

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali

Corso di laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio

Studio ex-post sulla pendenza di correzione di un tratto d'alveo sistemato del torrente Pramper (Val di Zoldo, BL)

Relatore:
Prof. Vincenzo D'Agostino

Laureando:
Leonardo Bressan

Correlatori:
Dott. For. Francesco Bettella
Dott. For. Marco Martini

Matricola n°:
2007554

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

INDICE

RIASSUNTO	1
ABSTRACT.....	3
1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 La dinamica fluviale.....	6
1.2 Gli interventi di sistemazione dei corsi d'acqua	7
1.3 La pendenza di correzione.....	9
1.3.1 Soluzione esplicita semplificata per una sezione rettangolare molto larga .	11
2 OBIETTIVI.....	14
3 AREA DI STUDIO	15
3.1 Storia del bacino.....	17
3.2 Parametri morfometrici del bacino.....	18
3.3 Mappa della distribuzione delle aree e delle pendenze	19
3.3.1 Distribuzione delle aree	19
3.3.2 Distribuzione delle pendenze.....	20
3.4 Curva ipsometrica dimensionale e adimensionale	22
3.5 Profilo del collettore principale.....	24
3.6 Tratto in esame	25
3.6.1 Briglia 1	26
3.6.2 Briglia 2	27
3.6.3 Briglia 3	28
3.6.4 Briglia 5	29
4 MATERIALI E METODI.....	31
4.1 Analisi statistico-probabilistica delle precipitazioni	31
4.1.1 Regolarizzazione secondo Gumbel e Test Statistico di Matalas.....	32
4.1.2 Determinazione della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica (LSPP)	

4.2	Analisi di campo.....	35
4.2.1	Rilievi granulometrici	35
4.2.2	Rilievi GPS	38
4.3	Metodi di determinazione della portata liquida al colmo.....	39
4.3.1	Tempo di corrivazione	39
4.3.2	Determinazione della pioggia efficace con il metodo SCS-CN.....	41
4.3.3	Analisi idrologica.....	45
5	RISULTATI.....	51
5.1	Risultati dell'analisi statistico-probabilistica delle precipitazioni	51
5.1.1	Durata 0,5 ore.....	51
5.1.2	Durata 1 ore.....	53
5.1.3	Durata 3 ore.....	55
5.1.4	Durata 6 ore.....	57
5.1.5	Durata 12 ore.....	59
5.1.6	Durata 24 ore.....	61
5.1.7	Durata 48 ore.....	63
5.1.8	Cartogramma di Gumbel riassuntivo	65
5.2	Linea segnalatrice di possibilità pluviometrica.....	67
5.3	Risultati delle analisi di campo	69
5.3.1	Elaborazione dei rilievi granulometrici	69
5.3.2	Analisi del rilievo topografico	74
5.4	Determinazione del tempo di corrivazione	75
5.5	Analisi idrologica	75
5.5.1	Metodo razionale	76
5.5.2	Metodo cinematico.....	77
5.5.3	Riassunto dei risultati delle analisi idrologiche	86
5.6	Pendenza di correzione.....	87

6	DISCUSSIONI.....	89
7	CONCLUSIONE	92
8	BIBLIOGRAFIA	94

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Sezione rettangolare molto larga	11
Figura 2 – Inquadramento geografico del bacino del torrente Pramper (sullo sfondo immagine satellitare ©Google 2022).....	15
Figura 3 – Carta di uso del suolo bacino Pramper (Regione Veneto, 2022).....	16
Figura 4 – Carta geologica (ISPRA, 2022).....	16
Figura 5 – Istogramma di distribuzione delle aree del bacino per le diverse fasce di quota	20
Figura 6 – Mappa della distribuzione delle aree del bacino per le diverse fasce di quota.	20
Figura 7 – Istogramma di distribuzione della pendenza nelle fasce di quota	21
Figura 8 – Mappa della distribuzione della pendenza nelle fasce di quota	21
Figura 9 – Curva ipsometrica dimensionale	22
Figura 10 – Curva ipsometrica adimensionale.....	23
Figura 11 – Gradi di evoluzione di una curva ipsometrica adimensionale	23
Figura 12 – Profilo del collettore principale	24
Figura 13 – Profilo del tratto in esame.....	25
Figura 14 – Grafico dei dati topografici ottenuto dal rilievo della sezione della briglia 1 (a sinistra) e foto (a destra)	26
Figura 15 – Grafico dei dati topografici ottenuti dal rilievo della sezione della zona a monte della briglia 1 (a sinistra) e foto (a destra)	26
Figura 16 – Grafico dei dati topografici ottenuto dal rilievo della sezione della briglia 2 (a sinistra) e foto (a destra)	27
Figura 17 – Grafico dei dati topografici ottenuti dal rilievo della sezione della zona a monte della briglia 2 (sopra) e foto (sotto)	27
Figura 18 – Grafico dei dati topografici ottenuto dal rilievo della sezione della briglia 3 (sopra) e foto (sotto).....	28
Figura 19 – Grafico dei dati topografici ottenuto dal rilievo della sezione della briglia 5 (a sinistra) e foto (a destra)	29
Figura 20 – Grafico dei dati topografici ottenuti dal rilievo della sezione della zona a monte della briglia 5 (sopra) e foto (sotto)	29
Figura 21 – Grafico dei dati topografici ottenuti dal rilievo della sezione della zona a valle della briglia 5 (a sinistra) e foto (a destra)	30
Figura 22 – Tabella della variazione (Matalas , et al., 1975).....	34

Figura 23 – Schematizzazione particella di terreno (sinistra), piastra forata (destra) (Lenzi, 2022)	36
Figura 24 – Classificazione dell’American Geophysical Union (AGU) (in Lenzi, 2022)	36
Figura 25 – Curva frequenza relativa e cumulata	37
Figura 26 – Strumento GPS utilizzato in campo	38
Figura 27 – Percorso di deflusso del metodo cinematico (D'Agostino, 2022)	39
Figura 28 – Rappresentazione di un idrogramma di piena (Zaramella & Gregoretti, 2021)	45
Figura 29 – Idrogramma di piena ottenuto con il metodo cinematico (D'Agostino, 2022)	46
Figura 30 – Schema di suddivisione in sottobacini del metodo cinematico (D'Agostino, 2022)	48
Figura 31 – Costruzione pluviogramma a blocchi alterni.....	50
Figura 32 – Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 0,5h$	52
Figura 33 – Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 0,5h$	52
Figura 34 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 1h$	54
Figura 35 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 1h$	54
Figura 36 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 3h$	56
Figura 37 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 3h$	56
Figura 38 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 6h$	58
Figura 39 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 6h$	58
Figura 40 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 12h$	60
Figura 41 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 12h$	60
Figura 42 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 24h$	62
Figura 43 – Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 24h$	62
Figura 44 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 48h$	64
Figura 45 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 48h$	64
Figura 46 – Cartogramma riassuntivo di Gumbel secondo la probabilità empirica di Hazen	65
Figura 47 – Riassunto delle LSPP per ogni TR considerato	68
Figura 48 – Localizzazione dei rilievi granulometrici lungo il tratto analizzato	69
Figura 49 – Vista a monte della Briglia 5	70
Figura 50 – Curve di frequenza cumulata e relativa rilievo granulometrico 001	71
Figura 51 – Rilievo granulometrico 002	71

Figura 52 - Curve di frequenza cumulata e relativa rilievo granulometrico 002.....	72
Figura 53 - Curve di frequenza cumulata e relativa rilievo granulometrico 003.....	73
Figura 54 – Idrogramma di piena per ogni tempo di ritorno considerato secondo il Metodo Razionale.....	76
Figura 55 – Curva area cumulata – tempi.....	77
Figura 56 – Distribuzione nel tempo delle sub-aree contribuenti.....	78
Figura 57 – Pluviogramma a blocchi alterni TR 30 anni.....	79
Figura 58 – Idrogramma TR30 con metodo cinematico a blocchi alterni	80
Figura 59 – Pluviogramma a blocchi alterni TR 100 anni.....	81
Figura 60 - Idrogramma TR100 con metodo cinematico a blocchi alterni.....	82
Figura 61 – Pluviogramma a precipitazione costante TR 30 anni	83
Figura 62 – Idrogramma TR30 con metodo cinematico a precipitazione costante	84
Figura 63 - Pluviogramma a precipitazione costante TR 100 anni.....	85
Figura 64 - Idrogramma TR100 con metodo cinematico a precipitazione costante	86
Figura 65 – Scostamento dei valori di i_c teorici ottenuti attraverso differenti combinazioni, rispetto ai valori di i_c misurati.....	88

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Parametri ed indici morfometrici del bacino Pramper	19
Tabella 2 – Valori del CNII secondo la Legenda di Destinazione d’Uso dei Suoli Agricoli e Forestali (Rosso, 2004)	44
Tabella 3 – Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 0,5 ore	51
Tabella 4 – Verifica Test Matalas 0,5h	53
Tabella 5 - Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 1 ore	53
Tabella 6 - Verifica Test Matalas 1h.....	55
Tabella 7 - Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 3 ore	55
Tabella 8 - Verifica Test Matalas 3h.....	57
Tabella 9 - Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 6 ore	57
Tabella 10 - Verifica Test Matalas 6h.....	59
Tabella 11 – Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 12 ore	59
Tabella 12 - Verifica Test Matalas 12h.....	61
Tabella 13 – Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 24 ore	61
Tabella 14 - Verifica Test Matalas 24h.....	63
Tabella 15 – Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 48 ore	63
Tabella 16 - Verifica Test Matalas 48h.....	65
Tabella 17 - Precipitazione attesa durata 0,5h	66
Tabella 18 - Precipitazione attesa durata 1h	66
Tabella 19 - Precipitazione attesa durata 3h	66
Tabella 20 - Precipitazione attesa durata 6h	66
Tabella 21 - Precipitazione attesa durata 12h	66
Tabella 22 - Precipitazione attesa durata 24h	66
Tabella 23 - Precipitazione attesa durata 48h	67
Tabella 24 – Riassunto dei valori a e n per ogni TR considerato.....	67

Tabella 25 - Riassunto delle altezze di precipitazione attese per ogni TR; metodo analitico	68
Tabella 26 – Diametri percentili rilievo granulometrico 001.....	70
Tabella 27 - Diametri percentili rilievo granulometrico 002	72
Tabella 28 - Diametri percentili rilievo granulometrico 003	73
Tabella 29 - Diametri percentili medi tra i rilievi granulometrici 002 e 003.....	74
Tabella 30 – Pendenze di correzione ottenute da rilievo GPS riferite alla sistemazione avvenuta tra il 2008 e 2009.....	74
Tabella 31 – T_c a confronto; metodo cinematico ed empirico	75
Tabella 32 – Parametri utilizzati per le analisi idrologiche.....	75
Tabella 33 – Valori di deflusso superficiale per ogni tempo di ritorno.....	76
Tabella 34 – Aree contribuenti incrementali	77
Tabella 35 – Calcolo P_e con il metodo dei blocchi alterni TR 30 anni	78
Tabella 36 – Calcolo del deflusso superficiale con il metodo cinematico a blocchi alterni TR 30 anni.....	79
Tabella 37 – Calcolo P_e con il metodo dei blocchi alterni TR 100 anni.....	80
Tabella 38 - Calcolo del deflusso superficiale con il metodo cinematico a blocchi alterni TR 100 anni.....	81
Tabella 39 – Calcolo P_e con il metodo della precipitazione costante TR 30 anni.....	82
Tabella 40 – Calcolo del deflusso superficiale con il metodo cinematico a P costante TR 30 anni.....	83
Tabella 41 - Calcolo P_e con il metodo della precipitazione costante TR 100 anni	84
Tabella 42 - Calcolo del deflusso superficiale con il metodo cinematico a P costante TR 100 anni.....	85
Tabella 43 – Riassunto delle analisi idrologiche.....	86
Tabella 44 – Valori delle pendenze di correzione calcolati per la combinazione $D_{50} - Q_{30}$	87
Tabella 45 - Valori delle pendenze di correzione calcolati per la combinazione $D_{84} - Q_{30}$	87
Tabella 46 - Valori delle pendenze di correzione calcolati per le combinazioni $D_{90} - Q_{30}$ e $D_{90} - Q_{100}$	87
Tabella 47 – Media degli scarti di i_c teorica rispetto a i_c misurata.....	88
Tabella 48 – Confronto tra i valori di i_c misurati rispetto a i_c teorici per ogni combinazione	93

RIASSUNTO

I corsi d'acqua sono elementi del territorio molto dinamici che riflettono l'ambiente idrologico, geologico, climatico e vegetazionale del bacino idrografico nel quale scorrono.

Essi, infatti, con la loro azione costante ed ininterrotta, plasmano il loro percorso alterandolo, a livello planimetrico ed altimetrico, attraverso il trasporto di significative quantità di sedimenti solidi e legnosi.

I fenomeni erosivi che si accompagnano al trasporto solido creano spesso condizioni di instabilità che possono compromettere la sicurezza delle infrastrutture antropiche presenti, portando l'uomo ad agire ed intervenire attraverso la realizzazione di opere in grado di stabilizzare il fondo e le sponde.

Gli interventi relativi alla realizzazione di opere nei torrenti collinari e montani vedono come principali interventi opere quali briglie e soglie. Queste si basano sull'individuazione della pendenza di correzione, ovvero il valore della pendenza per la quale solo i sedimenti aventi diametro inferiore ad una determinata dimensione (ad esempio corrispondente al diametro medio della curva granulometrica del letto) possono essere trasportati in occasione di eventi di piena considerati significativi.

Queste opere di consolidamento consentono di mantenere il fondo ad una quota desiderata, garantendo quindi il controllo dell'azione dell'acqua dal punto di vista dei fenomeni erosivi e limitando l'intensità delle alluvioni solide.

In certi casi però, si può verificare l'eventualità che il valore della pendenza di correzione di progetto, non corrisponda nel medio-lungo periodo con il naturale evolversi del corso d'acqua, portando a vanificare parzialmente l'effetto di controllo previsto dall'intervento di sistemazione progettato e realizzato.

Lo studio in esame si pone come obiettivo quello di valutare lo stato nel quale si trova un tratto sistemato tra il 2008 ed il 2009 del torrente Pramper, situato presso il Comune di Val di Zoldo (BL), al fine di effettuare un confronto tra la pendenza di correzione prevista dall'intervento e lo stato nel quale si trova dopo 14 anni.

Le informazioni riguardanti la descrizione del bacino Pramper e del suo reticolo idrografico sono state ricavate a seguito dell'elaborazione GIS dei rilievi DTM a 5 metri, ottenuti dal

Geoportale della Regione Veneto e da una loro integrazione con dati ricavati da rilievi GPS effettuati in campo.

Per quanto riguarda invece la regolarizzazione delle piogge, sono stati utilizzati i dati della stazione pluviometrica di Forno di Zoldo – Campo (ARPAV, 2023), in quanto questa risulta essere la più vicina al sito di studio e per la quale la serie storica delle precipitazioni massime annuali è ininterrotta.

Dalle analisi è risultato che gli scenari ad aver dimostrato una corretta progettazione della sistemazione, sono stati due.

Il primo con l'imposizione di una portata di piena generata da un tempo di ritorno di 30 anni ed un diametro percentile pari all'ottantaquattresimo percentile della curva granulometrica di riferimento.

Il secondo invece attraverso una portata di piena generata da un tempo di ritorno di 100 anni, ed un diametro percentile pari al novantesimo percentile della curva granulometrica di riferimento.

ABSTRACT

Watercourses are very dynamic elements of land morphology that reflect the hydrological, geological, climatic and vegetational environment of the catchment area in which they flow.

They, in fact, with their constant and uninterrupted action, shape their course altering it, at planimetric and altimetric levels, through the transport of significant amounts of solid and woody sediments.

The erosive phenomena that accompany solid transport often create unstable conditions that can compromise the safety of the anthropogenic infrastructure present, leading man to act and intervene through the construction of works capable of stabilizing the bottom and banks.

Interventions related to the construction of works in hill and mountain streams see works such as weirs and thresholds as the main interventions. These are based on the identification of the correction slope, i.e., the value of the slope for which only sediment with a diameter smaller than a certain size (e.g., corresponding to the average diameter of the grain size curve of the bed) can be transported during flood events that are considered significant.

These consolidation works make it possible to maintain the bottom at a desired elevation, thus ensuring the control of water action from the point of view of erosive phenomena and limiting the intensity of solid flooding.

In certain cases, however, the possibility may occur that the value of the design correction slope, does not correspond in the medium to long term with the natural evolution of the watercourse, leading to partially nullify the control effect envisaged by the planned and implemented accommodation intervention.

The objective of the present study is to evaluate the state of a section settled between 2008 and 2009 of the Pramper stream, located at the Municipality of Val di Zoldo (BL), in order to make a comparison between the correction slope envisaged by the intervention and the state in which it is located after 14 years.

The information regarding the description of the Pramper basin and its hydrographic network was obtained as a result of GIS processing of the 5m DTM surveys obtained from the Geoportal of the Veneto Region and the integration of data obtained from the GPS surveys carried out in the field.

On the other hand, with regard to rainfall regularization, data from the rainfall station of Forno di Zoldo - Campo (ARPAV 2023) were used, as this appears to be the closest to the study site and for which the historical series of maximum annual rainfall is unbroken.

The analyses showed that there were two scenarios that demonstrated a correct design of the arrangement.

The first with the imposition of a flood flow rate generated by a return time of 30 years and a percentile diameter equal to the eighty-fourth percentile of the reference grain size curve.

The second instead through a flood flow rate generated by a return time of 100 years and a percentile diameter equal to the ninetieth percentile of the reference grain size curve.

1 INTRODUZIONE

Gli eventi atmosferici sono fenomeni naturali che interessano da sempre la vita sulla Terra. Talvolta però essi possono manifestarsi in maniera particolarmente intensa, costituendo un problema per la sicurezza dell'uomo ed i territori che lo circondano.

Uno tra i più devastanti, è il fenomeno delle alluvioni, il quale consiste in un evento di precipitazione di intensità tale da non poter essere contenuto dal reticolo idrografico esistente, e da non permettere al terreno di riuscire a far permeare l'acqua in profondità in maniera efficiente.

Ad aggravare la situazione è l'effetto delle attività antropiche, le quali con il passare degli anni, hanno portato ad un aumento della probabilità di accadimento di tali fenomeni e all'amplificazione delle loro conseguenze. Ciò è dovuto all'aumento delle emissioni di carbonio atmosferico che hanno portato ad uno squilibrio del clima globale. Inoltre, a rendere ancora più di impatto le alluvioni sono l'aumento del consumo di suolo, il quale porta ad una significativa riduzione delle piane inondabili e ad una diminuzione drastica della capacità di infiltrazione dei suoli.

Al fine di restituire un quadro più completo della superficie soggetta a questo tipo di evento, l'ISPRA nel 2020 ha individuato tre tipologie di aree soggette a tre differenti probabilità di rischio, distinguendole tra bassa, media ed elevata, le quali, a seguito delle analisi effettuate, sono risultate essere rispettivamente pari al 14%, al 10% ed al 5,4% del territorio nazionale.

Questi sono dati che, quando riferiti al totale della superficie italiana, potrebbero non restituire immediatamente un'idea dei soggetti coinvolti. Infatti, per poter esprimere in maniera più diretta tali valori, l'ISPRA ha stimato che, per il caso di territori soggetti ad una bassa probabilità di rischio (14%), ad essere esposta è una popolazione di circa 12.250.000 abitanti, pari al circa 20,6% della popolazione nazionale (Lastoria, et al., 2021).

1.1 La dinamica fluviale

Le variazioni del corso d'acqua a livello altimetrico e planimetrico di cui sopra accennato, si riferiscono alla capacità di trasporto solido del corso stesso. In particolare, tali alterazioni si verificano in maniera più evidente nei torrenti montani in quanto caratterizzati da pendenze maggiori e quindi da una conseguente maggiore capacità di movimentazione dei sedimenti (D'Agostino, 2022).

Secondo la classificazione di De Horatiis (1930) (in Ferro, 2006), infatti, un torrente può essere distinto in due differenti tipologie: di scavo e di trasporto.

I torrenti di scavo sono caratterizzati da un'energia della corrente in quantità sufficiente a provocare il trasporto del sedimento solido. L'asportazione di materiale dal fondo ne provoca l'incisione e così l'abbassamento. Tale condizione si verifica quando non è presente un'adeguata alimentazione solida rispetto alla capacità erosiva del flusso (Ferro, 2006).

I torrenti di trasporto invece non hanno energia sufficiente a provocare la mobilitazione del fondo, in quanto questa si trova già impegnata nel trasporto del sedimento reclutato a monte. Ciò accade a causa di una eccessiva alimentazione solida nella parte posta a monte del torrente stesso. Il deposito quindi del sedimento può comportare un innalzamento della quota del fondo, favorendo così la formazione di ostruzioni che possono comportare il conseguente verificarsi di fenomeni di avulsione (Ferro, 2006).

1.2 Gli interventi di sistemazione dei corsi d'acqua

Al fine di garantire la protezione delle zone antropiche, l'uomo ha sviluppato con il passare degli anni, differenti tipologie di interventi per la mitigazione del rischio idraulico, che possono essere suddivisi in due macrocategorie: non strutturali e strutturali.

Gli interventi non strutturali trattano la componente normativa, volta a garantire la prevenzione degli insediamenti esistenti e futuri.

Gli interventi strutturali constano invece principalmente di opere le cui azioni possono agire sulla rete idrografica, come invasi di regolazione, arginature spondali ed opere trasversali, oppure sui versanti, come opere longitudinali e opere per il controllo dell'erosione superficiale.

Nel caso di un torrente montano le opere di stabilizzazione dell'asta fluviale principale sono rappresentate da:

- soglie di fondo
- briglie
- muri di sponda e scogliere longitudinali
- pennelli

Le soglie di fondo consistono in opere trasversali non sporgenti dall'alveo nel quale sono fondate, con lo scopo di immobilizzare la porzione di fondo posto a monte rispetto alla loro posizione.

Solitamente sono disposte in serie, formando così una gradinata, sebbene talvolta possano essere utilizzate anche singolarmente, come nel caso del fissaggio del fondo in corrispondenza di infrastrutture viarie trasversali.

Le briglie consistono in opere trasversali sporgenti dall'alveo nel quale sono fondate ed anch'esse, come le soglie, hanno lo scopo di immobilizzare il fondo del corso d'acqua nel quale si trovano.

A differenza però delle precedenti, le briglie possono assumere diverse forme e venire quindi utilizzate per scopi differenti, tra i quali la trattenuta di materiale galleggiante e la selezione o la trattenuta di materiale solido. Ai giorni d'oggi inoltre sono state ideate nuove soluzioni che vedono l'impiego di materiali naturali come principale risorsa, come ad esempio piante viventi, legname e pietrame.

I muri di sponda sono opere di sostegno a gravità o semigravità che vengono utilizzate per difendere le sponde nel caso in cui queste si trovino in condizioni soggette ad instabilità gravitativa. Possono essere realizzati con differenti tipologie di materiali a seconda del loro utilizzo.

Le scogliere longitudinali rappresentano un'ulteriore tipologia di opera che riveste in maniera analoga il ruolo delle precedenti, fatta eccezione per il fatto che vengono realizzati attraverso l'impiego di grossi massi.

I pennelli o repellenti constano di elementi di varia forma che vengono disposti lungo le sponde di un corso d'acqua allo scopo di favorire l'accumulo di materiale a ridosso della stessa e mantenere così la corrente al centro della sezione (APAT, 2003).

1.3 La pendenza di correzione

Come accennato in precedenza, per opere quali briglie e soglie, l'obiettivo principale è quello di stabilizzare il fondo posto a monte di quest'ultime, e di anticipare il valore della pendenza di correzione che assumerebbe il corso d'acqua stesso nel caso in cui non dovesse avvenire alcun intervento da parte dell'uomo.

In particolar modo esse vengono realizzate nei torrenti caratterizzati da una ridotta alimentazione solida a monte. Ciò avviene attraverso la corretta determinazione della pendenza di correzione (i_c), la quale permette di mantenere il fondo del corso d'acqua ad una quota desiderata e di controllare i fenomeni erosivi durante le piene ordinarie (D'Agostino & Cerato, 2004).

Nel caso questo parametro non fosse calcolato correttamente in fase di progettazione, è possibile incorrere in situazioni per cui le opere trasversali progettate risultino sovradimensionate (eccesso di deposito) o sottodimensionate (permanenza di fenomeni erosivi con rischio di danneggiamento delle opere realizzate), situazioni che possono comportare la necessità di apportare correzioni a seguito della loro realizzazione.

Inoltre, nel caso in cui la sistemazione dovesse aver comportato un'eccessiva riduzione della pendenza, si può rischiare di incorrere in una diminuzione troppo accentuata della movimentazione di sedimenti, risolvendo il problema localmente ma proiettandolo a valle (D'Agostino & Cerato, 2004).

La corretta stima della pendenza di correzione rappresenta quindi un ruolo fondamentale nella salvaguardia del territorio posto in corrispondenza del torrente, ma anche a valle di quest'ultimo.

Esistono differenti metodi per il calcolo della pendenza di correzione che si distinguono in base all'approccio con il quale vengono affrontati: empirico, comparativo e deterministico. I primi si basano sull'interpretazione dei dati osservati in campo derivanti dall'analisi delle condizioni di alcuni tratti già sistemati che abbiano raggiunto uno stato di equilibrio.

L'approccio comparativo invece vede come modello di riferimento alcuni tratti del corso d'acqua oggetto della sistemazione, che si possano considerare essere caratterizzati da un profilo stabile.

Infine, la pendenza di correzione ottenuta attraverso l'approccio deterministico si basa sulla determinazione dello sforzo tangenziale dell'acqua (τ_{acqua}) tale per cui si soddisfano le condizioni di trasporto solido desiderate, dove per trasporto solido si intende il quantitativo

di sedimento mobilizzato, individuato dal percentile di diametro intermedio (vedi 4.2.1) limite (D_{xx}) scelto (D'Agostino & Cerato, 2004).

Ad esempio:

- Ponendo $D_{xx} = D_{30}$, verranno trasportati dalla corrente i sedimenti aventi un diametro inferiore al trentesimo percentile ed il corso d'acqua risulterà quindi più statico;
- Ponendo $D_{xx} = D_{90}$, verranno trasportati dalla corrente i sedimenti aventi un diametro inferiore al novantesimo percentile ed il corso d'acqua risulterà invece più dinamico.

Di seguito si riporta il metodo per la stima di i_c formulato da Shields nel 1936 (Shields, 1936).

La pendenza che garantisce le condizioni di trasporto solido determinate da D_{xx} si ottiene eguagliando lo sforzo tangenziale dell'acqua (τ_{acqua}) con lo sforzo tangenziale critico generato da parte del sedimento (τ_c).

$$\tau_{acqua} = \tau_c \quad (1)$$

$$\gamma_a \cdot Rh \cdot i = 0,06 \cdot (\gamma_s - \gamma_a) \cdot D_{xx} \quad (2)$$

dove	γ_a	Densità dell'acqua [N/m^2]
	Rh	Raggio idraulico [m]
	i	Pendenza [m/m]
	γ_s	Densità del sedimento [N/m^2]
	D_{xx}	Diametro sedimento limite [m]

Secondo quanto appena detto, è possibile affermare quindi che le condizioni di trasporto desiderate saranno garantite dalla nuova pendenza i_c (pendenza di progetto):

$$i \rightarrow i_c$$

$$\gamma_a \cdot Rh \cdot i_c = 0,06 \cdot (\gamma_s - \gamma_a) \cdot D_{xx} \quad (3)$$

$$i_c = 0,06 \cdot \frac{\gamma_s - \gamma_a}{\gamma_a} \cdot \frac{D_{xx}}{Rh} \cong 0,1 \cdot \frac{D_{xx}}{Rh} \quad (4)$$

Dove i_c rappresenta la pendenza da assegnare affinché un determinato diametro di riferimento, facente parte della granulometria del letto (per esempio $D = D_{84}$), si trovi in condizioni di moto incipiente nel momento in cui nel corso d'acqua transita una corrente che impegna la sua sezione con raggio idraulico R_h (per $D = D_{84}$ sarà quindi: D_{90} stabile, D_{70} mobile, etc.).

Il raggio idraulico R_h è una grandezza che dipende dalla portata liquida Q di piena di riferimento, ovvero la quantità di acqua che attraversa la sezione del tratto d'alveo in condizioni di piena, e dalla scabrezza di fondo della stessa sezione del tratto d'alveo.

1.3.1 Soluzione esplicita semplificata per una sezione rettangolare molto larga

Nel presente caso studio, al fine di individuare la pendenza di correzione, è stata utilizzata una soluzione semplificata che vede come geometria di riferimento una sezione rettangolare molto larga (Fig. 1) In una condizione quindi nella quale l'alveo ha sezione rettangolare con base (B) elevata e tirante idraulico (h) ridotto, si può approssimare 'h' con il raggio idraulico (R_h) (in D'Agostino, 2022).

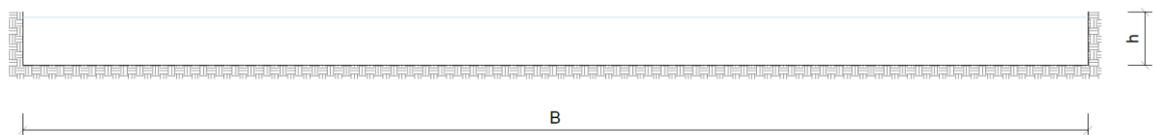


Figura 1 – Sezione rettangolare molto larga

Generalmente per un alveo rettangolare:

$$R_h = \frac{B * h}{B + 2h} = \frac{B * h}{B * \left(1 + \frac{2h}{B}\right)} \quad (5)$$

Dal momento che il tirante risulta molto più inferiore rispetto alla larghezza dell'alveo, si può dire che:

$$h / B \approx 0 \quad (6)$$

quindi,

$$R_h = \frac{h}{1} \cong h \quad (7)$$

Una volta chiariti i precedenti presupposti è possibile procedere con il calcolo della portata liquida attraverso la formula del moto uniforme (in D'Agostino, 2022):

$$Q = V * A \quad (8)$$

dove V Velocità [m/s]
A Area [m²]

$$Q = \left(ks * Rh^{\frac{2}{3}} * i_c^{\frac{1}{2}} \right) * (B * h) \quad (9)$$

dove ks Coefficiente di scabrezza [m^{1/3}s⁻¹]
Rh Raggio idraulico [m]
i_c Pendenza di correzione [m/m]
B Larghezza dell'alveo [m]
h Tirante [m]

A questo punto è possibile sostituire Rh con h:

$$Q = \left(ks * h^{\frac{2}{3}} * i_c^{\frac{1}{2}} \right) * (B * h) \quad (10)$$

$$Q = ks * h^{\frac{5}{3}} * i_c^{\frac{1}{2}} * B \quad (11)$$

Dalla formula (11) è infine possibile calcolare la pendenza di correzione i_c:

$$i_c = \left(\frac{0,1 * D_{xx} * ks^{0,6} * B^{0,6}}{Q_{xx}^{0,6}} \right)^{1,43} \quad (12)$$

dove D_{xx} Diametro oltre il quale non avviene movimento di sedimento [m]
Rh Coefficiente di scabrezza [m^{1/3}s⁻¹]
B Larghezza dell'alveo [m]
Q_{xx} Portata liquida che provoca lo spostamento dei sedimenti di D < D_{xx} [m]

È importante ricordare che per il calcolo della pendenza di correzione (i_c) in un alveo a sezione rettangolare con B elevato e h ridotto, bisogna verificare se ci si trova in condizioni

di micro o macro scabrezza, ovvero se la sommergenza relativa (h/D_{84}) risulti inferiore o superiore a 3,5.

