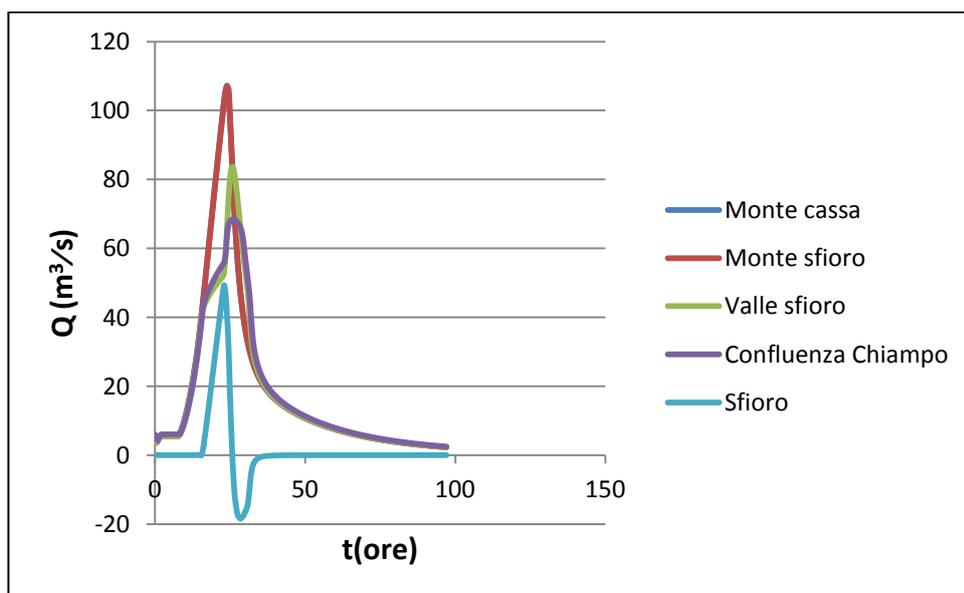


Figura 73. Andamento delle portate con sfioratore lungo 100 m e a quota 40.00 m s.m.m..

Il confronto tra le portate in alcune sezioni caratteristiche di Figura 73 evidenzia che la quota della soglia è troppo bassa: la cassa si riempie troppo velocemente e gli effetti di laminazione sono inferiori a quelli desiderati, come emerge dall'improvviso aumento dei livelli durante la fase discendente della piena. In questo caso infatti, la cassa rigurgita una portata consistente nell'Alpone prima che sia terminata la fase di piena. Tale effetto è visibile anche analizzando la portata dello sfioro in cui si può notare come per un tempo pari a circa 27 ore si ha una inversione del flusso. Questo funzionamento non ottimale non sortisce gli effetti di laminazione desiderati e comporta ancora fuoriuscite nel tratto a valle della cassa.

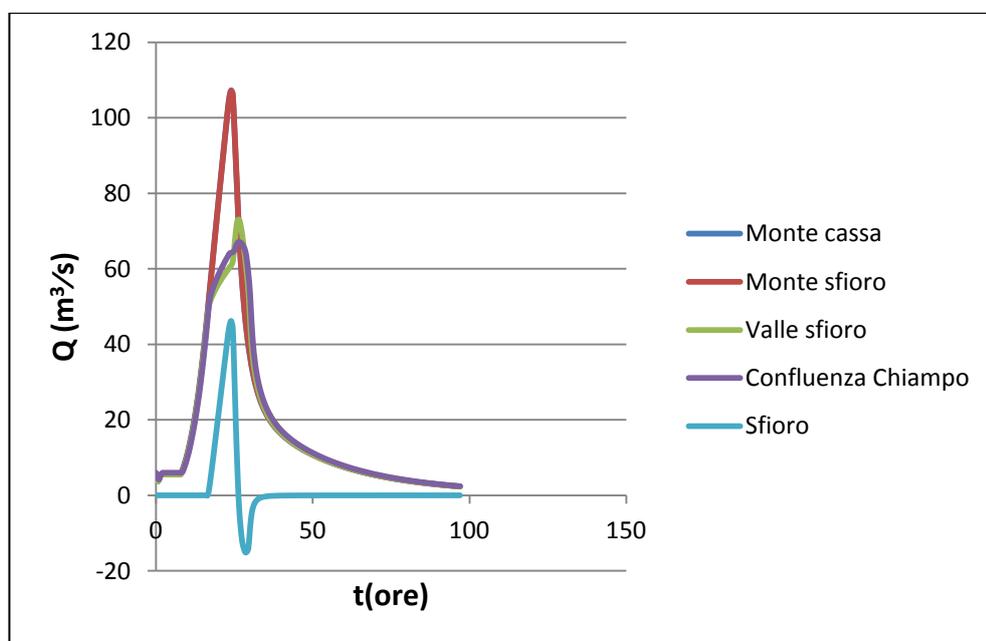


Figura 74. Andamento delle portate con sfioratore lungo 100 m e a quota 40.25 m s.m.m..

Fissando la quota dello sfioro a 40.25 m s.m.m. si nota un miglioramento del funzionamento, ma ancora una volta il funzionamento non è ottimale, come si evince da ragionamenti analoghi a quelli condotti nel caso precedente.

