

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE, AMBIENTALE
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile Idraulica



Tesi di Laurea Magistrale

EFFETTI DI ALCUNI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DELLA
PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELL'ALTO CORSO DEL FIUME PIAVE

*Effects of some interventions to mitigate
the hydraulics risk in the upper course of Piave river*

Relatore:

PROF. ING. LUCA CARNIELLO

Correlatori:

ING. IRMA BONETTO

ING. ELENA CRESTANI

Laureando:

FEDERICO BALASSO

MATRICOLA: 1040305 IC

ANNO ACCADEMICO 2016-2017

*“Ognuno é un genio. Ma se si giudica un pesce
dalla sua abilitá di arrampicarsi sugli alberi
lui passerá tutta la sua Vita a credersi stupido.”*

Albert Einstein

Sommario

La presente tesi, a seguito di un'operazione di revisione topografica del dominio di calcolo, studia gli effetti sulla mitigazione della pericolosità idraulica nell'alto corso del fiume Piave e sull'incremento della capacità di portata prodotti da tre interventi di sovrizzo arginale in corrispondenza degli abitati di Perarolo di Cadore, Longarone e Belluno.

L'analisi viene condotta attraverso un modello matematico bidimensionale, opportunamente calibrato, in ipotesi di fondo fisso, considerando di riferirsi all'evento di piena realizzatosi nei giorni 3-6 Novembre 1966 e mettendo a confronto le condizioni PRE e POST interventi.

Abstract

This thesis, after a topographic revision of the computational domain, studies the effects of the mitigation of hydraulics risk in the upper course of Piave river and of the increase of the flow capacity after three interventions of raising embankment at the settlements of Perarolo di Cadore, Longarone and Belluno.

The analysis is carried out by using a mathematical two dimensional model, properly calibrated, under the assumption of inerodible bed, considering the flood event occurred in 3rd-6th November 1966 as a reference and then comparing the PRE and POST interventions conditions.

Indice

Introduzione	1
1 Il fiume Piave: inquadramento territoriale	3
1.1 Generalità	3
1.2 Caratteristiche geologiche del bacino	3
1.3 Caratteristiche morfologiche dell'alveo	5
1.3.1 L'asta principale	5
1.3.2 La rete fluviale montana	5
1.3.3 La rete fluviale di pianura	7
1.3.4 I laghi ed i bacini artificiali	7
1.4 Opere di utilizzazione	8
1.4.1 La traversa di Soverzene	8
1.4.2 La traversa di Busche	9
1.4.3 La traversa di Fener	9
1.4.4 La traversa di Nervesa della Battaglia	10
2 Analisi del rischio idraulico del fiume Piave	11
2.1 Raccolta delle piene storiche	11
2.2 La piena del 3/6 Novembre 1966	13
2.2.1 Afflusso meteorico	13
2.2.2 Deflusso di piena	15
2.3 La mitigazione del rischio idraulico	15
2.3.1 Valutazione delle criticità	15
3 Studio della propagazione delle onde di piena	19
3.1 Il modello bidimensionale	19
3.1.1 Equazioni del moto bidimensionale	19
3.1.2 Transizione asciutto-bagnato: la media di fase	20
3.2 Gli elementi monodimensionali	23
3.2.1 Elementi monodimensionali "canale"	23
3.2.2 Elementi monodimensionali "speciali"	25
3.2.3 Condizioni al contorno	28
4 Schematizzazione del territorio	29
4.1 Dati cartografici	29
4.2 Dati aerofotogrammetrici	30
4.3 Dati topografici	32
4.4 Revisione della topografia	32

4.4.1	Topografia tra Longarone e Nervesa della Battaglia	33
4.4.2	Topografia nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore	38
5	Interventi di sistemazione	45
5.1	Interventi a Perarolo di Cadore	45
5.2	Interventi a Longarone	46
5.2.1	Ponte Malcolm	47
5.2.2	Confluenza Maé-Piave	48
5.2.3	Ponte Provagna	49
5.3	Interventi a Belluno	49
6	Calibrazione e determinazione della capacità di portata	53
6.1	Calibrazione del modello e determinazione delle scabrezze ottimali	53
6.2	Capacità di portata	55
6.2.1	Portata di picco per l'evento del Novembre 1966	58
6.2.2	Capacità di portata PRE e POST intervento	58
	Conclusioni	69
A	Studio e verifica relativo alle sezioni topografiche comprese tra Longarone e Nervesa della Battaglia	71
B	Studio e verifica relativo alle sezioni topografiche e ai dati lidar nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore	85
C	Profili longitudinali	103
	Bibliografia	119

Introduzione

Il fiume Piave è uno dei principali corsi d'acqua della Regione Veneto e si sviluppa all'interno di un bacino suddiviso in un'area montana e in una di pianura, caratterizzate per questo da differente morfologia e comportamento idrodinamico.

Nel bacino montano, il corso del fiume mostra un alveo a carattere prevalentemente torrentizio, alternando tratti in cui l'alveo è incassato all'interno delle sponde a tratti in cui le sezioni sono più ampie e l'alveo diventa pluricursale. L'intero corso montano del fiume è interessato da fenomeni di trasporto solido ed evoluzione del fondo soprattutto durante gli eventi di piena più intensi. Sempre nel tratto montano il Piave vanta numerosi affluenti, concentrati prevalentemente in destra idrografica che contribuiscono ai deflussi.

Sebbene, come già menzionato, il corso montano del fiume sia prevalentemente incassato esso non è esente da problemi legati alla pericolosità idraulica in particolare per la presenza di aree edificate che, nella loro espansione, si sono spinte fin troppo vicine all'alveo del fiume giungendo ad occupare porzioni di territorio di evidente pertinenza fluviale.

Generalmente, per l'analisi della pericolosità idraulica ci si riferisce all'evento dei giorni 3-6 Novembre del 1966, il più gravoso mai registrato. Pertanto questo viene considerato il riferimento per la progettazione delle opere di difesa idraulica, nel Piave e in altri corsi dell'area veneta.

La presente analisi trova la sua motivazione nella ricerca di una base topografica attendibile ed affidabile per poter predisporre un adeguato strumento modellistico che consenta di condurre delle valutazioni in merito alle criticità nel bacino montano e valutare l'efficacia degli interventi proposti ai fini di mitigazione, siano essi realizzati o solo in progettazione.

Nello specifico questa tesi si propone di valutare gli effetti di alcuni interventi lungo l'asta principale nel bacino montano del fiume Piave, in corrispondenza degli abitati di Perarolo di Cadore, Longarone e Belluno, concepiti per risolvere situazioni di criticità localizzate.

Tale obiettivo, grazie all'utilizzo di vari strumenti, è stato perseguito in diverse fasi. Inizialmente si è proceduto ad una revisione ed aggiornamento del reticolo di calcolo già realizzato per il corso montano del fiume Piave, sulla base della disponibilità dei più recenti rilievi topografici esistenti. Nel dettaglio i nuovi dati disponibili comprendono sezioni topografiche, rilievi lidar (Laser Imaging Detection And Ranging), dati DTM (Digital Terrain Model) e sono stati forniti sia da enti pubblici (Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione; Regione Veneto; Genio Civile) sia da studi di dettaglio ad opera di società incaricate (Zollet Ingegneria S.r.l.; Idrostudi S.r.l.; Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l.).

Successivamente si è operata una calibrazione dello schema di calcolo utilizzando, per confronto, le misure disponibili per l'evento di piena del 2002.

Da ultimo si è proceduto con l'analisi degli effetti prodotti, nelle aree di criticità individuate, degli interventi di mitigazione realizzati o progettati. Tale analisi ha permesso, in particolare, di verificare i benefici ottenuti o ottenibili in termini di incremento della capacità di portata (i.e. della massima portata transitabile senza produrre esondazioni) nei tratti oggetto di studio.

Capitolo 1

Il fiume Piave: inquadramento territoriale

1.1 Generalità

Le sorgenti del fiume Piave si trovano alle pendici del monte Peralba, nel comune di Sappada (BL), ad una quota di circa 2000 metri sul livello del mare; l'alveo principale segue la Val Visdende e, a causa della frana di Fadalto che ne ha ostacolato il transito nella Val Lapisina, la Val Belluna. La sezione di chiusura del bacino idrografico montano (figura 1.1) viene fatta sostanzialmente coincidere con la traversa di Nervesa della Battaglia: il bacino ricopre una superficie di circa 3900 km². Dopo Nervesa l'alveo segue un andamento rettilineo fino a sfociare nei pressi di Cortellazzo (VE), in seguito alla diversione effettuata dai Veneziani per salvaguardare della laguna. Tra i suoi affluenti più importanti si ricordano l'Ansiei, il Boite, il Maé ed il Cordevole, tutti in destra idrografica. Il corso principale del Piave si sviluppa tutto internamente ai confini della Regione Veneto, nelle provincie di Belluno, Treviso e Venezia. Come si nota dal diagramma di Stecher in figura 1.2, il bacino montano si sviluppa asimmetricamente e riceve un apporto idrico maggiore in destra idrografica rispetto alla sinistra.

1.2 Caratteristiche geologiche del bacino

Il Piave nasce dal versante meridionale del monte Peralba, nella zona più settentrionale del Comelico; dalle sorgenti a Ponte nelle Alpi le stratificazioni vengono tagliate verticalmente, mostrando una profonda incisione delle rocce su cui si basa la regione attraversata e strette valli che rispondono alle caratteristiche delle valli trasversali.

A valle di Ponte nelle Alpi il paesaggio cambia: il fiume si incanala in un largo solco preesistente fino a Feltre. In questa zona la valle assume le caratteristiche della valle longitudinale, con fondo piatto e fianchi relativamente dolci. Da Busche fino a Pederobba il Piave indirizza nuovamente il suo corso in una valle di tipo trasversale e relativamente stretta che taglia la catena Grappa - Tomatico - Cesen - Col Visentin.

A Sud di Pederobba l'alveo piega verso Est, attraversando e incidendo profondamente il Montello per poi sfociare nella stretta di Nervesa; una volta raggiunta la pianura il Piave da luogo alla conoide di alluvioni a ventaglio dell'alta Marca Trevigiana, alla cui estremità meridionale si trovano le acque risorgive.

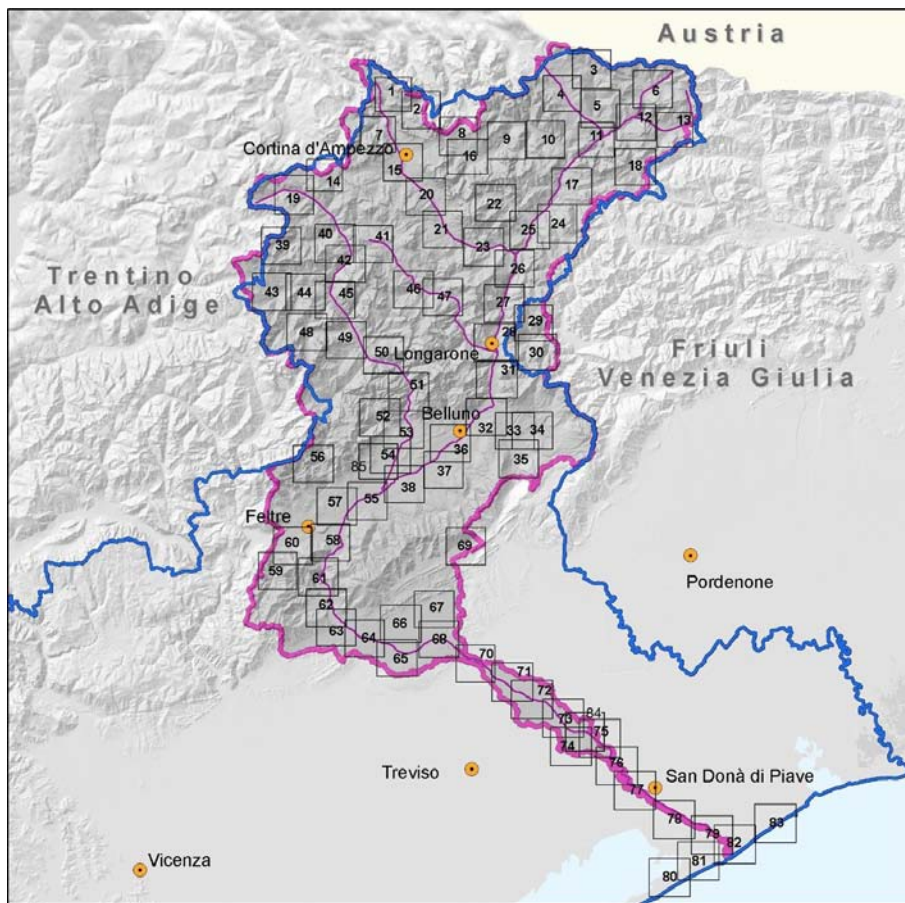


Figura 1.1: Bacino idrografico del fiume Piave. Fonte: Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2012.

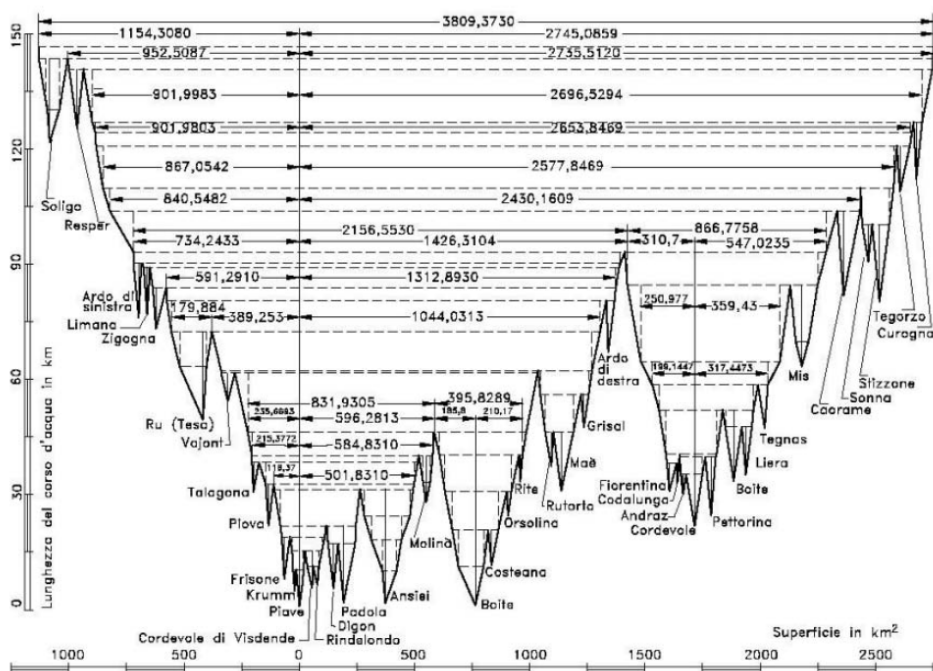


Figura 1.2: Diagramma di Stecher del bacino imbrifero del Piave. Fonte: Da Deppo et al., 1997.

Discendendo dalle sorgenti alla foce, si possono individuare tre gruppi fondamentali in cui suddividere i terreni che costituiscono il bacino del Piave:

- la zona Nord è costituita dalle formazioni rocciose delle Dolomiti del Cadore, dell'Agordino e di Primiero ed è delimitata sul lato meridionale da una linea che va da Longarone al monte Pavione;
- fra questo allineamento montuoso e quello che collega il Cansiglio al Grappa si trova il tratto intermedio, caratterizzato da sedimenti arenaceo marnosi e da letti alluvionali del Piave;
- la zona Sud si estende fino alla pianura Veneta andando a comprendere le colline del Trevigiano ed il Montello.

1.3 Caratteristiche morfologiche dell'alveo

Nello studio della morfologia dell'alveo del fiume Piave si possono individuare quattro distinti ambiti: l'asta principale, la rete fluviale montana e di pianura, quella artificiale dei consorzi di bonifica e gli invasi naturali.

1.3.1 L'asta principale

Il profilo dell'asta principale si può suddividere in tre tronchi sia per geometria che per sedimentologia.

Il primo tronco, quello montano, si estende dalle sorgenti del monte Peralba (BL) fino a Fener (BL). Entro tali limiti, il Piave ha carattere torrentizio, con una granulometria grossolana e pendenze elevate, che possono raggiungere valori massimi del 5 ‰ nel tratto a valle di Longarone. La città simbolo del disastro del Vajont suddivide ulteriormente questo primo tratto: mentre a monte l'alveo è relativamente stretto ed incassato tra pareti molto ripide, il tratto a valle, pur continuando ad essere delimitato da versanti ripidi, mostra un generale allargamento dell'alveo.

Il tronco mediano del Piave si distingue per avere le caratteristiche di un fiume torrentizio, esso è compreso tra Fener (BL) e Zenson di Piave (TV). La pendenza del fondo si mantiene su valori elevati fino all'abitato di Candelù (TV) dove passa bruscamente da 3.5 ‰ a 1.8 ‰ e arriva a Zenson di Piave con una pendenza di circa 1.2 ‰. Questo tratto è caratterizzato da velocità abbastanza elevate e da una granulometria grossolana, in particolare ghiaie e ciottoli. La larghezza dell'alveo supera i 3 km e raggiunge dimensioni ben più importanti avvicinandosi alle Grave di Papadopoli.

Oltre Zenson, nel tratto terminale del fiume, la granulometria diventa più fine (principalmente sabbie e limi), ed il Piave assume le caratteristiche tipiche dei corsi d'acqua di pianura; scorre in un alveo di larghezza media pari a 100 m, incassato in sponde artificiali e caratterizzato da una pendenza media molto bassa, tanto che in prossimità della foce raggiunge anche valori inferiori allo 0.1 ‰.

1.3.2 La rete fluviale montana

In prevalenza il bacino del fiume Piave è di tipo montano e la sua sezione di chiusura, che viene generalmente fatta coincidere con la traversa di Nervesa della Battaglia, sottende una superficie di 3900 km². L'asta principale all'interno del bacino montano misura circa

156 km ed essendo la quota media elevata, non è infrequente osservare in alcune aree precipitazioni di carattere nevoso nella stagione invernale; per questo motivo il regime idrometrico del fiume è caratterizzato da piene autunnali generate dalle precipitazioni e da piene e morbide primaverili per effetto sia delle piogge che dello scioglimento degli accumuli nevosi.

Gli affluenti si trovano per la maggioranza nel bacino montano; il Negrisia risulta essere l'unico affluente a valle di Nervesa della Battaglia. I maggiori tributari di destra del Piave sono:

- torrente Padola: confluisce nel Piave presso Santo Stefano di Cadore, in esso affluiscono altri 4 affluenti regolati da briglie;
- torrente Ansiei: nasce dal monte Cristallo e confluisce nel Piave presso Lozzo di Cadore;
- torrente Boite: nella parte terminale è regolato tramite il serbatoio di Valle di Cadore e confluisce nel Piave a Perarolo di Cadore;
- torrente Maé: in prossimità di Pontesei è regolato dall'omonimo lago artificiale, confluisce nel Piave nei pressi di Longarone, a valle della confluenza col torrente Vajont;
- torrente Ardo: confluisce nel Piave attraversando Belluno;
- torrente Cordevole: è il principale affluente del Piave, nasce fra il gruppo Sella e la Marmolada, ha esso stesso numerosi affluenti ed alimenta il lago di Alleghe e il bacino del Ghirlo; confluisce nel Piave nei pressi di Santa Giustina Bellunese;
- torrente Caorame: comprende il lago artificiale della Stua ed affluisce al Piave presso Feltre.

Come già specificato in precedenza gli affluenti in sinistra apportano contributi idrici minori rispetto a quelli in destra idrografica. Di questi, i principali sono:

- torrente Piova: nasce come il Piave dalle Alpi Carniche e confluisce nell'asta principale presso Vigo di Cadore;
- torrente Vajont: scorre principalmente in Friuli-Venezia Giulia e confluisce nel Piave presso Longarone;
- torrente Gallina: confluisce nel Piave nei pressi di Soverzene e lungo il suo corso si trova il bacino Gallina;
- torrente Rai: emissario del lago di Santa Croce, venutosi a creare dopo la frana del Fadalto, confluisce nel Piave presso Ponte nelle Alpi;
- torrente Cicogna: confluisce nel Piave presso Limana;
- torrente Limana: confluisce nel Piave presso Trichiana;
- torrente Ardo di Sinistra: omonimo del torrente Ardo che attraversa Belluno, confluisce nel Piave nei pressi di Trichiana;
- torrente Raboso: confluisce al Piave nei pressi di Sernaglia della Battaglia;

- torrente Soligo: ultimo affluente del bacino montano, confluisce nel Piave dopo la stretta di Falzè nei pressi di Susegana.

1.3.3 La rete fluviale di pianura

Nella rete montana le caratteristiche del moto riflettono le caratteristiche del bacino imbrifero, mentre nella rete di pianura i fenomeni propagatori sono preponderanti.

La rete fluviale di pianura comprende l'asta principale a valle di Nervesa della Battaglia (78 m s.l.m.) fino alla foce. Tale tratto ha una lunghezza di circa 64 km ed è caratterizzato da una pendenza media dell'1.2 ‰: all'interno di questo si può riconoscere un primo tratto, fra Nervesa e Ponte di Piave, in cui l'alveo conserva il suo carattere torrentizio con una morfologia ampia e ramificata, tipica dei fiumi ad alveo pluricursale (braided rivers) e un secondo tratto, quello terminale, in cui assume le caratteristiche tipiche dei fiumi di pianura con un alveo di magra che si restringe fino ad una larghezza di 80 metri.

Nell'ultimo secolo la portata media annuale registrata è notevolmente diminuita a causa dell'incremento del prelievo idrico per uso irriguo; le portate di magra erano dell'ordine di 40 – 50 m³/s mentre ora, nel periodo estivo, si attestano valori che faticano a raggiungere i 5 m³/s, lasciando ampie zone di secca soprattutto a monte del cambio di pendenza di Candelù. Questo fenomeno risulta accentuato dalla dispersione, per la composizione ghiaiosa dell'alveo, di una frazione delle acque che vanno a rifornire le falde. Le conseguenze di ciò sono state un restringimento dell'alveo di magra e un aumento della vegetazione in alveo, con un conseguente aumento della scabrezza dannoso per il deflusso di piena.

La planimetria del fiume a valle di Zenson si mostra tortuosa, tranne per i tratti canalizzati a valle di Musile di Piave, creati sia per allontanare le portate dalla laguna di Venezia e così evitarne l'interrimento del bacino Nord, sia per ridurre l'entità delle perdite di carico accorciando il tratto terminale.

1.3.4 I laghi ed i bacini artificiali

Le acque del fiume Piave vengono ampiamente sfruttate sia per la produzione di energia idroelettrica, sia per soddisfare il fabbisogno irriguo. Nel corso degli anni sono entrati in funzione i seguenti invasi artificiali:

- Santa Caterina sull'Ansiei (5.5 milioni di metri cubi);
- Pieve di Cadore sul Piave (56 milioni di metri cubi);
- Valle sul Boite (4.2 milioni di metri cubi);
- Vodo sul Boite (1.2 milioni di metri cubi);
- Pontesei sul Maé (5.8 milioni di metri cubi);
- Val Gallina sul Gallina (5.9 milioni di metri cubi);
- Fedaia, nel bacino dell'Adigem ma scarica nel Cordevole (17 milioni di metri cubi);
- Cavia sul Biois (2.3 milioni di metri cubi);
- Mis sul torrente Mis (39 milioni di metri cubi);
- Stua sul Caorame (3.5 milioni di metri cubi).

Il bacino del Piave è segnato anche dalla presenza di laghi naturali: il lago di Misurina ed il lago di Alleghe nelle Dolomiti Bellunesi (5.4 milioni di metri cubi), i due laghi di Revine (Santa Maria e Lago, 5.3 milioni di metri cubi) ed il lago di Santa Croce che però alimenta le centrali idroelettriche del comprensorio del Fadalto, che scaricano nel Livenza (120 milioni di metri cubi).

I serbatoi di Pieve di Cadore, Santa Croce e Mis coprono il 90% del volume complessivamente invasabile.

1.4 Opere di utilizzazione

Numerose, nel corso degli anni, sono state le opere realizzate col fine di consentire un sufficiente prelievo idrico a scopo irriguo. Le opere tra queste appartenenti al bacino montano (illustrate nel paragrafo 1.3.4) sono generalmente poste negli affluenti del fiume Piave, mentre avvicinandosi alla sezione di chiusura si incontrano opere poste nell'alveo principale, dalle quali vengono alimentati i canali artificiali di derivazione.

1.4.1 La traversa di Soverzene



Figura 1.3: La traversa di Soverzene.

La traversa di Soverzene (figura 1.3), posta a monte della frana di Fadalto, sbarra il corso naturale del Piave sostenendone il livello, così da alimentare il canale artificiale che indirizza l'acqua proveniente dalla centrale di Soverzene e le portate residue del Piave verso il lago di Santa Croce, bacino che alimenta le centrali del Fadalto. La traversa si compone di una parte fissa ed una mobile, capace di regolare i deflussi e quindi il livello a monte. La soglia fissa, lunga 269.5 m, è inclinata linearmente da 391 m s.m.m. a 390.5 m s.m.m. e sostiene, tramite 17 pile, la strada soprastante; queste pile producono un restringimento della sezione di deflusso fino a 259.2 m. La parte mobile è costituita da 3 luci presidiate da paratoie a settore circolare metalliche, ognuna delle quali ha una larghezza di 12 m e poggia sul basamento posto a quota 386.6 m s.m.m..

Inoltre c'è una paratoia piana posta anch'essa alla quota di 386.6 m s.m.m. che controlla una larghezza di 6 m; infine, in sinistra, vi sono due paratoie sghiaiatrici, della larghezza di 6 m ciascuna, a chiusura del canale artificiale di presa.

Un argine in terra in destra completa l'opera. La quota di massima regolazione a monte della traversa è pari a 390.5 m s.m.m., mentre la quota di massimo invaso raggiunge i

392.4 m s.m.m.. L'opera può scaricare, con il massimo invaso, una portata di circa 2100 m³/s.

1.4.2 La traversa di Busche

La traversa di Busche (figura 1.4) si pone qualche chilometro a valle rispetto alla confluenza tra il fiume Piave ed il torrente Cordevole ed è un'opera destinata esclusivamente ad uso idroelettrico con una portata massima derivabile di 61.4 m³/s che alimenta la centrale di Quero su un salto di circa 59 m.

Essa è formata da una soglia fissa posta a quota 237.2 m s.m.m. della lunghezza di 119 m e da quattro paratoie di regolazione, tre delle quali larghe 33 m e di tipo composto (paratoia a ventola su paratoia piana). La quarta paratoia, posta a presidiare il canale di presa, è piana e di larghezza di 10 m. Il bordo inferiore delle paratoie è posto a quota 232 m s.m.m., mentre l'altezza delle paratoie composte può raggiungere al massimo i 5.2 m: la paratoia piana in acciaio è alta 3.9 m e la paratoia a ventola, alta 1.3 m, è sagomata con il profilo Creager.



Figura 1.4: La traversa di Busche.

1.4.3 La traversa di Fener

La traversa di Fener (figura 1.5) è composta da una soglia fissa lunga oltre 300 m, affianco a due luci presidiate da paratoie a settore automatiche di larghezza 22.5 m, poste vicino all'opera di presa.

Le paratoie sostengono un livello a monte di 3 m, con la quota di massimo invaso pari a 171.8 m s.m.m. ed il basamento posto alla quota di 168.8 m s.m.m..

La massima derivazione dell'opera di presa, in destra, è pari a 46 m³/s ed il canale derivato raccoglie anche la portata in arrivo dalla centrale di Quero. Essa ha una soglia a quota 169.7 m s.m.m. ed si compone di 7 paratoie piane della larghezza di 4.5 m che immettono l'acqua nel bacino di carico. Il fondo del bacino di carico è posto a 168.2 m s.m.m., mentre la soglia del canale di derivazione è a quota 169.18 m s.m.m.; la regolazione del livello nel bacino di calma viene effettuata grazie a 5 paratoie che controllano il canale scaricatore.



Figura 1.5: La traversa di Fener.

1.4.4 La traversa di Nervesa della Battaglia

La traversa di Nervesa (figura 1.6) segna la sezione di chiusura del bacino montano del fiume Piave. L'opera ha finalità sia di produzione idroelettrica, sia irrigue, andando ad alimentaaare il Canale della Vittoria ed alcune micro-centrali. Lo sbarramento è formato da una soglia sfiorante fissa lunga circa 300 m la cui parte sinistra, lunga circa 100 m, si dispone ortogonalmente alla corrente, mentre la restante parte assume una disposizione ad arco inclinandosi molto nei pressi della sponda destra. All'interno della traversa è presente il condotto terminale del canale Castelletto-Nervesa che deriva parte della portata proveniente dal lago di Santa Croce.

Per favorire il funzionamento dell'opera di presa, lo sfioro fisso è inclinato verso destra; anche il dislivello fra lo sfioro e la vasca di valle risulta più importante verso la sponda sinistra piuttosto che verso la destra.

La traversa è caratterizzata da due luci: la prima presidiata da una paratoia composta larga 10 m, la seconda da una paratoia piana di 6 metri di larghezza. La paratoia composta è costituita da una paratoia a ventola di 1.2 m sovrapposta ad una paratoia piana di altezza pari a 2 m.



Figura 1.6: La traversa di Nervesa della Battaglia.

Capitolo 2

Analisi del rischio idraulico del fiume Piave

Per conoscere le problematiche e le criticità del fiume Piave è necessario studiare la storia del corso d'acqua, in particolare si deve porre attenzione agli eventi di piena straordinari ed a quelli, anche non propriamente idraulici, che hanno prodotto profondi cambiamenti alla geomorfologia del bacino e all'alveo del fiume stesso.

Si procederà quindi ad elencare i principali eventi di piena che hanno segnato il bacino del Piave, soffermandosi in particolare sulla piena del Novembre 1966. Questo evento è la piena storica più gravosa registrata e costituisce l'evento di riferimento, sia per lo studio delle criticità che per la progettazione, per il territorio Veneto così come per i numerosi corsi d'acqua a livello nazionale. Per questa piena verranno discussi brevemente anche i caratteri meteorologici e idrologici.

2.1 Raccolta delle piene storiche

Verranno qui presentate le principali piene che dal XX secolo in poi hanno interessato il tratto medio-basso dell'alveo del fiume Piave. Questa raccolta è presente nel Piano Stralcio per la Sicurezza Idraulica dell'*Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione* (2008).

Nella prima metà del secolo il Piave è stato soggetto a nove elevate piene verificatesi negli anni 1903, 1905, 1906, 1907, 1914, 1926 (Maggio e Ottobre) e 1928.

29 – 30 *Ottobre* 1903: La piena si verificò lungo tutta l'asta principale del fiume Piave. Nel bacino montano il Cordevole esondò a Cencenighe e la strada per Agordo fu interrotta per l'asporto di 2 ponti; a Caviola e a Piè di Falcade il Biois ed il Tegosa ruppero gli argini, a Taibon la viabilità fu interrotta da alcune frane. I livelli idrometrici massimi vennero raggiunti nel tratto di pianura tra Boccacallalta e il mare, per il persistere dell'alta marea che impedì il deflusso delle acque fluviali verso il mare. All'idrometro di Zenson, fu registrata una quota idrometrica di 11,58 m in corrispondenza del colmo di piena, superata solo da quella relativa al Novembre del 1966. Si verificarono tracimazioni sia in destra che in sinistra idrografica, in corrispondenza (in destra) dell'abitato di Zenson. Analoghi fenomeni furono rilevati a S. Donà e a Grisolera, in sinistra.

L'invasione delle acque di tracimazione avvenne con lame d'acqua limacciosa dello spessore di 15 – 20 cm. La lunghezza degli argini complessivamente sormontati, rispettivamente in

destra e in sinistra, ammontò a 3570 m e 150 m. Alle tracimazioni si associarono numerosi “fontanazzi”; minacce di rotta arginale si ebbero a Zenson e a Ponte di Piave e a valle di S. Donà.

16 *Maggio* 1926: La piena si sviluppò su tutto il corso principale del Piave. Nella zona montana il Cordevole in piena, nel Comune di Rocca Pietore, danneggiò la rete stradale; il versante sinistro del torrente Zunaia, nel comune di Alleghe, fu segnato da una grossa frana. In pianura il Piave portò allagamenti ai terreni coltivati in località Saletto a Breda di Piave. Le precipitazioni più intense si registrarono dal 14 al 17, con un’ulteriore intensificazione tra il 15 ed il 16 Maggio. La piena fu contenuta in alveo e non vennero provocati danni importanti ai manufatti o alle opere idrauliche. Il colmo si presentò a Nervesa il giorno 16 con una quota idrometrica di 2,84 m. La piena fu di breve durata, circa due giorni. La diversità di comportamento rispetto alle piene precedenti si deve al fatto che la piena, mantenendosi entro l’alveo, ha avuto il tempo necessario per esaurirsi in modo naturale; al contrario, durante le altre piene, le acque fuoriuscirono a causa delle rotte arginali, rientrando nell’alveo al diminuire dei livelli idrometrici, andavano a sostenere il deflusso durante la fase di esaurimento.

6 – 13 *Novembre* 1951: Gli effetti più importanti della piena si sono visti, in pianura, nei comuni di Alano di Piave, di Cison Val Marino e Cimadolmo, dove in località Stabiuzzo, le acque hanno asportato parte dell’area golenale. In località Le Grave sono allagati circa 50 ettari di terreno e 30 edifici e a Maserada sul Piave dove, in località Candelù, si hanno danni alle difese idriche a Zenson dove avviene una rotta arginale.

24 *Ottobre* 1953: La piena coinvolge il Piave pedemontano e di pianura causando danni alle difese idriche. Il territorio comunale di Maserada viene allagato e viene danneggiata la difesa a tenaglia a Breda di Piave; vengono allagati 25 ettari di terreno coltivato e alcuni edifici; presso Ponte di Piave le acque invadono 50 ettari di terreno. Una superficie di 200 ettari viene allagata tra Salgareda e Fagarè (S.Biagio di Collalta) e si registrano allagamenti anche a Zenson di Piave.

Settembre 1965: Alluvione nel Comune di Canale d’Agordo che causa danni per centinaia di milioni.

3 – 6 *Novembre* 1966: Le precipitazioni che causarono l’evento eccezionale del Novembre 1966 sono state caratterizzate da una diffusa e contemporanea distribuzione, oltre a verificarsi con continuità e persistenza dalle ore 6 del 3 Novembre per circa 40 ore; l’intensità di pioggia, inoltre, aumentò nel tempo. Un’altra aggravante riguarda il contemporaneo verificarsi dell’alta marea che ha ostacolato il deflusso delle acque del Piave, oltre ad allagare ampie aree della pianura costiera. In tale occasione, in quasi tutti i corsi d’acqua, furono superati i massimi livelli idrometrici precedentemente osservati. Sul Piave, l’idrometro di Segusino rilevò il colmo raggiunto alle ore 18 del 4 Novembre 1966 con incremento medio orario di 0,20 m e quota idrometrica massima di 6,48 m, 1,20 m oltre la massima registrata durante la piena del 3 Settembre 1965.

12 *Giugno* 1975: Piena determinata da precipitazioni molto intense in tutto il Veneto orientale. In particolare è stata colpita la valle del Cordevole, dove si manifestano erosio-

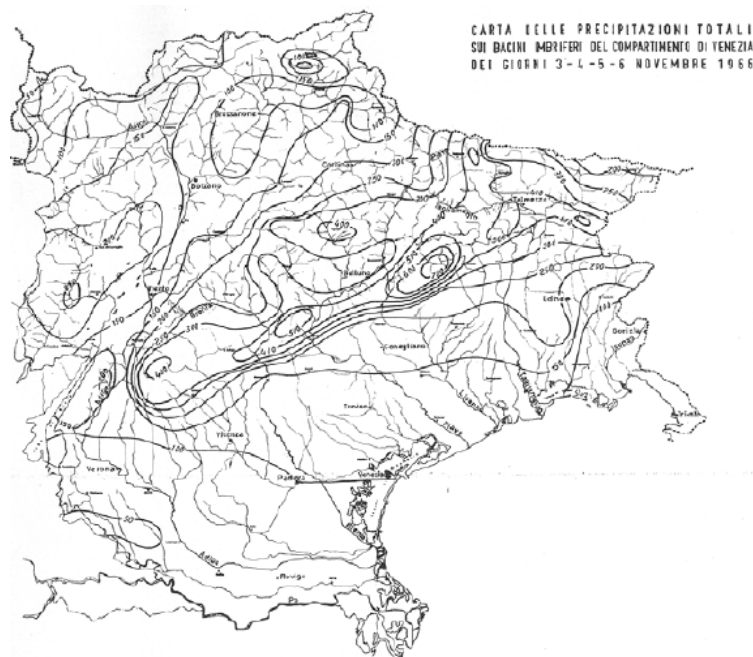


Figura 2.1: Carta delle precipitazioni totali nel Triveneto nei giorni 3/6 Novembre 1966. Fonte: ENEL - La piena dei fiumi della Regione Veneta del Novembre 1966.

ni e alluvionamenti. In pianura si rilevano allagamenti nelle zone golenali a S. Biagio di Callalta e a S. Donà, dove vengono minacciate alcune abitazioni.

11–12 *Ottobre* 1987: Un nubifragio abbattutosi sul territorio trevigiano allaga le golene nel Comune di Zenson; gli affluenti di sinistra del Piave si gonfiano provocando straripamenti a Susegana ed in altri Comuni con conseguenti dissesti, accompagnati da numerose frane nella zona collinare.

2.2 La piena del 3/6 Novembre 1966

Come anticipato all’inizio di questo capitolo, la piena del 1966 è considerata l’evento di riferimento per la progettazione delle principali opere di difesa idraulica del bacino del fiume Piave. La ricostruzione di tale evento è tutt’altro che banale poichè, pur disponendo di sufficienti informazioni riguardanti gli afflussi meteorici, non sono disponibili adeguate registrazioni idrometriche.

2.2.1 Afflusso meteorico

Gli afflussi meteorici sono disponibili sono stati registrati in 22 stazioni pluviometriche omogeneamente distribuite nell’area del bacino, dove ogni pluviografo ha un’area di influenza di circa 200 km². Attraverso le curve di possibilità climatica di ciascuna stazione è stato determinato il tempo di ritorno T_R associato all’afflusso meteorico, mostrato in tabella 2.1 (Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2008). La distribuzione territoriale delle precipitazioni si può osservare nella carta delle precipitazioni in figura 2.1 (ENEL - La piena dei fiumi della regione veneta del novembre 1966).

Pluviografo	Precipitazione per $t_p = 36$ ore (mm)	T_R (anni)
Dosoledo	184	45
Santo Stefano	166	45
Passo Falzarego	197	300
Cortina	167	200
San Vito	220	3500
Perarolo	328	30000
Longarone	316	600
Fortogna	241	70
Caprile	200	1500
Soverzene	256	500
Santa Croce	488	9500
Forno di Zoldo	344	10000
Agordo	447	10000
Belluno	201	250
S. Antonio di Tortal	380	400
La Guarda	380	60
Pedavena	329	1200
Seren del Grappa	558	5500
Valdobbiadene	172	12
Cison di Valmarino	187	11

Tabella 2.1: Distribuzione delle altezze di pioggia registrate per ogni stazione. Fonte: Autorità di Bacino - Piano stralcio per la sicurezza idraulica del medio e basso corso del fiume Piave.

All'interno del bacino del Piave le precipitazioni del 1966 furono molto disuniformi riguardo la probabilità di avvenimento e per l'intensità, oscillando tra un'altezza minima di 160 mm ed un'altezza massima di 1550 mm. Si possono dunque individuare delle zone geografiche con precipitazione caratteristica:

- la fascia collinare a bassa precipitazione (fra 170 e 190 mm);
- la fascia prealpina lungo la linea Monte Grappa - Col Visentin con la massima precipitazione (fra 380 e 550 mm);
- il fondovalle bellunese con precipitazioni attenuate (fra 200 e 250 mm);
- la fascia delle Dolomiti centro-meridionali a precipitazione accentuata (fra 250 e 450 mm);
- la fascia delle Dolomiti settentrionali con precipitazione ancora una volta attenuata (fra 160 e 220 mm).

L'unica caratteristica che risulta omogenea all'interno del bacino è l'andamento della precipitazione nel tempo, eccetto per i dati registrati ad Auronzo e Santo Stefano. La forma dei pluviogrammi è tale da presentare una crescita graduale dell'intensità di pioggia fino all'esaurimento della precipitazione. Questo particolare andamento pluviometrico porta un aumento del deflusso nel bacino pari al 20% rispetto ad un classico pluviogramma ad intensità costante.

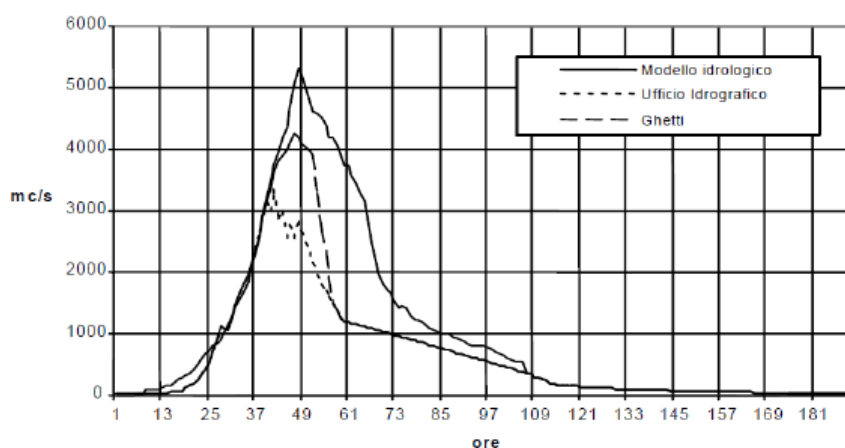


Figura 2.2: Confronto fra gli idrogrammi di piena a Segusino nei giorni 3/6 Novembre 1966. Fonte: Autorità di Bacino - Piano stralcio per la sicurezza idraulica del medio e basso corso del fiume Piave.

2.2.2 Deflusso di piena

Il principale problema nella ricostruzione del deflusso di piena del 1966 consiste nell'assenza di misurazioni continue dei dati idrometrici dell'evento, in particolare a valle di Soverzene. Gli unici dati registrati riguardano una parte della fase di crescita della piena e del suo colmo a Busche; il livello al colmo nelle traverse di Fener e Nervesa della Battaglia: con questi è possibile stimare quale fosse il valore al colmo della portata, ma non la forma dell'idrogramma di piena.

Un altro problema è relativo alla stazione di misura di Segusino, dove si hanno delle stime contrastanti riguardo il valore al colmo del livello idrometrico. L'ufficio idrografico fissa tale livello a +6.48 m rispetto allo zero dello strumento, mentre più recenti studi (Ghetti et al., 1970) sostengono un valore massimo raggiunto pari a +7 : 50 m, che corrisponde, tramite la scala delle portate, ad una portata al colmo di 4250 m³/s. Con procedimento analogo sono state stimate le portate al colmo anche nelle altre sezioni: Busche 3860 m³/s, Fener 4880 m³/s, Nervesa della Battaglia 4850 m³/s.

Anche l'Ingegnere Susin si è occupato della ricostruzione della piena del 1966 tramite un modello idrologico, ed in figura 2.2 si può vedere il confronto fra i vari risultati ottenuti a Segusino.

2.3 La mitigazione del rischio idraulico

Parlare di mitigazione del rischio idraulico richiede una grande conoscenza storica e geografica degli eventi straordinari che hanno segnato il bacino idrografico e dei luoghi in cui tali eventi si sono verificati. Alla luce di quanto riportato nelle sezioni 2.1 e 2.2 relativamente agli eventi storici, a seguire si analizzeranno le zone geografiche ritenute critiche sotto l'aspetto idraulico.

2.3.1 Valutazione delle criticità

Le criticità idrauliche del fiume Piave possono essere geograficamente divise in due categorie:

- insufficienza idraulica del bacino montano;
- insufficienza idraulica del tratto di pianura.

Questa tesi si pone come obiettivo lo studio delle criticità del bacino montano del fiume Piave, con specifico riferimento a quelle che si manifestano lungo l'asta principale del fiume stesso: a Perarolo di Cadore, a Longarone e a Belluno.

Insufficienza idraulica del bacino montano

Le principali condizioni di criticità, che caratterizzano il bacino montano del fiume Piave, si manifestano in zone urbanizzate realizzate in area golenale o a ridosso delle pertinenze fluviali.

I casi, illustrati procedendo da monte verso valle, sono i seguenti:

- il nodo idraulico di Perarolo, alla confluenza tra il torrente Boite e il fiume Piave: le problematiche idrauliche riguardano sostanzialmente l'insufficienza dell'alveo causata dalla canalizzazione in seguito alla costruzione del ponte sul Boite della Statale Alemagna e la presenza di sponde in frana con grandi apporti di materiale nel Boite;
- la zona industriale di Longarone: in seguito al disastro del Vajont, per cercare di recuperare aree destinabili alla zona industriale, furono occupate aree golenali del Piave;
- la piana del Rai: emissario del lago di Santa Croce non riesce a sopportare le acque di piena provenienti da esso e nemmeno dal suo bacino imbrifero a causa della limitata pendenza e dal rigurgito che il Piave provoca al canale, si ricorda infatti l'allagamento totale della piana in occasione della piena del 1966;
- la città di Belluno, costruita sullo sperone roccioso fra il torrente Ardo ed il Piave: recentemente, a Sud-Est, è stata rialzata ed arginata un'ampia golena per l'insediamento di attività urbane ora a rischio allagamento;
- il torrente Cordevole a valle di La Stanga: si ha in questa zona un forte sviluppo della vegetazione arborea ed arbustiva, una volta equilibrato da una sistematica raccolta ora invece incontrollato, che causa ostacoli al deflusso ed una riduzione della capacità di portata.

È opportuno ricordare che, anche se le criticità principali del bacino montano sono quelle citate sopra, ai fini di questo elaborato sono state prese in esame soltanto le situazioni particolari che riguardano l'asta principale del fiume Piave in corrispondenza degli abitati di Perarolo, Longarone e Belluno.

Insufficienza idraulica del tratto arginato a valle di Nervesa

Il tratto terminale di pianura del fiume Piave si può a sua volta suddividere in tre diverse tratte caratterizzate da diverso valore della pendenza longitudinale del fondo e quindi da differente comportamento idrodinamico.

Il primo tratto va da Nervesa della Battaglia a Candelù e mostra un'elevata pendenza del fondo, altezze arginali contenute e un ampio alveo pluricursale (braided) in alluvioni

ghiaio-sabbiose che permettono di far transitare fino a 5000 m³/s. Il secondo tratto, compreso tra Candelù e Zenson di Piave, si distingue per caratteri intermedi fra il tratto a monte e quello a valle e vi può transitare una portata massima pari a 3000 m³/s circa. Il tratto terminale si estende da Zenson di Piave fino alla foce con un alveo molto inciso e ristretto, contenuto tra argini relativamente elevati (fino a 7 metri), una modesta pendenza del fondo, seguendo un percorso meandriforme a monte e rettilineo a valle di San Donà di Piave. La portata massima transitabile è simile a quella che caratterizza il tratto intermedio, circa 3000 m³/s.

Storicamente la tratta intermedia è quella più frequentemente soggetta a rotte arginali a causa delle repentine riduzioni di pendenza.

Capitolo 3

Studio della propagazione delle onde di piena

La propagazione di un'onda di piena in un alveo come quello del fiume Piave, caratterizzato da tratti con dimensioni trasversali molto ampie, nei quali non è possibile determinare a priori la direzione del flusso, deve essere affrontata utilizzando schemi di calcolo di tipo bidimensionale. Tali schemi sono utili anche per descrivere la propagazione sul territorio adiacente di eventuali onde di sommersione generate da fenomeni di cedimento o sormonto arginale, purché le equazioni del moto siano opportunamente adattate e nella modellazione delle aree interessate si tenga conto degli effetti non trascurabili prodotti dalle strutture presenti sul territorio sui fronti di allagamento.

Nell'allestimento del modello propagatorio del Piave si è proceduto alla realizzazione di uno schema uni-bidimensionale a fondo fisso con cui si è simulato il comportamento idraulico dell'intero territorio modellato, considerando le diverse opere presenti (argini, rilevati stradali, opere di regolazione, idrovore, ecc...) e anche il reticolo idrografico minore.

3.1 Il modello bidimensionale

3.1.1 Equazioni del moto bidimensionale

Il modello matematico, ampiamente descritto in molte pubblicazioni scientifiche (D'Alpaos and Defina, 1993; D'Alpaos et al., 1994; D'Alpaos and Defina, 1995; Defina, 2000; D'Alpaos and Martini, 2003; D'Alpaos et al., 2003; D'Alpaos and Defina, 2007) e che ha trovato in questi anni altrettanto numerose applicazioni, si basa sulla soluzione delle equazioni di De Saint Venant. Tali equazioni descrivono il moto bidimensionale di una corrente a superficie libera nelle ipotesi di distribuzione idrostatica delle pressioni, velocità uniformemente distribuite lungo la verticale e di fondo inerodibile. Uno schema numerico agli elementi finiti su di una griglia a maglia triangolare, utilizzata per la discretizzazione del dominio, consente la soluzione delle equazioni di De Saint Venant.

Il modello risolve unitamente le equazioni del moto mediate sulla verticale nella direzioni orizzontale x ed y e l'equazione di continuità, scritte come segue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\tau_{wy}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

nelle quali h indica la quota della superficie libera; x e y sono le direzioni spaziali orizzontali correnti; g è l'accelerazione di gravità; ρ è la densità del fluido; t è il tempo; \vec{q} è la portata unitaria di componenti q_x e q_y secondo le due direzioni orizzontali; R_{ij} sono gli sforzi di origine viscosa e turbolenta nel piano orizzontale in cui i e j indicano le direzioni x o y ; $\tau_b = (\tau_{bx}; \tau_{by})$ è lo sforzo tangenziale al fondo espresso dall'equazione (3.3) e $\tau_w = (\tau_{wx}; \tau_{wy})$ è lo sforzo prodotto dall'azione del vento sulla superficie libera espresso dall'equazione (3.4).

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gY \left(\frac{|\mathbf{q}|}{k_s^2 H^{10/3}} \right) \mathbf{q} \quad (3.3)$$

$$\tau_w = \rho_a c_d U_{wind}^2 \quad (3.4)$$

Nelle equazioni (3.3) e (3.4) relative agli sforzi tangenziali agenti sono indicati con k_s il coefficiente di scabrezza secondo Strickler, con U_{wind} la velocità del vento e con c_d il coefficiente di resistenza, determinato nel modello con la relazione semiempirica:

$$c_d = c_{d_0} (1 - e^{\epsilon_W U_{wind}}) \quad (3.5)$$

scegliendo opportunamente c_{d_0} ed ϵ_W .