Nel primo caso è possibile utilizzare per il calcolo della scabrezza la formula di Bray (1979) (in D'Agostino, 2022):

$$k_s = \frac{20,1}{D_{90}^{\frac{1}{6}}} \quad (13)$$

Nel secondo caso invece è possibile utilizzare la formula di Bathurst (1985) (in D'Agostino, 2022):

$$k_s = \frac{\sqrt{g}}{h^{\frac{1}{6}}} * \left[5,62 * \log\left(\frac{h}{D_{84}}\right) + 4 \right] \quad (14)$$

dove g Accelerazione gravitazionale [m/s^2]
 h Tirante [m]

In questo caso, il calcolo della pendenza di correzione viene effettuato con un metodo iterativo dal momento che il tirante, che è in funzione della scabrezza e della pendenza, compare sia nella formula di Bathurst che nel calcolo della pendenza di correzione:

$$i_c = \left(\frac{0,1 * D_{xx} * k_s^{0,6} * B^{0,6}}{Q_{xx}^{0,6}} \right)^{1,43} \quad (12)$$

$$h = \left(\frac{Q}{k_s * i_c^{\frac{1}{2}} * B} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (15)$$

2 OBIETTIVI

L'obiettivo del presente elaborato consta nella valutazione a posteriori dell'efficacia sistematoria di una serie di briglie realizzate nel torrente Pramper (Val di Zoldo, BL) tra il 2008 ed il 2009 (OPENCOESIONE, 2023). In particolare, si mira ad effettuare un confronto tra lo stato attuale e quello previsto dall'intervento in termini di pendenza di correzione.

L'elaborazione dei dati topografici prevede l'utilizzo del software QGIS (v. 3.28.0) (QGIS, 2023) per l'analisi del modello digitale del terreno (DTM) con maglia 5 metri della Regione Veneto e dei dati ottenuti attraverso un rilievo con GPS differenziale realizzato ad-hoc in campo.

Gli idrogrammi liquido e solido, utilizzati per perseguire l'obiettivo del lavoro di tesi, si basano sull'elaborazione dei dati forniti dalla stazione pluviometrica di Forno di Zoldo – Campo, della rete di monitoraggio dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione e protezione Ambientale del Veneto (ARPAV), e dei dati ottenuti dai rilievi granulometrici effettuati in campo.

3 AREA DI STUDIO

Il torrente Pramper scorre nell'omonima valle e sfocia nel Torrente Maè presso la località di Forno di Zoldo, situata a circa 20 km a Nord della provincia di Belluno (Fig. 2). In questo punto è stata inoltre posizionata la sezione di chiusura del bacino idrografico preso in considerazione, il quale risulta avere una superficie totale di 15,54 km² ed un perimetro di 26.151,42 m.

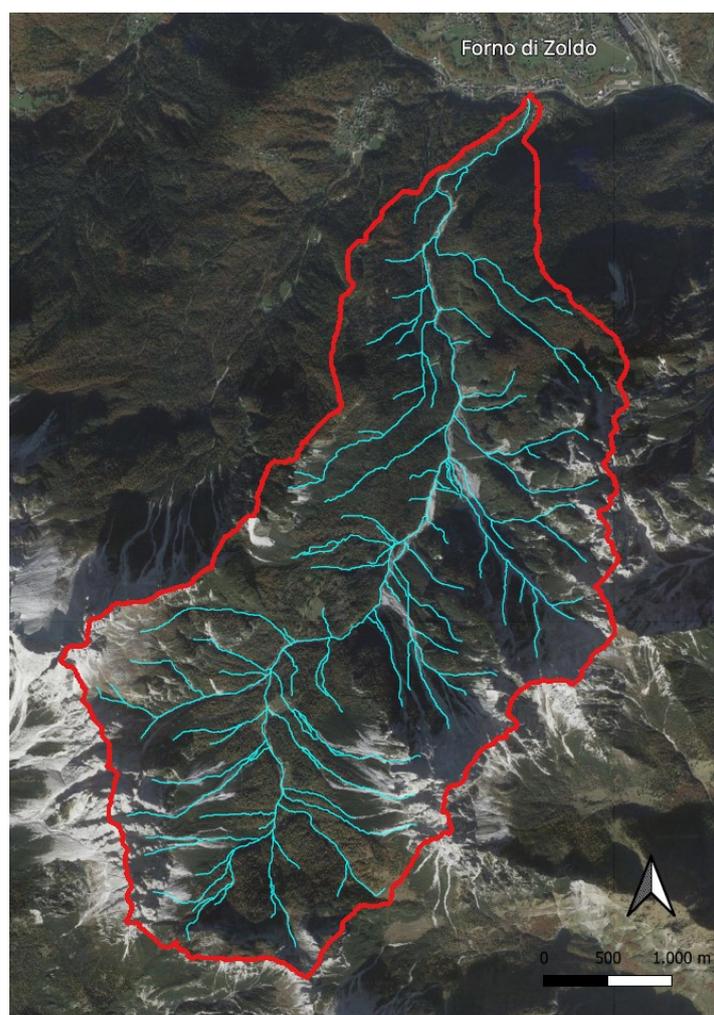


Figura 2 – Inquadramento geografico del bacino del torrente Pramper (sullo sfondo immagine satellitare ©Google 2022)

Il bacino Pramper si sviluppa su un dislivello complessivo di 1.665 m, compresi tra la quota massima di 2.495 m s.l.m. e la quota minima di 830 m s.l.m., con una pendenza media complessiva di 18,13° (o 0.33%).

È caratterizzato dalla presenza di foreste di larici e faggi nelle fasce di quota inferiore, mentre da foreste di pini mughi, ghiaioni (Regione Veneto, 2022) ed affioramenti rocciosi di Dolomia Principale nelle fasce di quota superiore (Fig. 3).

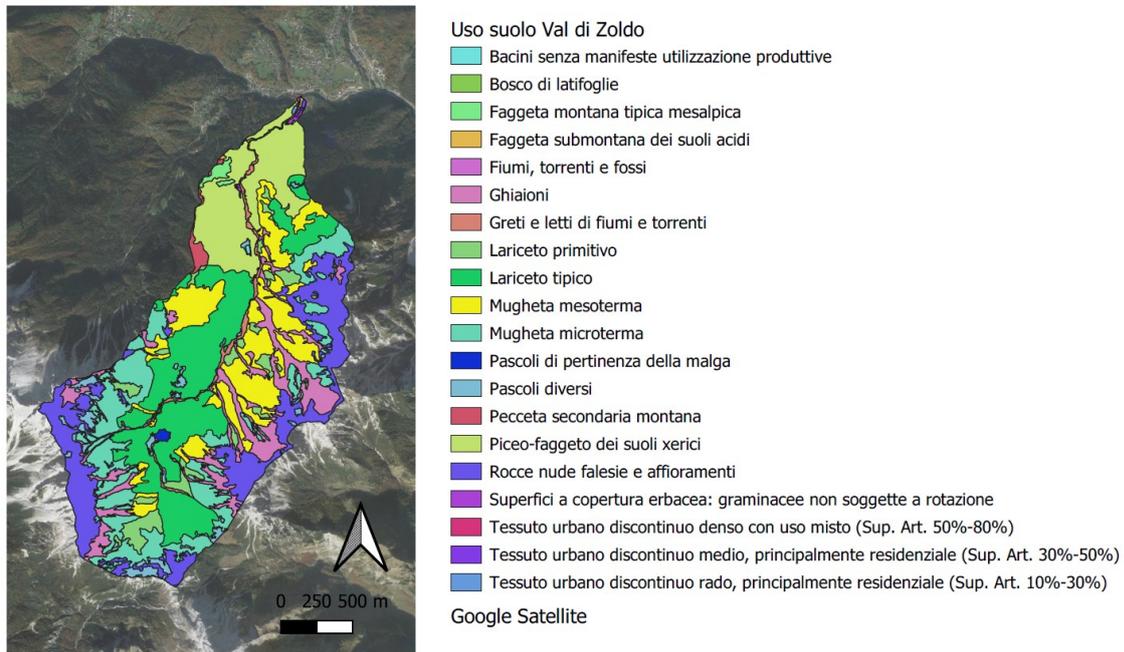


Figura 3 – Carta di uso del suolo bacino Pramper (Regione Veneto, 2022)

In particolare, data l’origine glaciale del bacino sono presenti morfologie connesse alla sua formazione come cordoni morenici laterali e rock glacier posti prevalentemente in corrispondenza della Malga Pramper (Fig. 4) (ISPRA, 2022).



Figura 4 – Carta geologica (ISPRA, 2022)

3.1 Storia del bacino

La dinamicità di un bacino e dei propri corsi d'acqua è fortemente condizionata dal verificarsi di eventi di notevole intensità, i quali possono portare ad un totale stravolgimento dell'assetto del territorio e ad ulteriori conseguenze disastrose, come è successo al bacino Pramper nel corso della propria storia. Di seguito si riportano alcuni degli eventi più impattanti verificatisi negli ultimi cinquant'anni nei territori montani del bellunese e delle province limitrofe, che hanno, almeno dal punto di vista pluviometrico, interessato anche il bacino idrografico del torrente Pramper. In assenza di informazioni specificatamente riguardanti tale bacino, si presume che i seguenti eventi abbiano probabilmente causato eventi di piena significativi anche nel bacino oggetto di studio.

Tra il 3 ed il 4 novembre del 1966 si abbatté su gran parte delle Regioni Trentino, Veneto e Friuli Venezia-Giulia un'alluvione che durò per circa 36 ore raggiungendo un picco di intensità presso la stazione di Bosco Cansiglio, nel bacino del Piave, di 22,9 mm/h. L'evento fu reso ancora più severo a causa del parziale scioglimento del manto nevoso creatosi durante gli eventi di precipitazione avvenuti in quell'anno, il quale portò il terreno a saturarsi per una profondità di diversi metri (Deppo, 2016).

Ad una distanza di quarantaquattro anni dall'alluvione del '66, più precisamente tra il 31 ottobre ed il 2 novembre 2010, sugli stessi territori si verificò un ulteriore fenomeno che comportò l'allagamento di circa 140 km² di superficie, posizionandosi tra i 3 eventi più intensi che abbiano mai colpito le zone prealpine e pedemontane venete fino ad allora (Regione Veneto, 2011).

Tale evento fu però poi superato in termini di eccezionalità pochi anni dopo, tra il 27 ed il 30 ottobre 2018, dalla tempesta Vaia, la quale costituisce ancora oggi un record assoluto sia dal punto di vista dei valori di precipitazione, che da quelli della velocità del vento per gran parte delle stazioni di monitoraggio installate a partire dal 1992 dall'ARPAV.

Vaia, nei quattro giorni in cui si manifestò, generò presso la stazione di Forno di Zoldo un valore di precipitazione cumulata di 430,6 mm e raffiche di vento che raggiunsero un picco di 190 km/h sulla cima prealpina del Monte Cesen (ARPAV, 2022).

Si può affermare quindi che l'intervento di sistemazione del tratto del torrente in esame, risalente all'anno 2008, ha dovuto fronteggiare il verificarsi di due eventi meteorologici importanti, risultando sicuramente di aiuto nella mitigazione degli effetti generati da quest'ultimi.

3.2 Parametri morfometrici del bacino

La forma del bacino è resa più chiara dal coefficiente di forma di Gravelius (16) (in D'Agostino, 2022) il quale all'aumentare del valore ottenuto, indica una forma del bacino sempre più allungata, con una lunghezza del collettore principale superiore a quella degli affluenti ed una lunghezza di versante inferiore. Per il presente caso studio, il bacino ha ottenuto un valore pari a 1,86.

$$F = 0,28 \frac{P}{A^{0,5}} \quad (16)$$

dove P Perimetro [m]
 A Area [m²]

A rappresentare invece la propensione del bacino alla generazione di colate detritiche è il numero di Melton (17), il quale per valori inferiori a 0,5 indica l'attesa di fenomeni di alluvionamento rapido di acqua e fango (flash flood o debris flood), mentre per valori superiori a 0,5 indica l'attesa di flussi di detrito a maggiore viscosità, anche detti debris flow (D'Agostino, 1996).

$$Me = \frac{\Delta H}{A^{0,5}} \quad (17)$$

dove ΔH Dislivello bacino [m]
 A Area [m²]

Data l'elevata estensione del bacino Pramper, quest'ultimo ha ottenuto un valore Me pari a 0.42, suggerendo quanto sopra riportato.

Il reticolo idrografico ha una lunghezza complessiva di 66,73 km, mentre il collettore principale misura 8,727 m con una pendenza media pari a 0,13 m/m.

Alla sezione di chiusura esso assume un ordine, secondo il Metodo Horton-Stralher, (in Ferro, 2006) pari a 8.

In relazione invece alla densità di drenaggio D_r il reticolo ottiene un valore paria a 4,29, dovuto alla fitta rete di canali distribuita sull'intera superficie.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei parametri morfometrici sopracitati:

Riferimento	Parametri morfometrici del bacino Pramper	
Bacino idrografico	Superficie planimetrica A [km ²]	15,54
	Perimetro P [m]	26.151,42
	Quota massima h _{max} [m s.l.m.]	2.495,00
	Quota della sezione di chiusura h ₀ [m s.l.m.]	830,00
	Quota media h _m [m s.l.m.]	1.648,21
	Rilevo del bacino: h _{max} – h ₀ [m]	1.665,00
	Pendenza media del bacino i _m [m/m]	0,33
	Pendenza media del bacino i _m [°]	18,13
	Coefficiente di forma di Gravelius F [0,28 P/A ²]	1,86
	Numero di Melton [-] ΔH/A ^{0,5}	0,42
Reticolo idrografico	Lunghezza del reticolo idrografico L _r [m]	66.727,31
	Lunghezza del collettore principale L [m]	8.727,00
	Pendenza media del collettore principale [m/m]	0,13
	Densità di drenaggio Dr [km ⁻¹] L _r /A	4,29
	Ordine del bacino [-]	8,00

Tabella 1 – Parametri ed indici morfometrici del bacino Pramper

3.3 Mappa della distribuzione delle aree e delle pendenze

Dall'elaborazione del Modello Digitale del Terreno (DTM) a 5 m è stato possibile ottenere gli istogrammi della distribuzione delle aree (Fig. 5) e delle pendenze (Fig. 7) e le conseguenti rappresentazioni grafiche (Fig. 6 e 8).

I valori riportati di seguito sono stati ricavati considerando fasce di quota intervallate da isoipse¹ aventi un'interdistanza verticale di 50 m.

3.3.1 Distribuzione delle aree

Come si può notare dai seguenti risultati, le fasce di quota con valori minori di area si trovano nelle zone poste agli estremi del bacino idrografico, in prossimità quindi della sezione di chiusura e della linea dello spartiacque, mentre, al contrario, ad essere

¹ Per isoipse si intendono linee i cui punti possiedono tutti la medesima quota

caratterizzate da una maggiore superficie sono le zone in prossimità delle quote poste a 1850 m s.l.m. e 1900 m s.l.m.

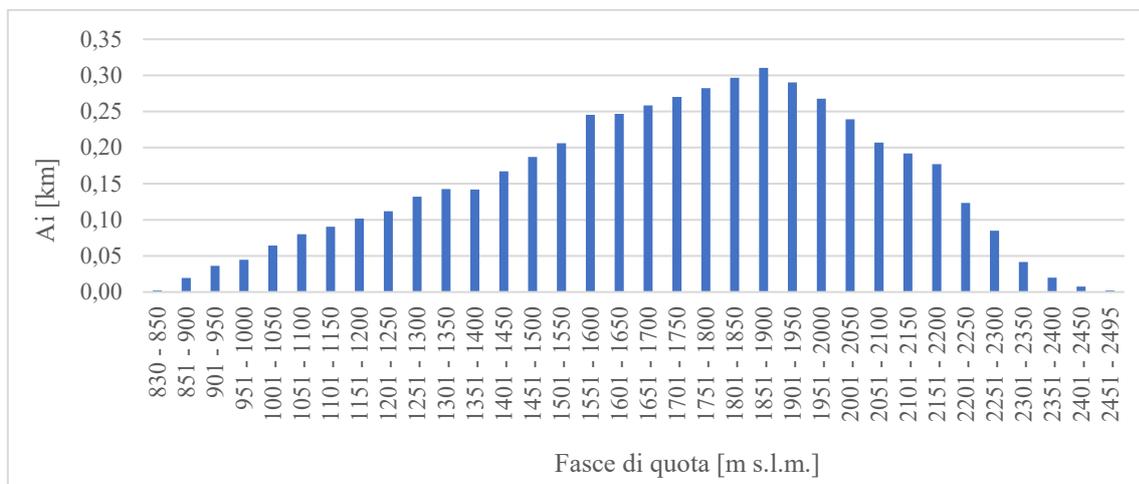


Figura 5 – Istogramma di distribuzione delle aree del bacino per le diverse fasce di quota

La distribuzione delle aree è resa ancora più chiara dall'immagine seguente la quale rappresenta in una scala di colori che va dall'azzurro al rosso, rispettivamente le fasce di quota aventi una minore ed una maggiore superficie.

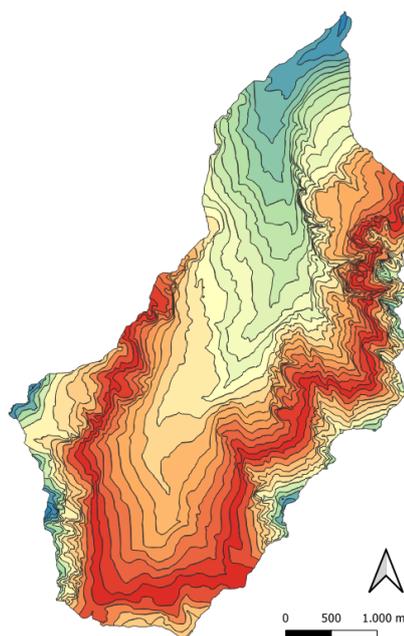


Figura 6 – Mappa della distribuzione delle aree del bacino per le diverse fasce di quota

3.3.2 Distribuzione delle pendenze

I dati acquisiti relativi alle pendenze medie mostrano come il bacino sia caratterizzato da una generale diminuzione delle pendenze con il diminuire della quota. Più in dettaglio si nota un andamento irregolare, che si traduce in un susseguirsi di fasce di quota aventi valori

inizialmente maggiori e successivamente minori, portando il profilo del bacino ad assumere un andamento quasi a gradinata.

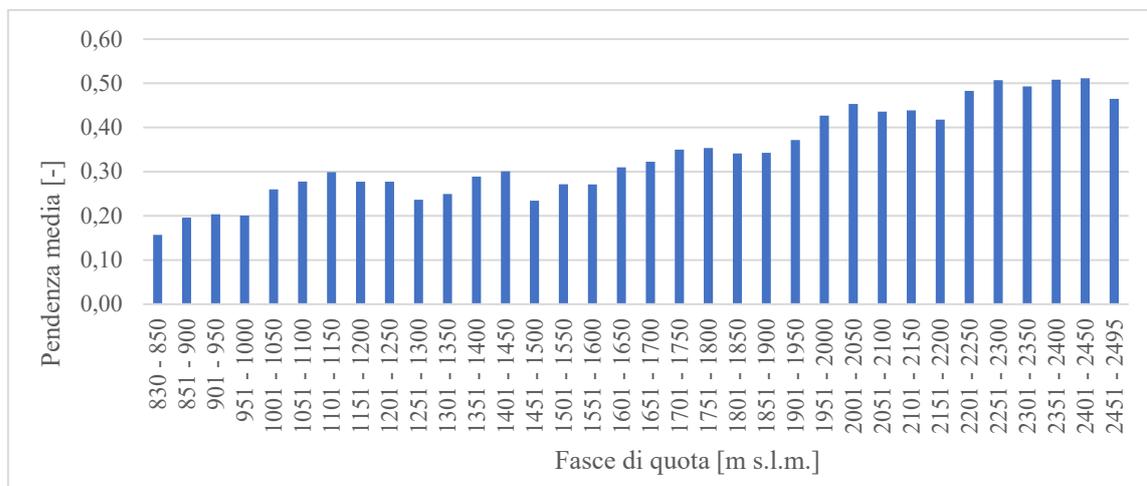


Figura 7 – Istogramma di distribuzione della pendenza nelle fasce di quota

La distribuzione delle pendenze rispetto alla quota è resa ancora più chiara dall'immagine seguente la quale rappresenta in una scala di colori che va dal verde rosso, rispettivamente le fasce di quota aventi una minore ed una maggiore pendenza. Tali valori assumono una pendenza media minima di 0,16 in corrispondenza della sezione di chiusura, ed una pendenza media massima di 0,51 in prossimità dello spartiacque.

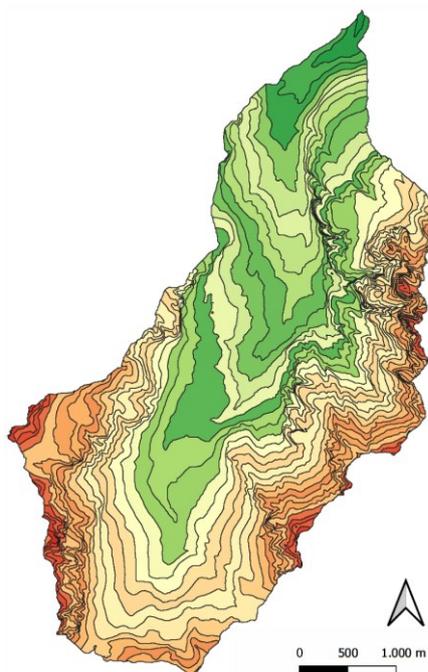


Figura 8 – Mappa della distribuzione della pendenza nelle fasce di quota

3.4 Curva ipsometrica dimensionale e adimensionale

La curva ipsometrica dimensionale (Fig. 9) fornisce la distribuzione delle superfici nelle diverse fasce altimetriche: ogni punto ha come ordinata un valore di quota e come ascissa la percentuale di superficie del bacino posta al di sopra della quota considerata.

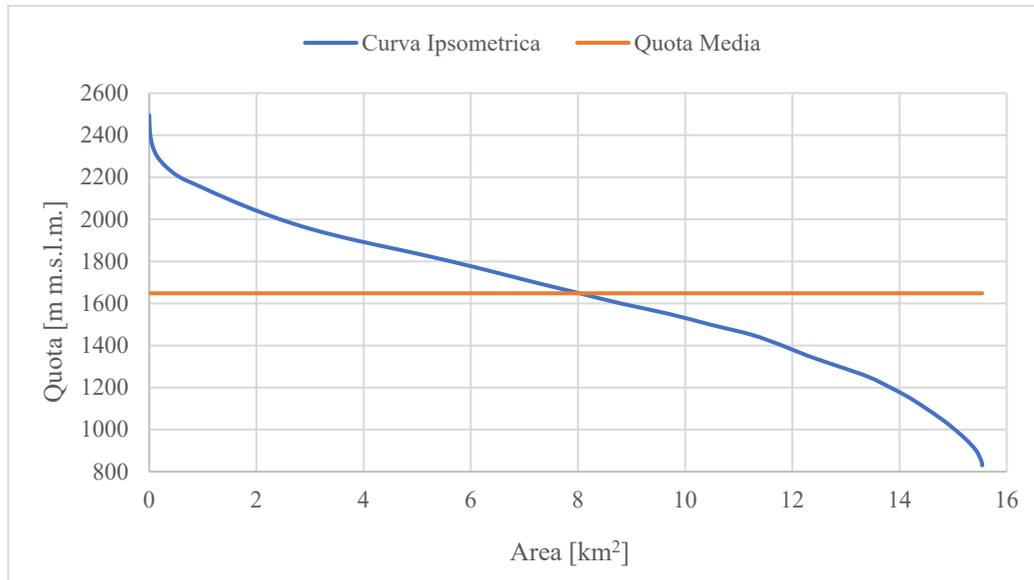


Figura 9 – Curva ipsometrica dimensionale

Come si può notare dal grafico è inoltre possibile determinare l'altezza media h_m del bacino, attraverso l'applicazione della seguente formula:

$$h_m = \frac{\sum (h_i - A_i)}{A_{tot}} \quad (18)$$

dove

h_i	Altitudine media dell'intervallo di quota i-esimo [m]
A_i	Area del bacino compresa nell'intervallo di quota i-esimo [km ²]
A_{tot}	Area totale del bacino [km ²]

L'altezza media del bacino è infine risultata essere pari a 1648,21 m.

Al fine però di poter consentire un agevole confronto del bacino del torrente Pramper con altri bacini è necessario ricorrere alla rappresentazione adimensionale della curva ipsometrica (Fig. 10). In tale grafico gli assi delle ascisse e delle ordinate sono compresi tra i valori di 0 e 1, e quindi privi di unità di misura.

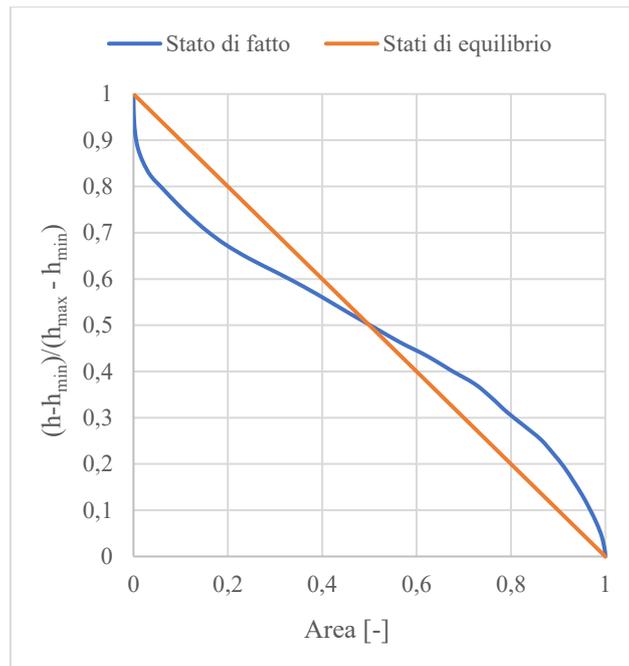


Figura 10 – Curva ipsometrica adimensionale

L'analisi della presente curva permette di valutare il grado di evoluzione raggiunto dal bacino (Fig. 11), il quale può trovarsi in una fase giovanile (a), matura (b) o senile (c), in base alla comparazione del suo stato attuale con quello di equilibrio.

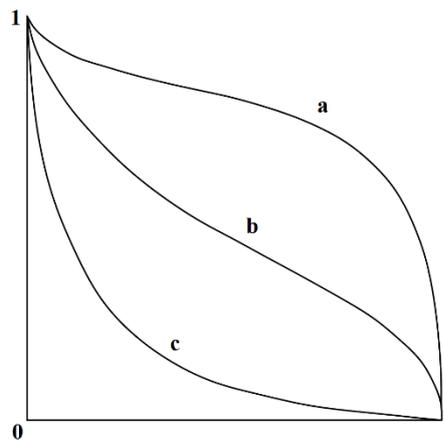


Figura 11 – Gradi di evoluzione di una curva ipsometrica adimensionale

In questo caso attraverso l'osservazione dell'andamento della curva corrispondente allo stato di fatto è possibile desumere che il bacino Pramper si trovi una fase di equilibrio.

3.5 Profilo del collettore principale

Il profilo altimetrico (Fig. 12) consiste nell'elaborato grafico che rappresenta l'andamento del profilo del collettore principale da monte verso valle rispetto alla sua distanza progressiva orizzontale.

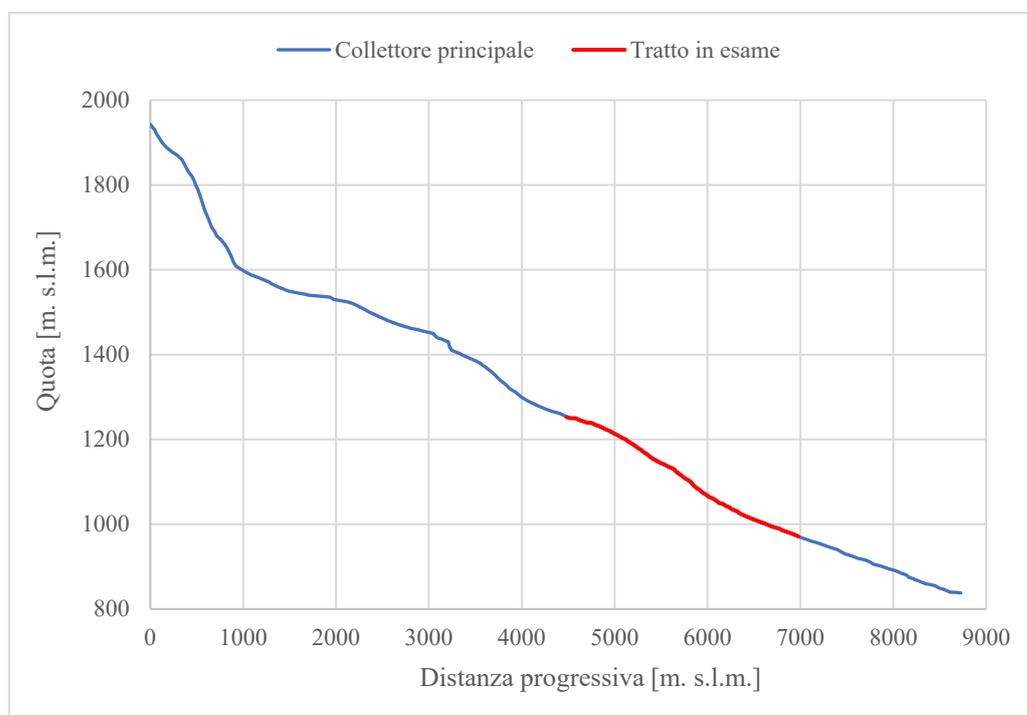


Figura 12 – Profilo del collettore principale

In riferimento a quanto già riportato nella tabella del capitolo 3.2, la lunghezza complessiva del collettore principale risulta essere di 8.727,22 m con una pendenza media del 12,66 %, mentre il tratto interessato dall'intervento di sistemazione è lungo 2.509,57 m con una pendenza media del 11,22 %.

Dal confronto con la mappa delle pendenze (Fig. 8), si può notare come gran parte del bacino sia caratterizzato da valori di pendenza moderati, fino poi ad assumere valori sempre maggiori in corrispondenza delle pareti rocciose poste lungo la linea dello spartiacque.

3.6 Tratto in esame

Il caso studio si concentra sull'analisi del tratto sistemato compreso tra le quote 992,34 e 1235,82 m s.l.m. del torrente Pramper (Fig. 13), in quanto, come citato in precedenza, su di esso tra il 2008 ed il 2009 sono state realizzate delle briglie poste ad una interdistanza irregolare.