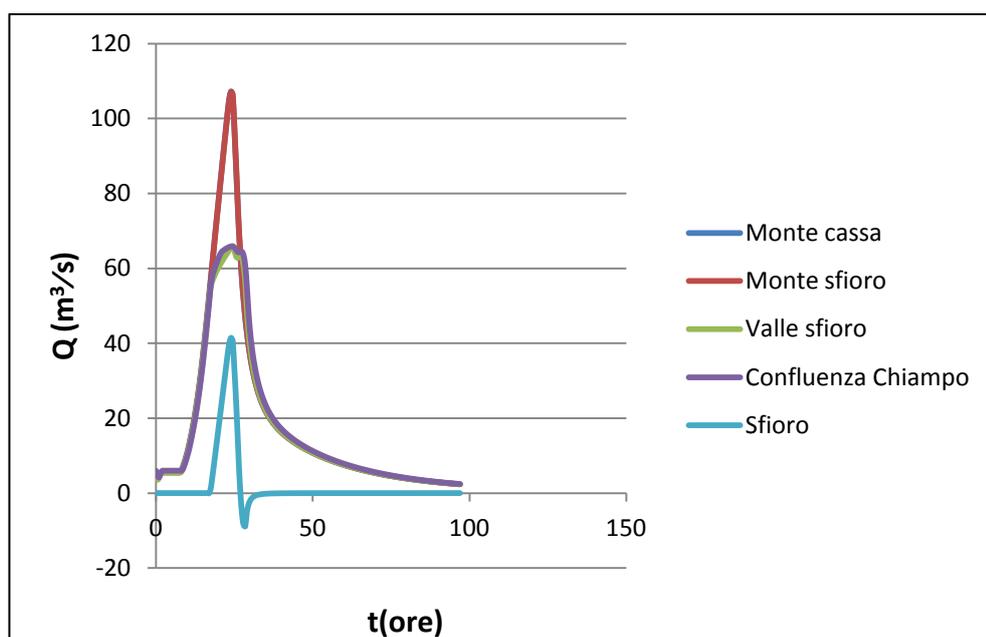


Figura 75. Andamento delle portate con sfioratore lungo 100 m e a quota 40.40 m s.m.m..

Si procede quindi all'analisi delle portate nel caso in cui lo sfioratore sia a quota 40.40 m s.m.m.. Dal confronto tra le portate in alcune sezioni caratteristiche di Figura 75 risulta evidente che la quota della soglia permette un funzionamento ottimale della cassa. Si nota, infatti, che la portata immediatamente a valle dello sfioro presenta un doppio colmo approssimativamente di ugual portata, a suggerire che la cassa lavora in modo ottimale. È di un qualche interesse analizzare anche il comportamento dei livelli all'interno della cassa durante le fasi di riempimento, ad integrazione delle analisi desunte dal comportamento delle portate precedentemente analizzato. L'andamento dei livelli indica che dopo un primo periodo necessario al graduale riempimento della cassa, i livelli all'interno della cassa raggiungono la quota dello sfioro (40.40 m s.m.m.). Il confronto tra i livelli idrometrici nella cassa e il livello idrometrico in corrispondenza allo sfioro indica che, nella fase successiva al riempimento della cassa, al diminuire delle quote idrometriche in alveo, i livelli idrometrici all'interno della cassa e in corrispondenza allo sfioro hanno comportamenti diversi in quanto nella cassa, non essendoci possibilità di svuotamento, il livello si mantiene costante, mentre va calando in corrispondenza dello sfioro, dopo il passaggio dell'onda di piena.

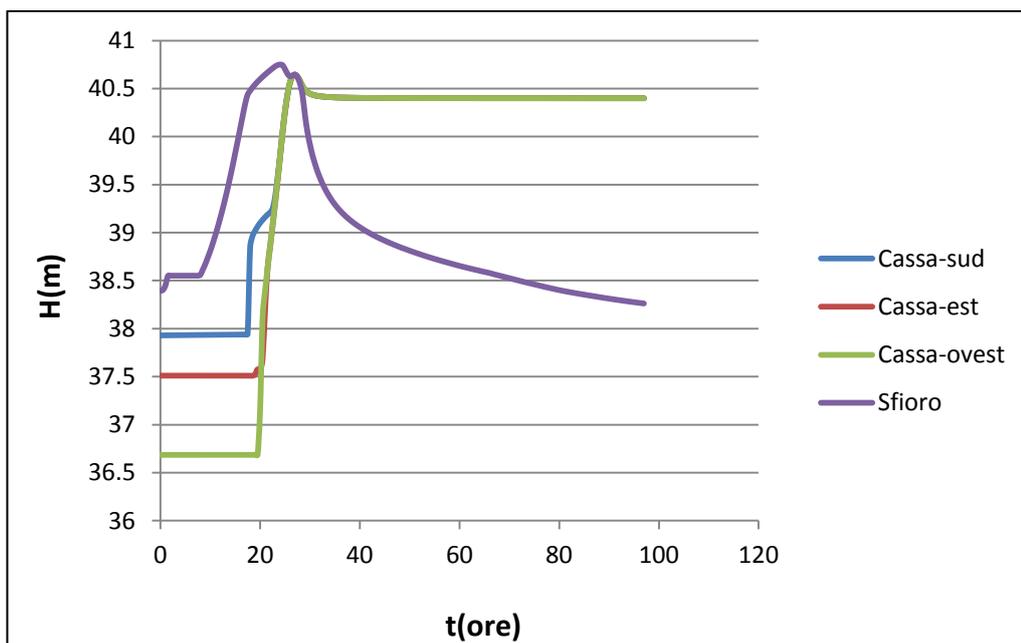


Figura 76. Livelli idrometrici nella cassa con sfioratore correttamente dimensionato.