I termini η , Y e H che compaiono nelle equazioni dinamiche (3.1) e in quella di continuità (3.2), indicano, rispettivamente, nel tempo generico e per ciascun elemento, la frazione locale di dominio allagato, il volume d'acqua per unità di superficie e una profondità d'acqua equivalente, introdotta per descrivere l'effetto dei termini dissipativi quando il tirante si riduce e diventa confrontabile con le dimensioni delle irregolarità del terreno.

3.1.2 Transizione asciutto-bagnato: la media di fase

Nella propagazione di una lama d'acqua sottile su un terreno naturale, l'esperienza insegna l'importanza delle irregolarità della superficie, che assicurano, all'interno dell'area in esame, l'esistenza di un transitorio nel quale coesistono porzioni di suolo asciutte accanto a porzioni già bagnate. Il contributo più innovativo fornito dal Dipartimento IMAGE Nella risoluzione delle equazioni descritte nel paragrafo 3.1.1 sono stati introdotti, ad opera del dipartimento IMAGE, due parametri, η e H , mediante i quali vengono modificate rispettivamente le equazioni dinamiche e di continuità. Questi parametri sono dipendenti da una grandezza caratteristica a_r , dimensionalmente uguale ad una lunghezza, che è direttamente legata all'altezza e alla distribuzione delle irregolarità presenti sulla superficie dei singoli elementi con cui è schematizzato il campo di moto.

Al riguardo si osserva che abitualmente la superficie del dominio di calcolo è topograficamente caratterizzata attraverso la quota media degli elementi che lo compongono, trascurando, quindi, il ruolo delle irregolarità del terreno come conseguenza di questa operazione di media. Tale semplificazione è accettabile per tiranti d'acqua elevati rispetto all'ampiezza delle irregolarità della superficie, ma è certamente irrealistica per tiranti d'acqua modesti, a causa di una non corretta valutazione delle resistenze al moto e del volume d'acqua contenuto nell'elemento al generico istante t di calcolo.

Mantenendo la rappresentazione di superficie piana per ogni singolo elemento del reticolo di calcolo si avrebbe una istantanea transizione asciutto-bagnato, che comporterebbe tutta una serie di problemi numerici, ben noti in letteratura, che affliggono i classici schemi

bidimensionali a griglia fissa.

Per rimuovere questi limiti, nel modello proposto si è ipotizzato che esista un intervallo di profondità all'interno del quale, durante l'evolversi della piena, si verificano condizioni variabili, comprese tra le due situazioni limite di elementi completamente asciutti e/o completamente bagnati.

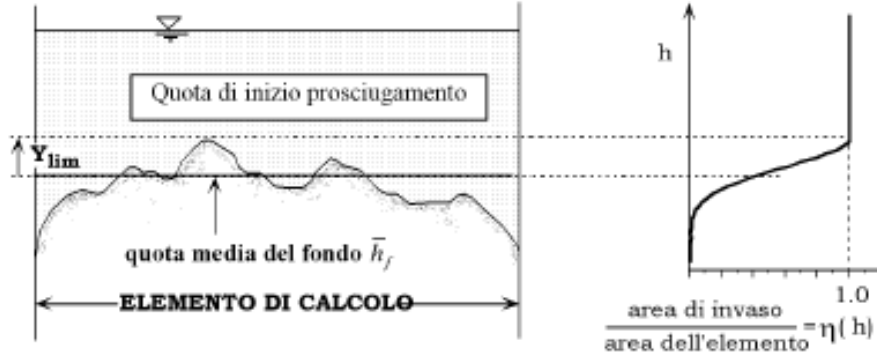


Figura 3.1: Percentuale di area bagnata η in funzione della quota della superficie libera.

L'idea che sta alla base dell'approccio proposto consente di tradurre concettualmente il transitorio asciutto-bagnato, facendo in modo che la capacità di invaso del singolo elemento (vale a dire la possibile estensione della superficie libera al variare della quota sul singolo elemento in rapporto alla superficie totale dell'elemento stesso) vari con continuità da un valore pressoché nullo, quando la quota idrometrica dell'elemento è inferiore alla quota minima delle irregolarità del terreno, al valore che compete all'intera estensione dell'elemento, quando la quota idrometrica è maggiore o uguale alla quota massima del terreno. Come indice dell'ampiezza delle irregolarità si introduce un parametro denominato a_r , pari alla differenza tra la quota della più alta asperità e la quota media h_f , assunta come quota dell'elemento stesso (figura 3.1).

Dal punto di vista matematico, per applicare una operazione di media alle equazioni del moto di De Saint Venant si può utilizzare la funzione di fase:

$$\varphi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & z > h_f \\ 0 & z \leq h_f \end{cases} \quad (3.6)$$

in cui h_f è la quota del fondo e $\mathbf{x} = (x, y, z)$ è il vettore delle coordinate spaziali.

Indicando con $\langle \rangle$ il processo di media di fase, ad una generica variabile del campo di moto $f(\mathbf{x}, t)$ corrisponde una funzione $F(\mathbf{x}, t) = \langle \varphi(\mathbf{x})f(\mathbf{x}, t) \rangle$ mediata in fase con il medesimo significato dell'equazione 3.7:

$$F(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{A} \int_A \varphi(\mathbf{x})f(\mathbf{x}, t)dA \quad (3.7)$$

essendo A l'area dell'elemento di calcolo. A questo punto, si definiscono le funzioni $\vartheta(\mathbf{x})$ e η come segue:

$$\vartheta(\mathbf{x}) = \langle \varphi(\mathbf{x}) \rangle \quad (3.8)$$

$$\eta = \vartheta(x, y, z) \quad (3.9)$$

che rappresentano, rispettivamente, la frazione di area A che giace sopra la superficie del terreno e la frazione bagnata di A , indicando con h la quota della superficie libera.

Per facilitare l'assegnazione di un valore al parametro a_r , con una diversa interpretazione si può dire che la funzione $\vartheta(\mathbf{x})$ può essere considerata come la probabilità P che l'elevazione locale del fondo h_f all'interno di A non ecceda la generica elevazione z .

$$\vartheta(\mathbf{x}) = P(h_f \leq z) \quad (3.10)$$

In questo modo $\partial\vartheta(\mathbf{x}) = \partial z$ è la funzione densità di probabilità dell'elevazione del fondo all'interno dell'area A e una possibile misura delle irregolarità del terreno è data dalla deviazione standard dell'elevazione del fondo in A :

$$a_r = 2\sigma_b \quad (3.11)$$

Assumendo che in prima approssimazione la distribuzione delle asperità del terreno sia descrivibile da una gaussiana, in queste ipotesi è possibile ricavare un plausibile valore per il parametro a_r in assenza di stime specifiche.

È interessante osservare che il significato della lunghezza caratteristica a_r può essere fortemente concettualizzato al punto da descrivere anche gli effetti di irregolarità molto profonde del terreno, tali da formare una vera e propria rete di canali minori, che contribuiscono in modo rilevante al convogliamento delle acque e ad incrementare la celerità di avanzamento di eventuali fronti di sommersione.

Studi specifici svolti al riguardo hanno dimostrato come, in alcuni casi, raddoppiare il valore di a_r porti anche a quintuplicare la celerità media di avanzamento del fronte e come, al contrario, tale celerità risulti fortemente ridotta nel caso di elementi caratterizzati da modeste asperità ($a_r = 0.01$ m), sui quali con rapidità si passa dalla condizione di superficie asciutta a quella di superficie bagnata.

Sulla base di queste sintetiche considerazioni è immediato comprendere come l'ipotesi di terreno sostanzialmente piatto, adottata dalla quasi totalità dei modelli bidimensionali proposti in letteratura, dia risultati inattendibili riguardo alla velocità di avanzamento dei fronti di allagamento, non appena le irregolarità del terreno assumano un ruolo di una certa importanza sul fenomeno. Di conseguenza, risultano non realistiche le stime fornite da questi schemi relativamente ai tempi caratteristici di avanzamento dell'onda di sommersione in un terreno inizialmente asciutto, soprattutto nelle prime fasi dell'allagamento. Alla luce di quanto esposto, i termini η , Y e H che compaiono nelle equazioni 3.1, 3.2 e 3.3 sono esprimibili come (Defina, 2000):

$$\eta = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{2D}{a_r} \right) \right] \quad (3.12)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta dz = a_r \left(\eta \frac{D}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4(D/a_r)^2} \right) \quad (3.13)$$

$$H \cong Y + 0.27\sqrt{Y} a_r e^{-2Y/a_r} \quad (3.14)$$

nelle quali $\operatorname{erf}()$ è la funzione errore e $D = h - z_f$ è una profondità media data dalla differenza tra la quota della superficie libera e quella del fondo.

3.2 Gli elementi monodimensionali

3.2.1 Elementi monodimensionali “canale”

La rete idrografica minore, oltre ad esercitare un ruolo preciso nel drenaggio del territorio posto in adiacenza alla rete idrografica principale, rappresenta, nel caso di esondazione, una vera e propria via preferenziale per la propagazione dei fronti di allagamento, verso la quale le acque esondate tendono a confluire, accelerando sensibilmente la velocità di avanzamento dei fronti stessi.

La schematizzazione con elementi bidimensionali della rete idrografica minore presenterebbe non poche difficoltà: da un lato porterebbe all'utilizzo di elementi di dimensioni tanto piccole da rendere assai onerosa la fase di costruzione del reticolo, dall'altro potrebbe far insorgere problemi di stabilità ed accuratezza della soluzione numerica, a meno di non adottare passi di integrazione temporale particolarmente ridotti, a discapito della velocità di calcolo. Per questa ragione il modello consente l'impiego accoppiato di elementi bidimensionali ed unidimensionali, utilizzando questi ultimi per descrivere il funzionamento dei canali della rete minore che drena porzioni di territorio soggette a prosciugamento o per simulare piccole incisioni profonde in un dominio sostanzialmente bidimensionale come la rete minore di canali di una laguna a marea.

In particolare, nello schema adottato, gli elementi unidimensionali funzionano come canali “in pressione” a sezione costante, fino a quando le zone laterali che li fiancheggiano sono ricoperte dalle acque, e come canali a pelo libero quando il livello scende al di sotto della quota delle zone laterali.

In queste ipotesi una schematizzazione verosimile del campo di moto è quella illustrata

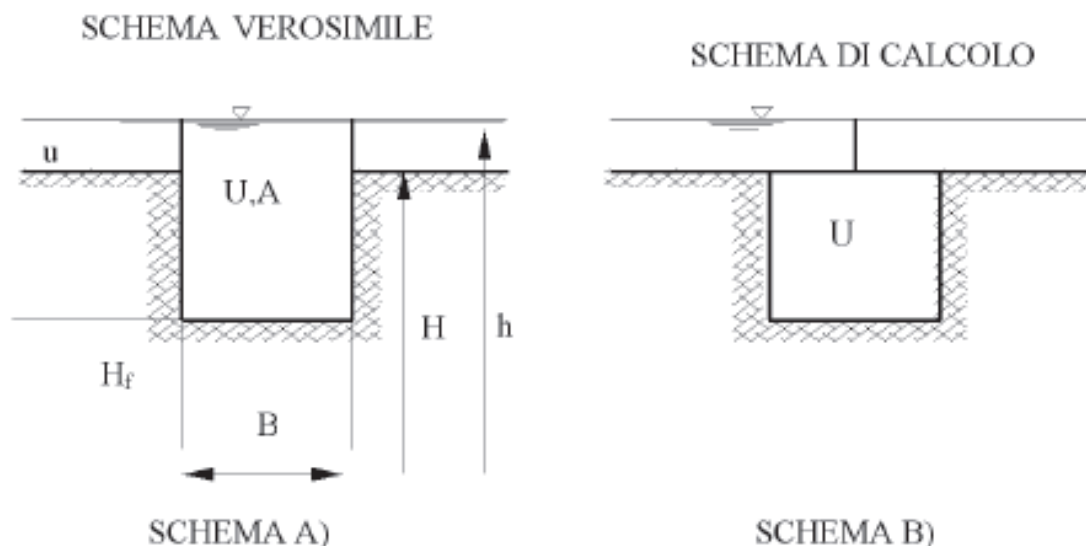


Figura 3.2: Schema di calcolo dell'elemento monodimensionale “canale”.

nello schema A di figura 3.2, ove per semplicità, si è supposta per il canale una sezione rettangolare. Una schematizzazione alternativa a questa e di più semplice implementazione è quella illustrata nello schema B della stessa figura 3.2, nella quale il canale è egualmente considerato, conglobandone però la parte superiore negli adiacenti elementi bidimensionali, che sono estesi fino al suo asse, ed introducendo, per tenere conto della parte inferiore, un

elemento unidimensionale destinato a funzionare come un “canale in pressione” a sezione liquida costante nel caso in cui le superfici laterali siano inondate.

Nello schema proposto, se gli elementi bidimensionali seguono in parte o in toto il contorno della rete di canali che li solcano, questi ultimi, descritti con elementi di tipo monodimensionale, possono essere introdotti o eliminati senza apportare modifiche alla struttura del reticolo di calcolo bidimensionale.

Le equazioni del modello, in questo caso, si semplificano ulteriormente: si assume innanzitutto che l'inerzia convettiva sia trascurabile (scompaiono nelle equazioni di partenza 3.1 e 3.2 i termini di accelerazione convettiva) e si considerano solo sezioni trasversali compatte per le quali sia possibile assumere velocità praticamente uniforme sulla sezione. Sotto queste ipotesi l'equazione del moto e l'equazione di continuità diventano:

$$\frac{\partial h}{\partial s} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q|Q|}{k_S^2 R_H^{4/3} A^2} \quad (3.15)$$

$$\eta(h) \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (3.16)$$

dove s è l'ascissa curvilinea che descrive planimetricamente l'andamento dell'asse del canale; A è l'area della sezione trasversale; Q è la portata che transita attraverso la sezione del canale; R_H è il raggio idraulico.

Il modello si fonda sulla coesistenza di elementi bidimensionali ed unidimensionali che, in alcune zone, possono entrare in sovrapposizione; per tale motivo, nello scrivere il bilancio di massa per ciascun nodo è necessario considerare che parte della portata che fluisce lungo gli elementi unidimensionali è già stata considerata nel calcolo degli elementi bidimensionali (figura 3.2).

In particolare la frazione di portata ΔQ coinvolta può essere espressa dalla seguente relazione:

$$\Delta Q = B[Y_L(v_L \cdot s) + Y_R(v_R \cdot s)]/2 \quad (3.17)$$

nella quale B è la larghezza del canale in superficie; v è il vettore velocità relativo agli elementi bidimensionali adiacenti; Y è il volume d'acqua per unità di superficie; s è il versore che individua la direzione dell'asse del canale e i pedici L ed R individuano, rispettivamente, gli elementi bidimensionali a sinistra e a destra del canale.

La portata che deve essere considerata nel bilancio di massa nodale è pertanto la frazione $Q_a = Q - \Delta Q$ e l'equazione di continuità assume la seguente espressione:

$$\left(1 - \frac{\eta_L + \eta_R}{2}\right) B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_a}{\partial s} = 0 \quad (3.18)$$

dove η rappresenta la frazione bagnata del generico elemento bidimensionale adiacente.

Si noti come, se $\eta_L = \eta_R = 0$ (cioè gli elementi bidimensionali adiacenti sono asciutti o assenti), la portata Q_a è proprio uguale a Q e l'equazione di continuità assume la sua forma consueta.

Se invece η_L e η_R sono prossimi ad uno, viene di fatto inibito l'effetto di invaso, che resta confinato alla parte bidimensionale sovrastante. In questo caso nell'equazione di continuità dovrebbe comparire un termine addizionale che descrive il flusso che dal canale entra (o esce) nella parte bidimensionale sovrastante. Analogamente lo stesso flusso dovrebbe essere sottratto agli elementi bidimensionali adiacenti. Con riferimento alla soluzione numerica, che prevede di fatto bilanci di massa nodali, questi contributi, uguali ed opposti, si elidono. Per questo motivo qui non vengono esplicitamente considerati.

3.2.2 Elementi monodimensionali “speciali”

Per il territorio adiacente alla rete idrografica principale non meno importante dei canali minori è il ruolo che assumono, nella propagazione, i rilevati (stradali, ferroviari o di altra natura), gli argini e le strutture di regolazione di diverso tipo presenti sul territorio. Nella fase iniziale dell'allagamento gli argini e i rilevati fungono da barriere di contenimento, ritardando l'espansione dell'onda di piena sul terreno circostante. Una volta sormontati, essi funzionano, invece, come delle vere e proprie soglie e, non infrequentemente, possono cedere, creando delle brecce attraverso le quali le acque possono lasciare gli alvei principali, più facilmente e in quantità rilevante, per alimentare ulteriormente il fronte di sommersione

Per simulare con buona approssimazione la presenza di questi elementi particolari della morfologia, quali rilevati o manufatti che possono modificare apprezzabilmente l'evoluzione del fenomeno, il modello uni-bidimensionale descritto nei paragrafi precedenti prevede l'inserimento di una serie di elementi unidimensionali (tronchi) speciali, che consentono di descrivere localmente in modo corretto le conseguenze di una manovra di regolazione o di un eventuale cedimento del sistema delle numerose opere di difesa presenti.

Mediante l'inserimento di tali elementi è così possibile simulare, in particolare, il funzionamento delle arginature, che diversamente non potrebbero essere descritte correttamente utilizzando soli elementi bidimensionali, a meno di non aumentare considerevolmente gli oneri di calcolo. I rilevati arginali sono perciò schematizzati come soglie sfioranti, per le quali è sufficiente assegnare le caratteristiche geometriche (lunghezza, quota) e il valore del coefficiente di portata c_q , perché il modello determini, al variare delle quote idrometriche, l'andamento della portata che eventualmente tracima la soglia, considerando condizioni sia di efflusso libero sia di efflusso rigurgitato. Utilizzando queste strutture è egualmente possibile simulare gli effetti di un eventuale cedimento, che apra sul corpo arginale o sul rilevato stradale una breccia, che si va progressivamente ampliando per l'azione erosiva della corrente effluente.

Altri tronchi speciali inseriti nello schema di calcolo consentono di simulare il funzionamento di soglie o salti di fondo, di brevi tratti di canale in pressione, come sottopassi o botti a sifone; altri elementi ancora permettono di simulare il funzionamento di paratoie, che possono operare automaticamente comandate dai livelli o dalla direzione del flusso (porte vinciane). Sempre mediante questi elementi speciali è possibile, infine, simulare il funzionamento degli impianti idrovori presenti all'interno del dominio di calcolo. Ciò consente di semplificare notevolmente la fase di assegnazione delle condizioni al contorno del problema, poiché tali dispositivi, che sono trattati dal modello come condizioni al contorno interne, si attivano automaticamente nel corso della simulazione, quando i livelli idrometrici locali superano le quote di attacco previste per le pompe e si disattivano, quando gli stessi livelli scendono al di sotto delle quote di stacco.

Lo schema implementato permette, infine, di tener conto, volendo, delle portate dovute agli apporti meteorici diretti al suolo, introducendo il relativo idrogramma di piena in corrispondenza ai nodi del reticolo di calcolo deputati a tal fine.

I valori dei parametri che caratterizzano tutti i dispositivi considerati devono essere inseriti nel file dei dati associato a ciascuna simulazione. Gli stessi parametri possono, peraltro, essere fatti variare durante la sessione di calcolo, in modo tale da rendere possibile la simulazione interattiva di situazioni particolari che possono verificarsi nel corso dell'evento simulato, quali i già ricordati eventuali cedimenti di corpi arginali, l'interruzione del

funzionamento di impianti idrovori o altro.

Tronchi spaciali soglia

I tronchi speciali soglia consentono di schematizzare mediante degli elementi monodimensionali il funzionamento di un argine e/o di una traversa.

In particolare, ogni tronco speciale connette tra loro due nodi del reticolo bidimensionale (figura 3.3) e la portata che sfiora al di sopra del tronco è determinata dalle quote idrometriche dei nodi situati a monte e a valle del tronco stesso. Questi elementi speciali possono, pertanto, congiungere o disgiungere le due parti del dominio, a seconda che al di sopra della soglia si instaurino condizioni di flusso nullo, libero o rigurgitato (figura 3.4). Il

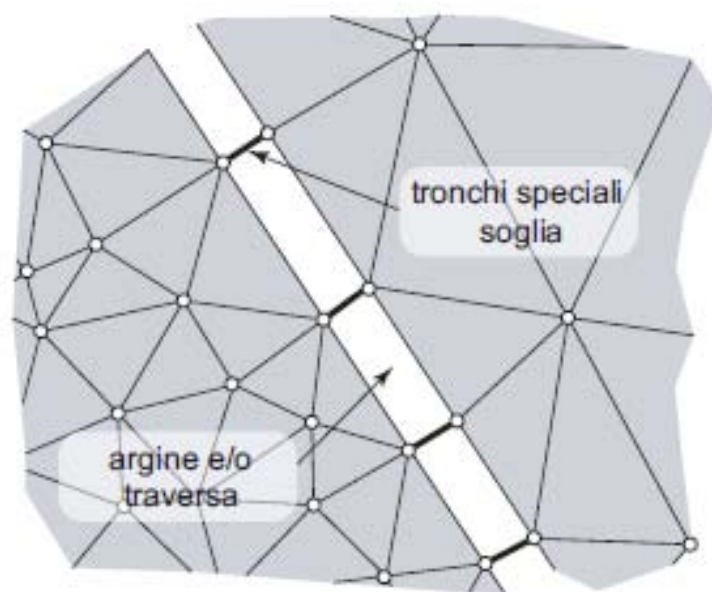


Figura 3.3: Schema di inserimento dei tronchi speciali soglia.

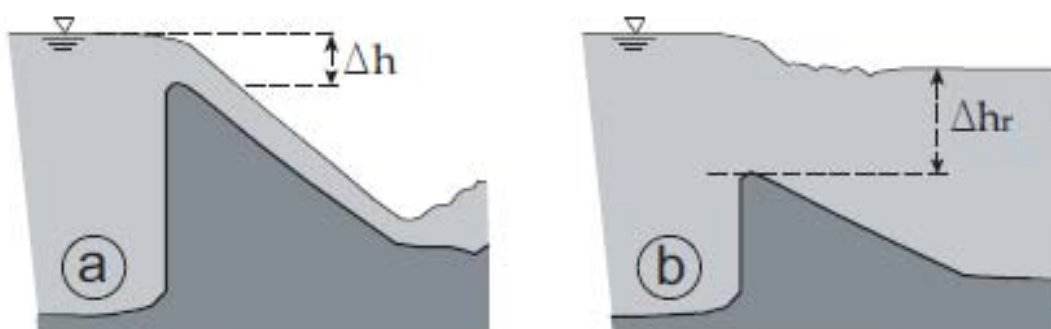


Figura 3.4: Efflusso al di sopra di una soglia: (a) libero e (b) rigurgitato.

tronco speciale soglia è caratterizzato alle sue estremità da due nodi, n_1 e n_2 . Nell'ipotesi in cui l'efflusso avvenga dal nodo n_1 verso il nodo n_2 , per continuità la portata uscente dal nodo n_1 deve essere uguale alla portata entrante nel nodo n_2 ($Q_1 = -Q_2$).

Supponendo di trascurare i carichi cinetici, l'energia specifica a monte e a valle della soglia può essere determinata considerando solamente il carico gravitazionale h . In questo caso

la portata che sfiora al di sopra della soglia dipende solamente dal coefficiente di portata c_q della soglia stessa e dalla larghezza B dello sfioro.

L'efflusso al di sopra della soglia può essere libero oppure rigurgitato (figura 3.4). Affinché l'efflusso sia libero il livello liquido a valle deve essere inferiore alla quota di sfioro del tronco speciale incrementata di $2/3$ del valore del carico idraulico istantaneo. Nel caso contrario l'efflusso risulta rigurgitato. La condizione di efflusso rigurgitato, tuttavia, può aversi anche con livelli liquidi a valle inferiori alla quota di sfioro, nel momento in cui il ricambio d'aria nella parte inferiore della vena (mantenimento della pressione atmosferica lungo il profilo sfiorante) sia impedito o non sia sufficiente e, di conseguenza, l'acqua rimanti al di sotto della vena fino alla soglia.

Nel caso di efflusso libero (figura 3.4a), la portata specifica sfiorata è espressa dalla relazione:

$$q_L = c_{qL} B \sqrt{2g\Delta h}^{3/2} \quad (3.19)$$

mentre nel caso di efflusso rigurgitato (figura 3.4b) la portata specifica si può esprimere come:

$$q_R = c_{qR} B \sqrt{2g\Delta h} \left[\max(\Delta h_R, 0) + \frac{2}{3}\Delta h \right] \quad (3.20)$$

nelle quali q_L e q_R rappresentano la portata per unità di larghezza e c_{qL} e c_{qR} sono i coefficienti di portata della soglia nel caso, rispettivamente, di efflusso libero e rigurgitato. Il modello valuta la portata sfiorata dal tronco speciale nelle due condizioni di efflusso e tra le due sceglie quella minore:

$$q = \min(q_L, q_R) \quad (3.21)$$

Agli elementi speciali soglia, infine, può essere associato un valore della quota di sfioro h_{tr} costante nel tempo oppure variabile. In questo modo il modello consente di simulare la formazione di eventuali brecce in corrispondenza degli argini, una volta associata al tronco speciale una tabella che descrive l'andamento di h_{tr} nel tempo.

Tronchi speciali idrovora

Un impianto idrovoro altro non è che una stazione di sollevamento il cui scopo è quello di riprendere le acque raccolte in bacini la cui quota media è sensibilmente inferiore alla quota idrometrica del corpo idrico ricettore ed introdurvele. Il modello, in particolare, prevede la possibilità di inserire nel dominio di calcolo appositi "tronchi speciali idrovora", che permettono di descrivere in maniera estremamente verosimile il funzionamento di questi dispositivi.

In particolare, l'elemento speciale idrovora collega due nodi del dominio, appartenenti indifferentemente alla parte bidimensionale o a quella unidimensionale del reticolo di calcolo. Il tronco è quindi caratterizzato da un nodo di monte n_1 e da un nodo di valle n_2 e il sollevamento avviene dal nodo n_1 verso il nodo n_2 . Ad ogni tronco speciale idrovora corrispondono un numero di pompe equivalente a quello dell'impianto di sollevamento che si vuole simulare e, ad ogni pompa, sono associati la portata sollevabile Q_p , la sua quota di attacco h_a e la sua quota di stacco h_s . In pratica, il funzionamento della pompa è simulato sottraendo la portata Q_p al nodo di monte n_1 , la quale viene poi fornita al nodo di valle n_2 .

Tali dati costituiranno delle condizioni al contorno interne, direttamente legate ai livelli idrometrici dei nodi collegati tramite l'idrovora, la quale entrerà in funzione automaticamente non appena la soluzione, ad un dato istante, produrrà, per il nodo di monte collegato

all'idrovora, un livello superiore a quello di attacco della prima pompa.

Il funzionamento di attacco-stacco delle pompe è stabilito dal modello sulla base delle seguenti condizioni:

- se la pompa è a riposo, il livello h del nodo di monte viene confrontato con la quota di attacco h_a della pompa; se $h < h_a$ la pompa viene mantenuta a riposo, altrimenti comincia a funzionare con le modalità descritte.
- se la pompa è in funzione, il livello h del nodo di monte viene confrontato con la quota di stacco h_s della pompa; se $h < h_s$ la pompa viene arrestata, altrimenti continua a funzionare con le modalità descritte.

È prevista, anche, la possibilità di introdurre o di emungere semplicemente della portata da un nodo non recapitandola ad alcun altro nodo della griglia, circostanza che si verifica quando un'idrovora scarica direttamente le sue portate all'esterno del dominio di calcolo in un corpo idrico. È sufficiente, a tale scopo, attribuire al nodo di valle un numero convenzionale superiore al numero di nodi della mesh.

3.2.3 Condizioni al contorno

Affinché la soluzione del problema di Cauchy sia unica, è necessario fornire le condizioni iniziali e le condizioni al contorno. Un problema idrodinamico relativo alla propagazione di onde di piena in regime di moto lento richiede l'imposizione a monte di un idrogramma delle portate e a valle l'andamento dei livelli o di una scala delle portate. Nelle simulazioni della propagazione delle onde di piena, la procedura da seguire è quella di fornire una condizione iniziale possibilmente equilibrata, quale può essere, ad esempio, quella rappresentata dal moto stazionario determinato da un valore relativamente piccolo di portata fluente nelle diverse sezioni di ingresso e da un prefissato livello o scala delle portate nella sezione di valle. Tale condizione di moto permanente viene raggiunta imponendo delle condizioni al contorno costanti nel tempo.

La procedura di portare a moto permanente un corso d'acqua su fondo completamente asciutto rappresenta la fase più delicata dal punto di vista numerico: essendo il dominio inizialmente asciutto è necessario adottare un passo di integrazione temporale Δt molto più piccolo di quello che sarà poi utilizzato nella simulazione della propagazione dell'onda di piena.

Un espediente è quello di far propagare sull'asciutto una portata più piccola di quella permanente e quindi, una volta che l'alveo si è "bagnato", incrementare progressivamente la portata fino al valore desiderato, lasciando che il sistema si porti a regime. Per quanto riguarda le condizioni al contorno, lo schema di calcolo adottato garantisce l'impermeabilità dei limiti del reticolo.

Capitolo 4

Schematizzazione del territorio

La rappresentazione del territorio del fiume Piave prende forma da una precedente schematizzazione sviluppata da [Terzariol, 2014], con l'ausilio dei software *Autocad* ed *Incidenze*, sulla base di dati cartografici, aerofotogrammetrici e topografici rilevati dalla Regione Veneto, dall'Autorità di bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione e dal Genio Civile di Treviso.

4.1 Dati cartografici

Tra i dati cartografici ci si è principalmente riferiti alla *Carta Tecnica Regionale (CTR)*, reperibile presso l'infrastruttura dei dati territoriali gestita dalla regione Veneto, disponibile sia in formato numerico sia in formato raster (basate sulla corrispondente versione numerica).

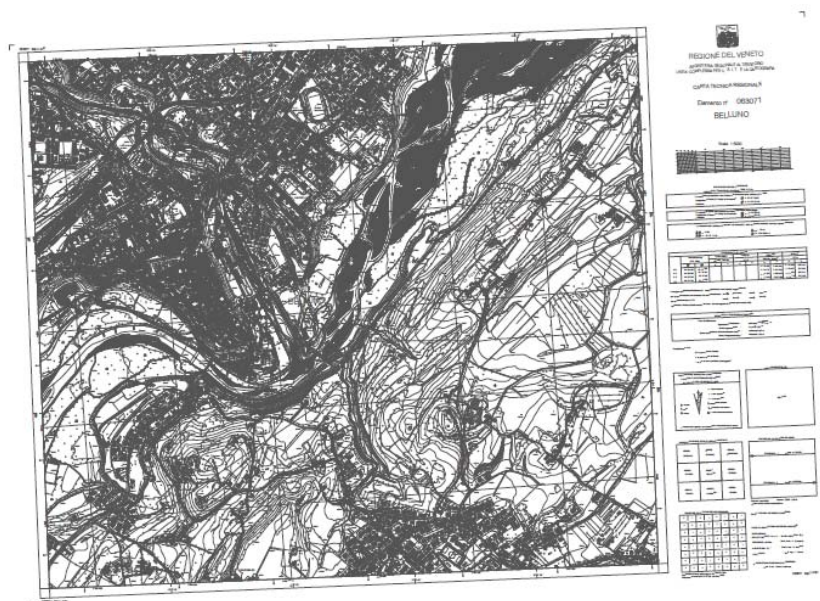


Figura 4.1: Esempio di Carta Tecnica Regionale numerica 063071o - Belluno. Fonte: Sistema Informativo Territoriale, Regione Veneto.

In questa elaborazione sono state utilizzate Carte Tecniche Regionali numeriche in scala 1 : 5000, ricavate da un rilievo aerofotogrammetrico da piattaforma aerea e aggiornate al 31/12/2004.

Tutte le carte utilizzate sono state riferite al *fuso Ovest* del sistema cartografico italiano *Gauss-Boaga* con origine a Roma Monte Mario. La numerazione di ogni cartina indica nei primi tre numeri il foglio di riferimento, con i successivi due numeri la tavoletta e l'ultimo numero si riferisce alla specifica sezione (numerata da 1 a 4 in senso orario partendo da Nord-Est).

Sempre prendendo origine dalle Carte Tecniche in formato numerico, la Regione Veneto mette a disposizione dei file denominati *DTM* ovvero *Digital Terrain Model*. In questi files di testo sono contenuti, all'interno di una matrice, i valori della quota del terreno nel punto corrispondente all'intersezione di una riga e una colonna della matrice, una volta assegnate le coordinate geografiche di un vertice di riferimento della matrice e la dimensione della griglia spaziale che la matrice descrive.

Diversamente dalla Carta Tecnica Regionale, il metadato *DTM* è catalogato e suddiviso secondo la tavoletta di appartenenza, senza un riferimento alla specifica sezione. I dati raccolti sono aggiornati a Luglio 2009.

4.2 Dati aerofotogrammetrici

Altre importanti informazioni vengono fornite dalle ortofoto: rilevate contestualmente alle Carte Tecniche con un rilievo aerofotogrammetrico, sono fornite dal servizio cartografico della Regione e svolgono un ruolo importante perché semplificano notevolmente la fase di assegnazione delle scabrezze. Infatti risulta molto più semplice individuare le caratteristiche morfologiche del terreno su di esse rispetto alla carta numerica che non è in grado di fornire certe informazioni. Se ne può osservare un esempio, in una formazione aggregata, in figura 4.7, dove sono rappresentate anche le tracce delle sezioni utilizzate in fase di controllo e aggiornamento del dominio di calcolo.

Sempre per via aerea, è possibile raccogliere dati con uno strumento laser ed una geolocalizzazione tramite satelliti GPS: sostanzialmente simile alla rilevazione della Carta Tecnica, ad eccezione dello strumento di misura. Questa tipologia di dato è denominata *Laser Imaging Detection And Ranging (LIDAR)*.

I dati *LIDAR* si differenziano dai dati *DTM* per la diversa struttura: mentre i secondi sono rappresentati sotto forma di una matrice di quote, i primi sono costituiti da una serie di coordinate geografiche (Est; Nord) alle quali viene associata la quota corrispondente.

I file *LIDAR* sono la principale fonte di informazioni diffuse necessarie per la quotatura di gran parte del reticolo geografico in esame. In figura 4.3 se ne riporta un esempio.

Nella redazione di questo elaborato sono stati considerati i dati *LIDAR* forniti da:

- Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta- Bacchiglione, per quanto riguarda le zone esterne alla Provincia di Treviso (dati aggiornati al 31/12/2004) ;
- Genio Civile della Provincia di Treviso, per quanto riguarda i territori appartenenti alla stessa provincia (dati aggiornati al 31/12/2009);
- Regione Veneto: dati provenienti dall'incarico affidato alle società Zollet Ingegneria S.r.l. e Idrostudi S.r.l. per lo studio *Studio sulle condizioni di sicurezza idraulica*

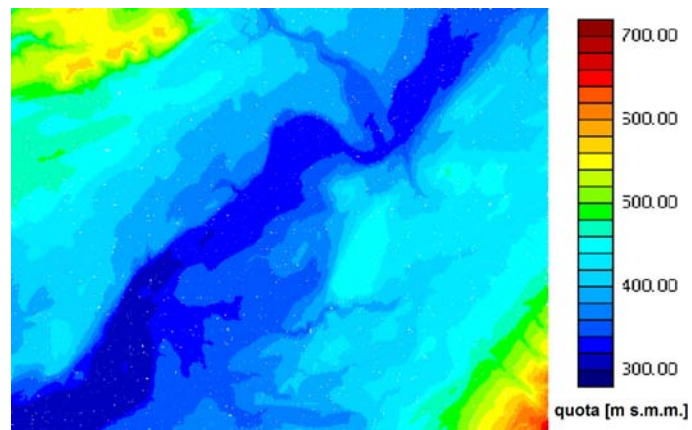


Figura 4.2: Esempio di Digital Terrain Model 063070o - Belluno. Fonte: Sistema Informativo Territoriale, Regione Veneto.

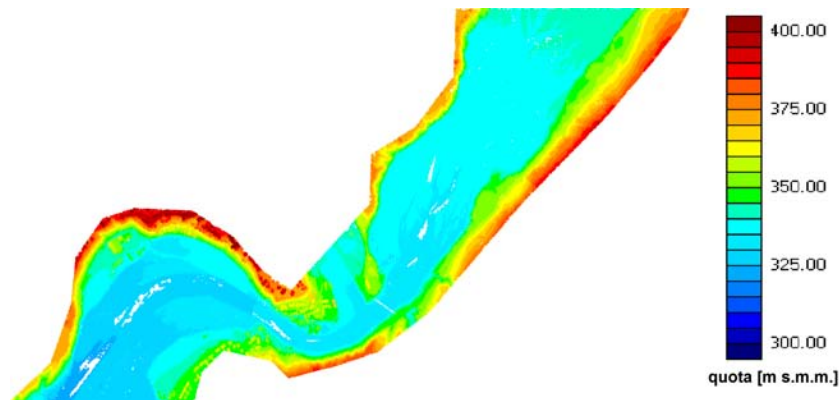


Figura 4.3: Esempio di Lidar Imaging Detection And Ranging - Belluno. Fonte: Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione.

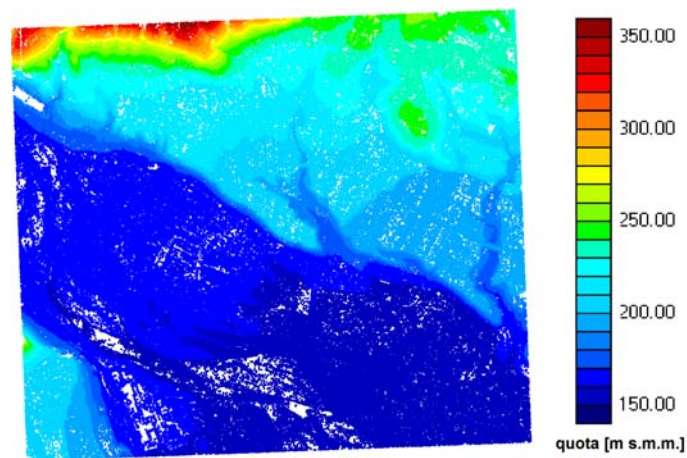


Figura 4.4: Esempio di Lidar Imaging Detection And Ranging - Pederobba. Fonte: Genio Civile provincia di Treviso.

dell'abitato di Perarolo di Cadore mediante implementazione di un modello matematico bidimensionale della confluenza tra il fiume Piave e il torrente Boite (dati aggiornati a Marzo 2008).

Si fa presente che, mentre i dati *LIDAR* raccolti dall'Autorità di Bacino hanno forme irregolari, quelli raccolti dal Genio Civile della provincia di Treviso rispecchiano la stessa suddivisione in tavolette, proposta dalla Regione Veneto, usata per la Carta Tecnica Regionale.

4.3 Dati topografici

I rilievi topo-batimetrici utilizzati in questa elaborazione fanno parte di una più ampia serie di sezioni trasversali rilevate, dall'Autorità di Bacino, lungo il corso del fiume Piave, da Perarolo di Cadore (BL) a Zenson di Piave (TV). I rilevamenti sono stati effettuati nei mesi di Marzo-Aprile 2006 con stazione totale Leica TCR 703 mediante lo sviluppo di poligoni agganciate ai capisaldi estremi di sezione.

Per l'esecuzione della poligonale è stato adottato il sistema del centramento forzato su treppiede che, unito alla precisione dello strumento, ha permesso di svilupparla con risultati ottimali relativamente al successivo trasferimento plano-altimetrico delle coordinate.

Il rilievo della sezione è stato eseguito tramite letture dalla sponda sinistra alla sponda destra del fiume, più precisamente, con distanze progressive e quota del punto, ad intervalli adatti alla rappresentazione trasversale con maggior dettaglio per gradoni, argini e opere di difesa idrologica. Per le zone pianeggianti il rilievo è stato effettuato a discrezione, in modo da configurare esattamente l'andamento altimetrico del terreno.

Il rilievo della parte sommersa è stato eseguito a guado, dove le condizioni di livello idrometrico e di sicurezza operativa hanno consentito all'operatore di attraversare la sezione liquida, mentre, dove ciò non è stato possibile, è stato utilizzato un natante vincolato tra le sponde con una corda di sicurezza.

Le sezioni sono state fornite sia in formato *.dxf*, in cui viene riportata la planimetria delle stesse e, separatamente, il loro inviluppo, sia in formato *.txt* in cui sono riportate le coordinate del punto, la quota e la distanza progressiva dei punti.

In figura 4.5 si ha un esempio di sezione topografica.

4.4 Revisione della topografia

Avendo a disposizione gli strumenti (citati nella sezione 4) adatti a descrivere la geomorfologia del bacino del fiume Piave ci si propone di portare avanti un controllo diffuso, per mezzo del software *Incidenze*, del reticolo precedentemente realizzato per valutare se e dove sia possibile migliorare la sua schematizzazione e dare una più realistica rappresentazione del suo comportamento nella propagazione di un'onda di piena.

Tutti i dati disponibili relativi alla revisione topografica sono raccolti e organizzati in appendice:

- nell'appendice A si riportano lo studio e la verifica delle sezioni topografiche comprese tra Longarone e Nervesa della Battaglia;
- nell'appendice B si mostrano l'analisi e la verifica della topografia nel nodo idraulico di Perarolo in riferimento alle sezioni topografiche e ai dati lidar rilevati da Zollet Ingegneria S.r.l.;

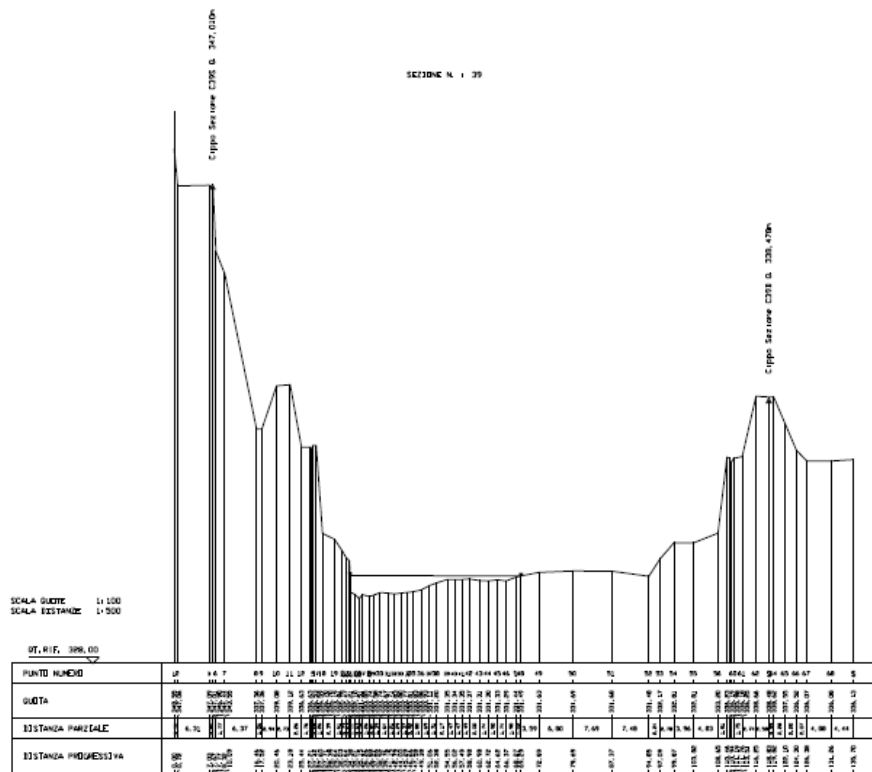


Figura 4.5: Sezione topografica numero 39 del 2006 relativa a Belluno. Fonte: Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione.

- nell'appendice C si riporta il confronto tra l'andamento topografico del fondo e le quote del fondo in corrispondenza delle sezioni topografiche lungo diversi profili longitudinali.

4.4.1 Topografia tra Longarone e Nervesa della Battaglia

Dall'ampia serie di rilievi topo-batimetrici prodotti dall'Autorità di Bacino lungo il corso del Piave (Marzo-Aprile 2006) sono state studiate 27 sezioni, mettendo a confronto le diverse fonti disponibili e il reticolo di calcolo originario. In questo modo è stato possibile verificare se la quotatura della mesh fosse realmente rappresentativa del territorio in esame, intervenendo laddove necessario.

Si riporta in figura 4.7 una panoramica delle sezioni, osservate da monte, prese in considerazione nell'operazione di controllo del reticolo, procedendo da monte verso valle lungo il dominio.

Si presentano nelle figure A.2-A.28 (vedi appendice A) le rappresentazioni dei dati relativi ad ogni sezione procedendo sempre da monte verso valle. Si precisa che la numerazione delle sezioni rimane fedele a quella dell'archivio dell'Autorità di Bacino: sono state esaminate soltanto le sezioni per cui si disponeva delle coordinate di entrambi i cippi (destro e sinistro). Tale necessità nasce dall'esigenza di poter traslare e sovrapporre correttamente, all'interno di unio stesso grafico, le serie di dati ottenute da ogni fonte di informazione.

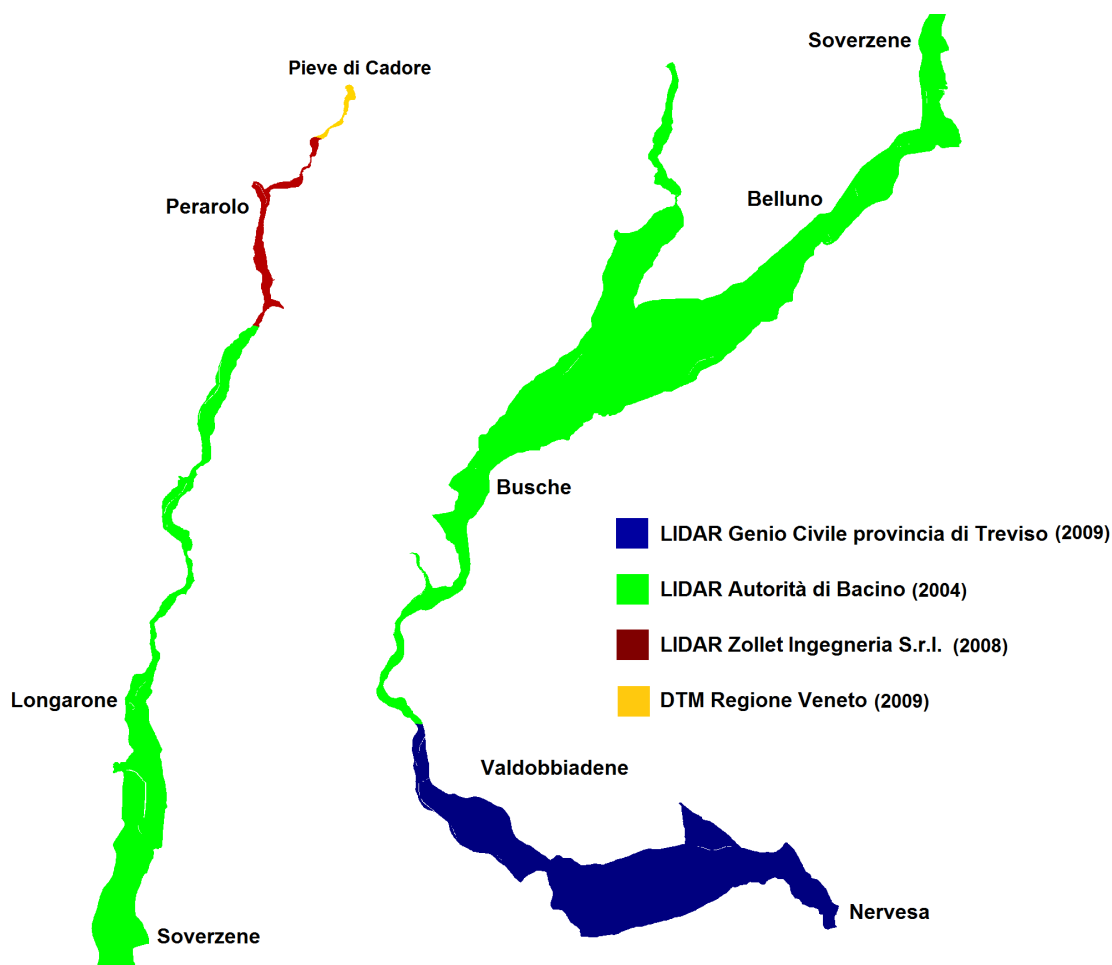


Figura 4.6: Dati topografici utilizzati per la quotatura del reticolo di calcolo. Blu: LIDAR - Genio Civile della Provincia di Treviso; verde: LIDAR - Autorità di Bacino; rosso: LIDAR - Zollet Ingegneria S.r.l.; giallo: DTM - Infrastruttura dati territoriali Regione Veneto.