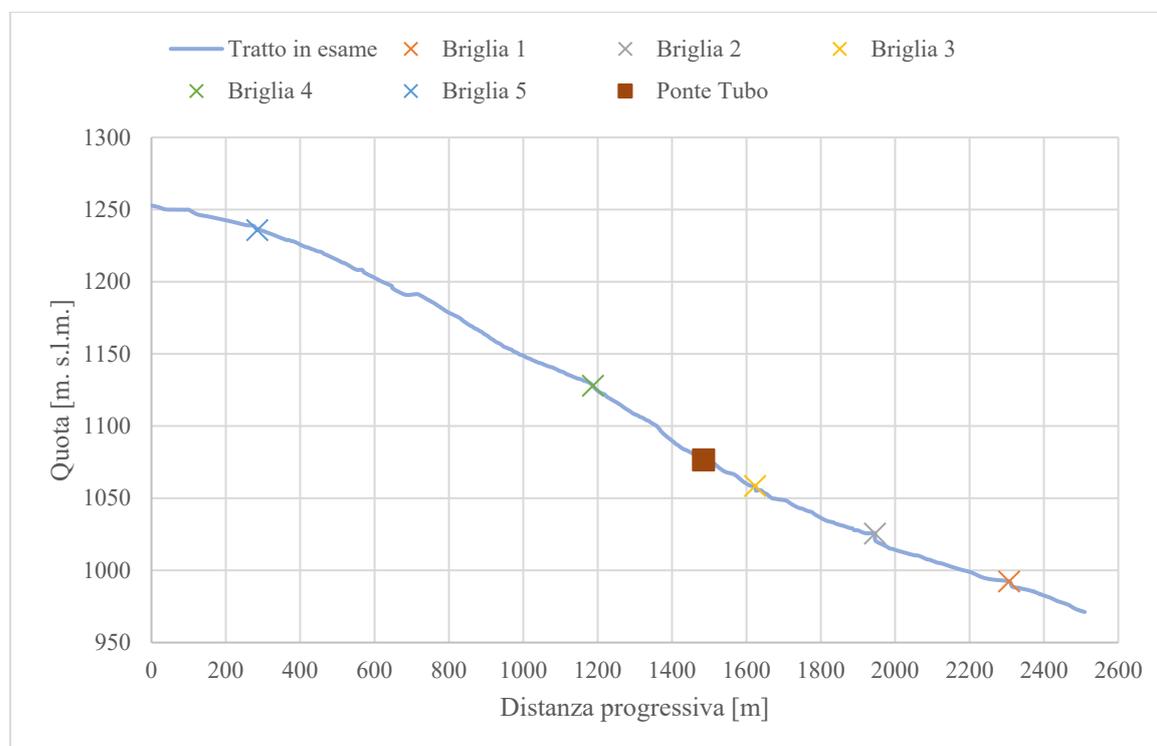


Figura 13 – Profilo del tratto in esame

In particolare, l'intervento è consistito nella realizzazione di 5 briglie, 4 delle quali sono oggetto del presente studio.

Inoltre, si informa della presenza di un'ulteriore opera situata alla base del passaggio di un ponte tubo per il funzionamento della centrale di Forno di Zoldo, la cui posizione è indicata nella figura soprastante. La stima della pendenza di correzione della "Briglia 3" viene quindi effettuata per il tratto compreso tra quest'ultima ed il suddetto ponte tubo.

Di seguito si riportano i valori relativi ad ogni briglia rilevata; com'è possibile notare dalla figura soprastante, la numerazione delle stesse è avvenuta in ordine crescente di quota.

3.6.1 Briglia 1

La gaveta della prima briglia si trova ad un'altitudine media di 992,30 m s.l.m. ed agisce su un tratto a monte di 360.75 m avente una pendenza media pari a 7,86%. Essa è caratterizzata da una base inferiore larga 13,89 m ed un'altezza pari a 2,09 m (Fig. 14).

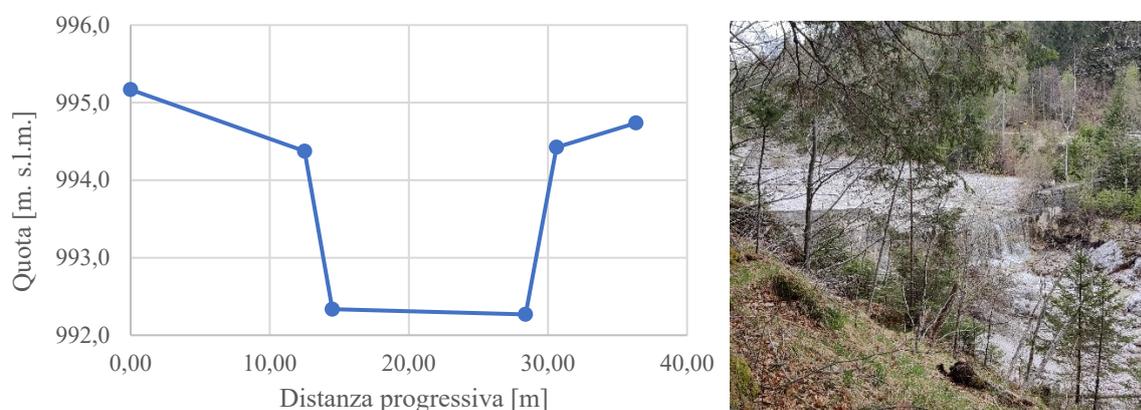


Figura 14 – Grafico dei dati topografici ottenuto dal rilievo della sezione della briglia 1 (a sinistra) e foto (a destra)

Il tratto del torrente Pramper posto appena a monte della briglia (Fig. 15) scorre all'interno di un contesto più ampio se paragonato alla larghezza dell'alveo subito a valle, ed è caratterizzato dalla presenza di massi posti lungo le sue sponde e da ciottoli di dimensioni minori.

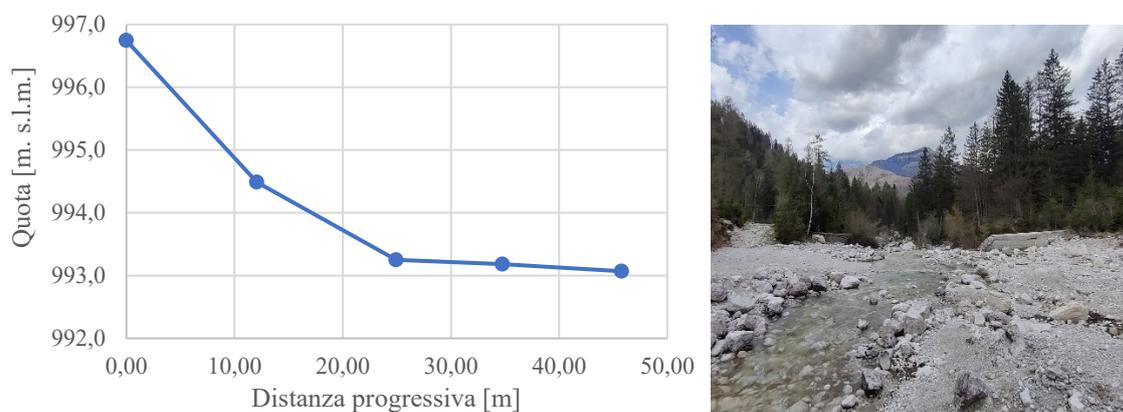


Figura 15 – Grafico dei dati topografici ottenuti dal rilievo della sezione della zona a monte della briglia 1 (a sinistra) e foto (a destra)

A valle invece, come sopra accennato, l'alveo subisce un forte restringimento e la vegetazione risulta essere molto più vicina alle sponde del corso d'acqua. In alcuni punti infatti sono presenti anche accumuli di materiale legnoso causato dalla presenza di tronchi in alveo.

3.6.2 Briglia 2

La gaveta della seconda briglia si trova ad un'altitudine media di 1025,65 m s.l.m. ed agisce su un tratto a monte di 322.16 m avente una pendenza media pari a 9,22%. Essa è caratterizzata da una base inferiore larga 11,98 m ed un'altezza pari a 2,22 m (Fig. 16).

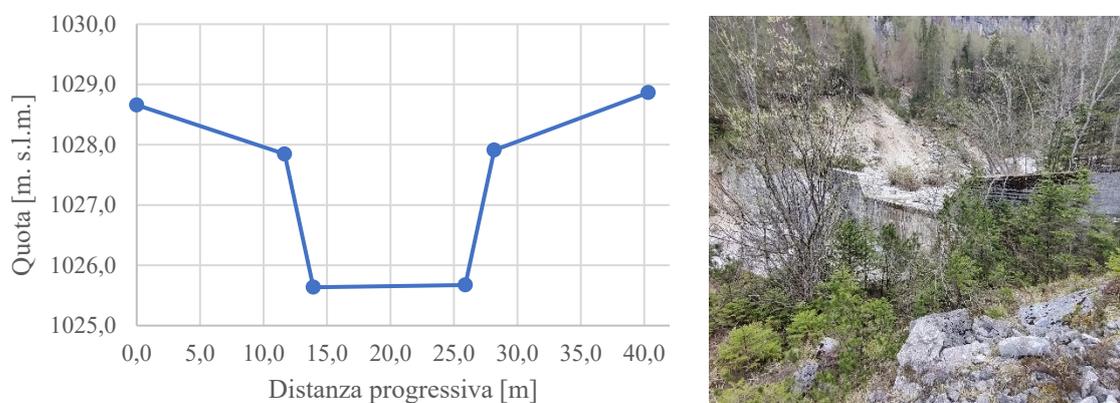


Figura 16 – Grafico dei dati topografici ottenuto dal rilievo della sezione della briglia 2 (a sinistra) e foto (a destra)

In questo tratto del torrente Pramper il contesto si presenta molto differente rispetto a quello riportato per la briglia 1. Esso, infatti, è caratterizzato sia a monte che a valle da una considerevole presenza di grossi massi, aventi diametri superiori al metro. Quest'ultimi però, come si può notare dalla Fig. 17, si trovano ad una distanza sufficiente dalla gaveta tale da non costituire un ostacolo in un eventuale evento futuro.

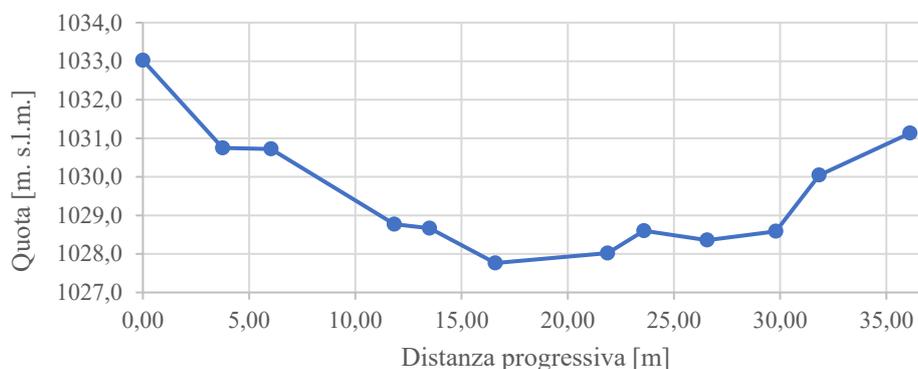


Figura 17 – Grafico dei dati topografici ottenuti dal rilievo della sezione della zona a monte della briglia 2 (sopra) e foto (sotto)

3.6.3 Briglia 3

La gaveta della terza briglia si trova ad un'altitudine media di 1058,46 m s.l.m. ed agisce su un tratto a monte di 138,42 m avente una pendenza media pari a 13,05%. Essa è caratterizzata da una base inferiore larga 12,00 m ed un'altezza pari a 1,99 m (Fig. 18).

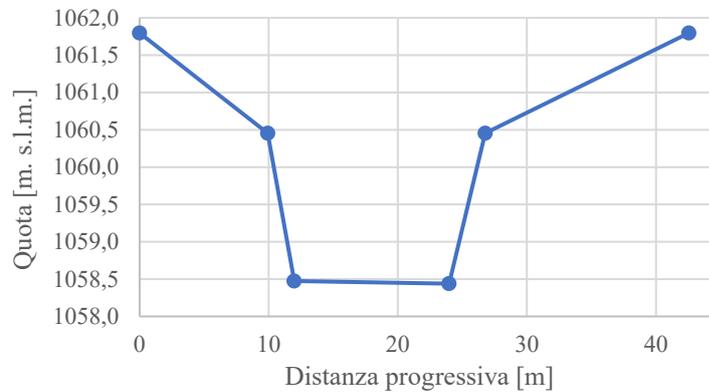


Figura 18 – Grafico dei dati topografici ottenuto dal rilievo della sezione della briglia 3 (sopra) e foto (sotto)

Il contesto a valle e a monte di questa briglia si presenta in maniera analoga a quanto descritto per la briglia 2, a differenza del fatto che, al momento dei rilievi, il tratto compreso tra la briglia 3 e 5 risultava prevalentemente assente di acqua corrente a pelo libero.

3.6.4 Briglia 5

La gaveta della quarta briglia si trova ad un'altitudine media di 992,30 m s.l.m. ed agisce su un tratto a monte di 160,89 m avente una pendenza media pari a 6,74%. Essa è caratterizzata da una base inferiore larga 10,76 m ed un'altezza pari a 1,84 m (Fig. 19).

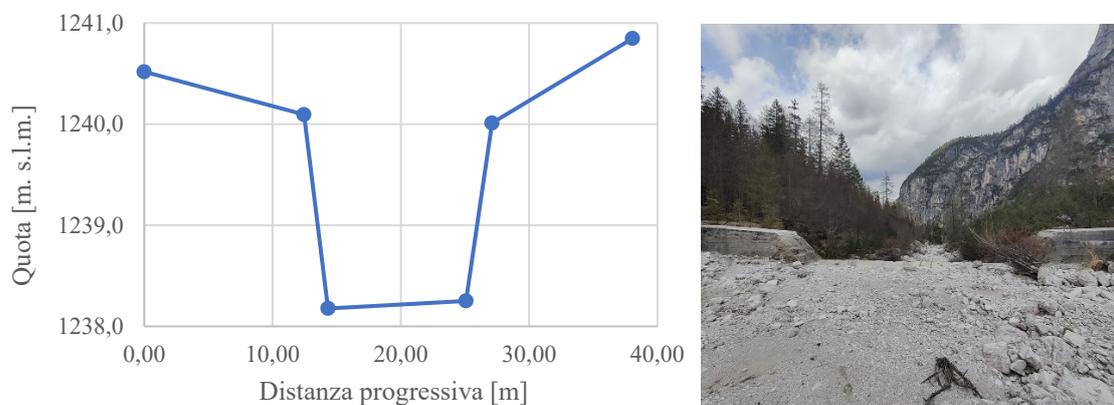


Figura 19 – Grafico dei dati topografici ottenuto dal rilievo della sezione della briglia 5 (a sinistra) e foto (a destra)

Il tratto a monte si presenta più ampio rispetto al resto del tratto analizzato, con una quasi totale assenza di sedimenti di diametro superiore al metro. Com'è possibile, inoltre, notare dalla Figura 20, l'alveo è occupato da una barra centrale di modeste dimensioni, con assenza di vegetazione su di essa.

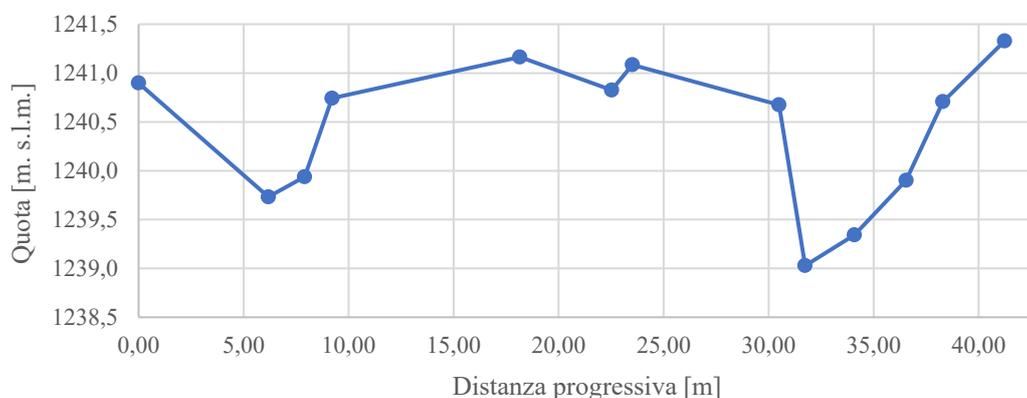


Figura 20 – Grafico dei dati topografici ottenuti dal rilievo della sezione della zona a monte della briglia 5 (sopra) e foto (sotto)

A valle invece il contesto è simile a quello descritto per la prima briglia; quindi, l'alveo subisce un restringimento significativo e la vegetazione si pone a ridosso delle sue sponde (Fig. 21).

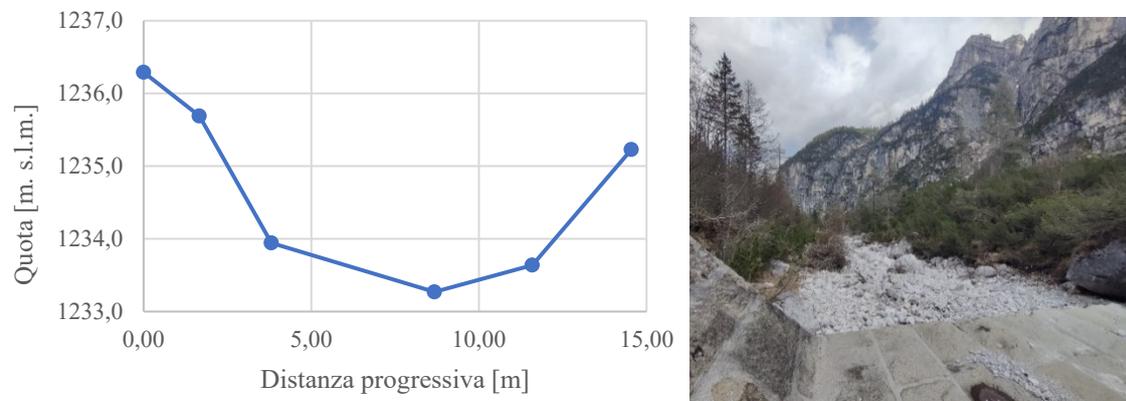


Figura 21 – Grafico dei dati topografici ottenuti dal rilievo della sezione della zona a valle della briglia 5 (a sinistra) e foto (a destra)

Infine, come anticipato per la briglia precedente, anche in questo tratto non è presente acqua corrente a pelo libero ma questa si infila a circa un centinaio di metri a monte dell'opera.

4 MATERIALI E METODI

4.1 Analisi statistico-probabilistica delle precipitazioni

In riferimento a quanto descritto nei capitoli precedenti, gli eventi di precipitazione possono talvolta rappresentare un problema per la sicurezza dell'uomo, in quanto non è possibile prevederne con certezza la data e la potenza di avvenimento.

Ciononostante, attraverso l'analisi statistica dei dati di precipitazione è possibile individuare la loro probabile frequenza di accadimento e la loro magnitudo.

I dati di precipitazione sono stati rilevati dalla stazione pluviometrica di Forno di Zoldo – Campo (12.1845653; 46.34666725 - EPSG 4258), situata nel Comune di Val di Zoldo ad una quota di 872 m s.l.m. (ARPAV, 2023).

Il metodo utilizzato nel presente caso studio prevede l'applicazione della distribuzione di Gumbel (in Ferro, 2006) ai massimi valori di pioggia registrati annualmente dalla stazione di riferimento nell'intervallo di anni che va dal 1985 al 2022. Il metodo, si basa sull'analisi di campioni aventi le seguenti caratteristiche:

1. Il campione deve rappresentare una serie storica di precipitazioni massime annuali;
2. La serie dei campioni in esame deve essere rilevata in maniera continuata e senza interruzioni;
3. Il campione deve essere omogeneo, quindi prodotto dalle stesse cause ed estratto dalla stessa popolazione (in altre parole rilevato dallo stesso pluviografo o dalla stessa comunità di stazioni prese in considerazione);
4. Il campione deve essere rappresentativo, ovvero deve contenere informazioni riguardo la popolazione che si sta analizzando (nel caso di piogge massime annuali di un'assegnata durata di precipitazione di una stazione si prende in considerazione una serie ininterrotta avente massima numerosità possibile) (in D'Agostino, 2022).

Le durate di precipitazione analizzate si riferiscono ai valori di precipitazione massimi annuali registrati dal 1985 al 2022 per le durate di 0,5, 1, 3, 6, 12, 24 e 48 ore.

Ogni popolazione di campioni è stata poi descritta attraverso l'individuazione dei relativi parametri statistici principali (vedi 5.1).

4.1.1 Regolarizzazione secondo Gumbel e Test Statistico di Matalas

Prima di parlare di regolarizzazione delle piogge è necessario introdurre e definire il concetto di Tempo di Ritorno (TR), ovvero il numero di anni entro il quale un evento assume una probabilità di essere eguagliato o superato ($F'(x)$) mediamente una sola volta (in D'Agostino, 2022).

Il valore di probabilità di eguagliamento o superamento ed il Tempo di Ritorno sono legati dalla seguente relazione:

$$TR = \frac{1}{F'(x)} = \frac{1}{1 - P(x)} \quad (19)$$

dove $F'(x)$ Probabilità di eguagliamento o superamento
 $P(x)$ Probabilità di non eguagliamento o superamento

Tramite la suddetta equazione è possibile quindi affermare che:

$$P(x) = \frac{TR - 1}{TR} \quad (20)$$

A questo punto è possibile determinare il valore di precipitazione attesa per un qualsiasi tempo di ritorno attraverso il calcolo della variabile ridotta. Tale variabile è rappresentata dalla variabile y (25) utilizzata nella regolarizzazione secondo Gumbel per il calcolo della probabilità di non eguagliamento o superamento $P(x)$ (21):

$$P(x) = e^{-e^{-y}} = e^{-e^{-\alpha(h-u)}} \quad (21)$$

dove $h = \frac{y}{\alpha} + u \quad (22)$

$$\alpha = \frac{1.283}{\sigma} \quad (23)$$

$$u = x_m - \frac{0.5772}{\alpha} \quad (24)$$

con σ Deviazione standard [mm]
 x_m Media [mm]

$$y = -\ln(-\ln(P_x)) \quad (25)$$

Dove i parametri α e u vengono ricavati con il metodo dei momenti (in D'Agostino, 2022).

La $P(x)$ viene determinata attraverso due procedimenti differenti, a seconda che si tratti del calcolo dell'altezza di precipitazione teorica, ottenuta tramite l'uso di una probabilità empirica (P_{em}) che rappresenti in maniera sufficientemente significativa la serie storica, e dell'altezza di precipitazione attesa, ottenuta attraverso l'equazione (20).

Ponendo infatti la P_{em} pari alla $P(x)$ è possibile verificare la bontà di adattamento della serie storica in esame.

$$P(x) = P_{em}(x) \quad (26)$$

con $P_{em}(x)$ Probabilità empirica

Tale verifica, quando la distribuzione dovesse assumere un andamento pseudo lineare, dimostrerebbe che la probabilità empirica scelta rappresenta in maniera sufficientemente significativa la popolazione di campioni e che esiste quindi una relazione lineare tra le altezze di precipitazioni in esame e la variabile ridotta.

Le verifiche della bontà di adattamento adottate per ogni serie storica analizzata sono state effettuate tramite le probabilità empiriche secondo Weibull (27) e Hazen (28) (in D'Agostino, 2022):

$$P_{emw} = \frac{i}{(N + 1)} \quad (27)$$

$$P_{emh} = \frac{i - 0.5}{N} \quad (28)$$

dove i Posizione in elenco [-]
 N Numerosità della popolazione [-]

In questo modo è possibile calcolare l'altezza di precipitazione teorica applicando la formula (22).

Ogni serie storica analizzata è rappresentata graficamente dal cartogramma di Gumbel, il quale permette di effettuare il confronto tra la serie storica e teorica in esame.

La verifica della bontà dell'adattamento può però avvenire non solo in maniera grafica, ma anche statistica. Infatti, una volta ottenuti i cartogrammi di Gumbel è possibile applicare il test statistico di Matalas, in quanto permette di verificare che la serie storica non differisca dalla serie teorica in maniera statisticamente significativa, ovvero per un livello inferiore al 5% (Matalas , et al., 1975).

$$|G - E(\gamma)| < 2\sigma(\gamma) \quad (29)$$

dove G Asimmetria del campione
 $E(\gamma)$ Media delle asimmetrie per distribuzioni con numerosità N
 $\sigma(\gamma)$ Deviazione standard delle asimmetrie per distribuzioni con numerosità N

$$G = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} = N^{1/2} \sum_{i=1,N} \frac{(x_i - x_m)^3}{[\sum_{i=1,N} (x_i - x_m)^2]^{3/2}} \quad (30)$$

dove N Numerosità del campione [-]
 x_i Valore di precipitazione i-esimo [mm]
 x_m Media dei valori di precipitazione [mm]

I parametri $E(\gamma)$ e $\sigma(\gamma)$ vengono infine ricavati in base alla numerosità del campione secondo la tabella della variazione che segue (Fig. 22):

Distribution	γ	Mean and Standard Deviation	n								
			10	20	30	40	50	60	70	80	90
Normal	0	$\bar{\mu}(G)$	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001
		$\bar{\sigma}(G)$	0.578	0.473	0.405	0.359	0.327	0.301	0.280	0.264	0.249
Uniform	0	$\bar{\mu}(G)$	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
		$\bar{\sigma}(G)$	0.471	0.330	0.267	0.230	0.206	0.187	0.174	0.161	0.152
Gumbel	1.14	$\bar{\mu}(G)$	0.525	0.740	0.841	0.898	0.937	0.964	0.986	1.002	1.015
		$\bar{\sigma}(G)$	0.625	0.586	0.555	0.526	0.504	0.485	0.468	0.452	0.437
Pareto	3	$\bar{\mu}(G)$	1.093	1.535	1.764	1.911	2.022	2.106	2.173	2.230	2.279
		$\bar{\sigma}(G)$	0.647	0.721	0.764	0.794	0.817	0.835	0.851	0.861	0.871
	4	$\bar{\mu}(G)$	1.155	1.647	1.915	2.094	2.234	2.342	2.430	2.508	2.575
		$\bar{\sigma}(G)$	0.661	0.764	0.833	0.886	0.931	0.968	1.001	1.027	1.053
	5	$\bar{\mu}(G)$	1.190	1.711	2.004	2.203	2.360	2.484	2.587	2.677	2.757
		$\bar{\sigma}(G)$	0.668	0.787	0.871	0.937	0.995	1.043	1.088	1.124	1.160
	10	$\bar{\mu}(G)$	1.254	1.831	2.169	2.407	2.600	2.755	2.887	3.005	3.110
		$\bar{\sigma}(G)$	0.681	0.826	0.936	1.026	1.106	1.176	1.240	1.296	1.350
	15	$\bar{\mu}(G)$	1.273	1.866	2.218	2.469	2.673	2.838	2.979	3.105	3.219
		$\bar{\sigma}(G)$	0.684	0.837	0.954	1.051	1.137	1.213	1.283	1.345	1.404

Figura 22 – Tabella della variazione (Matalas , et al., 1975)

4.1.2 Determinazione della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica (LSPP)

La determinazione della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica si basa sull'individuazione dei parametri a e n corrispondenti ad ogni TR, ottenuti attraverso l'interpolazione lineare dei valori ricavati dalle distribuzioni di probabilità espresse in una scala bi-logaritmica (in D'Agostino, 2022):

$$h = a * t^n \quad (31)$$

$$\log h = \log a + n * \log t \quad (32)$$

$$H = A + n * T \quad (33)$$

dove	h	Altezza di precipitazione attesa [-]
	t	Tempo di precipitazione [ore]

Questo procedimento permette di ottenere a e n dell'equazione (31) (ovvero le differenti LSPP) corrispondenti ai TR scelti.

4.2 Analisi di campo

Durante le giornate del 27 aprile e 29 giugno 2023 si sono condotti i rilievi granulometrici e GPS al fine di poter ottenere i dati relativi alle condizioni attuali del tratto analizzato del torrente Pramper.

4.2.1 Rilievi granulometrici

I rilievi granulometrici consistono in operazioni di misurazione dei sedimenti di uno o più tratti rappresentativi del corso d'acqua in esame. Tali operazioni risultano utili in quanto permettono di poter determinare diversi parametri, tra i quali la portata di moto incipiente, la pendenza di correzione e la stima della portata solida del tratto stesso (in Lenzi, 2022).

La misurazione della particella viene effettuata ricavando il valore del diametro intermedio (b), il quale corrisponde al valore intermedio tra le 3 dimensioni del sedimento stesso (a , b , c) ottenuto attraverso l'utilizzo di un calibro (analogico o digitale) o di una piastra forata (Fig. 23).

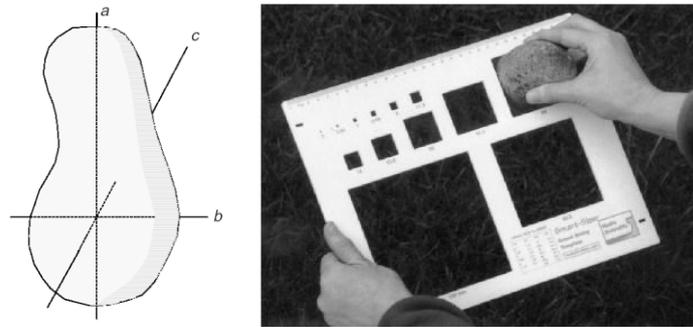


Figura 23 – Schematizzazione particella di terreno (sinistra), piastra forata (destra) (Lenzi, 2022)

La procedura applicata per l’acquisizione dei dati invece consta nel rilievo numerale lungo una linea, il quale prevede la misurazione del sedimento posto ad una interdistanza pari a due volte il diametro massimo individuato lungo il tratto in analisi, al fine di evitare il doppio conteggio degli elementi grossolani (in Lenzi, 2022).

I valori dei diametri (d_{xx}) ottenuti in millimetri vengono classificati seguendo la tabella dell’American Geophysical Union (in Lenzi, 2022) (Fig. 24), la quale permette di trasformare la distribuzione log normale in una gaussiana mediante l’indice ϕ (phi):

$$\phi = -\log_2 d_{xx} \quad (34)$$

Description of particle size	$\phi = -\log_2$	mm	$\psi = \log_2$
	- 12.0	4096	12.0
very large	- 11.5	2896	11.5
	- 11.0	2048	11.0
large	- 10.5	1448	10.5
Boulder	- 10.0	1024	10.0
Medium	- 9.5	724	9.5
	- 9.0	512	9.0
small	- 8.5	362	8.5
	- 8.0	256	8.0
large	- 7.5	181	7.5
Cobble	- 7.0	128	7.0
Small	- 6.5	90.5	6.5
	- 6.0	64	6.0
very coarse	- 5.5	45.3	5.5
	- 5.0	32	5.0
coarse	- 4.5	22.6	4.5
Gravel	- 4.0	16	4.0
medium	- 3.5	11.3	3.5
	- 3.0	8	3.0
fine	- 2.5	5.66	2.5
	- 2.0	4	2.0
very fine	- 1.5	2.83	1.5
Granule	- 1.0	2	1.0
very coarse	- 0.5	1.41	0.5
	0	1	0
coarse	+ 0.5	0.707	- 0.5
	+ 1.0	0.500	- 1.0
Sand	+ 1.5	0.354	- 1.5
medium	+ 2.0	0.250	- 2.0
	+ 2.5	0.177	- 2.5
fine	+ 3.0	0.125	- 3.0
	+ 3.5	0.088	- 3.5
very fine	+ 4.0	0.063	- 4.0
Silt	+ 8.0	0.0039	- 8.0
Clay	+ 12.0	0.00024	- 12.0

Figura 24 – Classificazione dell’American Geophysical Union (AGU) (in Lenzi, 2022)

A restituire una rappresentazione grafica della distribuzione dei sedimenti all'interno del tratto esaminato sono le curve della frequenza relativa e cumulata (Fig. 25), le quali permettono rispettivamente di individuare il numero di sedimenti appartenenti ad ogni classe, e la percentuale, riferita al totale, del sedimento più fine relativamente ad ogni classe diametrica.