Il confronto tra i livelli nel caso di funzionamento non ottimale rispecchia il comportamento della cassa stessa.

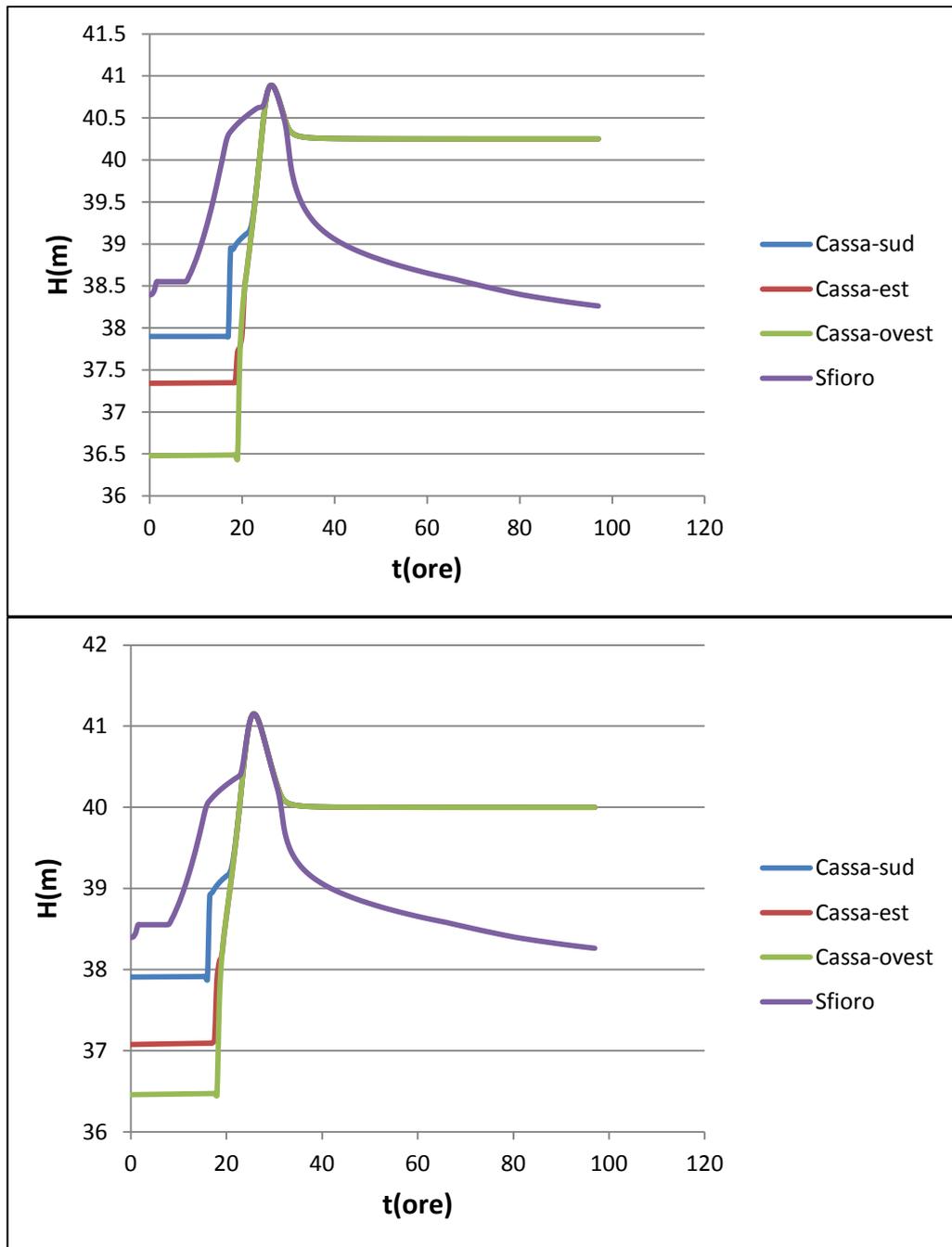


Figura 77. Livelli idrometrici nella cassa con sfioratore sovradimensionato (in alto posizionato a quota 40.00 m e in basso a 40.25 m s.m.m.).

Se invece è troppo piccolo i livelli mostrano che la cassa non si riempie completamente non raggiungendo mai la quota raggiunta dello sfioro.

