

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE BIOLOGICHE,
GEOLOGICHE E AMBIENTALI

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

Definizione di soglie pluviometriche di
allertamento per debris-flows nel bacino del
torrente Blé (Val Camonica, BS)

Candidato:
Linda Goldoni

Relatore:
Prof. Matteo Berti

Sessione Marzo 2023
Anno Accademico 2021-2022

Indice

Abstract	III
1. INTRODUZIONE	1
1.1. Scopo della tesi	1
1.2. Fasi di lavoro.....	1
1.3. Area di studio	2
2. STUDI PRECEDENTI	3
2.1. Caratteristiche delle colate di detrito.....	3
2.2. Monitoraggio di debris-flow	8
2.2.1. Monitoraggio delle precipitazioni	9
2.2.2. Monitoraggio dell'innesco della colata detritica.....	10
2.2.3. Monitoraggio della dinamica del flusso	11
2.2.4. Acquisizione, trasmissione dati e alimentazione.....	13
2.3. Strumentazione di allertamento.....	14
2.4. Colate di detrito nella regione Lombardia.....	17
2.4.1. Frequenza degli eventi di colata detritica in Lombardia	17
2.4.2. Soglie pluviometriche nella regione Lombardia	19
2.4.3. Esempi di eventi storici di debris-flow in Lombardia	25
2.5. Cenni sul clima della Val Camonica.....	28
2.5.1. Evidenze di cambiamento climatico	29
3. BACINO DEL TORRENTE BLÉ	30
3.1. Inquadramento geologico.....	30
3.2. Uso del suolo.....	33
3.3. Geomorfologia del bacino.....	37
3.4. Analisi multi-temporale del bacino.....	42
3.5. Caratteristiche granulometriche del detrito in alveo	50
3.6. Eventi di debris-flow passati.....	53
3.7. Eventi di debris-flow recenti.....	57
4. STAZIONE DI MONITORAGGIO	62
4.1. Scopo del monitoraggio	62
4.2. Strumentazione.....	62
4.2.1. Geofoni	63
4.2.2. Pluviometro.....	63
4.2.3. Datalogger.....	64
4.2.4. Pannello solare e batteria.....	64

4.2.5.	Data-Cube.....	65
4.2.6.	Sistema PiCamera & MAMODIS	65
5.	ANALISI DEI DATI PLUVIOMETRICI.....	67
5.1.	Scopo dell'analisi	67
5.2.	Metodologia.....	67
5.2.1.	Estrazione degli eventi di pioggia	67
5.2.2.	Osservazione delle immagini	69
5.2.3.	Definizione delle soglie.....	73
5.2.4.	Confronto con le soglie preesistenti	73
5.3.	Risultati	74
5.3.1	Eventi di pioggia nel 2021.....	74
5.3.2	Eventi di pioggia nel 2022.....	75
5.3.3	Grafico cumulativo degli eventi degli anni 2021-2022	76
5.3.4.	Aggiunta delle soglie sperimentali	77
5.4.	Discussione.....	78
6.	ANALISI DEI DATI SISMICI	81
6.1.	Scopo dell'analisi	81
6.2.	Metodologia.....	81
6.2.1.	Registrazione dei segnali sismici.....	81
6.2.2.	Estrazione dei segnali di ampiezza e frequenza	82
6.2.3.	Definizione dei rapporti di ampiezza e classificazione	86
6.2.4.	Confronto delle ampiezze medie	86
6.2.5.	Definizione dei rapporti di frequenza e classificazione.....	86
6.3.	Risultati	87
6.4.	Discussioni	93
7.	CONCLUSIONI	95
	BIBLIOGRAFIA.....	99
	SITOGRAFIA.....	105

Abstract

I debris-flow sono definiti come i fenomeni franosi più pericolosi tra quelli esistenti, a causa della loro velocità, del carattere impulsivo, del grande volume di materiale che può essere trasportato, ma soprattutto, della difficoltà di previsione del fenomeno e, di conseguenza, di prevenzione sugli abitati circostanti e la popolazione che li abita.

La causa innescante è da ricercare prevalentemente nelle piogge molto brevi ed intense, tipiche delle celle temporalesche, che in montagna assumono caratteristiche spiccatamente localizzate.

L'abitato di Ono San Pietro, in Val Camonica (BS), è situato nelle immediate vicinanze del torrente Blé, corso d'acqua che è da sempre interessato da eventi di debris-flow.

Tali fenomeni, in alcune occasioni, hanno assunto potenza e volume distruttivi, tali da aver danneggiato alcune infrastrutture come strade e ponti, anche durante gli eventi più recenti del 2018, 2019 e 2021. Fortunatamente in tali occasioni non sono rimaste coinvolte persone, tuttavia questi eventi sembrano aver acquisito maggior frequenza rispetto agli anni passati, probabilmente a causa dei cambiamenti climatici, che vedono le precipitazioni annuali in diminuzione, con più frequenti eventi temporaleschi molto intensi.

Per questo motivo, nel 2021, la Regione Lombardia ha deciso di finanziare un progetto di ricerca scientifica sulle colate rapide di detrito nel bacino del torrente Blé, al fine di aumentare la conoscenza sulla dinamica dei debris-flow, identificarne i fattori di controllo geomorfologico e meteorologico sull'innescamento e definire possibili strumenti, idonei all'allertamento.

Al fine di realizzare questi obiettivi il bacino del torrente in questione è stato attrezzato con strumentazione da campo in grado di documentare sia i processi di innescamento, con "stazioni di innescamento", che di propagazione, con "stazioni di flusso".

Per il presente lavoro di tesi ci si è avvalsi della sola analisi dei dati forniti dall'ultima tipologia di stazione, costituita da un pluviometro, tre geofoni, due telecamere ed un sensore ad infrasuoni.

I pluviometri sono utilizzati per registrare eventi piovosi e le precipitazioni ad essi correlati. I geofoni permettono, invece, di monitorare l'andamento di ampiezza del tremore e frequenza di picco in concomitanza degli eventi di pioggia ed incrociarlo con i risultati del pluviometro, al fine di caratterizzare meglio la risposta idrologica del bacino.

I dati utilizzati sono stati raccolti tra il 2021 ed il 2022, al fine di estrapolare dei valori di soglia pluviometrica. La sintesi dei dati di vari eventi in una singola soglia di comportamento idrologico permette di comprendere meglio quali possono essere le principali combinazioni di intensità e durata di pioggia, tali da innescare un evento di colata. In tal modo, una volta determinata una stima previsionale, si potrebbe implementare in un sistema di allerta, in modo da agire repentinamente sulla mitigazione del rischio.

1. INTRODUZIONE

Il torrente Blé è da sempre interessato da fenomeni di colate detritiche che nel tempo hanno depositato un'ingente quantità di materiale a valle, alla confluenza con il fiume Oglio, generando un'importante conoide di detrito su cui è insediato l'abitato di Ono San Pietro, in provincia di Brescia.

Quasi ogni anno nell'alveo del torrente si manifestano colate di detrito, a volte con caratteristiche catastrofiche, che in alcuni casi hanno colpito e danneggiato infrastrutture antropiche come ponti e ciclabili.

Negli anni sono stati effettuati diversi studi per capire il comportamento del torrente durante precipitazioni molto intense e costruire soglie pluviometriche, con lo scopo di implementarle a sistemi di allerta.

1.1. Scopo della tesi

Il presente studio ha lo scopo di analizzare le immagini time-lapse, i dati pluviometrici e sismici, raccolti dalla stazione di monitoraggio installata sulla sponda sinistra del torrente Blé nel luglio 2021. I dati analizzati provengono da due anni di monitoraggio in continuo del canale attivo di debris-flow, più precisamente degli anni 2021 e 2022.

Il fine di tale analisi verte sulla comprensione del comportamento del bacino in risposta ad eventi pluviometrici di diversa entità, sia tramite immagini sia con i segnali sismici prodotti dai processi in alveo.

Lo scopo finale è quello di descrivere le risposte dei vari eventi e successivamente identificare delle soglie di precipitazione che possano essere utilizzate come soglie di allarme per un eventuale sistema di allerta, al fine di prevenire danni a persone e/o infrastrutture.

1.2. Fasi di lavoro

Il presente lavoro è composto da diversi step, di seguito presentati in ordine cronologico:

- I. Consultazione della letteratura esistente e della carta geologica del sito per identificare il contesto del bacino in esame, in particolare la dinamica dei debris-flow ed i vari metodi di monitoraggio implementati per studiare tali fenomeni;
- II. Sopralluogo in campo con prelievo di campioni in alveo ed acquisizione di punti georeferenziati per realizzare una sezione trasversale del tratto torrentizio in esame;
- III. Definizione tramite ArcGIS dei caratteri idrologici e morfologici dell'area, per definire una mappa di uso del suolo di dettaglio e valutarne la correlazione con la dinamica di bacino che genera i debris-flow;
- IV. Realizzazione di una granulometria del materiale prelevato in alveo, per caratterizzare il detrito coinvolto nelle colate;
- V. Analisi dei dati di pioggia registrati nel corso degli anni 2021/22 e costruzione di soglie pluviometriche sulla base della risposta del torrente, analizzata tramite le immagini ricavate dalla videocamera installata sulla stazione di monitoraggio;
- VI. Analisi dei dati sismici registrati dai tre geofoni, per caratterizzare ampiezza media e frequenza di picco sia del rumore di fondo, che durante il culmine dell'evento.

1.3. Area di studio

Il presente lavoro di tesi si basa sui dati raccolti dalla stazione di monitoraggio situata nel bacino idrografico del torrente Blé, affluente destro del fiume Oglio, in Val Camonica (BS). Il corso d'acqua in esame si trova all'interno del comune di Ono San Pietro, a 493 m s.l.m. (46.016524° ; 10.329125°), e divide quest'ultimo dal vicino comune di Cerveno, a 486 m s.l.m. (46.003826° ; 10.324325°) (**Figura 1B**).

Sulla sponda sinistra del torrente è stata installata nel luglio 2021 una stazione di monitoraggio a 735 m s.l.m. (46.015130° ; 10.315341°) che permette la raccolta dei dati, oltre che riprese foto e video, dei frequenti fenomeni di colate di detrito (o debris-flow) che si innescano lungo il canale. La zona di installazione, visibile in **Figura 1A** alla scala 1:15'000 e in **Figura 1B** alla scala 1:6'000, è stata scelta sulla base dell'accessibilità per le macchine operatrici, nel caso di trasporto di materiale per manutenzione, ma anche per la buona visuale sul tratto di canale in questione, costantemente monitorato da remoto tramite videocamera.

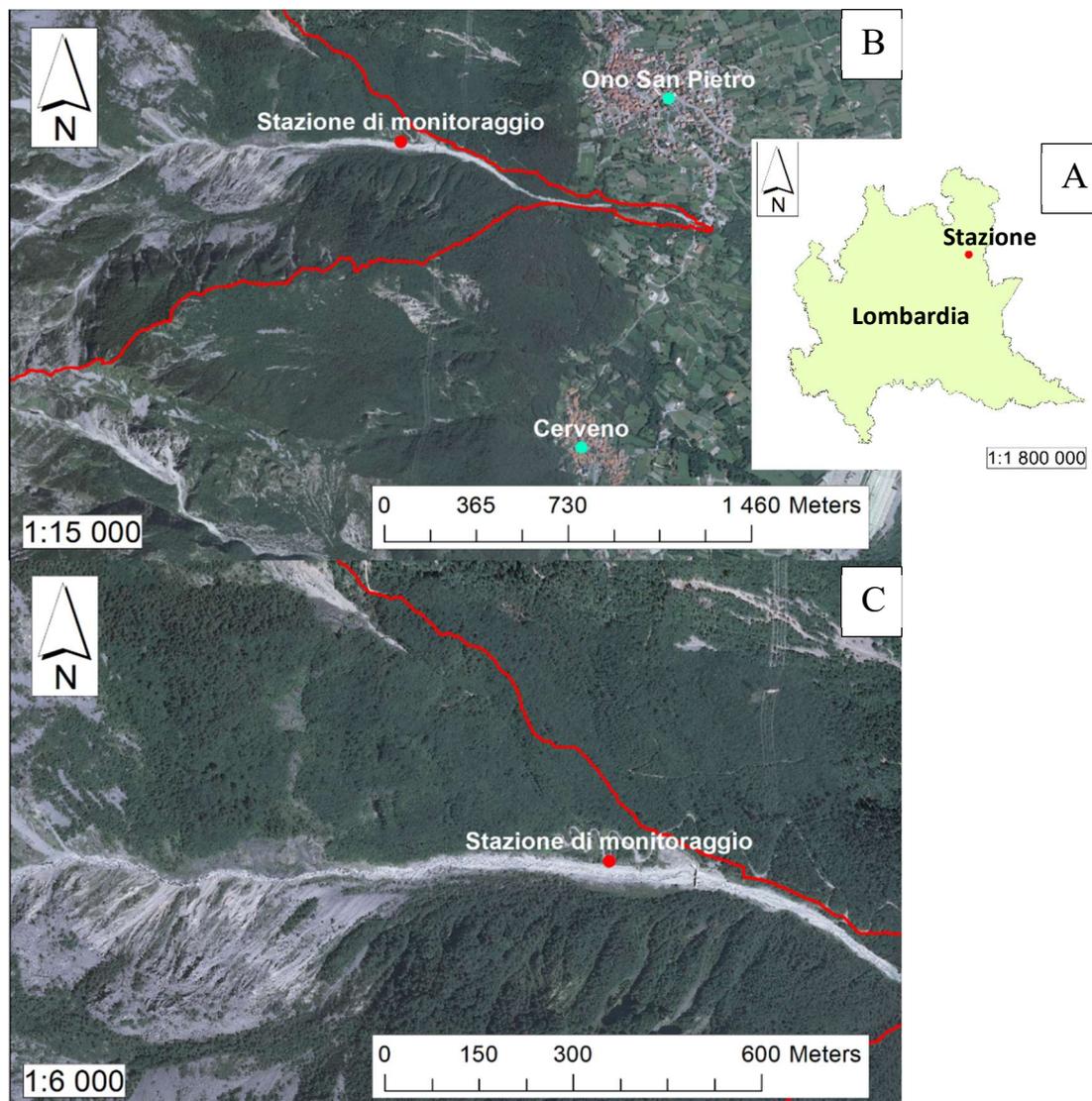


Figura 1. Le immagini, ottenute tramite ArcMap, mostrano la posizione della stazione di monitoraggio rispetto: **A)** alla regione Lombardia; **B)** ai due abitati di Ono San Pietro e Cerveno; **C)** al canale di incisione del torrente Blé e la frana de “La Tavola”. In tutti i casi è delineato il bacino del T. Blé con la linea rossa.

2. STUDI PRECEDENTI

2.1. Caratteristiche delle colate di detrito

Le colate di detrito sono movimenti franosi caratterizzati da un particolare cinematismo ed una specifica distribuzione granulometrica. Le frane vengono descritte nel complesso come “*un qualsiasi movimento di roccia, detrito o terra lungo un versante*”, ma ne esistono di diverse categorie. In particolare, facendo riferimento alla **Figura 2**, che rappresenta la Classificazione di *Cruden & Varnes (1996)*, è possibile notare come ad ogni movimento sia associato un diverso tipo di materiale, classificando così fino a 15 tipi di fenomeni franosi.

In particolare, si fa riferimento ai movimenti di colata, che si suddividono in due categorie a seconda del materiale coinvolto:

- Colata di terra (earth-flow), caratterizzata da materiale ad alta componente argillosa, abbondante contenuto d’acqua e scarsa velocità, che rendono tali fenomeni molto viscosi.
- Colata di detrito (debris-flow), fenomeni parossistici che si innescano generalmente a seguito di un evento temporalesco breve e molto intenso. Il materiale preso in carico presenta granulometria estremamente eterogenea ed il flusso è caratterizzato da un grande quantitativo d’acqua. Queste due caratteristiche stanno alla base dell’innescio del processo stesso, che verrà descritto con maggior dettaglio di seguito.

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
			Predominantly coarse	Predominantly fine
FALLS		Rock fall	Debris fall	Earth fall
TOPPLES		Rock topple	Debris topple	Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide	Earth slide
	TRANSLATIONAL			
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS		Rock flow (deep creep)	Debris flow (soil creep)	Earth flow

Figura 2. Classificazione di *Cruden & Varnes (1996)*.

Il presente lavoro verte sullo studio della categoria evidenziata in rosso, ossia le colate di detrito (o debris-flow). Questo fenomeno, nel corso degli anni, è stato descritto in maniera diversa da autori differenti:

- “Un flusso (colata) è un movimento spazialmente continuo in cui le superfici di taglio sono temporaneamente, fittamente spaziate, e generalmente non preservate. La distribuzione di velocità nella massa in frana è simile a quella di un fluido viscoso” (*Cruden & Varnes, 1996*).
- “Una colata di detrito è una miscela di acqua, sedimenti scarsamente selezionati ed altro detrito che si muove per gravità ad elevate velocità” (*Iverson, 1997*).

Ciò che accomuna le due descrizioni sono: il rilevante contenuto d'acqua, la presenza di materiale di diversa granulometria e la velocità sostenuta che questi fenomeni acquisiscono. Tipicamente le colate di detrito avvengono ad "impulsi", in maniera rapida, innescandosi ed esaurendosi in un tempo che va da una decina di minuti ad un'ora (Rappelli, 2008).

Un'altra particolarità è la struttura all'interno del canale. Con riferimento alla **Figura 3**, infatti, è possibile distinguere una gradazione longitudinale (Hungry et al., 2001), che suddivide il corpo in tre parti:

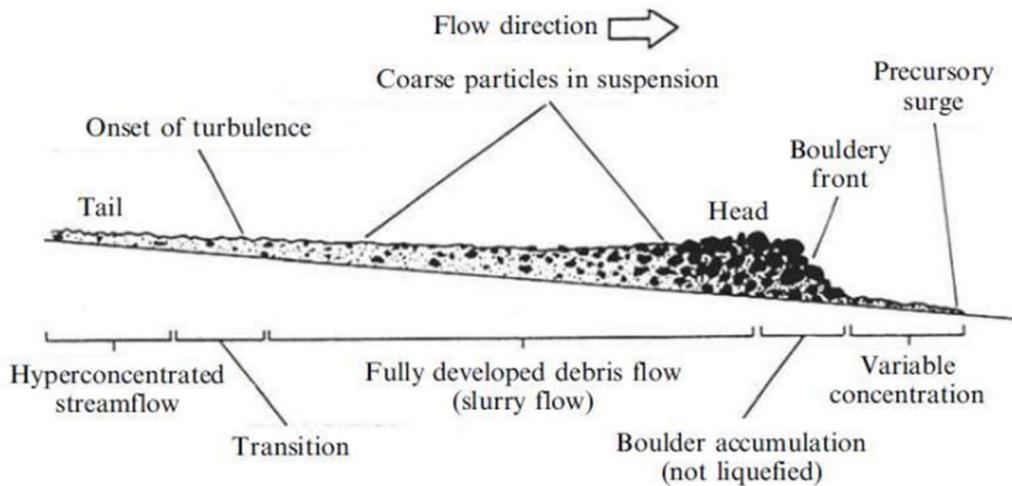


Figura 3. Schema concettuale di un debris-flow (Pierson, 1980).

- **Il fronte (Figura 4)**, caratterizzato da elevata altezza e pendenza, rappresenta la porzione dal maggiore potere erosivo e distruttivo, costituito dal detrito più grossolano. Tale zona del corpo di frana è solo parzialmente saturata.
- **Il corpo**, con pendenza meno accentuata, si presenta saturo, con le particelle fini in sospensione che vanno a riempire i vuoti del materiale più grossolano.
- **La coda** è la porzione terminale della colata, in cui le pendenze diminuiscono notevolmente ed il contenuto è relativamente fine.

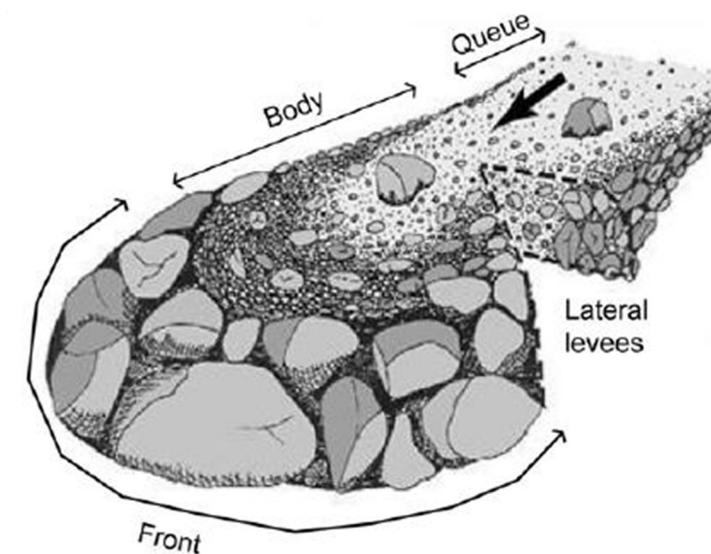


Figura 4. Schema rappresentativo del fronte di un debris-flow (Bardou et al., 2003).

Le colate di detrito tendono a ripetersi nelle aree di interesse, generando morfologie dai tratti caratteristici. Si distinguono per tale motivo tre unità geomorfologiche, evidenziate in rosso in *Figura 5*:

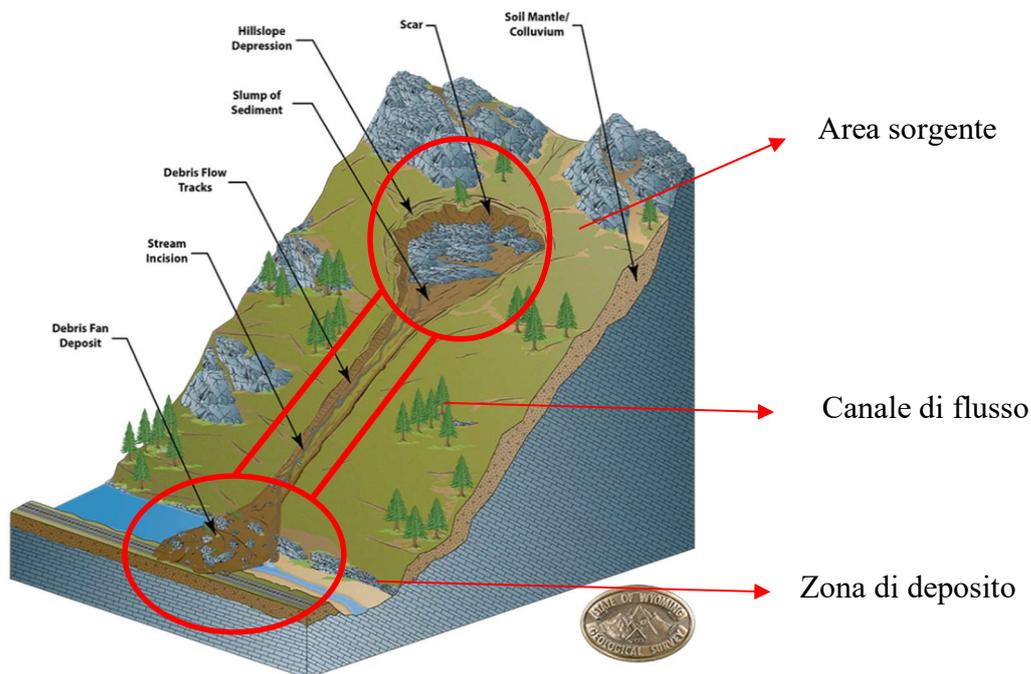


Figura 5. Suddivisione schematica di un debris-flow nelle tre aree morfologiche (www.intrageo.it).

- **Area sorgente** (o zona d'innescio), si tratta della parte più alta del bacino, dove è presente un elevato afflusso d'acqua. Questo fattore, unitamente alla presenza di detrito sciolto ed alle elevate pendenze, permette l'innescio di fenomeni di frana superficiale o di erosione.
- **Canale di flusso** (o zona di transito), è l'area in cui avviene il passaggio della colata detritica, tra l'area sorgente e la zona di accumulo. Tale porzione inizialmente presenta un'elevata pendenza che permette alla massa di acquisire notevole velocità, aumentando il suo potere erosivo, inglobando ulteriore materiale detritico e vegetale, e scavando sempre più il canale. Più a valle la pendenza tende a diminuire, riducendo così l'energia e lasciando depositi laterali, che si trasformano in argini al margine con la zona di deposito.
- **Zona di deposito** (o zona di accumulo) (*Figura 6*), il susseguirsi degli eventi nel tempo e le basse pendenze portano alla formazione di depositi di forma lobata (*Cruden & Varnes, 1996*). Essi non hanno stratificazione interna ma presentano una classazione distale, con blocchi di grosse dimensioni nelle parti più lontane del conoide che le impartiscono un'elevata pendenza. Le granulometrie minori e la frazione fine del materiale si depositano in genere all'apice dello stesso. Spesso la conformazione topografica della zona fa sì che si generino depositi ramificati.