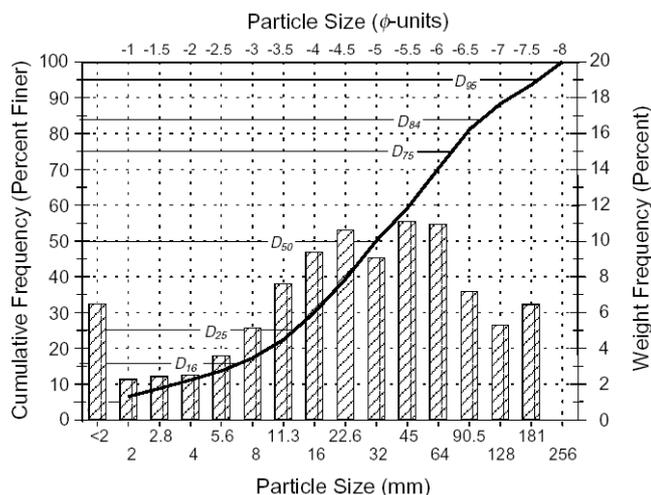


Figura 25 – Curva frequenza relativa e cumulata

La distribuzione dei sedimenti è solitamente descritta attraverso l'individuazione dei diametri percentili utili alla determinazione dei parametri sopra citati. Questi vengono ricavati attraverso la seguente formula (in Lenzi, 2022):

$$\phi_x = \phi_{inf} + \frac{\phi_{sup} - \phi_{inf}}{F_{sup} - F_{inf}} * (F_x - F_{inf}) \quad (35)$$

dove	ϕ_{sup}	Estremo di classe superiore [-]
	ϕ_{inf}	Estremo di classe inferiore [-]
	F_{sup}	Valore di frequenza cumulata superiore [-]
	F_{inf}	Valore di frequenza cumulata inferiore [-]
	F_x	Valore della frequenza da individuare [-]

Dal valore phi è possibile poi ottenere il valore in millimetri attraverso la seguente formula:

$$d_{xx} = 2^{\phi_x} \quad (36)$$

I rilievi granulometrici effettuati in campo sono stati condotti a valle della prima (n. 003) e seconda briglia (n. 002), e a monte della quarta (n. 001). Per il calcolo della pendenza di correzione delle briglie 1, 2 e 3 si sono utilizzati i diametri ottenuti dalla media dei rilievi 003 e 002, mentre si sono utilizzati i dati ottenuti dal rilievo 001 per la briglia 5.

4.2.2 Rilievi GPS

Nel 1978 il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America rilasciò nello spazio il primo satellite appartenente al progetto NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System). Tale progetto era stato inizialmente creato per scopi militari, ma con il passare degli anni è diventato uno strumento fondamentale in ambito civile, di monitoraggio ambientale e di rilevamento del territorio (in Menin, 2022).

Il suddetto sistema GPS si compone essenzialmente di tre segmenti:

- Il segmento spaziale, ovvero l'insieme dei satelliti che trasmettono i segnali a terra;
- Il segmento di controllo, ovvero l'insieme delle stazioni fisse a terra per la gestione dell'intero sistema;
- Il segmento utente, ovvero l'insieme delle strumentazioni in grado di ricevere ed elaborare i segnali per la determinazione della posizione a terra.

I sistemi di riferimento a cui esso si affida sono molteplici e differenti, a seconda che rappresentino l'intero globo oppure una regione specifica (detti rispettivamente globali e locali) (in Guarnieri, 2022).

Nel presente caso studio i rilievi sono stati effettuati con l'ausilio di ricevitori EMILD REACH RS2+ (Fig. 26) in modalità RTK con un errore orizzontale inferiore di 3 cm e riferendo le coordinate al sistema di riferimento globale WGS 84 / UTM zone 32N. I dati sono stati successivamente elaborati attraverso il software QGIS (v. 3.28.0).



Figura 26 – Strumento GPS utilizzato in campo

4.3 Metodi di determinazione della portata liquida al colmo

Il calcolo delle portate al colmo per un dato Tempo di Ritorno avviene attraverso la determinazione del tempo di corrivazione (T_c) e del deflusso generato (o pioggia efficace P_e), ottenuto attraverso l'utilizzo del parametro idrologico CN (in D'Agostino, 2022).

4.3.1 Tempo di corrivazione

Il tempo di corrivazione (T_c) consiste nel tempo impiegato da una particella d'acqua caduta sul punto "idraulicamente" più lontano del bacino per giungere alla sezione di chiusura (in D'Agostino, 2022).

Nel presente caso studio il tempo di corrivazione utilizzato è stato determinato attraverso l'applicazione del metodo cinematico (in D'Agostino, 2022).

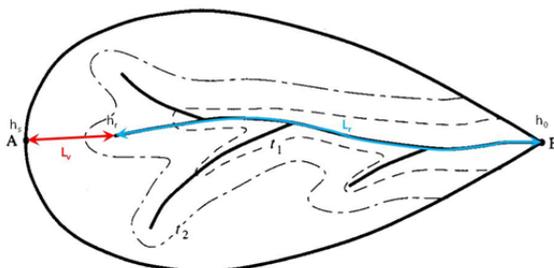


Figura 27 – Percorso di deflusso del metodo cinematico (D'Agostino, 2022)

$$T_C = T_v + T_R = \frac{L_v}{V_v} + \frac{L_R}{V_R} \quad (37)$$

$$T_c = \frac{L_R}{k_{Sv} * i_v^{0.5}} + \frac{L_V}{k_{SR} * i_R^{0.5}} \quad (38)$$

dove	T_c	Tempo di corrivazione totale [s]
	T_v	Tempo di corrivazione su versante [s]
	T_r	Tempo di corrivazione su reticolo idrografico [s]
	L_v	Lunghezza del versante [m]
	V_v	Velocità di versante [m/s]
	L_R	Lunghezza del collettore principale [m]
	V_R	Velocità di reticolo [m/s]
	k_{Sv}	Coefficiente di scabrezza di versante [$5 - 10 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$] *
	i_v	Pendenza del versante [m/m]
	k_{SR}	Coefficiente di scabrezza di reticolo [$0.1 - 0.15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$] *
	i_R	Pendenza del reticolo idrografico [m/m]

Nel presente caso studio si sono scelti i valori per il coefficiente di scabrezza di versante (k_{sv}) pari a $6 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, mentre per il coefficiente di scabrezza di reticolo (k_{SR}) pari a $0.11 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$.

Al fine di avere un confronto con ulteriori valori, si sono calcolati i tempi di corrivazione anche attraverso le formule empiriche secondo Giandotti e Ferro (in Ferro, 2006):

Giandotti:

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1,5 * L}{0,8 * \sqrt{H_m}} \quad (39)$$

dove	T_c	Tempo di corrivazione [ore]
	A	Area del bacino [km^2]
	L	Lunghezza del collettore prolungato fino allo spartiacque [km]
	H_m	Altezza media del bacino riferita alla sezione di chiusura [m]

Ferro 1:

$$T_c = 0,022 * \left(\frac{L_c}{i^{0,5}} \right)^{0,8} \quad (40)$$

dove	T_c	Tempo di corrivazione [min]
	L_c	Lunghezza del collettore [m]
	i	Pendenza del reticolo idrografico [m/m]

Ferro 2:

$$T_c = 0,675 * \sqrt{A} \quad (41)$$

dove	T_c	Tempo di corrivazione [ore]
	A	Area del bacino [km^2]

In riferimento a quanto sopra citato, per il presente caso studio si è utilizzato il tempo di corrivazione ottenuto dal metodo cinematico in quanto più affidabile, dato che in certi casi le formule empiriche tendono a sottostimare o sovrastimare i valori risultanti.

Per il calcolo di T_c si è utilizzata come riferimento di L_c la distanza a partire dalla briglia 1, la quale è risultata essere pari a 6766,67 m, mentre la L_v è risultata pari a 316.45 m.

4.3.2 Determinazione della pioggia efficace con il metodo SCS-CN

Il metodo del SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number) consiste nel metodo utilizzato per la stima della quantità di acqua piovana che viene assorbita da parte del terreno (F) per la successiva determinazione del deflusso superficiale (P_e) (in D'Agostino, 2022).

Il valore che esprime il comportamento dell'acqua durante l'infiltrazione è il Curve Number (CN), il quale è influenzato dai parametri di permeabilità del terreno (suolo), di uso del suolo (soprassuolo) e di condizioni di umidità antecedenti (AMC) (in Mishra & Singh, 2002).

Questo metodo si basa sul concetto che la pioggia efficace (P_e) corrisponde al prodotto tra la pioggia totale (P), ridotta delle perdite iniziali (I_a), ed il rapporto tra la quantità di infiltrazione effettiva (F) e la capacità di saturazione del terreno (S):

$$P_e = (P - I_a) * \frac{F}{S} \quad (42)$$

Il valore di infiltrazione (F) è reso noto tramite la sostituzione di quest'ultimo con il suo corrispettivo ottenuto dall'equazione di continuità:

$$F = P_e - I_a - P \quad (43)$$

Tale sostituzione permette poi di determinare il valore di deflusso superficiale (P_e):

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (44)$$

I valori corrispondenti alla capacità di saturazione del terreno (S) e alle perdite iniziali (I_a) vengono determinati attraverso l'uso del parametro CN:

$$S = 254 * \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (45)$$

$$I_a = (0 - 0,2) * S \quad (46)$$

dove I_a Perdite iniziali [mm] ; in questo caso 0,1 mm
 S Volume specifico di saturazione del terreno [mm]

In particolare, il valore I_a è stato posto pari al 10% in quanto, in ambiente montano, è necessario considerare anche la pioggia che viene intercettata da parte della vegetazione.

4.3.2.1 Il Curve Number (CN)

Il Curve Number (CN) è il parametro adimensionale utilizzato per la determinazione della propensione di un terreno a generare deflusso superficiale. Esso varia da un massimo di 100 ad un minimo di 0, ovvero rispettivamente da una condizione nella quale il suolo produce il massimo valore di pioggia efficace, ad una condizione nella quale tutta la precipitazione si infiltra (Mishra & Singh, 2002).

Come accennato in precedenza, il CN dipende da differenti parametri, tra i quali la tipologia di uso del territorio e il livello di permeabilità (o gruppo idrologico).

Quest'ultimo in particolare offre una descrizione delle caratteristiche del suolo dal punto di vista della capacità di infiltrazione dell'acqua (in D'Agostino, 2022):

- Classe A: bassissima capacità di scorrimento superficiale. Suoli con elevato tasso di infiltrazione anche quando sono completamente bagnati. Suoli con drenaggio molto buono, presenza cospicua di sabbie e ghiaie (detriti di falda, coperture alluvionali incoerenti);
- Classe B: tasso di infiltrazione moderato. Buon drenaggio. Suoli ancora di un certo spessore con presenza di terreni a grana fine;
- Classe C: tasso di infiltrazione basso. Strato nel suolo che impedisce il movimento discendente dell'acqua oppure suolo con abbondanza di tessiture fini;
- Classe D: tasso di infiltrazione bassissimo, se bagnati. Suoli argillosi, suoli con falda alta, suoli di spessore modesto su strati impermeabili.

Attraverso quindi la relazione che lega i parametri appena descritti è possibile determinare il valore del CN basandosi sulle seguenti tabelle:

1. SEMINATIVI

USO DEL SUOLO	Gruppi Idrologici del suolo			
	A	B	C	D
S1- Seminativo semplice	67	75	83	87
S2- Seminativo arborato	69	79	85	89
S6- Orti familiari non in ambito urbano	69	79	85	89
S7- Risaie	69	72	83	87

2. LEGNOSE AGRARIE

USO DEL SUOLO	Gruppi Idrologici del suolo			
	A	B	C	D
L1- Frutteti e frutti minori	65	75	82	86
L1v- Frutteti con vigneti	66	76	82	86
L2- Vigneti	67	77	83	87
L2f- Vigneti misti a frutteti	66	76	82	86
L3- Oliveti	65	75	82	86
L5- Castagneti da frutto	67	78	85	89
L7- Pioppeti	67	78	85	89
L8- Arboricoltura da legno	67	78	85	89

3. PRATI

USO DEL SUOLO	Gruppi Idrologici del suolo			
	A	B	C	D
P2- Prati permanenti di pianura	54	74	81	85
P2s- Prati permanenti di pianura con coltivazioni foraggere, associati a seminativi	59	75	83	87
P2sa- Prati permanenti con la presenza diffusa di filari arborei	69	81	86	89
P4- Prati e pascoli	49	71	86	89

4. BOSCHI

USO DEL SUOLO	Gruppi Idrologici del suolo			
	A	B	C	D
B1- Boschi di latifoglie	42	65	76	80
B4- Boschi di conifere	42	65	76	80
B5- Boschi misti di conifere e di latifoglie	42	65	76	80
B7- Rimboschimenti recenti	42	65	76	80

5. VEGETAZIONE NATURALE

USO DEL SUOLO	Gruppi Idrologici del suolo			
	A	B	C	D
N1- Vegetazione palustre e delle torbiere	98	98	98	98
N3- Vegetazione rupestre e dei detriti	68	79	86	89
N5- Vegetazione dei greti e delle zone spondali, spesso inondate	98	98	98	98
N8- Vegetazione arbustiva e cespuglieti	46	67	77	84
N8b- Vegetazione in evoluzione verso forme forestali	46	67	77	84

6. AREE STERILI

USO DEL SUOLO	Gruppi Idrologici del suolo			
	A	B	C	D
R1- Accumuli detritici ed affioramenti litoidi privi di vegetazione	72	82	87	90
R2- Aree estrattive	72	82	87	90
R3- Discariche	72	82	87	90
R4- Ambiti degradati soggetti ad usi diversi	72	82	87	90
R5- Aree sabbiose, ghiaiose e spiagge	25	55	70	77

7. AREE IDRICHE

USO DEL SUOLO	Gruppi Idrologici del suolo			
	A	B	C	D
A1- Ghiacciai e nevai	36	60	73	79
A2- Laghi, bacini e specchi d'acqua	100	100	100	100
A3- Alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali	100	100	100	100

8. AREE URBANIZZATE

USO DEL SUOLO	Gruppi Idrologici del suolo			
	A	B	C	D
Classe U				
111- Tessuto urbano continuo	89	92	94	95
1121- Tessuto residenziale discontinuo	77	85	90	92
1122- Tessuto residenziale rado e nucleiforme	60	75	84	89
1123- Tessuto residenziale sparso	55	71	80	85
12111- Insediamenti industriali, artigianali e commerciali	81	88	91	93
12112- Insediamenti produttivi agricoli	62	76	83	87
1212- Insediamenti dei grandi impianti di servizi pubblici e privati	81	88	91	93
122- Reti stradali e ferroviarie e spazi accessori	98	98	98	98
124- Aeroporti ed eliporti	72	82	87	89
133- Cantieri	72	82	87	89
1411- Parchi e giardini	68	79	86	89
1412- Aree verdi incolte interne all'urbanizzato	68	79	86	89
1412- Impianti sportivi	49	69	79	84
1422- Campeggi, strutture turistiche, ricreative	49	69	79	84

Tabella 2 – Valori del CNII secondo la Legenda di Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali (Rosso, 2004)

I valori del CN riportati nella Tabella 2 si riferiscono ad una condizione di saturazione del terreno intermedia (CNII) (Rosso, 2004) e la colonna di riferimento utilizzata per il calcolo del valore del CNII medio del bacino Pramper è quella appartenente al gruppo idrologico B (ARPAV, 2022). Dalla media ponderata quindi dei valori del CNII delle diverse aree caratterizzanti il bacino (Fig. 3), questo è risultato ottenere un CNII medio pari a 70,49.

4.3.3 Analisi idrologica

Lo studio degli effetti di un evento di precipitazione sulle portate del corso d'acqua viene effettuato attraverso l'analisi idrologica, la quale mira a determinare l'idrogramma di piena al fine di descrivere l'andamento ed il valore totale della portata liquida transitante per la sezione di chiusura (Zaramella & Gregoretti, 2021).

In riferimento a quanto riportato nel capitolo 4.3.1, per la determinazione delle portate liquida e solida si sono riferiti gli afflussi rispetto alla briglia 1. Questo significa che in confronto a quanto riportato nella Tabella 1, l'area del bacino si riduce a 13,59 km² e la lunghezza del collettore a 6766,67 m.

Di norma un evento di piena, caratterizzato da una distribuzione della precipitazione costante ed uniforme nel tempo e nello spazio, assume un andamento "a campana". Questa funzione è composta da una fase iniziale definita "ramo di concentrazione" ed una fase finale definita "ramo di esaurimento", separate dall'apice che assume il nome di colmo di piena (Fig. 28) (Zaramella & Gregoretti, 2021).

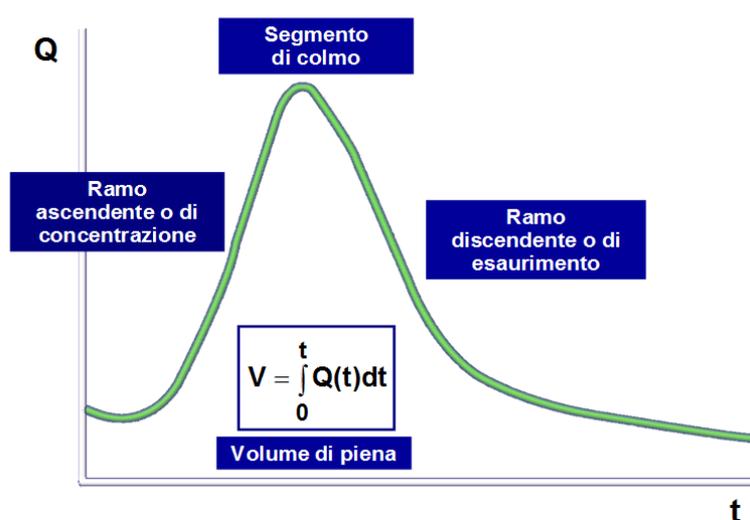


Figura 28 – Rappresentazione di un idrogramma di piena (Zaramella & Gregoretti, 2021)

Esistono differenti metodologie per il calcolo dell'idrogramma di piena. Nel presente caso studio si sono determinati i valori delle portate attraverso il metodo razionale e il metodo cinematico.

4.3.3.1 Metodo razionale

Il metodo razionale (Fig. 29) risulta particolarmente affidabile per bacini di piccole dimensioni, con una superficie inferiore ai 2-3 km², sebbene possa essere comunque applicabile anche a bacini di dimensioni maggiori (< 50 km²) (in D'Agostino, 2022).

Per poterlo applicare però è necessario assumere le seguenti ipotesi:

- La pioggia deve avere intensità costante ed essere distribuita in maniera uniforme su tutto il bacino;
- La durata di precipitazione considerata critica per il bacino è pari al tempo di corrivazione del bacino stesso;
- L'idrogramma di piena assume una forma triangolare, avente come base una durata pari a due volte il tempo di corrivazione.

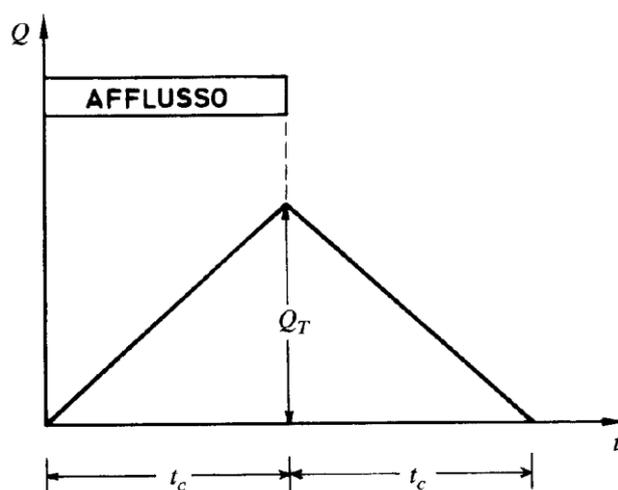


Figura 29 – Idrogramma di piena ottenuto con il metodo cinematico (D'Agostino, 2022)

Secondo la prima ipotesi quindi il metodo razionale utilizza come tempo di precipitazione (T_p), la durata pari al tempo di corrivazione (T_c), in quanto questa situazione simula la maggiore intensità di precipitazione sul bacino. Si è dimostrato infatti durante il processo di determinazione delle portate al colmo per $T_p = T_c$, che per un tempo di precipitazione superiore al tempo di corrivazione, l'intensità diminuisce gradualmente in maniera direttamente proporzionale.

La determinazione dell'idrogramma di piena è stata ottenuta tramite l'applicazione della formula della portata (47), riferita all'inizio e alla fine della durata di pioggia, e alla conclusione del drenaggio di tutta l'acqua accumulata nel bacino.

Inoltre, al fine di ottenere una più realistica semplificazione dell'evento, si è utilizzato il parametro CNII per la determinazione della pioggia efficace, come precedentemente accennato nel capitolo 4.3.2.

$$Q = \frac{\text{Volume}}{\text{Tempo}} = \frac{P_e * A}{t} \quad (47)$$

dove	Pe	Pioggia efficace [m]
	A	Area [m ²]
	t	Tempo di precipitazione [s]

Da essa è possibile in seguito ricavare il volume di acqua transitante per la sezione di chiusura in un qualsiasi istante dell'evento; in questo caso si esplicita la formula per il calcolo del volume al picco:

$$V_e = Q_{max} * t_p \quad (48)$$

Q _{max}	Portata massima [m ³ /s]
t _p	Tempo di precipitazione [s]

4.3.3.2 Metodo cinematico

Il metodo cinematico, a differenza del metodo razionale, prende in considerazione una serie di fattori aggiuntivi legati alla geometria del bacino, in quanto questi risultano di rilievo nella determinazione della funzione dell'onda di piena (in D'Agostino, 2022).

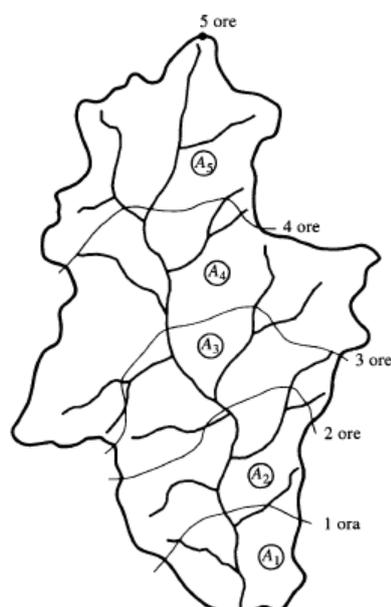


Figura 30 – Schema di suddivisione in sottobacini del metodo cinematico (D'Agostino, 2022)

Questo metodo prevede che l'onda di piena che si forma nella parte alta del bacino si propaghi attraverso la rete di drenaggio, lungo i canali e i corsi d'acqua che la compongono. In particolare, il metodo prevede la suddivisione del bacino in una serie di sottobacini, ognuno dei quali viene analizzato separatamente, e la successiva aggregazione dei valori da essi ottenuti (in D'Agostino, 2022).

Le aree di ogni sottobacino vengono determinate attraverso la curva delle aree cumulate rapportata al tempo. Questa curva viene ricavata attraverso l'inversione della curva ipsometrica dimensionale (Fig. 9) supponendo che ai punti del bacino a medesima quota (isoipse) corrispondano gli stessi tempi di contribuzione alla sezione di chiusura: isoipse = isocorive.

Il procedimento di conversione appena citato avviene ponendo sull'asse delle ascisse il tempo di contribuzione al posto della quota di elevazione, e sull'asse delle ordinate l'area contribuente per un tempo 't' dall'inizio della precipitazione al posto dell'area contribuente in funzione della quota (in D'Agostino, 2022):

$$t = T_c * \frac{h_i - h_0}{h_{max} - h_0} \quad (49)$$

dove	t	Tempo di contribuzione [min]
	T _c	Tempo di corrivazione [min]
	h _i	Quota i-esima [m]
	h ₀	Quota minima del bacino [m]
	h _{max}	Quota massima del bacino [m]

$$A(t) = A_{TOTALE} - A(h) \quad (50)$$

dove	A(t)	Area contribuente in funzione del tempo
	A _{TOTALE}	Area totale del bacino
	A(h)	Area in funzione della quota

Come per il metodo razionale però, anche in questo caso è necessario tenere in considerazione determinate assunzioni (in D'Agostino, 2022):

- Il contributo idrologico generato da ogni sottobacino viene trasferito alla sezione di chiusura senza che esso interferisca con le altre aree attraversate;
- Il contributo (P_e) derivante da un qualsiasi punto del bacino arriva alla sezione di chiusura transitando sempre lungo lo stesso percorso;
- Le linee isocorrive si mantengono costanti durante tutta la durata dell'evento;
- La portata totale si ottiene dalla sommatoria delle portate prodotte da ogni sottobacino passanti per la sezione di chiusura nello stesso momento.

Gli idrogrammi di piena possono essere calcolati assumendo diverse tipologie di distribuzione della pioggia nel tempo. In questo studio sono state prese in considerazione una distribuzione costante nel tempo (P_{cost}), e una distribuzione a blocchi alterni (P_{ba}).

Per quest'ultimo, i parziali di altezza di pioggia previsti dalla linea segnalatrice di possibilità pluviometrica considerata vengono appunto distribuiti in maniera "alternata" lungo tutta la durata dell'evento, con i valori maggiori nella fase centrale e minori ad inizio e fine evento.

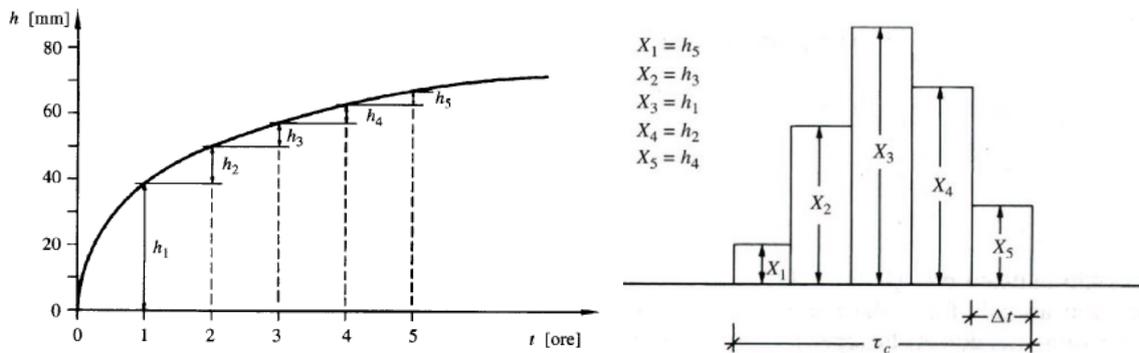


Figura 31 – Costruzione pluviogramma a blocchi alterni

Ai fini del presente caso studio si è utilizzato come idrogramma di riferimento, quello ottenuto dall'applicazione del metodo cinematico con precipitazione costante calcolato per un evento di pioggia con tempo di ritorno pari a 30 anni e 100 anni.

5 RISULTATI

5.1 Risultati dell'analisi statistico-probabilistica delle precipitazioni

In riferimento a quanto riportato nel capitolo 4.1, di seguito si riportano i risultati delle analisi statistiche svolte sui valori massimi di precipitazione annui registrati dal 1985 al 2022 dalla stazione di monitoraggio dell'ARPAV di Forno di Zoldo - Campo (ARPAV, 2023).

I risultati vengono presentati in ordine crescente di durata di precipitazione, per cui dalla durata di precipitazione di 0,5 ore fino a 48 ore.

5.1.1 Durata 0,5 ore

Descrizione della popolazione di campioni:

N	38,0
minimo (x_{min}) [mm]	10,4
massimo (x_{max}) [mm]	34,8
media (x_m) [mm]	18,4
varianza (σ^2) [mm]	34,2
deviazione standard (σ) [mm]	5,85
coeff. Variazione (CV) [-]	0,32
mediana ($x_{mediana}$) [mm]	17,5

Tabella 3 – Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 0,5 ore

La serie storica di campioni di precipitazione sopra riportata si riferisce ad una serie ininterrotta di 38 campioni (N), caratterizzata da un minimo di 10,4 mm ed un massimo di 34,8 mm.

Come si può notare, per una durata di precipitazione di trenta minuti, i valori di pioggia registrati non risultano particolarmente elevati. È utile comunque ricordare che precipitazioni di minore durata sono caratterizzate da una maggiore intensità, a differenza degli eventi di durata maggiore, per i quali i volumi di deflusso generato sono più cospicui (D'Agostino, 2022).

In Fig. 32 e 33 si riporta rispettivamente il confronto tra le probabilità empiriche di Weibull (P_{emw}) e Hazen (P_{emh}) per la ricerca del miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica.

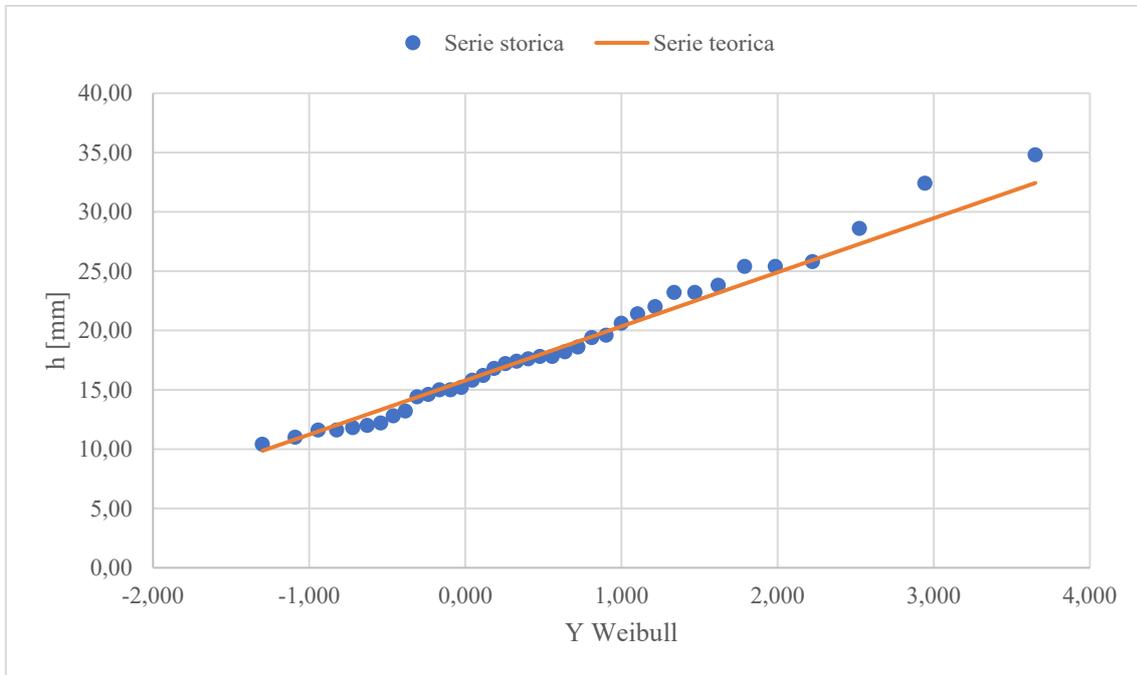


Figura 32 – Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 0,5h$

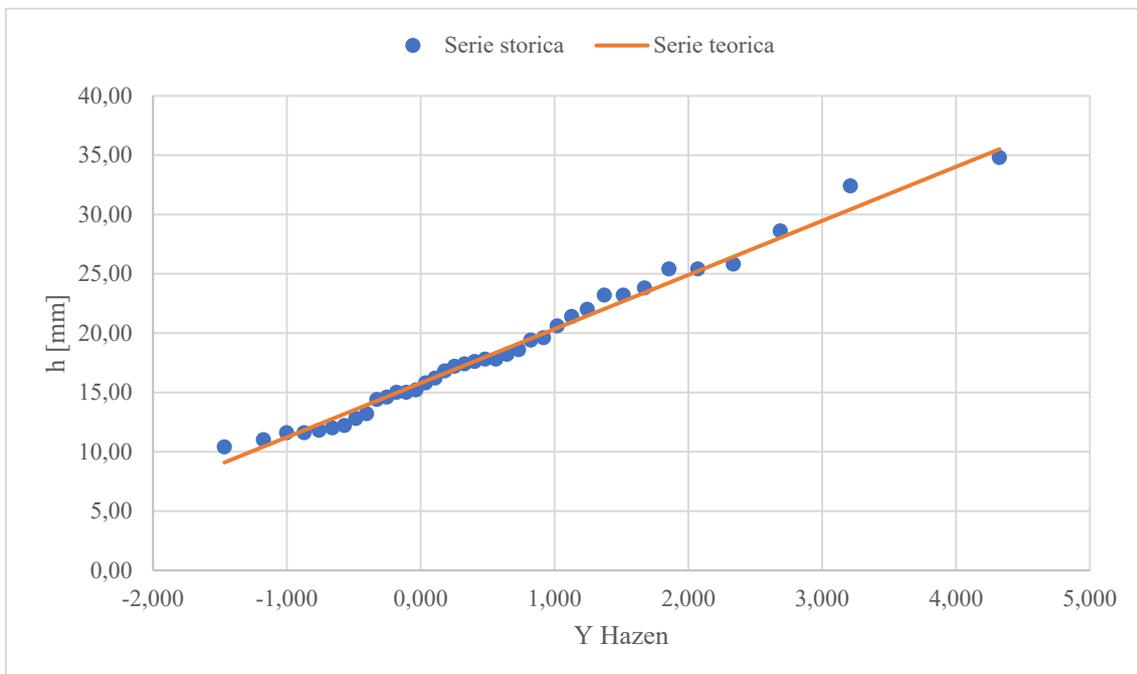


Figura 33 – Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 0,5h$

Dal confronto dei due metodi per ricavare il Cartogramma di Gumbel, ne risulta che ad aver ottenuto una migliore approssimazione dei dati è stato il metodo secondo Hazen, soprattutto nella parte finale del grafico (valori nell'intorno di $Y_{Hazen} = 4$).