Con lo scopo di rendere più semplice la lettura dei grafici si ricordi che:

- **GEO** indica la serie contenente le quote del fondo assegnate nella mesh sviluppata da *Terzariol [2014]*;
- **topografica** mostra la sezione topografica rilevata nei mesi Marzo-Aprile 2006;
- **lidar AdB** è costituita dai dati raccolti con i rilievi laser aerofotogrammetrici (2004) dall'Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione;
- **DTM** (Digital Terrain Model) sono i dati plano-altimetrici prodotti dalla Regione Veneto sulla base della Carta Tecnica Regionale in formato numerico (2009);
- **lidar TV** indica i dati in lidar raccolti dal Genio Civile della provincia di Treviso (2009);
- **GEO - nuovo** rappresenta le nuove quote del fondo in seguito alle modifiche apportate per migliorare la descrizione morfologica del dominio;

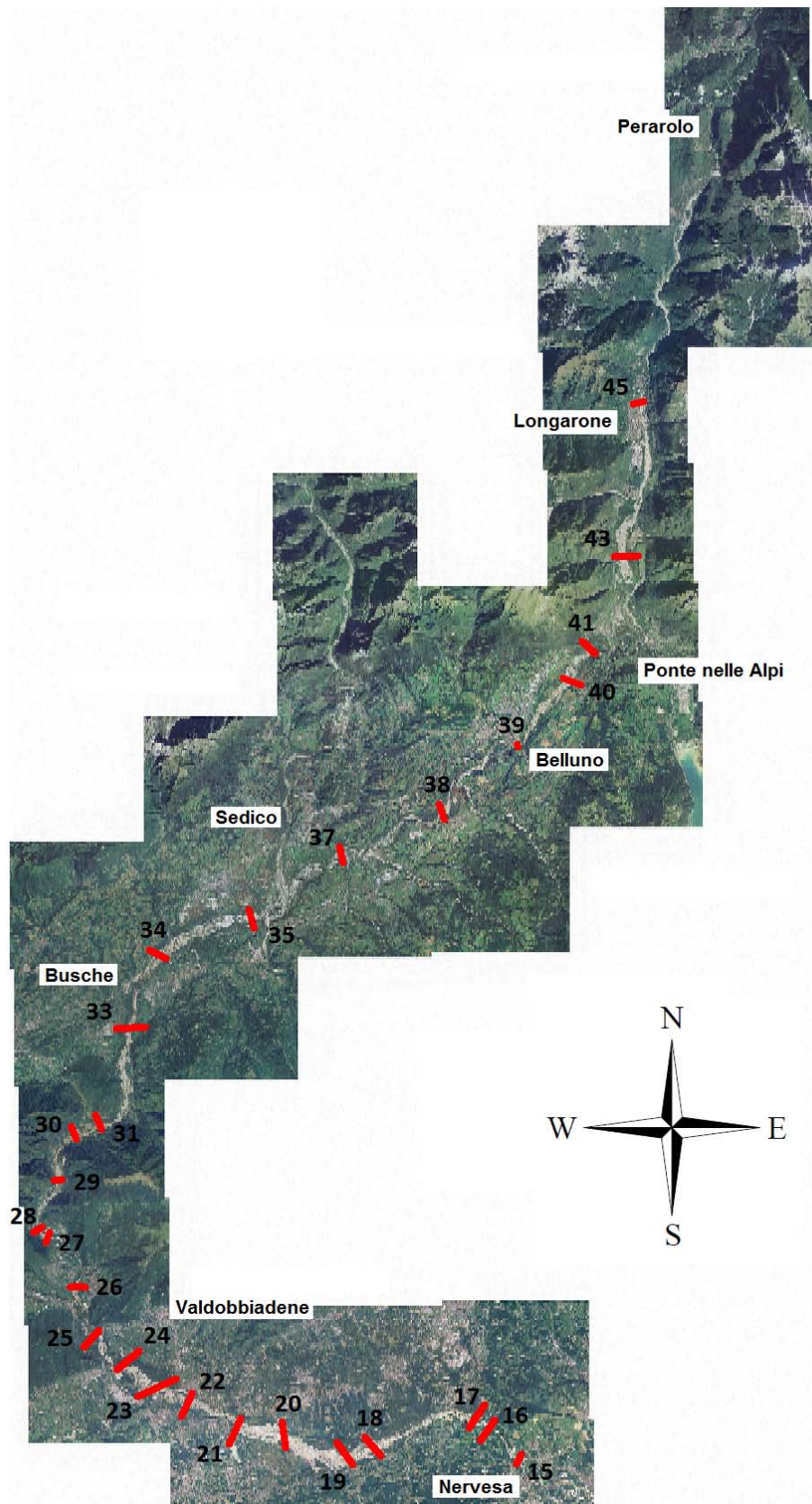


Figura 4.7: Sezioni topografiche esaminate nella fase di controllo e aggiornamento della geometria del dominio.

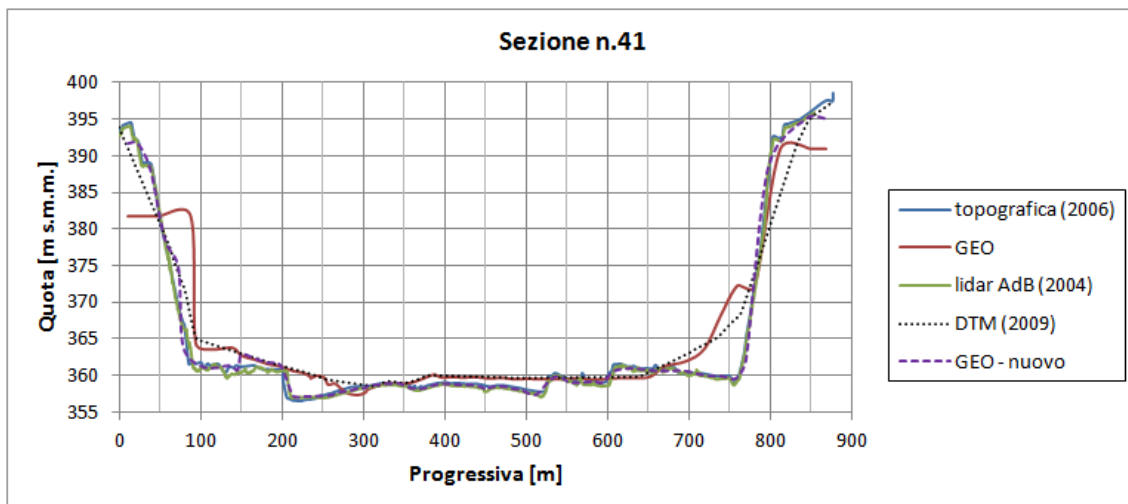


Figura 4.8: Esempio di sezione topografica di controllo: sezione numero 41

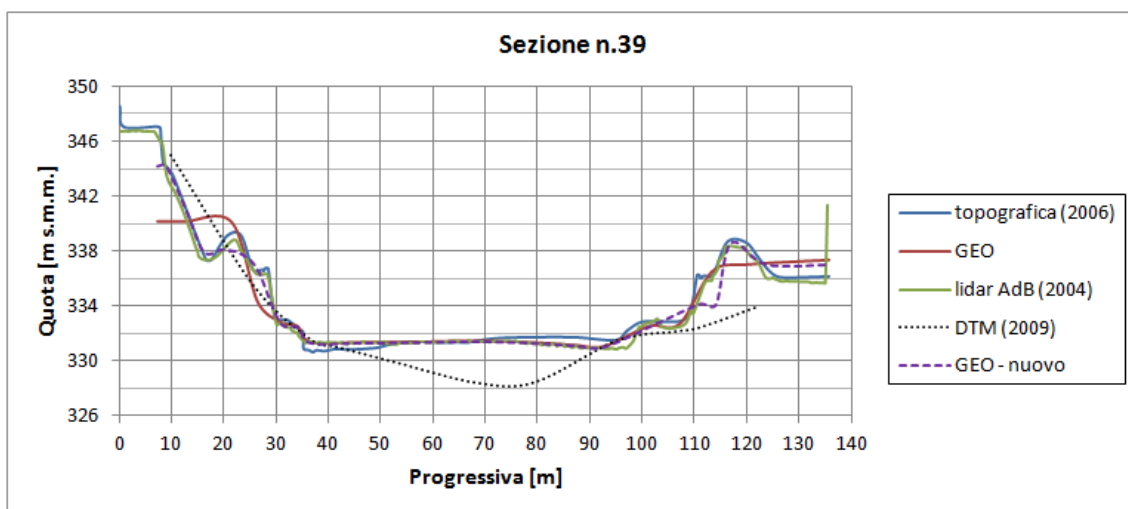


Figura 4.9: Esempio di sezione topografica di controllo: sezione numero 39

In alcuni grafici le importanti oscillazioni osservabili nei dati lidar dipendono dalla qualità della pulizia del metadato (possono rappresentare la presenza di alberi, edifici o altro).

Avendo a disposizione in alcune zone molte serie di dati, è stata assegnato un diverso grado di attendibilità ad ognuna di queste. Sia nella fase di modifica, che nella fase di verifica della mesh il riferimento ritenuto più affidabile è generalmente rappresentato dal rilievo topografico e si sono valutate singolarmente tutte quelle situazioni in cui il rilievo topografico è antecedente agli altri dati disponibili. In seconda battuta ci si è basati sui dati lidar, scegliendo tra quelli disponibili il cronologicamente più recente.

Le diverse priorità che caratterizzano le varie serie di dati comportano l'esecuzione delle modifiche secondo criteri precisi a seconda della situazione. L'approccio utilizzato è brevemente descritto nel seguito, mentre le figure 4.8 e 4.9 ne riportano alcuni esempi:

1. laddove il dato lidar segua con buona approssimazione il rilievo topografico della

sezione è possibile semplicemente riquotare le maglie del reticolo secondo il lidar più recente, rispetto alla quotatura attuale (se disponibile), per avere una migliore descrizione della geometria;

2. successivamente si possono spostare i nodi di alcune maglie per regolarizzare la mesh e darne una rappresentazione che riesca a seguire l'andamento della topografia e non comporti grandi discontinuità come ad esempio in figura 4.8;
3. se poi quanto descritto nei primi due punti non fosse sufficiente, si prende in considerazione l'inserimento (prevalentemente duplicando col software *Incidenze* maglie già esistenti) di nuovi nodi e nuove maglie nella zona interessata o, dove la schematizzazione lo richieda, l'inserimento di tronchi speciali (vedi 3.2.2) come in figura 4.9.

Ragionando sulle singole sezioni, bisogna dire che, per la natura stessa del dato, le informazioni e le modifiche dovrebbero essere di carattere locale, tuttavia per ogni sezione è stata considerata la possibilità di estendere le modifiche anche alle aree adiacenti, verso monte e verso valle.

Osservando le ortofoto e le immagini satellitari fornite da *Google Maps* e *Google Earth* si è potuto osservare fin dove le caratteristiche morfologiche del dominio restassero simili a quelle rilevate in corrispondenza della sezione. Le modifiche sono state estese fino a quando non si è incontrata una discontinuità che evidenziava una variazione delle caratteristiche del dominio.

Osservando i grafici delle sezioni, riportate in appendice A, dalla numero 35, subito a valle della confluenza tra il torrente Cordevole ed il fiume Piave, alla numero 27 si osserva che il rilievo topografico è tendenzialmente caratterizzato da quote maggiori rispetto a quelle del dato lidar. Questo scostamento potrebbe essere indice, laddove le sezioni topografiche sono successive al rilievo lidar, di un generale sovralluvionamento dell'alveo nel tratto compreso tra le due sezioni in esame.

Per valutare l'entità di questo fenomeno sono stati redatti dei profili longitudinali, interni all'alveo del Piave, dei quali si riporta l'andamento in planimetria nella figura C.1.

Dai grafici C.2, C.3, C.4 riportati in appendice C si vede che, mentre lungo il profilo centrale la differenza tra quote del fondo e andamento delle sezioni topografiche risulta in sostanza uniformemente distribuito, lungo il profilo in destra gli accumuli di materiale trasportato sono più accentuati nel tratto di monte e, viceversa, lungo quello in sinistra si nota una più netta tendenza all'accumulo nel tratto terminale.

Tali variazioni di quota del fondo vanno riferite alle fisiologiche evoluzioni morfologiche che sempre caratterizzano un alveo di questo tipo; non sono sintomo di particolari condizioni di sovralluvionamento da rappresentare nel modello.

Al termine di questa operazione di correzione secondo i criteri esposti finora, ricordando che si sono fatte delle ipotesi per l'estensione delle correzioni locali sulla sezione anche alle zone adiacenti del dominio, sono state arbitrariamente campionate delle nuove sezioni dove valutare se le modifiche apportate hanno effettivamente migliorato la descrizione della geometria in tutto il dominio esaminato.

La numerazione delle nuove sezioni si compone di due elementi: la lettera *T* indica la relazione con la serie delle sezioni *Topografiche*, mentre i due numeri che la seguono indicano

le sezioni topografiche che delimitano il tratto in cui la nuova sezione è stata tracciata. Come nell'esempio di figura 4.11, tutte le sezioni di verifica mostrano una buona corrispondenza tra il dato topografico di volta in volta ritenuto più attendibile e la nuova griglia di calcolo. Una migliore rappresentazione del territorio oggetto di indagine consentirà di modellare in modo più attendibile: la più realistica descrizione della geometria del dominio porterà ad uno studio della propagazione delle onde di piena il più possibile aderente alla realtà. Tutte le sezioni sono riportate in appendice A.

4.4.2 Topografia nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore

In figura 4.12 si mostra l'inquadramento territoriale dello studio topografico svolto da *Zollet Ingegneria S.r.l.* e *Idrostudi S.r.l.* relativo agli interventi in sponda destra previsti a Perarolo di Cadore.

Relativamente a questa zona si hanno a disposizione i seguenti dati:

- sezioni topografiche rilevate sul torrente Boite e sul fiume Piave, ordinate progressivamente dalla n.33 alla n.23 procedendo da monte verso valle (figura 4.13);
- rilievo lidar a copertura dell'intera area di studio come riportato in figura 4.12 realizzato durante Febbraio/Marzo 2008;
- rilievi lidar prodotti dall'*Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione*, prodotti nel 2004;
- file DTM (Digital Terrain Model) prodotti dalla Regione Veneto, datati 2009.

Volendo sfruttare, come già illustrato in precedenza nel paragrafo 4.4.1, il dato topografico più attendibile, si farà riferimento alle sezioni topografiche riportate in figura 4.13.

Dal confronto dei rilievi topografici e di tutti i dati lidar disponibili per la sezione emerge che in ognuna delle sezioni esaminate l'andamento del terreno dato dalla topografia non rispecchia pienamente quello mostrato dai rilievi aerofotogrammetrici. In particolare i dati prodotti da *Zollet Ingegneria S.r.l.* si posizionano tendenzialmente un metro al di sotto dei valori indicati dalla sezione topografica, mentre osservando i dati lidar forniti dall'*Autorità di Bacino* non si trova una perfetta corrispondenza tra i diversi dati. Ad esempio di quanto detto si riportano le tracce delle sezioni 32 e 27 nei grafici 4.16 e 4.17, per le restanti sezioni si faccia riferimento all'appendice B.

In virtù di queste osservazioni si è cercato di rimodellare il dominio in corrispondenza del nodo tra il fiume Piave e il torrente Boite (figura 4.12) e di assegnare delle nuove quote alle maglie tenendo conto di quanto descritto dai rilievi topografici per dare una descrizione il più possibile aderente alla realtà. Nelle zone comprese tra due sezioni topografiche è stato ricostruito l'andamento del terreno in modo da garantire un buon raccordo tra le due sezioni d'estremità. Nell'adottare questo tipo di approccio si è ovviamente avuto cura di verificare che tra le due sezioni non fossero presenti delle discontinuità.

Disponendo soltanto di sezioni topografiche concentrate alla confluenza del fiume Piave col torrente Boite, la verifica e l'aggiornamento della geometria nella restante area indicata in figura 4.12 si conduce basandosi sul confronto dei vari dati disponibili: sono state scelte arbitrariamente delle sezioni appartenenti al tratto interessato in cui sono stati confrontati i dati lidar e le quote assegnate alle maglie nell'elaborato (*Terzariol, 2014*).

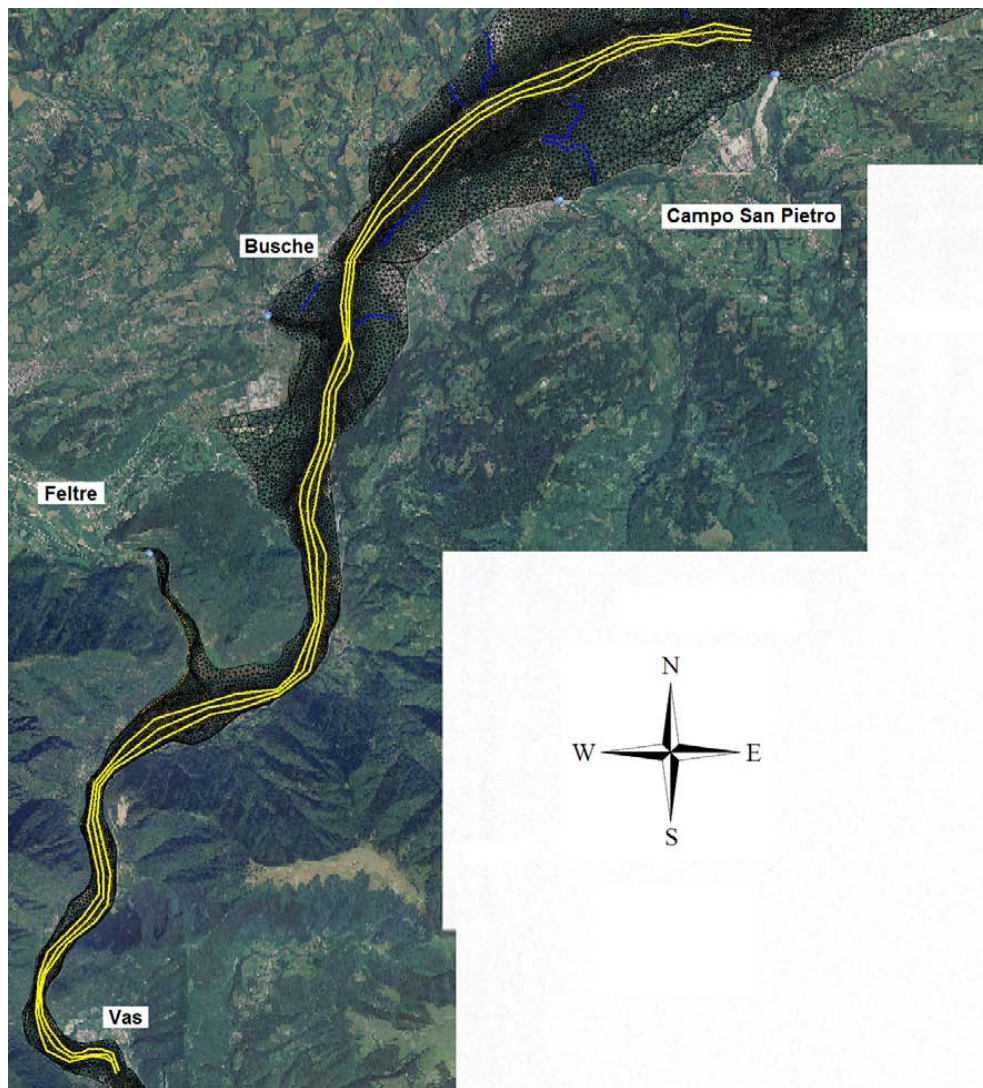


Figura 4.10: Planimetria dei profili longitudinali dell'asta principale del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27.

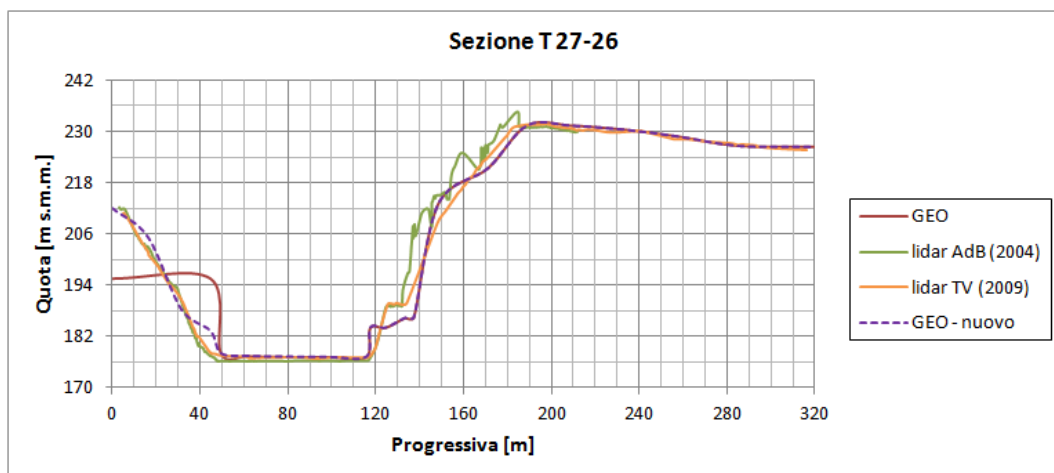


Figura 4.11: Esempio di sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 27 e 26.

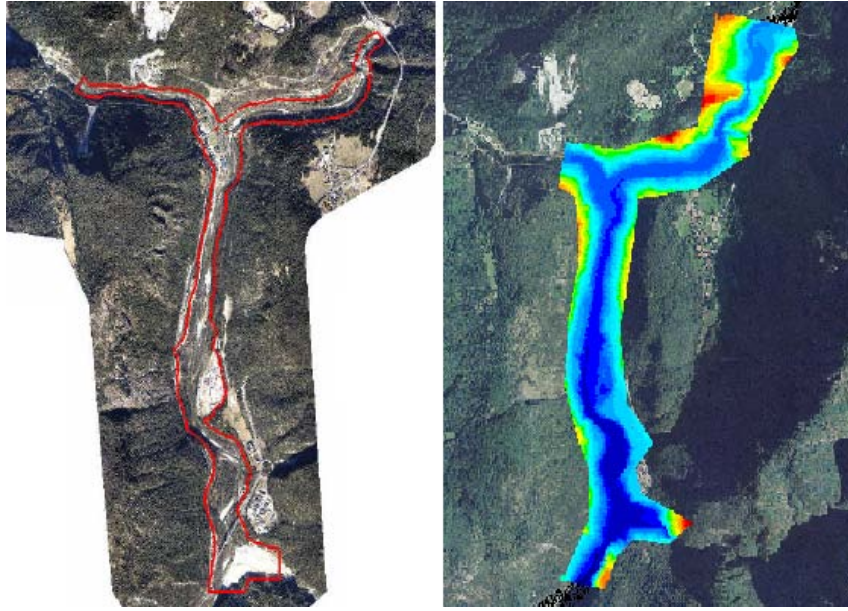


Figura 4.12: A sinistra: delimitazione dell'area dello studio *Studio sulle condizioni di sicurezza idraulica dell'abitato di Perarolo mediante implementazione di un modello matematico bidimensionale della confluenza tra il fiume Piave e il torrente Boite*. A destra: rilievo LIDAR effettuato dalla società incaricata Zollet Ingegneria S.r.l.



Figura 4.13: Sezioni di riferimento per lo studio topografico a Perarolo di Cadore.

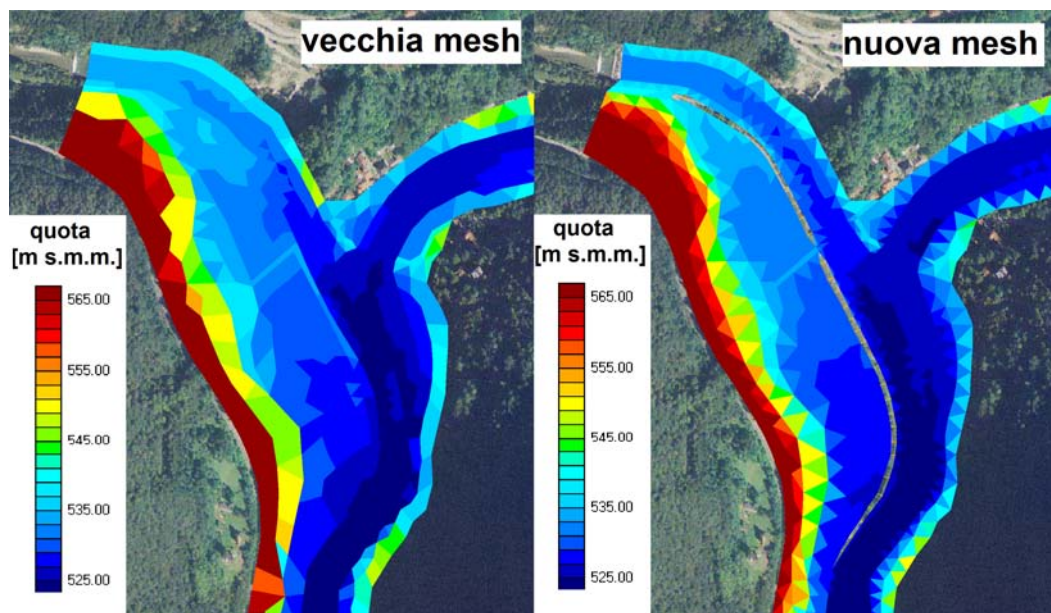


Figura 4.14: Confronto della mesh relativa al nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

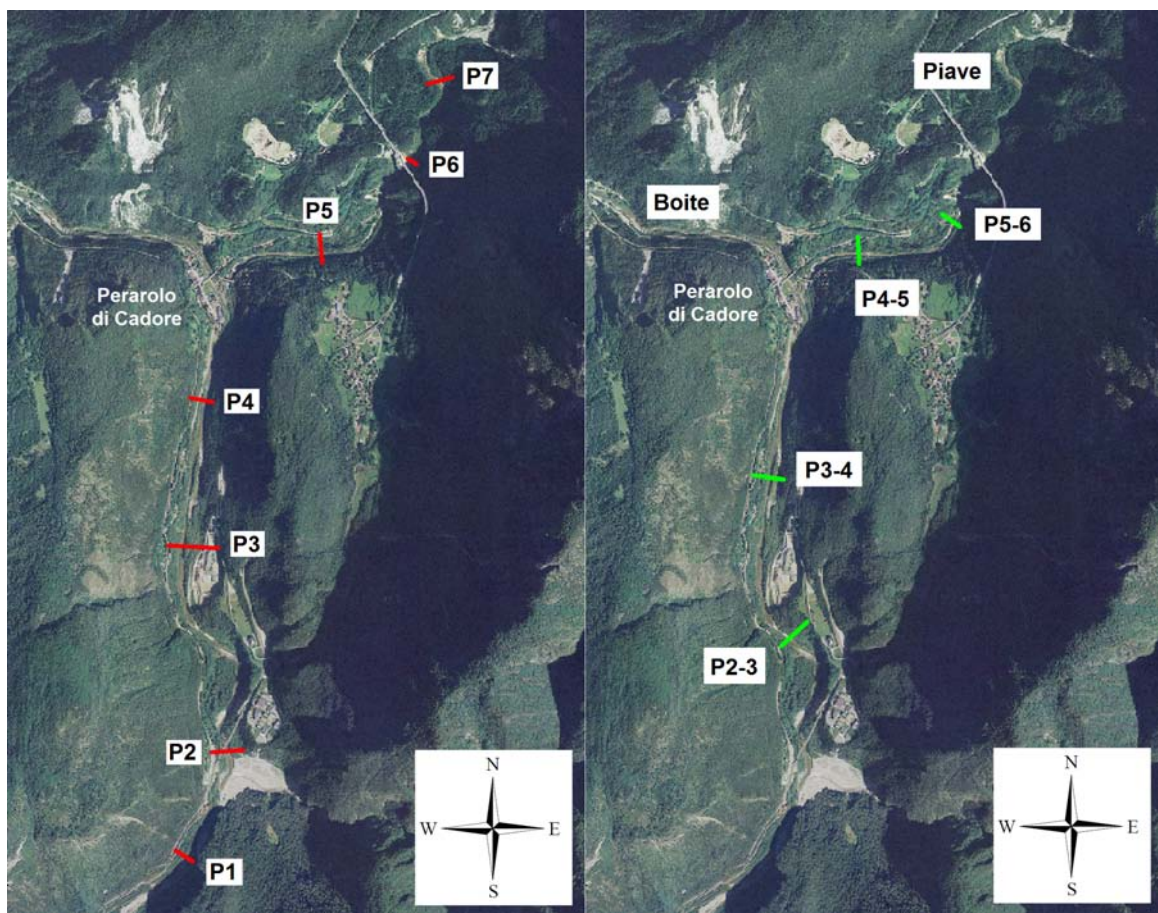


Figura 4.15: A sinistra: planimetria delle sezioni di riferimento per l'aggiornamento topografico della mesh. A destra: planimetria delle sezioni di verifica della mesh. Area di studio: nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

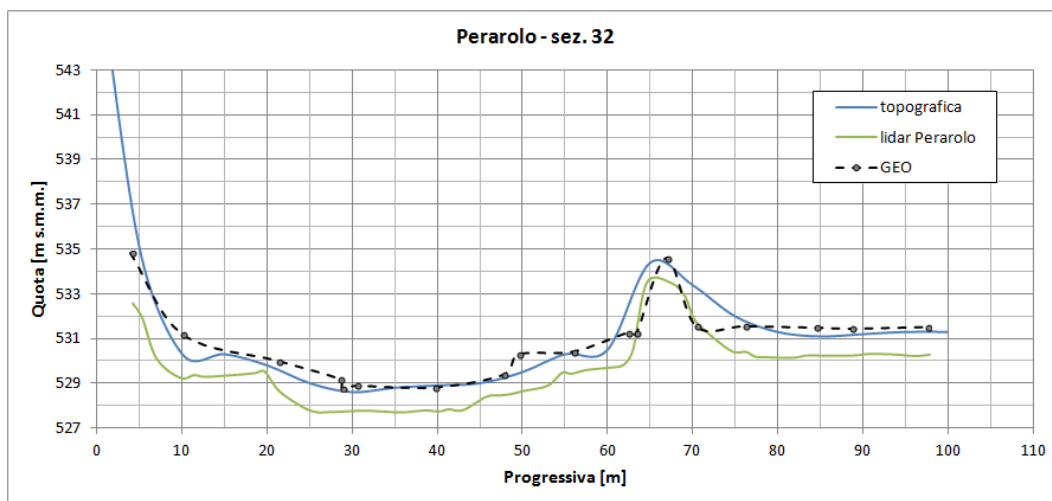


Figura 4.16: Confronto dei dati disponibili relativi alla sezione 32.

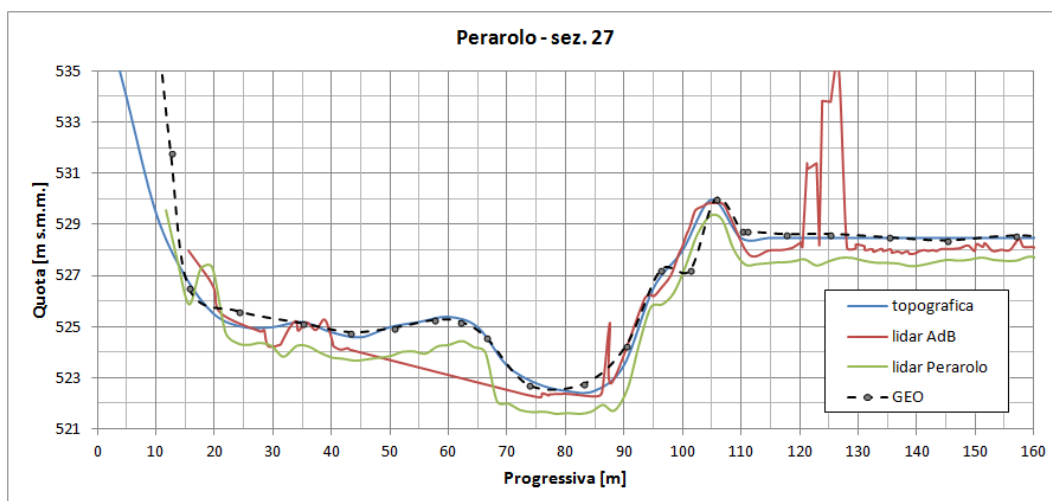


Figura 4.17: Confronto dei dati disponibili relativi alla sezione 32.

In figura 4.15 sono rappresentate rispettivamente le sezioni utilizzate come riferimento per le correzioni della geometria e le sezioni intermedie a queste tracciate per la verifica della nuova rappresentazione.

Come si può osservare nel grafico 4.18, sono stati confrontati i due rilievi lidar, prodotti rispettivamente dall'Autorità di Bacino e in occasione dello studio relativo al nodo idraulico di Perarolo, con la situazione descritta dalla mesh esistente. Considerando che il dato rilevato a copertura della sola zona di Perarolo è qualitativamente pari a quello fornito dall'Autorità di Bacino, ma cronologicamente più recente, viene data la priorità a quest'ultimo come riferimento per eventuali modifiche. Nelle sezioni 5, 6, 7 di controllo della topografia (a sinistra in figura 4.15) e P4-5, P5-6 di verifica (a destra in figura 4.15) situate più a monte, sull'asta principale del Piave, ci si è dovuti riferire all'unico dato disponibile di adeguata qualità ovvero il rilievo effettuato per la zona della confluenza tra Piave e Boite mostrato in figura 4.12.

Per poi rendere conto della buona descrizione della geometria in seguito alle modifiche

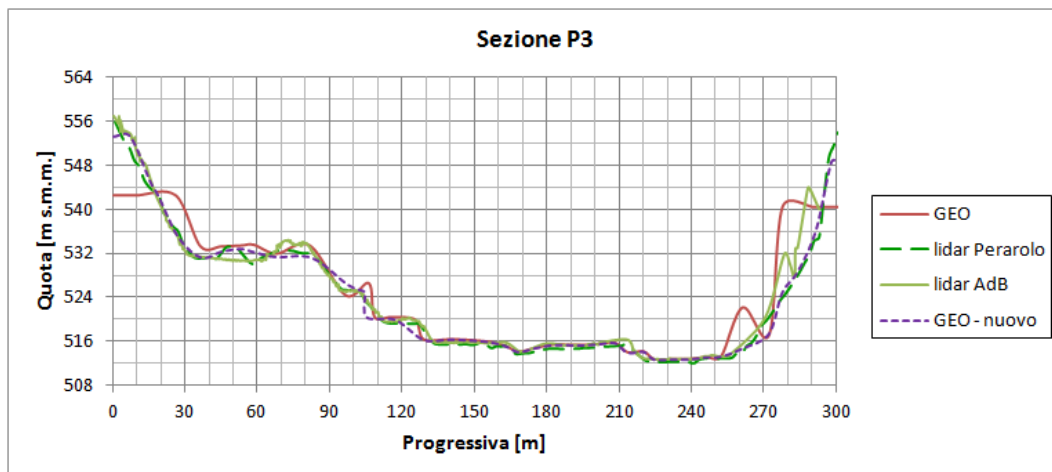


Figura 4.18: Esempio di sezione appartenente alla serie di Perarolo di Cadore: sezione numero 3.

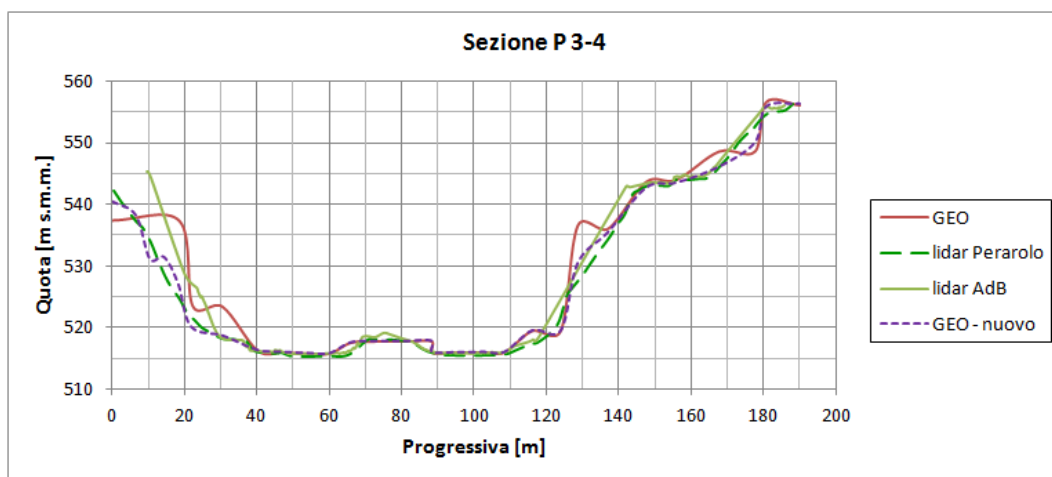


Figura 4.19: Esempio di sezione di verifica appartenente alla serie di Perarolo di Cadore: sezione compresa tra la numero 3 e la numero 4.

effettuate alla mesh coi nuovi dati a disposizione, si sono scelte delle sezioni nelle fasce intermedie, tra due sezioni di quelle sopra citate (esclusa la zona del nodo idraulico, per il quale ci si è riferiti ad uno studio di dettaglio), per vedere se le modifiche localizzate e la loro estensione verso monte e verso valle consentono di mantenere una buona qualità descrittiva. Un esempio di tale sezione è riportato in figura 4.19 in cui la lettera *P* indica l'appartenenza alla zona di Perarolo, mentre i due numeri che seguono indicano le due sezioni di riferimento (vedi fig.4.15) tra cui è contenuta quella in esame.

In tutte le sezioni si nota una buona corrispondenza tra il dato di riferimento e la nuova mesh usata per la rappresentazione del dominio, in alcuni casi il miglioramento risulta più che sensibile.

La serie completa di queste sezioni è riportata in appendice B.

Capitolo 5

Interventi di sistemazione

In questo capitolo sarà affrontata l'analisi delle principali situazioni di criticità che interessano la tratta montana del fiume Piave. Come già anticipato nel capitolo 2.3.1 si tratta in particolare della confluenza tra il torrente Boite ed il fiume Piave in corrispondenza dell'abitato di Perarolo, della zona industriale di Longarone a valle di ponte Malcolm e della confluenza tra il torrente Ardo ed il fiume Piave in corrispondenza alla città di Belluno. Per ciascuno di questi casi, l'Amministrazione competente ha già provveduto alla definizione di interventi idonei alla rimozione delle condizioni di criticità; nel seguito, oltre a descrivere gli interventi, si provvederà a verificarne l'efficacia.

5.1 Interventi a Perarolo di Cadore

Sulla confluenza del torrente Boite col corso principale del Piave si fa riferimento ad uno studio di dettaglio redatto da *Zollet Ingegneria S.r.l.* e *Idrostudi S.r.l.*

Tale studio si propone di mettere in evidenza le problematiche che caratterizzano l'area mostrata in figura 4.12: a tale scopo sono state condotte alcune simulazioni per eventi di piena con tempo di ritorno T_R pari a 50, 100 e 200 anni, valutando eventuali fenomeni di evoluzione del fondo.

Tale studio conclude che:

- l'alveo risulta stabile, senza erosione o depositi significativi;
- si evidenzia l'insufficienza arginale in destra in corrispondenza dell'abitato di Perarolo anche per tempi di ritorno cinquantennali (figura 5.1);
- è necessario porre attenzione, per tempi di ritorno elevati, alle protezioni di sponda longitudinali, allo scopo di evitare fenomeni erosivi in presenza di velocità elevate della corrente;
- poco a monte della confluenza si trova un restringimento naturale nell'alveo del Piave, in cui, per $T_R = 200$ anni, si realizzano tiranti idrici piuttosto elevati. In questa zona, il rigurgito della corrente e l'accumulo di materiale solido determinano una riduzione del franco idraulico e l'instaurarsi di condizioni di pericolo che potrebbero interessare l'abitato di Perarolo di Cadore.

In risposta alle criticità sopra elencate lo studio propone le seguenti soluzioni progettuali:

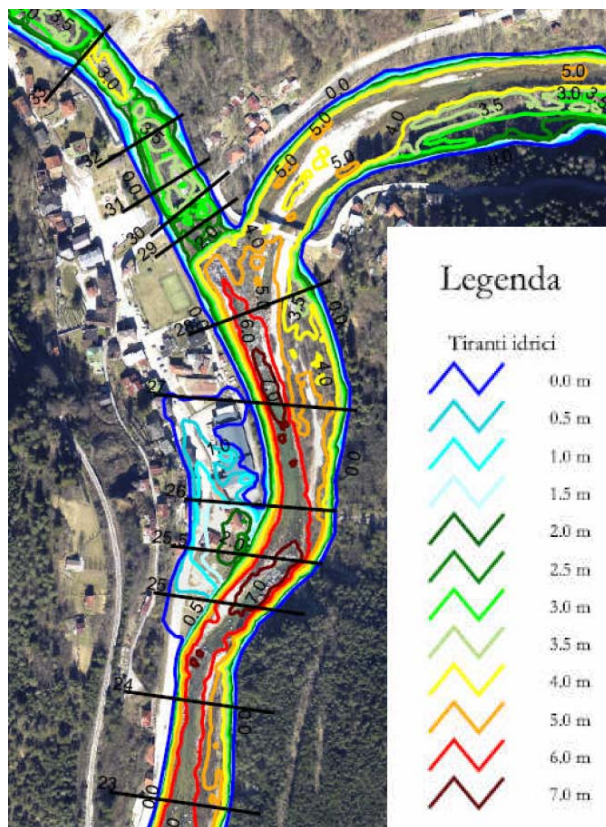


Figura 5.1: Distribuzione dei tiranti idrici a Perarolo di Cadore per un evento con tempo di ritorno $T_R = 100$ anni: la scala cromatica procede per intervalli di ampiezza 0.5 m partendo da un valore 0.0 m (linea blu) fino a 7.0 m (linea rosso scuro). Fonte: *Studio sulle condizioni di sicurezza idraulica dell'abitato di Perarolo mediante implementazione di un modello matematico bidimensionale della confluenza tra il fiume Piave e il torrente Boite*, Zollet Ingegneria S.r.l.

- qualora fossero prevedibili smottamenti dei versanti o frane a monte della confluenza, lungo il torrente Boite, sarebbe opportuno realizzare una piazza di deposito;
- incremento dell'altezza della luce libera sotto l'impalcato del ponte sul fiume Boite, per evitare eventuali ostruzioni i caso di piena;
- sopraelevazione e riprofilatura dell'arginatura in destra tra le sezioni 25 e 29 riportate in figura 4.13, con un'adeguata protezione al piede.

Si precisa che, in particolare, allo scopo di questo elaborato si fa riferimento all'intervento di sovrizzo arginale per la protezione di Perarolo da eventi di piena paragonabili con quello del Novembre 1966 poiché queste modifiche aumentano la capacità di portata del tratto considerato, definita come la portata massima transitabile prima del sormonto della sommità arginale.

In appendice B sono riportate le tracce delle sezioni interessate, prima e dopo l'intervento.

5.2 Interventi a Longarone

Gli interventi nella zona di Longarone introducono modifiche all'assetto del fiume Piave di carattere strutturale oppure di semplice ripristino delle opere di difesa fluviale esistenti.



Figura 5.2: Interventi in sponda destra e sinistra a valle di ponte Malcolm, Longarone.

5.2.1 Ponte Malcolm

Procedendo con ordine si analizza il tratto che si estende per circa 600 m a valle di Ponte Malcolm (figura 5.2): in destra si osserva già l'esistenza di un muro, realizzato già negli anni '60, per la difesa contro gli eventi di piena. Il muro esistente è adiacente ad una strada che si sviluppa per tutta la sua lunghezza e che si collega, nella parte interna e non direttamente a contatto col corso d'acqua principale, con l'abitato di Longarone.

Questo tratto è stato analizzato dal Prof. Ing. L. D'Alpaos attraverso un modello bi-dimensionale, sia in ipotesi di fondo fisso che di fondo mobile. Le simulazioni prodotte, effettuate per tempi di ritorno T_R pari a 50, 100 e 200 anni, mostrano che:

- nell'ipotesi di fondo fisso si ha un sormoto arginale di modesta entità solo in caso di eventi con probabilità duecentennale, mentre anche un evento paragonabile con quello del Novembre 1966 transita mantenendosi all'interno dell'alveo di piena;
- anche nel caso non si verificasse alcuna tracimazione, si osservano riduzioni del franco idraulico, anche del 70% rispetto al valore generalmente raccomandato pari ad 1 m per un tempo di ritorno T_R corrispondente all'evento di piena del 1966 (poco più che centenario);
- in ipotesi di fondo mobile si realizzano condizioni più gravose rispetto al caso di fondo fisso poiché, dopo il superamento della stretta in corrispondenza di ponte Malcolm, si manifestano depositi di materiale che innalzano le quote idrometriche di massima piena tanto da rendere concreto il pericolo di sormonto delle difese di sponda ed il conseguente allagamento delle zone adiacenti anche per eventi simili a quello di riferimento (Novembre 1966).

In seguito a questi risultati, anche considerando quanto suggerito dallo stesso Prof. Ing. L. D'Alpaos, Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l. propone un innalzamento della sommità arginale di +1.20 m rispetto alla situazione precedente e una protezione al piede, rivestendo opportunamente il muro sul lato fiume per una protezione dall'azione delle acque di piena. L'obiettivo perseguito è il deflusso, anche con ipotesi di fondo mobile, del colmo di piena con adeguati valori del franco di sicurezza idraulica.



Figura 5.3: Intervento in sponda destra nel tratto terminale del torrente Maé, Longarone.

Nello studio si suggerisce inoltre di individuare delle sezioni per il monitoraggio dell'evoluzione atimetrica del fondo, da effettuarsi periodicamente o comunque dopo ogni piena significativa.

Un intervento è richiesto anche dalla sponda sinistra, all'altezza dell'impianto sportivo di Codissago (figura 5.2). Non vi è necessità di innalzamenti delle difese poiché la topografia della zona consente l'allagamento solo di una fascia a ridosso della sponda, ma non va ad interessare abitazioni e viabilità.

Il problema riguarda il consolidamento al piede della difesa in sponda sinistra per evitare lo scalzamento prodotto dall'azione erosiva del filone della corrente. Già altri interventi di questo tipo sono stati realizzati nella zona di monte (circa 200 m) adiacente a quella considerata: pali in jet-grouting e sottomurazioni in calcestruzzo armato.

L'estensione del tratto maggiormente critico risulta di 30 m, ma per dare continuità alla stabilizzazione fatta a monte si propone di intervenire su una lunghezza di 40 m, realizzando 60 pali con la tecnologia del jet-grouting.

5.2.2 Confluenza Maé-Piave

Un secondo intervento pone l'attenzione sul tratto terminale del torrente Maé, subito a valle del ponte sulla Strada Statale 51 (figura 5.3): la sponda destra si trova a protezione della zona industriale di Longarone, segnalata come uno dei principali obiettivi sensibili in caso di piena.

Come mostrato in una relazione preliminare dal Prof. Ing. L.D'Alpaos e in sede di progetto da Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l., in questa zona si considera un franco arginale minimo pari a 1.50 m in virtù dei valori di velocità ivi registrate. Tali velocità, che caratterizzano la corrente con un numero di Froude prossimo a quello critico, potrebbero generare fenomeni di moto ondoso e generare tracimazione oltre la sommità delle difese di sponda.

Vista la natura della criticità non si opta per un intervento propriamente strutturale, ma per un'operazione globalmente meno complessa ovvero la ricarica della sponda destra con materiale di adeguata pezzatura fino a riportare il franco arginale al valore ottimale



Figura 5.4: Intervento sulle pile di ponte Provagna a valle della zona industriale di Longarone.

consigliato di 1.50 m. L'entità della ricarica è, anche nei casi "peggiori", di alcune decine di centimetri. L'intervento interessa un tratto di sponda della lunghezza di circa 70 m.

5.2.3 Ponte Provagna

Procedendo ancora verso valle si rende necessario un quarto intervento, stavolta non strutturale, ma rivolto alla sistemazione dell'alveo. A valle della confluenza del torrente Maé col fiume Piave si trova il ponte di Provagna dove, per effetto dell'erosione prodotta dalla corrente fluviale, i dadi di fondazione di 6 delle 11 pile del ponte mostrano scalzamento, privi della loro consueta protezione.

L'intervento proposto riguarda il ripristino locale delle condizioni delle pile in esame onde evitare problematiche strutturali per l'intero ponte: i dadi di fondazione delle pile andranno rivestiti da una difesa a scogliera ben radicata in profondità in modo che non possa essere modificata in seguito per effetto della corrente. A questo scopo, secondo il progetto di Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l. (figura 5.4), si richiede l'utilizzo di massi di 1^a categoria di dimensioni non inferiori ad 1.20-1.30 m: tuttavia la realizzazione delle protezioni non prevedono un lavoro interamente ex-novo, ma anche il recupero di massi già presenti e appartenenti alle precedenti difese.

Contestualmente a questo intervento di sistemazione è prevista anche la demolizione di una soglia in calcestruzzo posta in sinistra a valle del ponte poiché non risulta funzionale in relazione allo stato attuale.

Nel dettaglio, ai fini della presente tesi, a Longarone si valuterà l'effetto del rialzo arginale lungo la sponda destra del Piave a valle di ponte Malcolm sulla capacità del tratto di far transitare in sicurezza un evento di piena.

5.3 Interventi a Belluno

L'intervento volto a risolvere la criticità a Belluno riguarda il tratto di sponda destra che dal torrente Ardo, a valle di Ponte dell'Anta, si raccorda con la sponda destra del corso principale del Piave fino a che questo non transita sotto il ponte della Vittoria.

Allo stato attuale si nota una difesa arginale soltanto in un tratto della sponda del corso



Figura 5.5: Traccia del profilo longitudinale della sponda destra interessata dall'intervento a Belluno.

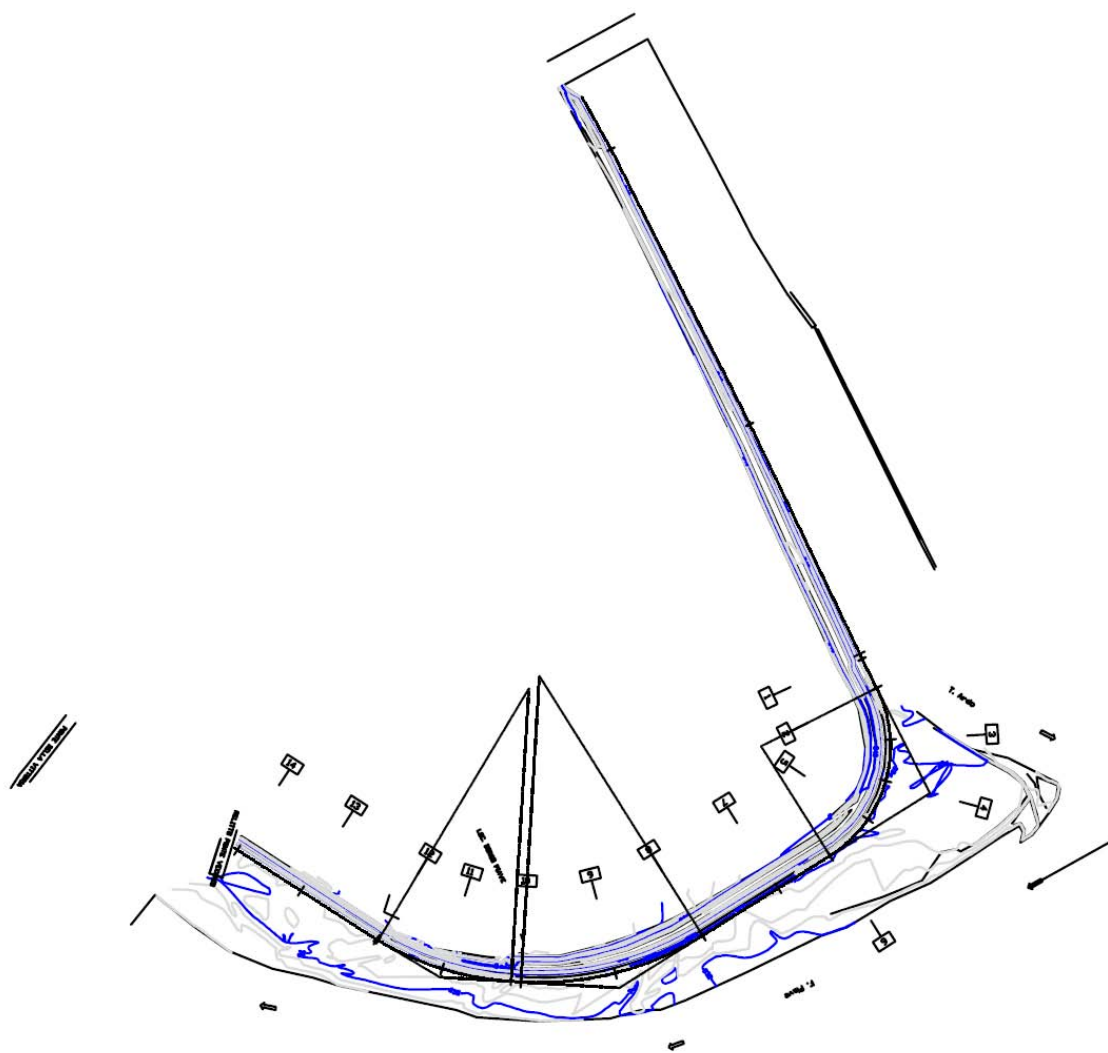


Figura 5.6: Planimetria di progetto dell'intervento alla confluenza Ardo-Piave a Belluno.

principale (figura 5.5) che costituisce il raccordo tra i due corsi d'acqua, esponendo l'abitato di Belluno a pericoli di allagamento: l'intervento ha l'obiettivo di estendere la protezione arginale in modo da tutelare l'intera area.