Figura 6. Zona di accumulo, rimaneggiata da mezzi meccanici, mostra la non-selezione verticale della granulometria. Foto scattata presso il debris-flow di Acquabona, Cortina d'Ampezzo (BL).

Questi fenomeni si possono sviluppare a seguito di due principali meccanismi di innesco (Iverson *et al.*, 1997; Berti & Simoni, 2005):

1. **Innesco per frana superficiale**, che si instaura nella parte alta di un versante, raggiungendo in un secondo momento un canale più a valle. Tale area è tipicamente caratterizzata da sottili spessori di terreno composto da materiale scarsamente selezionato, con frazione fine non superiore al 30-40% (Berti & Simoni, 2005), poggianti direttamente sul bedrock. La frana si verifica quando l'acqua meteorica si infiltra rapidamente nel terreno granulare, per poi raggiungere il substrato meno permeabile, ad elevate pendenze. In questo modo le pressioni interstiziali aumentano positivamente, generando una "falda sospesa" che permette lo scivolamento basale al contatto tra coltre ed il bedrock (Sidle e Swanston, 1982; Anderson e Sitar, 1995). Il materiale mobilitato aumenta in tal modo la pressione dei pori, facendo collassare la struttura ed originando un fenomeno di liquefazione. Il detrito acquisisce un comportamento fluido-viscoso che permette di aumentare la velocità del flusso e di conseguenza il potere erosivo ed il volume, fino a quando la pendenza del canale rimane elevata (Hutchinson, 1988; Cruden & Varnes, 1996).
2. **Innesco per erosione di fondo canale**, che si instaura all'interno di un detrito generalmente secco. I fattori innescanti sono: precipitazioni a carattere temporalesco, quindi brevi ed intense, elevate pendenze e materiale prevalentemente grossolano con un contenuto minore del 10-20 % di limo e argilla (Berti & Simoni, 2005). La zona sorgente, che può essere singola o multipla, riceve precipitazioni di forte intensità che provocano un deflusso superficiale critico. Questo, una volta incanalato, genera elevate forze di taglio, che mobilitano il detrito presente sul fondo canale (Berti & Simoni, 2005), con conseguente rapida transizione da flusso immaturo a flusso maturo, ed aumento di volume lungo il percorso (Hutchinson, 1988; Cruden & Varnes, 1996). Questi fenomeni si instaurano nelle zone disboscate o di alta montagna, a causa della concentrazione del flusso di superficie su ripidi pendii rocciosi, a monte delle zone di innesco (Berti *et al.*, 1999; D'agostino & Marchi, 2003), come illustrato in **Figura 7**.

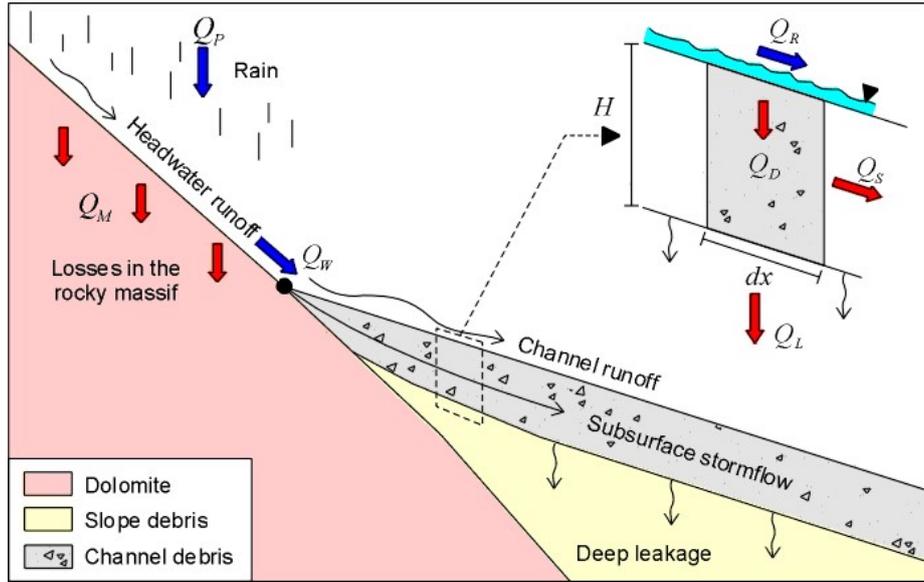


Figura 7. Sezione schematica dei principi alla base dell'innesco per erosione di fondo canale (Berti et al., 2020).

Indipendentemente dal tipo di innesco si riassumono i fattori predisponenti affinché avvengano delle colate detritiche:

- Presenza di elevate pendenze delle zone sorgenti e dei canali ($\alpha > 20^\circ$);
- Presenza di materiale scarsamente selezionato con componente grossolana prevalente;
- Presenza di abbondante flusso d'acqua, dipendente a sua volta da diverse dinamiche e contesti: topografia convergente, ruscellamento superficiale, sbarramento di un corso d'acqua o fusione rapida di neve o ghiaccio.

Infine, a differenza delle altre tipologie di frane, è importante sottolineare il comportamento repentino ed impulsivo di questi eventi, che associati ad elevate velocità di propagazione (classi 6 e 7 raffigurate in **Figura 8**), fanno sì che risultino uno dei fenomeni franosi più pericolosi esistenti. Difatti, la capacità distruttiva dei debris-flow è spesso sottovalutata a causa dell'innesco in torrenti di modeste dimensioni, caratterizzati da portate ordinarie il più delle volte pari a qualche decina di litri al secondo per la maggior parte dell'anno (Rappelli, 2008).

Classe	Descrizione	Velocità	V (mm/sec)	V (mm/giorno)	V (mm/mese)	V (mm/anno)
7	Estremamente rapido	5 m/sec	5.0E+03	4.3E+08	1.3E+10	1.6E+11
		3 m/min	5.0E+01	4.3E+06	1.3E+08	1.6E+09
5	Rapido	1.8 m/ora	5.0E-01	4.3E+04	1.3E+06	1.6E+07
		13 m/mese	5.0E-03	432	1.3E+04	1.6E+05
3	Lento	1.6 m/anno	5.0E-05	4.3	130	1600
		16 mm/anno	5.0E-07	0.043	1.3	16

Figura 8. Classi di velocità dei diversi fenomeni franosi. I debris-flow ricadono nelle classi 6 e 7 (Cruden & Varnes, 1996)

2.2. Monitoraggio di debris-flow

Le colate di detrito a causa della loro alta velocità, delle grandi forze d’impatto e delle lunghe distanze di percorrenza sono molto difficili da arrestare o contenere tramite opere strutturali, perciò l’unico intervento efficace di gestione del rischio è il monitoraggio. Le caratteristiche proprie del fenomeno, a differenza delle frane a lento movimento, richiedono una registrazione ad “alta frequenza” (*Hürlimann et al., 2019*), o sistematica dei diversi parametri, soprattutto quando l’evento è in corso. Solitamente, quando il canale non è attivo, si monitora lo stato del sito a “bassa frequenza”. Quando poi un sensore supera una “soglia critica” la stazione passa a modalità “alta frequenza” e fa partire l’allerta. Questa rete di dispositivi permette di migliorare le conoscenze sui meccanismi di innesco e dinamica del flusso, in modo da progettare sistemi di allarme e mitigazione efficienti, ai fini di diminuire l’impatto su infrastrutture e società (*Jakob & Hungr, 2005*).

In **Tabella 1** sono elencati i principali sensori che si possono utilizzare nell’analisi dei debris-flow.

Tabella 1. Caratteristiche principali dei sensori più comunemente utilizzati per il monitoraggio delle colate detritiche (*Hürlimann et al., 2019*).

Sensor	Parameter	Process
Rain Gauge	Rainfall, precipitation	Initiation
Time / Frequency Domain Reflectometry (TDR/FDR)	Soil water content	Initiation
Tensiometer	Negative pore water pressure	Initiation
Pressure sensor	Positive pore water pressure	Initiation/flow dynamics
Video camera	Flow regime, flow magnitude, surface	Initiation/flow dynamics
Stage sensor	Flow depth	Flow dynamics
Geophone	Ground vibration	Flow dynamics
Seismometer	Ground vibration	Flow dynamics
Infrasound sensor	Air pressure fluctuation	Flow dynamics
Doppler radar	Surface velocity	Flow dynamics
Entrainment sensor	Erosion	Flow dynamics
Load cell	Basal, lateral and impact stress	Flow dynamics

Sensor	Spatial extent	Distance (m)	Cost (€)
Rain Gauge	Channel reach - catchment	1-100	10 ²
Time / Frequency Domain Reflectometry (TDR/FDR)	Cross section	0-100	10 ²
Tensiometer	Cross section	0-100	10 ²
Pressure sensor	Cross section	0-100	10 ²
Video camera	Channel reach	1-100	10 ³
Stage sensor	Cross section	0	10 ³
Geophone	Channel section - channel reach	1-100	10 ²
Seismometer	Channel section - catchment	1-1000	10 ³
Infrasound sensor	Channel reach - catchment	1-1000	10 ³
Doppler radar	Channel reach	1-100	10 ⁴
Entrainment sensor	Cross section	0	10 ³
Load cell	Cross section	0	10 ³

A fianco di ognuno sono riportare le rispettive informazioni: tipi di parametri misurati, processo analizzato, estensione spaziale di ogni strumento, distanza di installazione tra sensore e canale attivo ed il costo in euro (Hürlimann et al., 2019).

Ciascun sensore è in grado di essere collegato da remoto per permettere il continuo monitoraggio e verificarne il loro corretto funzionamento.

Di seguito tali strumenti sono descritti più nel dettaglio in funzione dei processi analizzati.

2.2.1. Monitoraggio delle precipitazioni

È stato riconosciuto che il principale fattore di innesco dei debris-flow sono le precipitazioni, talvolta combinate con lo scioglimento delle nevi (Wieczorek e Glade, 2005). Un'accurata raccolta di dati di precipitazione è fondamentale per definire le soglie pluviometriche e per prevedere il volume delle colate (Nikolopoulos et al, 2014; Marra et al., 2016).

Lo strumento più utilizzato oggi è il pluviometro, più precisamente con meccanismo a bilancia oscillante (**Figura 9**).

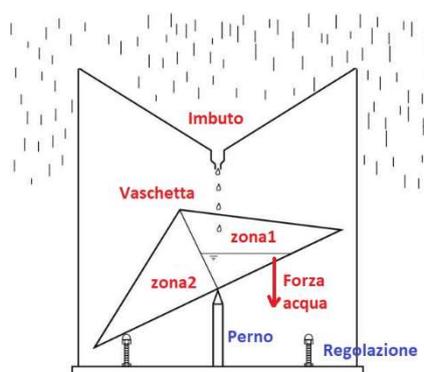


Figura 9. Rappresentazione schematica del meccanismo che governa il pluviometro a bilancia.

Tali sistemi hanno una risoluzione che varia tra 0.1 e 0.5 mm ad oscillazione, quindi, seppur semplici sono reputati efficienti ed economici.

L'accuratezza e l'affidabilità del dato dipendono in buona parte dalla precisione nell'installazione, che deve essere studiata, soprattutto nella localizzazione rispetto al canale. Molti debris-flow si innescano grazie a precipitazioni convettive locali molto intense, che si estendono su un areale ristretto. Per questo è necessario collocare il sensore il più vicino possibile all'area definita come "zona di innesco" (Hürlimann et al., 2019).

Ulteriori errori nella registrazione dei dati possono essere dovuti all'effetto del vento, che provoca una perdita di informazioni, la quale può essere minimizzata con l'applicazione di un anemometro a fianco del pluviometro, in modo da correggere il dato a seconda della velocità e direzione del vento.

Possono verificarsi errori di campionamento causati dall'impossibilità della bilancia di oscillare in modo abbastanza veloce da raccogliere tutta l'acqua (Habib et al., 2001), oppure può verificarsi l'ostruzione dell'imbuto di ricezione a causa della vegetazione che vi cade all'interno.

Un ulteriore accorgimento è da fare nel caso in cui la stazione si trovi in un bacino idrografico con precipitazioni nevose significative, la cui fusione rappresenta un altro fattore di innesco per le colate detritiche (Badoux et al., 2009). I pluviometri normali non misurano l'acqua prodotta dalla fusione del manto nevoso, ma esistono sistemi di riscaldamento che permettono di determinare l'equivalente in acqua della precipitazione nevosa.

2.2.2. Monitoraggio dell'innescò della colata detritica

I sensori che monitorano il meccanismo d'innescò possono variare a seconda della tipologia di quest'ultimo, che viene suddiviso in due categorie: innescò per frana superficiale o innescò per erosione di fondo canale.

Innescò per frana superficiale:

Nel primo caso, i sensori si focalizzano sulla registrazione dei dati di pressione interstiziale e di contenuto d'acqua nel versante. Spesso tali fenomeni sono conseguenza del franamento di un terreno colluviale che sovrasta il bedrock su un pendio ripido (Iverson *et al.*, 1997; Savage e Baum, 2005). Tali frane dipendono dallo sviluppo di sovrappressioni all'interfaccia tra strati a permeabilità contrastanti (Hürlimann *et al.*, 2019).

Il rapido aumento delle pressioni positive dell'acqua può essere rilevato da trasduttori di pressione, installati all'interno di piezometri a tubo aperto o direttamente interrati, per ottenere una risposta più rapida in terreni a bassa permeabilità (LaHusen, 2005; Berti & Simoni, 2010; Comiti *et al.*, 2014; Hürlimann *et al.*, 2019).

Talvolta l'innescò del fenomeno può verificarsi a causa della diminuzione della suzione di matrice (differenza tra pressione dell'aria e dell'acqua) durante le piogge. Tale parametro controlla la permeabilità e la resistenza al taglio dei terreni, influenzando direttamente sulla stabilità dei pendii (Crosta e Dal Negro, 2003; Godt *et al.*, 2009; Hürlimann *et al.*, 2019). Per tale motivo è di fondamentale importanza la sua misurazione.

I sensori in questione prendono il nome di tensiometri. Quelli standard sono efficienti nella misura, ma richiedono regolare manutenzione, operazione di difficile applicabilità in molti dei contesti di innescò dei debris-flow perché non facilmente raggiungibili. In alternativa possono essere utilizzati tensiometri a disco di ceramica porosa. In ultimo, la suzione di matrice può essere stimata attraverso metodi indiretti come la TDR (Time-domain reflectometry) o FDR (Frequency-domain reflectometry), presenti in **Figura 10**. Questi ultimi stimano il parametro sulla base della curva di ritenzione idrica del terreno (Hürlimann *et al.*, 2014; Hürlimann *et al.*, 2019).

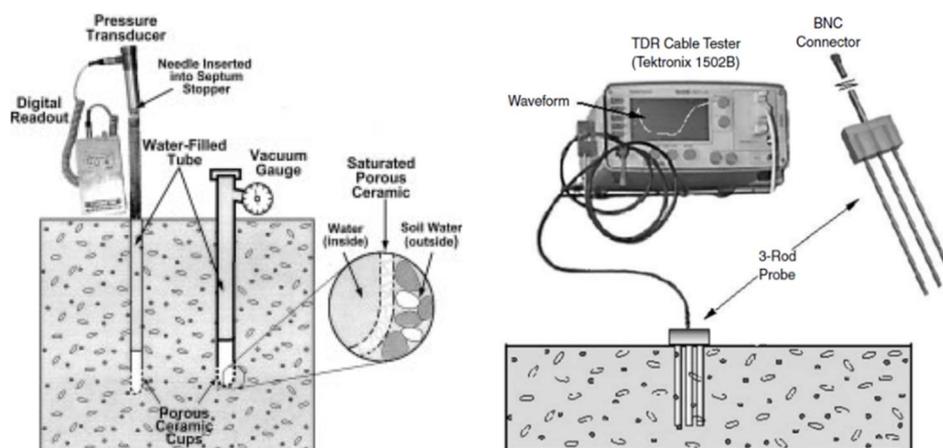


Figura 10. Diagrammi schematici di un tensiometro standard (Or, 2001) e un TDR (Jones *et al.*, 2002).

Innesco per erosione di fondo canale:

Questo meccanismo di innesco, controllato prevalentemente dal ruscellamento superficiale, è molto più complesso da monitorare rispetto al precedente. Di conseguenza, la stazione di monitoraggio deve essere equipaggiata in modo da osservare il processo di deflusso nel canale di debris-flow e rilevare il livello critico di ruscellamento, sufficiente da innescare l'erosione e la mobilitazione di fondo canale.

Comunemente il sistema prevede l'ausilio di telecamere e trasduttori di pressione interrati a bassa profondità. La combinazione dei dati forniti permette di identificare il comportamento idrologico del bacino idrografico, in risposta a precipitazioni di durata ed intensità variabili. Dall'analisi delle immagini estrapolate è poi possibile calcolare la velocità ed il volume del flusso, anche se l'irregolarità della sezione comporta notevoli errori (*Gregoretti et al., 2016; Hürlimann et al., 2019*).

Nel presente elaborato viene descritta la composizione di una stazione progettata per tale tipologia di innesco.

2.2.3. Monitoraggio della dinamica del flusso

Questa fase di monitoraggio richiede l'utilizzo di diverse strumentazioni a seconda del dato che si vuole raccogliere ed analizzare. Generalmente vengono collegate insieme in un breve tratto di canale, in modo da ridurre le incertezze. Il confronto dei dati derivanti dai diversi sensori installati lungo la traiettoria del flusso può fornire informazioni sull'idrogramma e sulla portata di picco, grazie alla combinazione della velocità e della sezione trasversale, approssimata dallo spessore del flusso. Con tali dati a disposizione è poi possibile stimare il volume totale del debris-flow integrando l'idrogramma (*Arattano & Marchi, 2005; Hürlimann et al., 2019*).

Vibrazioni del terreno ed infrasuoni:

I debris-flow sono movimenti rapidi in massa che generano onde sismiche ed infrasuoni mentre scendono lungo il canale (*Arattano & Moia, 1999; Abancó et al., 2014; Schimmel et al., 2018*). Le vibrazioni prodotte dall'impatto delle particelle solide all'interno del canale possono essere registrate da diversi sensori utilizzati per rilevare l'avvenimento di un debris-flow, caratterizzarne il tipo di flusso e stimarne la velocità (*LaHusen, 2005; Kean et al, 2015; Bel, 2017; Lai et al., 2018*).

I dispositivi più utilizzati per lo scopo sono i geofoni verticali, ed i sensori ad infrasuoni (**Figura 11**).

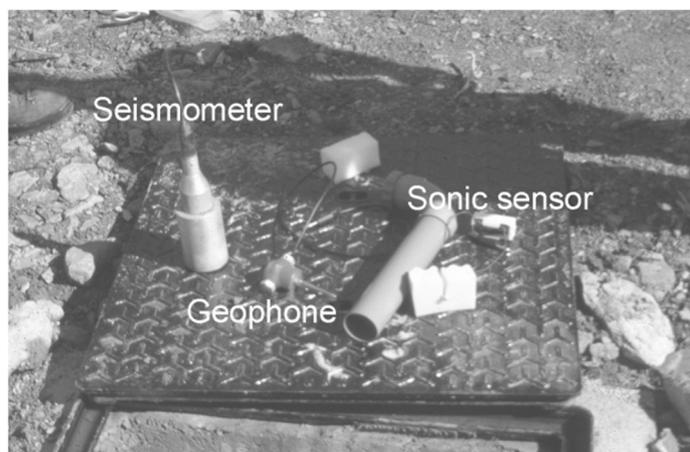


Figura 11. Esempio di geofono verticale, sismometro e sensore ad infrasuoni (*Arattano & Marchi, 2005*).

I geofoni forniscono valori di tensione proporzionali alle velocità di vibrazione del suolo, e vengono di norma installati nelle immediate vicinanze del canale attivo. I sensori ad infrasuoni, invece, possono essere installati a centinaia di metri, focalizzandosi sulle frequenze minori di 16 Hz. Tali sensori registrano in continuo un ampio spettro di processi, il che li rende fondamentali per la caratterizzazione dei debris-flow (Hürlimann et al., 2019).

Livello superficiale del flusso:

L'altezza del flusso può essere monitorata con diversi tipi di sensori opportunamente distribuiti in diversi punti del canale, permettendo così di determinare anche la velocità media del fronte di scorrimento (Figura 12B). Gli strumenti più utilizzati sono i dispositivi ad ultrasuoni (Figura 12A), radar o laser; i primi due misurano la distanza tra un punto fisso e la superficie del flusso attraverso un fascio a cono ad angolo di apertura variabile. Il dispositivo a laser, invece, attraverso un fascio puntiforme o tramite un profilo bidimensionale. Quest'ultimo strumento fornisce le migliori informazioni sulla geometria della superficie del flusso (Jacquemart et al., 2017; Hübl et al., 2018, Hürlimann et al., 2019).

Una colata di detrito varia di comportamento e capacità erosiva lungo il suo percorso, per questo si raccomandano molteplici misure lungo più sezioni trasversali, possibilmente controllate da briglie o da substrato roccioso. Questo accorgimento permette di evitare la stima erronea della profondità del flusso (Hürlimann et al., 2019).

A seconda della precisione dell'idrogramma che si vuole ottenere è accorgimento dell'operatore capire quale sia lo strumento più idoneo alle diverse situazioni.

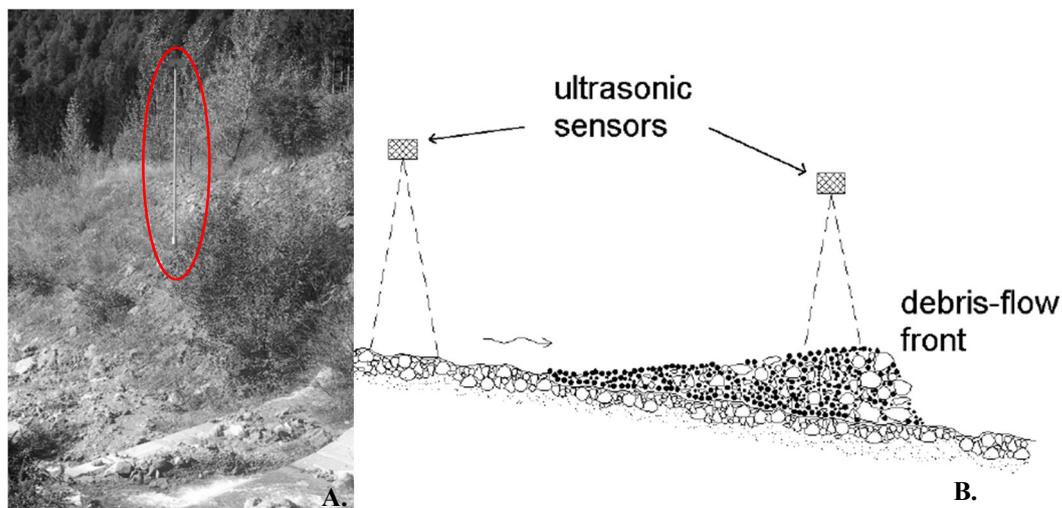


Figura 12. A) esempio di apparecchiatura ad ultrasuoni installata su un canale di debris-flow alpino; B) l'utilizzo di due dispositivi ad ultrasuoni, posti a distanza adeguata fra loro sullo stesso canale, misura la profondità del flusso e permette di valutare la velocità media del fronte (Arattano & Marchi, 2008).

Pressioni interstiziali, forze normali, di taglio e stress da impatto:

Esiste una serie di sensori che può essere installata all'interno del canale per misurare le forze normali, di taglio e le pressioni interstiziali alla base della colata detritica. I più comuni sono i trasduttori di pressione, che registrano il passaggio dei debris-flow e permettono di capire se le pressioni dei pori superano quelle idrostatiche. Tale misura è spesso correlata alla stima delle forze normali o di taglio, con l'ausilio di piastre di carico (Berti et al., 1999; McArdell et al., 2007; McCoy et al., 2010; Nagl e Hübl, 2017). Queste possono essere installate in array su strutture di protezione (Figura 13), che possono essere rigide o flessibili, permettendo di ottenere diversi profili di velocità, forze di taglio e forze d'impatto a varie profondità, in funzione dell'altezza sopra il letto del canale (Wendeler et al., 2007;

Hübl et al., 2009; Hu et al., 2011; Nagl and Hübl, 2017). Questa tipologia di sensori non è molto utilizzata a causa del costo d'installazione e della frequente manutenzione da effettuare.