Una volta ottenuti i cartogrammi di Gumbel è stato applicato il test statistico di Matalas, per verificare che la serie storica non differisse dalla serie teorica in maniera statisticamente significativa, ovvero per un livello inferiore al 5% (Matalas, et al., 1975).

In questo caso per una numerosità di 38 campioni, il valore della media $E(\gamma)$ corrisponde a 0.881 ed il valore della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ a 0.535 (Fig. 22) ottenendo:

media	18,42
$N^{0.5}$	6,164
G	0,893
G - E	0,012
2σ	1,069
TEST	verificato
	0,012 < 1,069

Tabella 4 – Verifica Test Matalas 0,5h

Come si può dedurre dalla soprastante, il Test Matalas per la popolazione di campioni di precipitazioni registrati in 0,5 ora ha ottenuto esito positivo.

5.1.2 Durata 1 ore

Descrizione della popolazione di campioni:

N	38,0
minimo (x_{min}) [mm]	11,6
massimo (x_{max}) [mm]	46,6
media (x_m) [mm]	23,6
varianza (σ^2) [mm]	55,3
deviazione standard (σ) [mm]	7,43
coeff. Variazione (CV) [-]	0,32
mediana ($x_{mediana}$) [mm]	23,0

Tabella 5 - Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 1 ore

Anche in questo caso la serie storica di campioni di precipitazione sopra riportata si riferisce ad una serie ininterrotta di 38 campioni, la quale è caratterizzata però da un valore minimo di 11,6 mm ed un massimo di 46,6 mm.

Rispetto alla popolazione della durata precedente, in questo caso il valore massimo registrato è risultato superiore di più di un ordine di grandezza, e anche il valore della media (x_m) conferma quanto sopra accennato.

In Fig. 34 e 35 si riporta rispettivamente il confronto tra le probabilità empiriche di Weibull e Hazen per la ricerca del miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica.

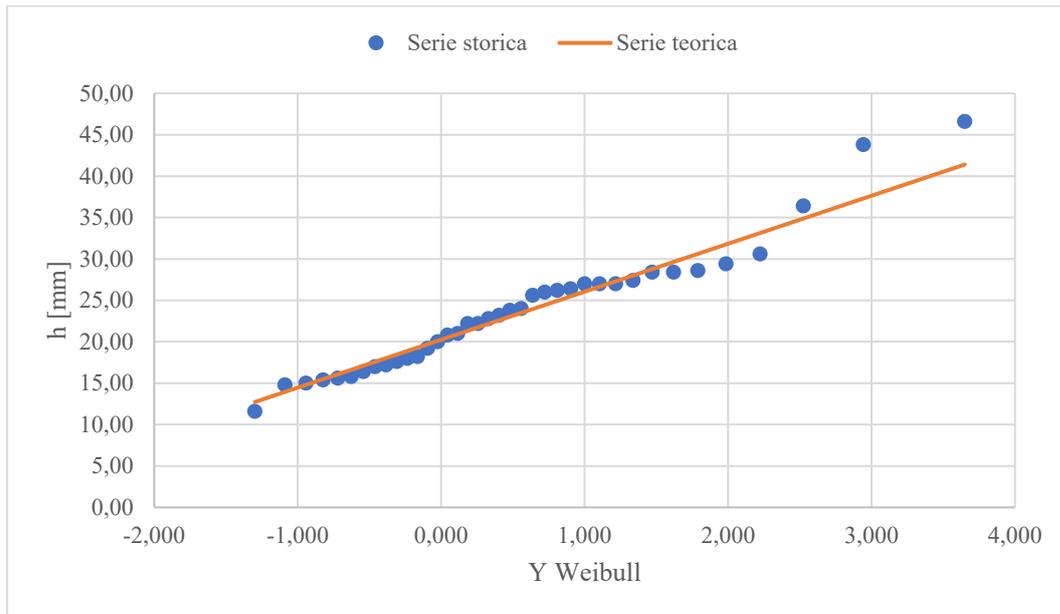


Figura 34 - Cartogramma di Gumbel con $P_{ew} 1h$

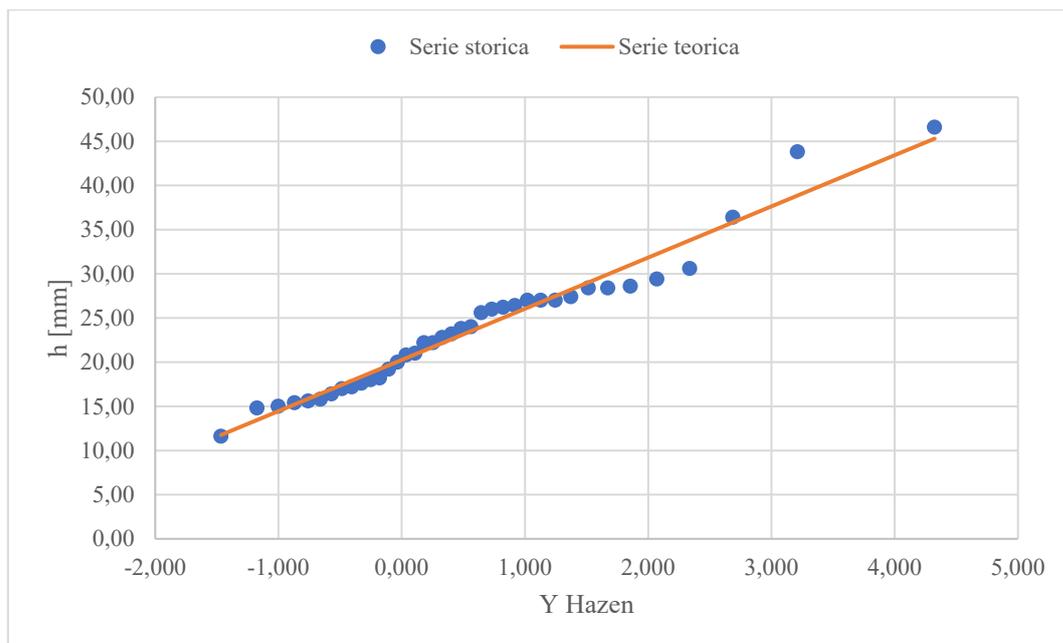


Figura 35 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 1h$

Dal confronto dei due metodi per ricavare il Cartogramma di Gumbel, ne risulta che ad aver ottenuto una migliore approssimazione dei dati è stato il metodo secondo Hazen, soprattutto nella parte finale del grafico (valori nell'intorno di $Y_{Hazen} = 4$).

Una volta ottenuti i cartogrammi di Gumbel è stato applicato il test statistico di Matalas, per verificare che la serie storica non differisse dalla serie teorica in maniera statisticamente significativa, ovvero per un livello inferiore al 5% (Matalas, et al., 1975).

In questo caso per una numerosità di 38 campioni, il valore della media $E(\gamma)$ corrisponde a 0.881 ed il valore della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ a 0.535 (Fig. 22), ottenendo:

media	23,59
$N^{0.5}$	6,164
G	1,116
G - E	0,235
2σ	1,069
TEST	verificato
	0,235 < 1,069

Tabella 6 - Verifica Test Matalas 1h

Come si può dedurre dalla soprastante, il Test Matalas per la popolazione di campioni di precipitazioni registrati in 1 ora ha ottenuto esito positivo.

5.1.3 Durata 3 ore

Descrizione della popolazione di campioni:

N	38,0
minimo (x_{min}) [mm]	14,6
massimo (x_{max}) [mm]	63,4
media (x_m) [mm]	37,6
varianza (σ^2) [mm]	123,2
deviazione standard (σ) [mm]	11,10
coeff. Variazione (CV) [-]	0,30
mediana ($x_{mediana}$) [mm]	34,5

Tabella 7 - Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 3 ore

Come per le due durate di precipitazione precedenti, anche in questo caso, i campioni costituenti la popolazione sono 38. Il valore minimo registrato equivale a 14,6 mm, mentre il valore massimo risulta essere pari a 63,4 mm.

Dalla tabella soprastante si può chiaramente notare la differenza che esiste già in termini di millimetri di pioggia rispetto ad una durata di registrazione di mezz'ora e anche di un'ora.

In Fig. 36 e 37 si riporta rispettivamente il confronto tra le probabilità empiriche di Weibull e Hazen per la ricerca del miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica:

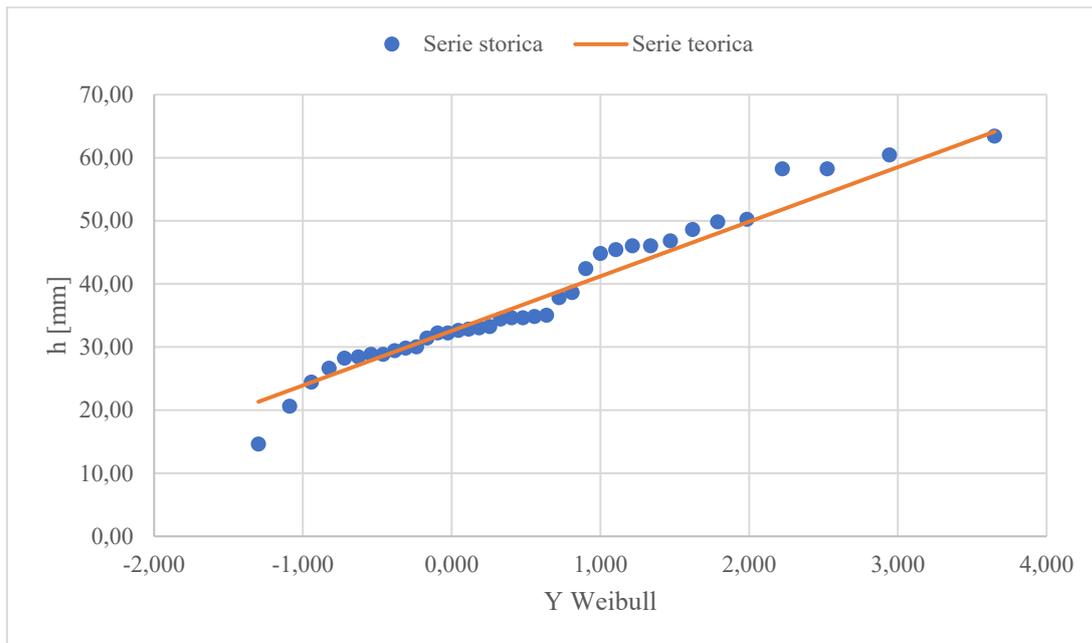


Figura 36 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 3h$

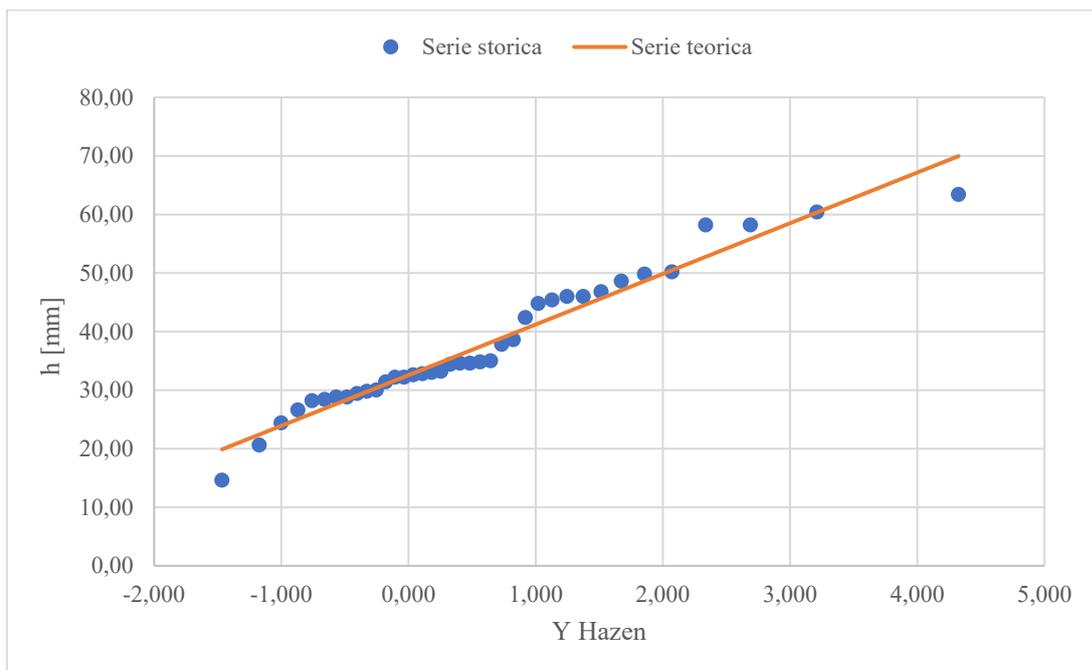


Figura 37 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 3h$

Rispetto alle due durate di registrazione precedenti, in questo caso entrambe le serie teoriche approssimano le serie storiche in maniera significativa. A dimostrare però un migliore adattamento è nuovamente la probabilità empirica secondo Hazen.

Una volta ottenuti i cartogrammi di Gumbel è stato applicato il test statistico di Matalas, per verificare che la serie storica non differisse dalla serie teorica in maniera statisticamente significativa, ovvero per un livello inferiore al 5% (Matalas , et al., 1975).

In questo caso per una numerosità di 38 campioni, il valore della media $E(\gamma)$ corrisponde a 0.881 ed il valore della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ a 0.535 (Fig. 22), ottenendo:

media	37,55
$N^{0.5}$	6,164
G	0,558
G - E	0,323
2σ	1,069
TEST	verificato
	0,323 < 1,069

Tabella 8 - Verifica Test Matalas 3h

Come si può dedurre dalla soprastante, il Test Matalas per la popolazione di campioni di precipitazioni registrati in 3 ore ha ottenuto esito positivo.

5.1.4 Durata 6 ore

Descrizione della popolazione di campioni:

N	38,0
minimo (x_{min}) [mm]	24,8
massimo (x_{max}) [mm]	92,8
media (x_m) [mm]	55,5
varianza (σ^2) [mm]	292,1
deviazione standard (σ) [mm]	17,09
coeff. Variazione (CV) [-]	0,31
mediana ($x_{mediana}$) [mm]	52,2

Tabella 9 - Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 6 ore

La serie storica di campioni di precipitazione sopra riportata si riferisce ad una serie ininterrotta di 38 campioni, caratterizzata da un minimo di 24,8 mm ed un massimo di 92,8 mm.

In Fig. 38 e 39 si riporta rispettivamente il confronto tra le probabilità empiriche di Weibull e Hazen per la ricerca del miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica.

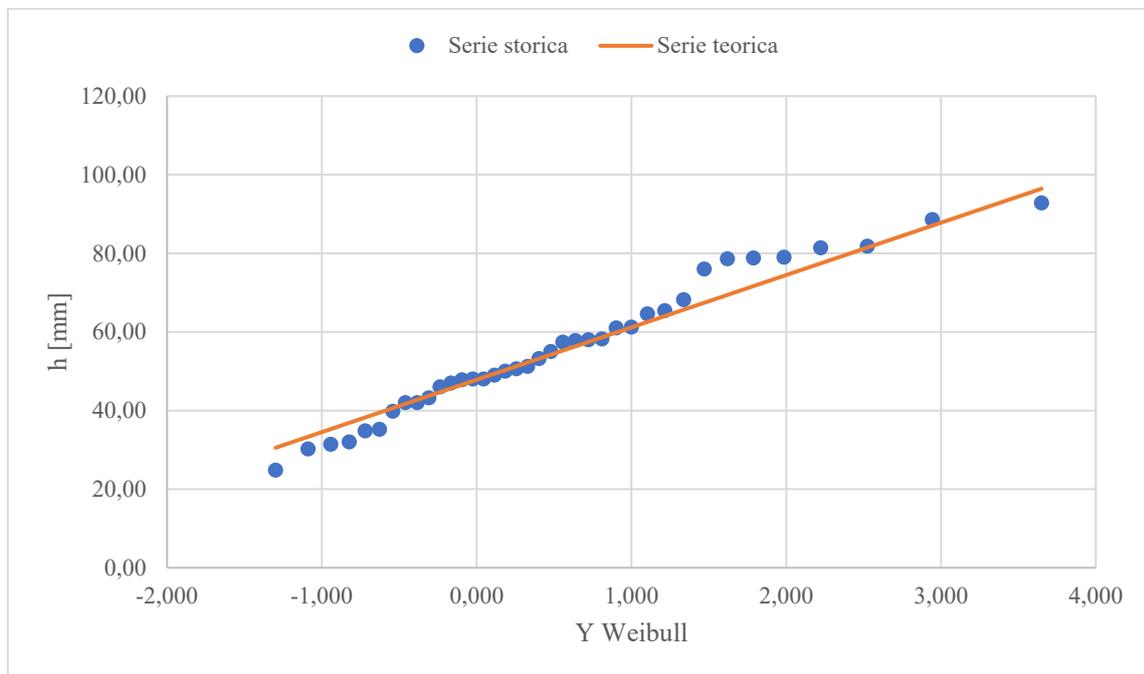


Figura 38 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emw} 6h$

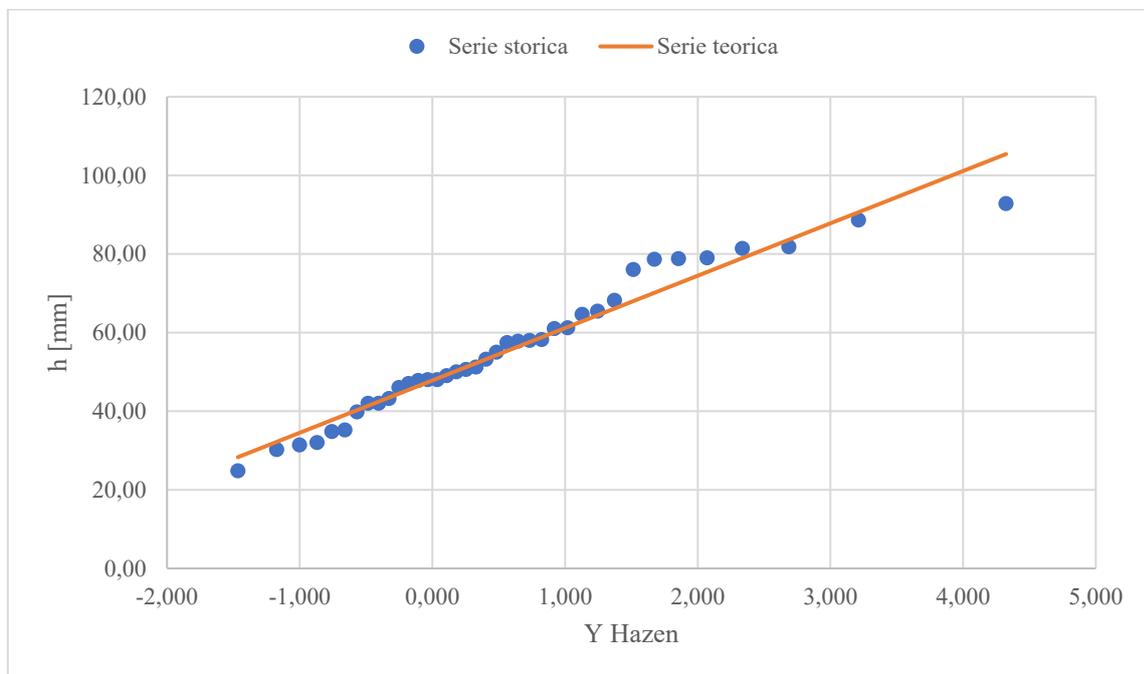


Figura 39 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 6h$

Dal confronto tra le due figure precedenti si può notare come anche in questo caso l'approssimazione delle due serie teoriche utilizzate, abbiano dimostrato un buon

adattamento alla serie storica. Data però la bontà di approssimazione apprezzata per le durate di precipitazione precedenti si è utilizzata la probabilità empirica di Hazen.

Una volta ottenuti i cartogrammi di Gumbel è stato applicato il test statistico di Matalas, per verificare che la serie storica non differisse dalla serie teorica in maniera statisticamente significativa, ovvero per un livello inferiore al 5% (Matalas, et al., 1975).

Per una numerosità di 38 campioni, il valore della media $E(\gamma)$ corrisponde a 0.881 ed il valore della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ a 0.535 (Fig. 22), ottenendo:

media	55,53
$N^{0.5}$	6,164
G	0,370
G - E	0,511
2σ	1,069
TEST	verificato
	0,511 < 1,069

Tabella 10 - Verifica Test Matalas 6h

Come si può dedurre dalla soprastante, il Test Matalas per la popolazione di campioni di precipitazioni registrati in 6 ore ha ottenuto esito positivo.

5.1.5 Durata 12 ore

Descrizione della popolazione di campioni:

N	37,0
minimo (x_{min}) [mm]	33,2
massimo (x_{max}) [mm]	150,2
media (x_m) [mm]	82,3
varianza (σ^2) [mm]	821,5
deviazione standard (σ) [mm]	28,66
coeff. Variazione (CV) [-]	0,35
mediana ($x_{mediana}$) [mm]	80,0

Tabella 11 – Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 12 ore

Per la durata di registrazione di 12 ore i campioni presi in esame risultano 37, a differenza delle popolazioni di campioni presentati fino ad ora, in quanto la stazione di rilevamento di riferimento non ha rilevato il valore di intensità massima del 2018. La popolazione è comunque caratterizzata da un valore minimo di 33,2 mm e da un massimo di 150,2 mm.

In Fig. 40 e 41 si riporta rispettivamente il confronto tra le probabilità empiriche di Weibull e Hazen per la ricerca del miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica.

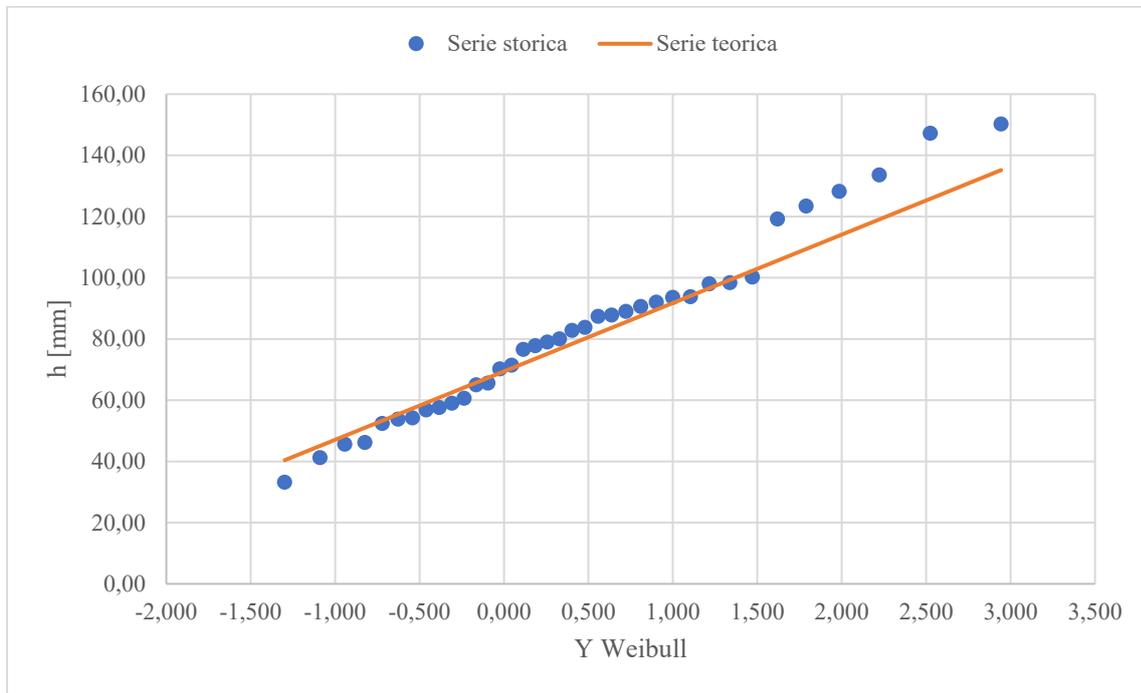


Figura 40 - Cartogramma di Gumbel con $P_{eww} 12h$

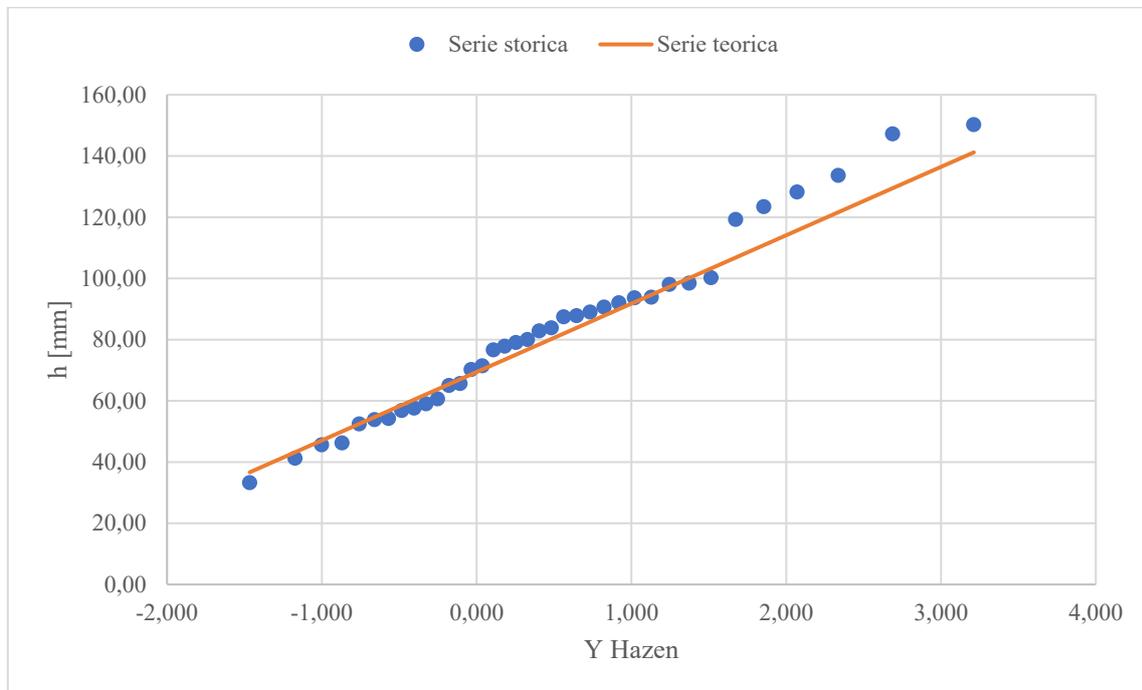


Figura 41 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 12h$

Dal confronto dei due metodi per ricavare il Cartogramma di Gumbel, ne risulta che ad aver ottenuto una migliore approssimazione dei dati è stato il metodo secondo Hazen, soprattutto nella parte finale del grafico (valori nell'intorno di $Y_{Hazen} = 3$).

Una volta ottenuti i cartogrammi di Gumbel è stato applicato il test statistico di Matalas, per verificare che la serie storica non differisse dalla serie teorica in maniera statisticamente significativa, ovvero per un livello inferiore al 5% (Matalas, et al., 1975).

Sebbene la numerosità sia calata da 38 a 37 campioni, il valore della media $E(\gamma)$ corrisponde sempre a 0.881 ed allo stesso modo anche il valore della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ rimane 0.535 (Fig. 22), ottenendo:

media	82,31
$N^{0.5}$	6,083
G	0,610
G - E	0,271
2σ	1,069
TEST	verificato
	0,271 < 1,069

Tabella 12 - Verifica Test Matalas 12h

Come si può dedurre dalla soprastante, il Test Matalas per la popolazione di campioni di precipitazioni registrati in 12 ore ha ottenuto esito positivo.

5.1.6 Durata 24 ore

Descrizione della popolazione di campioni:

N	36,0
minimo (x_{min}) [mm]	42,6
massimo (x_{max}) [mm]	226,4
media (x_m) [mm]	114,0
varianza (σ^2) [mm]	1742,8
deviazione standard (σ) [mm]	41,75
coeff. Variazione (CV) [-]	0,37
mediana ($x_{mediana}$) [mm]	107,5

Tabella 13 – Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 24 ore

In questo caso la popolazione è calata nuovamente di un campione, in quanto la stazione pluviometrica di Forno di Zoldo – Campo non ha registrato i valori degli anni 1985 e 1988.

Ad ogni modo, la popolazione assume un valore minimo pari a 42,6 mm ed un valore massimo di 226,4.

In Fig. 42 e 43 si riporta rispettivamente il confronto tra le probabilità empiriche di Weibull e Hazen per la ricerca del miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica.