Le difese di sponda del fiume Piave vengono innalzate tramite la realizzazione di un muro di contenimento per evitare la possibile tracimazione nella zona abitata retrostante, facendo attenzione a mantenere un buon grado di raccordo tra la nuova difesa e quella già esistente poco a monte in corrispondenza della confluenza.

Nonostante le portate che transitano sul torrente Ardo siano significativamente inferiori rispetto a quelle del Piave, l'intervento prevede un incremento della sommità arginale lungo tutta la sponda destra dell'Ardo (figura 5.6) fino a raggiungere Ponte dell'Anta. Questa scelta può tutelare maggiormente dal pericolo di allagamenti dovuti al rigurgito che si realizza nel tratto terminale dell'affluente a causa della differenza nelle portate che caratterizzano i due corsi d'acqua. Inoltre l'innalzamento della sommità arginale fino a raggiungere un andamento regolare della sponda (raccordato con l'intervento sulla sponda sul Piave) si rende necessario per la realizzazione di una strada che si sviluppa lungo tutta la lunghezza dell'intervento e collega Ponte dell'Anta all'abitato di Belluno.

Capitolo 6

Calibrazione e determinazione della capacità di portata

A valle della revisione geometrica del reticolo di calcolo, si ritiene opportuno procedere ad una fase di calibrazione dei valori da assegnare al parametro k_S , scabrezza secondo Strickler, per valutarne un set ottimale prima di procedere alle successive valutazioni in merito all'incremento della capacità di portata a seguito degli interventi, di cui si tratterà estesamente nel successivo paragrafo 6.2, a Perarolo di Cadore, Longarone e Belluno.

6.1 Calibrazione del modello e determinazione delle scabrezze ottimali

L'operazione di calibrazione del modello considera come base di partenza il seguente set di valori del parametro k_S , utilizzato già in (Terzariol, 2014):

- $25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: alveo di magra;
- $20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: alveo in ghiaia;
- $15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: aree edificate e viabilità;
- $10 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: prati, coltivazioni e golene non vegetate;
- $5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: zone boschive e golene vegetate.

L'obiettivo di questo procedimento consiste nel verificare se i valori sopracitati siano adeguati alla rappresentazione degli eventi di piena che interessano il bacino montano del Piave o debbano essere modificati ricercando dei valori ottimali di scabrezza. Ciò si ottiene simulando un evento di riferimento attraverso il modello *2DEF* (*Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas*. Authors: Andrea Defina. First published: November 2000), con un assegnato set di k_S , e poi confrontando i risultati ottenuti con misure sperimentali, riferite al medesimo evento.

Sulla base dei risultati ottenuti da questo confronto, i valori dei coefficienti di scabrezza vengono fatti variare ad intervalli di $5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, in più o in meno rispetto al valore di partenza.

L'evento utilizzato per la procedura di calibrazione è quello dal 12 Novembre 2002 al 1 Dicembre 2002, per il quale si ha a disposizione l'idrogramma misurato alla traversa di

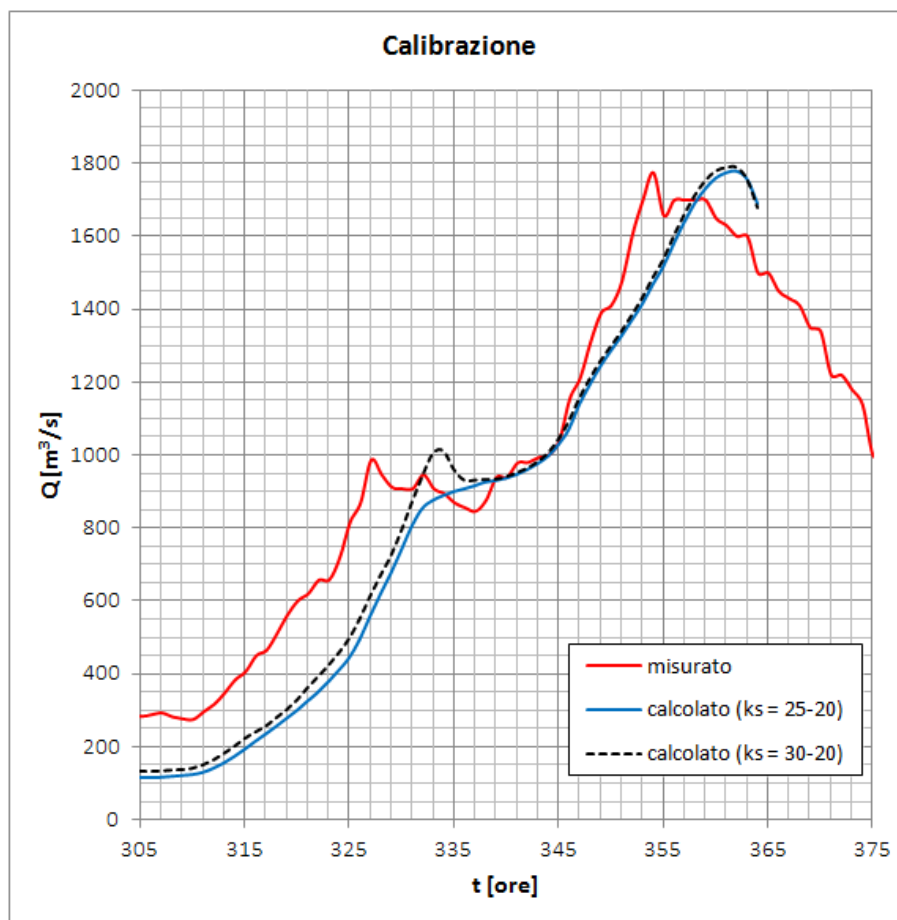


Figura 6.1: Confronto, per l'evento del 2002, tra gli idrogrammi di portata misurato e calcolato per diversi valori del coefficiente k_S [$\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$], in corrispondenza alla traversa di Busche. Le coppie di valori di k_S si riferiscono, nell'ordine, all'alveo di magra e all'alveo in ghiaia.

Busche (ad oggi è l'unica misura disponibile nel tratto montano e realizzata durante eventi di piena).

Pur avendo a disposizione un dataset di un'ampiezza pari a 457 ore, la calibrazione viene effettuata su un intervallo di sole 60 ore. In particolare, la finestra temporale scelta va dalla 305esima ora (ore 16:00 del 24 Novembre 2002) fino alla 364esima (ore 03:00 del 27 Novembre 2002) della serie di dati disponibili, in corrispondenza del picco di massima piena dell'evento del 2002.

Calibrare il parametro k_S sul valore massimo registrato risulta ragionevole poichè tale è il massimo valore di portata che transita e che quindi può mettere in crisi le difese fluviali. Durante l'analisi ci si è limitati a far variare i coefficienti di scabrezza relativi all'alveo di magra e all'alveo in ghiaia. Avendo distinto, in sede di caratterizzazione della mesh, le aree del dominio secondo la presenza o meno di vegetazione, si definisce "alveo in ghiaia" tutta l'area appartenente all'alveo di piena, del corso principale e degli affluenti, non interessata da una copertura vegetale.

In figura 6.1 si vede che con i valori originali di k_S , pur riuscendo a cogliere l'entità del picco di piena, l'idrogramma non è in grado di cogliere il picco secondario ben visibile nella fase di crescita della piena.

Tale obiettivo può essere raggiunto semplicemente modificando il coefficiente di scabrezza relativo all'alveo di magra, portandone il valore da $25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ a $30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Come si vede, mantenendo sostanzialmente il picco massimo inalterato, si dà una migliore rappresentazione della parte esaminata dell'idrogramma globale.

Un ulteriore dettaglio che risulta evidente osservando i risultati di figura 6.1 è lo sfasamento temporale in avanti che non permette la perfetta corrispondenza tra l'idrogramma misurato e quelli prodotto dal modello bidimensionale *2DEF*.

In figura 6.3 si riporta il risultato dell'operazione di calibrazione sull'intero evento di piena del 2002: oltre ad uno sfasamento temporale si nota che il modello non riesce a cogliere esattamente i valori di picco della portata che caratterizzano l'intero idrogramma.

Questa incongruenza può essere principalmente spiegata con il fatto che gli idrogrammi relativi al fiume Piave nella sua sezione di ingresso nel dominio di calcolo così come tutti gli ulteriori contributi dei diversi corsi d'acqua che confluiscono nel Piave sono stati calcolati con un modello idrologico di tipo geomorfologico calibrato sulla stessa sezione di Busche. Lo schema propagatorio presente nel modello idrologico è tuttavia semplificato e pertanto la procedura che prevede di estrarre dal modello geomorfologico gli idrogrammi più a monte rispetto alla sezione di chiusura scelta per la calibrazione (Busche) e far propagare tali idrogrammi con un modello idrodinamico, potrebbe introdurre delle differenze.

Alla luce di queste considerazioni si è ritenuto di adottare il seguente set modificato di coefficienti k_S (vedi figura 6.2):

- $30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: alveo di magra;
- $20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: alveo in ghiaia;
- $15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: aree edificate e viabilità;
- $10 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: prati, coltivazioni e golene non vegetate;
- $5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: zone boschive e golene vegetate.

6.2 Capacità di portata

Si definisce in questo elaborato capacità di portata la massima portata che transita lungo un tratto fluviale senza generare fenomeni di sormonto arginale, con conseguenti allagamenti.

Assegnati i valori ottimali, sulla base della calibrazione, delle scabrezze k_S , si procede ad un'analisi per la valutazione della capacità di portata nelle tratte laddove gli interventi, realizzati o da realizzare, possano determinarne un incremento. In particolare si considera:

1. il rialzo arginale realizzato in sponda destra del Piave nella confluenza col torrente Boite a Perarolo di Cadore;
2. l'incremento di +1.20 m della quota di sommità del muro di difesa in sponda destra del Piave a valle di ponte Malcolm (Longarone);
3. la difesa arginale in sponda destra del tratto terminale del torrente Ardo, a partire da ponte dell'Anta, e del corso principale del Piave fino a ponte della Vittoria per la protezione della città di Belluno.

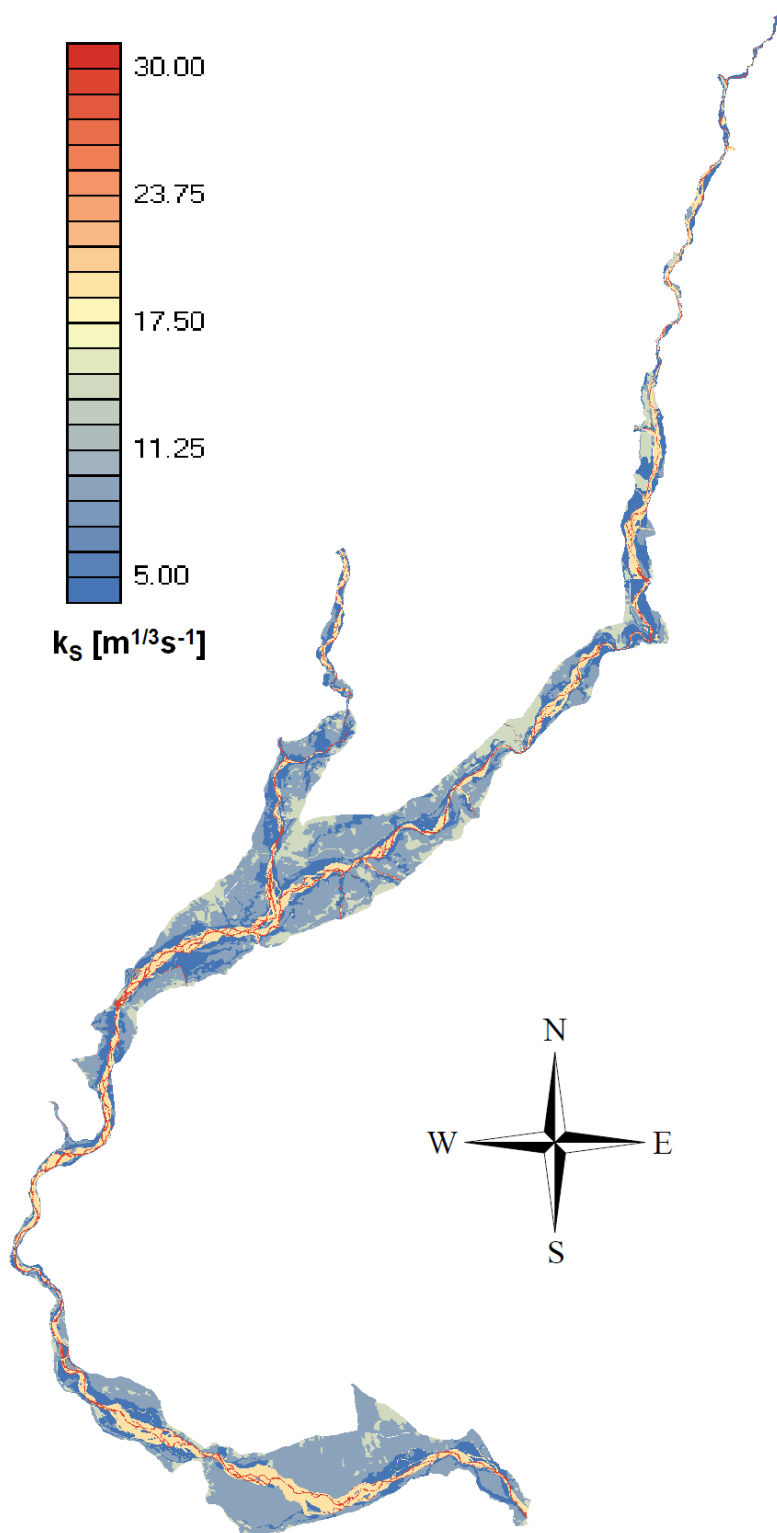


Figura 6.2: Distribuzione dei coefficienti di scabrezza k_s in seguito all'operazione di calibrazione.

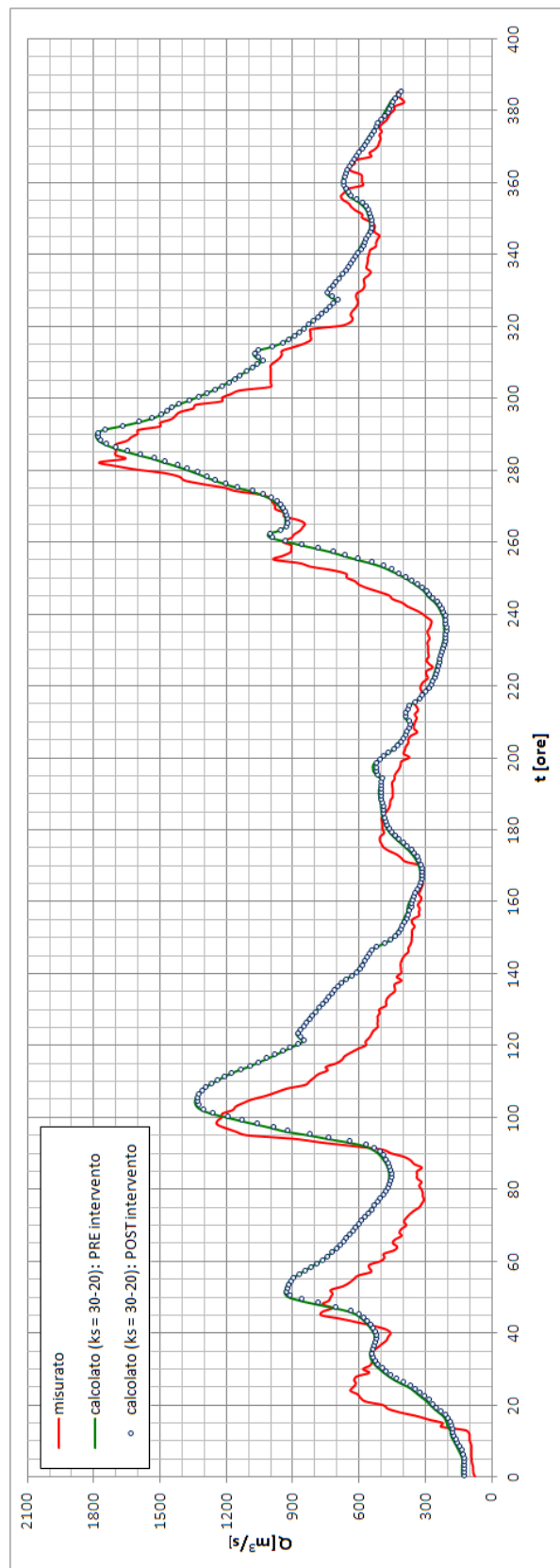


Figura 6.3: Confronto tra idrogramma misurato e simulato, in condizioni PRE e POST-intervento, per l'intero evento del 2002.

Questi interventi sono stati operativamente schematizzati, col software *Incidenze*, utilizzando gli elementi “tronco speciale” per descrivere al meglio il funzionamento e le caratteristiche idrauliche di un rilevato arginale o di un muro di difesa fluviale.

Come già citato all’inizio del capitolo 2, l’evento di riferimento per la valutazione delle criticità e per la progettazione di interventi sul fiume Piave è la piena del 1966, storicamente la più gravosa registrata. Una volta stimata la capacità di portata, attraverso incrementi progressivi della portata, sono stati verificati i profili idrometrici nei tratti analizzati per osservare cosa succederebbe qualora si ripresentasse un evento come quello del 1966.

6.2.1 Portata di picco per l’evento del Novembre 1966

Il primo passo di questo studio consiste nel simulare con l’ausilio del software *2DEF* l’evento di piena del 3 – 6 Novembre 1966. In figura 6.4 sono riportate le tracce dei profili longitudinali relativi ai tre interventi.

Osservando i grafici 6.9-6.11 che descrivono il massimo livello rispetto alla quota arginale per l’evento del Novembre 1966 si nota che il tratto considerato a valle di ponte Malcolm consente il transito dell’intero idrogramma di piena, mentre le aree di Perarolo e di Belluno sono soggette ad allagamenti a causa del superamento delle rispettive sommità arginali con l’avvicinarsi del colmo di piena. La medesima osservazione può essere derivata dall’osservazione dei grafici 6.6-6.8 dove si riporta l’idrogramma di piena corrispondente all’evento del 1966 evidenziando gli istanti in cui si ha tracimazione o in cui si viene raggiunta la portata massima, laddove riesca a transitare indisturbata.

In figura 6.6 si vede che la tracimazione avviene per valori prossimi alla massima portata per l’evento simulato, invece il grafico 6.8 evidenzia il sormonto della sponda in piena fase di crescita dell’idrogramma di piena, con valori significativamente inferiori rispetto a quello di picco.

6.2.2 Capacità di portata PRE e POST intervento

Le valutazioni espresse sopra hanno solo carattere indicativo rispetto alla capacità di portata dei singoli tratti fluviali.

Mirando all’ottimizzazione dei tempi di calcolo, le capacità di portata sono state valutate conducendo una serie di simulazioni successive non sull’intero dominio di calcolo, ma soltanto fino alla zona interessata dall’intervento (vedi figura 6.5) considerando:

- il corso d’acqua principale e tutti gli affluenti che vi si immettono a monte dell’area di intervento;
- alcuni degli affluenti a valle della zona di intervento, sempre procedendo con ordine da monte verso valle, in modo da prendere in considerazione possibili effetti di rigurgito che questi possono creare, andando ad influenzare i livelli nella zona in esame.

Basandosi sulle informazioni contenute nei grafici 6.6-6.8, si sceglie arbitrariamente un valore di portata per verificare se questo, nell’area considerata, transiti in sicurezza senza dar luogo a tracimazioni.

Per tentare di dare una rappresentazione il più ragionevole possibile della dinamica con cui le portate che attraversano il corso principale e i suoi affluenti arrivano alla zona di intervento, si procede nel seguente modo:

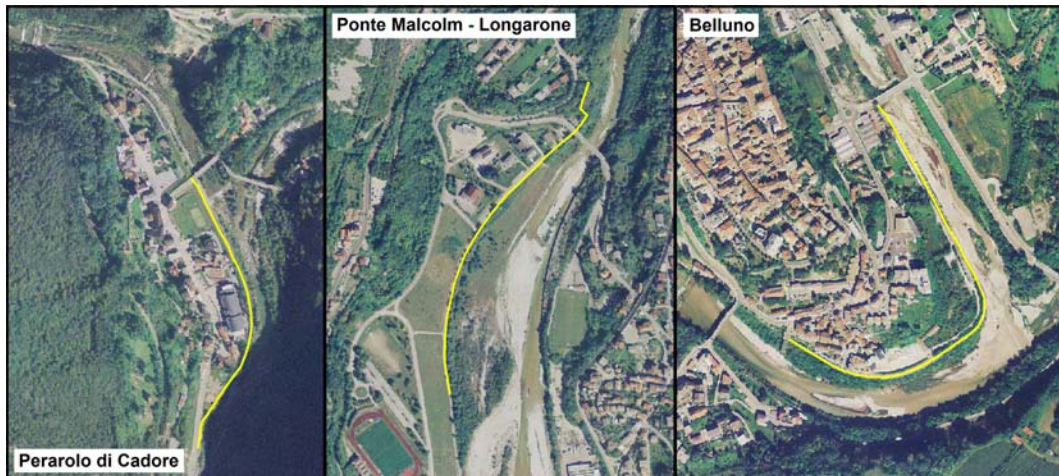


Figura 6.4: Tracce dei profili longitudinali di intervento.

Limite spaziale simulazione			Corso	Q_{colmo} [m^3/s]
PERAROLO DI CADORE	LONGARONE	BELLUNO	Piave	1140
			Boite	580
Valmontina			30	
Rivalgo			13	
Valbona			10	
PERAROLO DI CADORE	LONGARONE	BELLUNO	Val Tovanella	12
			Ga de raza	18
			Vajont	73
			Maè	400
		BELLUNO	Desedan	27
			Gallina	61
			Rai	300
			Ardo di Destra	60
			Cicogna	60
			Limana	30
			Ardo di Sinistra	45
			Gresal	30
			Cordevole	845
			Mis	712
			Terche	45
Veses	80			
Rimonta	85			

Figura 6.5: Corsi d'acqua considerati nel calcolo della capacità di portata.

1. la quota parte di portata che caratterizza i soli corsi d'acqua che si trovano a monte della zona di intervento viene assegnata secondo un criterio di proporzionalità rispetto al valore del colmo di piena che transita in ogni singolo corso simulando l'evento di piena del 1966;
2. la portata per gli affluenti considerati a valle dell'intervento viene determinata assegnando ad ognuno di essi un fattore moltiplicatore di scala. Tale coefficiente dipende dalla portata "arbitrariamente" scelta che si desidera verificare, infatti è dato dal rapporto tra tale valore e la somma delle portate massime dei corsi d'acqua a monte dell'area da esaminare;
3. in ognuno dei corsi d'acqua considerati, la portata viene fatta crescere linearmente, partendo dal valore di portata che caratterizza il regime di moto permanente del corso, fino al raggiungimento del valore determinato seguendo i punti 1. e 2.;
4. in seguito al raggiungimento del valore di portata richiesto si mantiene tale valore costante per un tempo sufficiente a poter considerare il deflusso nel tratto soggetto ad intervento in condizione di regime.

Questo procedimento è stato applicato ad ognuna delle zone esaminate per lo studio della capacità di portata: Perarolo, Longarone e Belluno.

È necessario osservare che, in merito al procedimento descritto sopra, è possibile, ed opportuno, assegnare durate diversificate alle varie simulazioni in base al tempo impiegato dall'acqua a raggiungere la zona desiderata e a portare il deflusso nel tratto alle condizioni di regime.

Una volta implementato il modello bidimensionale *2DEF*, a simulazione conclusa si procede alla valutazione della bontà del risultato ottenuto (visualizzato per mezzo del software *Incidenze*). In corrispondenza dei profili tracciati in figura 6.4 si osserva l'andamento del livello idrometrico: se questo, lungo tutto il profilo, si trova al di sotto della sommità della sponda è possibile incrementare il valore di portata precedentemente scelto e ripetere la procedura; se invece la quota arginale viene superata dal livello dell'acqua in almeno un punto del profilo, si deve diminuire la portata inizialmente adottata e ripetere la procedura. A seconda del caso che si verifica, gli aumenti e le riduzioni della portata da studiare vengono fatti adottando un passo $\Delta Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Si ritiene di aver raggiunto il valore della capacità di portata del tratto in esame quando sono stati determinati Q per cui il livello non supera mai la quota massima arginale e $Q + \Delta Q$ caratterizzato da un profilo che almeno in un punto si trova ad una quota superiore rispetto a quella della difesa spondale: così è stata valutata la capacità di portata sia in condizioni "pre" che "post" intervento.

I risultati prodotti da questa analisi sono riportati nei grafici 6.12-6.14, dove vengono messi a confronto gli andamenti del livello e delle quote arginali in condizioni PRE e POST intervento per avere una visione chiara dell'influenza che gli interventi hanno sulla capacità di portata del tratto esaminato. I risultati sono inoltre riassunti nella tabella 6.1.

Si vede, in tabella 6.1, che gli interventi producono variazioni importanti nella capacità di portata dei singoli tratti, passando dal 33% di incremento a Longarone fino al 60% a Belluno. Tali aumenti consentono, come mostrato nelle figure 6.6-6.8, di far transitare in sicurezza il colmo di piena di un evento confrontabile con quello del Novembre 1966. Dalle

	Perarolo	Longarone	Belluno
Q_{MAX} 1966 [m^3/s]	1715	1790	2400
Q_{PRE} [m^3/s]	1550	2050	1150
Q_{POST} [m^3/s]	2900	3050	2900

Tabella 6.1: Dati delle portate che caratterizzano i tratti soggetti ad intervento. Q_{MAX} : portata di picco che transita per un evento paragonabile a quello del 1966; Q_{PRE} : capacità di portata prima dell'intervento; Q_{POST} : capacità di portata in seguito all'esecuzione dei lavori.

figure 6.9-6.9 si nota che, rispetto al nuovo profilo arginale, il franco idraulico minimo è pari a 0.90 m per Longarone e Belluno, arrivando fino a 2.0 m circa a Perarolo.

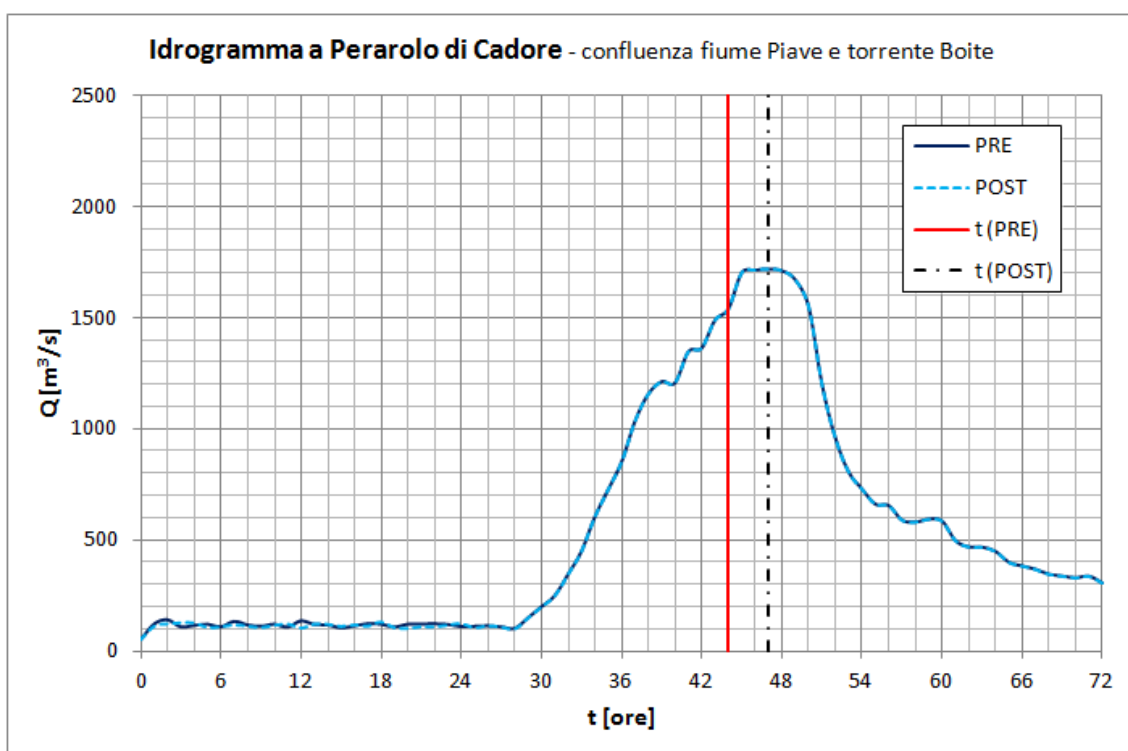


Figura 6.6: Idrogramma a Perarolo di Cadore ottenuto dalla simulazione dell'evento del 1966 attraverso il modello bidimensionale *2DEF*.

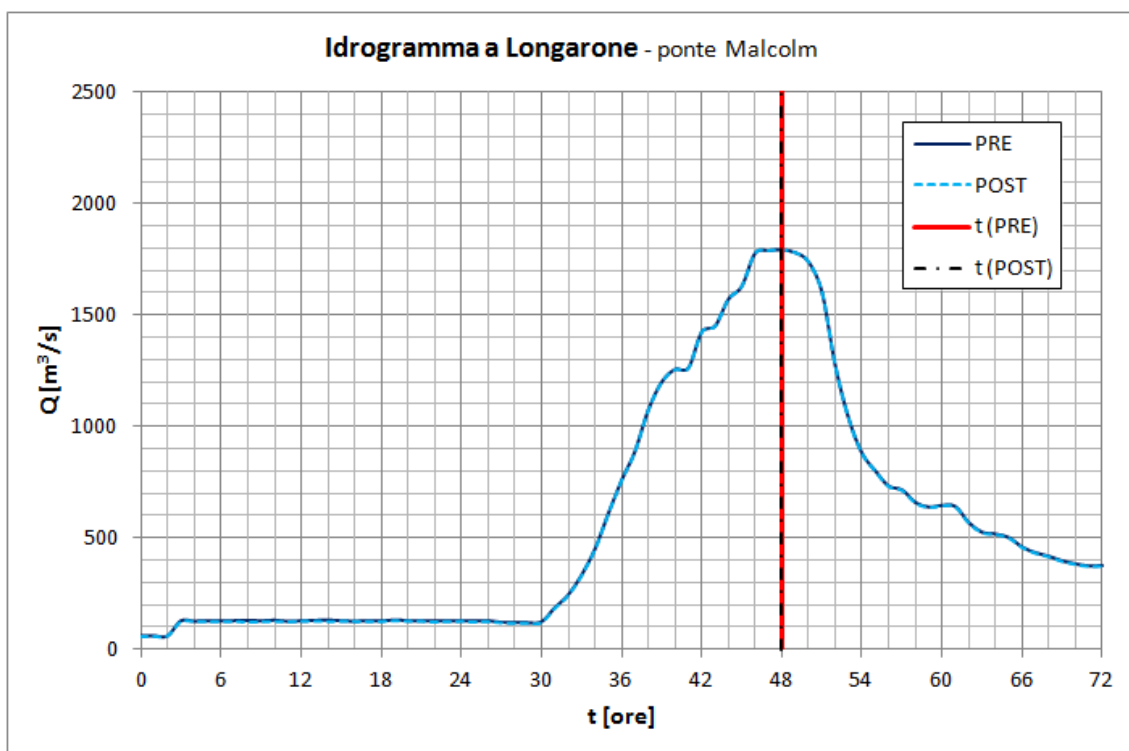


Figura 6.7: Idrogramma a Longarone ottenuto dalla simulazione dell'evento del 1966 attraverso il modello bidimensionale *2DEF*.

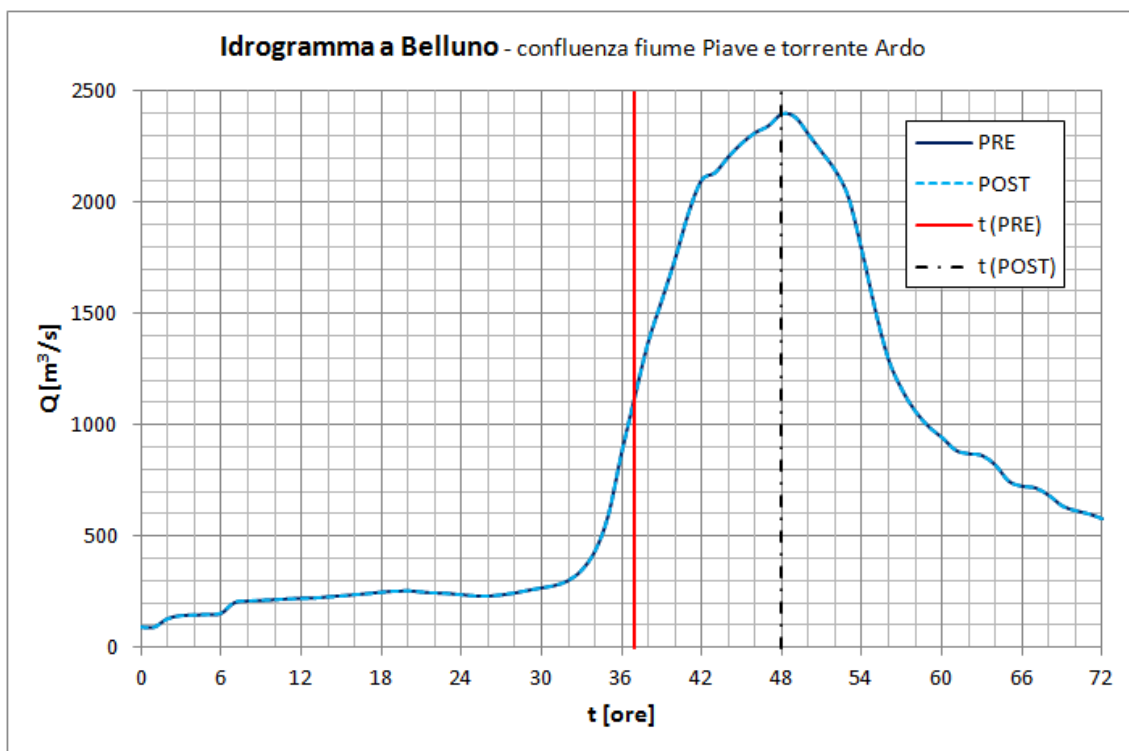


Figura 6.8: Idrogramma a Belluno ottenuto dalla simulazione dell'evento del 1966 attraverso il modello bidimensionale *2DEF*.

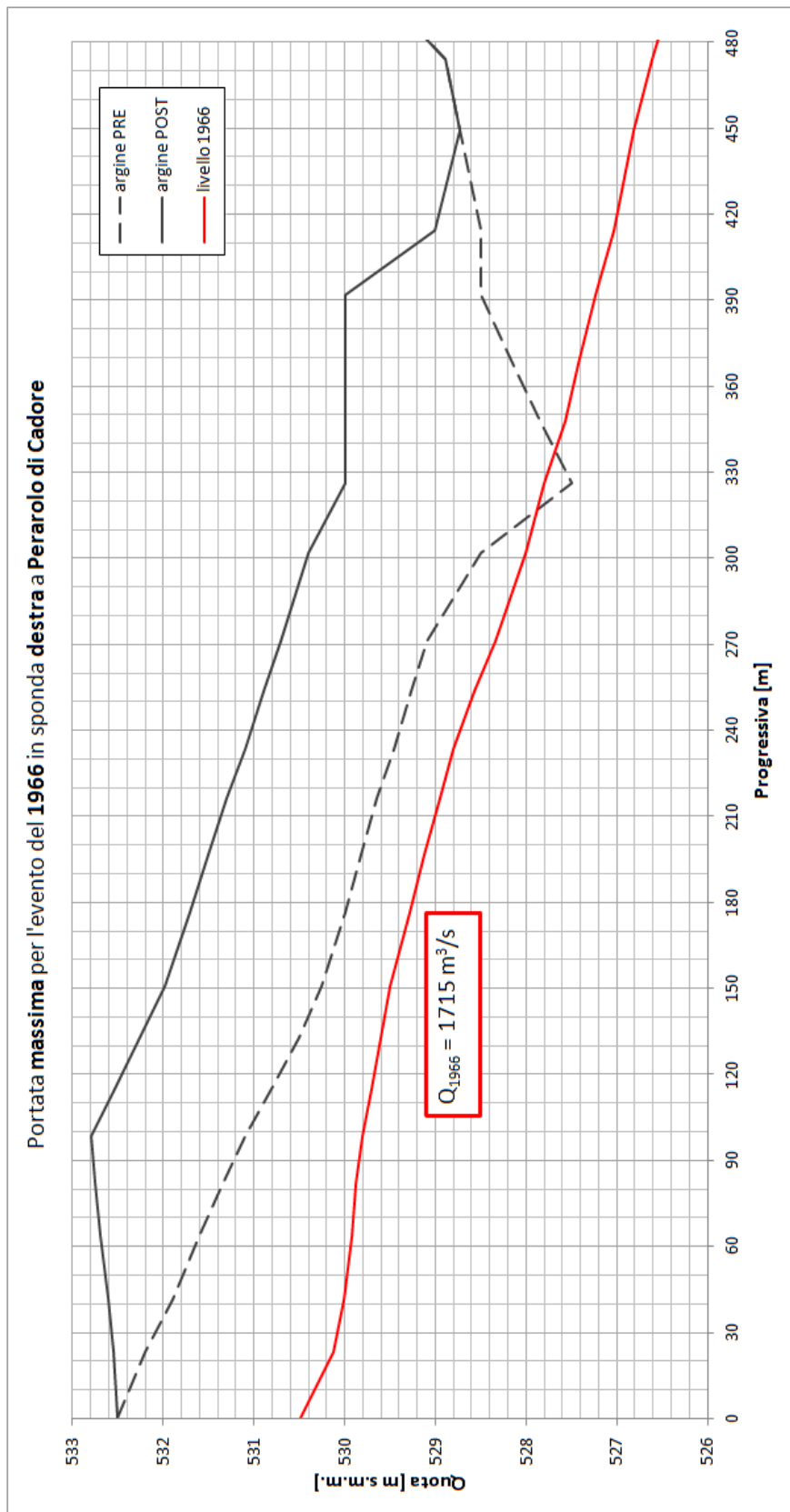


Figura 6.9: Andamento del livello idrometrico, corrispondente all'evento del 1966, lungo il profilo di intervento a Perarolo di Cadore rispetto al profilo arginale in condizioni PRE e POST intervento.

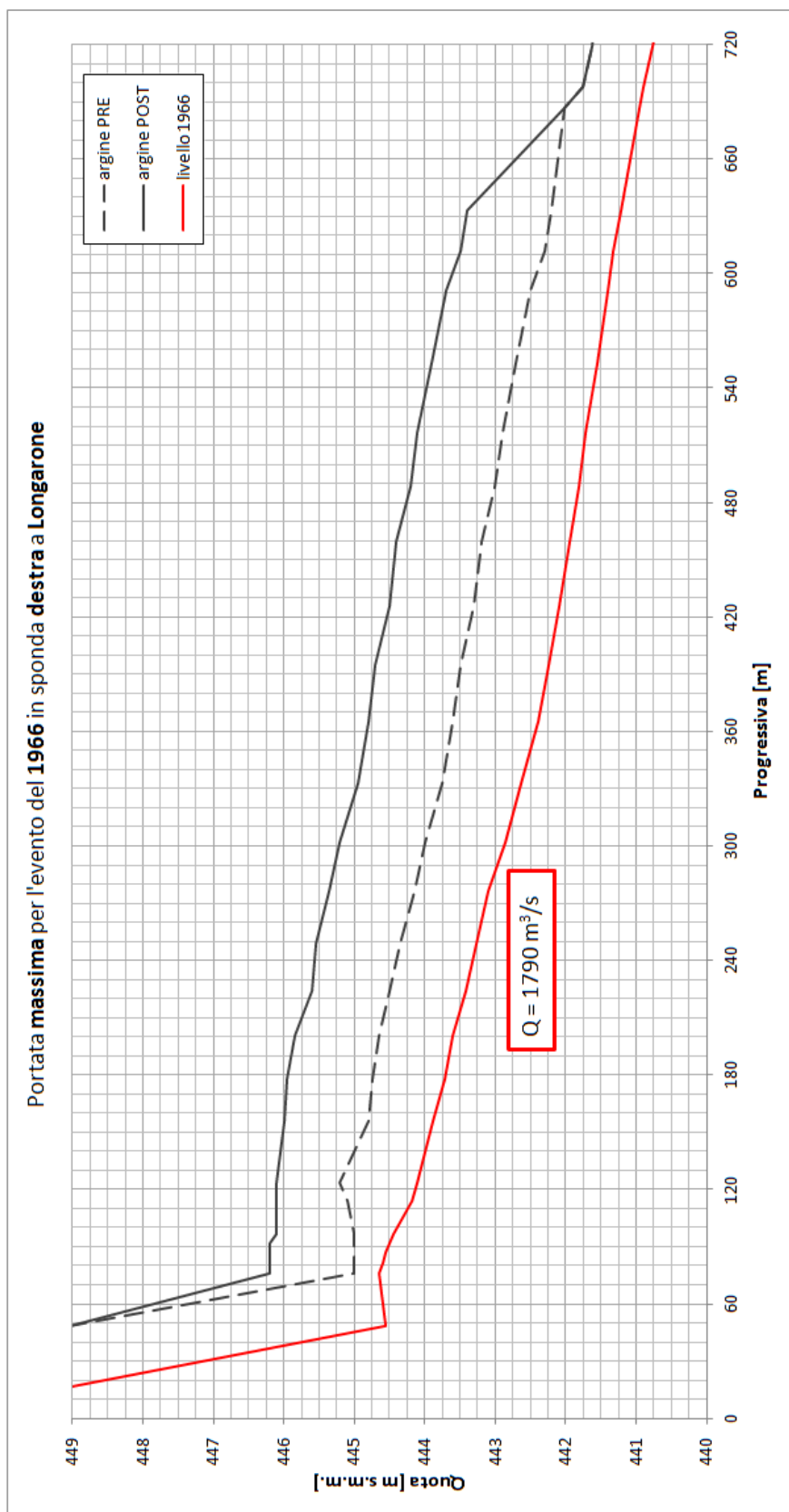


Figura 6.10: Andamento del livello idrometrico, corrispondente all'evento del 1966, lungo il profilo di intervento a Longarone rispetto al profilo arginale in condizioni PRE e POST intervento.

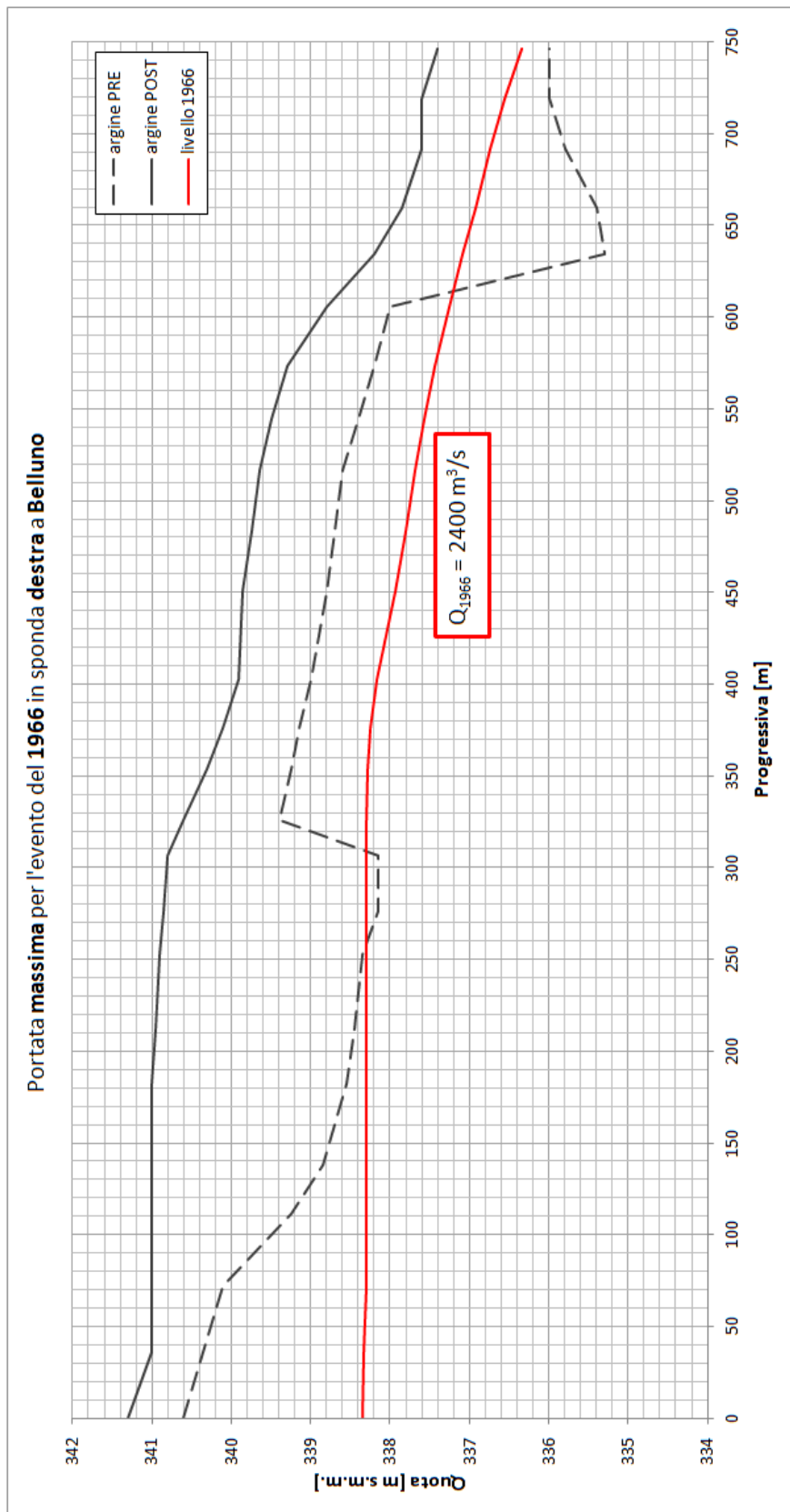


Figura 6.11: Andamento del livello idrometrico, corrispondente all'evento del 1966, lungo il profilo di intervento a Belluno rispetto al profilo arginale in condizioni PRE e POST intervento.

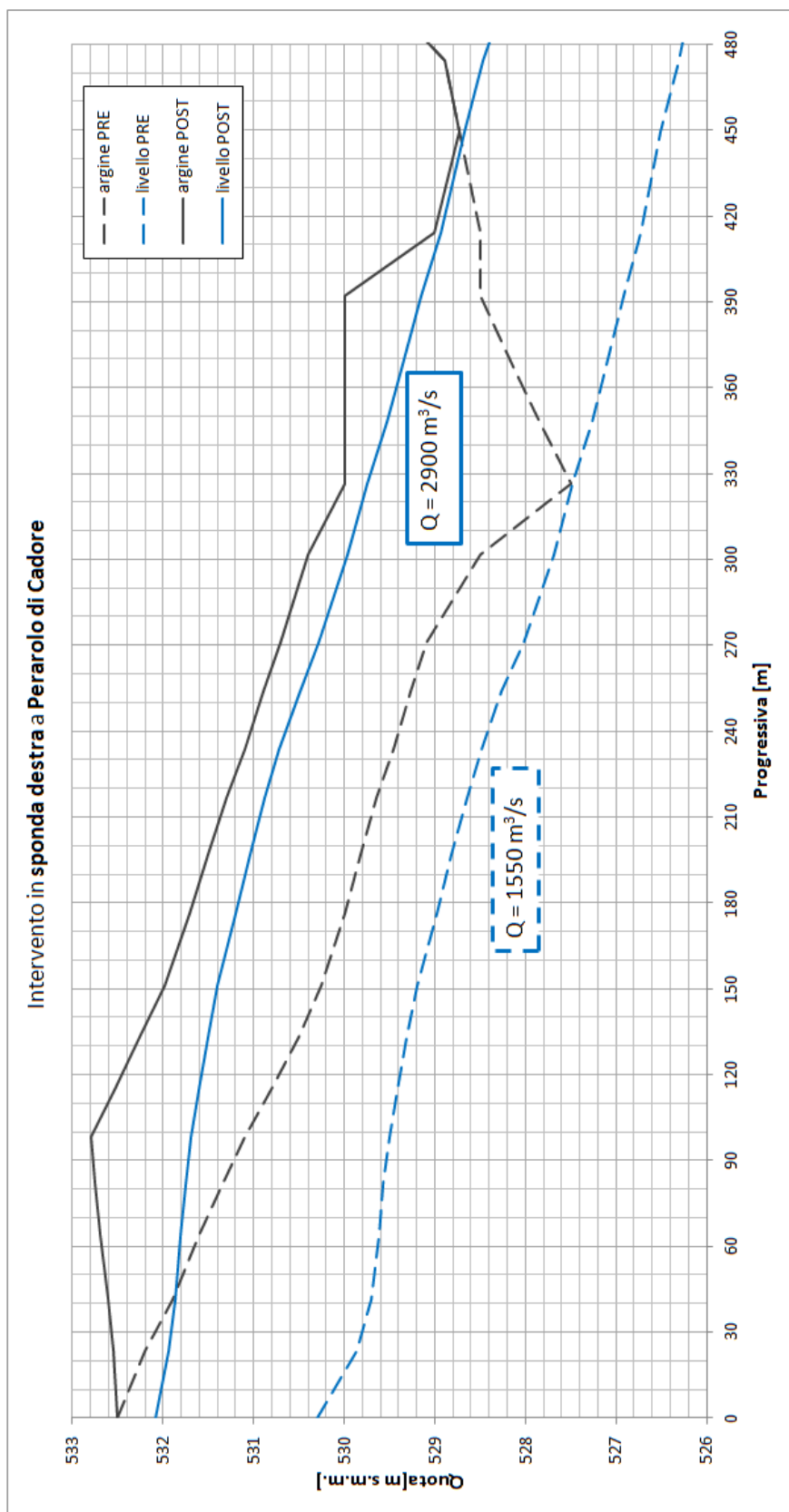


Figura 6.12: Profilo arginale e livello idrometrico, a capacità di portata raggiunta, a Perarolo di Cadore in condizioni PRE e POST intervento.