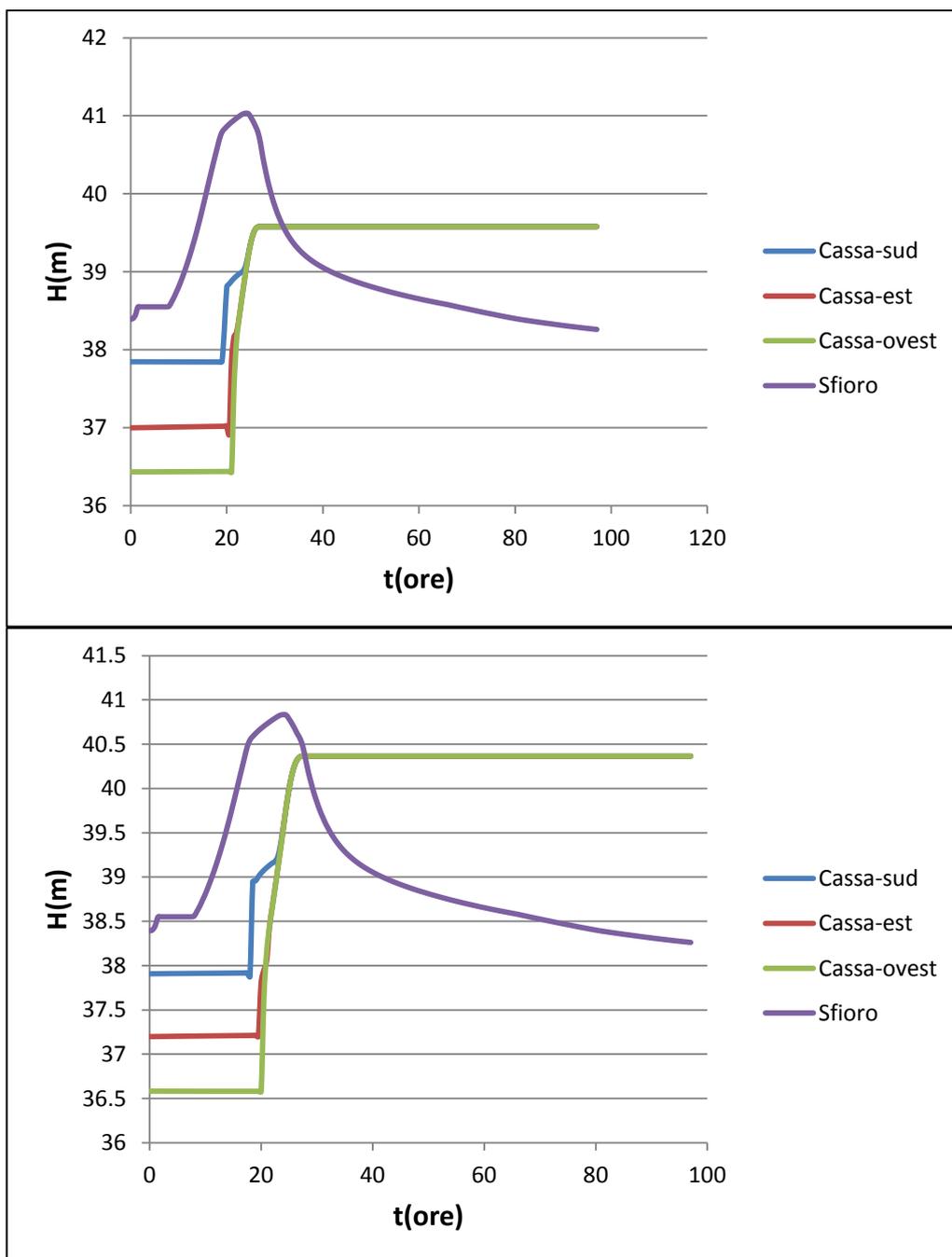


Figura 78. Livelli idrometrici nella cassa con sfioratore sottodimensionato (in alto posizionato a quota 40.75 m e in basso a 40.50 m s.m.m.).

Analogamente al caso attuale, è significativo analizzare l'andamento delle quote idrometriche massime lungo il corso dell'Alpone.