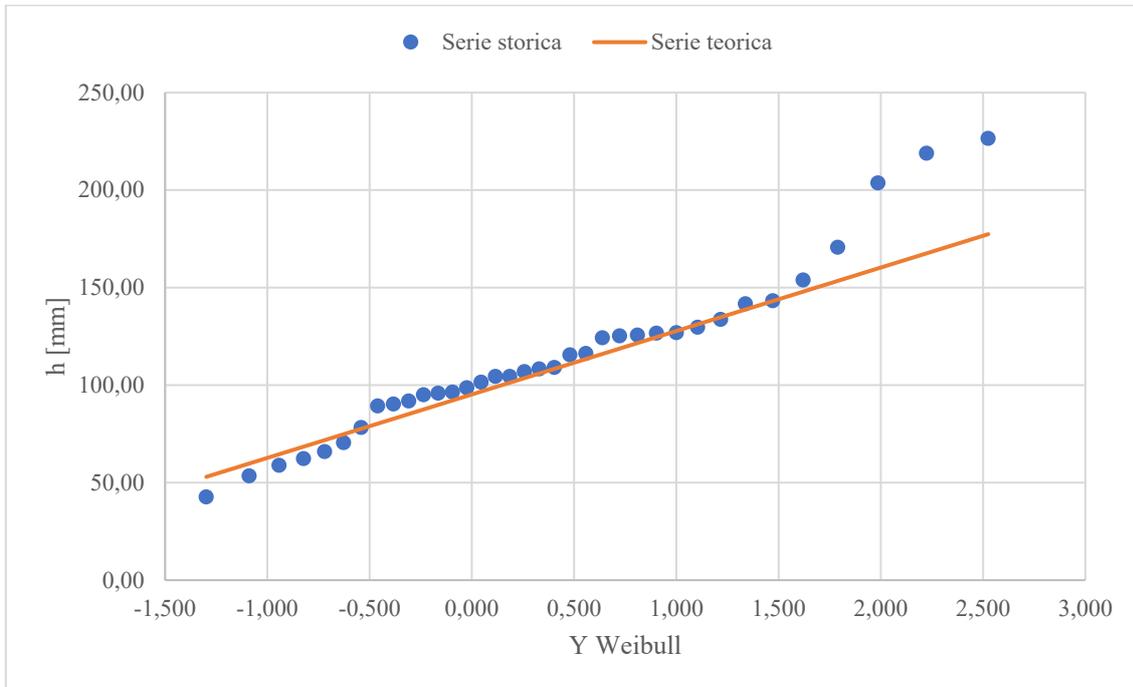


Figura 42 - Cartogramma di Gumbel con $P_{ewh} 24h$

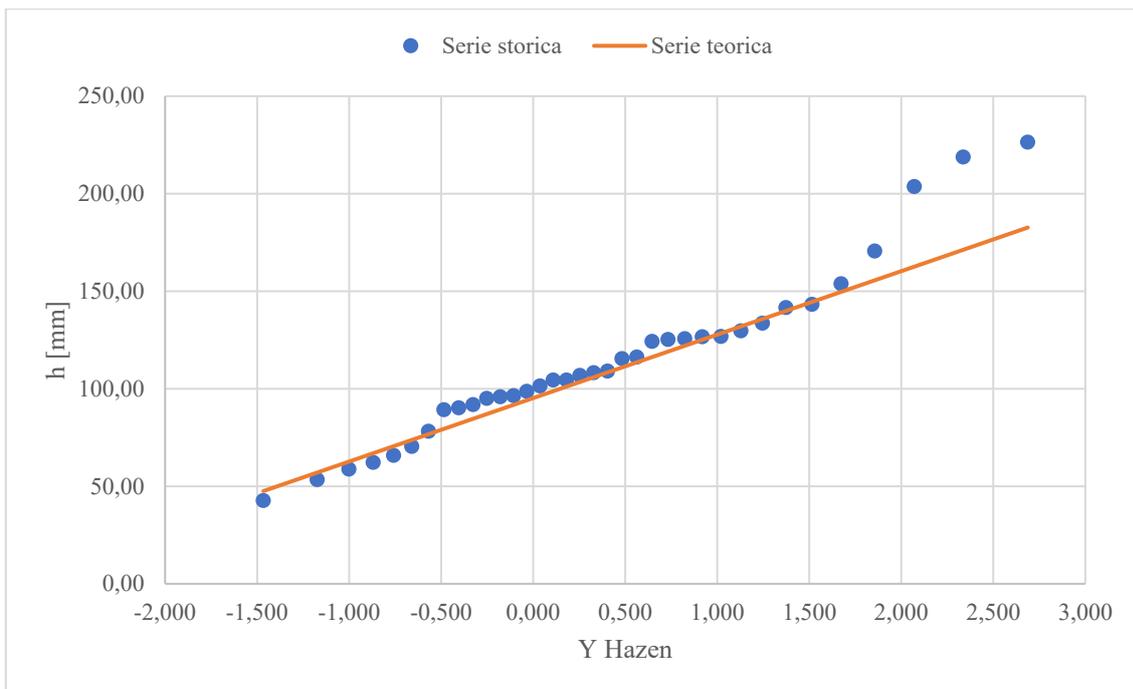


Figura 43 - Cartogramma di Gumbel con $P_{eh} 24h$

A seguito del confronto delle serie teoriche utilizzate, ad approssimare in maniera più significativa la serie storica è la probabilità empirica secondo Hazen.

Una volta ottenuti i cartogrammi di Gumbel è stato applicato il test statistico di Matalas, per verificare che la serie storica non differisse dalla serie teorica in maniera statisticamente significativa, ovvero per un livello inferiore al 5% (Matalas , et al., 1975).

Anche in questo caso, sebbene la numerosità sia calata da 38 a 36 campioni, il valore della media $E(\gamma)$ corrisponde sempre a 0.881 ed allo stesso modo anche il valore della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ rimane 0.535 (Fig. 22), ottenendo:

media	113,99
$N^{0.5}$	6,000
G	0,917
G - E	0,036
2 σ	1,069
TEST	verificato
	0,036 < 1,069

Tabella 14 - Verifica Test Matalas 24h

Come si può dedurre dalla soprastante, il Test Matalas per la popolazione di campioni di precipitazioni registrati in 24 ore ha ottenuto esito positivo.

5.1.7 Durata 48 ore

Descrizione della popolazione di campioni

N	36,0
minimo (x_{min}) [mm]	42,6
massimo (x_{max}) [mm]	332,6
media (x_m) [mm]	142,5
varianza (σ^2) [mm]	3766,6
deviazione standard (σ) [mm]	61,37
coeff. Variazione (CV) [-]	0,43
mediana ($x_{mediana}$) [mm]	135,6

Tabella 15 – Principali indicatori di descrizione statistica del campione dei massimi annuali di precipitazione con durata pari a 48 ore

Come per la durata di registrazione precedente, anche in questo caso non sono stati rilevati i valori di intensità di precipitazione massima per gli anni 1985 e 1988, per cui la popolazione si compone di 36 campioni totali.

Tra le popolazioni analizzate, questa è quella che ha raggiunto il massimo valore di precipitazione in assoluto, il quale è risultato essere pari a 332,6 mm. Mentre la precipitazione minima registrata equivale a 42,6 mm.

In Fig. 44 e 45 si riporta rispettivamente il confronto tra le probabilità empiriche di Weibull e Hazen per la ricerca del miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica.

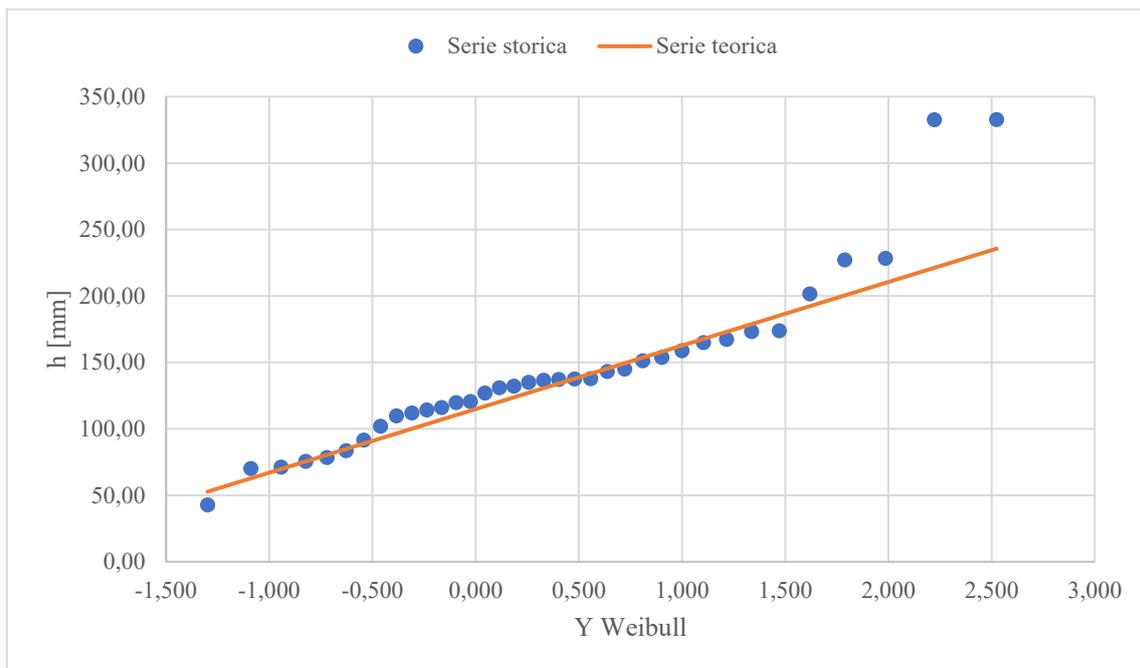


Figura 44 - Cartogramma di Gumbel con $P_{ewv} 48h$

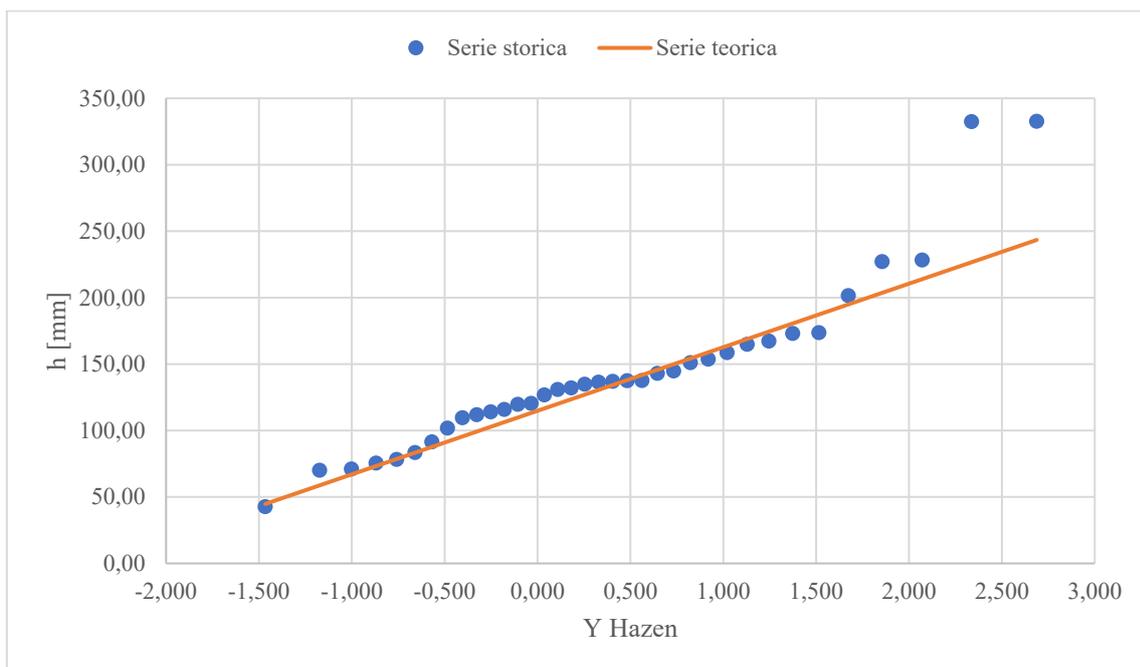


Figura 45 - Cartogramma di Gumbel con $P_{emh} 48h$

Come per la durata di precipitazione di 6 ore, anche in questo caso si predilige l'approssimazione della serie storica da parte della serie teorica secondo Hazen, in quanto nuovamente le probabilità empiriche utilizzate assumono un andamento simile.

Una volta ottenuti i cartogrammi di Gumbel è stato applicato il test statistico di Matalas, per verificare che la serie storica non differisse dalla serie teorica in maniera statisticamente significativa, ovvero per un livello inferiore al 5% (Matalas , et al., 1975).

Come per la durata di registrazione di 24 ore, il valore della media $E(\gamma)$ corrisponde a 0.881 ed il valore della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ rimane 0.535 (Fig. 22), ottenendo:

media	142,47
$N^{0.5}$	6,000
G	1,490
G - E	0,609
2σ	1,069
TEST	verificato
	0,609 < 1,069

Tabella 16 - Verifica Test Matalas 48h

Come si può dedurre dalla soprastante, il Test Matalas per la popolazione di campioni di precipitazioni registrati in 48 ore ha ottenuto esito positivo.

5.1.8 Cartogramma di Gumbel riassuntivo

In Figura 46 si riporta il cartogramma di Gumbel che riassume le differenti serie teoriche calcolate e descritte nei precedenti paragrafi:

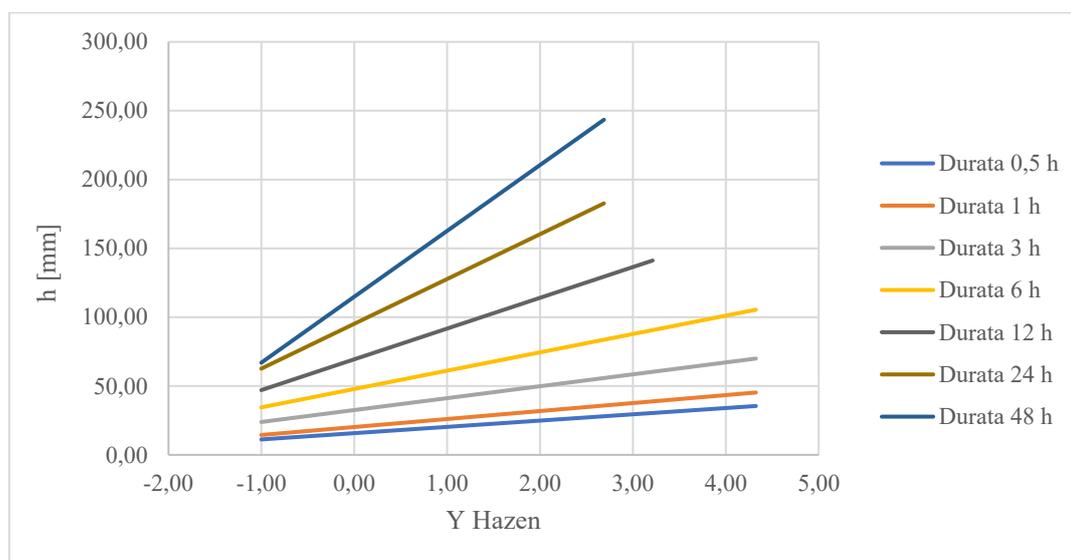


Figura 46 – Cartogramma riassuntivo di Gumbel secondo la probabilità empirica di Hazen

Di seguito si riportano le tabelle contenenti i valori delle variabili ridotte e delle altezze di precipitazione per ogni durata e tempo di ritorno preso in considerazione.

DURATA 0.5 ORA		
TR (anni)	y	h attesa (mm)
2	0,367	17,46
5	1,500	22,62
10	2,250	26,05
30	3,384	31,22
50	3,902	33,58
100	4,600	36,76
200	5,296	39,93
300	5,702	41,79

Tabella 17 - Precipitazione attesa durata 0,5h

DURATA 1 ORA		
TR (anni)	y	h attesa (mm)
2	0,367	22,37
5	1,500	28,94
10	2,250	33,29
30	3,384	39,86
50	3,902	42,86
100	4,600	46,91
200	5,296	50,94
300	5,702	53,29

Tabella 18 - Precipitazione attesa durata 1h

DURATA 3 ORA		
TR (anni)	y	h attesa (mm)
2	0,367	35,73
5	1,500	45,53
10	2,250	52,03
30	3,384	61,83
50	3,902	66,31
100	4,600	72,35
200	5,296	78,37
300	5,702	81,88

Tabella 19 - Precipitazione attesa durata 3h

DURATA 6 ORA		
TR (anni)	y	h attesa (mm)
2	0,367	52,72
5	1,500	67,82
10	2,250	77,81
30	3,384	92,92
50	3,902	99,81
100	4,600	109,11
200	5,296	118,38
300	5,702	123,79

Tabella 20 - Precipitazione attesa durata 6h

DURATA 12 ORA		
TR (anni)	y	h attesa (mm)
2	0,367	77,60
5	1,500	102,92
10	2,250	119,69
30	3,384	145,02
50	3,902	156,58
100	4,600	172,18
200	5,296	187,72
300	5,702	196,80

Tabella 21 - Precipitazione attesa durata 12h

DURATA 24 ORA		
TR (anni)	y	h attesa (mm)
2	0,367	107,14
5	1,500	144,02
10	2,250	168,44
30	3,384	205,33
50	3,902	222,18
100	4,600	244,90
200	5,296	267,53
300	5,702	280,75

Tabella 22 - Precipitazione attesa durata 24h

DURATA 48 ORA		
TR (anni)	y	h attesa (mm)
2	0,367	132,39
5	1,500	186,61
10	2,250	222,51
30	3,384	276,75
50	3,902	301,51
100	4,600	334,91
200	5,296	368,19
300	5,702	387,62

Tabella 23 - Precipitazione attesa durata 48h

5.2 Linea segnalatrice di possibilità pluviometrica

La LSPP viene ricavata attraverso la determinazione dei parametri a e n corrispondenti ad ogni TR, ottenuti attraverso l'interpolazione lineare dei valori ricavati dalle distribuzioni di probabilità espresse in una scala bi-logaritmica.

Nella Tabella 24 si riportano i valori di a e n per ogni tempo di ritorno considerato.

TR (anni)	a	n
2	23,04	0,4655
5	29,54	0,4818
10	33,85	0,4887
30	40,37	0,4961
50	43,35	0,4987
100	47,37	0,5016
200	51,37	0,5040
300	53,71	0,5052

Tabella 24 – Riassunto dei valori a e n per ogni TR considerato

Durata (ore)	h calcolata (mm)							
	TR 2 anni	TR 5 anni	TR 10 anni	TR 30 anni	TR 50 anni	TR 100 anni	TR 200 anni	TR 300 anni
0,5	16,68	21,15	24,13	28,63	30,68	33,46	36,22	37,84
1	23,04	29,54	33,85	40,37	43,35	47,37	51,37	53,71
3	38,41	50,15	57,91	69,63	74,98	82,19	89,37	93,56
6	53,04	70,04	81,26	98,21	105,93	116,35	126,73	132,79
12	73,24	97,81	114,03	138,51	149,67	164,73	179,72	188,48
24	101,12	136,59	160,01	195,35	211,48	233,22	254,87	267,51
48	139,62	190,74	224,52	275,53	298,80	330,18	361,43	379,69

Tabella 25 - Riassunto delle altezze di precipitazione attese per ogni TR; metodo analitico

Infine, si riporta in Figura 47 il grafico rappresentante le Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP) di ogni TR considerato.

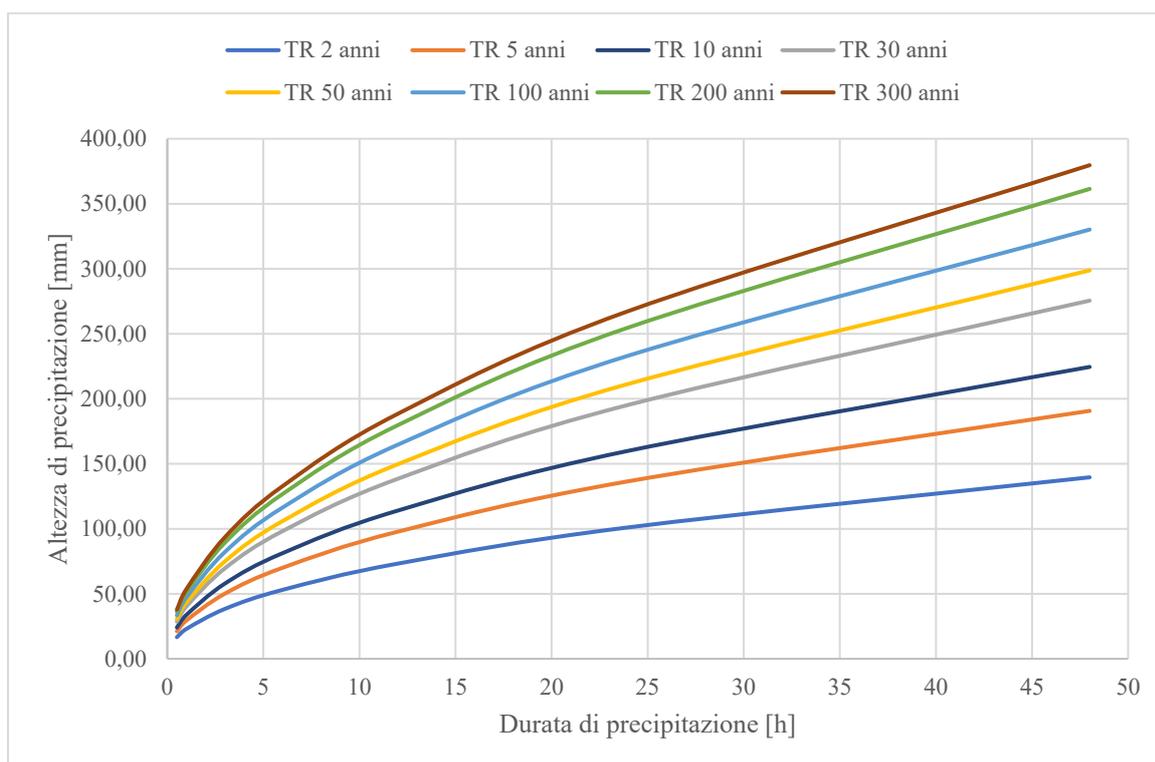


Figura 47 – Riassunto delle LSPP per ogni TR considerato

5.3 Risultati delle analisi di campo

I rilievi di campo sono stati condotti nelle giornate del 27 aprile e 29 giugno 2023.

In queste due date si sono svolte le analisi granulometriche e la rilevazione dei punti GPS del tratto del torrente Pramper oggetto dello studio.

5.3.1 Elaborazione dei rilievi granulometrici

L'acquisizione dei dati si è svolta a partire dalla Briglia 5, posta a monte della sistemazione, in direzione della briglia 1, la quale rappresenta l'opera posta più a valle del tratto analizzato. I singoli rilievi sono quindi stati nominati come segue: 001, 002 e 003 (Fig. 48).

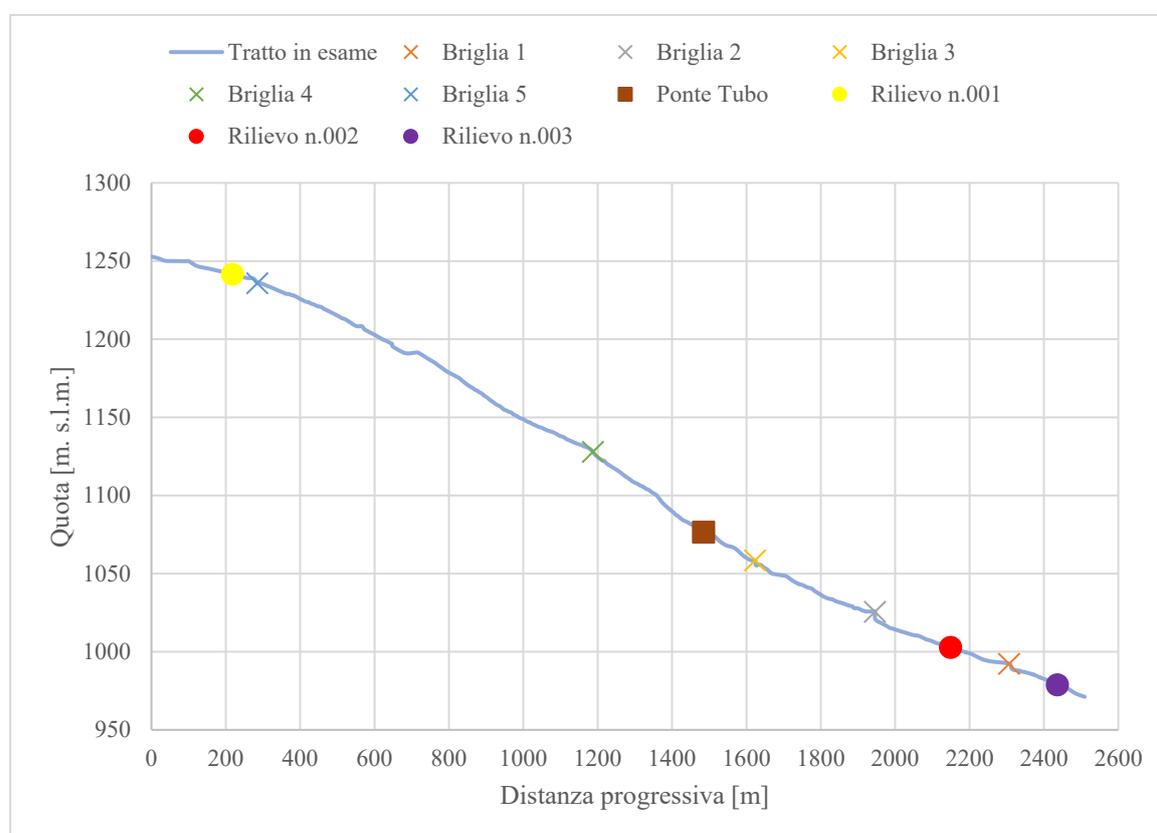


Figura 48 – Localizzazione dei rilievi granulometrici lungo il tratto analizzato

5.3.1.1 Analisi granulometrica 001

Il primo rilievo granulometrico è stato condotto a monte della Briglia 5 (Fig. 49), con un intervallo di raccolta del sedimento di 40 cm. Come anticipato nel capitolo 4.2.1, in seguito all'elaborazione dei dati acquisiti, si sono ottenuti i percentili diametrici riportati in Tabella 26, oltre alla curva di frequenza cumulata e relativa (Figura 50).



Figura 49 – Vista a monte della Briglia 5

	ϕ_{ix}	D_x (mm)
D₅	-3,00	8
D₁₆	-3,95	15
D₃₀	-4,94	31
D₄₀	-5,47	44
D₅₀	-6,00	64
D₈₄	-7,80	223
D₉₀	-8,33	323
D₉₅	-9,00	512
D_m	-5,95	62

Tabella 26 – Diametri percentili rilievo granulometrico 001

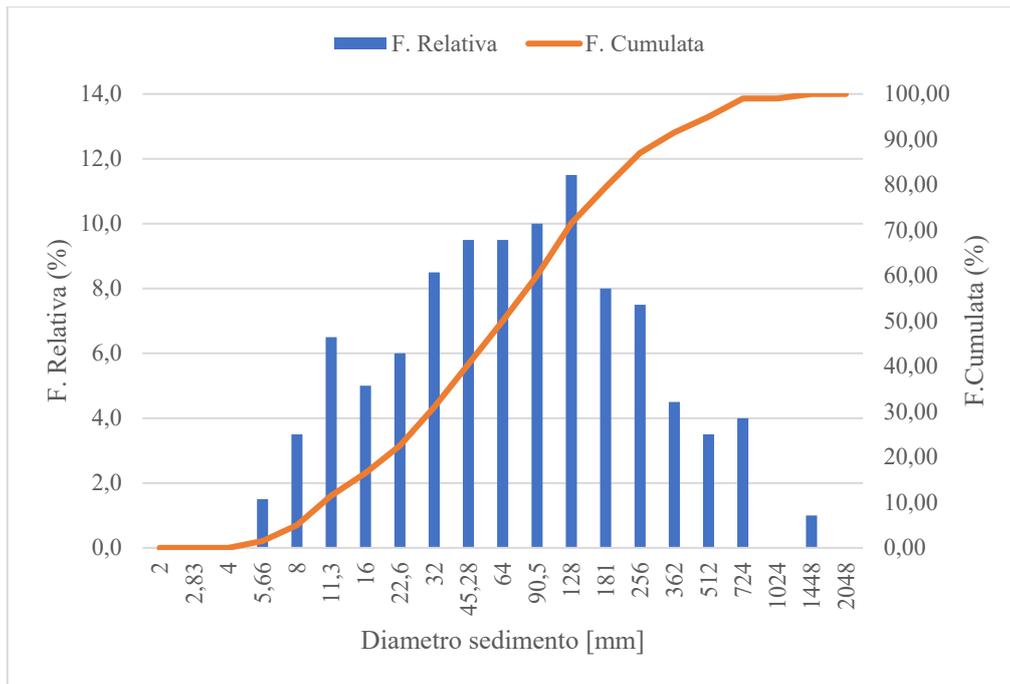


Figura 50 – Curve di frequenza cumulata e relativa rilievo granulometrico 001

Dalla figura soprastante è possibile notare come i sedimenti rilevati si siano disposti a “forma di campana”, sebbene la curva della frequenza cumulata mostri in maniera evidente che le classi di sedimenti tra i 45 e i 128 mm non si discostino di molto le une dalle altre in termini di frequenza relativa. L’eterogeneità granulometrica (D_{90}/D_{30}) si attesta pari a 10,5, indicando un discreto livello di varietà diametrica tra i sedimenti.

5.3.1.2 Analisi granulometrica 002

Il secondo rilievo granulometrico è stato condotto a monte della briglia 1 (Fig. 51), con un intervallo di raccolta del sedimento di 50 cm. Di seguito si riportano i percentili diametrici (Tabella 27) e la curva di frequenza cumulata e relativa (Fig. 52).



Figura 51 – Rilievo granulometrico 002

	ϕ_x	D_x (mm)
D₅	-2,32	5
D₁₆	-3,54	12
D₃₀	-5,22	37
D₄₀	-5,81	56
D₅₀	-6,25	76
D₈₄	-9,69	827
D₉₀	-10,11	1107
D₉₅	-10,43	1381
D_m	-6,47	88

Tabella 27 - Diametri percentili rilievo granulometrico 002

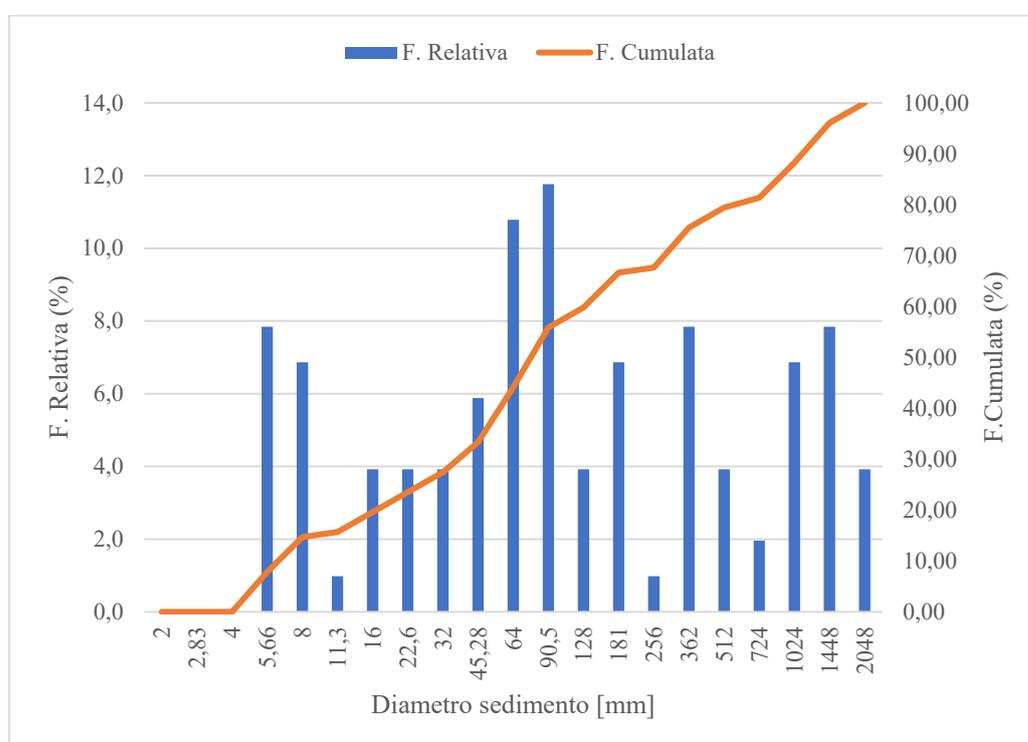


Figura 52 - Curve di frequenza cumulata e relativa rilievo granulometrico 002

Rispetto al rilievo n. 001, si può notare come in questo caso il tratto di torrente analizzato sia caratterizzato da una elevata eterogeneità di sedimenti, che variano dai 4 mm fino a massi di dimensioni maggiori rientranti nella classe dei 2048 mm. L'eterogeneità granulometrica (D_{90}/D_{30}), infatti, si attesta pari a 29,77, indicando un elevato livello di varietà diametrica tra i sedimenti.