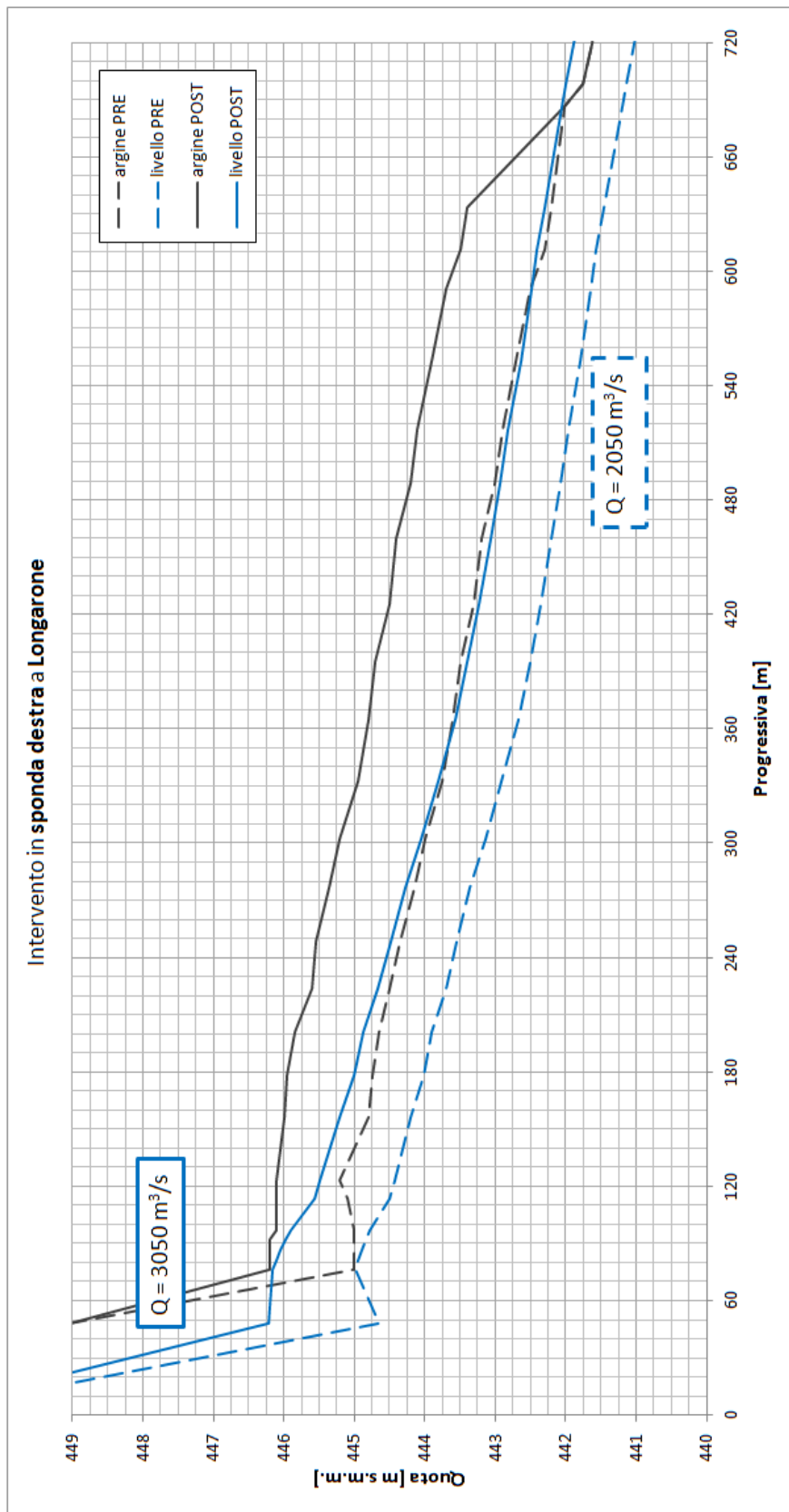


Figura 6.13: Profilo arginale e livello idrometrico, a capacità di portata raggiunta, a Longarone in condizioni PRE e POST intervento.

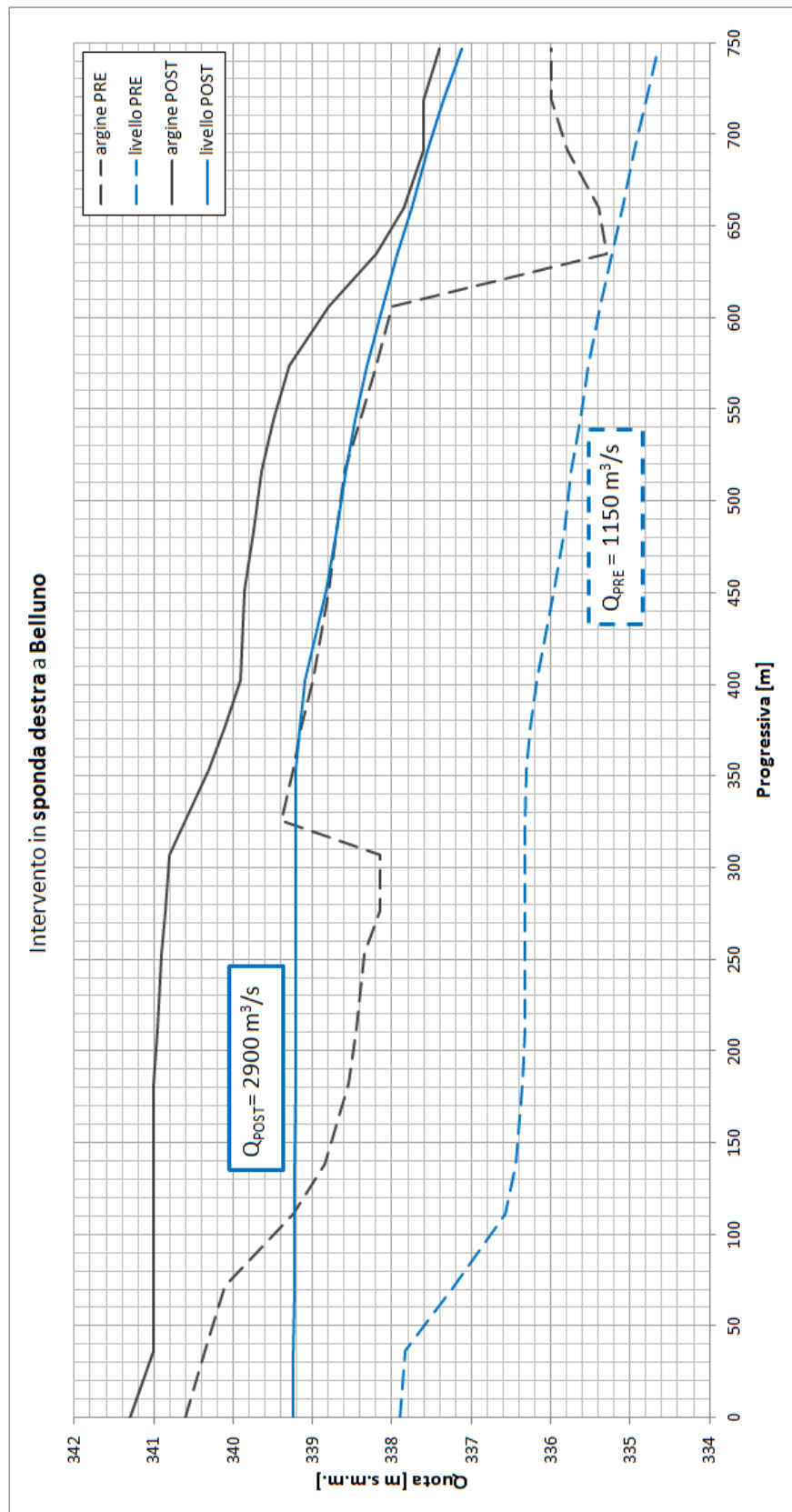


Figura 6.14: Profilo arginale e livello idrometrico, a capacità di portata raggiunta, a Belluno in condizioni PRE e POST intervento.

Conclusioni

Nella presente tesi si sono studiati gli effetti di alcuni interventi localizzati lungo il corso del fiume Piave, in corrispondenza degli abitati di Perarolo di Cadore, Longarone e Belluno. L'analisi si è sviluppata a diversi livelli:

1. revisione e aggiornamento della geometria del reticolo di calcolo esistente sulla base dei dati più aggiornati a disposizione;
2. calibrazione del modello numerico tramite confronto con misure disponibili per l'evento di piena del 2002;
3. determinazione della capacità di portata dei tratti fluviali soggetti ad interventi mirati alla mitigazione del rischio idraulico.

In merito al primo punto, nel reticolo originale erano presenti diverse zone in cui la discretizzazione non risultava ottimale per la descrizione della geometria del dominio. Principalmente questa scarsa qualità descrittiva era dovuta alla presenza di maglie di dimensioni "eccessive" rispetto alla rapida variabilità delle caratteristiche topografiche all'interno della maglia stessa. Pertanto è stata necessaria una prima fase di revisione in cui queste problematiche sono state risolte utilizzando i dati topografici più recenti attualmente a disposizione e ridimensionando alcune maglie del reticolo; in situazioni particolari si sono sostituite alcune maglie con gli elementi monodimensionali "tronchi speciali".

Il risultato prodotto da questa analisi è un netto miglioramento nella descrizione globale della mesh: in particolare le modifiche che possono ritenersi più significative sono quelle, riportate in appendice A e B, che migliorano la rappresentazione degli argini e delle sponde, caratterizzando realisticamente la separazione tra l'area del fiume Piave generalmente interessata dal deflusso (alveo, di magra e di piena) da quella interessata dalla presenza delle acque in situazioni più o meno eccezionali (aree golenali, urbanizzate, boschive).

Nell'ottica di poter apportare ulteriori migliorie alla caratterizzazione della mesh di calcolo, nella seconda fase dello studio ci si è concentrati sulla calibrazione del modello al fine di determinare il più corretto valore da attribuire ai coefficienti di scabrezza secondo Strickler da assegnare agli elementi di calcolo. Per questa operazione sono necessari dei dati misurati in una o più sezioni del corso d'acqua da adottare come riferimento: nel nostro caso l'unico dato a disposizione riguardava l'idrogramma di piena misurato durante l'evento del 2002 alla traversa di Busche.

La procedura utilizzata ha messo in evidenza una ridotta variabilità della portata di picco riprodotta, che rimane sostanzialmente invariata, ma ha evidenziato anche come la variazione del solo coefficiente k_S relativo all'alveo di magra possa rappresentare in modo più preciso l'andamento dell'idrogramma anche in fasi che non corrispondono al colmo di

piena. In questa circostanza si è osservato che il parametro k_S che caratterizza l'alveo di magra è quello che influenza maggiormente i valori della portata Q : infatti, come era lecito attendersi, l'alveo di magra è la parte maggiormente interessata dal deflusso delle acque.

Il set dei coefficienti di scabrezza k_S individuato mediante la procedura di calibrazione risulta:

- $30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: alveo di magra;
- $20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: alveo in ghiaia (si veda il paragrafo 6.1);
- $15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: aree edificate e viabilità;
- $10 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: prati, coltivazioni e golene non vegetate;
- $5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$: zone boschive e golene vegetate.

A valle delle due precedenti fasi dello studio, sono stati considerati alcuni interventi alle difese arginali in corrispondenza degli abitati di Perarolo di Cadore, di Longarone e di Belluno, già noti come punti di criticità all'interno del bacino montano del Piave con problematiche di tracimazione delle arginature rispetto all'evento di riferimento per la progettazione (Novembre 1966).

Il terzo punto di questa tesi considera, note la struttura e la tipologia degli interventi (realizzati o anche solo progettati), gli effetti che questi producono nelle dinamiche del deflusso delle acque durante un evento di piena nel corso principale. In particolare, oltre a valutare la bontà di queste soluzioni per la soluzione delle criticità è stato di interesse quantificare i vantaggi ottenuti attraverso un'analisi della capacità di portata nei diversi tratti interessati dagli interventi stessi.

I risultati in termini di incremento della capacità di portata sono i seguenti:

- Perarolo di Cadore: da $1550 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2900 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Longarone: da $2050 \text{ m}^3/\text{s}$ a $3050 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Belluno: da $1150 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2900 \text{ m}^3/\text{s}$.

In tutti i tratti analizzati si vede un incremento importante della capacità di portata. Il valore minimo del franco di sicurezza idraulica osservato in seguito agli interventi si attesta su 0.90 m , adeguato alla protezione degli abitati dagli allagamenti a cui prima risultavano sensibili rispetto ad un evento con caratteristiche simili a quello del 1966. Si può dunque affermare che gli interventi portano giovamento nella soluzione di queste criticità che caratterizzano il bacino montano.

Tali interventi e gli effetti da essi prodotti possono risultare utili al fine di considerazioni relative alla gestione degli invasi artificiali che vanno ad alimentare il deflusso nell'alveo del fiume Piave.

Appendice A

Studio e verifica relativo alle sezioni topografiche comprese tra Longarone e Nervesa della Battaglia

Le sezioni topografiche di riferimento sono indentificate da un valore numerico crescente da 15 a 45 procedendo da quella più a valle (Nervesa della Battaglia) verso quella più a monte (Longarone) secondo la stessa numerazione usata contestualmente al rilievo nel 2006.

Le sezioni campionate per verificare la bontà delle modifiche apportate alla mesh sono contraddistinte dalla lettera *T* nel titolo del grafico che mostra l'appartenenza alla studio relativo alle sezioni Topografiche e da due numeri che indicano quali sono le sezioni topografiche che si trovano agli estremi del tratto in cui è stata campionata la sezione.

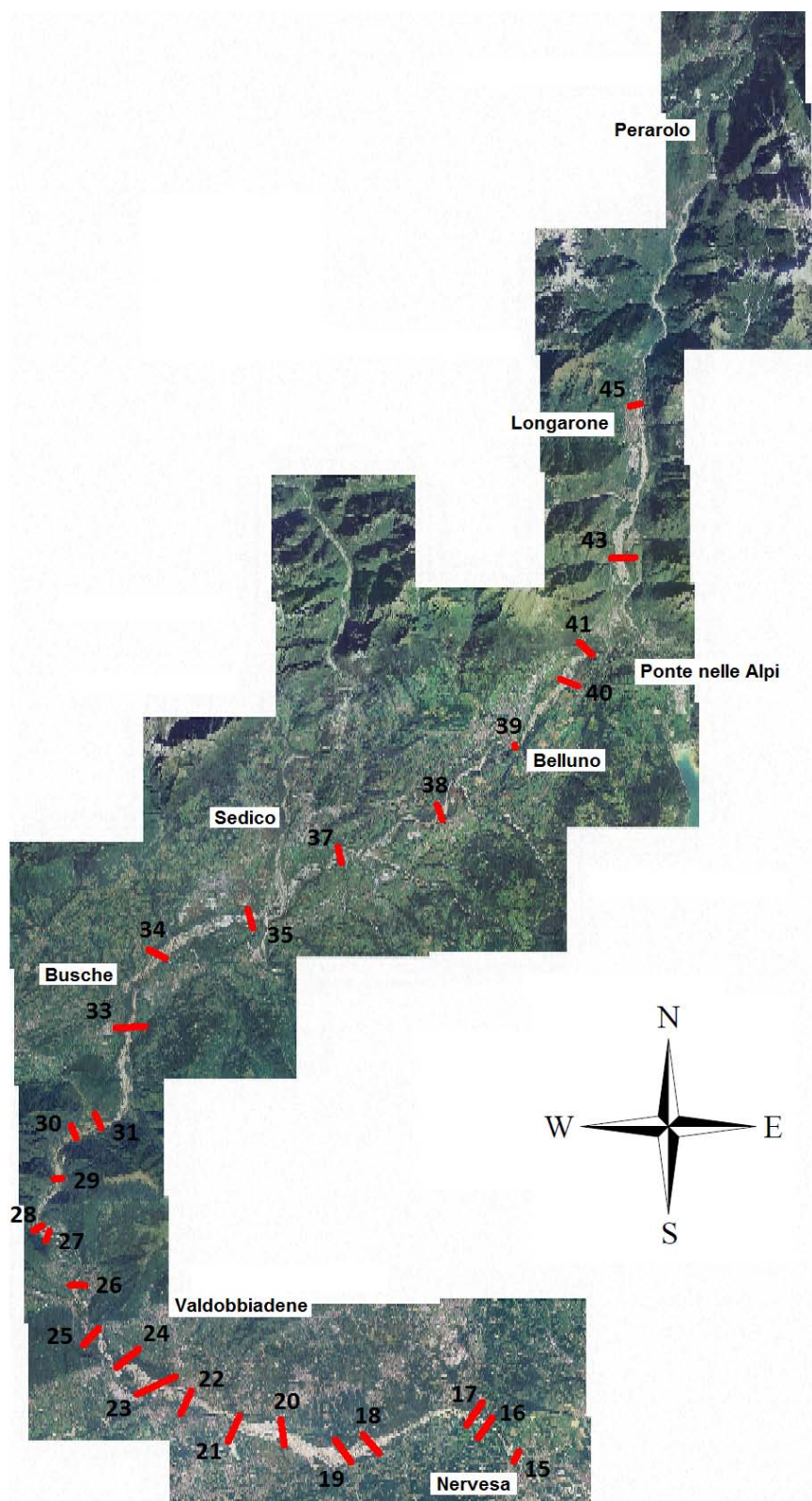


Figura A.1: Mappa della serie delle sezioni appartenenti al rilievo topografico di Marzo-Aprile 2006.