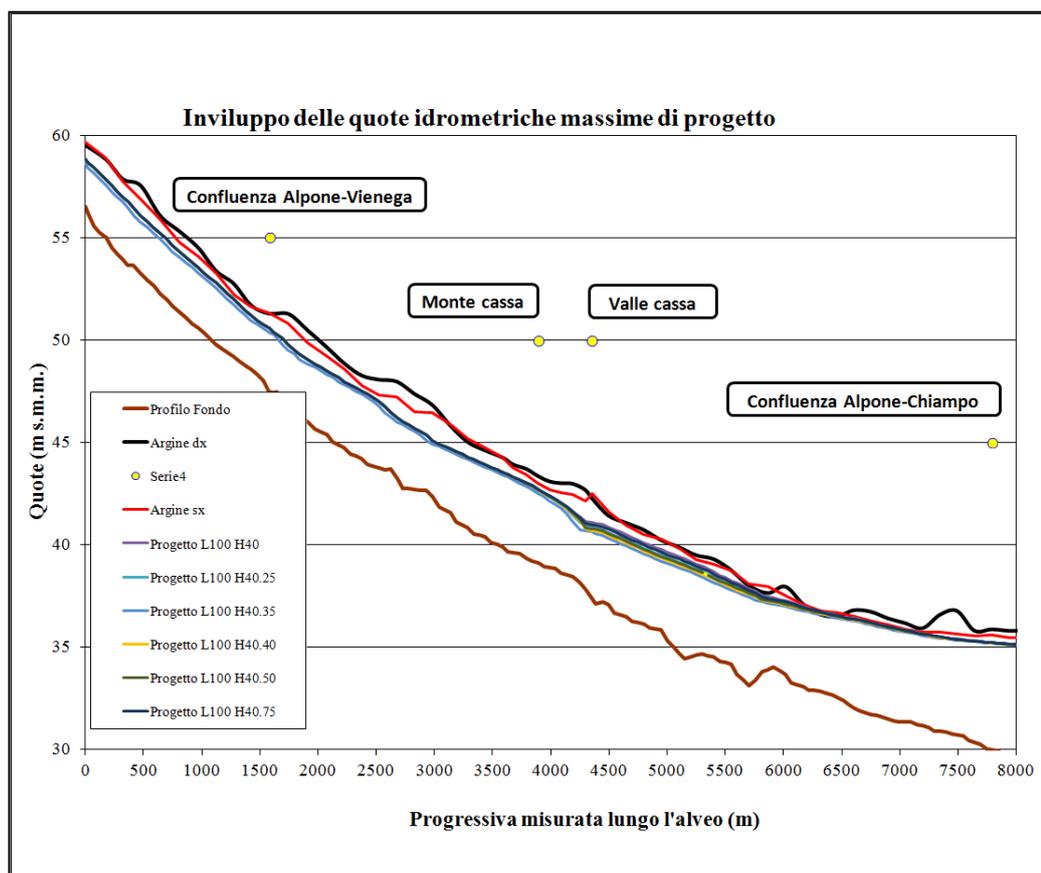


Figura 79. Profilo del fondo del tratto del torrente Alpone che va dalla sezione di monte (si veda la Figura 53) alla sezione di valle in corrispondenza con la confluenza con il torrente Chiampo, e confronto tra gli involucri dei massimi livelli idrometrici di progetto, imponendo la lunghezza dello sfioratore pari a 100 m e la quota pari a 40.00 m, 40.25 m, 40.35 m, 40.40 m, 40.50 m e 40.75 m s.m.m..

Il confronto tra gli involucri delle quote idrometriche massime relative ai diversi valori attribuiti alla quota dello sfioratore, evidenzia come a valle della cassa, la condizione migliore per i livelli si abbia con la cassa dimensionata in modo ottimale. Le minime quote idrometriche massime, si ottengono nel caso in cui lo sfioratore venga dimensionato in modo ottimale, mentre le massime quote idrometriche massime si manifestano nel caso in cui lo sfioratore sia posto a quota 40.00 m s.m.m.. Si noti comunque che anche nel migliore dei casi, i franchi arginali sono esigui, tendono ad annullarsi in corrispondenza ad una sezione in alcuni casi, mentre in altri si ha una seppur modesta traccimazione dei rilevati arginali, con portate tuttavia assolutamente trascurabili. Nonostante l'inserimento

della cassa comporti un miglioramento dei problemi del torrente Alpone, essa non risulta tuttavia sufficiente a mettere in sicurezza il tratto a valle della cassa.

## 9. Applicazione di un caso reale: la piena del 2010

Dopo aver utilizzato i dati sintetici, è interessante analizzare il comportamento del sistema quando forzato con un idrogramma che riproduce un evento reale. Nello specifico è stata utilizzata la ricostruzione della piena del 2010 (Regione Veneto, 2011), dapprima allo stato attuale e poi con la cassa di laminazione in funzione.