5.3.1.3 Analisi granulometrica 003

Il terzo rilievo granulometrico è stato condotto a valle della briglia 1, con un intervallo di raccolta del sedimento di 40 cm. Di seguito si riportano i percentili diametrici (Tabella 28) e la curva di frequenza cumulata e relativa (Fig. 53).

	ϕ_{ix}	D_x (mm)
D₅	-3,04	8
D₁₆	-4,00	16
D₃₀	-4,48	22
D₄₀	-5,01	32
D₅₀	-5,30	39
D₈₄	-7,39	168
D₉₀	-7,85	231
D₉₅	-9,06	534
D_m	-5,52	46

Tabella 28 - Diametri percentili rilievo granulometrico 003

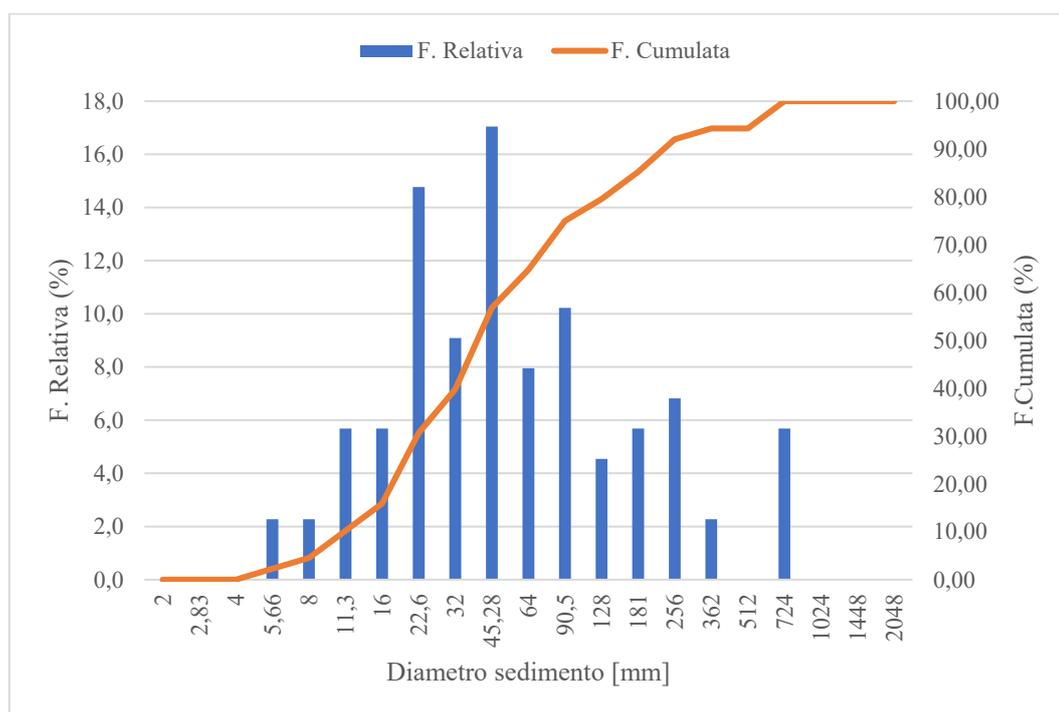


Figura 53 - Curve di frequenza cumulata e relativa rilievo granulometrico 003

Il contesto a valle della briglia 1 si presenta in maniera simile rispetto a quello riportato per il rilievo n.001. In questo caso si nota come il tratto sia caratterizzato da sedimenti di minori dimensioni; infatti, le frequenze relative maggiori sono rappresentate dalle classi

appartenenti ai 23mm e 45,28mm. L'eterogeneità granulometrica (D_{90}/D_{30}) si attesta pari a 10,36, indicando nuovamente un discreto livello di varietà diametrica tra i sedimenti.

5.3.1.4 Media delle analisi granulometriche n. 002 e n. 003

Il calcolo della pendenza di correzione per le briglie 1, 2 e 3 è stato effettuato utilizzando i valori dei diametri ottenuti dalla media della analisi 002 e 003 (Tabella 29).

	ϕ_{ix}	D_x (mm)
D5	-2,68	6
D16	-3,77	14
D30	-4,85	29
D40	-5,41	42
D50	-5,78	55
D84	-8,54	373
D90	-8,98	505
D95	-9,75	858
Dm	-5,99	64

Tabella 29 - Diametri percentili medi tra i rilievi granulometrici 002 e 003

L'eterogeneità granulometrica media risultante (D_{90}/D_{30}) si attesta pari a 20,07, indicando un elevato livello di varietà diametrica tra i sedimenti.

5.3.2 Analisi del rilievo topografico

A seguito dell'elaborazione dei dati GPS rilevati in campo attraverso il software QGIS (v. 3.28.0), le pendenze di correzione previste dalla sistemazione avvenuta tra il 2008 e 2009 sono risultate le seguenti (Tabella 30).

Tratto	L [m]	Δ [m]	i_c misurata [m/m]	i_c misurata [%]
Briglia 1	367,62	31,55	0,0858	8,58
Briglia 2	321,27	34,60	0,1077	10,77
Briglia 3	140,43	21,21	0,1511	15,11
Briglie 1 - 3	828,21	87,36	0,1055	10,55
Briglia 5	160,89	10,85	0,0674	6,74
Briglia 1 - 5	2385,69	275,50	0,1155	11,55

Tabella 30 – Pendenze di correzione ottenute da rilievo GPS riferite alla sistemazione avvenuta tra il 2008 e 2009

Come anticipato dai capitoli precedenti, si può notare come le briglie siano disposte a distanze irregolari le une dalle altre. Allo stesso modo anche i valori di pendenza differiscono in maniera significativa, specie se si effettua il confronto tra i tratti a monte delle briglie 1 e 5.

Si è determinata inoltre la pendenza dei tratti relativi alle “Briglie 1 – 3” al fine di effettuare un ulteriore confronto tra i singoli tratti delle briglie interessate.

Infine, si è individuata la pendenza rappresentativa del tratto in esame prima della sistemazione, indicata nella tabella soprastante come “Briglia 1 – 5”.

5.4 Determinazione del tempo di corrivazione

Per il calcolo di T_c si è utilizzata come riferimento di L_c la distanza a partire dalla briglia 1, la quale è risultata essere pari a 6766,67 m, mentre la L_v è risultata pari a 316.45 m.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dall’individuazione del valore di T_c attraverso l’applicazione del metodo cinematico e metodo empirico (Tabella 31).

T_c				
Tempo	Cinematico	Empirico		
		Giandotti	Ferro 1	Ferro 2
ore	1,96	1,21	0,93	2,49
min	117,33	72,78	55,90	149,32

Tabella 31 – T_c a confronto; metodo cinematico ed empirico

Dal confronto con i differenti T_c calcolati, si è scelto il metodo cinematico in quanto più affidabile rispetto a quello empirico (vedi 4.3.1).

5.5 Analisi idrologica

Le analisi idrologiche per il calcolo degli idrogrammi di piena sono state condotte sul reticolo idrografico riferito alla sezione di chiusura posta sulla briglia 1.

I parametri idrologici usati come riferimento per la determinazione della propensione del terreno a generare deflusso superficiale si sono riferiti a delle condizioni del terreno aventi livello di saturazione intermedia (CNII) ed una sottrazione iniziale (I_a) pari al 10% della precipitazione (P).

I valori che si sono utilizzati per le analisi idrologiche sono quindi i seguenti:

A [km ²]	T_c [ore]	CN [II]	S II [mm]	I_a [mm]
13,59	1,96	70,49	106,36	10,64

Tabella 32 – Parametri utilizzati per le analisi idrologiche

5.5.1 Metodo razionale

L'idrogramma di piena (Fig. 54) ottenuto ponendo il tempo di precipitazione pari al tempo di corrivazione ha generato i seguenti valori di deflusso superficiale (P_e) (Tabella 33).

TR [anni]	Tc [ore]	P [mm]	P_e [mm]	Qt [m^3/s]	Q_b [m^3/s]	Qt + Q_b [m^3/s]
2	1,96	31,48	3,41	6,59	0,66	7,25
5	1,96	40,81	6,67	12,88	1,29	14,16
10	1,96	46,98	9,26	17,88	1,79	19,66
30	1,96	56,31	13,72	26,50	2,65	29,14
50	1,96	60,57	15,95	30,80	3,08	33,88
100	1,96	66,31	19,13	36,94	3,69	40,63
200	1,96	72,03	22,47	43,38	4,34	47,72
300	1,96	75,37	24,49	47,29	4,73	52,02

Tabella 33 – Valori di deflusso superficiale per ogni tempo di ritorno

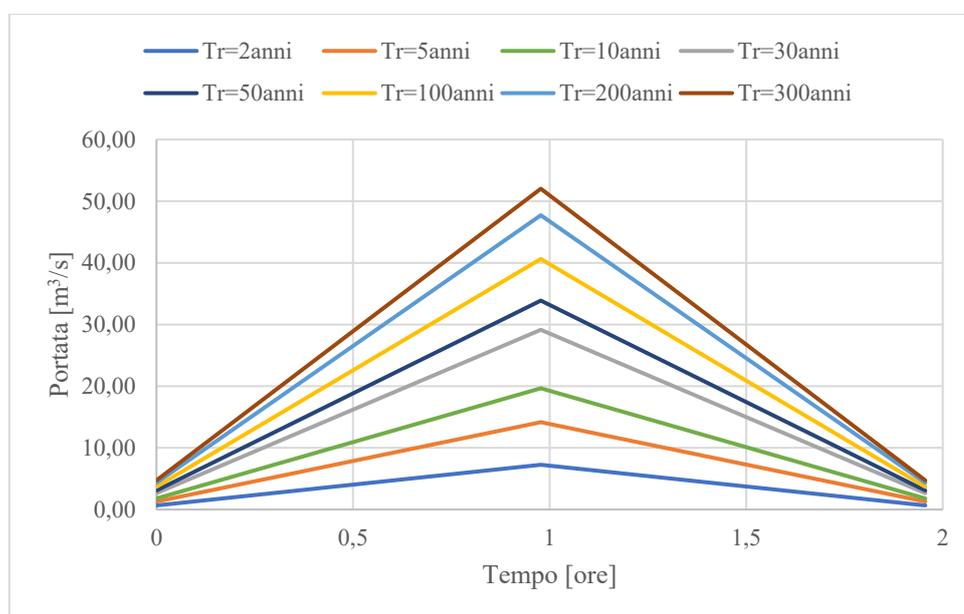


Figura 54 – Idrogramma di piena per ogni tempo di ritorno considerato secondo il Metodo Razionale

Dove, per il calcolo della portata di base (Q_b), si è considerato il 10% della portata critica (Q_t) generata dall'evento di precipitazione.

Dall'analisi dei volumi di portata generati, si può notare come essi aumentino in maniera direttamente proporzionale al tempo di ritorno (Fig. 47).

5.5.2 Metodo cinematico

A differenza del metodo razionale, per il metodo cinematico si sono calcolati solamente gli idrogrammi di piena per i TR pari a 30 anni e 100 anni, in quanto sono stati i valori di riferimento per il calcolo delle pendenze di correzione.

Le aree di ogni sottobacino, ottenute dalla curva “area cumulata – tempi” (Fig. 55), sono risultate le seguenti (Tabella 34 e Fig. 56).

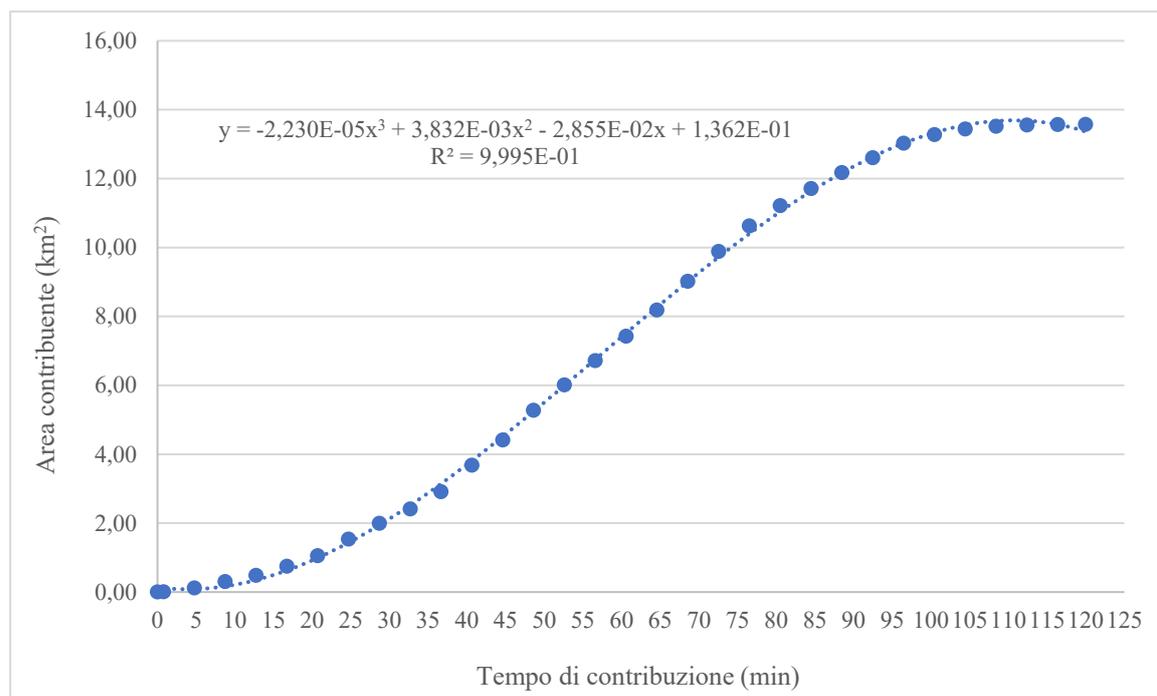


Figura 55 – Curva area cumulata – tempi

t [min]	A contribuyente [km²]	A contribuyente incrementale [km²]
0	0,00	0,000
15	0,49	0,495
30	2,13	1,632
45	4,58	2,453
60	7,40	2,822
75	10,14	2,741
90	12,35	2,207
105	13,57	1,222
120	13,58	0,005

Tabella 34 – Aree contribuenti incrementali

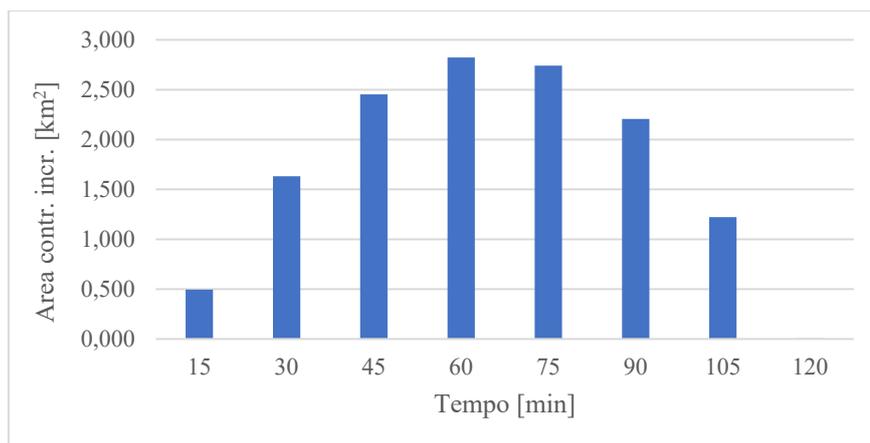


Figura 56 – Distribuzione nel tempo delle sub-aree contribuenti

Dalla figura soprastante si può notare come la superficie contribuyente diventi massima circa a metà della durata di precipitazione totale, in quanto, per la conformazione morfologica del bacino, questo è caratterizzato da una superficie di 2,822 km² che impiega 60 min a raggiungere la sezione di chiusura.

Di seguito si riportano i risultati delle analisi idrologiche svolte per le casistiche nelle quali la pioggia assume una distribuzione nel tempo a blocchi alterni (P_{ba}) o costante (P_{cost}).

5.5.2.1 Idrogrammi di precipitazione a blocchi alterni

L'idrogramma di piena viene generato da una precipitazione avente una distribuzione a blocchi alterni andando a calcolare volta per volta i valori di deflusso generati dal bacino in funzione del tempo.

- **Tempo di ritorno 30 anni**

t [ore]	P = h [mm]	DP [mm]	DP _{bloc.alt.} [mm]	P _{bloc.alt.cum.} [mm]	P _{e bloc.alt.cum.} [mm]	DP _{e bloc.alt.} [mm]
0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
0,25	20,30	20,30	3,92	3,92	0,00	0,00
0,50	28,63	8,33	4,73	8,65	0,00	0,00
0,75	35,00	6,38	6,38	15,03	0,17	0,17
1,00	40,37	5,37	20,30	35,32	4,65	4,47
1,25	45,10	4,73	8,33	43,65	7,82	3,17
1,50	49,37	4,27	5,37	49,02	10,18	2,35
1,75	53,29	3,92	4,27	53,29	12,21	2,03
2,00	56,94	3,65	3,65	56,94	14,04	1,83

Tabella 35 – Calcolo P_e con il metodo dei blocchi alterni TR 30 anni

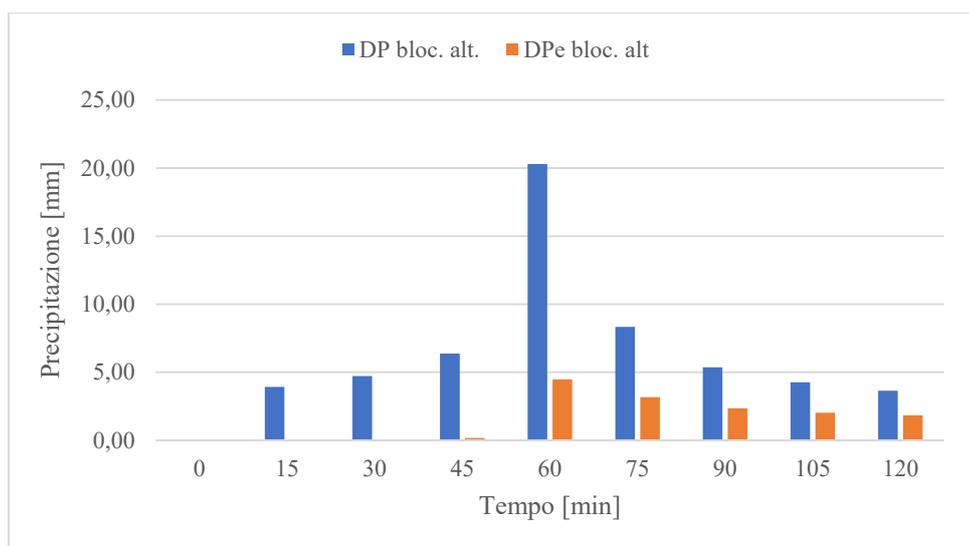


Figura 57 – Pluviogramma a blocchi alterni TR 30 anni

Dalla figura soprastante si nota come per i primi 30 min di precipitazione il deflusso sia pari a 0 a causa delle perdite iniziali (I_a).

I valori del deflusso hanno generato il seguente idrogramma:

Dt [ore]	Dt [sec]	Q_b [m ³ /s]	V_{tot} [m ³]
0,25	900	3,71	250832,13

t	Q(t)	Q(t) + Q_b	V
[minuti]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]
0,00	0,00	3,71	0,00
15,00	0,00	3,71	3341,47
30,00	0,00	3,71	3341,47
45,00	0,10	3,81	3384,57
60,00	2,78	6,49	4634,46
75,00	10,33	14,05	9241,65
90,00	19,79	23,50	16898,22
105,00	28,60	32,32	25119,69
120,00	35,12	38,83	32017,79
135,00	37,13	40,84	35853,37
150,00	32,41	36,12	34631,56
165,00	22,05	25,76	27846,50
180,00	13,79	17,50	19467,25
195,00	7,27	10,98	12815,89
210,00	2,50	6,21	7738,22
225,00	0,01	3,72	4471,46
240,00	0,00	3,71	3345,63
255,00	0,00	3,71	3341,47
270,00	0,00	3,71	3341,47

Tabella 36 – Calcolo del deflusso superficiale con il metodo cinematico a blocchi alterni TR 30 anni

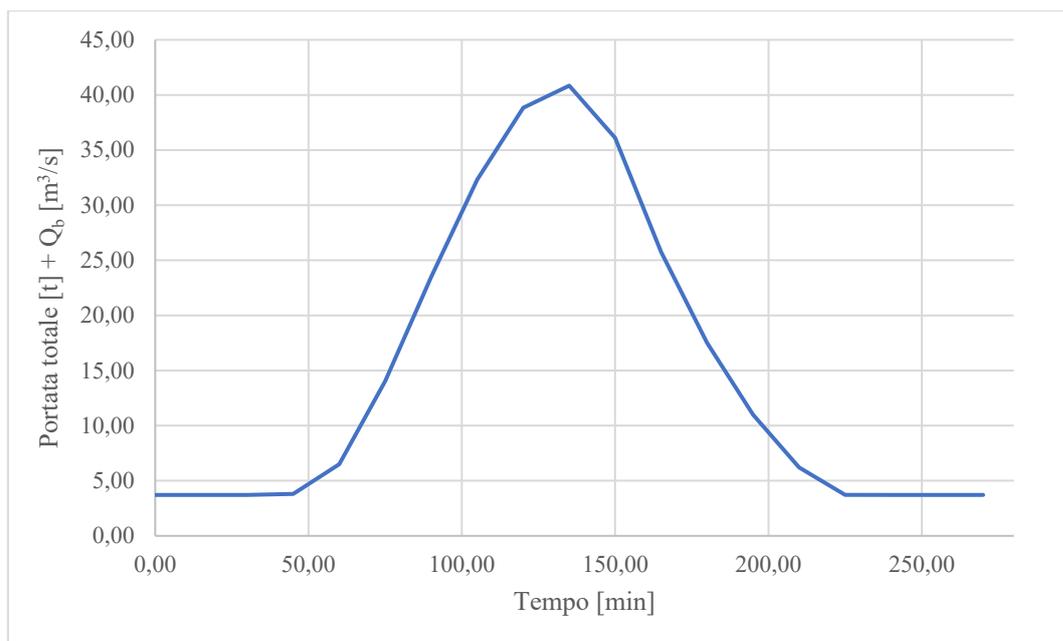


Figura 58 – Idrogramma TR30 con metodo cinematico a blocchi alterni

La portata di base (Q_b) è stata calcolata come il 10% del valore massimo di portata critica (Q_t) generata, corrispondente ad un valore di $37,13 \text{ m}^3$. Il volume totale di deflusso superficiale (V_{tot}) invece ha raggiunto un valore pari a $250.832,13 \text{ m}^3$.

- **Tempo di ritorno 100 anni**

t [ore]	P = h [mm]	DP [mm]	DP _{bloc.alt.} [mm]	P _{bloc.alt.cum.} [mm]	P _{e bloc.alt.cum.} [mm]	DP _{e bloc.alt.} [mm]
0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	23,63	23,63	4,67	4,67	0,00	0,00
0,50	33,46	9,83	5,61	10,28	0,00	0,00
0,75	41,00	7,55	7,55	17,82	0,45	0,45
1,00	47,37	6,36	23,63	41,45	6,92	6,47
1,25	52,98	5,61	9,83	51,28	11,24	4,31
1,50	58,05	5,07	6,36	57,64	14,41	3,17
1,75	62,72	4,67	5,07	62,72	17,12	2,71
2,00	67,06	4,34	4,34	67,06	19,56	2,44

Tabella 37 – Calcolo P_e con il metodo dei blocchi alterni TR 100 anni

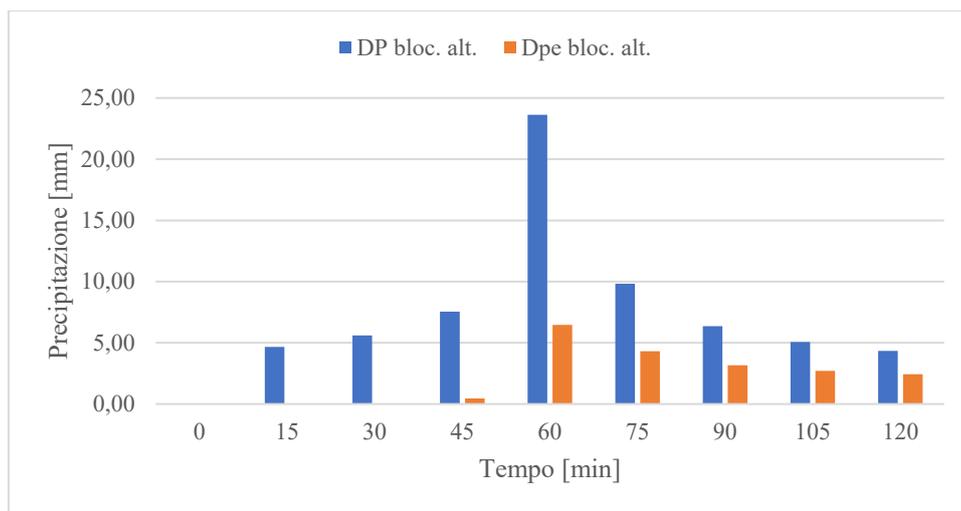


Figura 59 – Pluviogramma a blocchi alterni TR 100 anni

Anche in questo caso comincia a crearsi deflusso superficiale a partire dal quarantacinquesimo minuto, ma i valori generati sono di entità superiore rispetto a quelli generati dal TR di 30 anni.

I valori del deflusso hanno generato il seguente idrogramma:

D_t [ore]	D_t [sec]	Q_b [m ³ /s]	V_{tot} [m ³]
0,25	900	5,14	348756,62

t	Q(t)	Q(t) + Q_b	V
[minuti]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]
0,00	0,00	5,14	0,00
15,00	0,00	5,14	4623,58
30,00	0,00	5,14	4623,58
45,00	0,25	5,39	4736,12
60,00	4,38	9,52	6707,88
75,00	15,34	20,48	13497,74
90,00	28,62	33,76	24405,06
105,00	40,67	45,81	35803,36
120,00	49,24	54,38	45082,72
135,00	51,37	56,51	49899,92
150,00	44,17	49,31	47618,49
165,00	29,57	34,71	37807,88
180,00	18,40	23,54	26212,52
195,00	9,68	14,82	17260,64
210,00	3,33	8,46	10475,36
225,00	0,01	5,15	6125,50
240,00	0,00	5,14	4629,12
255,00	0,00	5,14	4623,58
270,00	0,00	5,14	4623,58

Tabella 38 - Calcolo del deflusso superficiale con il metodo cinematico a blocchi alterni TR 100 anni

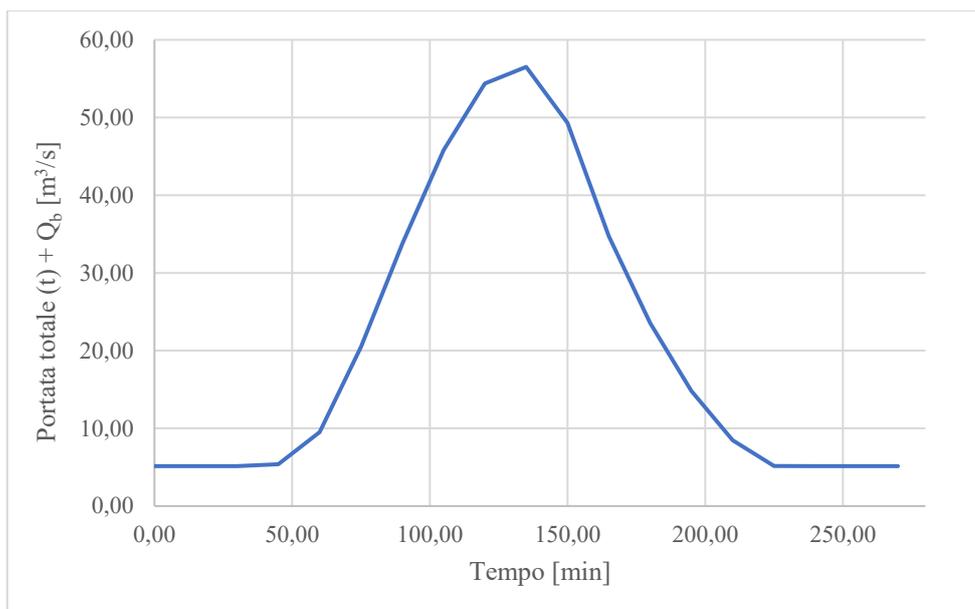


Figura 60 - Idrogramma TR100 con metodo cinematico a blocchi alterni

La portata di base (Q_b) è stata calcolata come il 10% del valore massimo di portata critica (Q_t) generata, corrispondente ad un valore di $51,37 \text{ m}^3$. Il volume totale di deflusso superficiale (V_{tot}) invece ha raggiunto un valore pari a $348.756,62 \text{ m}^3$.

5.5.2.2 Pioggia costante

L'idrogramma di piena viene generato da una precipitazione avente una distribuzione costante nel tempo, andando a calcolare volta per volta i valori di deflusso generati dal bacino durante l'evento di pioggia.