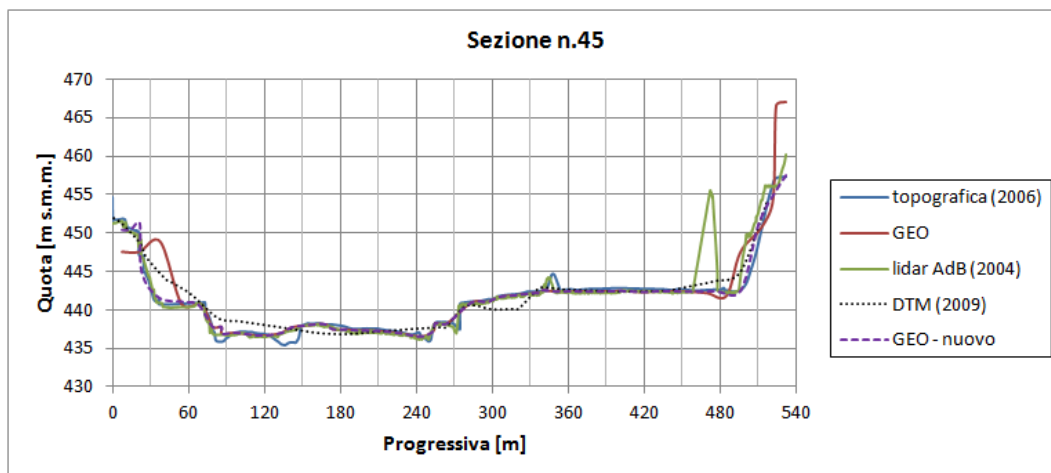


Figura A.2: Sezione numero 45

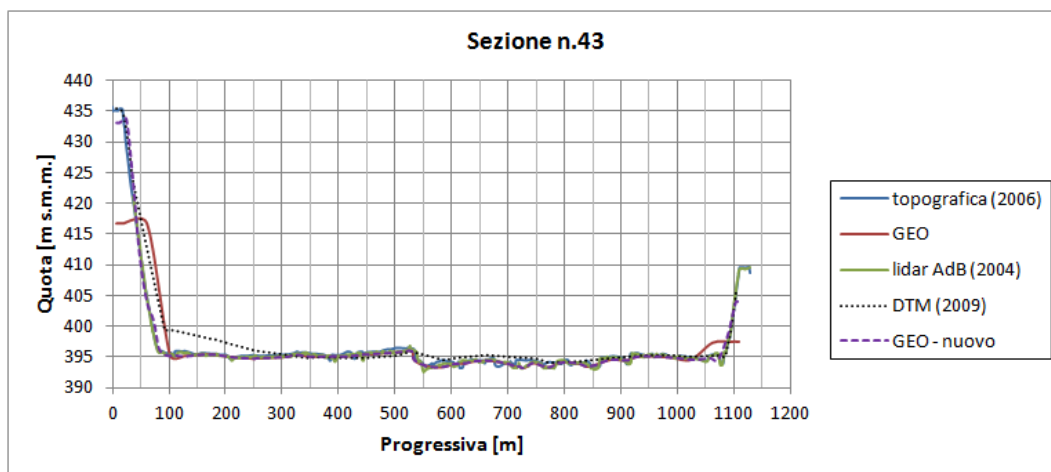


Figura A.3: Sezione numero 43

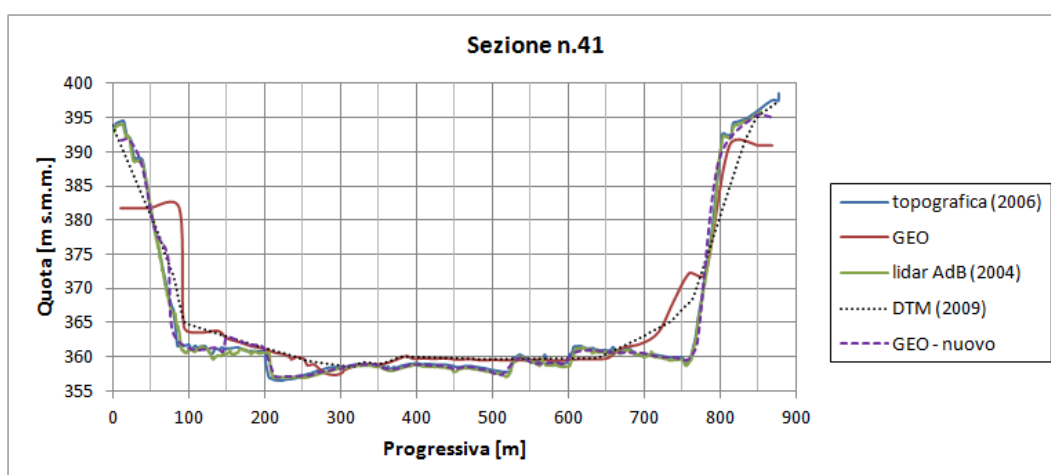


Figura A.4: Sezione numero 41

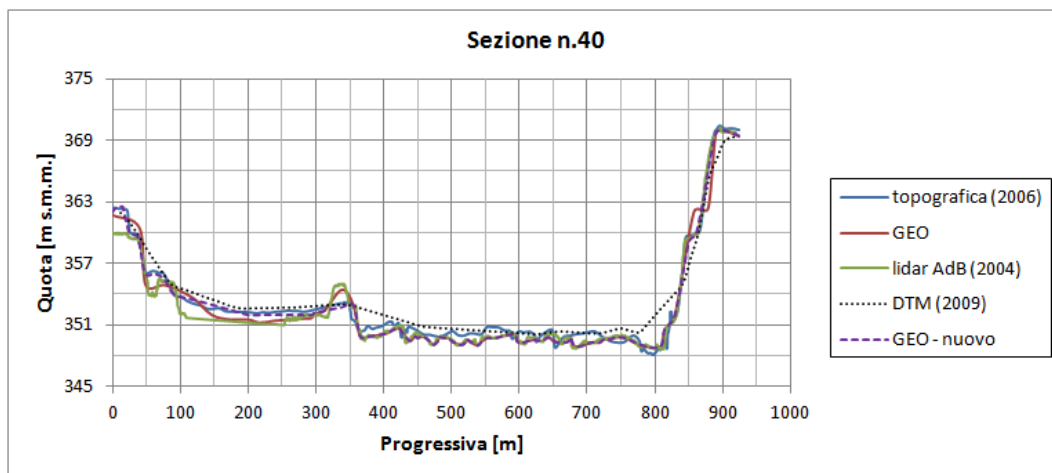


Figura A.5: Sezione numero 40

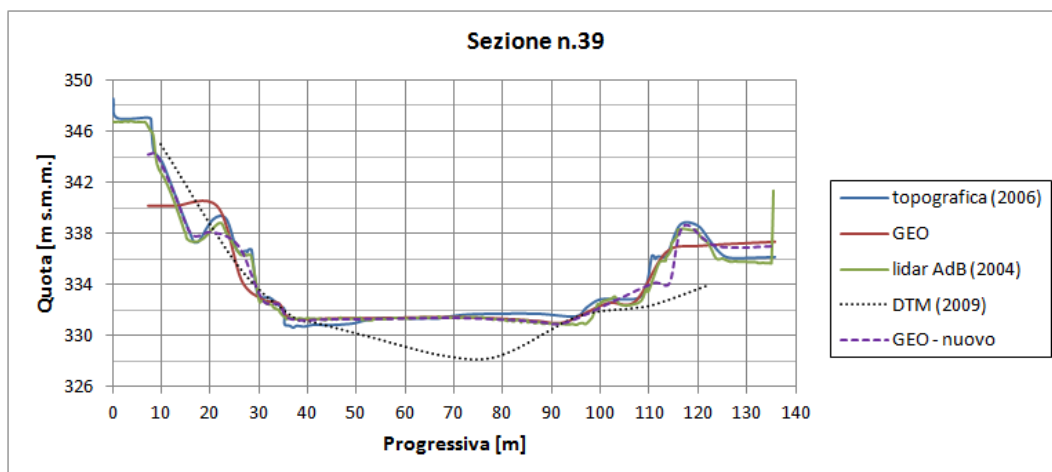


Figura A.6: Sezione numero 39

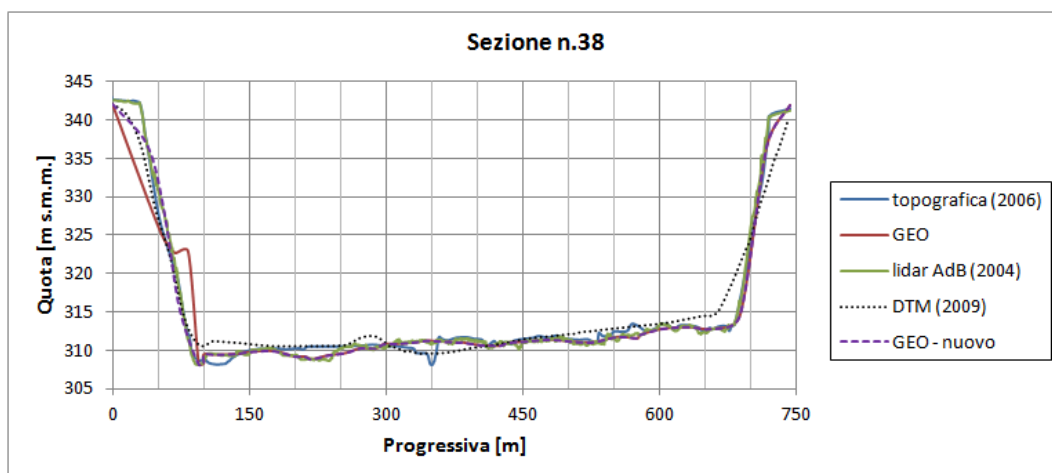


Figura A.7: Sezione numero 38

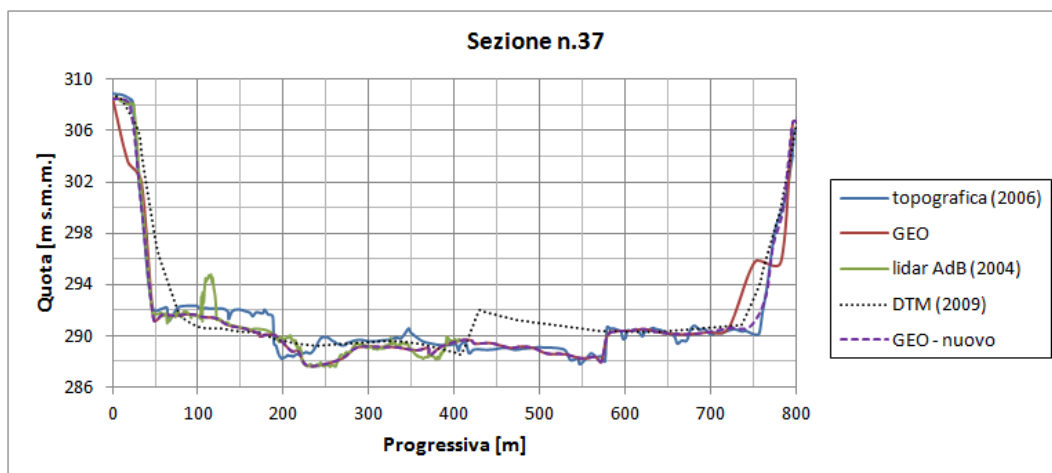


Figura A.8: Sezione numero 37

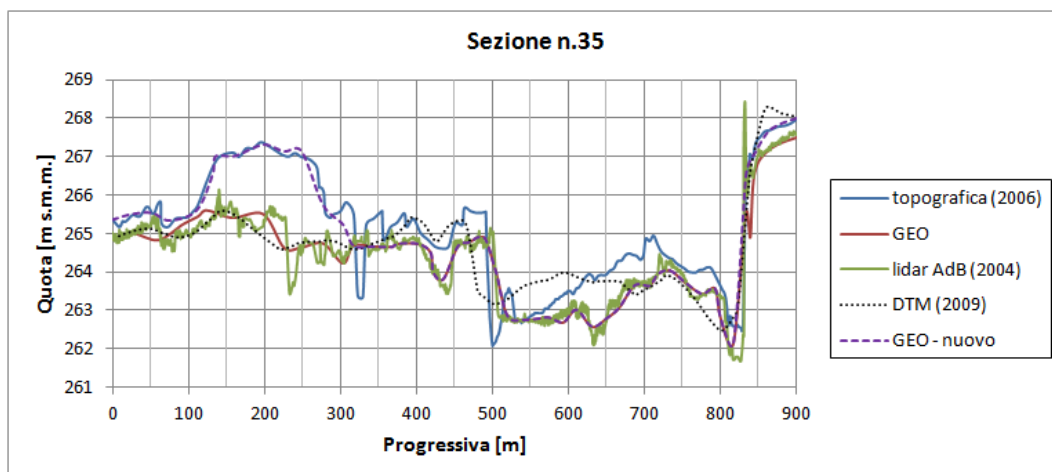


Figura A.9: Sezione numero 35

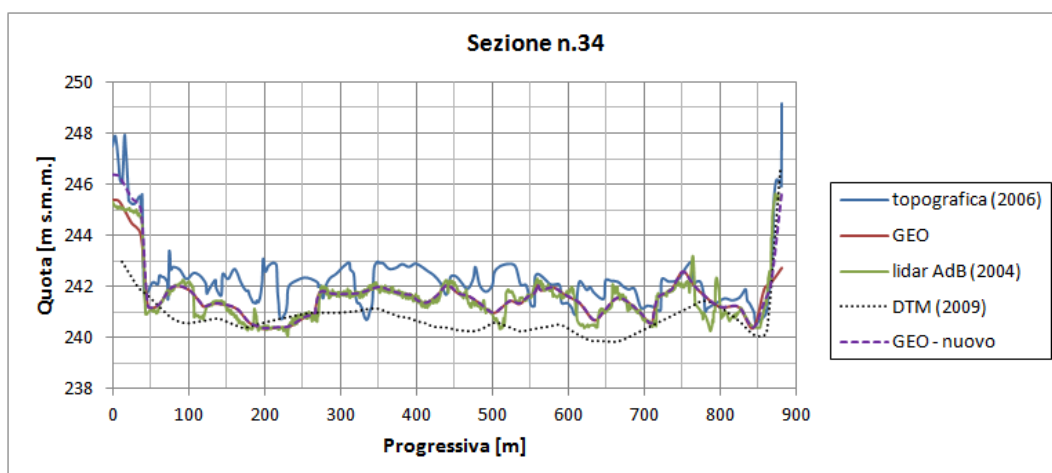


Figura A.10: Sezione numero 34

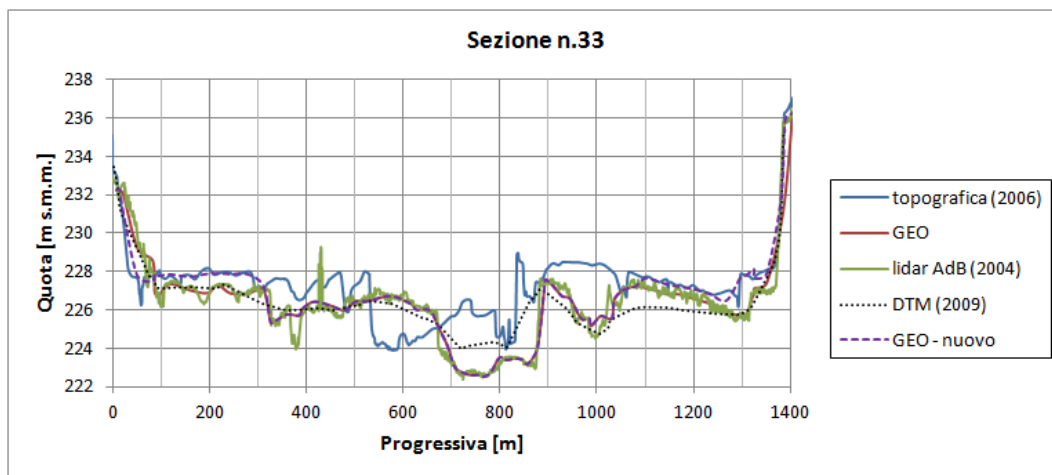


Figura A.11: Sezione numero 33

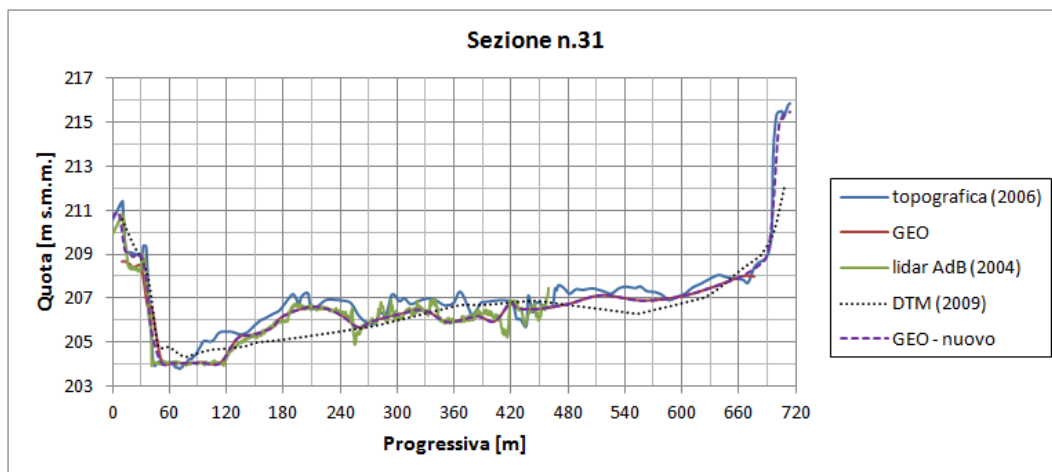


Figura A.12: Sezione numero 31

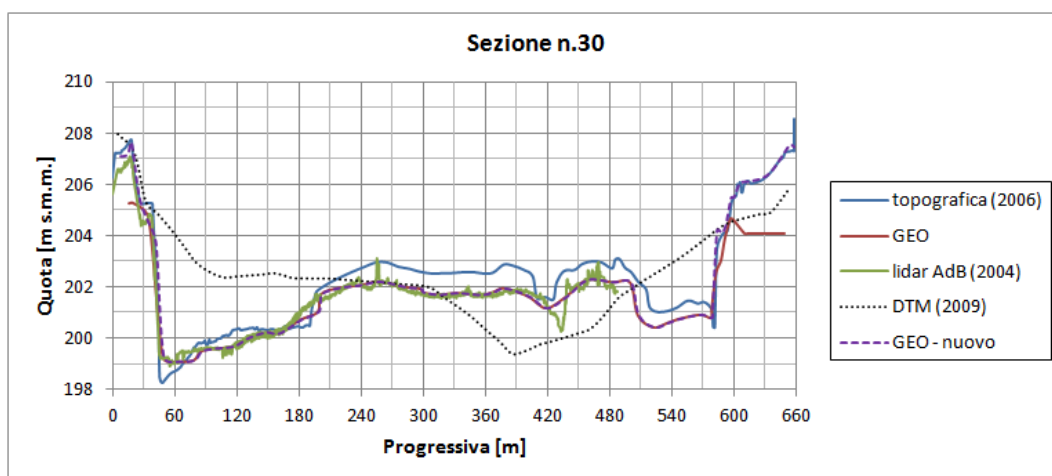


Figura A.13: Sezione numero 30

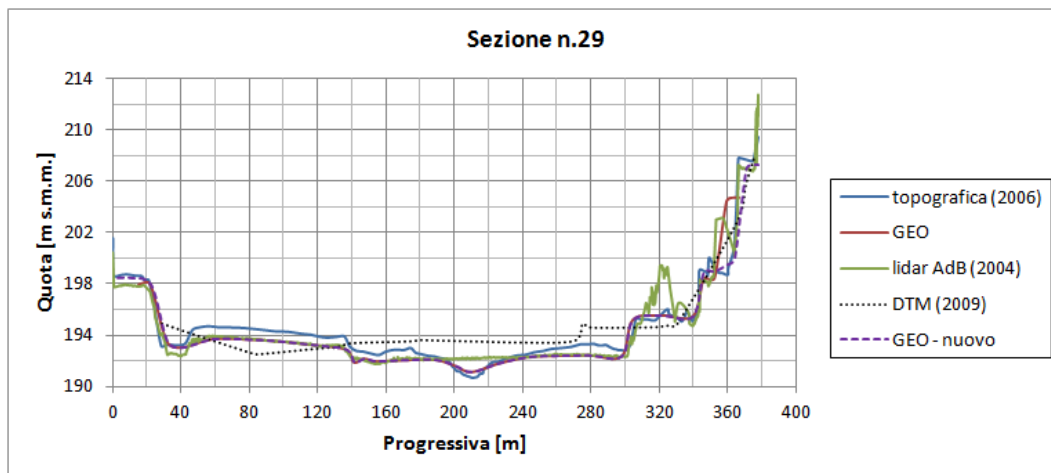


Figura A.14: Sezione numero 29

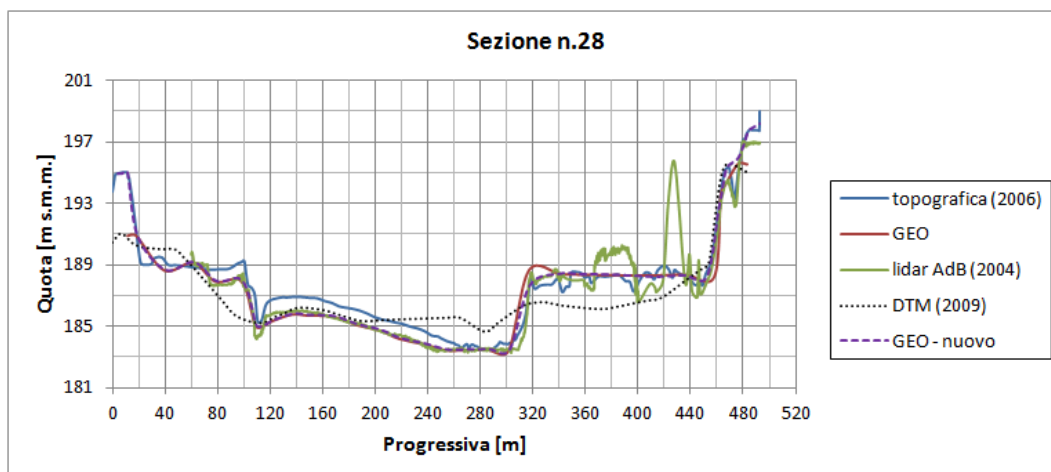


Figura A.15: Sezione numero 28

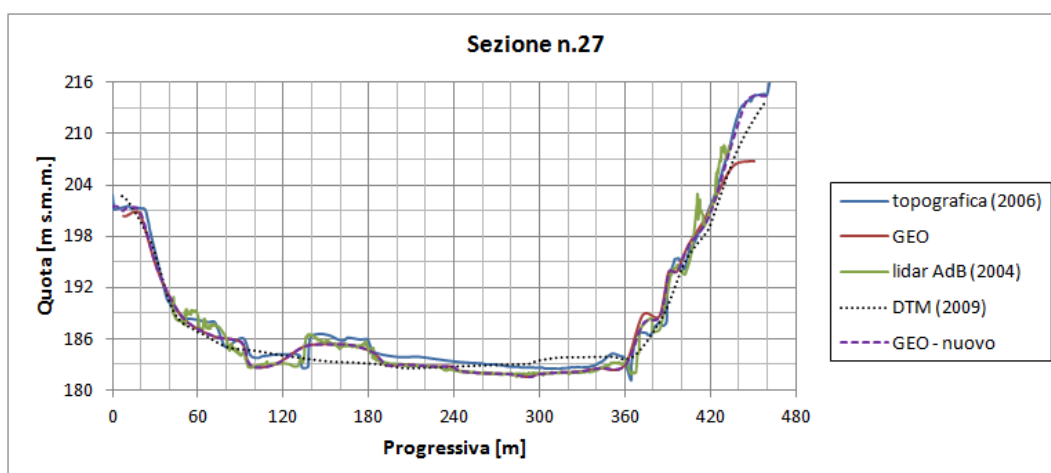


Figura A.16: Sezione numero 27

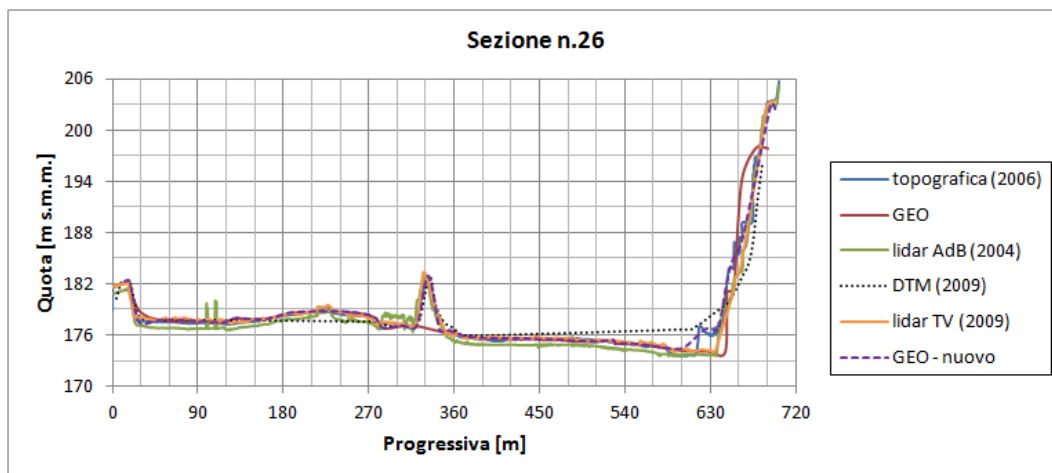


Figura A.17: Sezione numero 26

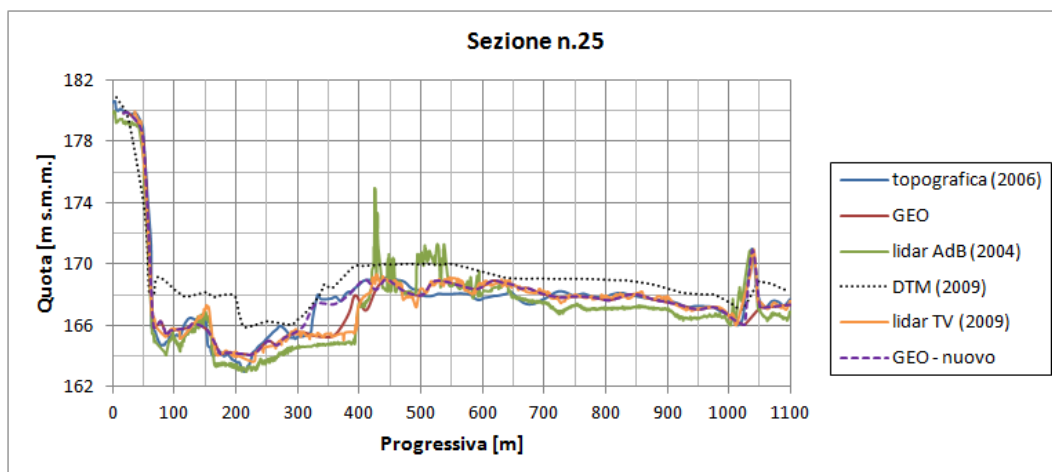


Figura A.18: Sezione numero 25

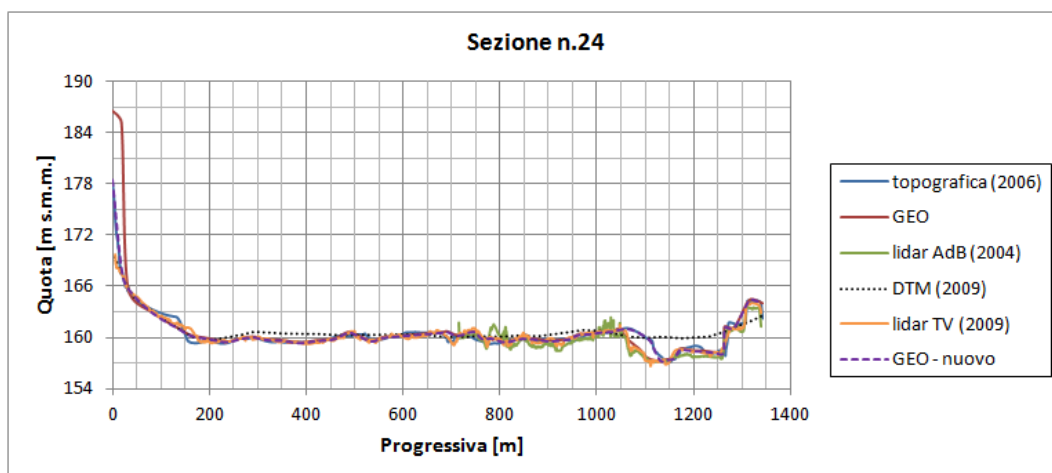


Figura A.19: Sezione numero 24

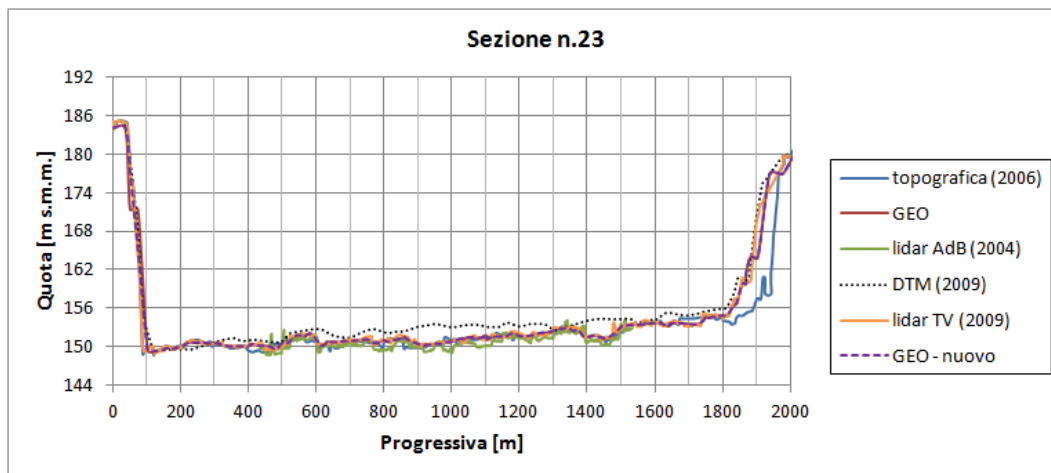


Figura A.20: Sezione numero 23

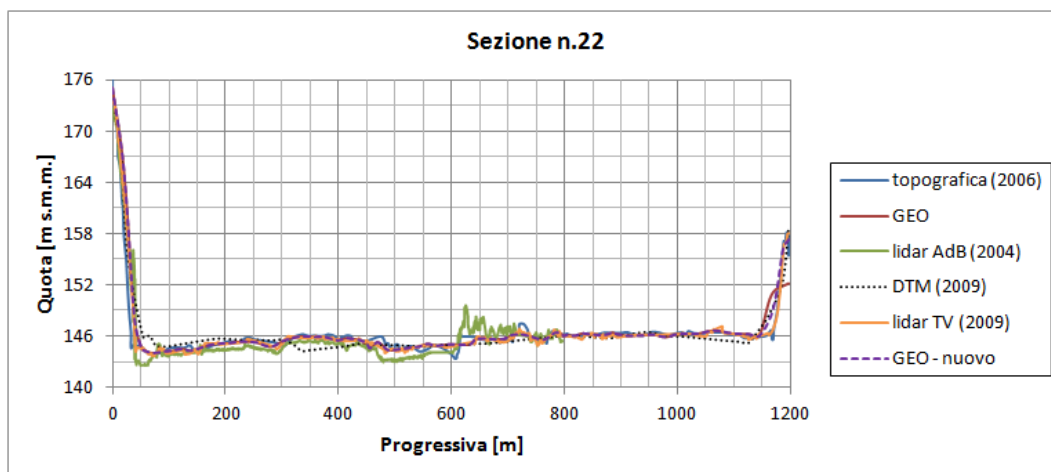


Figura A.21: Sezione numero 22

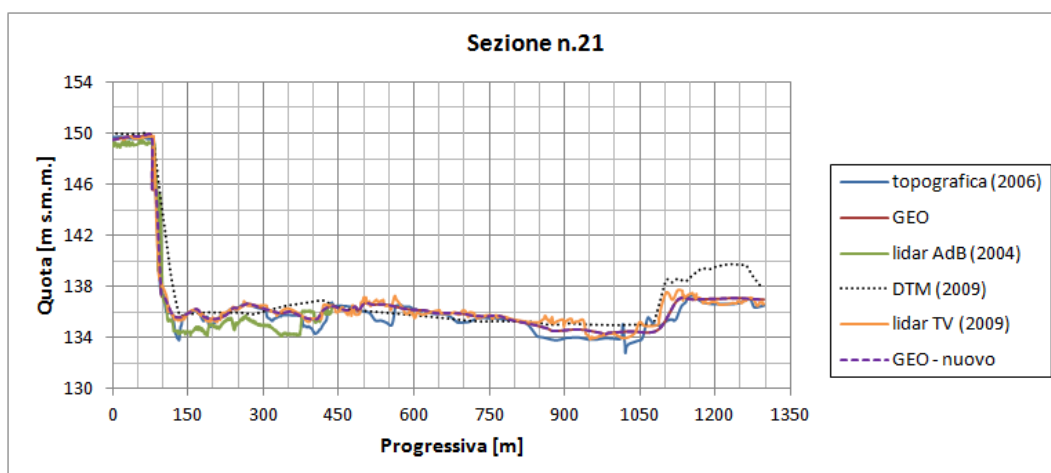


Figura A.22: Sezione numero 21

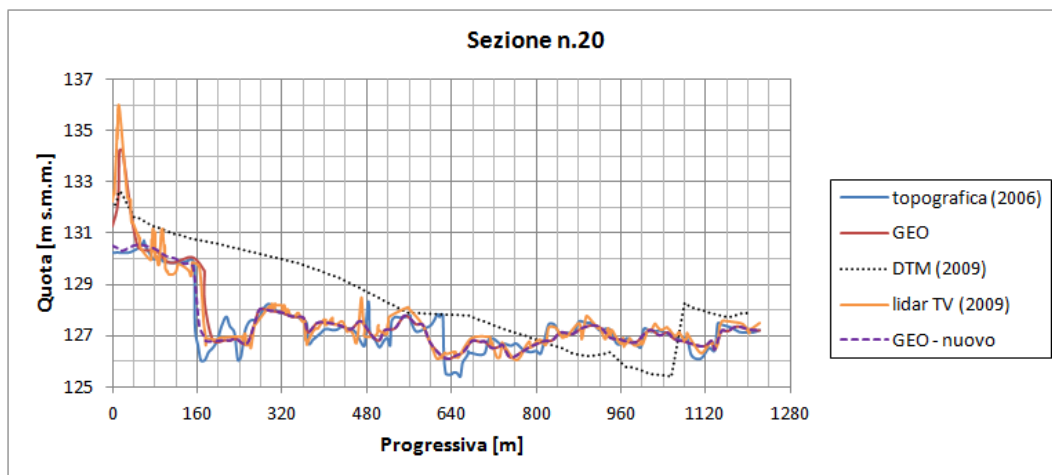


Figura A.23: Sezione numero 20

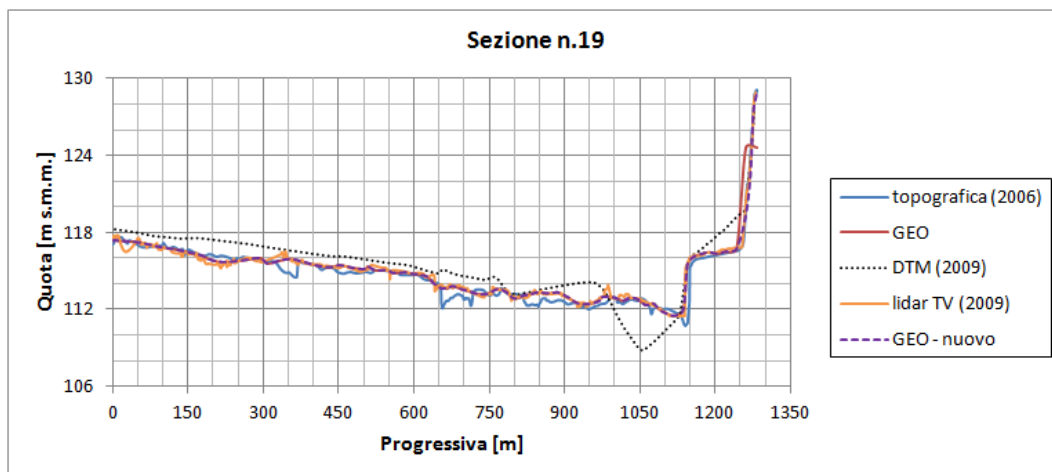


Figura A.24: Sezione numero 19

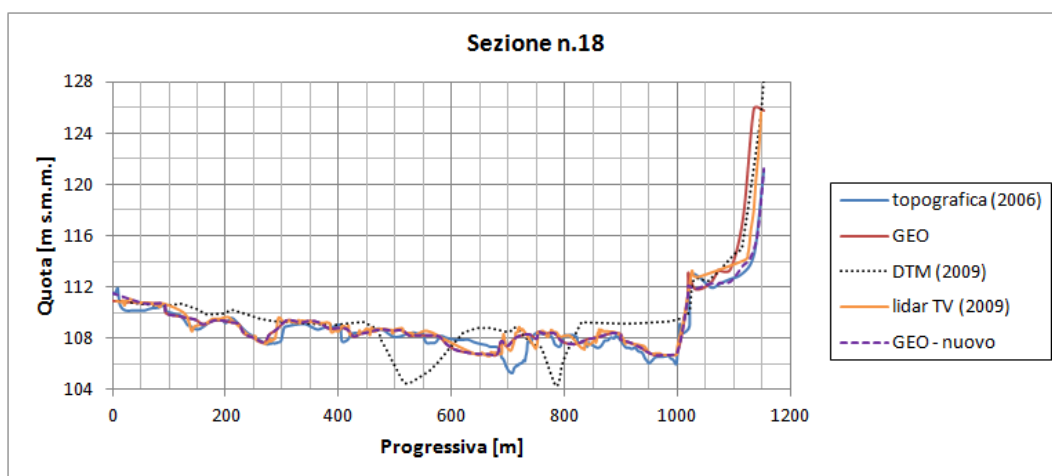


Figura A.25: Sezione numero 18

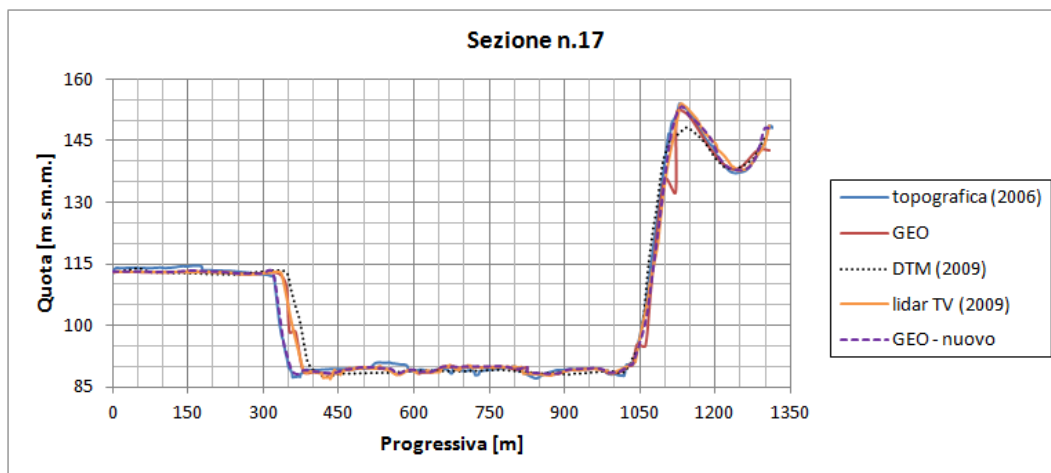


Figura A.26: Sezione numero 17

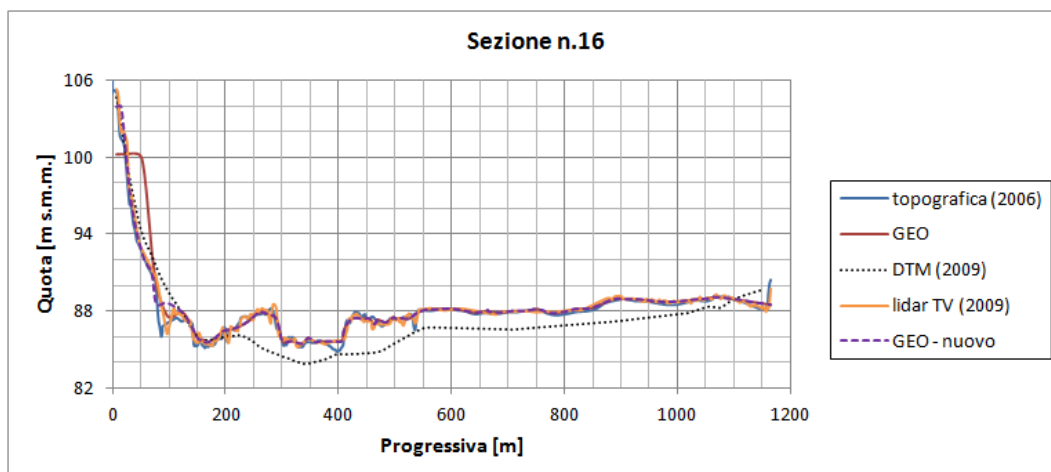


Figura A.27: Sezione numero 16

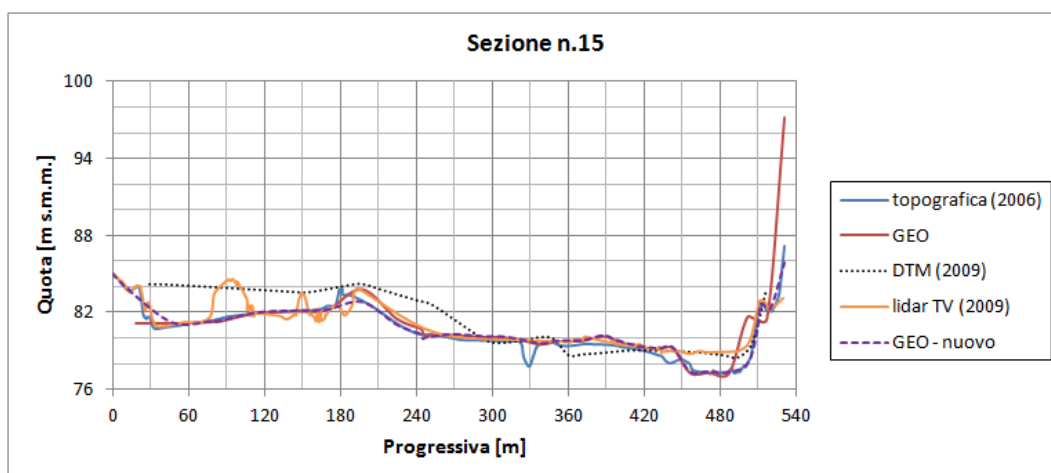


Figura A.28: Sezione numero 15

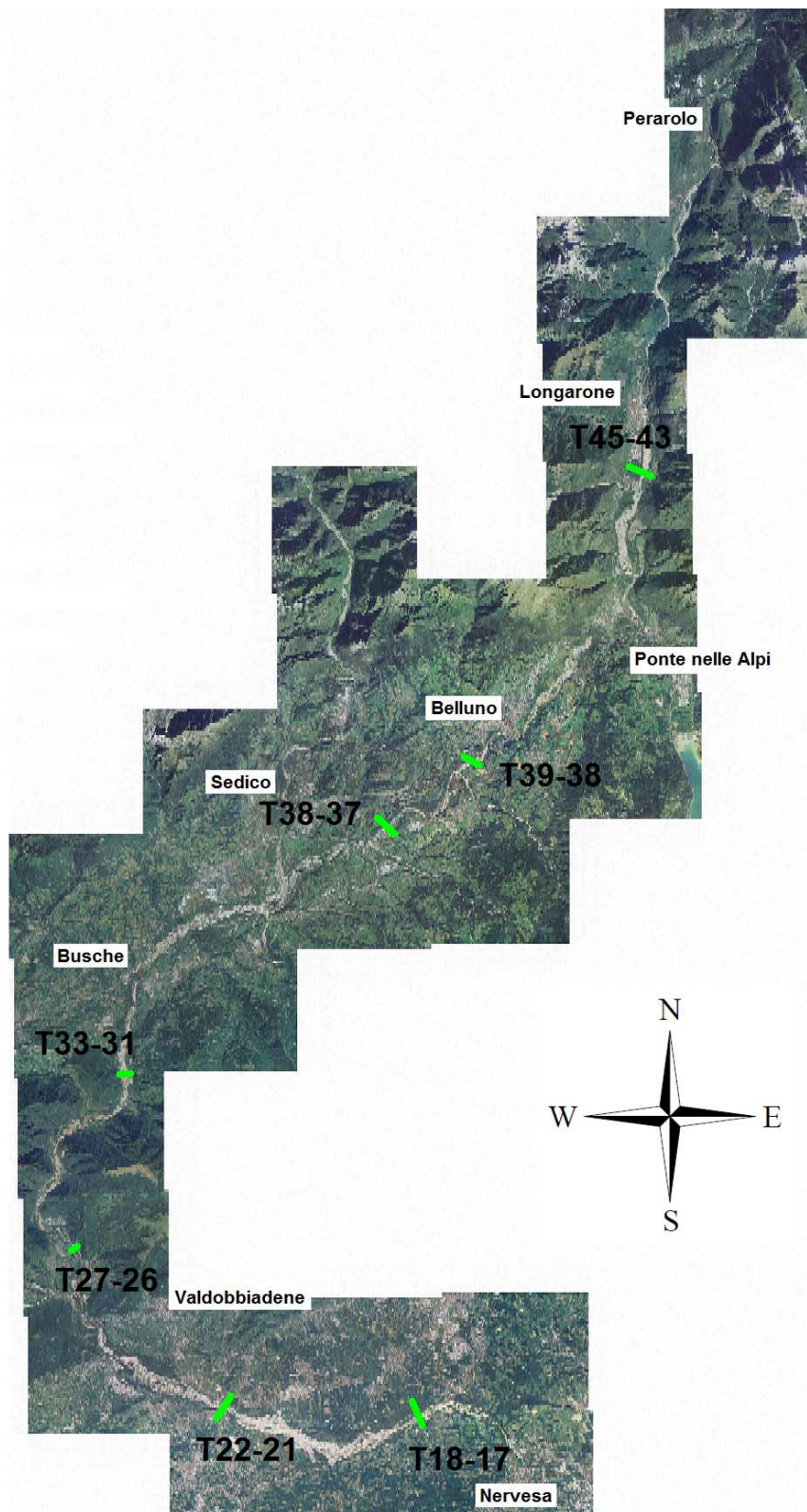


Figura A.29: Mappa della serie delle sezioni di verifica della fase di aggiornamento della mesh sulla base del rilievo topografico di Marzo-Aprile 2006.

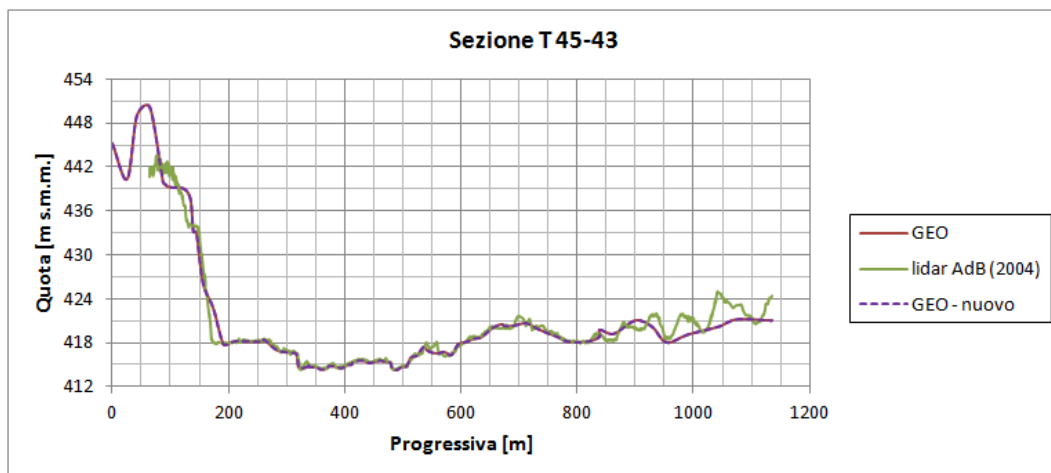


Figura A.30: Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 45 e 43.

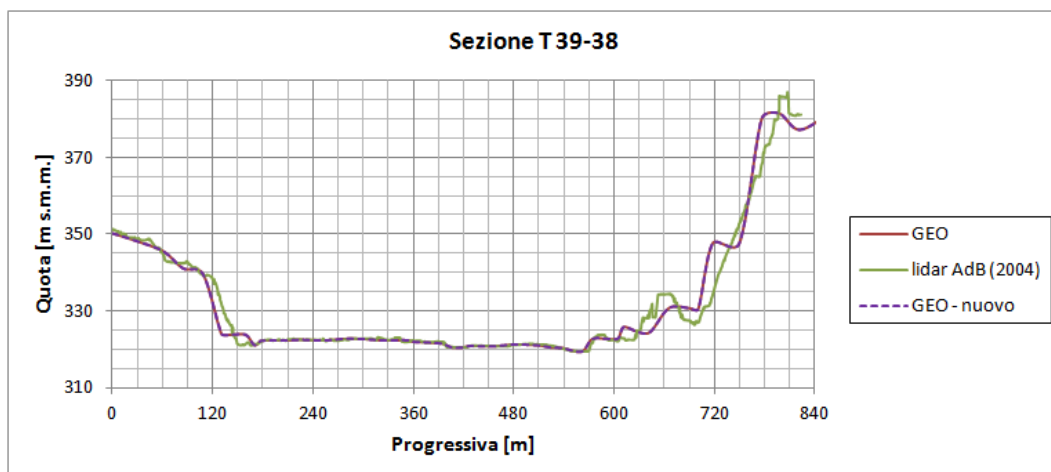


Figura A.31: Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 39 e 38.

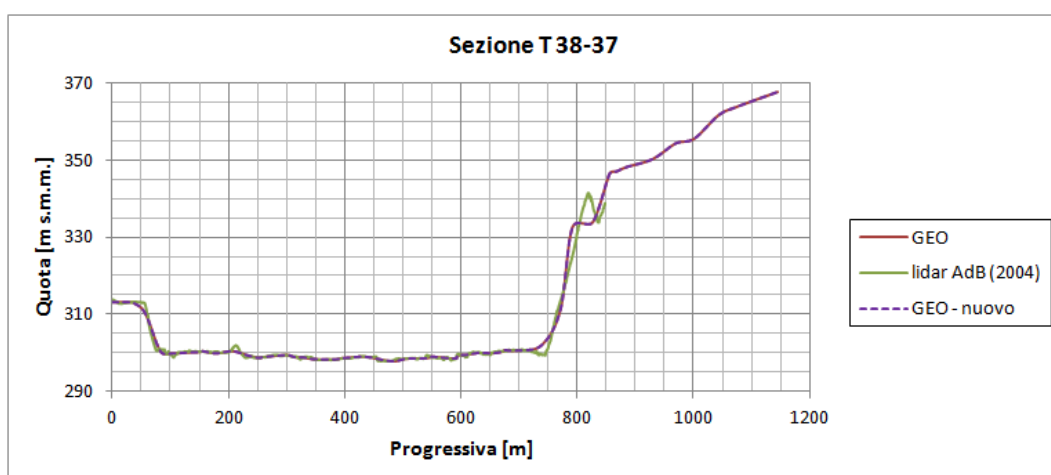


Figura A.32: Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 38 e 37.

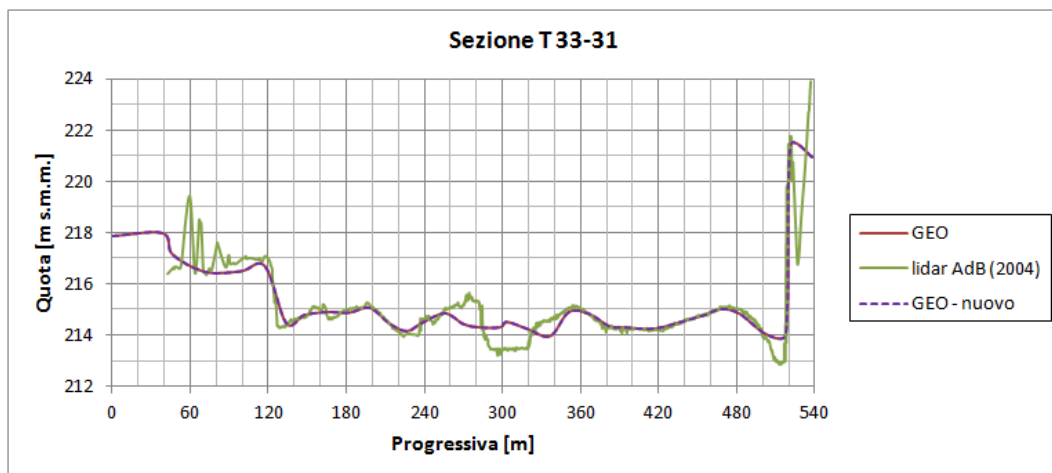


Figura A.33: Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 33 e 31.

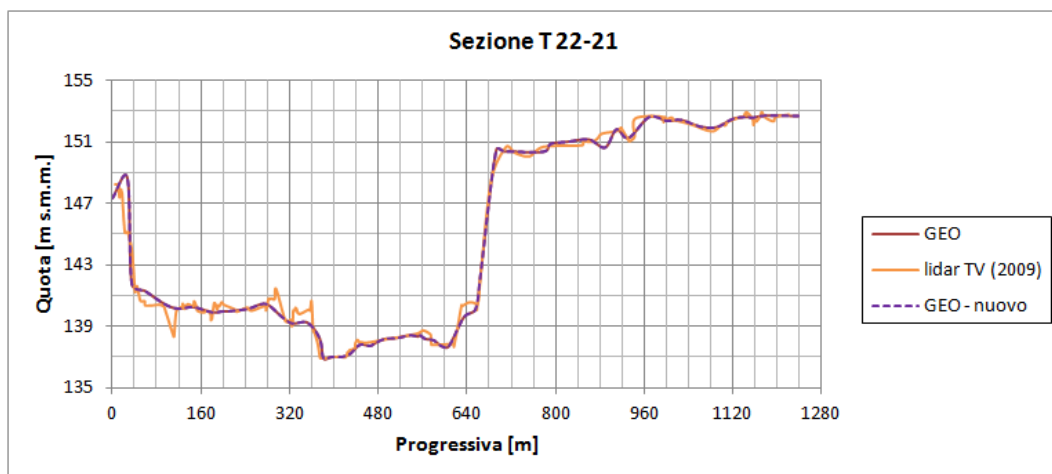


Figura A.34: Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 22 e 21.

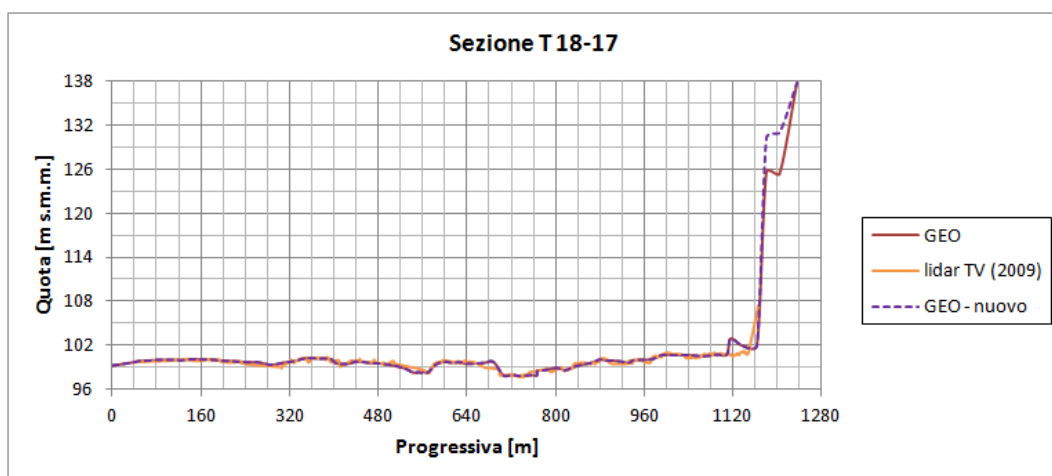


Figura A.35: Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 18 e 17.

Appendice B

Studio e verifica relativo alle sezioni topografiche e ai dati lidar nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore

Le sezioni di riferimento per l'analisi della topografia basata sui dati lidar sono identificate dalla lettera *P* indicanti l'appartenenza all'area di Perarolo e da un numero crescente da 1 a 7 procedendo da quella più a valle verso quella più a monte (si vedano le figure B.1 e B.9).

Le sezioni campionate per verificare la bontà delle modifiche apportate alla mesh sono contraddistinte anch'esse dalla lettera *P* nel titolo del grafico che mostra l'appartenenza alla zona di Perarolo di Cadore e da due numeri che indicano quali sono le sezioni di riferimento tra cui è compresa la sezione in esame.

Le sezioni topografiche in corrispondenza del nodo idraulico di Perarolo sono numerate in ordine crescente, procedendo da valle verso monte, da 23 a 33 come riportato in figura B.14. Su di esse si sono svolte operazioni di verifica e confronto rispetto agli altri dati topografici disponibili.

Si riportano soltanto le sezioni direttamente interessate dall'intervento di incremento della quota della sommità arginale, come indicato nel capitolo 6.

Dallo studio *Studio sulle condizioni di sicurezza idraulica dell'abitato di Perarolo mediante implementazione di un modello matematico bidimensionale della confluenza tra il fiume Piave e il torrente Boite* vengono riportate le sezioni direttamente interessate dall'intervento di sovrizzo arginale, come indicato nel capitolo 6, per descrivere l'andamento delle quote del terreno PRE e POST lavori.

Si ricorda che, in queste figure estratte dallo studio sopra citato, si indica, per un tempo di ritorno pari a 200 anni, con SDF il livello che caratterizza le condizioni attuali (Stato Di Fatto) e con SDP il livello che descrive il deflusso secondo le condizioni progetto (Stato Di Progetto).

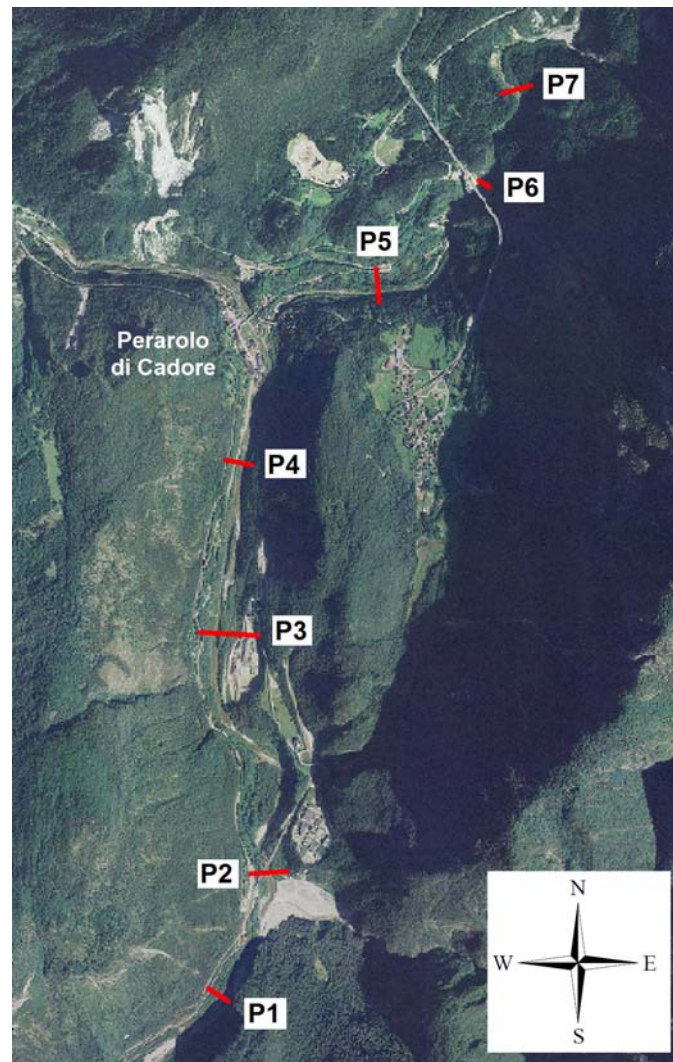


Figura B.1: Mappa delle sezioni di riferimento nella fase di aggiornamento della mesh nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

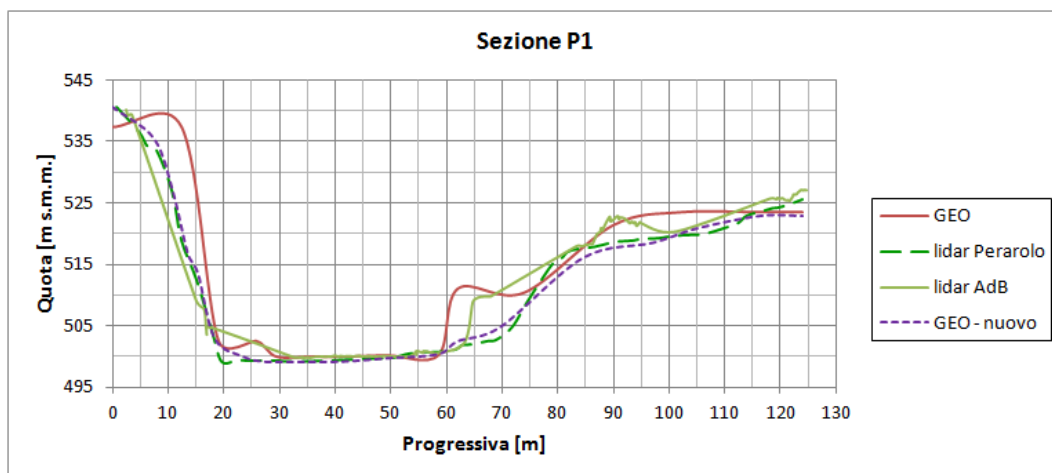


Figura B.2: Traccia della sezione numero 1 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

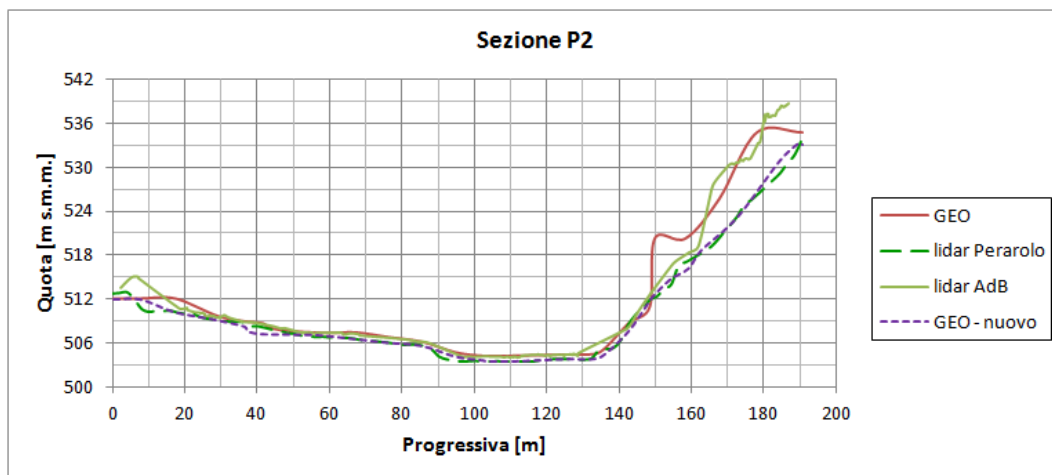


Figura B.3: Traccia della sezione numero 2 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

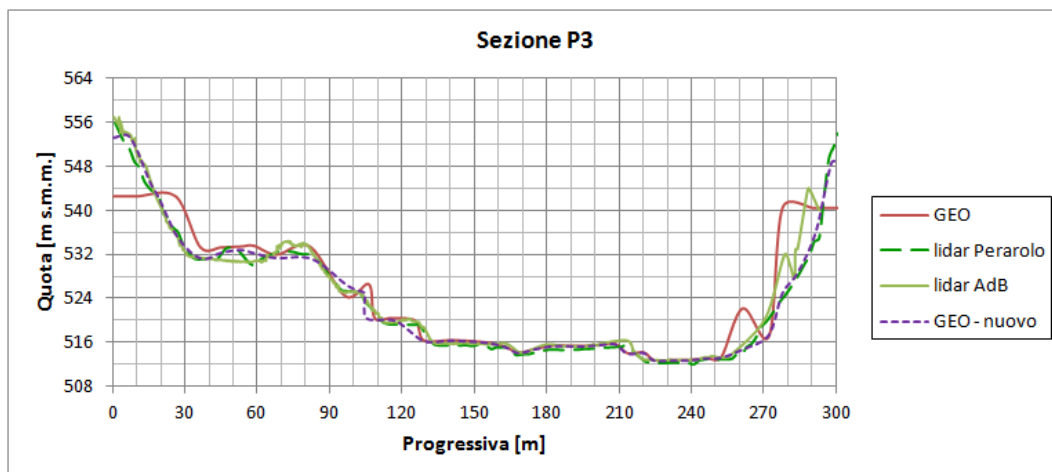


Figura B.4: Traccia della sezione numero 3 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

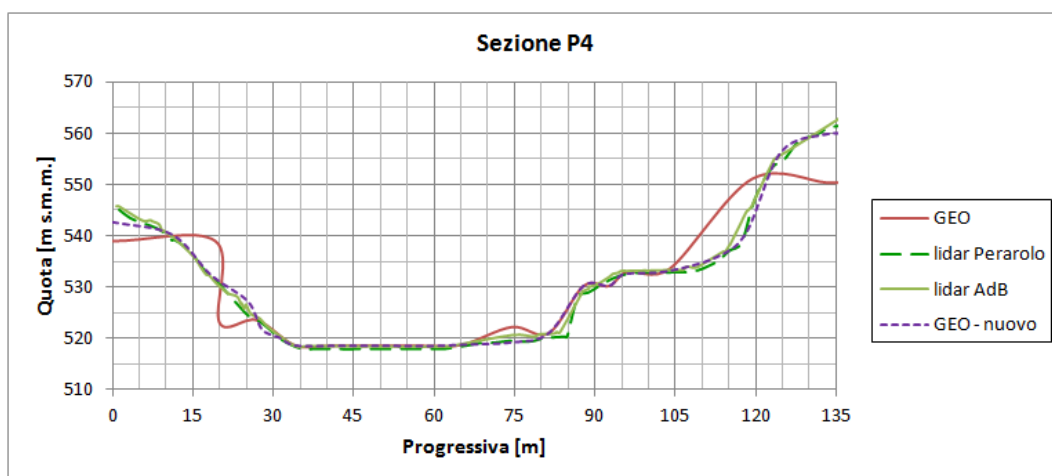


Figura B.5: Traccia della sezione numero 4 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

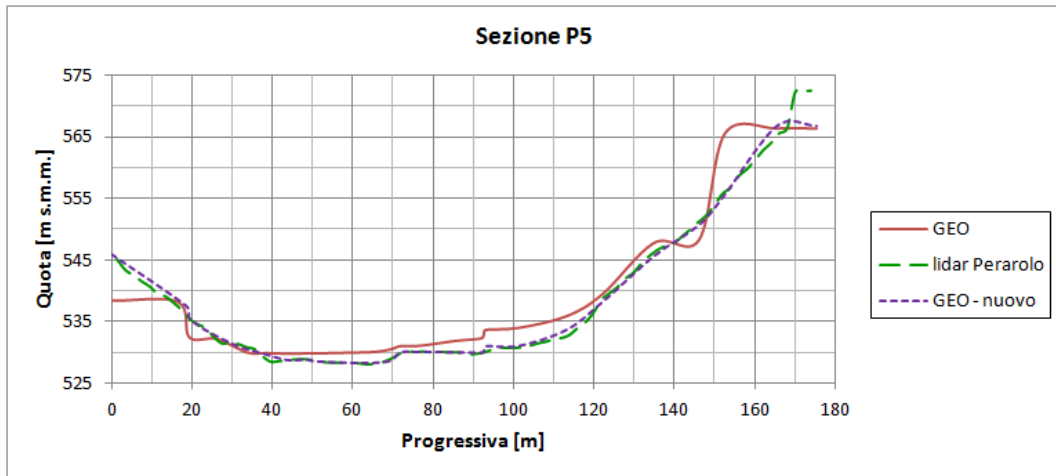


Figura B.6: Traccia della sezione numero 5 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

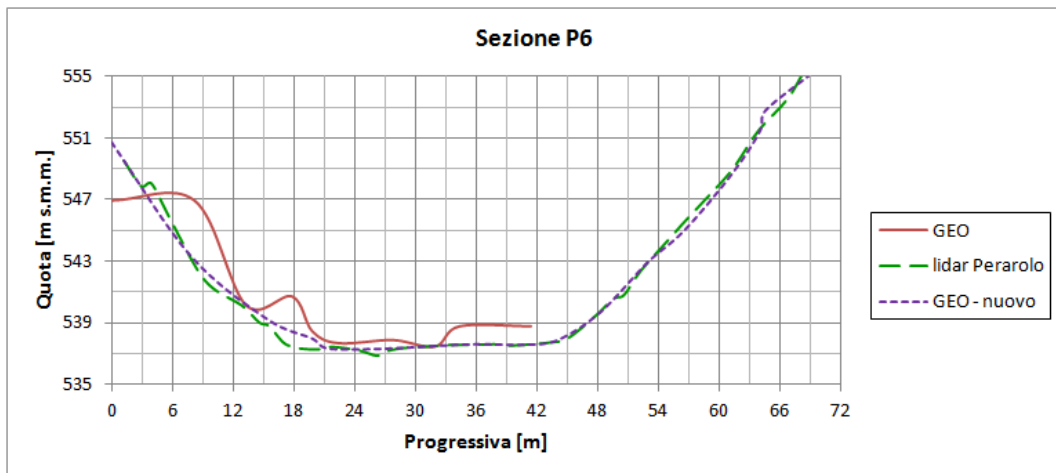


Figura B.7: Traccia della sezione numero 6 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

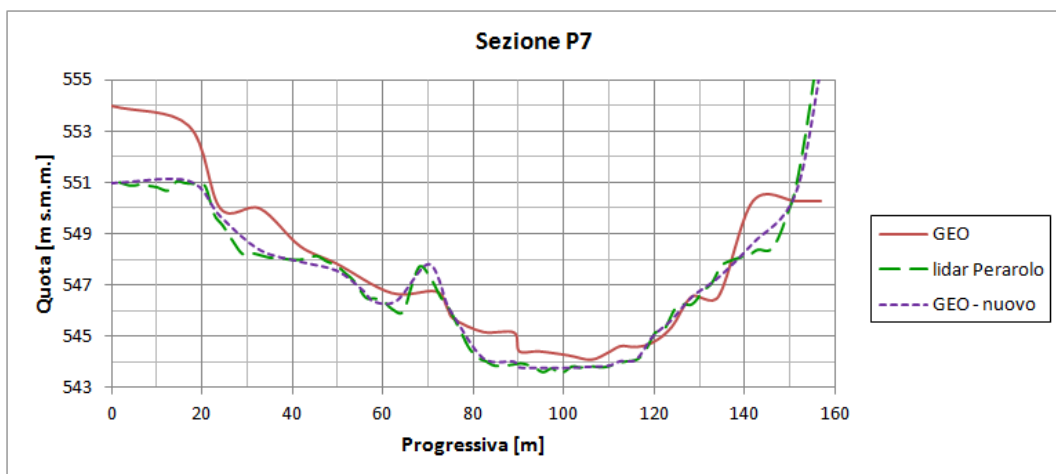


Figura B.8: Traccia della sezione numero 7 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

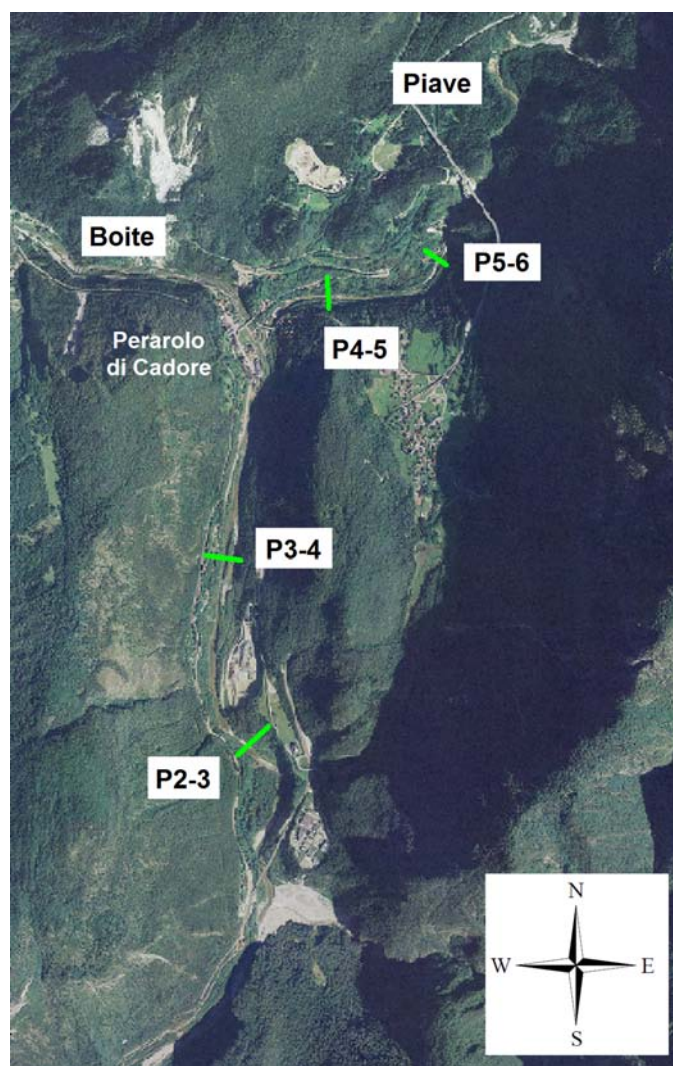


Figura B.9: Mappa delle sezioni di verifica nella fase di aggiornamento della mesh nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

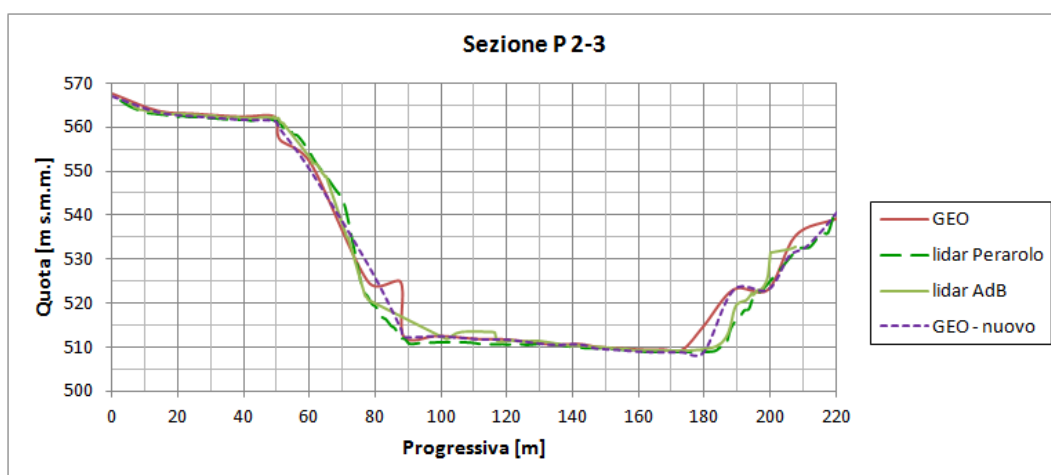


Figura B.10: Traccia della sezione di verifica compresa tra la numero 2 e la numero 3 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

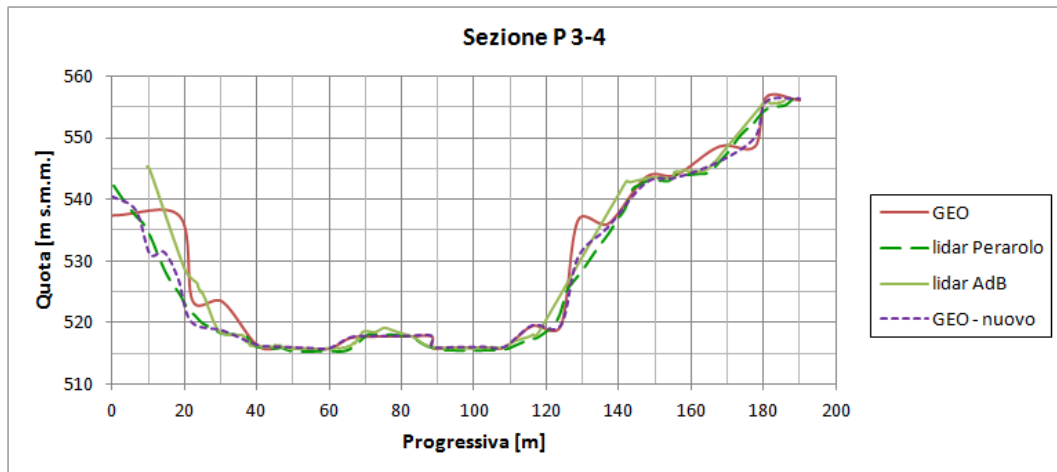


Figura B.11: Traccia della sezione di verifica compresa tra la numero 3 e la numero 4 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

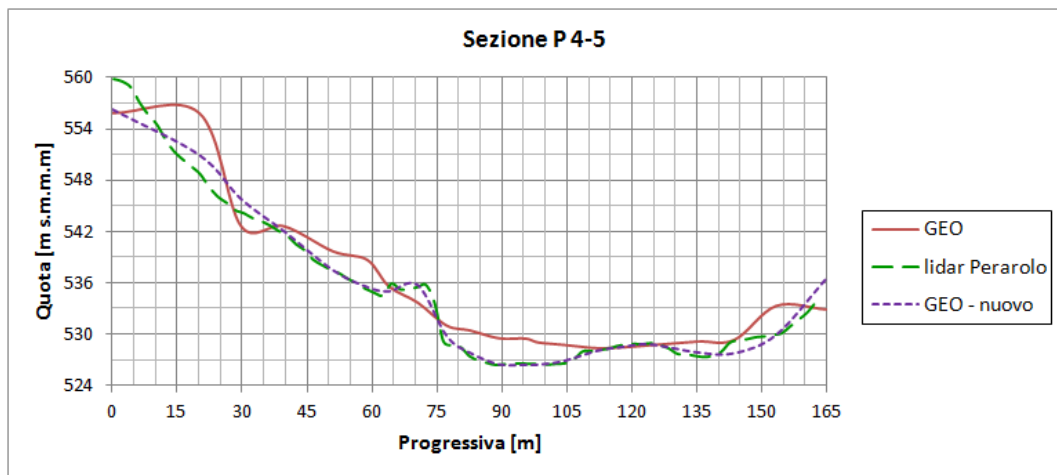


Figura B.12: Traccia della sezione di verifica compresa tra la numero 4 e la numero 5 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.

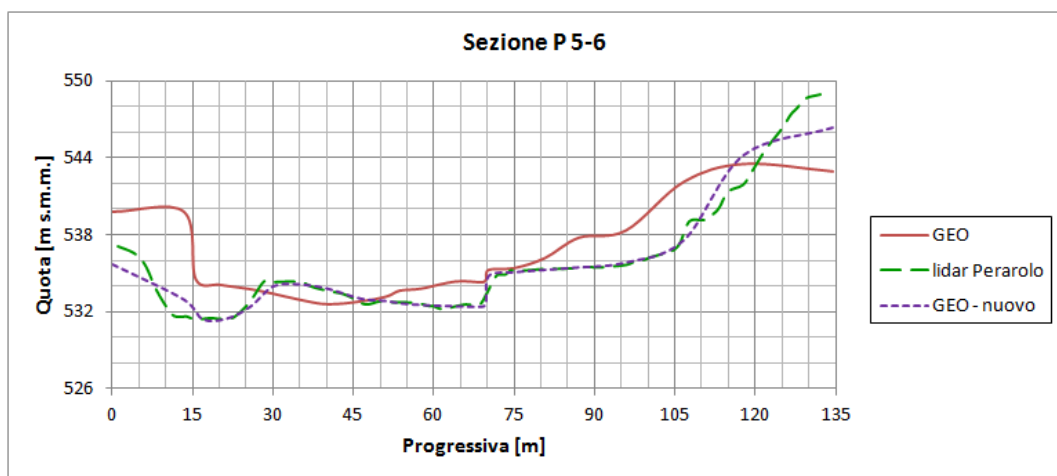


Figura B.13: Traccia della sezione di verifica compresa tra la numero 5 e la numero 6 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.