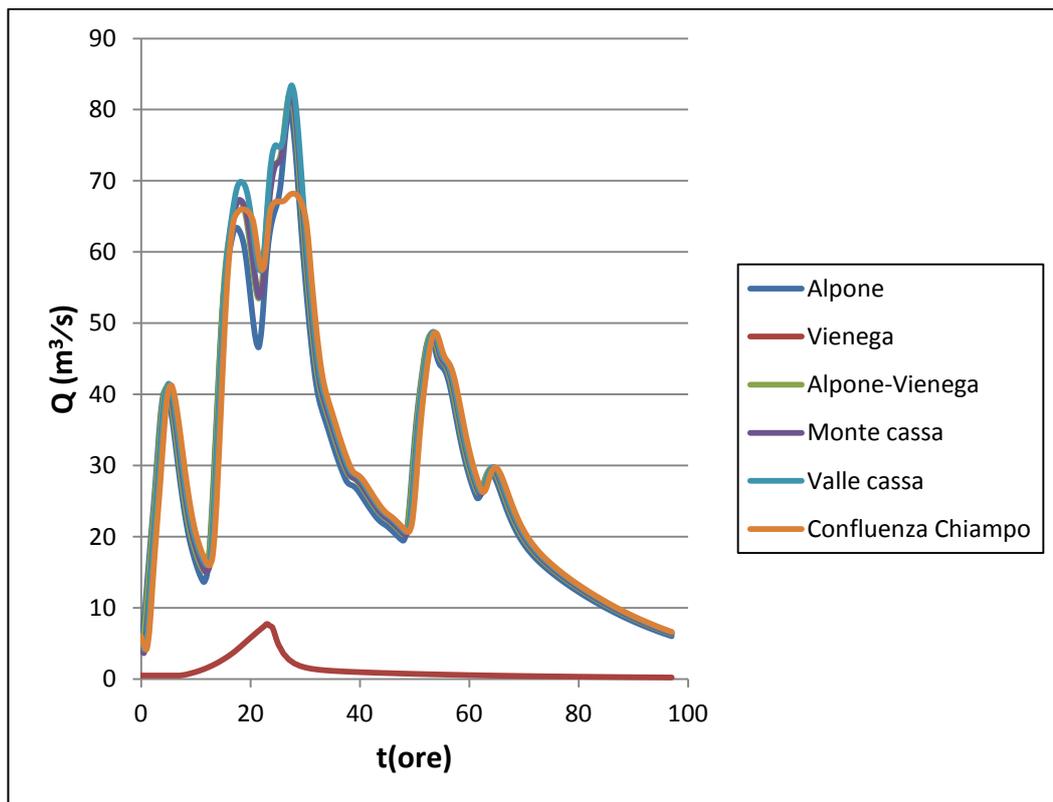


Figura 80. Andamento delle portate ricostruite sulla base della piena del 2010 in alcune sezioni caratteristiche del sistema considerato, indicate in Figura 53, nella condizione attuale.

L'andamento delle portate della piena per l'evento ricostruito del 2010, riportato in Figura 80, evidenzia come nella condizione attuale, parte della portata in transito lungo l'Alpone esondi nel tratto tra la posizione della cassa e la sezione di valle alla confluenza con il torrente Chiampo. Si nota infatti, osservando l'andamento delle portate alla confluenza con il Chiampo, una sorta di laminazione dovuta appunto alla fuoriuscita di acqua.

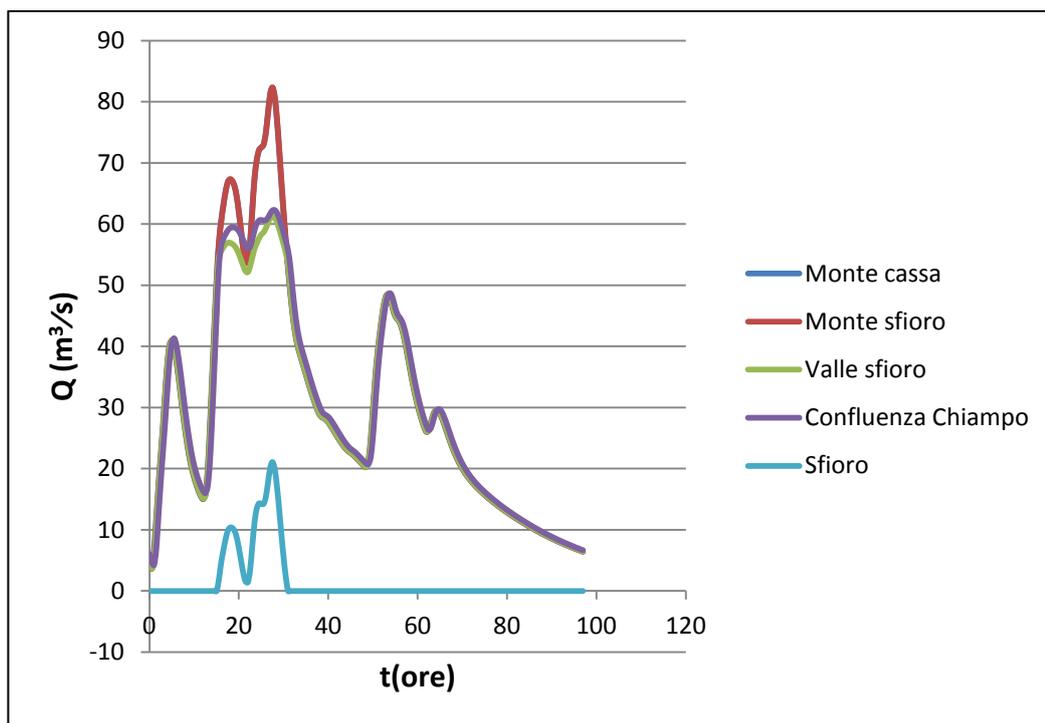


Figura 81. Andamento delle portate della piena del 2010 in alcune sezioni caratteristiche del sistema considerato, indicate in Figura 53, nel caso di progetto che vede la realizzazione di una cassa provvista di sfioratore di lunghezza pari a 100 m, a quota 40.40 m s.m.m. (si noti la coincidenza tra la sezione a monte della cassa e a monte dello sfioro)

Gli effetti benefici legati alla costruzione della cassa sono evidenti dal confronto tra gli andamenti delle portate della piena del 2010, riportate in Figura 81. Nel caso di progetto, con cassa dotata di sfioratore di lunghezza 100 m a quota 40.40 m s.m.m., si può osservare l'andamento tipico, precedentemente descritto, legato al funzionamento della cassa. Inoltre, è interessante notare come in questa situazione, non si vengono a verificare tracimazioni lungo il corso dell'Alpone, a valle della cassa stessa.