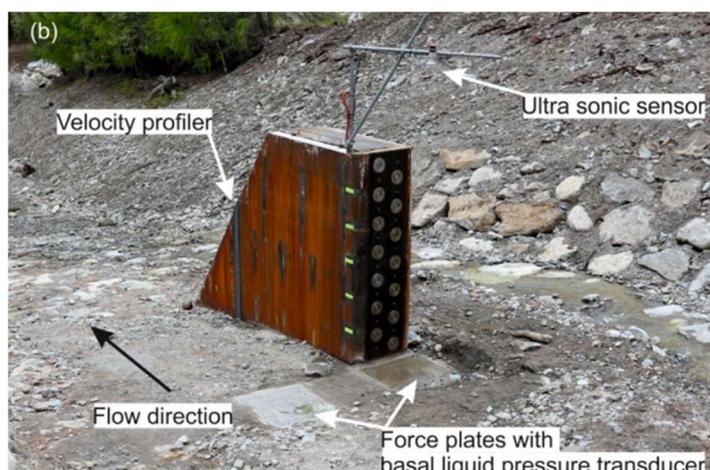


Figura 13. Esempio di barriera di monitoraggio installata nel letto del torrente Gatria (Nagl e Hübl, 2017).

Velocità superficiale:

Per monitorare la velocità superficiale delle colate di detrito si utilizza la tecnica del radar doppler, che permette di ottenere una stima anche in condizioni meteorologiche non ottimali, ricoprendo una distanza di indagine che va dai 15 ai 250 m (Hübl et al., 2018). A questi sensori si possono aggiungere sistemi LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) che necessitano della luce di diurna per la ripresa delle immagini o, in alternativa, di obiettivi ad infrarossi.

Esistono sensori che non vengono comunemente installati in tutte le stazioni di monitoraggio, ma rappresentano un grande contributo nei siti in cui sono stati posizionati. Alcuni esempi sono: sensori di trascinarsi, che permettono di studiare più nel dettaglio l'erosione basale, elemento cruciale per modellare il volume finale dei debris flow (Berger et al., 2010; McCoy et al., 2012; Theule et al., 2012); massi artificiali, che monitorano le dinamiche interne dei flussi detritici mentre questi vengono trasportati (Lee et al., 2010; Apostolov e Benoît, 2017), nonché la loro distanza percorsa (McCoy et al., 2011).

2.2.4. Acquisizione, trasmissione dati e alimentazione

I debris-flow, come descritto anche in precedenza, sono fenomeni impulsivi, che necessitano una differenziazione nelle modalità di acquisizione dell'evento. Questo accorgimento viene preso per ottimizzare l'alimentazione del sistema e il limitato spazio di archiviazione disponibile per i dati ed i video.

Esistono essenzialmente due modalità di registrazione: “non-evento”, che prevede una rilevazione a bassa frequenza (un campione entro diversi minuti), e una “evento”, con un'elevata frequenza di campionamento (da 1 a 1000 campioni al secondo).

Per passare da una modalità all'altra esistono due approcci principali: uno richiede che il flusso interagisca con un interruttore fisico, come un cavo o un pendolo situato nel canale, l'altro utilizza una soglia legata alle precipitazioni o alle vibrazioni del terreno (Hürlimann et al., 2019). Quest'ultima può essere impostata su valori bassi per documentare la risposta idrologica anche in condizioni non critiche.

Visto che le stazioni si trovano spesso in zone difficili da raggiungere, la trasmissione dei dati è normalmente effettuata da remoto attraverso un sistema di dati mobili, che permette di monitorare lo stato di salute del complesso di sensori.

Tutto il sistema richiede un'adeguata alimentazione che dipende in gran parte dalla tipologia e dal consumo dei sensori installati. Solitamente si applicano batterie esterne che possono essere ricaricate da energia solare attraverso i pannelli, altrimenti, si può ricorrere a sistemi di energia alternativa come acqua od energia eolica (*Chambers et al., 2013; Magno et al., 2014*).

2.3. Strumentazione di allertamento

I sistemi di allerta progettati per i debris-flow vengono divisi in due classi: allerta preventiva e allerta in caso di evento (*Hungr et al., 1987*).

I sistemi di allerta pre-evento prevedono il possibile innesco del fenomeno, monitorando le condizioni predisponenti. I sistemi di allerta in corso d'evento rilevano la colata detritica mentre è già in atto ed attivano un allarme (*Davies, 1997; Arattano & Marchi, 2008*).

2.3.1. Sistemi di allarme preventivo

I sistemi di allerta pre-evento più comuni per i debris-flow sono basati su correlazioni empiriche tra dati pluviometrici e colate detritiche passate. Interpolando lo storico di tutti i dati registrati è possibile ricavare un grafico in cui viene messa in relazione l'intensità media delle precipitazioni e la loro durata, ottenendo in questo modo una linea critica di piovosità (**Figura 14**). Al di sotto di questa soglia non si sono verificati eventi in passato, al di sopra, invece, le condizioni erano tali da aver innescato un debris-flow (*Arattano & Marchi, 2008*).

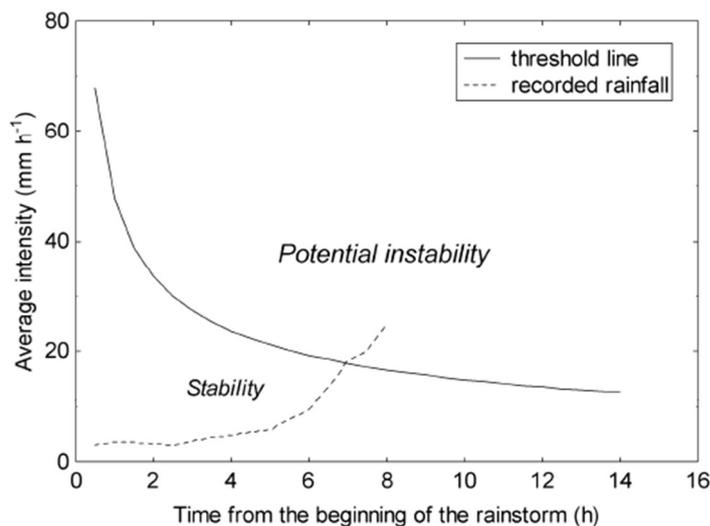


Figura 14. Esempio di soglia pluviometrica per innesco di colate di detrito (*Arattano & Marchi, 2008*).

Questo sistema è soggetto ad una grande probabilità di falsi allarmi, in quanto non tutte le perturbazioni che superano le soglie critiche innescano effettivamente i flussi detritici. Ciò è dovuto alla complessità dei meccanismi d'innescamento dei debris-flow, che non possono essere semplificati alle sole variabili pluviometriche (*Arattano & Marchi, 2008*). Per tale motivo i sistemi di allarme preventivo sono idonei ad allertare il personale coinvolto nella gestione dell'emergenza, ma inadatti ad avvertire direttamente la popolazione.

2.3.2. Sistemi di allarme in corso d'evento

I sistemi di allarme in corso di evento hanno lo scopo di fornire un avviso quando è in corso una colata detritica (Arattano & Marchi, 2008). Per fare ciò si ricorre all'utilizzo dei medesimi sensori adottati all'interno del canale per scopo di monitoraggio scientifico, presentati in **Tabella 2** con i rispettivi vantaggi e limiti.

Tabella 2. Sensori principalmente utilizzati per i sistemi di allerta in corso di evento, con rispettivi limiti e vantaggi (Arattano & Marchi, 2008).

Sensor	Operation	Advantages	Limitations
Ultrasonic, radar and laser sensors.	Measurement of the flow stage.	Easy to set warning thresholds.	Ultrasonic sensors have to be hung over the channel; installation can prove difficult if the channel banks are unstable.
Geophones and seismometers.	Measurement of ground vibrations caused by debris flow.	Easy and safe installation (the sensors are buried in safe places on stream banks).	Setting warning thresholds can be quite complicated. Risk of false alarms due to other sources of ground vibration (passage of trains or trucks, rockfalls, etc.). The need to filter the signal may increase system complexity.
Pendulums.	Detection of the debris-flow from the tilting of the pendulum.	Simple and robust device.	The pendulum must be hung over the channel; installation can prove difficult if the channel banks are unstable.
Wire sensors.	Detection of the debris-flow from wire breaking.	Simple and robust device.	Need for restoration after activation. Risk of false alarms due to accidental circumstances (passage of animals, falling trees, etc.).
Photocells (infrared photobeams, etc.).	Detection of debrisflow passage.	Non-contact detectors: do not need restoration after activation.	A careful installation is needed to avoid having the sensors come into contact with the flow.
CCD camera for machine-vision detection.	Recognition of debris flows.	Safe installation (the camera can be placed beside the channel).	The presence of fog or the occurrence of debris flow at night may complicate the use of the system and its workability.

Oltre ai sensori di monitoraggio, il sistema deve comprendere unità di acquisizione ed elaborazione dati e dispositivi per diffondere l'allarme (**Figura 15**). La stazione deve essere accuratamente posta in una zona riparata dal flusso in modo da ricevere i dati dai sensori, elaborarli e, se necessario, inoltrarli ai dispositivi di allerta. Tale avviso viene diffuso sia alla popolazione, tramite sirene o semafori, che al personale incaricato della gestione delle emergenze, attraverso messaggi telefonici (Arattano & Marchi, 2008).

Come per i sistemi di allerta pre-evento, bisogna prestare molta attenzione ai falsi allarmi, per questo si raccomandano sensori collegati tra di loro per ottenere un monitoraggio incrociato (Chang, 2003; Liu & Chen, 2003).

Un requisito fondamentale per la progettazione di un sistema di allerta è l'intervallo di tempo che intercorre tra l'emissione dell'allarme e l'arrivo effettivo della colata detritica nelle aree a rischio. Solitamente questi tempi dovrebbero essere inferiori ai 3-5 minuti, in modo da permettere la chiusura di tratti sensibili, come strade e ferrovie. Tuttavia, non si adattano a proteggere efficacemente le aree abitate, in quanto i tempi risultano troppo brevi per evacuare le zone a rischio (Arattano & Marchi, 2008).

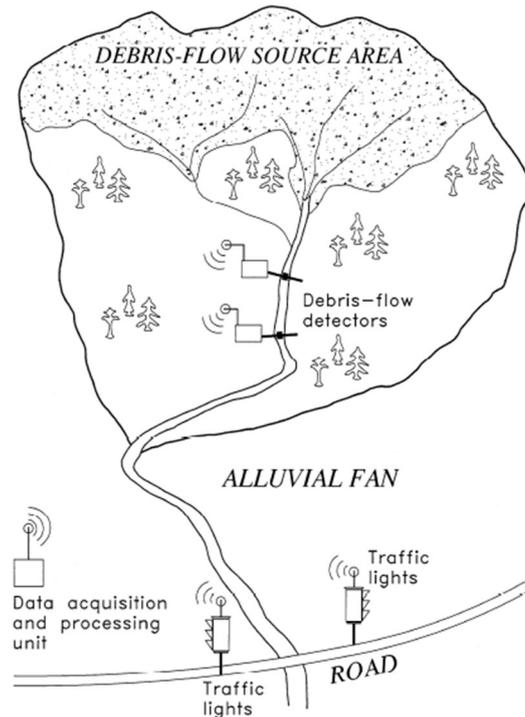


Figura 15. Schema illustrativo delle componenti di un sistema di allerta in corso di evento (Arattano & Marchi, 2008).

2.4. Colate di detrito nella regione Lombardia

Negli anni sono stati svolti diversi studi, volti a raggruppare ed uniformare le informazioni relative ai fenomeni franosi del territorio lombardo in un unico database (**Figura 16**). In particolare, si fa riferimento al Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), a cura della Regione Lombardia, ed il Progetto svolto da IREER (Istituto Regionale di Ricerca della Lombardia) per la “definizione di soglie pluviometriche d’innescio di frane superficiali e colate torrentizie” all’interno della regione.

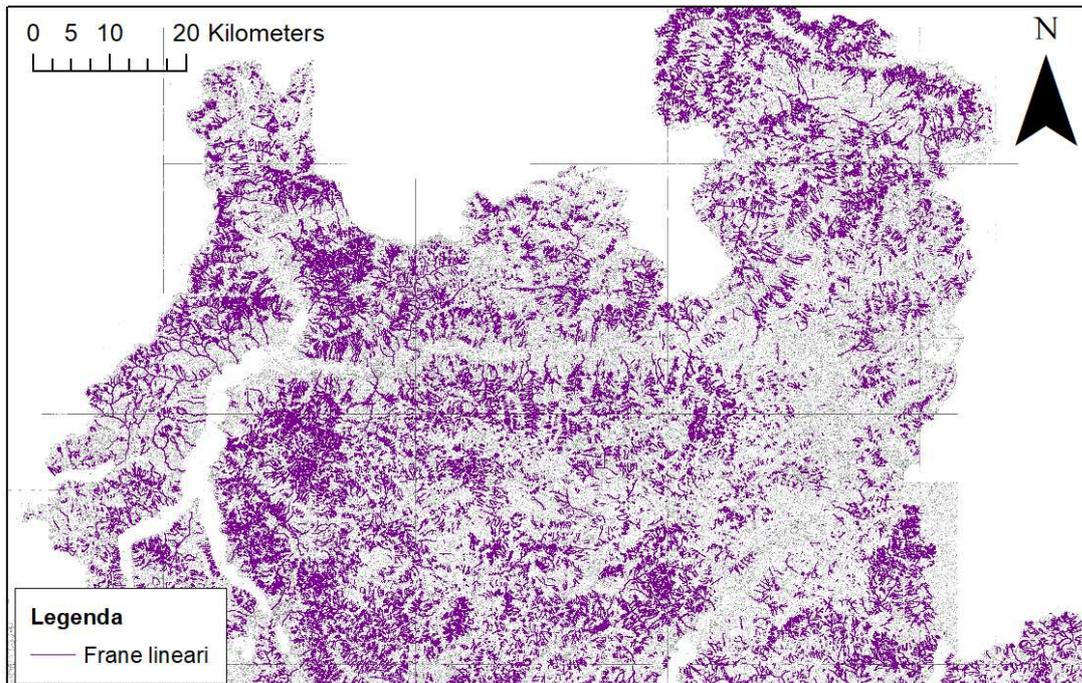


Figura 16. Esempio di visualizzazione del database dei debris-flow in Lombardia. Dati su frane lineari ricavati dal Geoportale della Regione Lombardia (www.geoportale.regione.lombardia.it).

2.4.1. Frequenza degli eventi di colata detritica in Lombardia

La regione Lombardia è posizionata centralmente nell’arco alpino ed a Nord è caratterizzata da numerose valli disposte prevalentemente in direzione N-S (Valchiavenna, Valle Seriana, Valle Brembana, Val Camonica, Valle Sabbia) con l’eccezione della Valtellina. Si possono distinguere tre settori principali della regione: quello alpino e prealpino a nord, che costituiscono la maggior parte del territorio montuoso e collinare, quello padano nella parte centro-meridionale e quello appenninico a sud. Essendo un territorio costituito per il 46% da rilievi sono numerosi i bacini ed i sottobacini potenzialmente soggetti a debris-flow (*Regione Lombardia, 2000*).

Nella banca dati *IFFI* sono presenti 130’540 fenomeni franosi, la maggior parte dei quali sono situati nelle province di Sondrio (41’666) e Brescia (31’012). Di questi solo alcuni sono “frane lineari”, ovvero che si propagano maggiormente in direzione longitudinale, evidenziate in rosso in **Tabella 3**.

Tabella 3. Numero di frane per provincia della regione Lombardia. Tabella estrapolata dal Progetto IFFI (*Regione Lombardia, 2000*).

PROVINCIA	PIFF	FRANE LINEARI
Varese	2510	805
Como	10439	2636
Sondrio	41666	18839
Milano	20	8
Bergamo	26583	12107
Brescia	31012	10667
Pavia	5949	0
Lecco	12359	6724
Cremona	2	0

Tutte le frane conteggiate in regione Lombardia sono state successivamente discretizzate a seconda della tipologia di movimento (**Figura 17**), evidenziando che la maggior parte dei fenomeni franosi è costituito da colamenti rapidi di detrito (41%, come descritto nel grafico in **Figura 18**). Tali fenomeni sono ampliamenti diffusi sia sulle porzioni alpine che prealpine (*Regione Lombardia, 2000*).

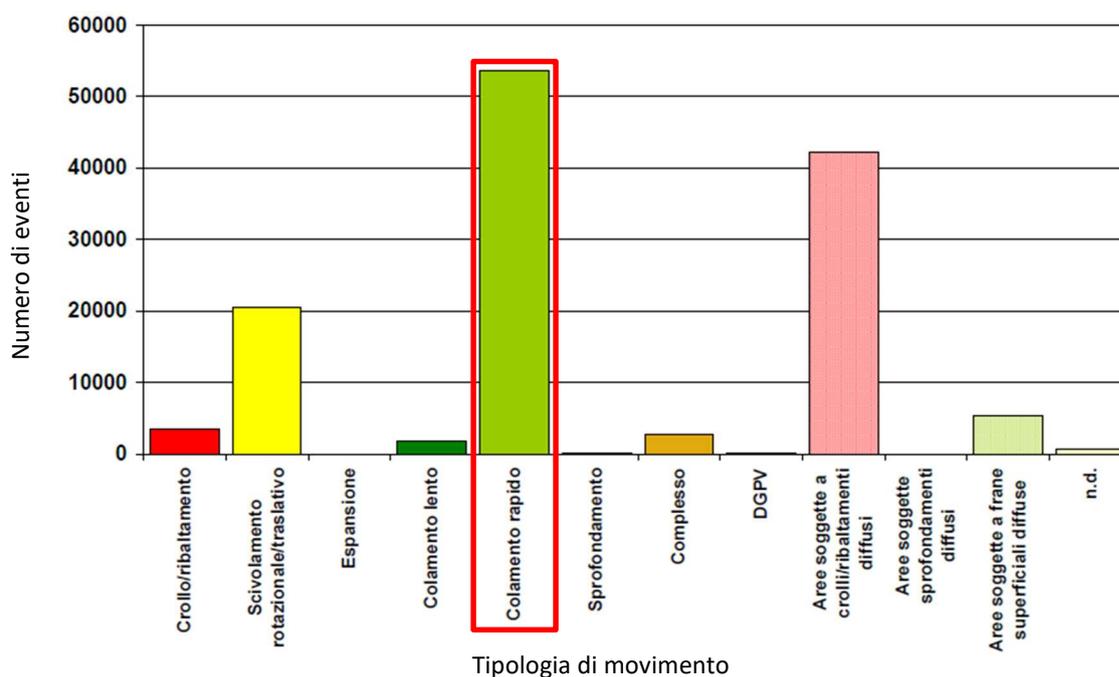


Figura 17. Numero di frane per tipologia di movimento. Grafico estrapolato dal Progetto IFFI (*Regione Lombardia, 2000*).

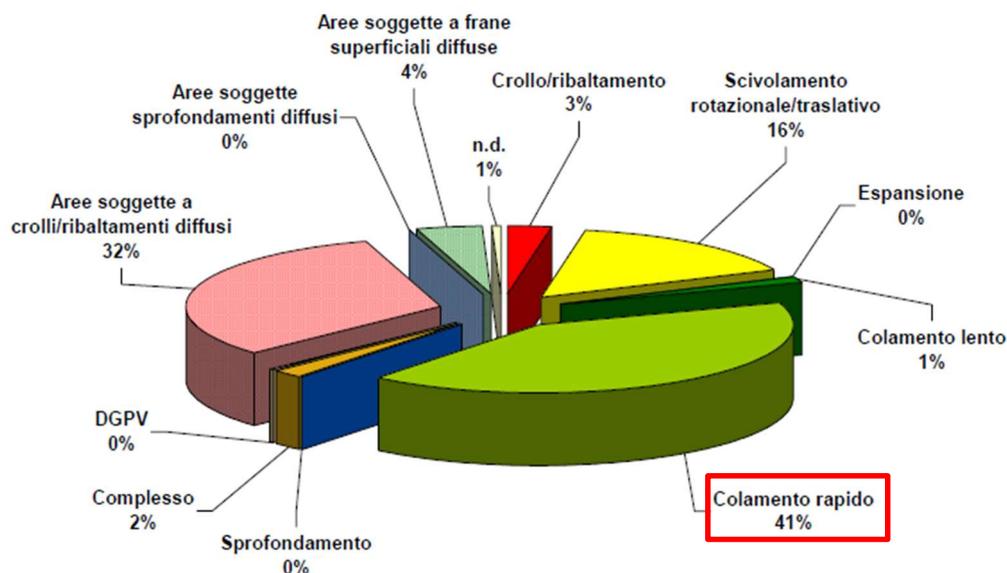


Figura 18. Grafico a torta che mostra le percentuali di movimenti franosi sulla base della tipologia di cinematismo (Regione Lombardia, 2000).

Le cause principali di innesco dei fenomeni franosi sono generalmente riferibili all'assetto geologico e strutturale delle rocce, unitamente all'uso del suolo.

La composizione litologica del detrito preso in carico durante gli eventi di colata, in Lombardia, è prevalentemente di tipo metamorfico-intrusivo (filladi, micascisti, gneiss, anfiboliti) e carbonatico (calcarei, dolomie, calcari marnosi e marne), che costituiscono rispettivamente l'asse alpino lombardo ed il dominio Sudalpino. Nel primo caso tali litologie hanno subito forte decompressione dovuta allo scioglimento dei ghiacciai, che hanno originato estesi fenomeni di deformazione gravitativa di versante (DGPV), fornendo elevate quantità di detrito, che in occasione di precipitazioni intense può essere preso in carico dai torrenti, talvolta generando debris-flow.

Se si considera, invece, la relazione che lega gli eventi franosi, all'uso del suolo è possibile individuare che l'indice di franosità maggiore, ovvero il 47%, è rappresentato dalle zone aperte con vegetazione rada o assente, seguite da aree a vegetazione arbustiva e/o erbacea, con un valore del 40% (Regione Lombardia, 2000).

2.4.2. Soglie pluviometriche nella regione Lombardia

Negli anni è risultato di notevole importanza, nell'analisi dei debris-flow, individuare una correlazione tra le precipitazioni ed i movimenti in massa. Tale rapporto prende il nome di "soglia pluviometrica" e può essere discretizzata in "minima" e "massima": la prima è il livello inferiore al di sotto del quale il fenomeno non s'innesci, la seconda rappresenta il livello oltre il quale l'evento si innesci sempre (Crozier, 1996).

Solitamente gli eventi di pioggia innescanti sono temporaleschi, quindi di breve durata e grande intensità, ma soprattutto molto localizzati. A causa di questo ultimo fattore la loro dinamica evolutiva dipende molto dall'orografia, dalla quota, dall'esposizione dei versanti, dal vento e dal gradiente termico (Rappelli, 2008). Queste caratteristiche sono fortemente impattanti sulla misura del dato di pioggia, che in contesti montani è rappresentativo di areali

molto ristretti. Per correlare tali fenomeni metereologici con i movimenti in massa esistono sostanzialmente due tipologie di studi:

- Modellazione fisica del pendio con previsione di infiltrazione e deflusso lungo lo stesso, attraverso modelli idrologici, implementati a scala di versante o di bacino, tramite l'ausilio di software GIS. Richiedono una grossa mole di dati soggetti a notevole variabilità spaziale;
- Individuazione di soglie pluviometriche valide a scala locale o regionale, ricavate tramite indagini statistiche sugli eventi pregressi nella zona in esame. Per tale lavoro è necessaria un'ampia mole di dati sugli eventi franosi e sulle precipitazioni. In questo capitolo si farà riferimento soltanto a tale tipologia di studi.

Essendo un approccio essenzialmente statistico, l'affidabilità dei risultati è legata alla disponibilità dei dati di partenza, sia pluviometrici che relativi ai fenomeni franosi (*Rappelli, 2008*).

Negli anni diversi autori hanno proposto vari metodi per estrapolare soglie pluviometriche, determinate partendo da dati raccolti su intervalli di tempo e luoghi differenti tra loro (*ad es. Caine, 1980; Govi & Sorzana, 1980; Govi et al., 1985; Wiczorek, 1987; Ceriani et al., 1992*).

La Regione Lombardia, il 24 marzo 2005, ha ufficialmente adottato il “metodo Ceriani” come metodo regionale per la predisposizione del sistema di allerta idrometeorologico della Protezione Civile, relativamente ai dissesti superficiali (*Rappelli, 2008*). Tale metodo si basa sullo studio di *Ceriani* del 1992, il quale ha raccolto le date dei fenomeni franosi avvenuti a partire dagli anni '20 del secolo scorso, con maggiore dettaglio dagli anni '60 in poi. Per ciascun pluviometro è stato considerato un intorno significativo non superiore a 5 km di raggio ed i pluviogrammi relativi sono stati letti a ritroso fino ad un intervallo variabile tra le 240-360 ore, in funzione delle caratteristiche dell'evento meteorologico (durata ed intensità). Dei fenomeni di cui si conoscevano solo gli orari approssimati è stata estrapolata la fascia oraria più probabile, considerando anche i pluviometri nelle stazioni limitrofe (*Ceriani et al., 1994*).