Figura B.14: Mappa delle sezioni topografiche di riferimento nella fase di aggiornamento della mesh nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

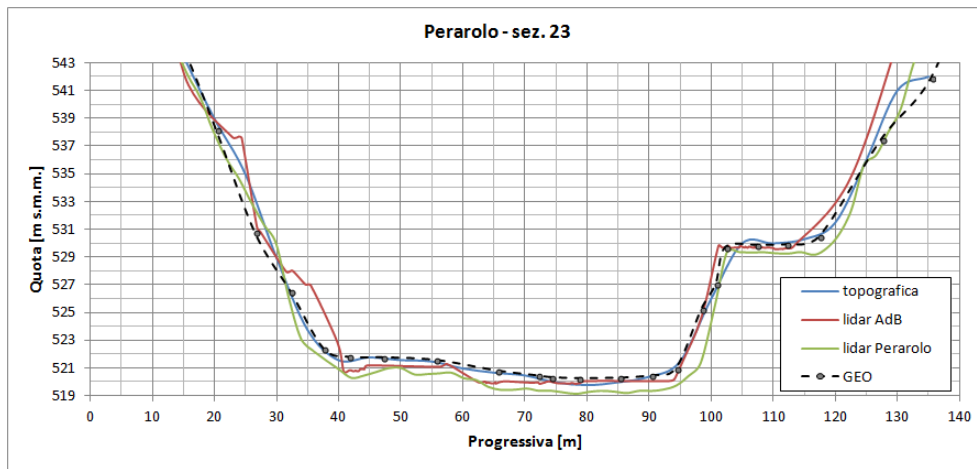


Figura B.15: Sezione topografica numero 23 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

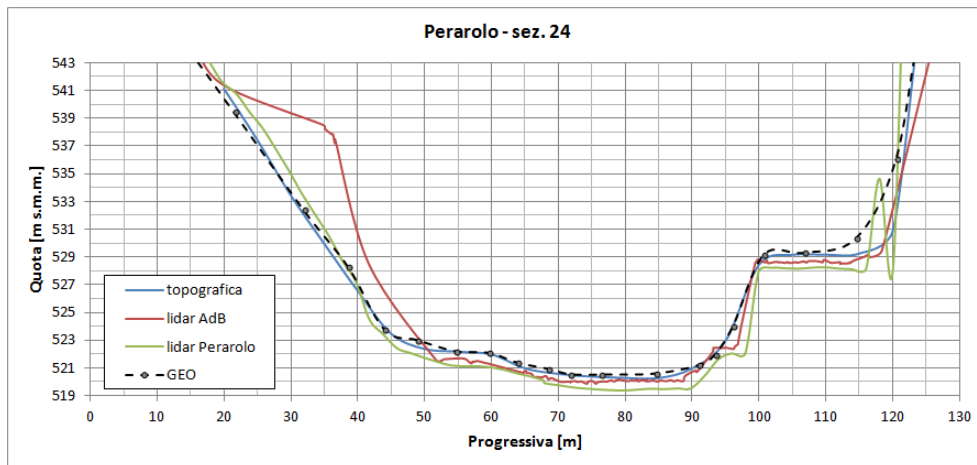


Figura B.16: Sezione topografica numero 24 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

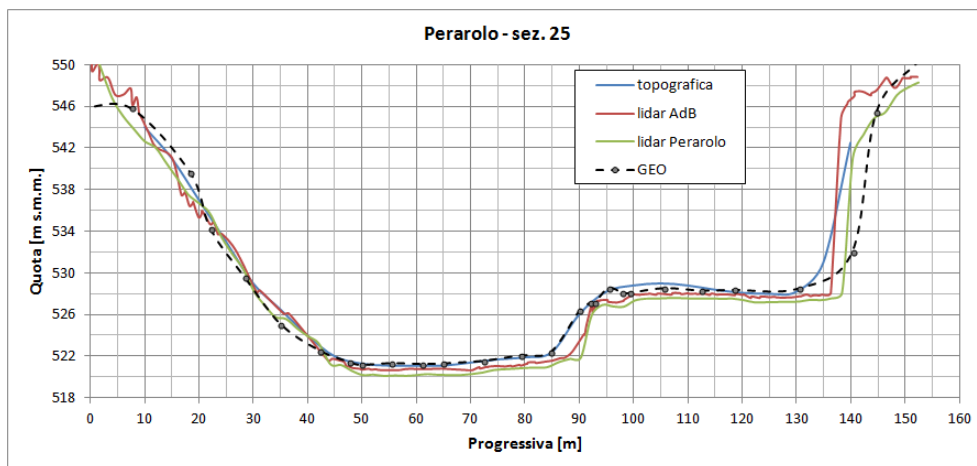


Figura B.17: Sezione topografica numero 25 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

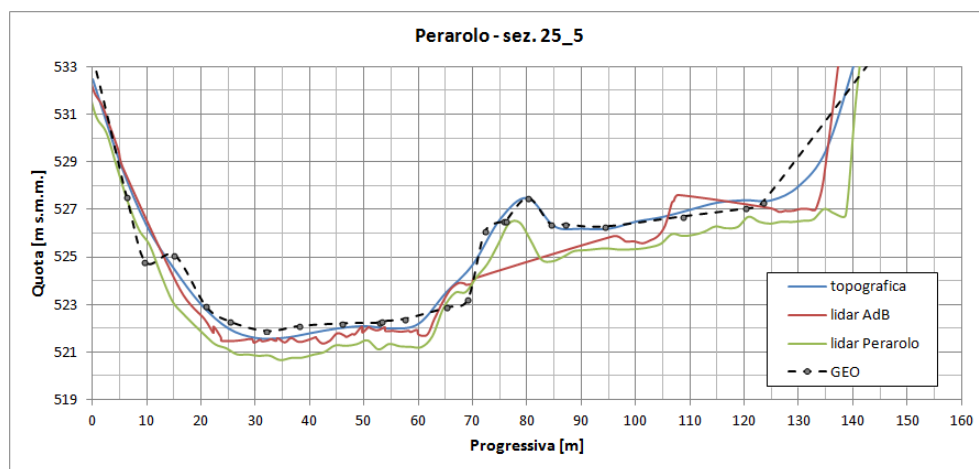


Figura B.18: Sezione topografica numero 25₅ nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

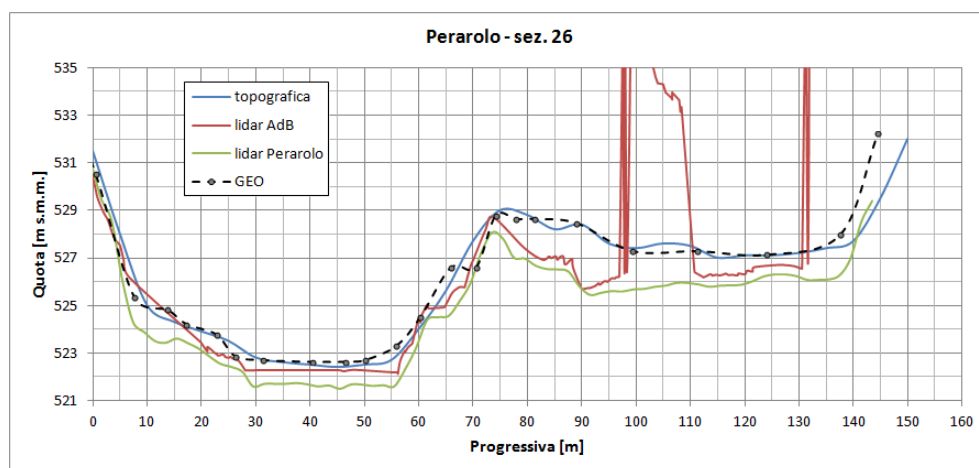


Figura B.19: Sezione topografica numero 26 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

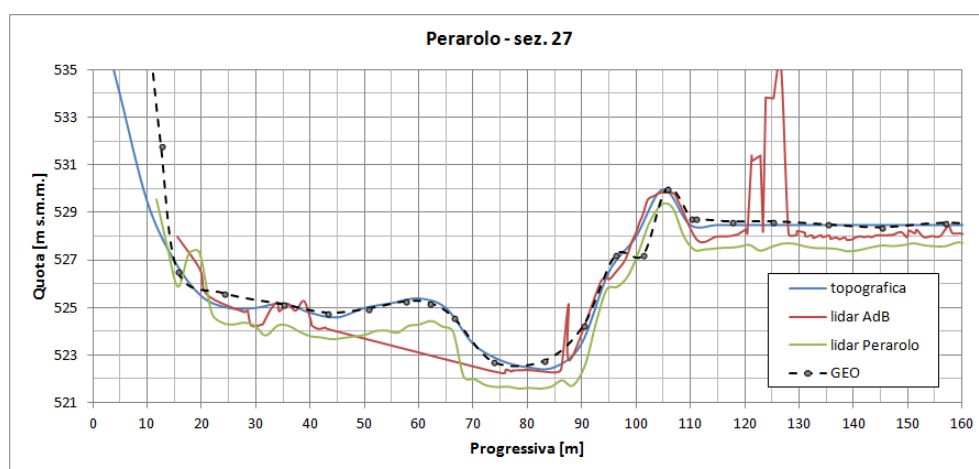


Figura B.20: Sezione topografica numero 27 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

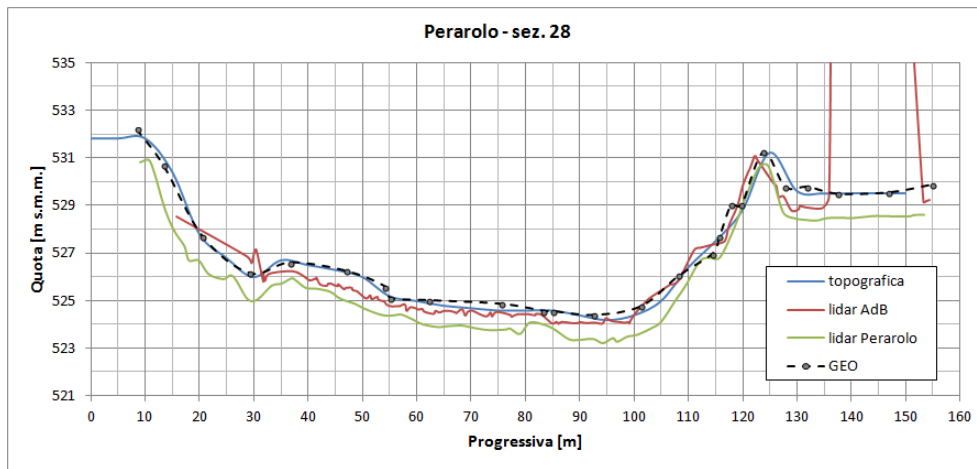


Figura B.21: Sezione topografica numero 28 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

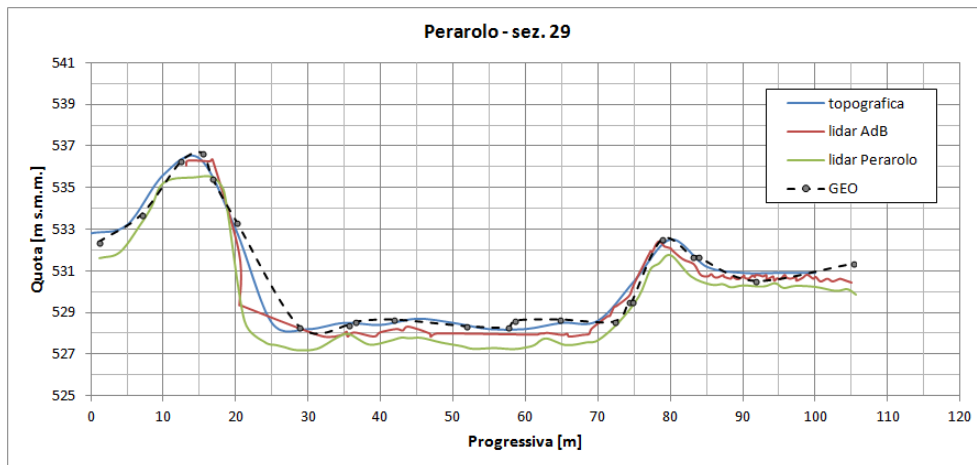


Figura B.22: Sezione topografica numero 29 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

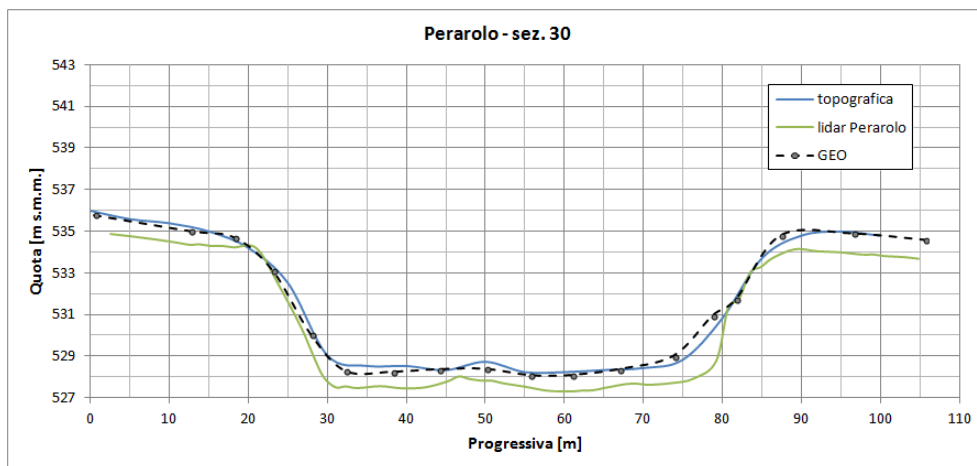


Figura B.23: Sezione topografica numero 30 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.

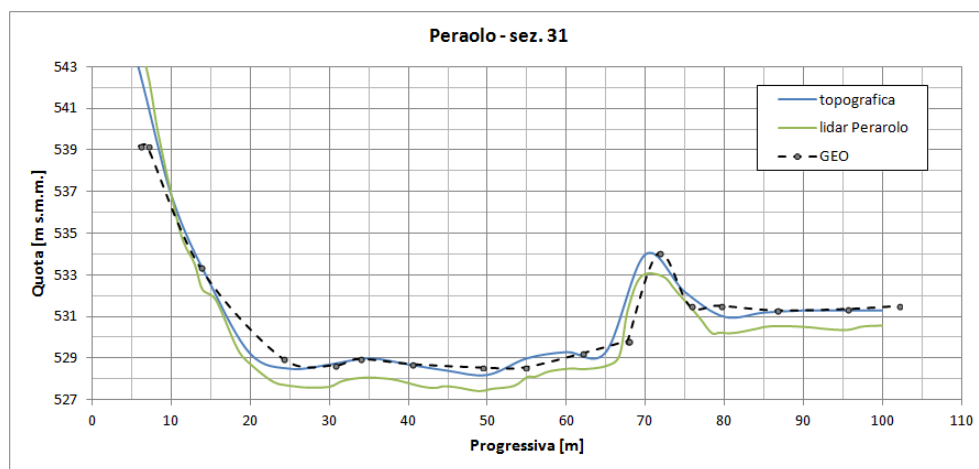


Figura B.24: Sezione topografica numero 31 nel nodo idraulico di Peraolo di Cadore.

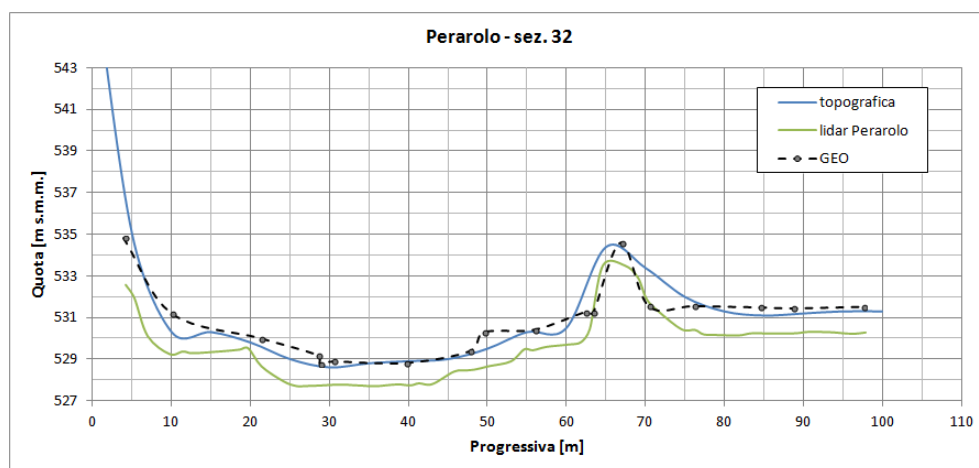


Figura B.25: Sezione topografica numero 32 nel nodo idraulico di Peraolo di Cadore.

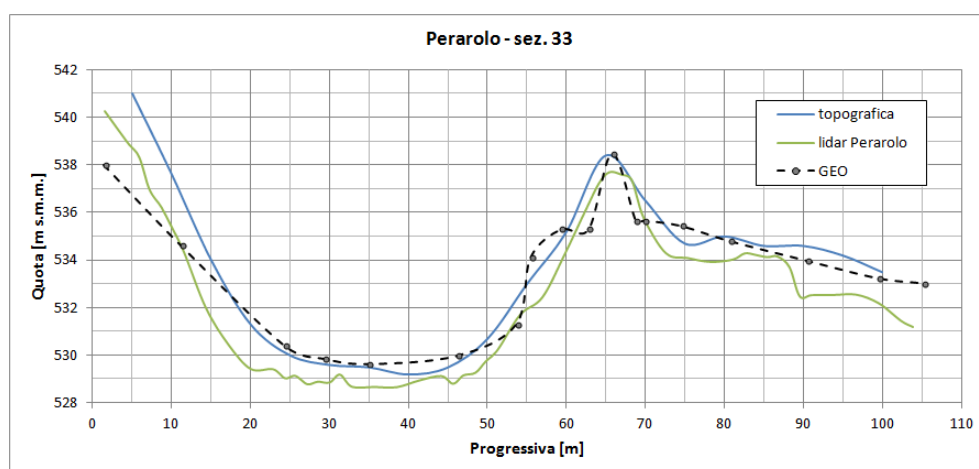


Figura B.26: Sezione topografica numero 33 nel nodo idraulico di Peraolo di Cadore.

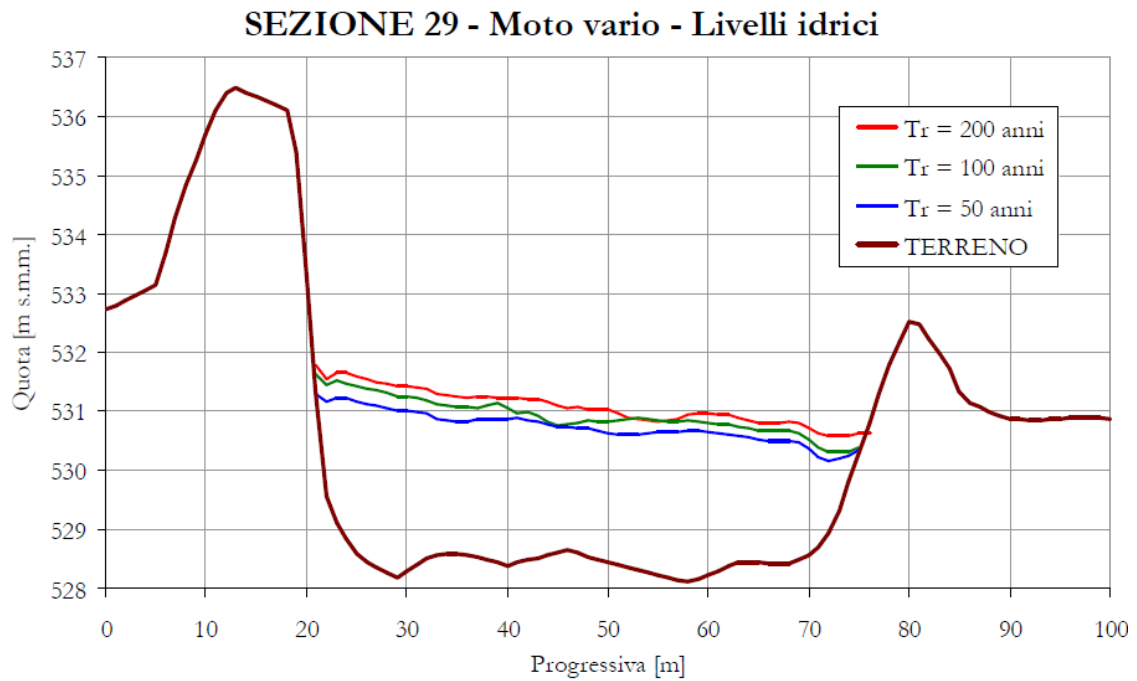


Figura B.27: Sezione topografica 29 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

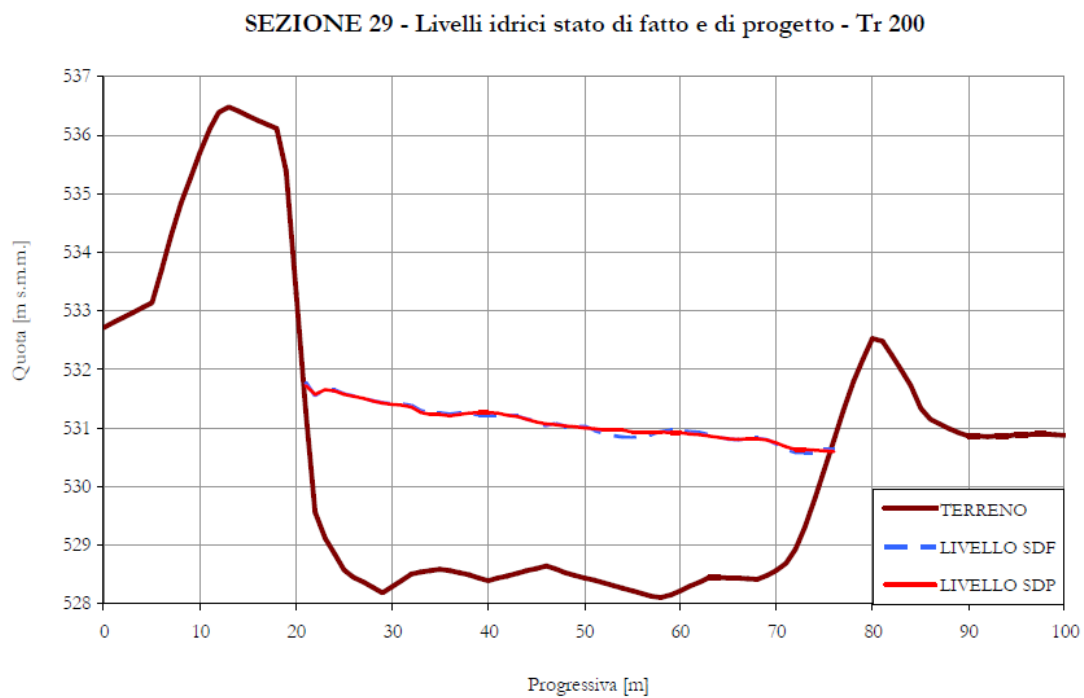


Figura B.28: Sezione topografica 29 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

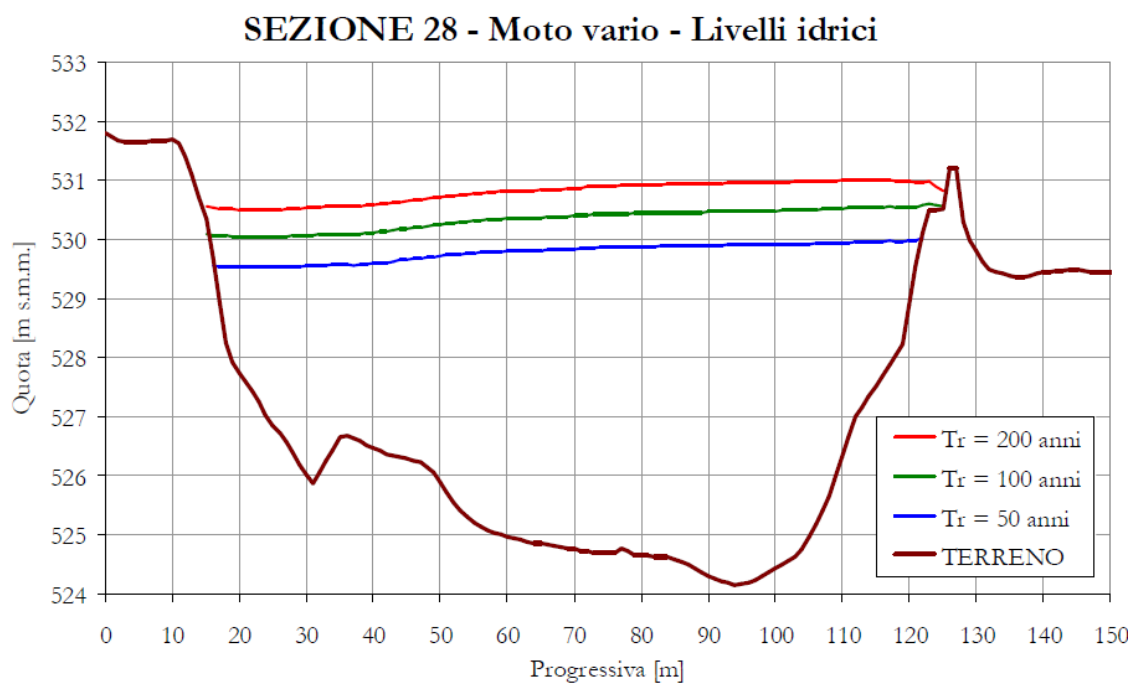


Figura B.29: Sezione topografica 28 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

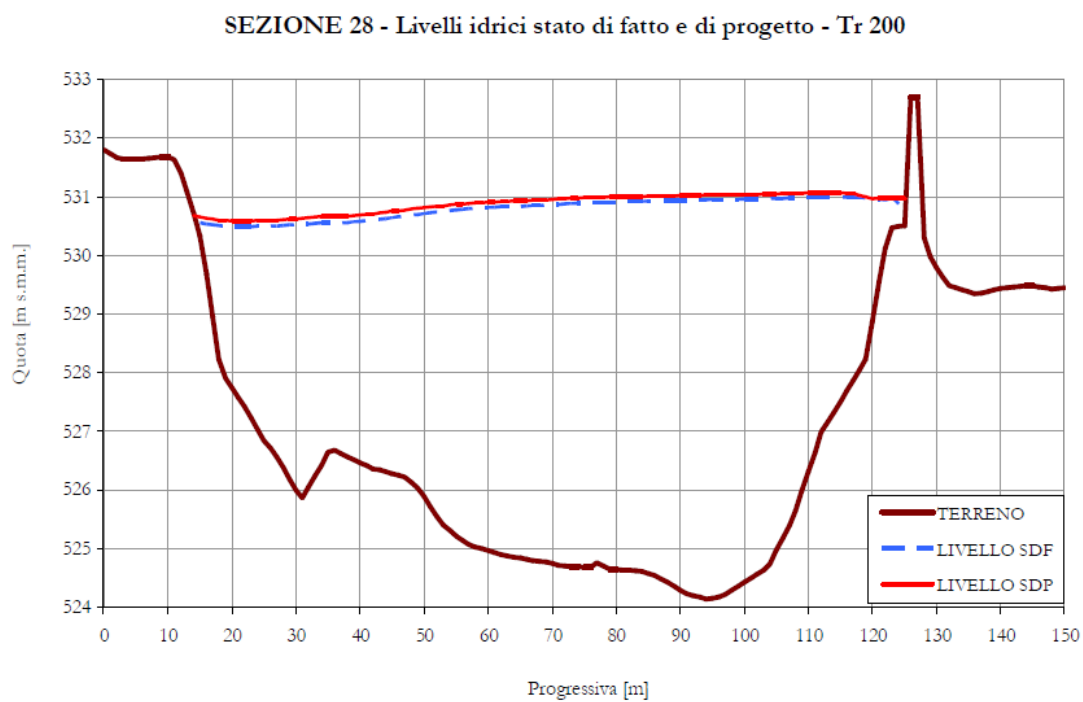


Figura B.30: Sezione topografica 28 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

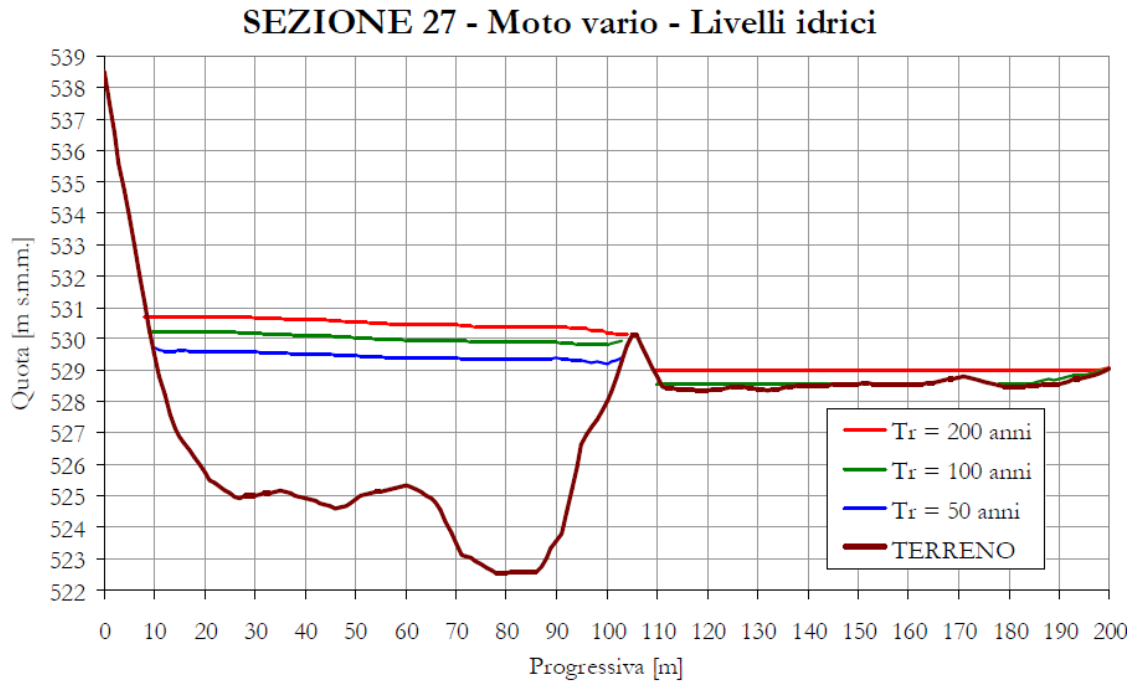


Figura B.31: Sezione topografica 27 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

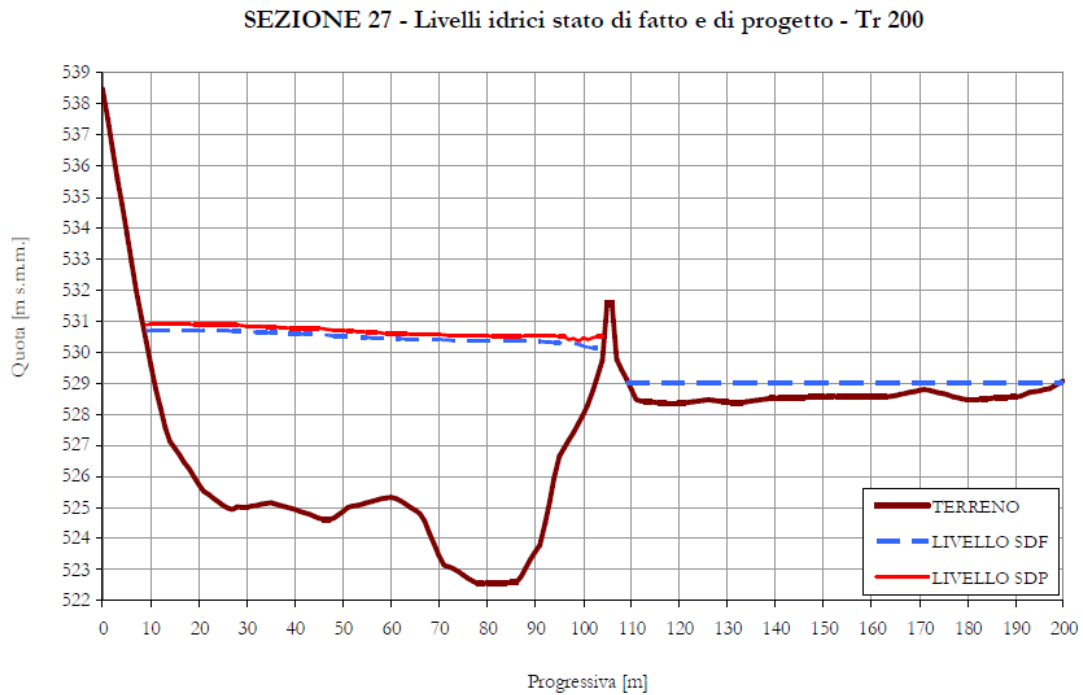


Figura B.32: Sezione topografica 27 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

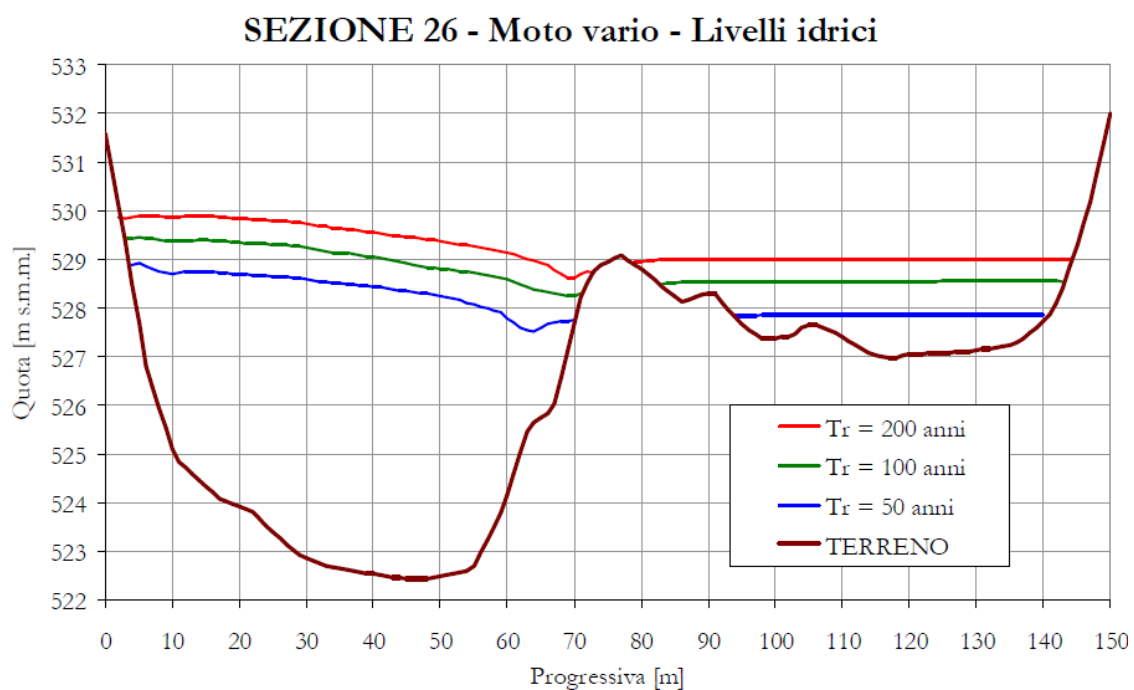


Figura B.33: Sezione topografica 26 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

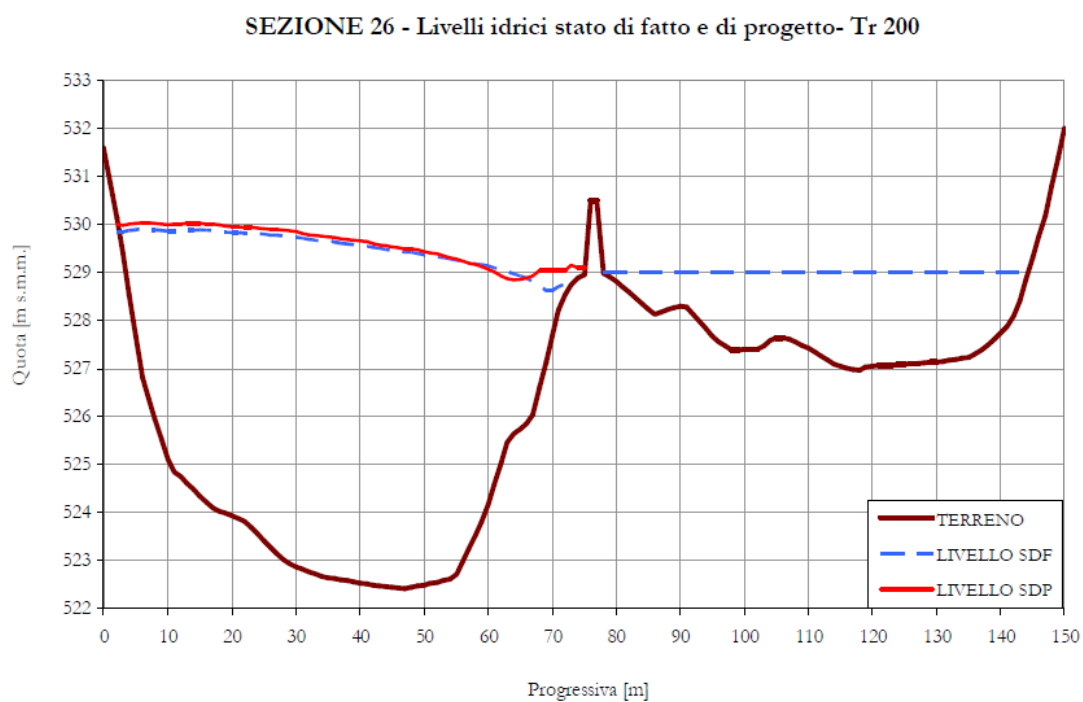


Figura B.34: Sezione topografica 26 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

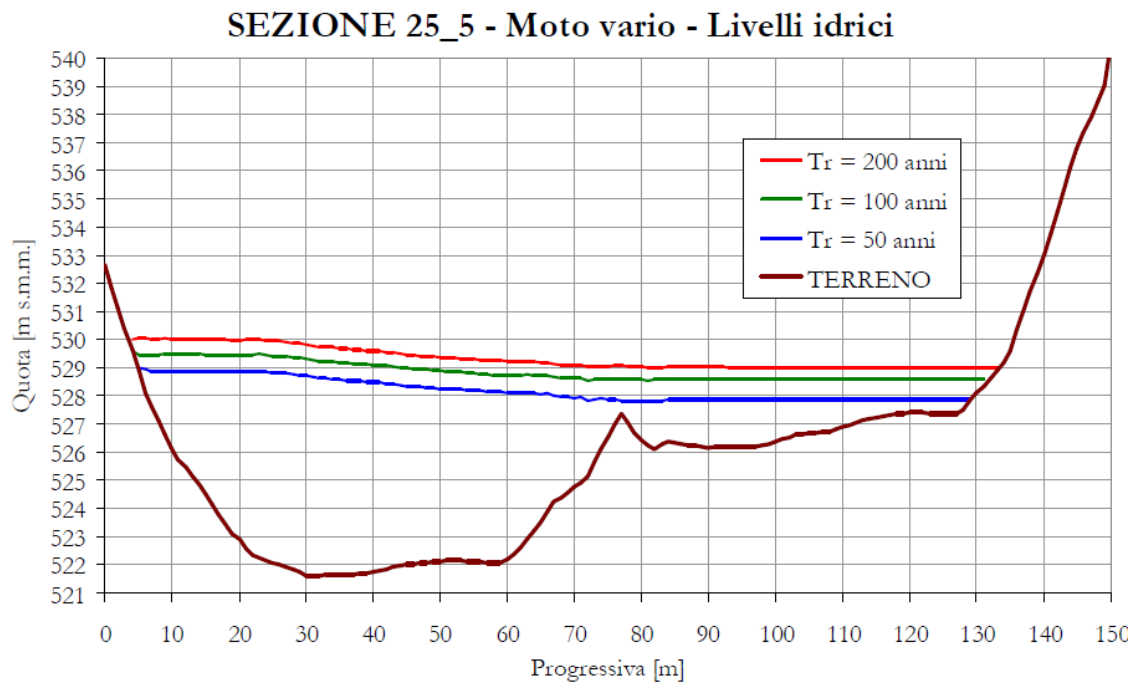


Figura B.35: Sezione topografica 25_5 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

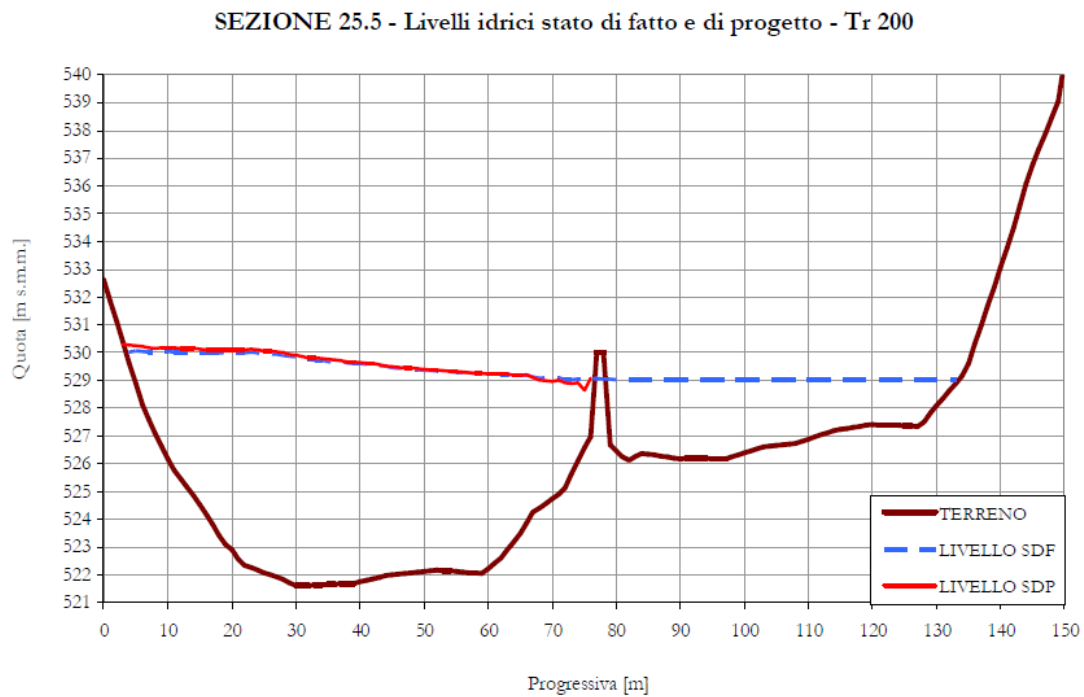


Figura B.36: Sezione topografica 25_5 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

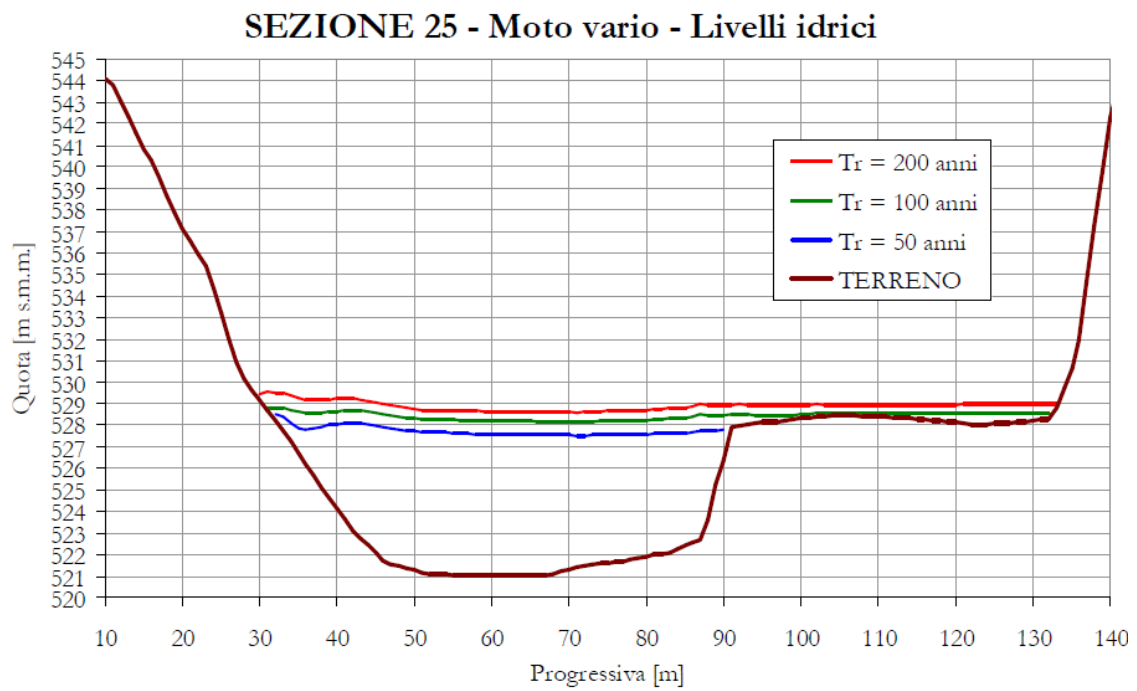


Figura B.37: Sezione topografica 25 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

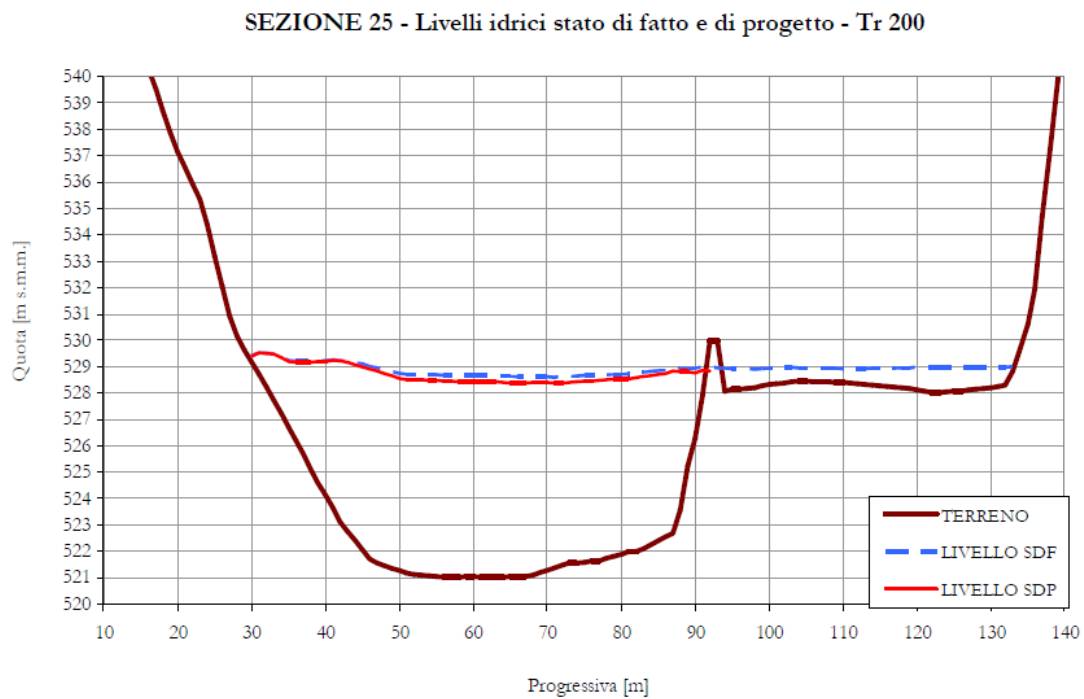


Figura B.38: Sezione topografica 25 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.

Appendice C

Profili longitudinali

In questa appendice sono riportati i profili longitudinali tracciati nella fase di aggiornamento della mesh per valutare, secondo quanto riportato in figura C.1, la presenza di eventuali fenomeni di sovralluvionamento lungo il corso principale del Piave.

Ciascun profilo longitudinale si estende per circa 23 km interessando il tratto del fiume Piave compreso tra le sezioni topografiche 35 e 27 (vedere figura 4.7).

Per una migliore lettura dei risultati, ogni profilo viene suddiviso in tre tratte, ciascuna della lunghezza massima di 8 km.

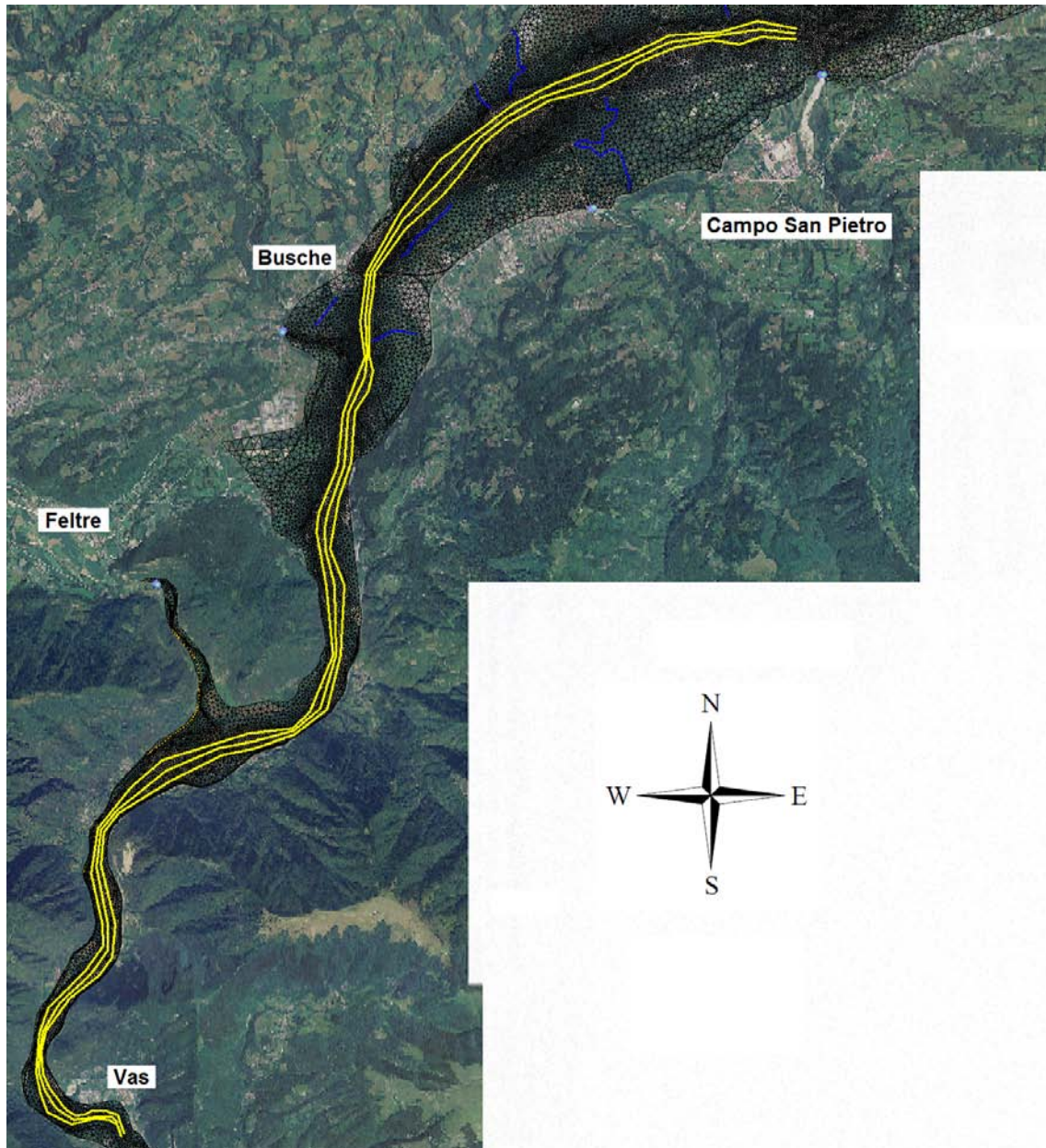


Figura C.1: Traccia dei profili longitudinali esaminati nell'alveo del fiume Piave.