## 10. Conclusioni

Alla fine di questo lavoro e alla luce dei risultati ottenuti dalle analisi degli effetti della cassa di laminazione, si può affermare che indubbiamente l'opera contribuisca a mitigare in maniera importante la pericolosità idraulica del torrente Alpone e, di conseguenza, abbassi il livello di rischio per la popolazione e per i territori limitrofi al corso d'acqua stesso. Allo stato attuale una pioggia oraria della durata di 24 ore e tempo di ritorno 70 anni, causa tracimazioni diffuse lungo il tratto di corso d'acqua più meridionale con danni ingenti e difficoltà conseguenti all'evento. Al contrario, l'inserimento di una cassa di espansione in destra idrografica in corrispondenza dell'abitato di Brognoligo-Costalunga, riduce sensibilmente il colmo di piena portandolo a valori di poco superiori a  $60\text{m}^3/\text{s}$ , rispetto ai  $110\text{m}^3/\text{s}$  a monte della cassa stessa. Le portate con tempo di ritorno di 70 anni generate da piogge di durata pari a 24 ore, possono fluire a valle in condizioni prossime a quelle di sicurezza. Si verifica, infatti, una modesta tracimazione dei rilevati arginali, con portate esondate dell'ordine di  $2-3\text{ m}^3/\text{s}$ . Si tratta comunque delle minime portate esondabili nel caso in cui si inserisca la cassa, portate che non sono assolutamente confrontabili con quelle esondate in condizioni attuali che raggiungono picchi nell'ordine dei  $50\text{ m}^3/\text{s}$ . Sicuramente, se fosse possibile accoppiare il funzionamento di questa cassa di laminazione a quella prevista dalla Regione Veneto, in località Colombaretta, si andrebbe ad aumentare ulteriormente il livello di sicurezza.



## Bibliografia

- Antonelli R., Barbieri G., Dal Prà A., De Zanche V., Grandesso P., Mietto P., Sedea R. e Zanferrari A. (1990) – *Carta Geologica del Veneto, una storia di cinquecento milioni di anni, scala 1:250.000*. Ed. Regione del Veneto, S.E.L.C.A. Firenze, pp. 31.
- Barbieri G. (1972) – *Sul significato geologico della faglia di Castelvero (Lessini Veronesi)*. Atti Mem. Accad. Patav. Sci. Lett. Arti, 84, pp. 297-302.
- Barbieri G., De Zanche V. & Sedea R. (1991) – *Vulcanesimo paleogenico ed evoluzione del semigraben Alpone-Agno (Monti Lessini)*. Rend. Soc. Geol. It., 14, pp. 5-12.
- Barbieri G., De Zanche V., Medizza F. & Sedea R. (1981) – *Considerazioni sul vulcanesimo Terziario del Veneto Occidentale e del Trentino Meridionale*. Rend. Soc. Geol. It., 4 (1981), pp. 267-270.
- Barbieri G. & Medizza F. (1969) – *Contributo alla conoscenza geologica della regione di Bolca (Monti Lessini)*. Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. di Padova, 27, pp 1-27.
- Barbieri G. & Zampieri D. (1992) – *Deformazioni sinsedimentarie Eoceniche con stile a domino nel Semigraben Alpone-Agno e relativo campo di paleostress (Monti Lessini Orientali-Prealpi Venete)*. Atti Tic. Sc. Terra., Note Brevi, 35, pp. 25-31.
- Bertotti G., Picotti V., Bernoulli D. & Castellarin A. (1993) – *From rifting to drifting: tectonic evolution of the South-Alpine upper crust from the Triassic to the Early Cretaceous*. Sedimentary Geology, 86, pp. 53-76.
- Bosellini A., Mutti E., Ricci Lucchi F. (1989) – *Rocce e successioni sedimentarie*. Ristampa 2004, pp. 1-395.
- Castellarin A. & Vai G.B. (1982) – *Guida alla geologia del Sudalpino centro orientale*. Guide Geol. Reg. S.G.I., pp. 1-22.

- Consorzio di bonifica Zerpano-Adige-Guà San Bonifacio (1992) – *Riassetto idraulico del territorio pedemontano tra il torrente Alpone ed il torrente Chiampo: relazione geologica e geotecnica.*
- Consorzio di bonifica Zerpano-Adige-Guà San Bonifacio (1992) – *Riassetto idraulico del territorio pedemontano tra il torrente Alpone ed il torrente Chiampo: relazione geologica.*
- Dal Degan D. & Barbieri S. (2003) – *Rilievo geologico dell'area di Bolca (Monti Lessini orientali).* Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona: Geologia Paleontologia Preistoria, pp. 3-10.
- De Vecchi G.P., Gregnanin A. & Piccirillo E.M. (1976) – *Aspetti petrogenetici del vulcanesimo terziario veneto.* Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. di Padova, 30, pp. 1-33.
- De Zanche V. (1965) – *Le microfacies Eoceniche nella valle del Chiampo tra Arzignano e Mussolino (Lessini orientali).* Riv. It. Paleont. Strat. 73, pp. 275-310.
- De Zanche V. & Conterno T. (1972) – *Contributo alla conoscenza geologica dell'orizzonte Eocenico di Roncà nel veronese e nel vicentino.* Atti e Memorie dell'Accademia Patavina di SS. LL. AA., vol LXXXIV – parte II: Cl di Sci. Mat. e Nat.
- Dipartimento della Protezione Civile – *Il rischio idrogeologico.* [www.protezionecivile.it](http://www.protezionecivile.it)
- Doglioni C. & Bosellini A. (1987) – *Eoalpine and mesoalpine tectonics in the Southern Alps.* Geologische Rundschau, 76/3, pp. 735-754.
- Fabiani R., 1913. *I bacini dell'Alpone, del Tramigna e del Prognò d'Illasi nei Lessini Medi.* Uff. Odrogr. R. Magistrato alle Acque, pubbl. 44-45, 60 pp. (con 1 carta geologica 1:75.000 e 1 carta permeabilità 1:100.000), Venezia.
- Fabiani R., 1921. *I bacini idrografici della Regione Lessinea. Parte I. Struttura geologica.* Uff. Idrogr. R. mag. Acque, 79, Venezia
- Fantoni R. & Franciosi R., 2009. *Mesozoic extension and Cenozoic compression in Po Plain and Adriatic foreland.* Rendiconti on line Soc. Geol. It.