In particolare, *Ceriani et al., (1992)* hanno verificato la validità delle soglie determinate da *Govi et al., (1985)*, applicandole alla zona delle Alpi Centrali, colpita dall'alluvione del luglio 1987. Videro che i punti relativi ai vari eventi, inseriti in un diagramma intensità-precipitazione media annuale, si discostavano dalle soglie proposte da *Govi et al., (1985)*, evidenziandone l'impossibilità di utilizzo (*Figura 19*). In particolare, la soglia “estate-autunno” rappresentava, per l'area studiata, uno “stato di instabilità catastrofica”, descrivibile come la presenza di decine di frane per chilometro quadrato (*Ceriani et al., 1994*).

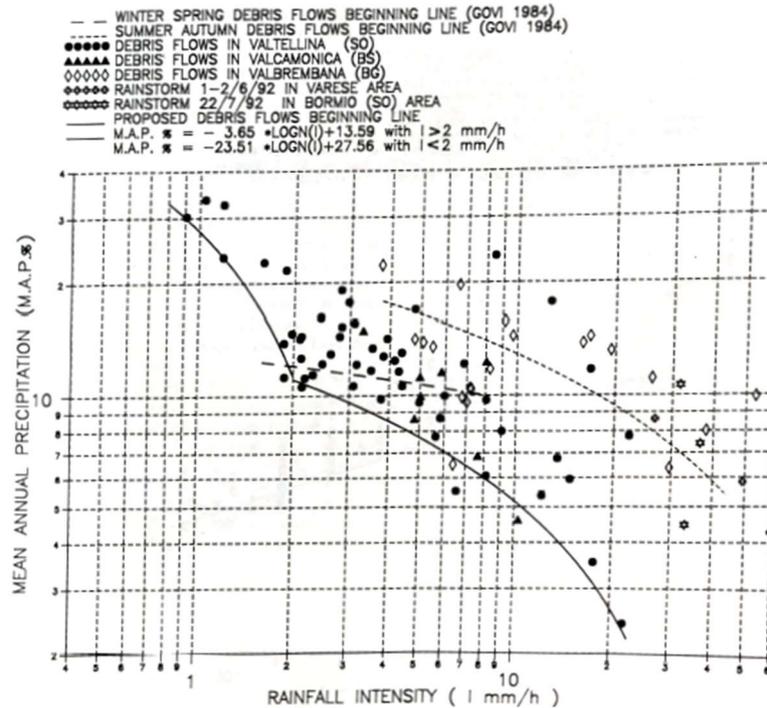


Figura 19. Correlazione tra i dati dei debris-flow in Lombardia (punti) e le soglie ideate da Govi *et al.*, (1985), descritte con le linee tratteggiate. Immagine estrapolata dal lavoro di Ceriani *et al.*, (1994).

Venne quindi proposta una diversa “curva di instabilità” (linea continua in **Figura 19**), valida per tutti i fenomeni franosi, che correla intensità media di precipitazione (mm/h), durata dell’evento (h) e la precipitazione media annua PMA (%). Tale linea è normalizzata per valori di pioggia più bassi rispetto alla linea “inverno-primavera” proposta da Govi *et al.*, (1985). Questa linea critica risulta avere differente espressione a seconda che l’intensità della pioggia sia minore o maggiore di 2 mm/h:

$$M.A.P. \% = -3.65 \cdot \log I + 13.59 \quad \text{con } I > 2 \text{ mm/h}$$

$$M.A.P. \% = -23.51 \cdot \log I + 27.56 \quad \text{con } I < 2 \text{ mm/h}$$

Inoltre, viene rappresentata la curva di “innesco dei debris-flow” (**Figura 20**), che può essere utilizzata anche per tutti i danni idrologici come piene o fenomeni di scorrimento di diversa entità (Ceriani et al., 1994). Tale linea presenta espressione simile a quella proposta da Caine (1980):

$$I = D^{-0.46} \cdot 16.24$$

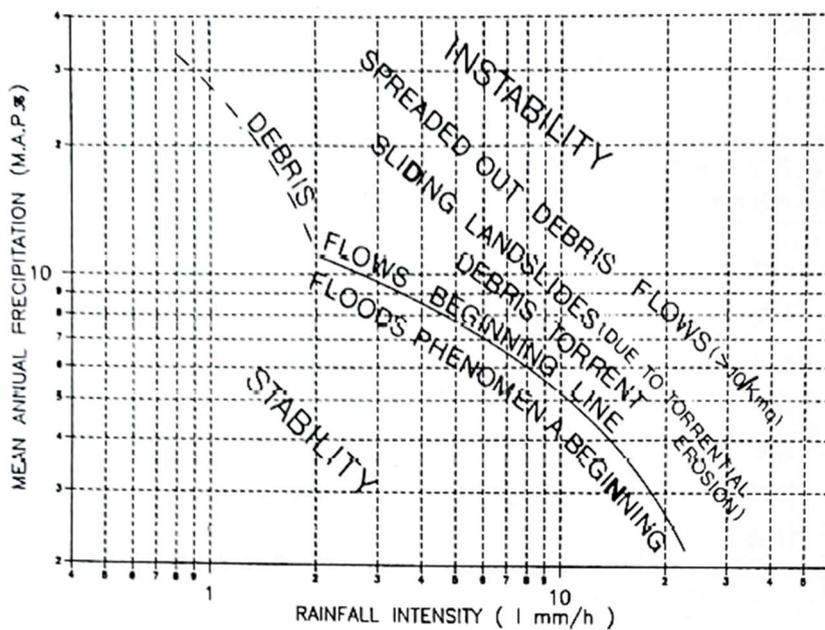


Figura 20. Linea proposta come "innesco di debris-flow" ed eventi idrologici (Ceriani et al., 1994).

Successivamente venne ulteriormente affinata sui dati degli eventi meteorici della zona avvenuti nell'estate 1992 e nell'autunno 1993, ottenendo due differenti formulazioni a seconda che in ordinata si inserisca l'intensità (mm/h) o l'intensità normalizzata (% della M.A.P.) (Ceriani et al., 1994).

$$I = D^{-0.55} \cdot 20.0$$

$$In\% = D^{-0.55} \cdot 2.01 \quad (\text{Figura 21})$$

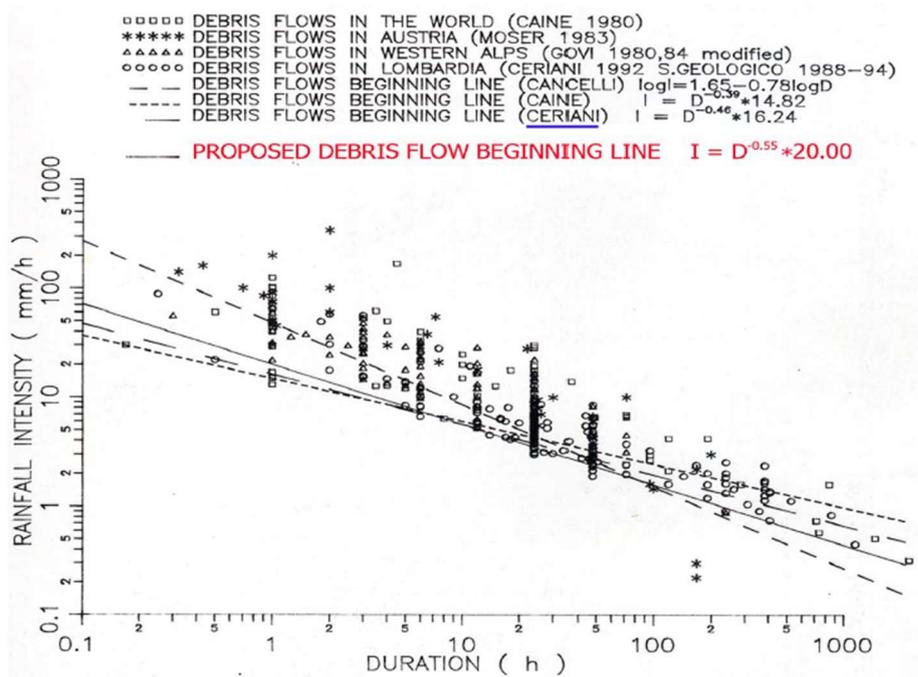


Figura 21. Grafico durata/intensità di pioggia per l'innescio di debris flow (Ceriani et al., 1994).

Le equazioni tutt'oggi utilizzate per individuare le soglie minime considerate per l'innescio dei fenomeni superficiali, sono le seguenti:

$$S_1 = (D^{-0.55}) \cdot 2.01 \cdot \frac{M.A.P.}{100} \cdot D$$

S_1 = soglia minima d'innescio (< 10 debris flow per km²)
 D = durata della precipitazione

$$S_2 = (D^{-0.48}) \cdot 2.80 \cdot \frac{M.A.P.}{100} \cdot D$$

S_2 = soglia minima d'innescio (< 20 debris flow per km²)
 D = durata della precipitazione

Applicando queste equazioni sono stati calcolati i valori di soglia minimi per intervalli di tempo pari a 12, 24 e 48 ore per ognuna delle aree omogenee di allerta, in cui è suddiviso il territorio della Regione Lombardia. Tali valori di soglia sono stati definiti in modo che solo nel 5% del territorio di ogni area omogenea si possano verificare fenomeni franosi, anche per valori inferiori a quello assunto come soglia (Rappelli, 2008).

Oltre alla presente Soglia Ceriani, lo studio condotto da IRPI-CNR di Torino ha permesso di ideare e redigere una soglia più cautelativa, che tiene in considerazione anche precipitazioni che possono innescare altri fenomeni oltre ai debris-flow. In particolare, si fa riferimento ai *muddy-debris flow* o *soil slip*, ovvero frane per saturazione e fluidificazione della coltre eluvio-colluviale. Sono fenomeni d'instabilità che si originano sia nel periodo estivo per precipitazioni di breve durata ed elevata intensità, sia nei periodi primaverile/autunnale a seguito di precipitazioni prolungate (Rappelli, 2008). Si tratta in genere di frane di piccole dimensioni e di modesto spessore rispetto ai debris-flow.

In tal caso le soglie sono state ideate tenendo in considerazione i parametri di durata ed intensità normalizzata rispetto alla PMA (Precipitazione Media Annuale) (Ceriani e Carrelli, 2000). I dati di partenza provengono dalla ricerca condotta da IREER ed IRPI-CNR di Torino, considerando eventi temporaleschi occorsi nelle province di Brescia e Sondrio, oltre ai valori dell'alluvione del luglio 1987, caratterizzati da precipitazioni prolungate, con durate maggiori di 10 ore (Rappelli, 2008).

La curva è stata ottenuta interpolando i punti ai minimi quadrati, ottenendo una curva di equazione $In = aD^{-b}$ (su un diagramma bilogarithmico è rappresentata come una retta). Mantenendo costante il coefficiente b (inclinazione) e modificando il coefficiente a (intercetta) è stato possibile confinare nel semipiano superiore il 90% dei punti rappresentanti i fenomeni di dissesto considerati (Rappelli, 2008) (Figura 22).

Si è osservato che la distribuzione dei punti sul grafico, per durate d'evento superiori alle 10 ore, si differenzia notevolmente rispetto a quella degli eventi caratterizzati da una durata inferiore. Per tale motivo è stata ricavata la curva d'interpolazione degli eventi, trattando separatamente i casi con durata inferiore o uguale a 10 ore rispetto a quelli con durata superiore. In una prima fase è stata ricavata la curva a doppia pendenza che inviluppa tutti i punti corrispondenti a fenomeni di dissesto avvenuti nei territori delle province di Sondrio e di Brescia, rappresentata dalle equazioni:

$$In = 0.58 \cdot D^{-0.46} \text{ per } D \leq 10 \text{ ore}$$

$$In = 0.31 \cdot D^{-0.19} \text{ per } D > 10 \text{ ore}$$

Tale curva risulta maggiormente cautelativa se confrontata con le soglie proposte da altri autori, in particolare rispetto alle curve attualmente in uso in Regione Lombardia (Ceriani, 1994; Rappelli, 2008).

In seguito, sono stati analizzati separatamente i punti relativi ai dissesti avvenuti nelle diverse province considerate, ottenendo le curve descritte dalle seguenti equazioni:

	Eventi avvenuti in provincia di Brescia	Eventi avvenuti in provincia di Sondrio
$D \leq 10 \text{ ore}$	$In = 0.47 \cdot D^{-0.36}$	$In = 0.68 \cdot D^{-0.50}$
$D > 10 \text{ ore}$	$In = 0.34 \cdot D^{-0.22}$	$In = 0.32 \cdot D^{-0.17}$

Per il presente lavoro di tesi sarà presa in considerazione solo la curva per la provincia di Brescia.

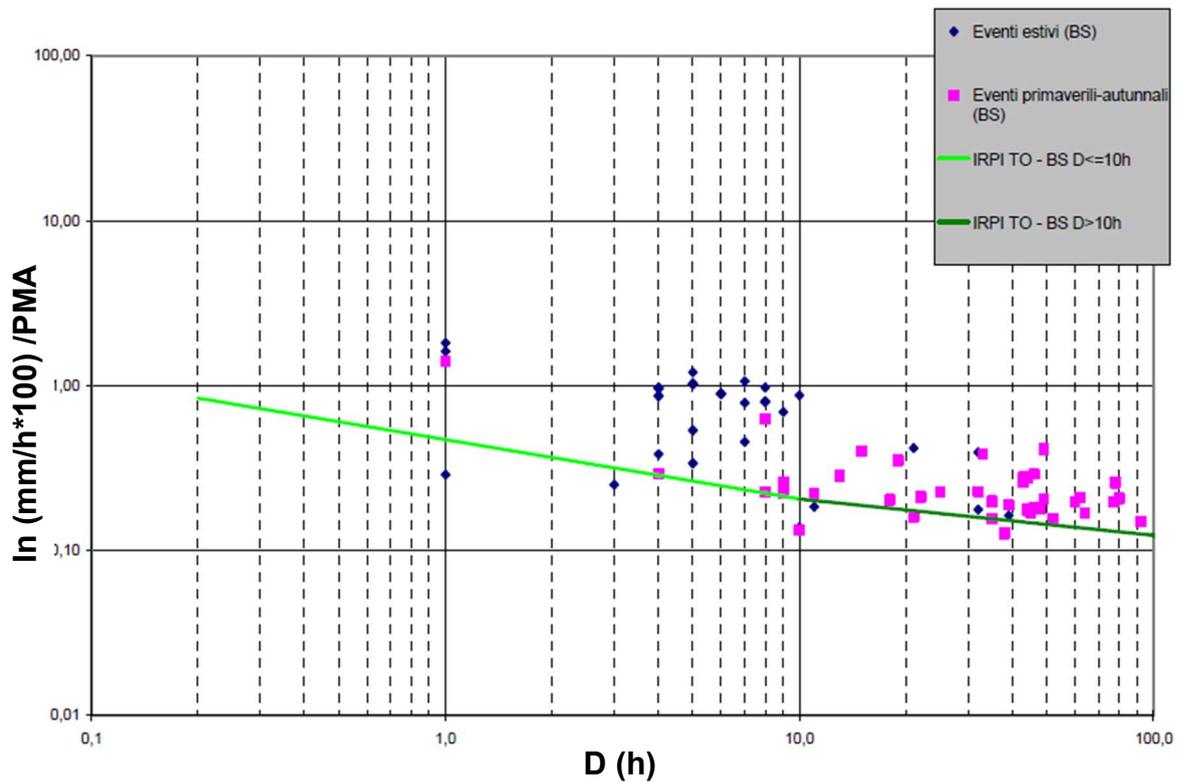


Figura 22. Proiezione dei punti per la provincia di Brescia sul grafico intensità normalizzata rispetto alla PMA (I_n) – durata (D) e curva ottenuta (Rappelli, 2008).

2.4.3. Esempi di eventi storici di debris-flow in Lombardia

Di seguito vengono citate solo alcune delle colate detritiche storiche individuate e schedate grazie al progetto a cura di IRER ed il progetto IFFI.

Bienno (BS) - agosto 1933: originatasi probabilmente per frana ha avuto luogo nel Torrente Travagnolo, in località Seza (**Figura 23**).



Figura 23. Immagine da archivio storico che mostra gli effetti di una colata detritica (Rappelli, 2008).

Novate Mezzola (SO) – 29/30 agosto 1934: fenomeno avvenuto a seguito di precipitazioni temporalesche abbattutesi sul bacino del T. Vallone di Campo, che in poche ore originò la colata detritica (*Figura 24*).



Figura 24. Fotografia storica scattata da Giacon Motta. Mostra la frazione di Campo investita dalla colata detritica, coinvolgendo abitazioni, la strada nazionale e la linea ferroviaria (*Rappelli, 2008*).

Val Tartano (SO) – 18 luglio 1987: il fenomeno si è sviluppato come scorrimento superficiale per poi evolvere in colata rapida lungo l'impluvio. L'evento causò 12 vittime e numerosi feriti oltre ad ingenti danni ad un albergo (*Figura 25*), ad un condominio ed alla strada provinciale (*Regione Lombardia, 2000*).



Figura 25. Panoramica della nicchia di distacco e di transito della colata. Sul fondo alcuni edifici coinvolti (*Regione Lombardia, 2000*).

Sonico (BS) – 26 settembre 1987: la colata, avvenuta nel letto del torrente Remulo, nella sua discesa travolse la località di Rino, causando notevoli danni all’abitato (**Figura 26**). Sullo stesso abitato si è abbattuto un ultimo evento, di minor intensità, in data 27 luglio 2012. A differenza del primo evento è stato il torrente Rabbia, in questo caso, a portare a valle il materiale detritico. Grazie ai sistemi di allerta, in tale occasione, si è riusciti ad evacuare tempestivamente l’abitato.



Figura 26. Immagine dell'abitato di Rino coinvolto nella colata detritica. Si notano alcuni edifici ed il ponte danneggiati. Foto presa dall'Archivio IRPI-CNR Torino (*Rappelli, 2008*).

Ponte in Valtellina – 16 novembre 2002: anche questo evento è caratterizzato da innesco per frana superficiale evolutosi solo in un secondo momento in debris-flow. La frana, nella sua discesa, ha coinvolto la strada comunale causando due vittime (**Figura 27**).



Figura 27. Immagine che mostra lo sgombero della strada da parte degli operatori. La colata detritica, raggiungendo il fiume Adda, ha trascinato un'autovettura (*Regione Lombardia, 2002*),

2.5. Cenni sul clima della Val Camonica

La Val Camonica presenta un assetto geografico con direzione preferenziale N-S, nella parte settentrionale confina con la Valtellina, in quella meridionale con il Lago d'Iseo. Questo assetto fa sì che la parte a Nord sia caratterizzata da un clima alpino, verso Sud, invece, le caratteristiche sono più spiccatamente padane. Risalendo la valle si assiste al passaggio dal regime pluviometrico sublitoraneo (a due massimi, primaverile ed autunnale), tipico dell'area a clima padano (zona di Chiari) e di quella a clima insubrico (Iseo e Lovere), al tipo di regime continentale, con il massimo estivo tipico del clima alpino interno, che si rileva a partire da Breno.

In termini di apporti quantitativi, risalendo la Val Camonica, si osserva una progressiva riduzione delle precipitazioni medie annue, spostandosi dal Lago d'Iseo sino alla testata della valle: stazione di Lovere 1191 mm/anno, Sonico 1085 mm/anno, Temù 982 mm/anno e Passo del Tonale 1118 mm/anno (*Ceriani & Carelli, 2000*).

La disposizione N-S, unitamente al profilo alto dei monti che delimitano la vallata, riducono il soleggiamento del fondovalle e gli influssi di correnti fredde da N-E. In questo tratto di valle, le perturbazioni che portano maggiori precipitazioni sono quelle provenienti da S-W. I temporali nella vallata sono piuttosto frequenti a causa delle numerose alte cime che favoriscono lo sviluppo di cumuli, raramente violenti (*Rappelli, 2008*).

Prendendo come riferimento la stazione di Breno, situata in coordinate 45°58'N 10°18'E, a 343 m s.l.m., considerando un dataset di 30 anni di misure, è possibile identificare, in **Figura 28**:

- Febbraio come mese più freddo (1.3°C alla stazione);
- Luglio come mese più caldo (26.3°C alla stazione);
- Giugno come mese più piovoso (20 giorni) con un massimo di circa 125 mm;
- Febbraio come mese meno piovoso (7 giorni) con un minimo di 45 mm.

ATTENZIONE: Orografia complessa! I valori calcolati sono validi per 1459m. Ci aspettiamo una differenza di temperatura di: 7.3°C.

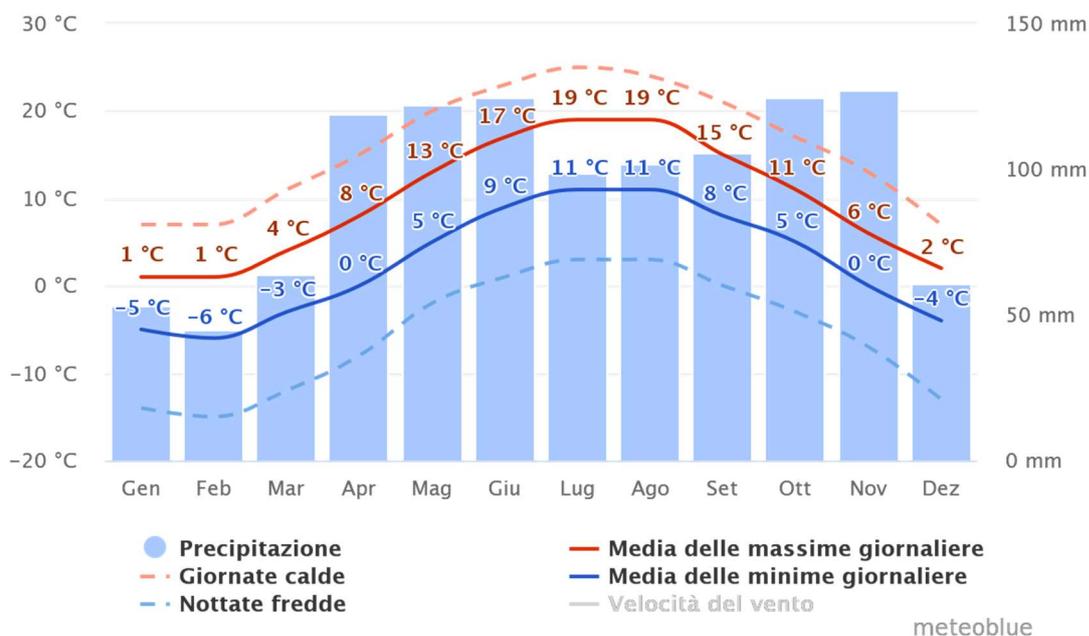


Figura 28. Immagine estralata dal sito www.meteoblue.com, mostra i calcoli delle temperature e precipitazioni medie sulla stazione di Breno su in arco temporale di 30 anni di raccolta dati.

2.5.1. Evidenze di cambiamento climatico

In linea generica, in Italia, dal 1865 al 2003 il clima è diventato più caldo e asciutto e gli andamenti annuali e stagionali delle piogge totali mensili hanno evidenziato una tendenza negativa (*Brunetti et al., 2006*). In particolare, negli ultimi 50 anni, nel Nord Italia si è osservato un aumento dell'intensità delle precipitazioni ed una diminuzione degli eventi con scarsi apporti idrici (*Buffoni et al., 2003*).

L'ambiente alpino ha visto negli anni l'aumento delle temperature medie, dal 1850 al 1980 le aree glaciali sono diminuite di un terzo e la calda estate del 2003 ha ridotto ulteriormente la risorsa del 10 % (*European Environment Agency, 2004*).

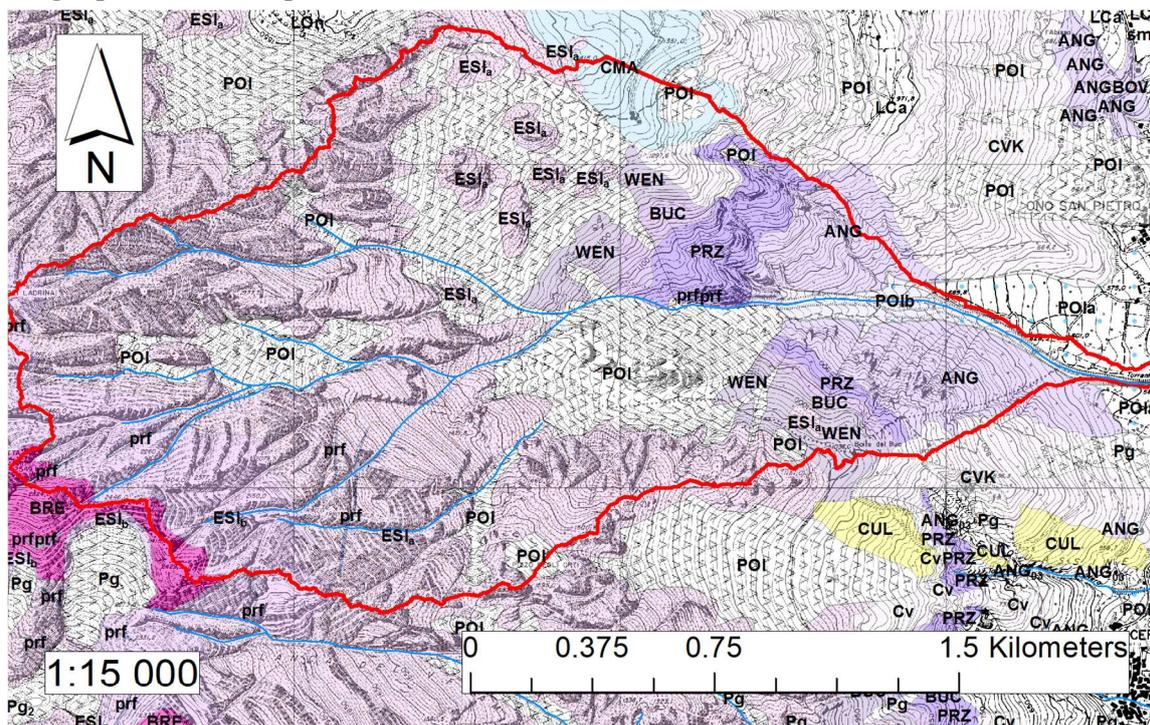
Le precipitazioni hanno assunto caratteristiche diverse rispetto al recente passato, diventando più intense e pericolose (*Schmidli et al., 2002*).