- **Tempo di ritorno 30 anni**

t [ore]	P = h [mm]	DP _{cost} [mm]	P _{cum.} [mm]	P _{e cum.} [mm]	DP _{e cost.} [mm]
0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
0,25	20,30	7,12	7,12	0,00	0,00
0,50	28,63	7,12	14,24	0,12	0,12
0,75	35,00	7,12	21,35	0,98	0,86
1,00	40,37	7,12	28,47	2,56	1,58
1,25	45,10	7,12	35,59	4,74	2,18
1,50	49,37	7,12	42,71	7,43	2,69
1,75	53,29	7,12	49,82	10,55	3,12
2,00	56,94	7,12	56,94	14,05	3,49

Tabella 39 – Calcolo P_e con il metodo della precipitazione costante TR 30 anni

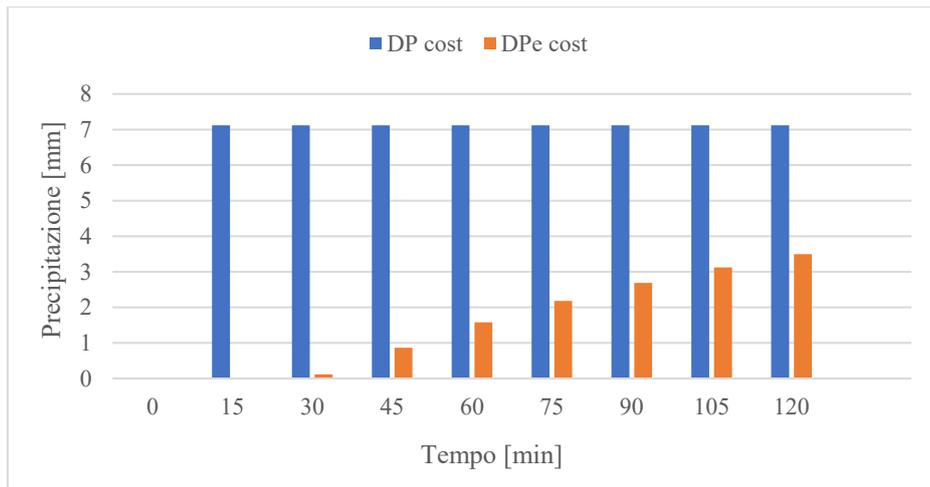


Figura 61 – Pluviogramma a precipitazione costante TR 30 anni

Rispetto ad una distribuzione a blocchi alterni, il deflusso superficiale comincia a generarsi a partire dalla prima mezz'ora di precipitazione, diventando massimo alla fine dell'evento.

I valori del deflusso hanno generato il seguente idrogramma:

Dt [ore]	Dt [sec]	Q _b [m ³ /s]	V _{tot} m ³
0,25	900	3,50	247378,28

t	Q(t)	Q(t) + Q _b	V
[minuti]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]
0,00	0,00	3,50	0,00
15,00	0,00	3,50	3149,59
30,00	0,06	3,56	3178,75
45,00	0,69	4,19	3488,52
60,00	2,76	6,25	4699,19
75,00	6,79	10,29	7443,17
90,00	12,80	16,30	11965,18
105,00	20,41	23,91	18094,17
120,00	28,83	32,33	25307,60
135,00	34,96	38,46	31856,85
150,00	35,00	38,49	34629,51
165,00	30,02	33,52	32408,52
180,00	21,96	25,46	26540,81
195,00	12,82	16,32	18799,16
210,00	4,76	8,26	11060,98
225,00	0,02	3,52	5299,58
240,00	0,00	3,50	3157,52
255,00	0,00	3,50	3149,59
270,00	0,00	3,50	3149,59

Tabella 40 – Calcolo del deflusso superficiale con il metodo cinematico a P costante TR 30 anni

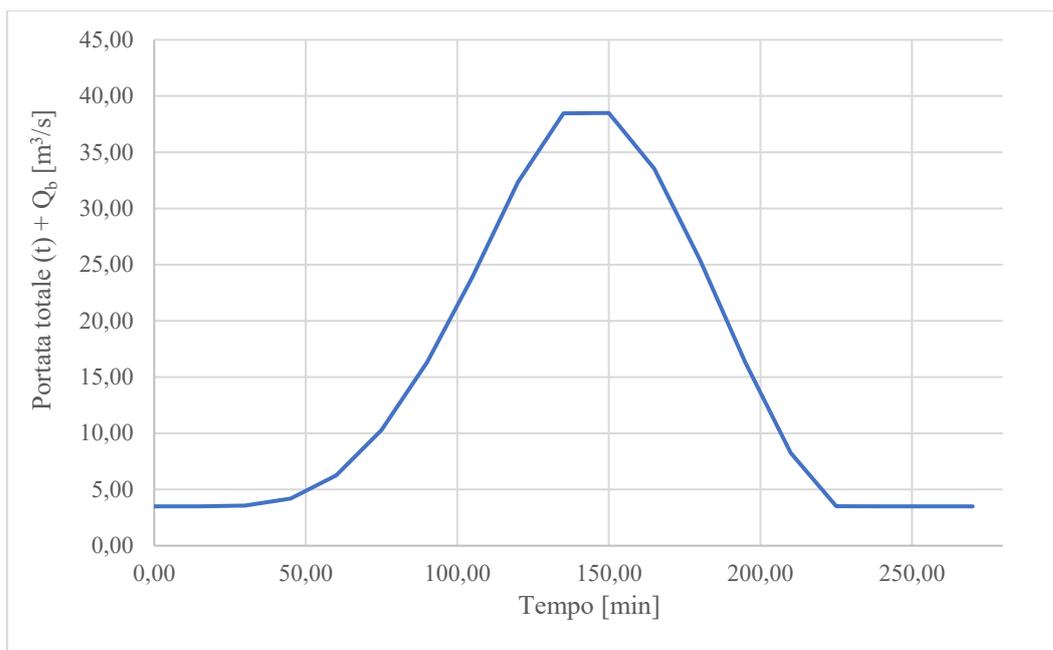


Figura 62 – Idrogramma TR30 con metodo cinematico a precipitazione costante

La portata di base (Q_b) è stata calcolata come il 10% del valore massimo di portata critica (Q_t) generata, corrispondente ad un valore di $35,00 \text{ m}^3$. Il volume totale di deflusso superficiale (V_{tot}) invece ha raggiunto un valore pari a $247.378,28 \text{ m}^3$.

- **Tempo di ritorno 100 anni**

t [ore]	P = h [mm]	DP _{cost} [mm]	P _{cum.} [mm]	P _{e cum.} [mm]	DP _{e cost.} [mm]
0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
0,25	23,63	8,38	8,38	0,00	0,00
0,50	33,46	8,38	16,77	0,33	0,33
0,75	41,00	8,38	25,15	1,74	1,41
1,00	47,37	8,38	33,53	4,06	2,31
1,25	52,98	8,38	41,91	7,11	3,05
1,50	58,05	8,38	50,30	10,77	3,66
1,75	62,72	8,38	58,68	14,95	4,18
2,00	67,06	8,38	67,06	19,56	4,61

Tabella 41 - Calcolo P_e con il metodo della precipitazione costante TR 100 anni

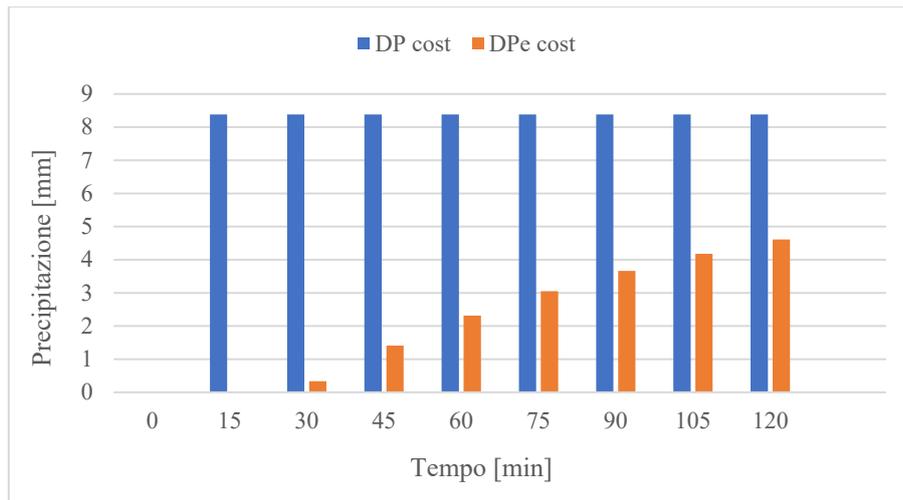


Figura 63 - Pluviogramma a precipitazione costante TR 100 anni

Il comportamento che assume il deflusso superficiale è il medesimo registrato per il tempo di ritorno di 30 anni. In questo caso però il valore di P_e massimo generato equivale a 4,61 mm, a differenza della Fig. 61 nella quale lo stesso valore è risultato pari a 3,49 mm.

I valori del deflusso hanno generato il seguente idrogramma:

Dt [ore]	Dt [sec]	Q_b [m ³ /s]	V_{tot} [m ³]
0,25	900	4,81	343475,52

t	Q(t)	Q(t) + Q_b	V
[minuti]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]
0,00	0,00	4,81	0,00
15,00	0,00	4,81	4330,18
30,00	0,18	4,99	4412,84
45,00	1,38	6,19	5033,86
60,00	4,74	9,55	7082,19
75,00	10,76	15,57	11302,15
90,00	19,29	24,10	17850,09
105,00	29,62	34,43	26338,33
120,00	40,62	45,43	35937,02
135,00	48,11	52,92	44258,74
150,00	47,45	52,27	47335,35
165,00	40,32	45,13	43827,61
180,00	29,27	34,08	35645,42
195,00	16,99	21,81	25149,86
210,00	6,28	11,09	14804,00
225,00	0,02	4,83	7166,86
240,00	0,00	4,81	4340,65
255,00	0,00	4,81	4330,18
270,00	0,00	4,81	4330,18

Tabella 42 - Calcolo del deflusso superficiale con il metodo cinematico a P costante TR 100 anni

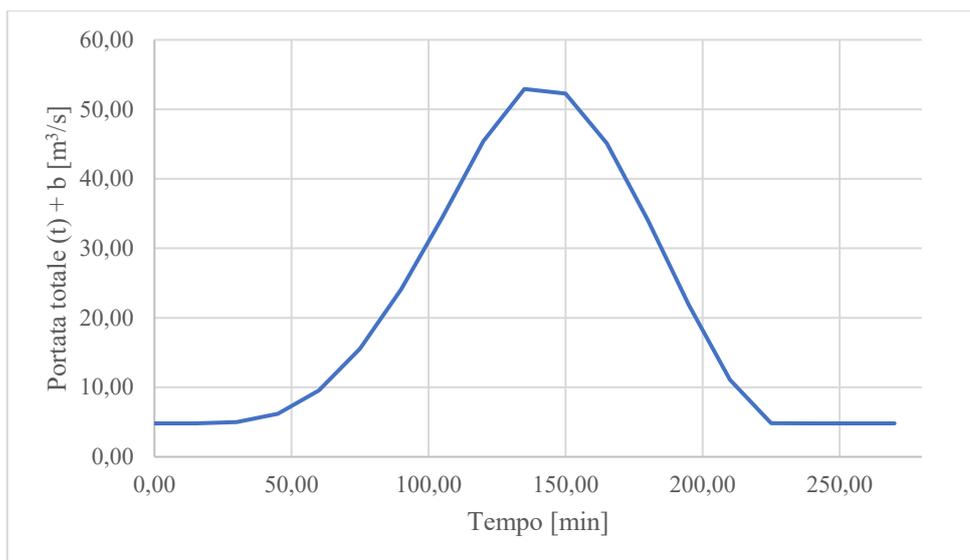


Figura 64 - Idrogramma TR100 con metodo cinematico a precipitazione costante

La portata di base (Q_b) è stata calcolata come il 10% del valore massimo di portata critica (Q_t) generata, corrispondente ad un valore di $48,11 \text{ m}^3$. Il volume totale di deflusso superficiale (V_{tot}) invece ha raggiunto un valore pari a $343.475,52 \text{ m}^3$.

5.5.3 Riassunto dei risultati delle analisi idrologiche

Di seguito si presentano in forma riassuntiva, i risultati ottenuti da ogni analisi idrologica effettuata, ponendo in evidenza i valori corrispondenti alle portate al picco per i due TR considerati nelle successive analisi.

	Metodo razionale		Metodo cinematico			
			Blocchi alterni		Precipitazione costante	
	TR 30	TR 100	TR 30	TR 100	TR 30	TR 100
$Q(t) + Q_b$ [m^3/s]	29,14	40,63	40,84	56,51	38,49	52,92

Tabella 43 – Riassunto delle analisi idrologiche

Le analisi hanno evidenziato una somiglianza in termini di portata tra le diverse applicazioni del metodo cinematico. Per il calcolo dei valori di pendenza di correzione, si sono utilizzate quindi le portate al picco generate da una precipitazione costante in quanto rappresentative di un evento reale.

5.6 Pendenza di correzione

La pendenza di correzione è stata determinata attraverso la combinazione di differenti variabili. In particolare, si sono determinati i valori di i_c per le seguenti situazioni.

- Condizione di moto incipiente per i percentili diametrici D_{50} (Tabella 44) e D_{84} (Tabella 45) e una portata liquida al picco generata da un evento con TR 30 anni (Q_{30})
- Condizione di moto incipiente per il percentile diametrico D_{90} e portata liquida al picco per eventi con tempo di ritorno 30 e 100 anni (Tabella 46).

I valori di pendenza di correzione sono stati calcolati per i diversi tratti presi in esame.

Di seguito si riportano i valori ottenuti confrontati con i valori delle pendenze di correzione rilevate in campo (i_c misurata) (Tabella 30):

Tratto	D_{50} [mm]	i_c misurata [m/m]	i_c calcolata Q 30 [m/m]
Briglia 1	54,76	0,0858	0,0082
Briglia 2	54,76	0,1077	0,0069
Briglia 3	54,76	0,1511	0,0070
Briglie 1 - 3	54,76	0,1055	0,0076
Briglia 5	64,00	0,0674	0,0109

Tabella 44 – Valori delle pendenze di correzione calcolati per la combinazione $D_{50} - Q_{30}$

Tratto	D_{84} [mm]	i_c misurata [m/m]	i_c calcolata Q 30 [m/m]
Briglia 1	372,66	0,0858	0,1045
Briglia 2	372,66	0,1077	0,0898
Briglia 3	372,66	0,1511	0,0907
Briglie 1 - 3	372,66	0,1055	0,0974
Briglia 5	222,86	0,0674	0,0590

Tabella 45 - Valori delle pendenze di correzione calcolati per la combinazione $D_{84} - Q_{30}$

Tratto	D_{90} [mm]	i_c misurata [m/m]	i_c calcolata Q 30 [m/m]	i_c calcolata Q 100 [m/m]
Briglia 1	505,39	0,0858	0,1549	0,1278
Briglia 2	505,39	0,1077	0,1345	0,1098
Briglia 3	505,39	0,1511	0,1346	0,1104
Briglie 1 - 3	505,39	0,1055	0,1451	0,1192
Briglia 5	322,54	0,0674	0,0967	0,0778

Tabella 46 - Valori delle pendenze di correzione calcolati per le combinazioni $D_{90} - Q_{30}$ e $D_{90} - Q_{100}$

Al fine di agevolare la lettura dei dati nelle tabelle sopra riportate, di seguito si rappresenta lo scostamento dei valori ottenuti (i_c teorica) con le diverse combinazioni di parametri di input, rispetto a quelli misurati (i_c misurata) (Fig. 65).

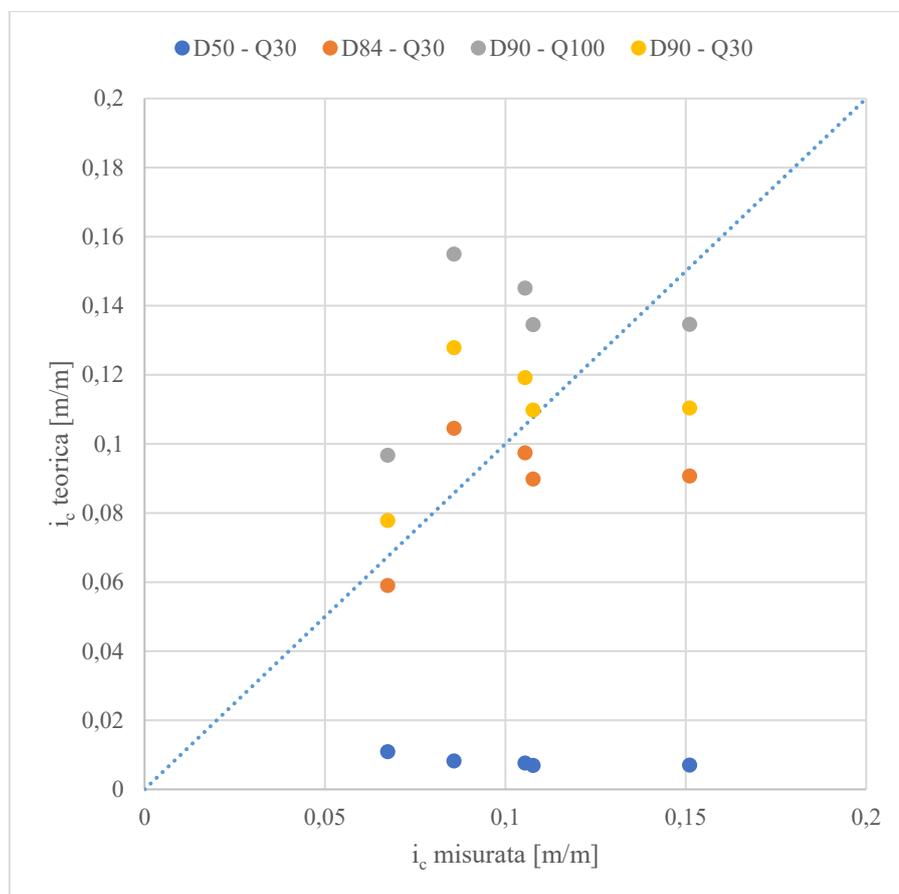


Figura 65 – Scostamento dei valori di i_c teorici ottenuti attraverso differenti combinazioni, rispetto ai valori di i_c misurati

Dalla figura soprastante si nota come ad avvicinarsi maggiormente ai valori misurati in campo, siano le combinazioni D84 – Q30 e D90 – Q30. Al contrario invece, gli scenari che si allontanano in maniera più significativa sono rappresentati dalle combinazioni D50 – Q30 e D90 – Q30. Nella Tabella 47 si riportano la media degli scarti di i_c teorica rispetto a i_c misurata per restituire in maniera analitica lo scostamento esistente tra tali valori.

Combinazione		Media degli scarti
D _{xx}	Q _{xx}	
50	30	-0,0954
84	30	-0,0152
90	30	0,0297
	100	0,0055

Tabella 47 – Media degli scarti di i_c teorica rispetto a i_c misurata

6 DISCUSSIONI

I rilievi granulometrici effettuati sul torrente Pramper dimostrano che l'alveo è caratterizzato da una forte eterogeneità.

Infatti, per i tre differenti campionamenti si sono registrati i seguenti valori del rapporto D_{90}/D_{30} :

- n. 001: 10,50
- n. 002: 29,77
- n. 003: 20,07

Come vedremo dall'analisi dei risultati, questo è un aspetto importante da considerare nella gestione del corso d'acqua e nella definizione delle opere di sistemazione.

Infatti, attraverso la realizzazione di differenti simulazioni, lo studio ha permesso di individuare i parametri che permettono di ottenere valori della pendenza di correzione più simili a quelli che sono stati definiti naturalmente nei tratti d'alveo oggetto di analisi.

Le analisi effettuate hanno evidenziato che i valori delle pendenze di correzione teorici che si avvicinano maggiormente a quelli reali sono rappresentati da due differenti combinazioni (Fig. 65 e Tabella 47).

La prima è rappresentata da una portata di piena generata da un tempo di ritorno di 30 anni ed un diametro percentile (D_{xx}) oltre il quale si impone stabilità del letto, pari all'ottantaquattresimo percentile (D_{84}) della curva granulometrica di riferimento.

Questo significa che la pendenza apportata dalla sistemazione, per una portata con TR 30 anni ($38,49 \text{ m}^3/\text{s}$), è tale da comportare il trasporto solido di tutti i sedimenti aventi diametro inferiore a 373 mm per i tratti di competenza delle briglie 1, 2 e 3, e 168 mm per il tratto di competenza della briglia 5.

La seconda, invece, è rappresentata dalla combinazione per la quale la portata di piena è generata da un tempo di ritorno pari a 100 anni ed un D_{xx} corrispondente al novantesimo percentile (D_{90}) della curva granulometrica di riferimento.

Questo significa che la pendenza apportata dalla sistemazione, per una portata con TR 100 anni ($52,92 \text{ m}^3/\text{s}$), è tale da comportare il trasporto solido di tutti i sedimenti aventi diametro inferiore a 505 mm per i tratti di competenza delle briglie 1, 2 e 3, e 323 mm per il tratto di competenza della briglia 5.

Nel capitolo 1.3 si riporta che l'imposizione di un D_{xx} elevato (come nel caso dei due scenari appena riportati) può comportare il trasporto di una considerevole quantità di sedimenti, rendendo l'alveo molto dinamico.

L'elevata dinamicità, se eccessiva, può portare ad erosioni del fondo eccessive, fatto che non è stato osservato nei tratti in esame. La corazzatura dell'alveo operata dai sedimenti di maggiori dimensioni, nel caso in esame inibisce questi fenomeni erosivi permettendo quindi di ottenere un valore di pendenza di correzione ottimale anche utilizzando percentili diametrici elevati.

Ciononostante, combinazioni tra portata e diametro dei sedimenti più estreme, com'è tra Q_{30} e D_{90} , si confermano inidonee alla definizione della pendenza di correzione in quanto porterebbero effettivamente a condizioni di dinamicità dell'alveo troppo elevate. In questi casi, fenomeni alluvionali con alti tassi di trasporto solido potrebbero infatti causare erosioni del fondo tali da esporre eccessivamente il piede della briglia e comprometterne la stabilità.

Il caso opposto invece si può verificare per la combinazione Q_{30} e D_{50} (Tabella 44). I valori di i_c ottenuti da quest'ultima dimostrano che, a causa dell'elevata eterogeneità granulometrica dell'alveo, l'imposizione di un diametro percentile inferiore inibirebbe troppo il trasporto solido di fondo, portando così all'aumento della quota del letto.

L'eccessiva diminuzione della pendenza, infatti, può portare il corso d'acqua a trovare una situazione di equilibrio su valori di pendenze del fondo maggiori. Tale condizione provoca l'accumulo di sedimenti a valle di ogni briglia e la conseguente diminuzione dell'energia di trasporto della portata liquida in quanto in funzione dell'inclinazione del fondo. Questo effetto può causare parziali sommersioni delle briglie, riducendo l'effetto di stabilizzazione in caso di eventi eccezionali. Una pendenza di correzione troppo bassa implica inoltre un aumento dei costi della sistemazione visto che per raggiungere tali valori è necessario un numero maggiore di briglie o altezze delle opere maggiori.

In riferimento, perciò, a quanto descritto per gli ultimi due scenari, la scelta errata della pendenza di correzione può causare la formazione di nuove situazioni di pericolo, ma anche rappresentare un investimento economico errato, il quale non può fare altro che peggiorare dato che per sistemare l'eventuale danno, sarebbero necessari ulteriori interventi.

In conclusione, si può affermare quindi che la sistemazione realizzata tra il 2008 ed il 2009 sul torrente Pramper abbia anticipato correttamente la naturale pendenza del corso d'acqua stesso.

7 CONCLUSIONE

Il presente studio si è concentrato sulla valutazione a posteriori dell'efficacia sistematoria, in termini di pendenza di correzione (i_c), di una serie di briglie realizzate nel torrente Pramper (Val di Zoldo, BL) tra il 2008 ed il 2009.

Nelle giornate del 27 aprile e 29 giugno 2023, si sono svolti i rilievi topografici e granulometrici al fine di acquisire rispettivamente le geometrie delle briglie dell'alveo nel tratto analizzato, e le dimensioni caratteristiche dei sedimenti presenti. Da quest'ultime analisi si è potuto constatare il fatto che l'alveo sia caratterizzato da un'elevata eterogeneità granulometrica e da massi di notevoli dimensioni. La presenza di questa tipologia di contesto ha condotto la ricerca alla verifica del set di parametri ottimale per la definizione di un valore di pendenza di correzione che si avvicini il più possibile alla condizione di equilibrio osservata in campo. Per raggiungere questo obiettivo il lavoro di tesi si è sviluppato nelle seguenti fasi.

Dapprima la descrizione morfometrica del bacino idrografico, svolta attraverso l'uso del software QGIS, ha permesso di individuare valori quali il tracciato del collettore principale, la distribuzione delle pendenze e delle aree, la lunghezza del reticolo idrografico e conseguentemente il tempo di corrivazione.

In seguito, le analisi idrologiche, svolte grazie ai dati forniti dalla stazione pluviometrica di Forno di Zoldo – Campo, appartenente alla rete di monitoraggio ARPAV, e ai dati relativi alla distribuzione delle aree in base al CNII, forniti dalla Regione Veneto, hanno permesso di poter stimare i valori delle portate liquide per differenti tempi di ritorno (TR).

L'individuazione della portata liquida di riferimento è stata condotta attraverso la determinazione dell'idrogramma di piena tramite differenti metodologie. Tra esse però si è deciso di utilizzare il valore ottenuto dal metodo cinematico con una distribuzione della pioggia di tipo costante nel tempo.

Infine, si sono calcolati i valori delle pendenze di correzione per ogni briglia individuata nel tratto analizzato, attraverso differenti combinazioni di portate liquide al picco (Q_{xx}) e percentili diametrici (D_{xx}). In particolare, si sono determinati i valori di i_c nel caso dei diametri percentili di D_{50} e D_{84} con una portata liquida generata da un evento con TR 30 anni, e per il diametro percentile D_{90} generato da portate liquide aventi TR 30 e 100 anni.

Dal confronto con i valori di i_c misurati in campo e i valori di i_c teorici calcolati in base alla conformazione della sistemazione esistente, è emerso che le combinazioni $Q_{30} - D_{84}$ e $Q_{100} - D_{90}$ sono quelle che forniscono una migliore rappresentazione dello stato attuale.

Al fine di evidenziare la somiglianza tra i valori di i_c misurati in campo, ed i valori di i_c ottenuti per via teorica, si riporta di seguito una tabella riassuntiva dei risultati ottenuti, contenente i valori calcolati per ogni combinazione e le rispettive medie degli scarti.

Tratto	i_c misurata [m/m]	i_c teorica [m/m]			
		$D_{50} - Q_{30}$	$D_{84} - Q_{30}$	$D_{90} - Q_{30}$	$D_{90} - Q_{100}$
Briglia 1	0,0858	0,0082	0,1045	0,1549	0,1278
Briglia 2	0,1077	0,0069	0,0898	0,1345	0,1098
Briglia 3	0,1511	0,0070	0,0907	0,1346	0,1103
Briglie 1 - 3	0,1055	0,0076	0,0974	0,1451	0,1192
Briglia 5	0,0674	0,0109	0,0590	0,0967	0,0778
Medie degli scarti		-0,0954	-0,0152	0,0297	0,0055

Tabella 48 – Confronto tra i valori di i_c misurati rispetto a i_c teorici per ogni combinazione

Le analisi effettuate permettono infine di affermare che, in caso di eterogeneità granulometrica, l'utilizzo di percentili diametrici tutto sommato elevati ($D_{84} - D_{90}$) può garantire l'ottenimento di buoni risultati sistematori.

8 BIBLIOGRAFIA

- APAT, A. n. p. l. p. d., 2003. *Atlante delle opere di sistemazione fluviale*. Roma: s.n.
- ARPAV, 2022. *27 - 30 ottobre 2018. Maltempo in Veneto: pioggia e vento eccezionali*. [Online]
Available at: <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/neve/approfondimenti/27-30-ottobre-2018.-maltempo-in-veneto-pioggia-e-vento-eccezionali>
[Consultato il giorno 21 08 2023].
- ARPAV, 2022. *Gruppo idrologico*. [Online]
Available at: <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/conoscenza-dei-suoli/carte-applicative/gruppo-idrologico>
[Consultato il giorno 02 09 2023].
- ARPAV, 2023. *Precipitazione di massima intensità*. [Online]
Available at: <https://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/dati-storici/meteo-idro-nivo/precipit-max?codseq=300001896>
[Consultato il giorno 12 07 2023].
- D'Agostino, V., 1996. ANALISI QUANTITATIVA E QUALITATIVA DEL TRASPORTO SOLIDO TORRENTIZIO NEI BACINI MONTANI DEL TRENTO ORIENTALE. *Associazione Italiana di Ingegneria Agraria*, Volume 1.
- D'Agostino, V., 2022. *Appunti delle lezioni di Design of Sustainable and Resilient Measures Against Floods, Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio. Università di Padova*. s.l.:s.n.
- D'Agostino, V. & Cerato, M., 2004. Una revisione critica del concetto di pendenza di correzione. *10° Congresso INTERPRAEVENT*, Volume 1, pp. III-69 - III-80.
- Deppo, L. D., 2016. *L'ALLUVIONE DEL 3-4 NOVEMBRE 1966 NELLE TRE VENEZIE. Considerazioni (malinconiche) dopo 50 anni*. [Online]
[Consultato il giorno 21 08 2023].
- Ferro, V., 2006. *La sistemazione dei bacini idrografici - seconda edizione*. Milano: McGraw-Hill.
- Guarnieri, A., 2022. *Appunti delle lezioni di Topografia, Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio. Università di Padova*. s.l.:s.n.

ISPRA, 2022. *Progetto CARG - Longarone*. [Online] Available at:

https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note_illustrative/46_Longarone.pdf

[Consultato il giorno 17 08 2023].

Lastoria, B. et al., 2021. *Rapporto sulle condizioni di pericolosità da alluvione in Italia e indicatori di rischio associati*. [Online]

Available at:

https://www.isprambiente.gov.it/files2021/pubblicazioni/rapporti/rapporto_alluvioni_ispra_353_16_11_2021_rev2.pdf

[Consultato il giorno 04 09 2023].

Lenzi, M. A., 2022. *Appunti delle lezioni di Channel morphology large wood sediment and sediment fluxes in mountain rivers, Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio*. s.l.:s.n.

Matalas , N. C., Slack, J. R. & Wallis, J. R., 1975. Regional skew in search of a parent. *Water Resources Research*, 11(6), pp. 815 - 826.

Menin, A., 2022. *Appunti delle lezioni di Metodologie innovative per il rilievo 3D, Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio. Università di Padova*. s.l.:s.n.

Mishra, S. K. & Singh, V. P., 2002. SCS-CN Method. Part I: Derivarion of SCS-CN-Based Models. *ACTA GEOPHYSICA POLONICA*, 50(3).

OPENCOESIONE, 2023. *Torrente Pramper - Realizzazione di briglie selettive, muro arginale e consolidamento versanti*. [Online]

Available at: <https://opencoesione.gov.it/it/progetti/1misevendui1a3p076/>

[Consultato il giorno 12 07 2023].

QGIS, 2023. *QGIS Geographic Information System. QGIS Association*. [Online]

Available at: <https://www.qgis.org/>

[Consultato il giorno 11 09 2023].

Regione Veneto, 2011. *VENETO - LA GRANDE ALLUVIONE*. [Online]

Available at:

https://www.casalserugoedintorni.it/img/pub/opuscolo_veneto_la_grande_alluvione.pdf

[Consultato il giorno 21 08 2023].

Regione Veneto, 2022. *Banca dati della Carta della Copertura del Suolo aggiornamento 2020*. [Online]

Available at: <https://idt2.regione.veneto.it/idt/webgis/viewer?webgisId=216>

[Consultato il giorno 07 09 2023].

Rosso, R., 2004. *SHAKEUP-2: Mappatura dell'Indice di Assorbimento e del Massimo Volume Specifico di Ritenzione Potenziale del Terreno*. , Milano: s.n.

Shields, 1936. Application of similarity principles and turbance research to bed-load movement.

Zaramella, M. & Gregoretti, C., 2021. *Appunti delle lezioni di Idraulica e Idrologia, Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio*. s.l.:s.n.