- Massari F. & Medizza F. (1973) – *Stratigrafia e paleogeografia del Campaniano-Maastrichtiano nelle Alpi Meridionali (con particolare riguardo agli hard grounds della Scaglia Rossa Veneta)*. Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova, 28, pp. 1-63.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri numero 3906 del 13 novembre 2010 – *Piano delle azioni e degli interventi di mitigazione del rischio idraulico e geologico*. Relazione di sintesi.
- Piccoli G. (1966) – *Studio geologico del vulcanesimo Paleogenico Veneto*. Mem. Ist. Geol. Mineral. Università Padova, 26, pp. 1-100.
- Provincia di Verona (2008) – *VAS, rapporto ambientale*. Allegato 8: rischio idrogeologico.
- Regione Veneto (2010) – *Carta evento del novembre 2010 ed episodi precedenti: schema delle criticità*. Nell’ambito della realizzazione di un’opera d’invaso sul torrente Alpone, in località Colombaretta, in comune di Montecchia di Crosara (VR) – ID piano 999. Progetto preliminare.
- Regione Veneto (2010), IPRO Ingegneria Ambientale – *Modellazione idrologica e idraulica specialistica a supporto della progettazione del manufatto di sconnessione idraulica nel torrente Tramigna da realizzare a monte della confluenza con il torrente Alpone nel territorio del comune di San Bonifacio (VR)*.
- Regione Veneto (2010) – *Scheda evento "idro": 31 ottobre – 5 novembre 2010*.
- Regione Veneto (2010) – *Scheda evento "pluvio": 31 ottobre – 2 novembre 2010*.
- Regione Veneto (2010) – *Veneto ferito*.
- Sauro U., 1973. *Alcune osservazioni sui rapporti idrografia-tettonica nei Lessini centrali ed occidentali*. Boll. Mus. Civ. St. Nat. Venezia, suppl., 24, 45-51.
- Zampieri D. (1992) – *Extensional mesostructures in the Cretaceous limestones of Paleogene Alpone-Agno half graben (Eastern Lessini Mountains, Northern Italy)*. St. Trent. Sci. Nat., 67, pp. 75-85.
- Zampieri D. (1995) – *Tertiary extension in the southern Trento Platform, Southern Alps, Italy*. Tectonics, 14,3, pp. 645-657.

- Zampieri D. (2000) – *Segmentation and linkage of the Lessini Mountains normal faults, Southern Alps, Italy*. *Tectonophysics*, 319, pp. 19-31.



# Ringraziamenti

Giunto alla fine di questo lavoro vorrei ringraziare tutti coloro che lo hanno permesso:

la zia Stefy che avrebbe voluto essere qui, che mi ha aspettato con tutte le sue forze, ma che ha potuto condividere con me solo la gioia della fine degli esami;

la mamma per il supporto economico, per avermi spinto a fare sempre meglio e per aver avuto tanta pazienza;

lo zio Paolo per avermi sempre spronato, un po' più delicatamente della mamma;

Enrico, praticamente mio fratello minore, che mi capisce durante le prediche e che mi aiuta quando il pc non fa quello che dico io;

la nonna per le benedizioni dall'alto;

il Dr. Andrea D'Alpaos per aver reso possibile questa tesi, per la pazienza e la passione che ha avuto nel seguirmi durante il cammino;

l'Ingegnere Umberto Anti per tutte le volte che mi ha aiutato nella raccolta dei dati e per le continue consulenze;

il Dr. Luca Carniello e il Prof. Dario Zampieri per la preziosa collaborazione;

Sandro, un compagno di studi ma soprattutto un grande amico, per l'immenso aiuto che mi ha dato nelle mille difficoltà della tesi, della carriera accademica e della vita;

Giovanni, Matteo e Giovanni per i meravigliosi anni vissuti assieme all'università e per essermi stati vicini sempre;

Lore e tutti gli amici del mare per le bellissime estati vissute assieme, nelle quali ho ricaricato le batterie per affrontare le fatiche accademiche invernali;

il Villaggio per aver finanziato tanti anni di studio e il suo staff con cui da tanto tempo condivido i fine settimana;

Camy per aver scelto di condividere con me i momenti felici e quelli tristi, per essermi sempre vicina quando ne ho bisogno, per mettere un po' di ottimismo quando tutto sembra nero e per tutta la pazienza che ci vuole per sopportarmi.

**GRAZIE**