L'evoluzione della temperatura media nel corso degli ultimi due secoli evidenzia come i valori si mantengano piuttosto bassi fino al 1860. Successivamente si è verificata una graduale tendenza verso valori più alti, raggiungendo il massimo relativo intorno al 1950, rimasto stazionario fino al 1970. Da questo anno fino al 2003, invece, le temperature sono salite significativamente. L'andamento delle precipitazioni nel corso degli ultimi due secoli mostra una sequenza di massimi e minimi relativi senza alcuna tendenza evidente né verso un incremento né verso una diminuzione (*Rappelli, 2008*). Negli ultimi anni, però, in particolare quello appena trascorso, si è assistito ad una notevole diminuzione di precipitazioni, confermando il 2022 come l'anno più siccitoso e caldo dal 1800.

3. BACINO DEL TORRENTE BLÉ

3.1. Inquadramento geologico

Dal punto di vista geologico il bacino del torrente Blé è situato nel settore delle Alpi Meridionali, essendo posizionato a sud della Linea Insubrica. Di conseguenza, le rocce prevalentemente affioranti appartengono alle formazioni litostratigrafiche del bacino sedimentario lombardo (Albertelli, 2021). In particolare, nella zona di studio è stata riscontrata la seguente successione stratigrafica (Figura 29), descritta di seguito dalla litologia più antica alla più recente.



LEGENDA

Depositi Continentali Neogenico-Quaternari

- POI - Sintema del Po (Unità Postglaciale)
- POla - Sintema del Po (Unità Postglaciale), deposito di debris-flow
- POIb - Sintema del Po (Unità Postglaciale), deposito di origine mista
- CMA - Supersintema della Colma del Piano (indistinto)
- CVK - Conglomerato di Cerveno

Alpi Meridionali

Successione Triassica

- BRE - Formazione di Breno
- ESla - Calcari biostrutturati e breccie (facies di margine e pendio)
- ESlb - Calcari in strati e banchi, di piattaforma interna
- WEN - Formazione di Wengen
- BUC - Formazione di Buchenstein
- PRZ - Calcare di Prezzo
- ANG - Calcare di Angolo
- prf - Filoni andesitici non foliati ("Porfiriti" Auct.)

SOVRASSEGNI

- Argine naturale di conoide (evidente)
- Orlo di scarpata di frana
- Trincea di distensione attiva
- Traccia di paleoalveo evidente
- Rete idrografica
- Bacino del torrente Blé

Figura 29. In alto è rappresentata la carta geologica alla scala 1:15'000 su base CTR alla scala 1:10'000, estrapolata tramite software ArcMap. I poligoni sono stati scaricati dal Geoportale della Regione Lombardia. I colori sono stati assegnati sulla base della discretizzazione utilizzata dal progetto CARG. In basso è presente la rispettiva legenda (www.geoportale.regione.lombardia.it).

- **ANG – Calcare di Angolo** (ANISICO inf. – medio): questa litologia interessa buona parte delle sponde sinistra e destra del torrente Blé, in prossimità di incisione del fondo alveo. Si tratta di litotipi caratterizzati da una buona compattezza ma scarsa resistenza all’erosione, dovuta alla stratificazione sottile ed alla diffusa fratturazione. È composto da calcari grigio scuri e neri in strati decimetrici, con interstrati millimetrici marnosi. Sono prevalentemente fini con locali intercalazioni calcarenitiche. A causa della fitta stratificazione, la disgregazione del litotipo non dà origine a massi di grande volume, ma piuttosto a blocchi che possono essere facilmente trasportati dall’acqua. Lungo l’asta sono presenti alcuni affioramenti, in particolare in corrispondenza de “La Tavola”, che mostrano pieghe anche molto strette ed a scala metrica. Lo spessore della formazione si aggira tra i 300-400 m, al tetto il contatto con PRZ è netto (*Gosso et al., 2011; Albertelli, 2021*).
- **PRZ – Calcare di Prezzo** (ANISICO sup.): tale litologia affiora in modo particolare in sinistra idrografica del Blé. È caratterizzato da un’alternanza ritmica di calcilutiti, marne e argilliti nere con mica. La stratificazione è piano parallela e occupa uno spessore che raggiunge i 100 m. È delimitato al tetto da un netto contatto con BUC (*Gosso et al., 2011; Albertelli, 2021*).
- **BUC - Formazione di Buchenstein** (LADINICO inf.): il litotipo comprende calcare di colore grigio-nerastro, con grossi noduli di forma allungata e liste di selce nera. Talora si possono riscontrare arenarie e peliti vulcanoclastiche molto alterate e risedimentate (“pietre verdi”). Raggiunge uno spessore massimo che va dai 20-50 m ed è delimitato superiormente dal contatto netto con WEN (*Gosso et al., 2011; Albertelli, 2021*).
- **WEN – Formazione di Wengen** (LADINICO sup. – CARNICO inf.): è costituita da arenarie quarzoso-vulcanoclastiche e siltiti grigio scure-verdi. Talora si trovano intercalazioni di calcari micritici grigio scuri e marne argillose. Lo spessore della formazione va dai 15 ai 50 m ed al tetto è delimitato da ESI (*Gosso et al., 2011; Albertelli, 2021*).
- **ESI – Calcare di Esino** (LADINICO – CARNICO inf.): in questo foglio tale litotipo costituisce il massiccio della Concarena, zona ipotetica d’innescio degli eventi di debris-flow (**Figura 30**). Sono state distinte due litofacies appartenenti a tale formazione:
 - Litofacies di margine (ESI_a):** calcari di colore nocciola, generalmente massivi, con presenza di coralli. Le facies presenti sono prevalentemente calcarenitico-ruditiche con clasti di 2-3 metri. Nelle facies a breccie sono comuni cavità riempite da cementi concentrici (evinosponge).
 - Litofacies di piattaforma interna (ESI_b):** calcari grigio chiari fossiliferi e calcareniti grigio chiare-nocciola che si riscontrano con grande continuità laterale. Il passaggio tra le due litofacies è rapido e marcato dalla scomparsa di stratificazione che caratterizza ESI_b. Nella zona di studio il contatto superiore è marcato nettamente dal passaggio con BRE (*Gosso et al., 2011; Albertelli, 2021*).
- **BRE – Formazione di Breno** (CARNICO inf.): si tratta di calcari e dolomie grigio chiare ben stratificate. Si riscontrano facies marnose da grigio chiare a scure, con intercalazione di argilliti nere. Lo spessore va da 10 a 50 metri ed al tetto la successione termina con il passaggio all’Argillite di Lozio (non in carta) (*Gosso et al., 2011*).

Gli altri litotipi (CVL e CMA) presenti in legenda lambiscono solo in minima parte il bacino del Torrente Blé, per tale motivo sono trascurati.

Ancora più recentemente si è deposta la porzione che costituisce la quasi totalità del bacino in questione:

- **POI – Sintema del Po** (PLEISTOCENE sup. – OLOCENE): all'interno dell'area di studio è composto prevalentemente da DGPV (Deposito Gravitativo di Versante) e deposito di frana con trasporto glaciale. È costituito essenzialmente da ghiaie massive con clasti eterometrici spigolosi, originatesi dalla disgregazione delle litologie circostanti, ed è la fonte principale di materiale inglobato durante gli eventi di debris-flow.



Figura 30. Immagine della parte alta del bacino del torrente Blé, composta dal Calcare di Esino (ESI), (Venturelli, 2021).

3.2. Uso del suolo

Nel *paragrafo 2.4.1.* si è sottolineato che l'uso del suolo è un fattore importante da considerare per l'innesco dei debris-flow. Si ricorda, a tal proposito, che l'indice di franosità in Lombardia è del 47% nelle aree a detrito con vegetazione rada od assente e del 40% nelle zone con vegetazione erbacea ed/od arbustiva (*Regione Lombardia, 2000*). Risulta essere di valido aiuto, quindi, analizzare e mappare i tipi di copertura del bacino, per individuare quali possano essere le possibili zone di innesco, in particolare quale sia la percentuale di detrito potenzialmente mobilizzabile.

A tale scopo è stata redatta una mappa di uso del suolo di dettaglio, che permettesse di discretizzare il bacino. Per fare ciò è stato utilizzato il software ArcMap, con base di partenza l'ortofoto LIDAR (maglia 1m x 1m), rappresentata in *Figura 31*, la cui attenta osservazione ha permesso di delimitare le aree di interesse. Questo procedimento è stato eseguito sul bacino idrografico del Blé, delimitato attraverso appositi comandi del software, che permettono di ricavare il reticolo di drenaggio attraverso l'utilizzo del DEM.

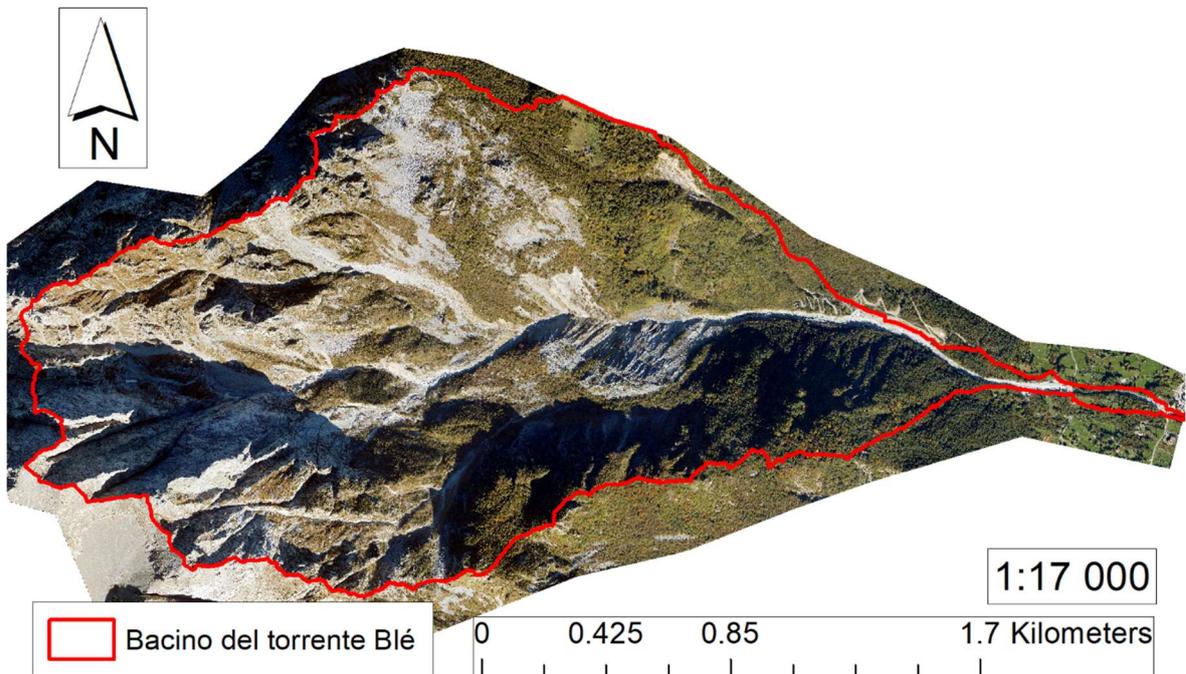
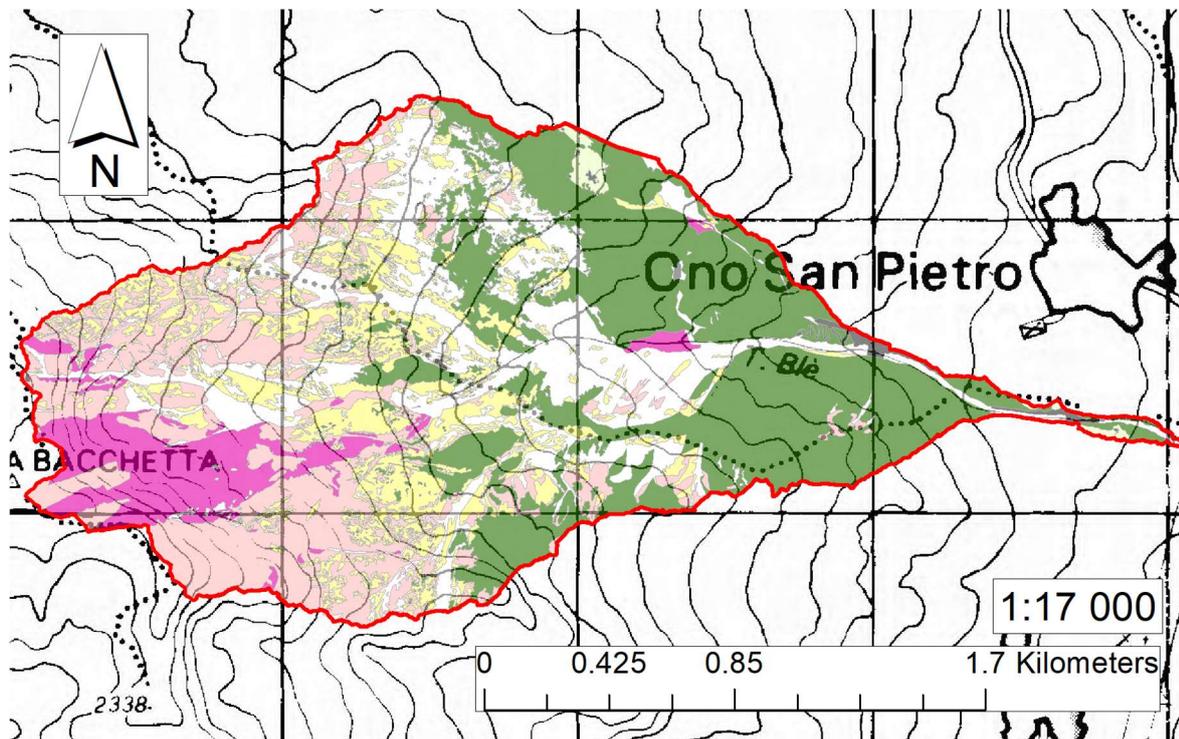


Figura 31. Ortofoto LIDAR (maglia 1x1 m). Sovrapposto, in rosso, è visualizzato il perimetro del bacino idrografico del torrente Blé. L'immagine ricavata è alla scala 1:17'000, tale da mostrare il bacino nella sua interezza.

Successivamente, attraverso l'ausilio dell'editor GIS, sono stati costruiti gli shapefile "poligoni" per disegnare le aree di interesse, associando le diverse categorie nella tabella degli attributi, fino a ricoprire l'intera area delimitata in rosso, ottenendo il prodotto rappresentato in *Figura 32*.



Legenda

Bacino del torrente Blé

Uso del suolo

Tipologia

- Bedrock
- Bedrock affiorante con locale vegetazione
- Detrito sciolto con sporadica vegetazione
- Vegetazione arbustiva e/o prato
- Vegetazione ad alto fusto
- Prati ad uso abitativo o campi coltivati
- Infrastrutture antropiche

Figura 32. Mappa di uso del suolo del bacino del torrente Blé a scala 1:17'000 e relativa legenda. La mappa è stata sovrapposta alla CTR a scala 1:50'000, ricavata dal geo-portale della Regione Lombardia (www.geoportale.regione.lombardia.it).

Le diverse tipologie di uso del suolo sono state scelte sulla base delle differenze maggiormente evidenti sul territorio. Dopo aver calcolato l'area occupata da ogni classe, queste sono state messe a confronto con l'area totale del bacino (**Tabella 4**), facendone un grafico che mostrasse le percentuali (**Figura 33**). Dall'analisi effettuata è stato osservato che la somma delle porzioni di detrito sciolto e di vegetazione arbustiva e/o prato, ovvero quelle necessarie all'innescò di debris-flow, costituiscono il 37% del territorio nel bacino, fornendo potenzialmente grandi quantità di materiale ad un eventuale evento meteorico intenso. Il 29% dell'area è invece in bedrock, caratterizzato da pendenze elevate, ove la pioggia ha la possibilità di acquisire grandi velocità prima di arrivare al detrito. Il restante 34% rappresenta suolo vegetato ad alto fusto e zone antropizzate.

Tabella 4. Estensione areale di ogni classe in m², in km² e in percentuale rispetto all'area totale.

Tipo di uso del suolo	Area (m2)	Area (km2)	%
Bedrock	265866	0.27	7.66
Bedrock affiorante con locale vegetazione e/o detrito	738854	0.74	21.28
Detrito sciolto con sporadica vegetazione	728125	0.73	20.97
Vegetazione arbustiva e/o prato	551413	0.55	15.88
Vegetazione ad alto fusto	1142510	1.14	32.90
Prati ad uso abitativo o campi coltivati	23833	0.02	0.69
Infrastrutture antropiche	21796	0.02	0.63
Area totale (km2)		3.47	100

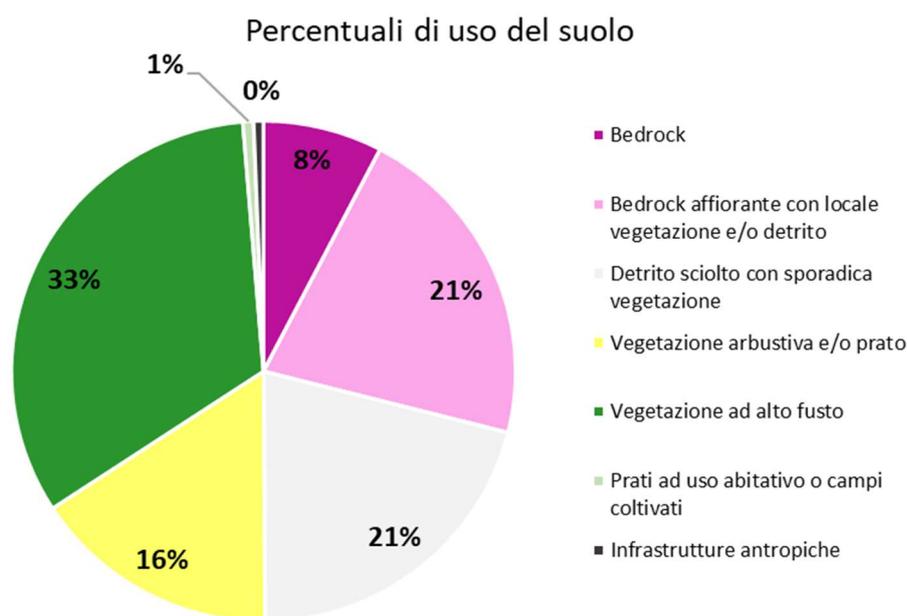


Figura 33. Grafico a torta che mostra le percentuali di uso del suolo per ogni classe, con relativa legenda.

Andando ad analizzare con maggior dettaglio alcune zone in carta si è potuto osservare che: la parte alta del bacino, in particolare la zona S-W, è caratterizzata quasi esclusivamente da bedrock che permette, in caso di eventi piovosi estremi, un aumento critico della velocità dell'acqua (**Figura 34**); una grande quantità di detrito disponibile è situato in corrispondenza della frana de "La Tavola", il cui scorrimento è in parte una conseguenza della presenza di bedrock nella porzione frontale (**Figura 35**).

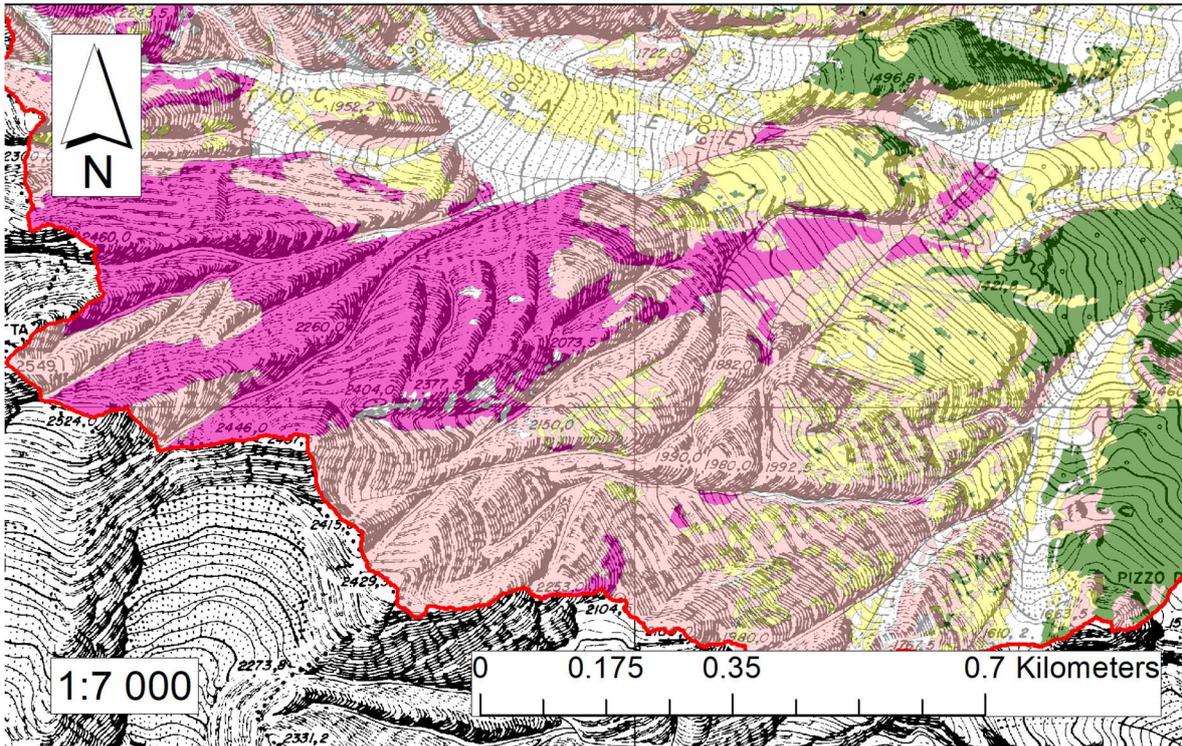


Figura 34. Immagine di dettaglio, a scala 1:7'000, della zona alta del bacino, in particolare quella a S-W, estrapolata tramite ArcMap. Uso del suolo sovrapposto alla CTR a scala 1:10'000.

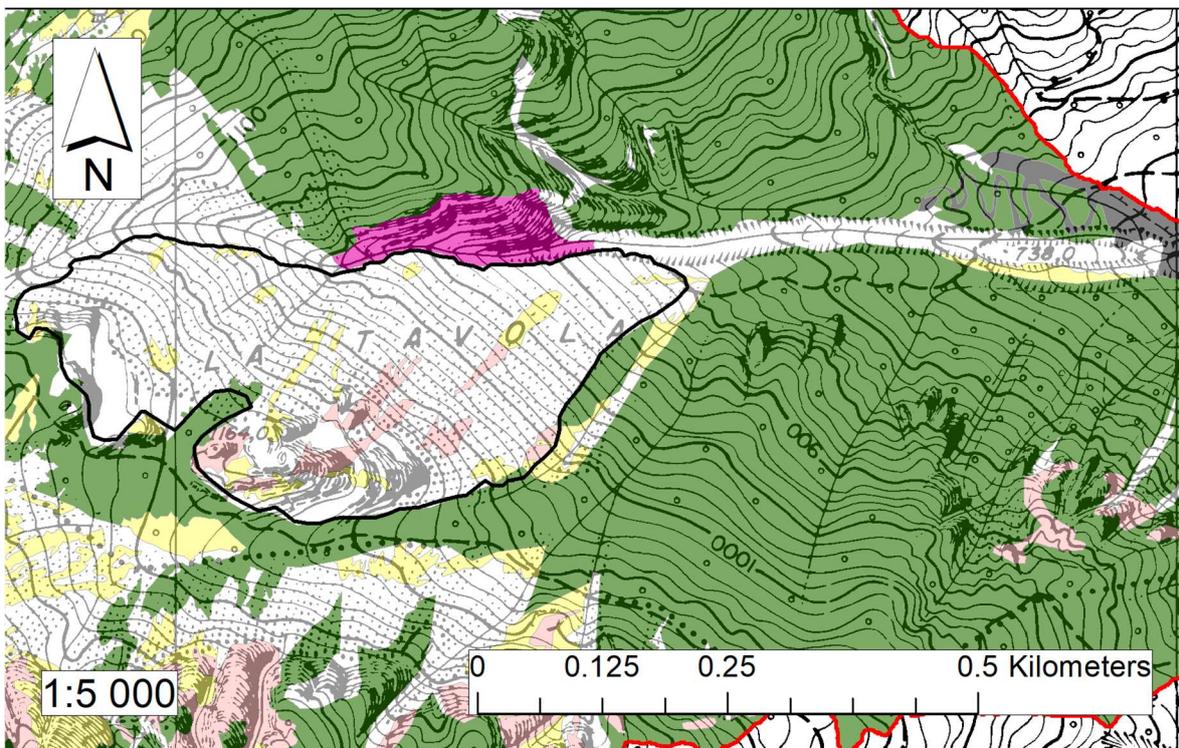


Figura 35. Immagine di dettaglio, a scala 1:5'000, della zona della frana de "La Tavola" estrapolata tramite ArcMap. Uso del suolo sovrapposto alla CTR a scala 1:10'000.