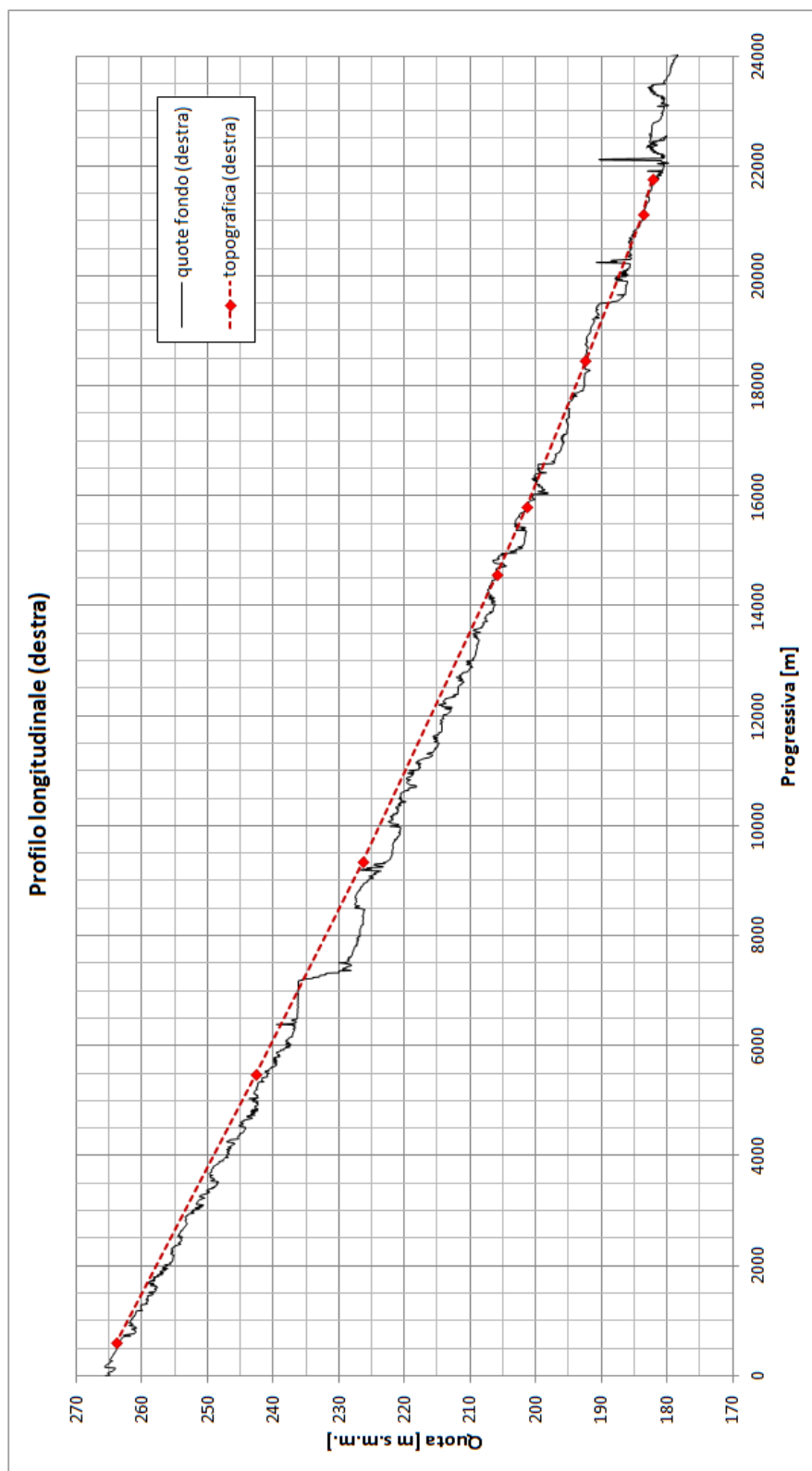


Figura C.2: Profilo longitudinale in destra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27.

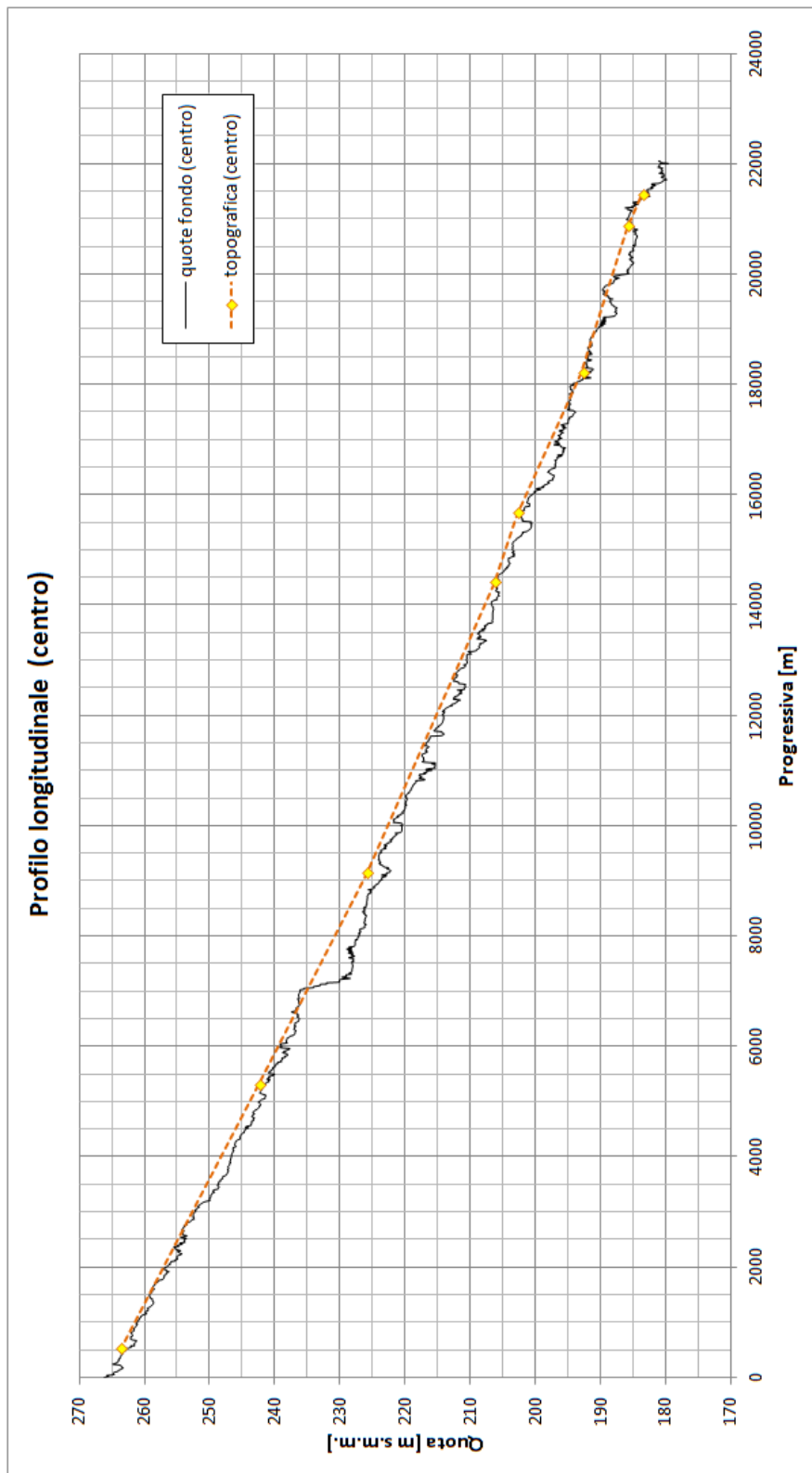


Figura C.3: Profilo longitudinale in centro alveo del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27.

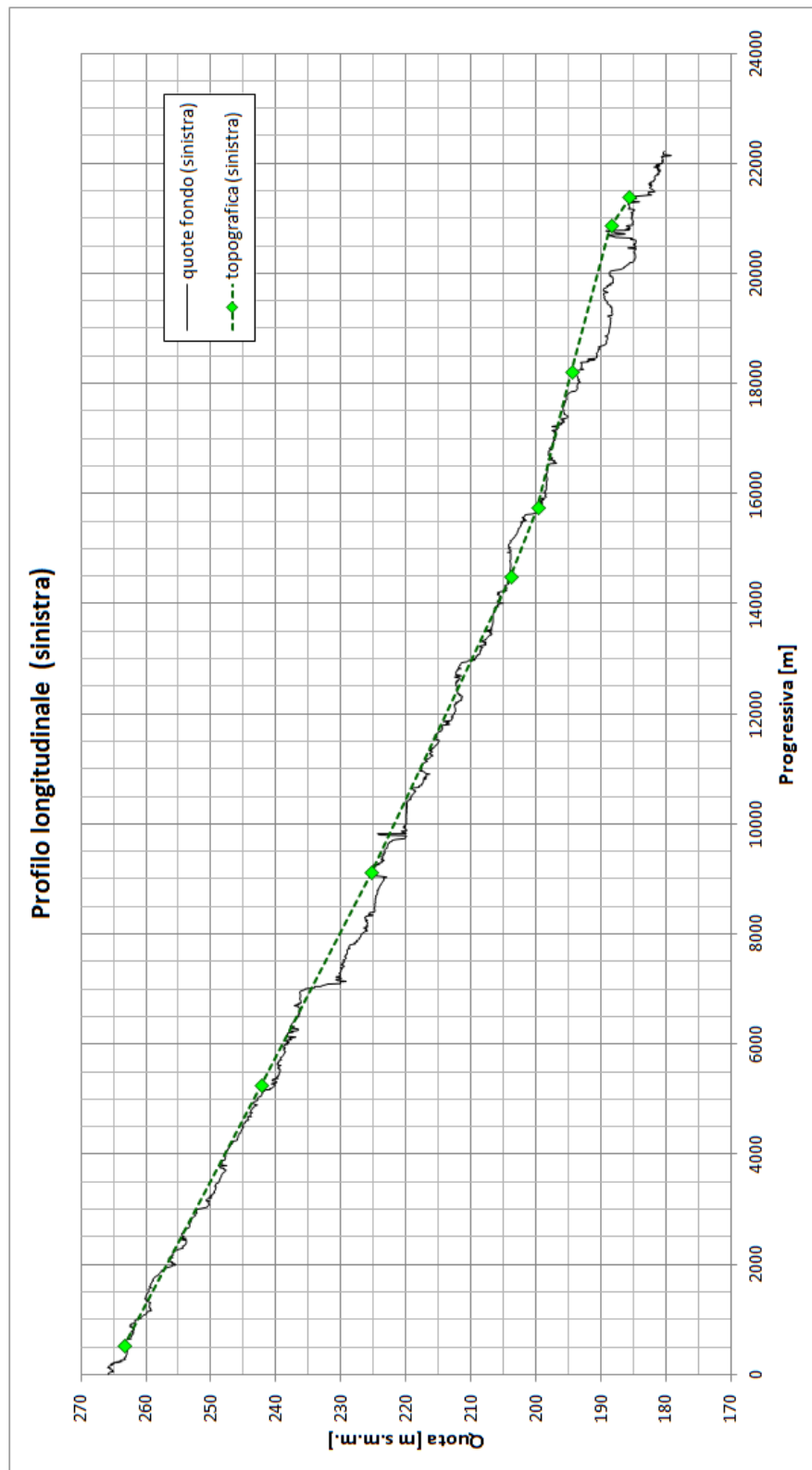


Figura C.4: Profilo longitudinale in sinistra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27.

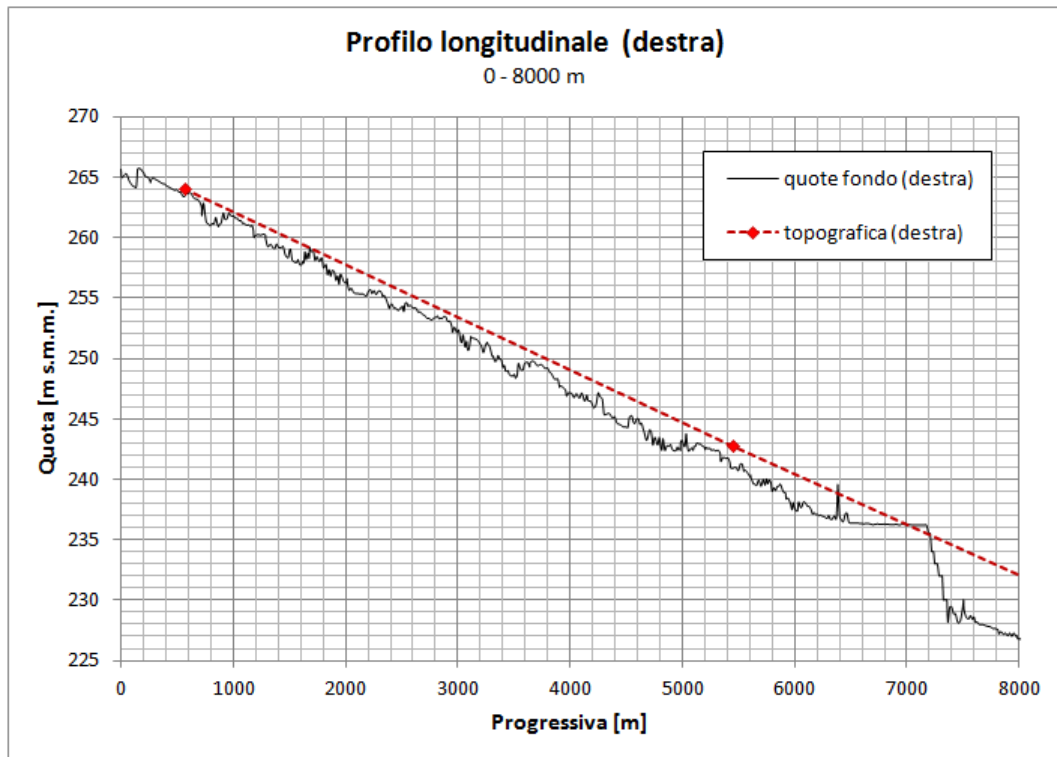


Figura C.5: Profilo longitudinale in destra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 1.

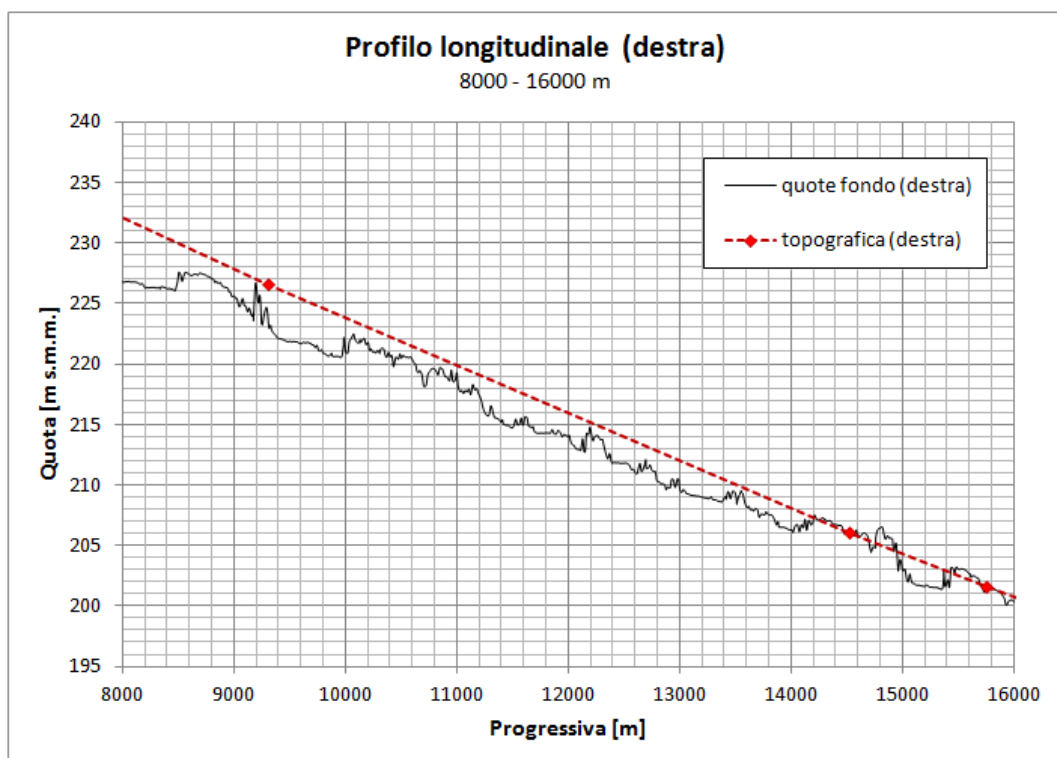


Figura C.6: Profilo longitudinale in destra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 2.

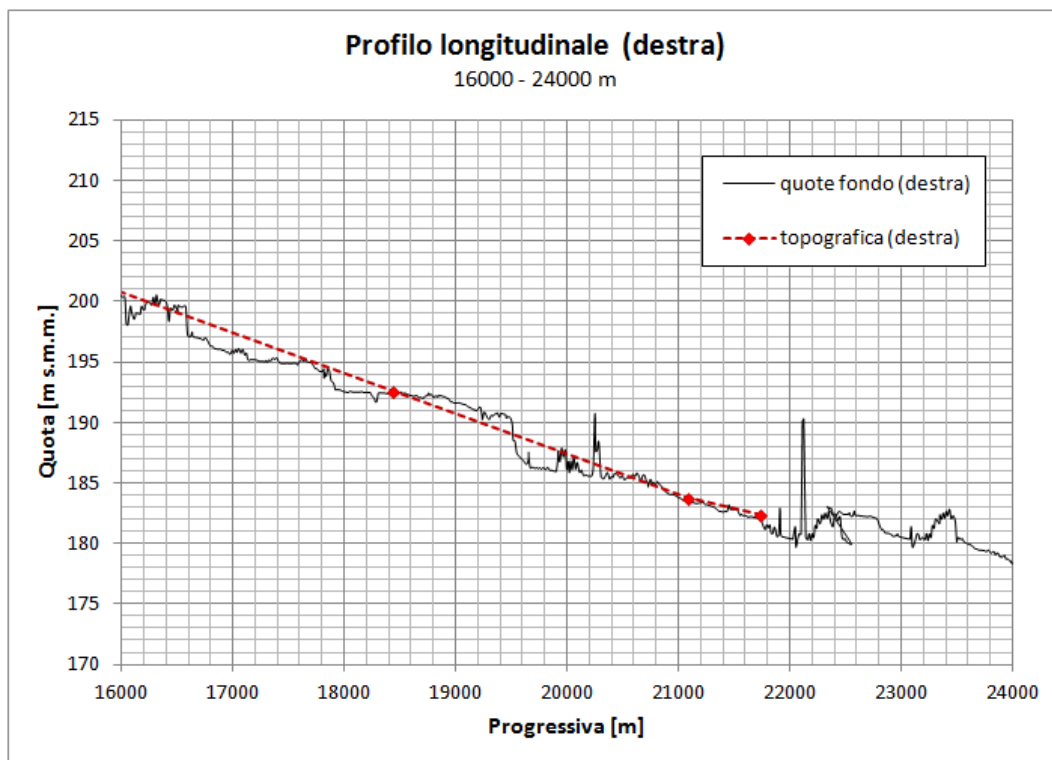


Figura C.7: Profilo longitudinale in destra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 3.

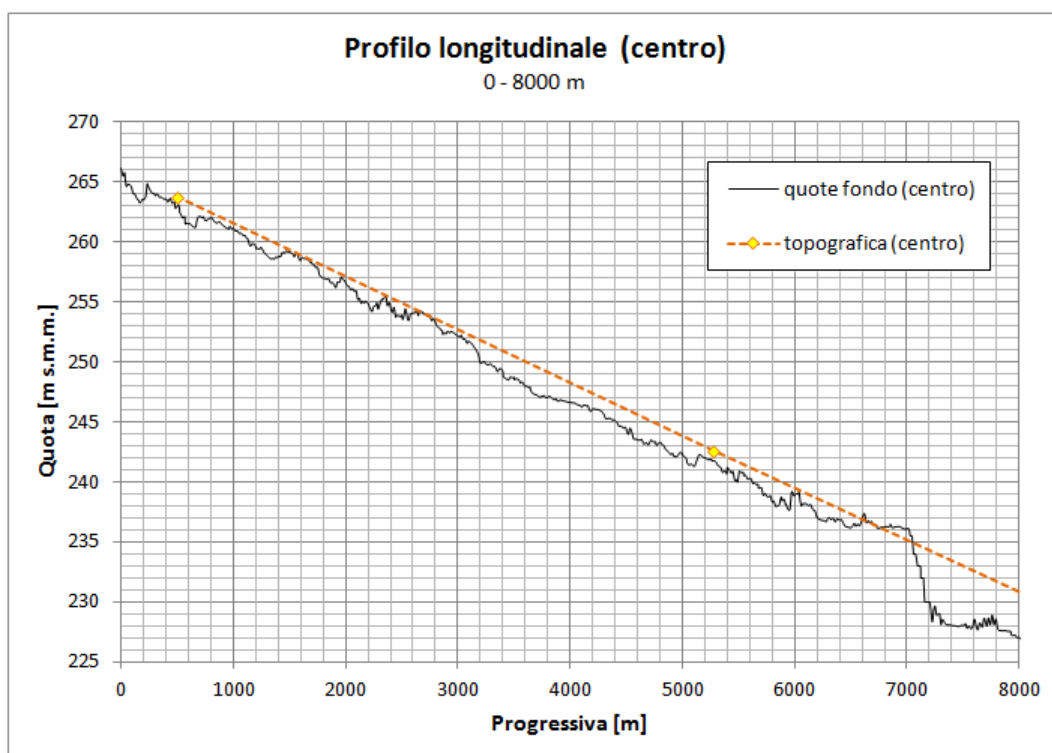


Figura C.8: Profilo longitudinale in centro alveo del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 1.

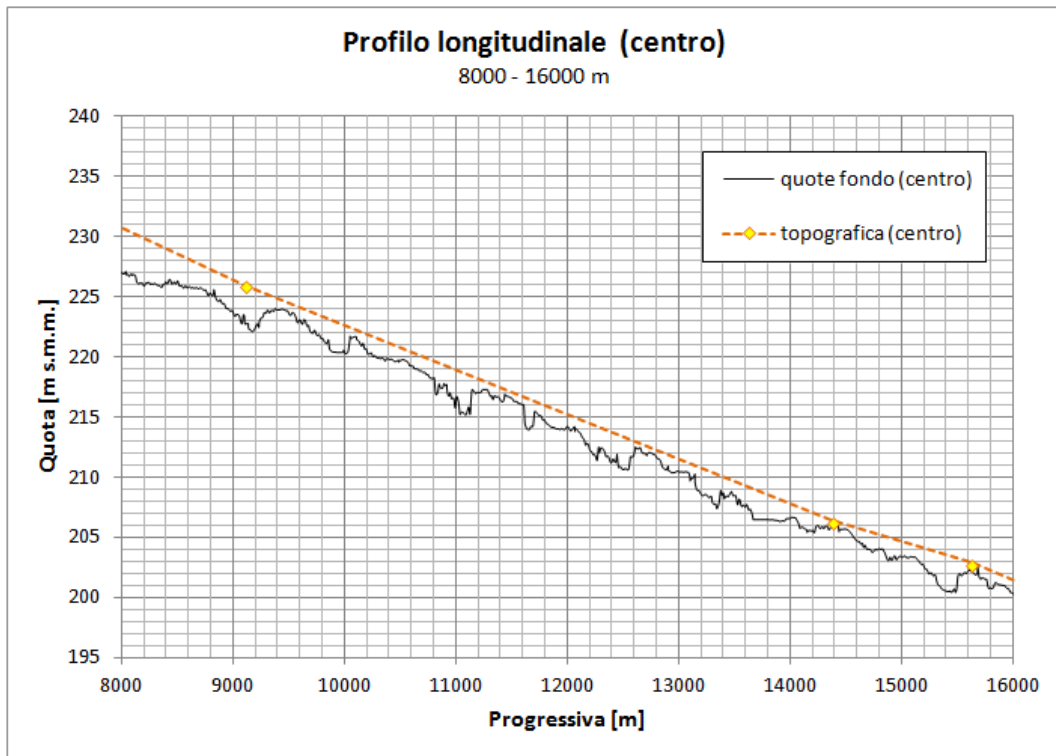


Figura C.9: Profilo longitudinale in centro alveo del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 2.

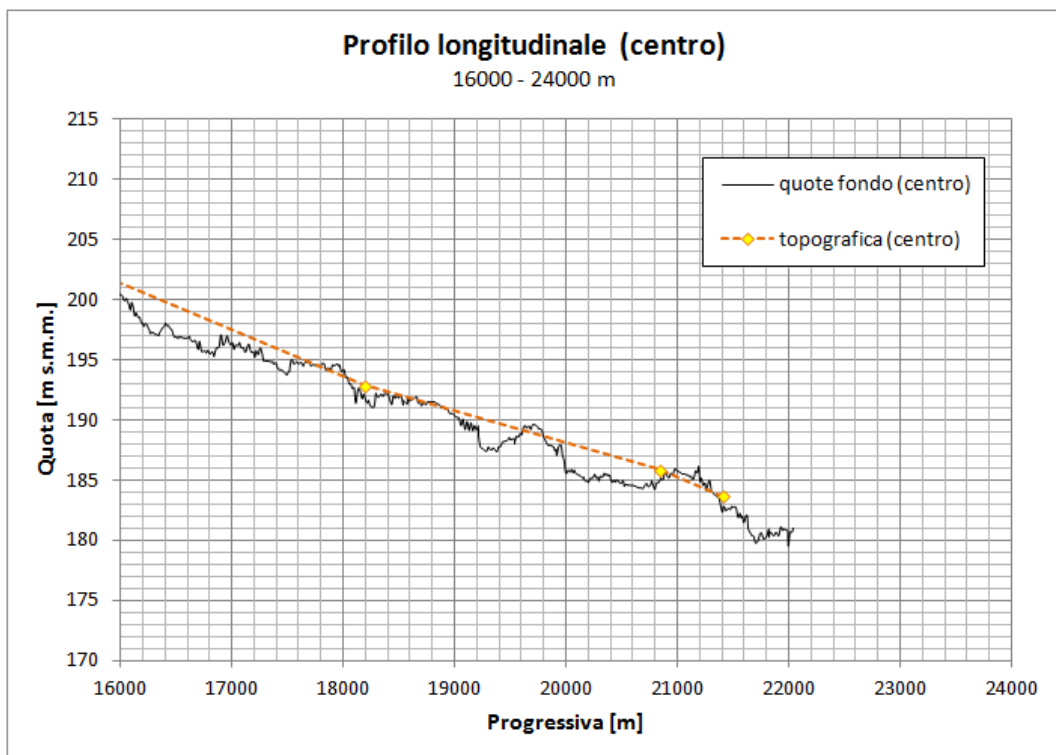


Figura C.10: Profilo longitudinale in centro alveo del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 3.

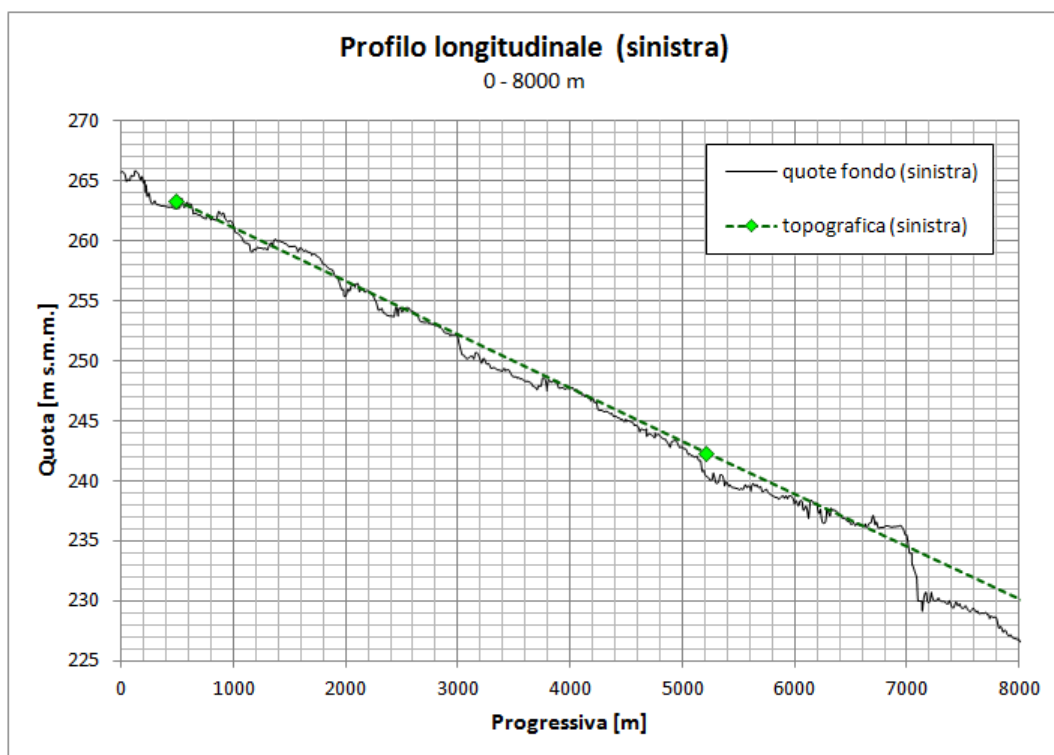


Figura C.11: Profilo longitudinale in sinistra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 1.

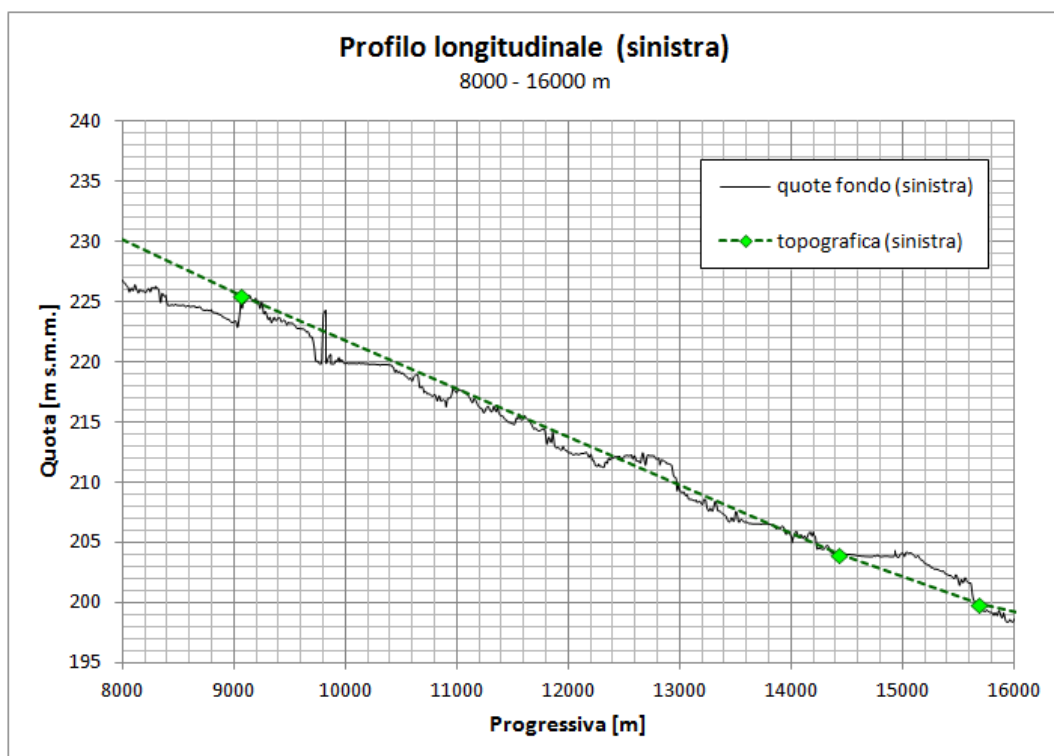


Figura C.12: Profilo longitudinale in sinistra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 2.

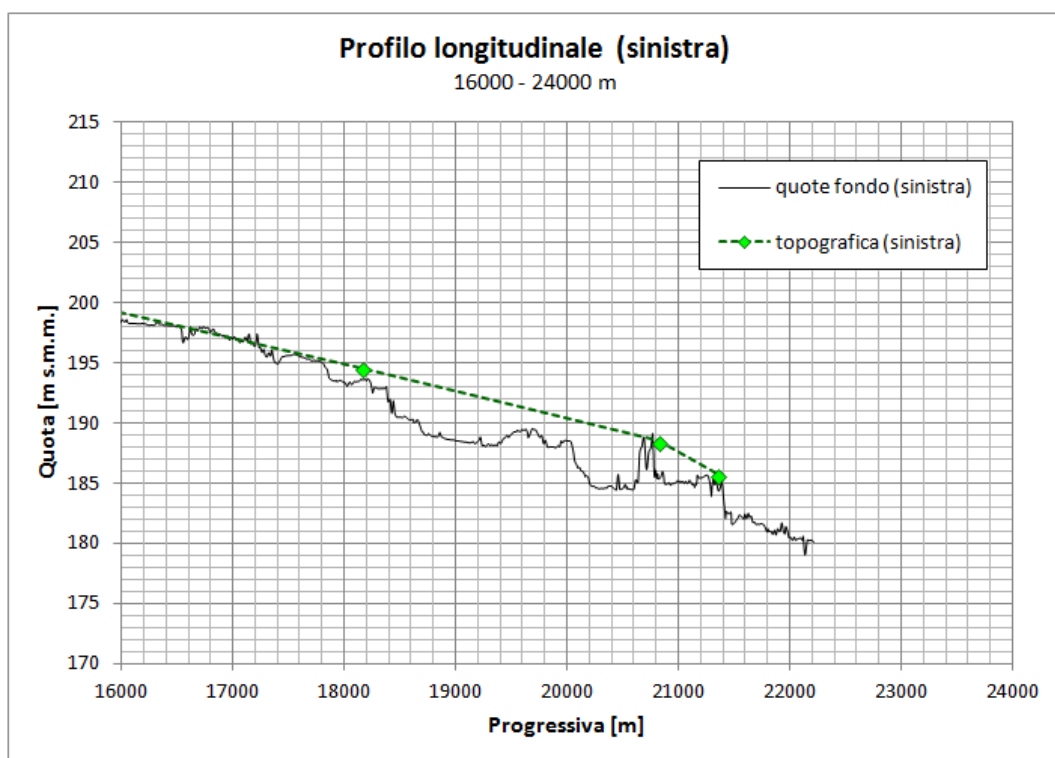


Figura C.13: Profilo longitudinale in sinistra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 3.

Elenco delle figure

1.1	Bacino idrografico del fiume Piave. Fonte: Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2012.	4
1.2	Diagramma di Stecher del bacino imbrifero del Piave. Fonte: Da Deppo et al., 1997.	4
1.3	La traversa di Soverzene.	8
1.4	La traversa di Busche.	9
1.5	La traversa di Fener.	10
1.6	La traversa di Nervesa della Battaglia.	10
2.1	Carta delle precipitazioni totali nel Triveneto nei giorni 3/6 Novembre 1966. Fonte: ENEL - La piena dei fiumi della Regione Veneta del Novembre 1966. 13	
2.2	Confronto fra gli idrogrammi di piena a Segusino nei giorni 3/6 Novembre 1966. Fonte: Autorità di Bacino - Piano stralcio per la sicurezza idraulica del medio e basso corso del fiume Piave.	15
3.1	Percentuale di area bagnata η in funzione della quota della superficie libera.	21
3.2	Schema di calcolo dell'elemento monodimensionale "canale".	23
3.3	Schema di inserimento dei tronchi speciali soglia.	26
3.4	Efflusso al di sopra di una soglia: (a) libero e (b) rigurgitato.	26
4.1	Esempio di Carta Tecnica Regionale numerica 063071o - Belluno. Fonte: Sistema Informativo Territoriale, Regione Veneto.	29
4.2	Esempio di Digital Terrain Model 063070o - Belluno. Fonte: Sistema Informativo Territoriale, Regione Veneto.	31
4.3	Esempio di Lidar Imaging Detection And Ranging - Belluno. Fonte: Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione.	31
4.4	Esempio di Lidar Imaging Detection And Ranging - Pederobba. Fonte: Genio Civile provincia di Treviso.	31
4.5	Sezione topografica numero 39 del 2006 relativa a Belluno. Fonte: Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione. 33	
4.6	Dati topografici utilizzati per la quotatura del reticolo di calcolo. Blu: LIDAR - Genio Civile della Provincia di Treviso; verde: LIDAR - Autorità di Bacino; rosso: LIDAR - Zollet Ingegneria S.r.l.; giallo: DTM - Infrastruttura dati territoriali Regione Veneto.	34
4.7	Sezioni topografiche esaminate nella fase di controllo e aggiornamento della geometria del dominio.	35
4.8	Esempio di sezione topografica di controllo: sezione numero 41	36

4.9	Esempio di sezione topografica di controllo: sezione numero 39	36
4.10	Planimetria dei profili longitudinali dell'asta principale del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27.	39
4.11	Esempio di sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 27 e 26.	39
4.12	A sinistra: delimitazione dell'area dello studio <i>Studio sulle condizioni di sicurezza idraulica dell'abitato di Perarolo mediante implementazione di un modello matematico bidimensionale della confluenza tra il fiume Piave e il torrente Boite</i> . A destra: rilievo LIDAR effettuato dalla società incaricata Zollet Ingegneria S.r.l.	40
4.13	Sezioni di riferimento per lo studio topografico a Perarolo di Cadore.	40
4.14	Confronto della mesh relativa al nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	41
4.15	A sinistra: planimetria delle sezioni di riferimento per l'aggiornamento topografico della mesh. A destra: planimetria delle sezioni di verifica della mesh. Area di studio: nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	41
4.16	Confronto dei dati disponibili relativi alla sezione 32.	42
4.17	Confronto dei dati disponibili relativi alla sezione 32.	42
4.18	Esempio di sezione appartenente alla serie di Perarolo di Cadore: sezione numero 3.	43
4.19	Esempio di sezione di verifica appartenente alla serie di Perarolo di Cadore: sezione compresa tra la numero 3 e la numero 4.	43
5.1	Distribuzione dei tiranti idrici a Perarolo di Cadore per un evento con tempo di ritorno $T_R = 100$ anni: la scala cromatica procede per intervalli di ampiezza 0.5 m partendo da un valore 0.0 m (linea blu) fino a 7.0 m (linea rosso scuro). Fonte: <i>Studio sulle condizioni di sicurezza idraulica dell'abitato di Perarolo mediante implementazione di un modello matematico bidimensionale della confluenza tra il fiume Piave e il torrente Boite</i> , Zollet Ingegneria S.r.l.	46
5.2	Interventi in sponda destra e sinistra a valle di ponte Malcolm, Longarone.	47
5.3	Intervento in sponda destra nel tratto terminale del torrente Maé, Longarone.	48
5.4	Intervento sulle pile di ponte Provagna a valle della zona industriale di Longarone.	49
5.5	Traccia del profilo longitudinale della sponda destra interessata dall'intervento a Belluno.	50
5.6	Planimetria di progetto dell'intervento alla confluenza Ardo-Piave a Belluno.	50
6.1	Confronto, per l'evento del 2002, tra gli idrogrammi di portata misurato e calcolato per diversi valori del coefficiente k_S [$m^{1/3}s^{-1}$], in corrispondenza alla traversa di Busche. Le coppie di valori di k_S si riferiscono, nell'ordine, all'alveo di magra e all'alveo in ghiaia.	54
6.2	Distribuzione dei coefficienti di scabrezza k_S in seguito all'operazione di calibrazione.	56
6.3	Confronto tra idrogramma misurato e simulato, in condizioni PRE e POST-intervento, per l'intero evento del 2002.	57
6.4	Tracce dei profili longitudinali di intervento.	59
6.5	Corsi d'acqua considerati nel calcolo della capacità di portata.	59
6.6	Idrogramma a Perarolo di Cadore ottenuto dalla simulazione dell'evento del 1966 attraverso il modello bidimensionale <i>2DEF</i>	61

6.7	Idrogramma a Longarone ottenuto dalla simulazione dell'evento del 1966 attraverso il modello bidimensionale <i>2DEF</i>	62
6.8	Idrogramma a Belluno ottenuto dalla simulazione dell'evento del 1966 attraverso il modello bidimensionale <i>2DEF</i>	62
6.9	Andamento del livello idrometrico, corrispondente all'evento del 1966, lungo il profilo di intervento a Perarolo di Cadore rispetto al profilo arginale in condizioni PRE e POST intervento.	63
6.10	Andamento del livello idrometrico, corrispondente all'evento del 1966, lungo il profilo di intervento a Longarone rispetto al profilo arginale in condizioni PRE e POST intervento.	64
6.11	Andamento del livello idrometrico, corrispondente all'evento del 1966, lungo il profilo di intervento a Belluno rispetto al profilo arginale in condizioni PRE e POST intervento.	65
6.12	Profilo arginale e livello idrometrico, a capacità di portata raggiunta, a Perarolo di Cadore in condizioni PRE e POST intervento.	66
6.13	Profilo arginale e livello idrometrico, a capacità di portata raggiunta, a Longarone in condizioni PRE e POST intervento.	67
6.14	Profilo arginale e livello idrometrico, a capacità di portata raggiunta, a Belluno in condizioni PRE e POST intervento.	68
A.1	Mappa della serie delle sezioni appartenenti al rilievo topografico di Marzo-Aprile 2006.	72
A.2	Sezione numero 45	73
A.3	Sezione numero 43	73
A.4	Sezione numero 41	73
A.5	Sezione numero 40	74
A.6	Sezione numero 39	74
A.7	Sezione numero 38	74
A.8	Sezione numero 37	75
A.9	Sezione numero 35	75
A.10	Sezione numero 34	75
A.11	Sezione numero 33	76
A.12	Sezione numero 31	76
A.13	Sezione numero 30	76
A.14	Sezione numero 29	77
A.15	Sezione numero 28	77
A.16	Sezione numero 27	77
A.17	Sezione numero 26	78
A.18	Sezione numero 25	78
A.19	Sezione numero 24	78
A.20	Sezione numero 23	79
A.21	Sezione numero 22	79
A.22	Sezione numero 21	79
A.23	Sezione numero 20	80
A.24	Sezione numero 19	80
A.25	Sezione numero 18	80
A.26	Sezione numero 17	81

A.27 Sezione numero 16	81
A.28 Sezione numero 15	81
A.29 Mappa della serie delle sezioni di verifica della fase di aggiornamento della mesh sulla base del rilievo topografico di Marzo-Aprile 2006.	82
A.30 Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 45 e 43.	83
A.31 Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 39 e 38.	83
A.32 Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 38 e 37.	83
A.33 Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 33 e 31.	84
A.34 Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 22 e 21.	84
A.35 Sezione di verifica compresa tra le sezioni topografiche 18 e 17.	84
B.1 Mappa delle sezioni di riferimento nella fase di aggiornamento della mesh nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	86
B.2 Traccia della sezione numero 1 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	86
B.3 Traccia della sezione numero 2 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	87
B.4 Traccia della sezione numero 3 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	87
B.5 Traccia della sezione numero 4 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	87
B.6 Traccia della sezione numero 5 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	88
B.7 Traccia della sezione numero 6 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	88
B.8 Traccia della sezione numero 7 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	88
B.9 Mappa delle sezioni di verifica nella fase di aggiornamento della mesh nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	89
B.10 Traccia della sezione di verifica compresa tra la numero 2 e la numero 3 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	89
B.11 Traccia della sezione di verifica compresa tra la numero 3 e la numero 4 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	90
B.12 Traccia della sezione di verifica compresa tra la numero 4 e la numero 5 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	90
B.13 Traccia della sezione di verifica compresa tra la numero 5 e la numero 6 appartenente alla serie di Perarolo di Cadore.	90
B.14 Mappa delle sezioni topografiche di riferimento nella fase di aggiornamento della mesh nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.	91
B.15 Sezione topografica numero 23 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	92
B.16 Sezione topografica numero 24 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	92
B.17 Sezione topografica numero 25 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	92
B.18 Sezione topografica numero 25 ₅ nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	93
B.19 Sezione topografica numero 26 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	93
B.20 Sezione topografica numero 27 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	93
B.21 Sezione topografica numero 28 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	94
B.22 Sezione topografica numero 29 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	94
B.23 Sezione topografica numero 30 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	94
B.24 Sezione topografica numero 31 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	95
B.25 Sezione topografica numero 32 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	95
B.26 Sezione topografica numero 33 nel nodo idraulico di Perarolo di Cadore.	95
B.27 Sezione topografica 29 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.	96
B.28 Sezione topografica 29 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l.	96

B.29 Sezione topografica 28 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. . . .	97
B.30 Sezione topografica 28 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. . . .	97
B.31 Sezione topografica 27 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. . . .	98
B.32 Sezione topografica 27 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. . . .	98
B.33 Sezione topografica 26 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. . . .	99
B.34 Sezione topografica 26 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. . . .	99
B.35 Sezione topografica 25_5 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. . .	100
B.36 Sezione topografica 25_5 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. .	100
B.37 Sezione topografica 25 PRE intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. . . .	101
B.38 Sezione topografica 25 POST intervento. Fonte: Zollet Ingegneria S.r.l. . . .	101
C.1 Traccia dei profili longitudinali esaminati nell'alveo del fiume Piave.	104
C.2 Profilo longitudinale in destra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27.	105
C.3 Profilo longitudinale in centro alveo del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27.	106
C.4 Profilo longitudinale in sinistra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27.	107
C.5 Profilo longitudinale in destra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 1.	108
C.6 Profilo longitudinale in destra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 2.	108
C.7 Profilo longitudinale in destra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 3.	109
C.8 Profilo longitudinale in centro alveo del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 1.	109
C.9 Profilo longitudinale in centro alveo del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 2.	110
C.10 Profilo longitudinale in centro alveo del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 3.	110
C.11 Profilo longitudinale in sinistra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 1.	111
C.12 Profilo longitudinale in sinistra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 2.	111
C.13 Profilo longitudinale in sinistra del fiume Piave dalla sezione 35 alla sezione 27. Tratto 3.	112

Bibliografia

- [1] L. D'Alpaos, A. Defina, and B. Matticchio. *A 2D finite element modelling of flooding due to a river bank collapse*. In ASCE, editor, *Proceedings of Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas*, Milano, 1994.
- [2] L. D'Alpaos, P. Martini, L. Carniello, and C. Avanzi. *Two dimensional modelling of flood flows and suspended sediment transport: the case of Brenta River*. In EGS-AGU-EUG Joint Assembly 2003, Nizza, April 2003.
- [3] A. Defina. *Two dimensional shallow flow equations for partially dry areas*. *Water Resource Research*, 36(11):3251-3264, 2000.
- [4] A. Defina, L. D'Alpaos, and B. Matticchio. *A new set of equation for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models*. In ASCE, editor, *Proceedings of Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas*, Milano, 1994.
- [5] Ministero dei Lavori Pubblici. *Evento alluvionale del 3-5 novembre 1966 - carta degli allagamenti*. Magistrato alle Acque - Venezia - Ufficio Idrografico, 1969.
- [6] R. Del Favero. *Sintesi del sistema informativo Forestale del Veneto*. Regione Veneto - Commissione Europea, 1999.
- [7] Regione del Veneto. *Infrastruttura dei dati territoriali*. idt.regione.veneto.it/app/metacatalog/.
- [8] Consorzio di Bonifica Pedemontano Brenta. *Brenta e brentane: utilizzazione e difesa*. Cassa di Risparmio di Padova e Rovigo, 1996.
- [9] A. Ghetti. *Risultati dei recenti studi sulla moderazione delle piene del Livenza e del Piave*. San Donà di Piave, 1977.
- [10] A. Ghetti, L. Berti, and E. Scardellato. *Studio per la sistemazione del piave a difesa dalle piene*. Provincia di Treviso, 1970.
- [11] Dipartimento IMAGE. *Modello matematico a scala di bacino per lo studio della formazione e propagazione delle piene nel bacino del fiume Piave*. Fondazione Vajont - Fondazione Cassa di Risparmio Verona, Vicenza, Belluno e Ancona, 15 novembre 2006.
- [12] Dipartimento IMAGE. *Modello stocastico di precipitazione per il bacino del fiume Piave - relazione finale*. Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2008a.
- [13] Dipartimento IMAGE. *Modello idrologico del fiume Piave - relazione finale*. Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2008b.

-
- [14] Dipartimento IMAGE. *Modello matematico bidimensionale per lo studio della propagazione delle piene nel fiume Piave tra Macchietto e la foce*. Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2008c.
- [15] R. Iommi. *Metodologie di rilievo della geometria di un fiume e valutazione della capacità di portata: il caso del fiume Brenta a valle di Limena*. Università degli studi di Padova, 2006.
- [16] M. Maso. *Note sulle metodologie operative per i rilievi laser-scanning e la generazione di DTM d'alta qualità*. Cinque fiumi, 1(1):23-33, 2002.
- [17] CNR Ist. Geog. Univ. Padova. *Carta dell'alluvione del novembre 1966 nel Veneto e nel Trentino-Alto Adige - effetti morfologici e allagamenti*. Touring Club Italiano, 1972.
- [18] R. Saggiani. *Moderazione dei colmi di piena nel fiume Piave operata dal serbatoio di Pieve di Cadore*. Università degli studi di Padova, 2014.
- [19] L. Terzariol. *Sulla mitigazione del rischio idraulico del fiume Piave: effetti del serbatoio di Falzè di Piave e delle casse di espansione di Ciano del Montello*. Università degli studi di Padova, 2014.