3.3. Geomorfologia del bacino

Il bacino idrografico del T. Blé si estende per circa 3.5 km² e la sua asta principale ricopre una lunghezza di circa 4 km. Orientato in direzione E-W termina il suo percorso immettendosi in destra idrografica nel fiume Oglio, all'altezza dell'abitato di Ono San Pietro.

Il bacino è caratterizzato da movimenti franosi come debris-flow, frane superficiali e dal grande scorrimento della frana de "La Tavola" (evidenziata con la linea nera in **Figura 36**). Le pendici della Concarena rappresentano la fonte primaria di materiale detritico potenzialmente instabile, che a causa di piogge intense può essere preso in carico dall'alveo principale del torrente Blé (*Venturelli, 2021*). Tali versanti arrivano fino alla quota di 2'527 m s.l.m. nella parte S-W del bacino (Cima Bacchetta) e sono caratterizzati da elevate pendenze, che raggiungono gli 89°, risultando così la principale zona d'innescò (**Figura 36**). In generale, l'intero bacino presenta una pendenza media di 42°.

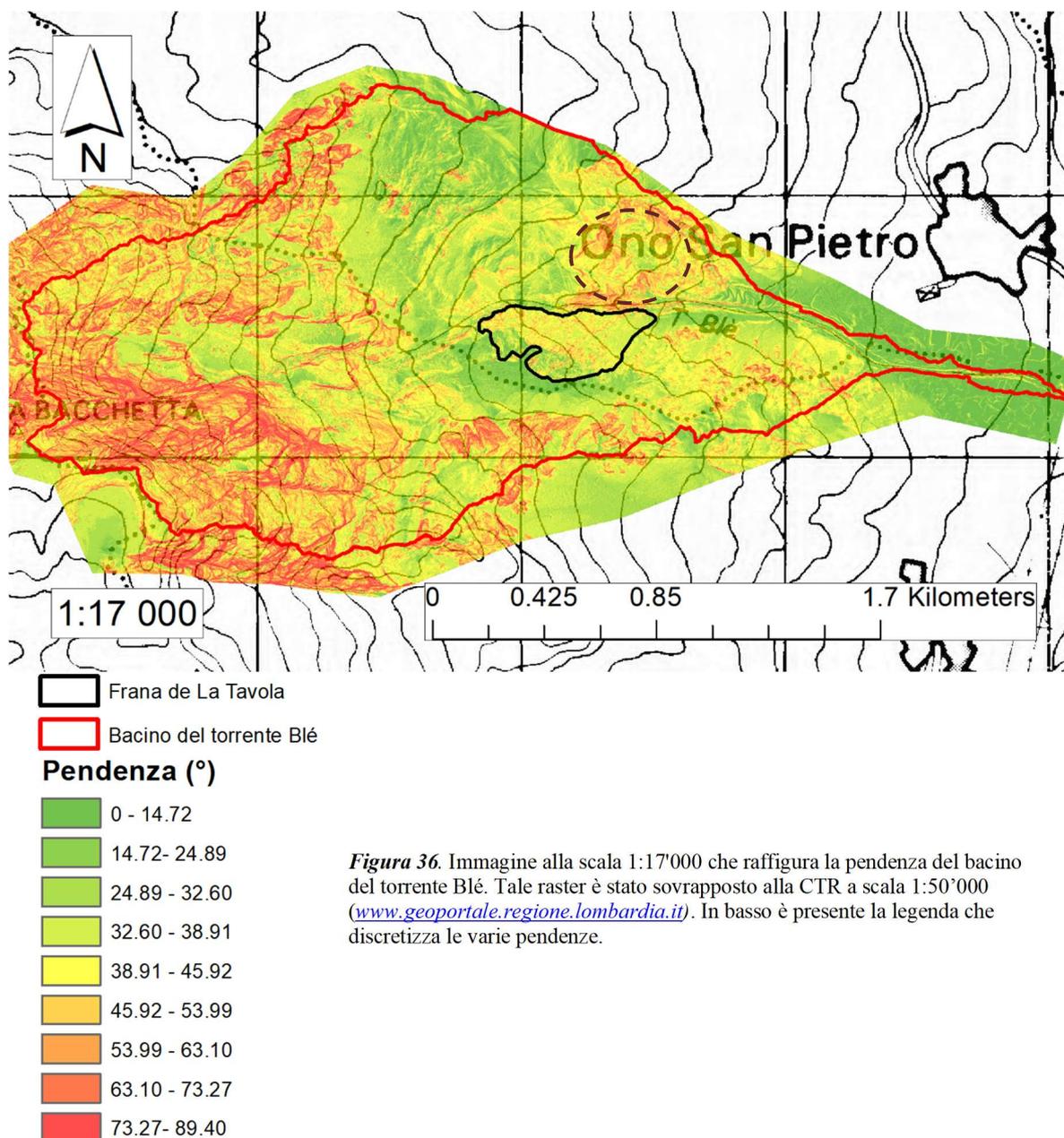


Figura 36. Immagine alla scala 1:17'000 che raffigura la pendenza del bacino del torrente Blé. Tale raster è stato sovrapposto alla CTR a scala 1:50'000 (www.geoportale.regione.lombardia.it). In basso è presente la legenda che discretizza le varie pendenze.

L'andamento delle pendenze è stato ricavato applicando il comando "Slope" al DEM di maglia 1x1 m del bacino, nel software ArcMap,. Le zone a più basse pendenze, colorate in verde, sono caratterizzate da detrito o da zone boschive. In rosso tutta la porzione in bedrock. Un'area ad elevata pendenza è quella situata di fronte alla frana de "La Tavola" (zona cerchiata in **Figura 36**), questo perché in tal punto è presente il substrato roccioso appartenente alla formazione del Calcare di Prezzo. Questa caratteristica è uno dei fattori di innesco dello scorrimento, poiché durante le condizioni di piena il canale acquisisce grande potere erosivo, scalzando al piede il versante detritico destro (**Figura 37**). Avendo in sinistra idrografica il bedrock il torrente si approfondisce maggiormente sul lato opposto, destabilizzando il complesso franoso de "La Tavola" (*Albertelli, 2021*).



Figura 37. Foto che mostra la sponda sinistra in bedrock e quella destra, detritica, sotto l'azione erosiva del torrente (*Albertelli, 2021*).

Nella zona de "La Tavola", come in tutte le altre aree caratterizzate da grande apporto detritico e frane superficiali, la vegetazione fatica a crescere (**Figura 38**), proprio per i continui movimenti della massa a causa dell'erosione del torrente. Tale instabilità è legata alle pendenze, superiori a 20°, che possono raggiungere sui versanti anche i 35°- 40° (*Venturelli, 2021*).



Figura 38. Foto aerea che mostra la frana de "La Tavola" ed il versante opposto in bedrock (*Venturelli, 2021*).

Risulta evidente, quindi, che i processi di versante e quelli torrentizi siano in continua interazione ed interconnessione.

L'intero bacino idrografico è interessato dalla presenza di frane diffuse, crolli in roccia, e accumuli di antiche frane (zona de "La Tavola", **Figura 39**). Il torrente ha quindi a disposizione materiale vario ed eterogeneo derivato dalla disgregazione delle litologie circostanti. Questi processi colmano progressivamente l'alveo, principalmente nella parte alta dell'asta, costringendo il torrente a scorrere sotto i depositi. I diversi fenomeni franosi possono causare lo sbarramento del corso d'acqua, con conseguente accumulo delle acque del torrente in condizioni di piena (effetto diga). Un possibile collasso dello sbarramento potrebbe determinare l'innescò di un debris-flow.

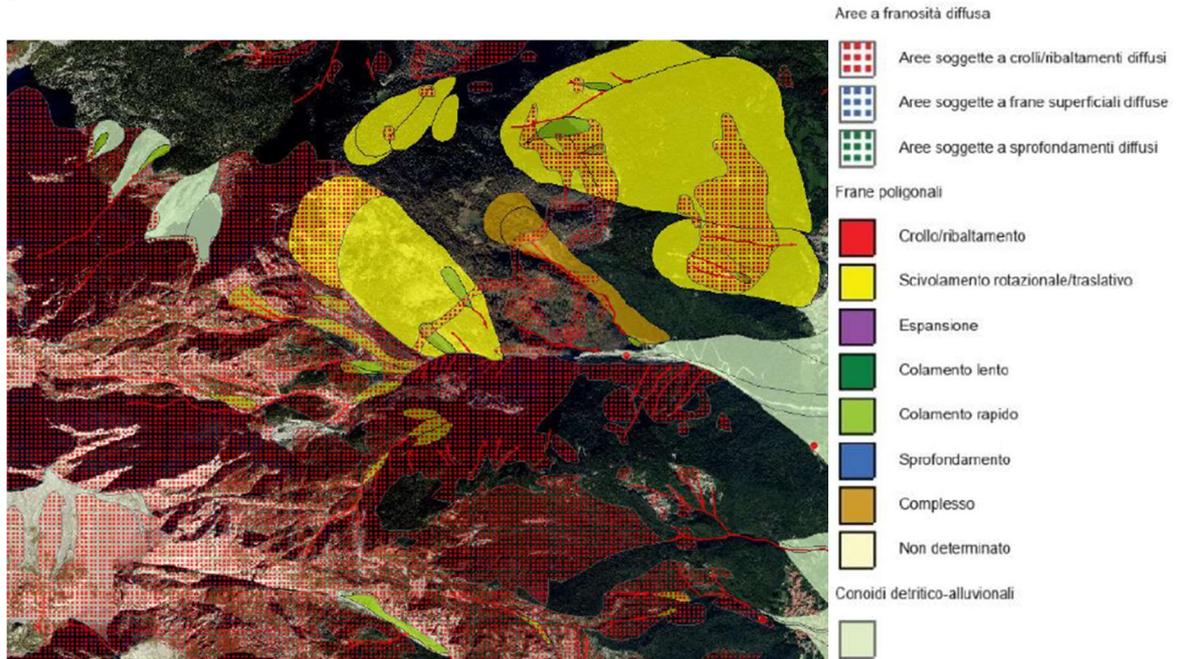
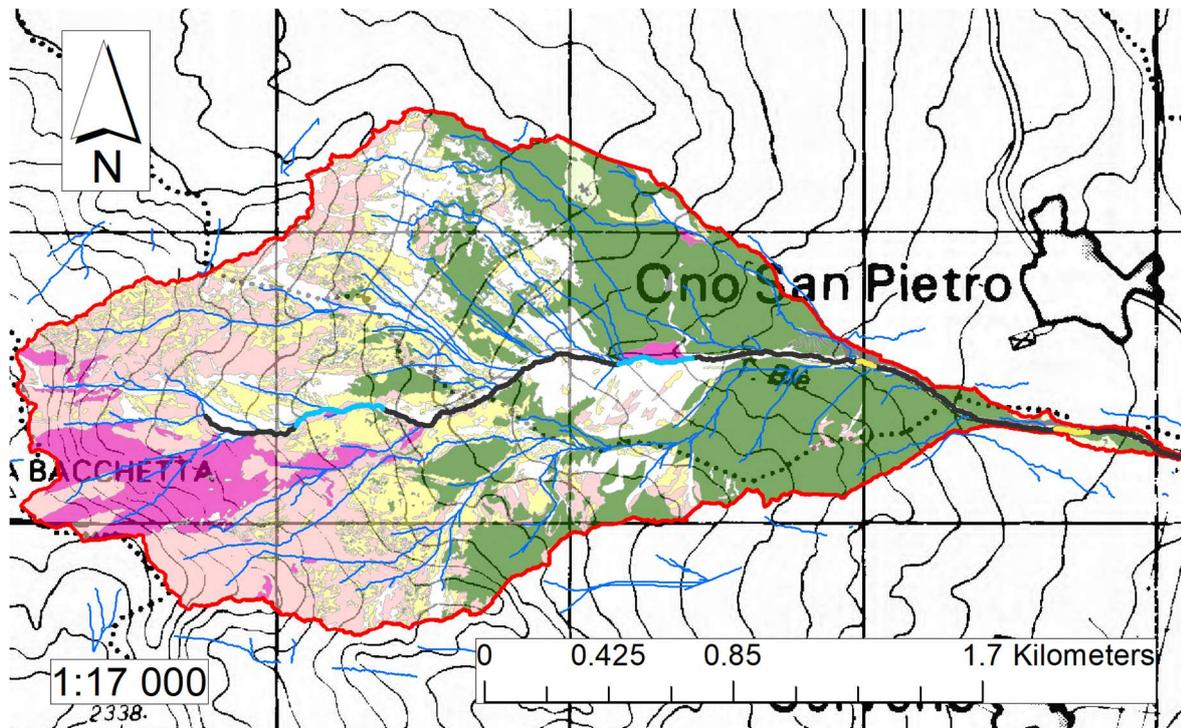


Figura 39. Immagine estrapolata da database cartografico IFFI (Inventario Fenomeni Franosi d'Italia) che evidenzia l'attività dei versanti locali (Albertelli., 2021).

All'interno del bacino i sedimenti vengono trasportati principalmente con meccanismi di colata, che redistribuiscono il deposito lungo tutta l'asta del torrente. Ciò presuppone che, in coincidenza di eventi estremi, il corso d'acqua prenda in carico il materiale lungo l'alveo, oltre che dalla zona di innesco, moltiplicando il volume dei fenomeni e sostenendo il flusso di detriti anche su lunghe distanze (Albertelli, 2021).

Un'ultima considerazione si può fare sul reticolo di drenaggio ricavato attraverso il comando "Flow Accumulation". Questo prodotto mostra le varie linee di impluvio, costruite sulle celle che raccolgono maggiore acqua piovana, sulla base dei dati forniti dal DEM. Si nota, in **Figura 40**, che dall'asta principale si dipartono diverse aste secondarie effimere, che attraversano molte zone di detrito. Questi canali si riattivano in caso di piogge intense, fungendo da veicolante di materiale nel corso principale.

Dal reticolo di drenaggio è stata poi evidenziata la sola asta principale, discretizzando i tratti che passano su detrito, bedrock oppure su un tratto antropizzato. Per farlo è stato creato uno shapefile “polilinea”, ricalcando il “Flow Accumulation”, seguendo l’asta principale di ordine più alto, in questo caso di ordine 4.



Legenda

- Bacino del torrente Blé
- Reticolo di drenaggio

Asta Principale

Tipo di letto torrentizio

- Tratto torrentizio su bedrock
- Canale su tratto detritico
- Canale rimaneggiato

Uso del suolo

Tipologia

- Bedrock
- Bedrock affiorante con locale vegetazione
- Detrito sciolto con sporadica vegetazione
- Vegetazione arbustiva e/o prato
- Vegetazione ad alto fusto
- Prati ad uso abitativo o campi coltivati
- Infrastrutture antropiche

Figura 40. Rete di drenaggio e asta principale sovrapposte all'uso del suolo a scala 1:17'000. Mappa estrapolata da software GIS, su base CTR a scala 1:50'000 (www.geoportale.regione.lombardia.it).

Nelle **Figure 41 e 42** sono rappresentati i tratti di torrente passanti su bedrock, ove l’acqua tende ad acquisire maggiore velocità.

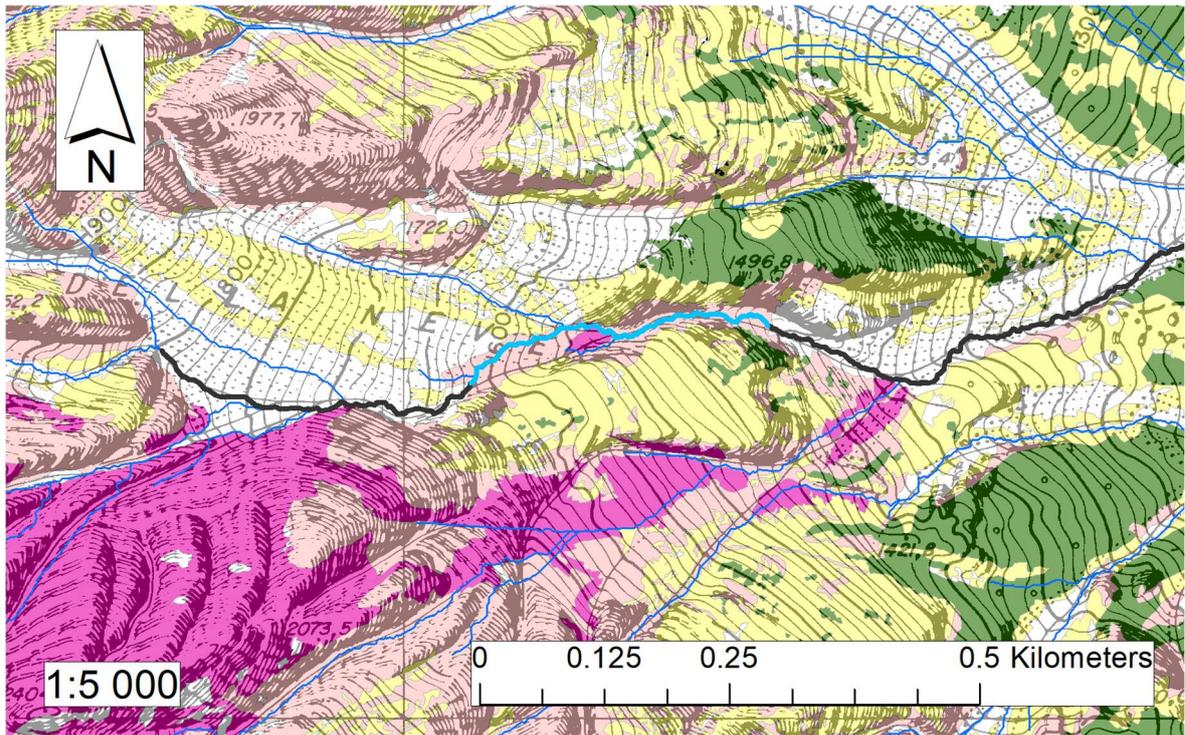


Figura 41. Immagine GIS, alla scala 1:5'000, che mostra il tratto di asta principale passante sul bedrock, in corrispondenza della parte alta del bacino. Carta di uso del suolo e asta principale sovrapposte alla CTR a scala 1:10'000.

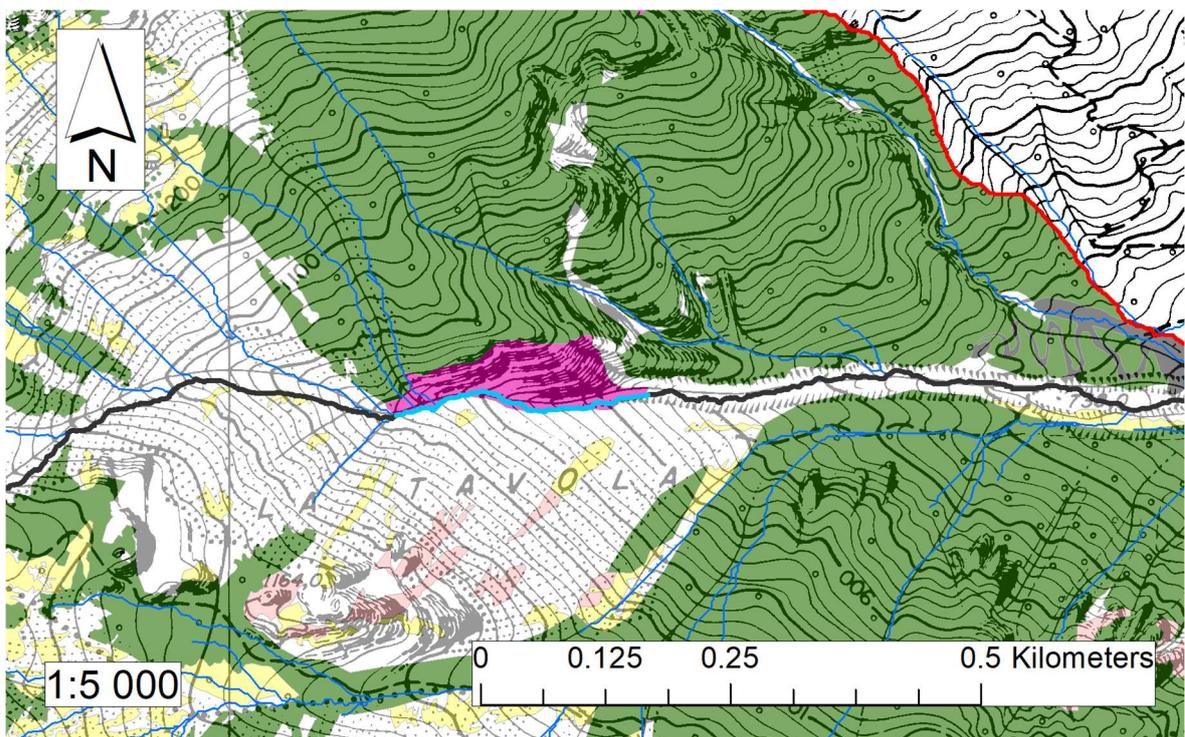


Figura 42. Immagine GIS, alla scala 1:5'000, che mostra il tratto di asta principale passante sul bedrock, in corrispondenza della frana de "La Tavola". Carta di uso del suolo e asta principale sovrapposte alla CTR a scala 1:10'000.

Il risultato di tale analisi (**Figura 43**) mostra che l’asta principale del torrente Blé scorre per il 78% all’interno di detrito sciolto e per il 17% su bedrock. Tali percentuali confermano la presenza di due delle caratteristiche predisponenti l’innescò di colate di detrito, ovvero, tratti in bedrock in cui l’acqua acquisisce grande velocità e lunghi tratti in detrito sciolto ad elevate pendenze.

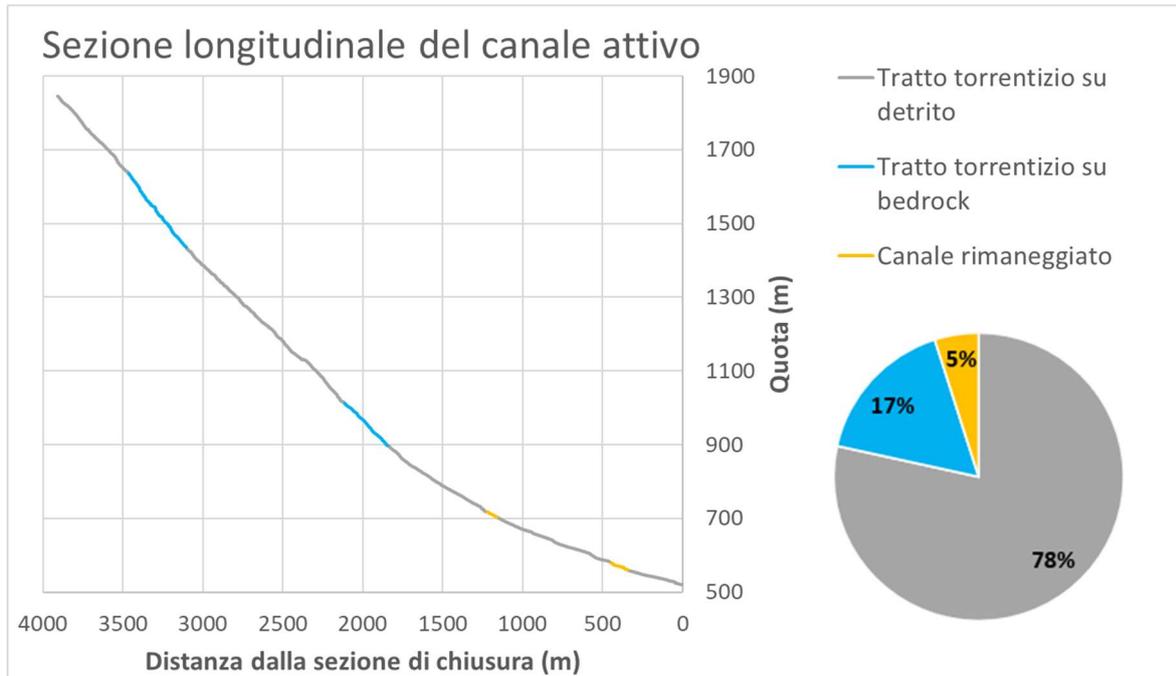


Figura 43. Profilo topografico dell’asta principale del torrente Blé ove sono evidenziati i diversi tratti in bedrock, detrito o antropizzati. A destra è inserito un grafico a torta che mostra le diverse percentuali per tipologia di letto fluviale.

3.4. Analisi multi-temporale del bacino

Un altro tipo di analisi effettuata è quella multi-temporale, che permette di indagare la dinamica del bacino nel tempo. Per fare questo sono state scelte tre zone di particolare interesse: la parte alta del bacino, la frana de “La Tavola” e la parte bassa del bacino. Per effettuare la presente analisi sono state estrapolate immagini dalle ortofoto presenti nel geoportale della Regione Lombardia, riferite agli anni 1975, 1998, 2012, 2015, 2019, e l’immagine LIDAR del 2021.

Parte alta del bacino

Le **Figure 44, 45 e 46** raffigurano la sequenza temporale della parte alta del bacino, dove è presente la parte in roccia affiorante e la maggior quantità di detrito sciolto disponibile. A distanza di 23 anni dalla prima foto non si notano cambiamenti nella morfologia e, con un’attenta osservazione, anche negli anni che intercorrono tra 1998 e 2021 (le cui immagini non sono riportate) non sono state notate differenze, ad indicare che la dinamica in questo settore tende ad essere sempre la stessa.

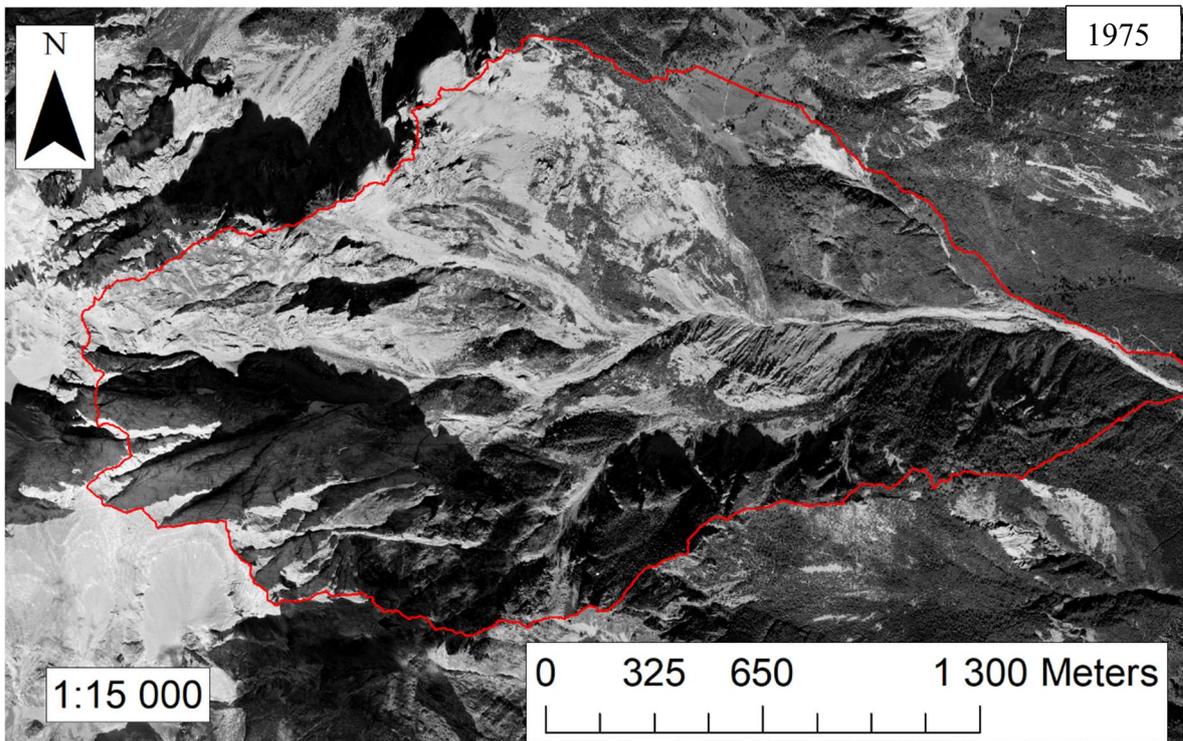


Figura 44. Ortofoto della parte alta del bacino, alla scala 1:15'000, relativa all'anno 1975. In rosso è delineato il bacino del torrente Blé.

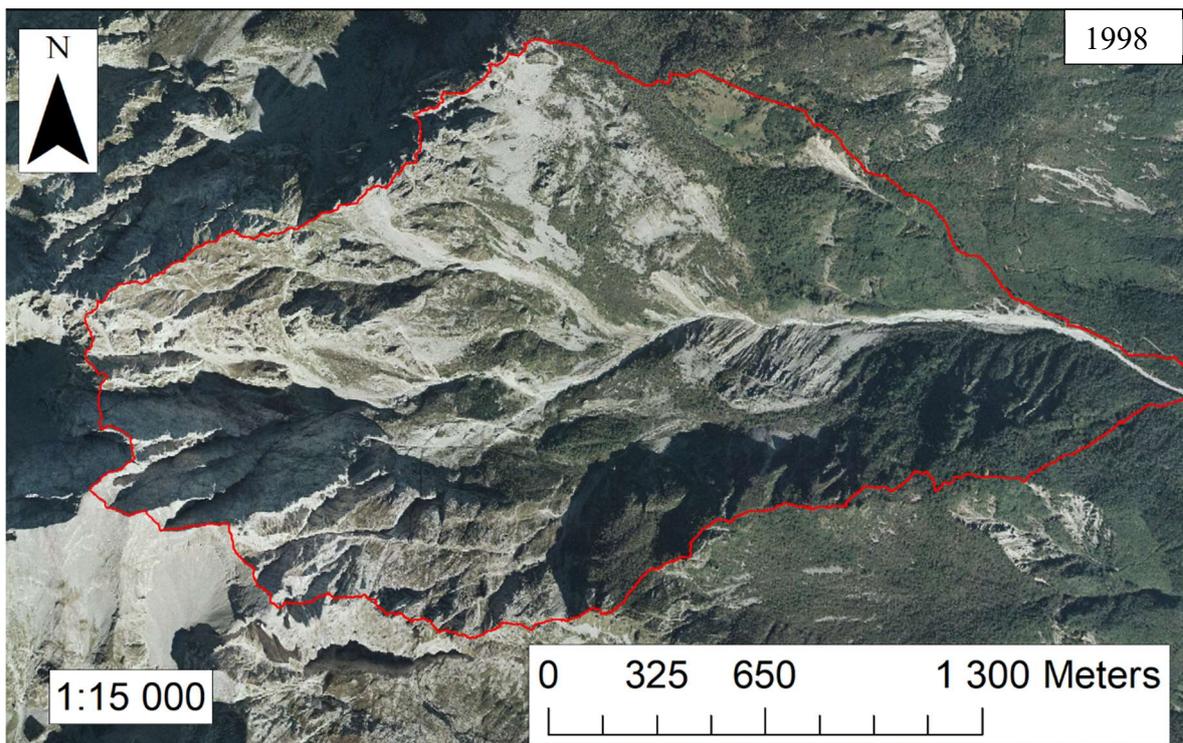


Figura 45. Ortofoto della parte alta del bacino, alla scala 1:15'000, relativa all'anno 1998. In rosso è delineato il bacino del torrente Blé.

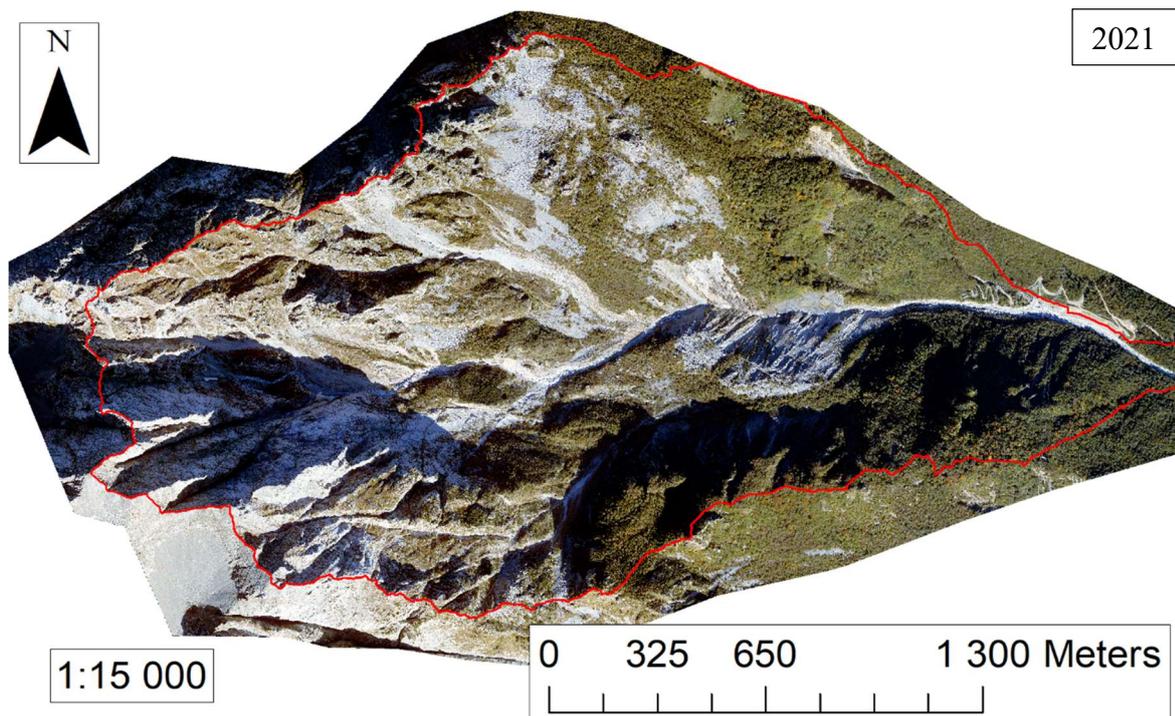


Figura 46. Ortofoto della parte alta del bacino, alla scala 1:15'000, relativa all'anno 2021. In rosso è delineato il bacino del torrente Blé.

Frana de “La Tavola”

Dalla seguente analisi è evidente come la zona in questione sia, contrariamente alla parte alta del bacino, in costante evoluzione. È possibile notare che nel 1975 (**Figura 47**) il tratto canalizzato si presentava molto più rettilineo. Negli anni l'avanzamento del corpo di frana verso Nord ha generato anse che si sono sempre più accentuate. In particolare, si osserva che in sinistra idrografica il bedrock rimane invariato nel tempo, mentre in destra il detrito frana, venendo scalzato al piede dal torrente (**Figure 48 e 49**). È evidente, nella foto del 2021 in **Figura 50**, come un evento franoso in sponda sinistra (cerchio rosso) abbia determinato il riempimento del canale torrentizio, modificando l'ansa creatasi fino ad allora.

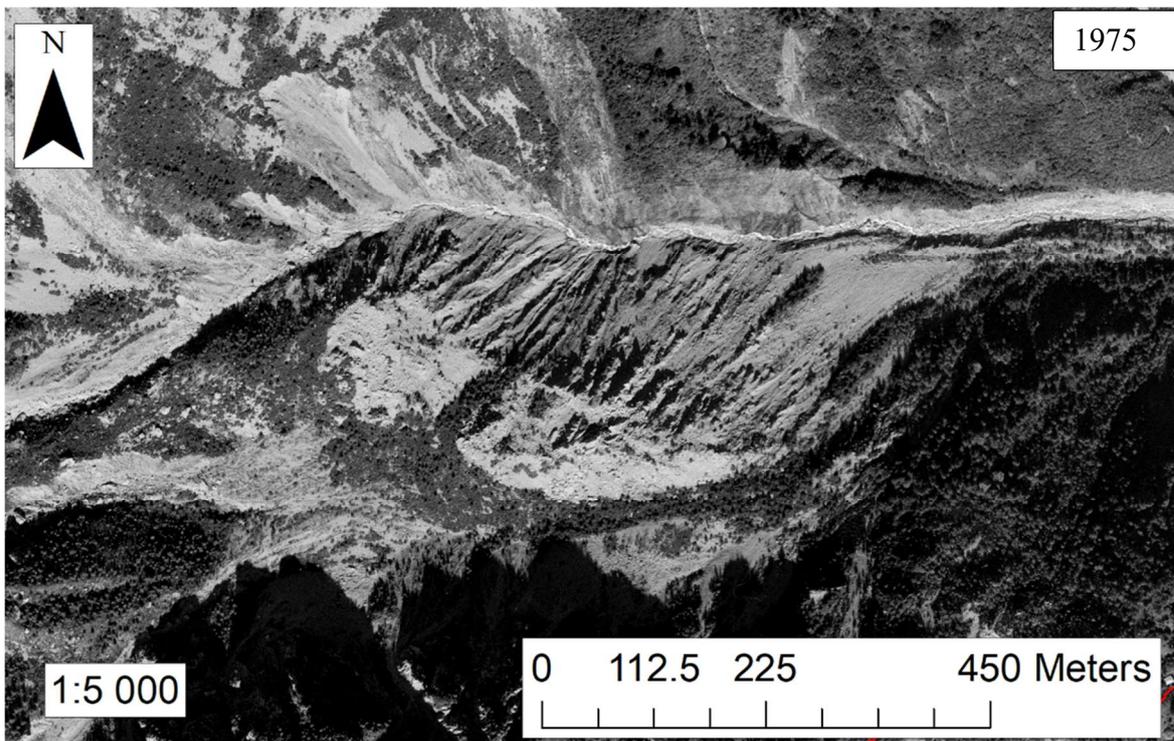


Figura 47. Ortofoto della zona della frana de "La Tavola" alla scala 1:5'000, relativa all'anno 1975.

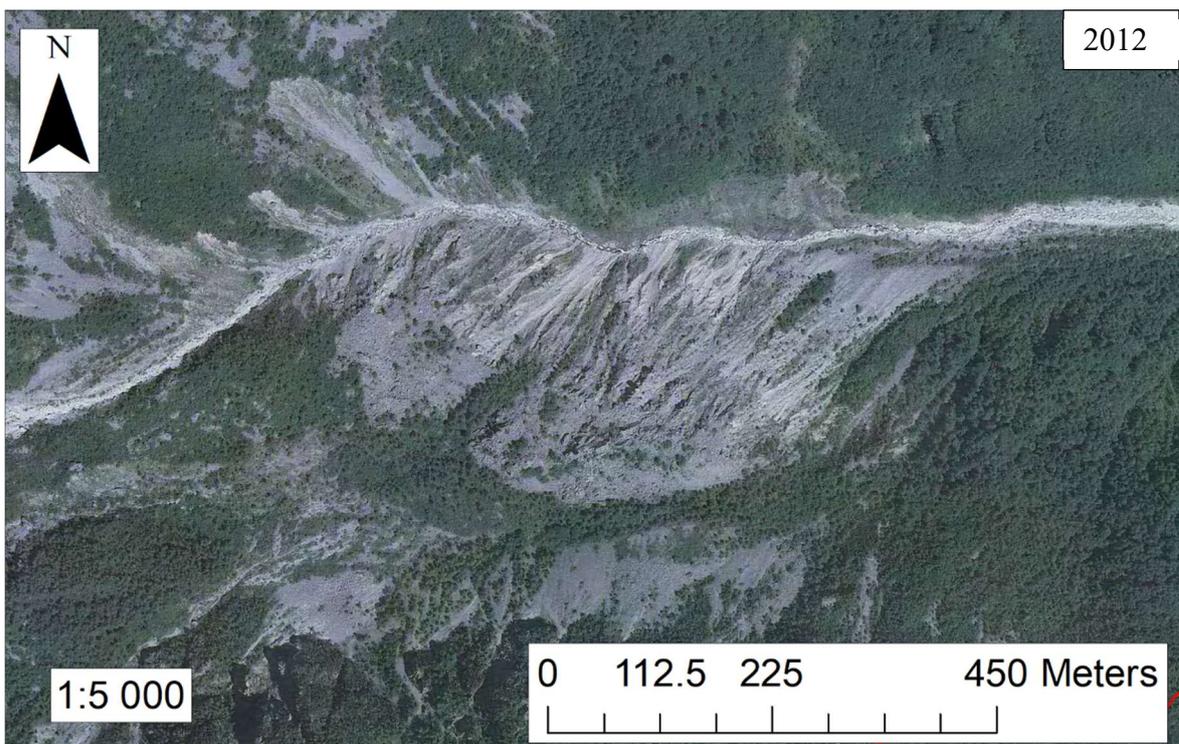


Figura 48. Ortofoto della zona della frana de "La Tavola" alla scala 1:5000, relativa all'anno 2012.

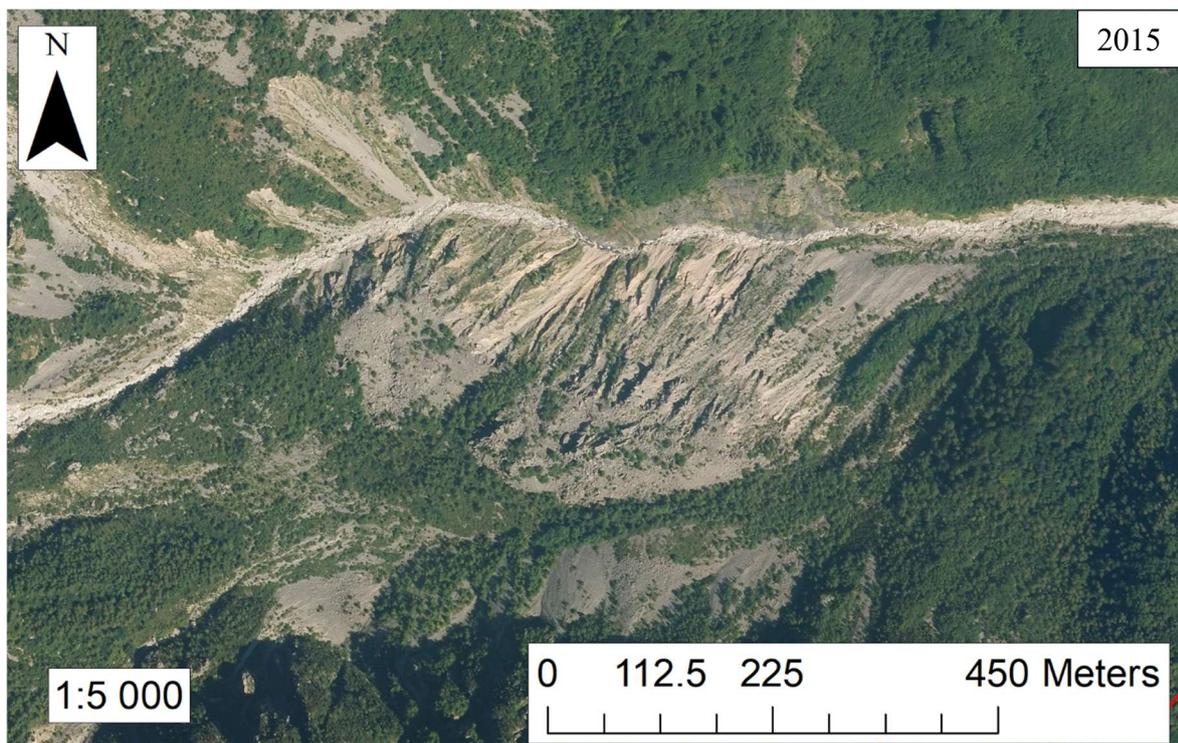


Figura 49. Ortofoto della zona della frana de “La Tavola” alla scala 1:5’000, relativa all’anno 2015.

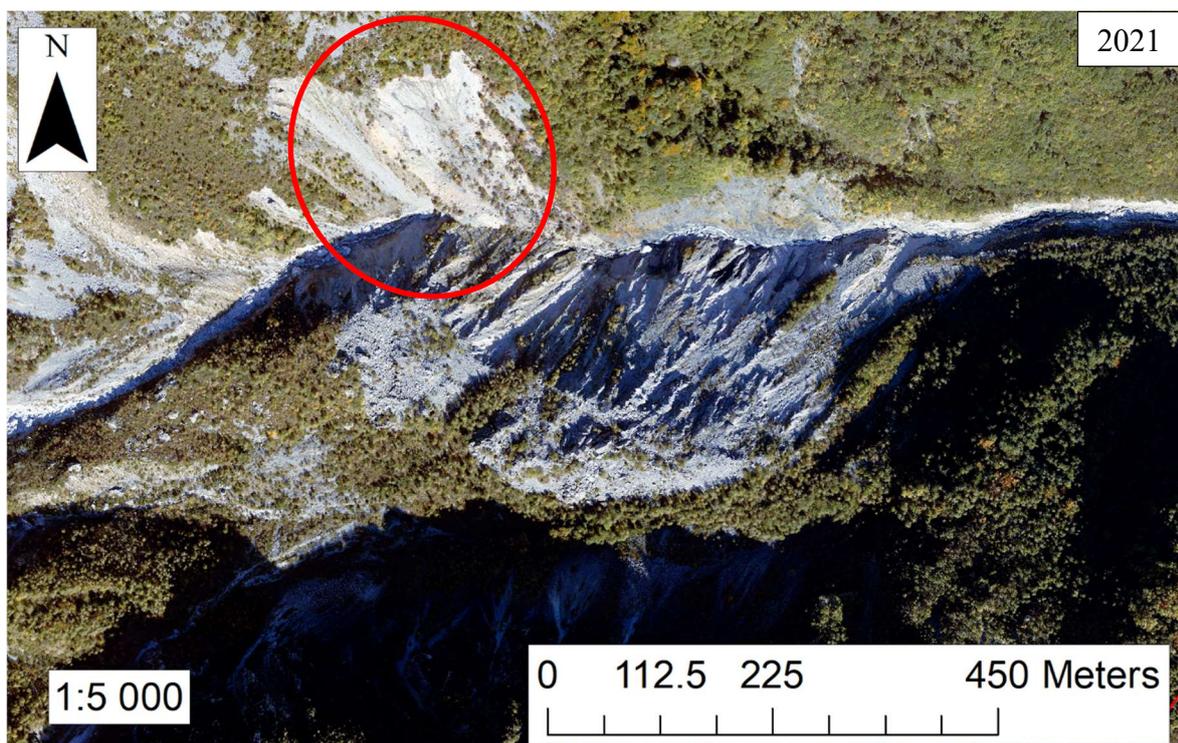


Figura 50. Ortofoto della zona della frana de “La Tavola” alla scala 1:5’000, relativa all’anno 2021.

Parte bassa del bacino

Nella sequenza di ortofoto di seguito si nota come il canale principale, nella parte bassa del bacino, sia stato confinato a partire dal 1975 (*Figura 51*), diminuendone l'ampiezza. In corrispondenza della chiusura del bacino è situata una cava da cui vengono ricavati gli inerti che scendono grazie ai debris-flow. Nel 2015 è stata costruita una briglia (cerchiata in rosso in *Figura 52*), distrutta dal violento episodio del 2019. Nella foto (*Figura 53*) di questo ultimo anno si vede, infatti, come il canale si sia allargato, invadendo la cava e depositando molto materiale in alveo. Questa vicenda è ben testimoniata anche in *Figura 54*, in cui il torrente Blé alla confluenza con il fiume Oglio ha colmato quest'ultimo di sedimenti.

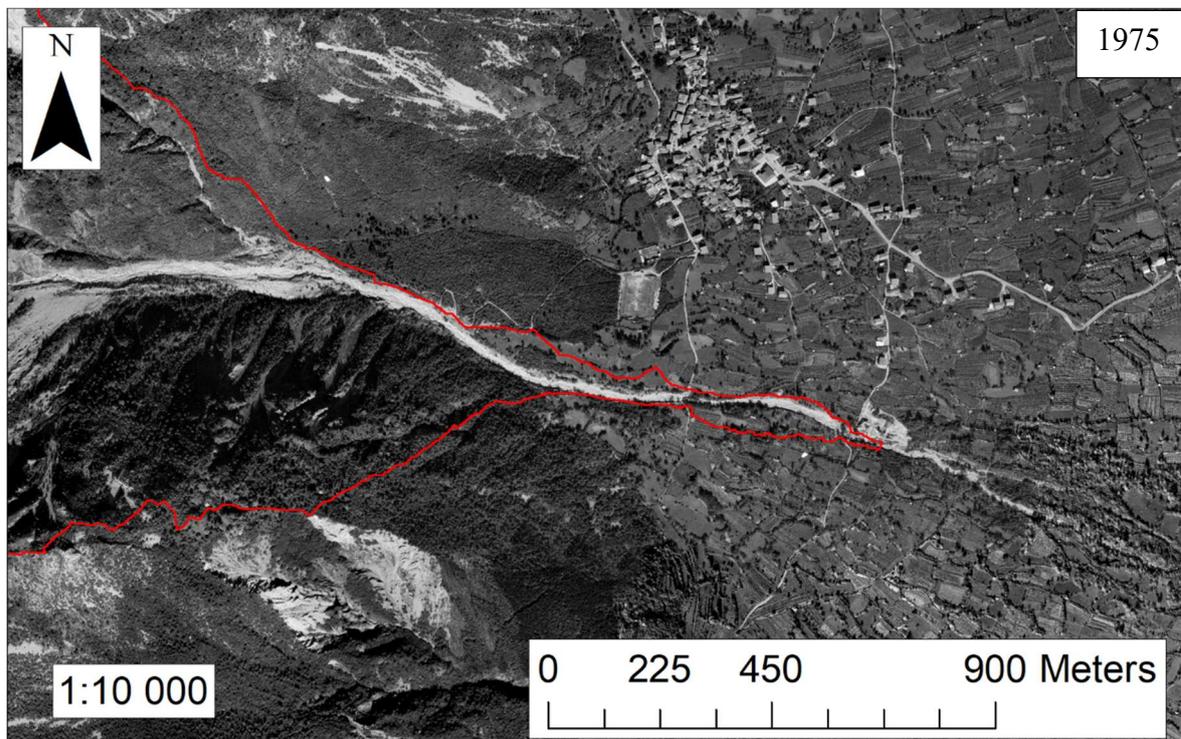


Figura 51. Ortofoto della zona bassa del bacino del T. Blé alla scala 1:10'000, relativa all'anno 1975.

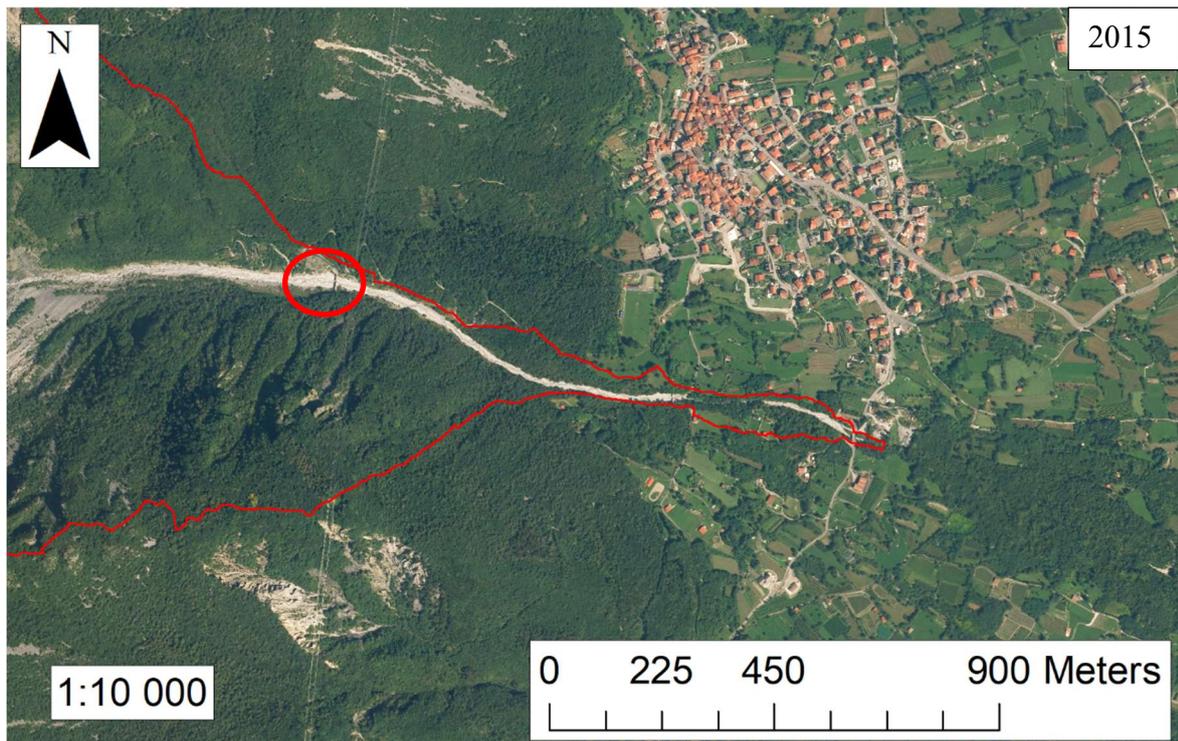


Figura 52. Ortofoto della zona bassa del bacino del T. Blé alla scala 1:10'000, relativa all'anno 2015. In rosso è cerchiata la briglia costruita in quell'anno.

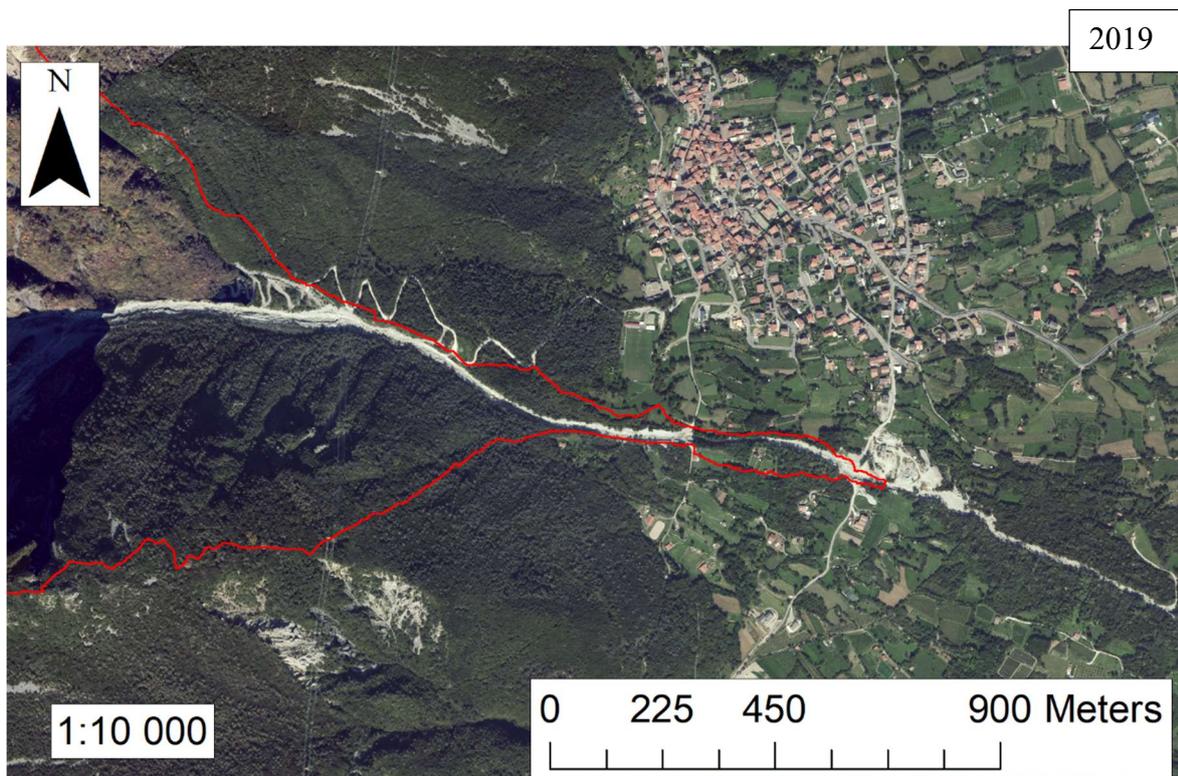


Figura 53. Ortofoto della zona bassa del bacino del T. Blé alla scala 1:10'000, relativa all'anno 2019. Si osserva la zona a valle della cava di inerti colmata di detrito rispetto al 2015.

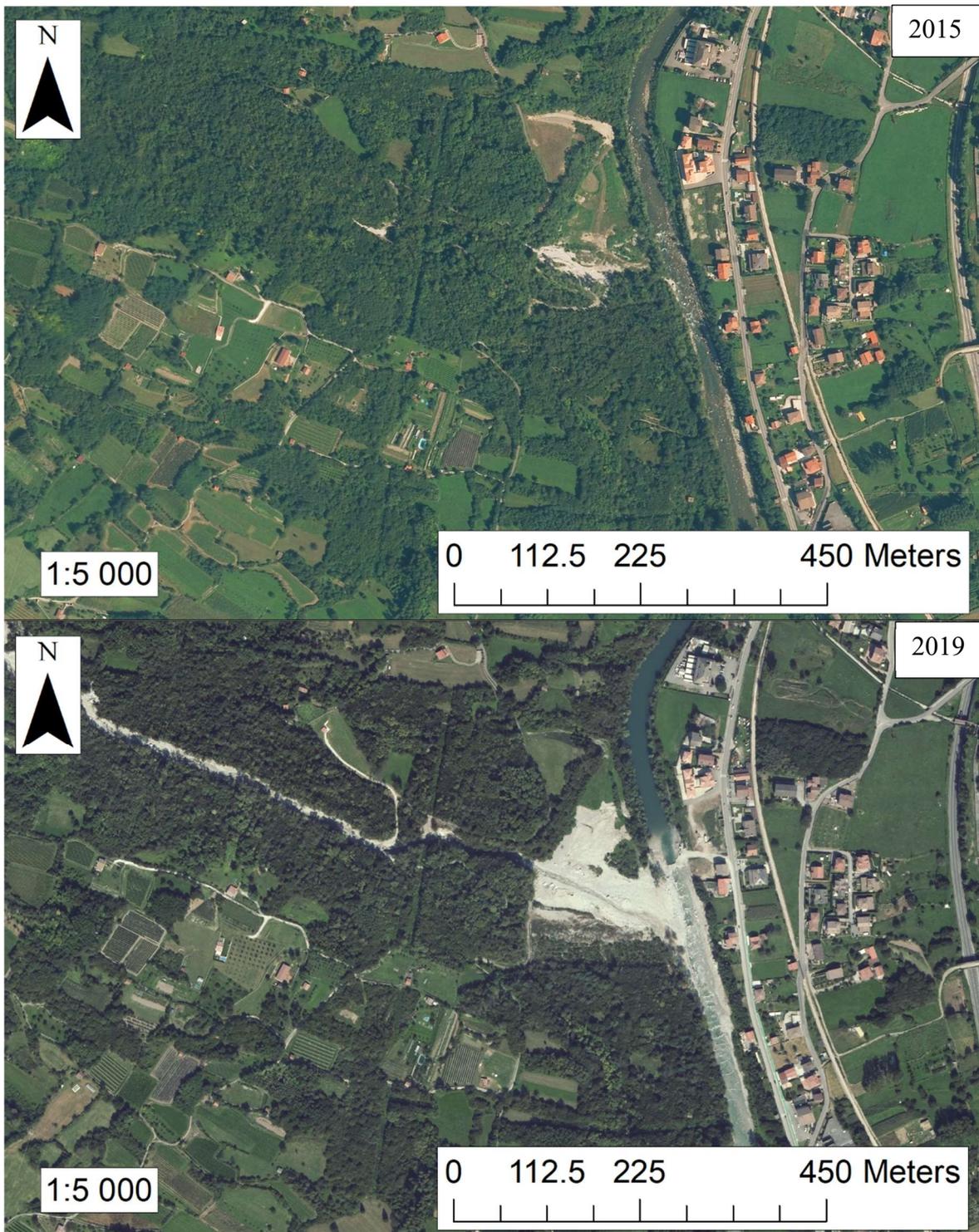


Figura 54. Ortofoto del 2015 e del 2019 alla scala 1:5'000. In quest'ultima si osserva la quantità di materiale apportato dal fenomeno di quell'anno.

3.5. Caratteristiche granulometriche del detrito in alveo

Durante i sopralluoghi in campo sono stati raccolti dei campioni del materiale in alveo, in corrispondenza della zona in cui è posizionata la stazione di monitoraggio (**Figura 55**). In tale punto sono stati presi anche le coordinate GPS per definire la sezione trasversale presente in **Figura 56**.

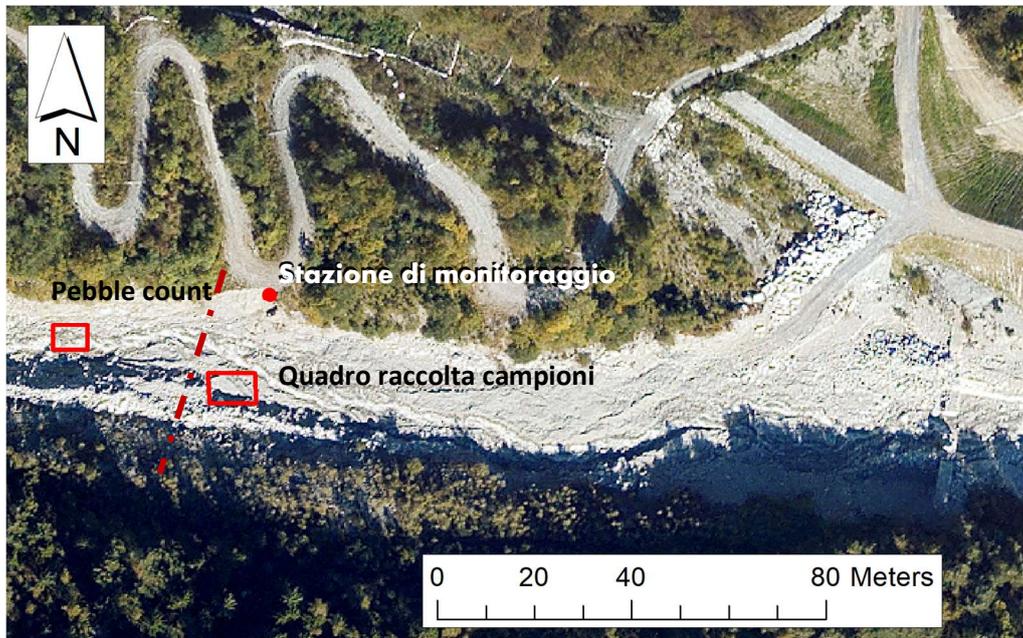


Figura 55. Ortofoto che mostra i quadri da cui sono stati prelevati i campioni e il sito del pebble count, rispetto alla stazione di monitoraggio. La linea rossa tratteggiata mostra il tracciato su cui sono stati presi i punti per tracciare la sezione trasversale.

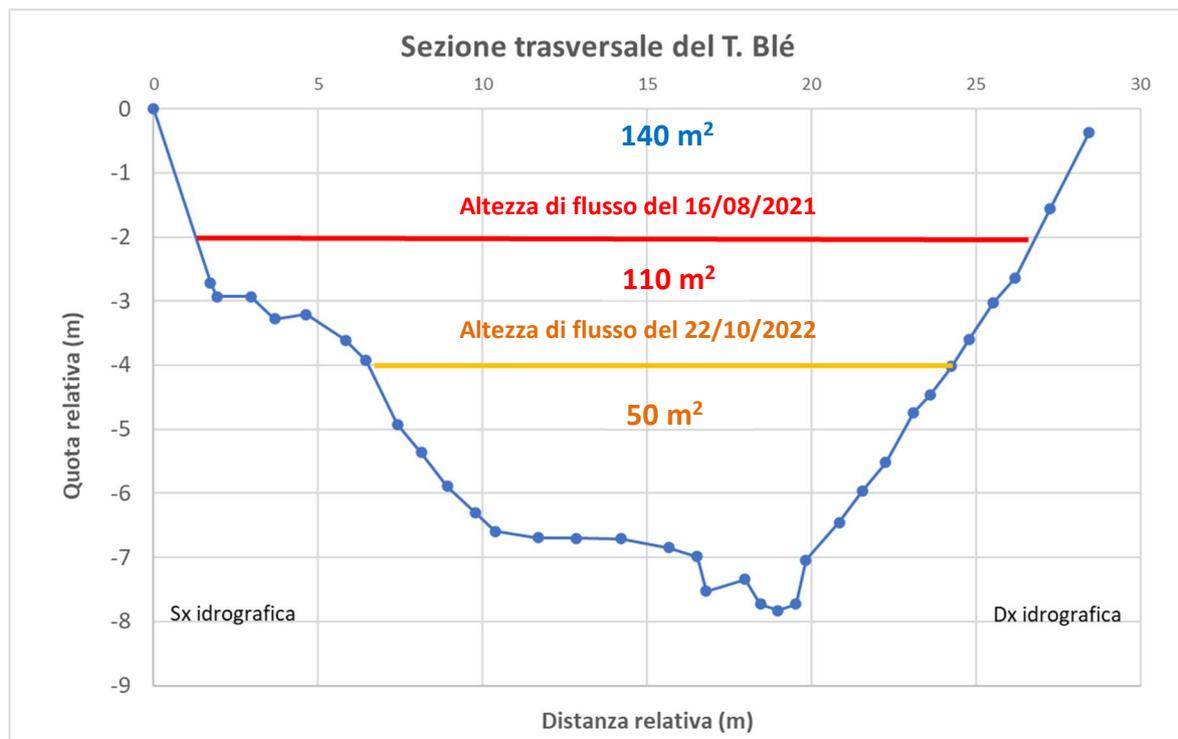


Figura 56. Sezione trasversale del torrente Blé con altezze di flusso degli eventi del 2021 (in rosso) e del 2022 (in giallo). Sono riportate anche le relative aree occupate e l'area totale della sezione misurata (in blu). I punti sono stati raccolti tramite GPS in progressione dalla sponda sinistra a quella in destra idrografica.

Si stima che la sezione presenti un'area bagnata totale di circa 140 m², ricavata dal grafico attraverso il calcolo dei trapezi, per una larghezza di circa 28 m ed un'altezza di 7.8 m. Attraverso l'osservazione delle foto relative agli eventi del 2021 e del 2022 è stato possibile fare una stima dell'altezza del flusso rispetto alla base dell'alveo, raffigurata nella suddetta sezione.

È risultato che il flusso durante il primo evento sia arrivato a 2 m dalla stazione di monitoraggio, che coincide con l'origine della sezione, occupando circa 110 m² (linea rossa in **Figura 56**). Prima della colata di detrito del 16 agosto 2021 l'alveo risultava meno inciso rispetto al momento delle misure GPS, determinando un flusso più "alto".

Il secondo debris-flow, avvenuto successivamente alla misura della sezione, ha raggiunto il livello segnato dalla linea gialla in **Figura 56**, a circa 3.8 m dalla base dell'alveo, occupando un'area di circa 50 m².

È stata successivamente effettuata la granulometria al fine di caratterizzare il detrito superficiale e sub-superficiale che compone l'alveo in esame.

Inoltre, in campo è stata effettuata la procedura del "pebble count", che permette di determinare in maniera speditiva la frequenza per ogni classe granulometrica, misurandone l'asse B (intermedio), selezionando in maniera casuale i grani superficiali da misurare.

Come è possibile osservare in **Figura 57**, è emerso che il 55% dei grani misurati è maggiore del diametro di 32 mm, ad indicare come la maggior parte del materiale superficiale sia prevalentemente grossolano.

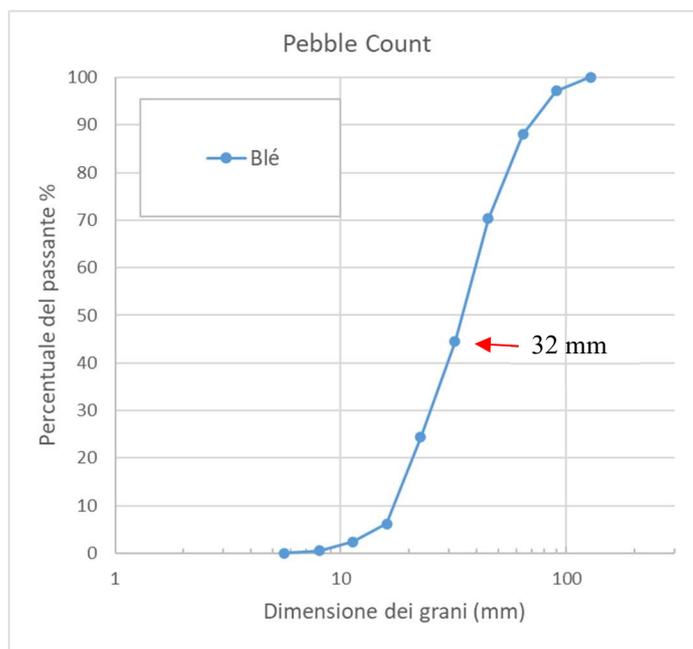
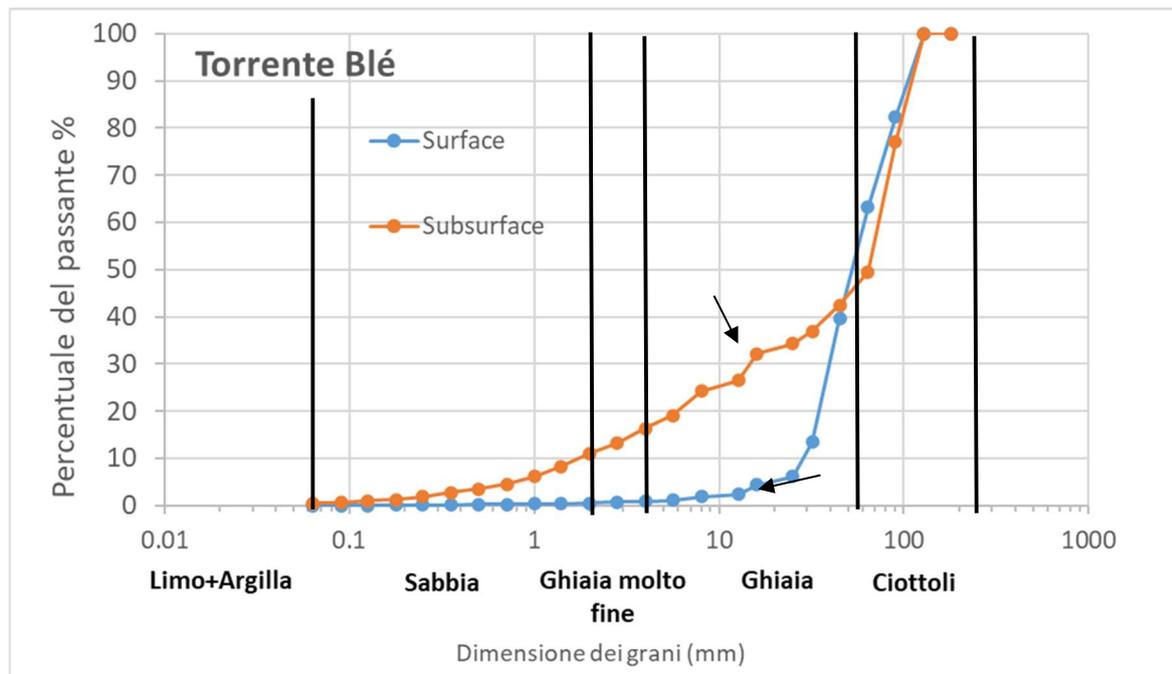


Figura 57. Grafico ottenuto dai dati del pebble count effettuato sul campo.

Il peso totale dei campioni raccolti in campo era rispettivamente di 99.89 kg, per il campione sub-superficiale, e di 50.94 kg per il campione superficiale. Parte della setacciatura è stata effettuata in campo per analizzare le frazioni più grossolane, mentre quelle più fini sono state dapprima asciugate in forno a 60°C per 24 ore, poi setacciate in laboratorio fino alla maglia di diametro 0.063 mm. I pesi ottenuti, sia del campione superficiale che sub-superficiale, sono stati processati per creare le curve granulometriche, presenti in **Figura 58**.



Classe Granulometrica	Subsurface (%)	Surface (%)
Ciottoli (64-256 mm)	50.56	36.80
Ghiaie (4-64 mm)	33.13	62.25
Ghiaie molto fini (2-4 mm)	5.27	0.38
Sabbia (0.063-2 mm)	10.54	0.54
Limo + Argilla ($\phi < 0.063$ mm)	0.50	0.02

Figura 58. Analisi granulometrica effettuata sul materiale in alveo del torrente Blé. In arancio è descritto il campione sub-superficiale, in azzurro il superficiale. Sotto sono descritte le percentuali di ogni classe sul totale. Le classi sono quelle teorizzate da *Wentworth (1922)*.

La forma della linea blu ricalca l'andamento del "pebble count", anche se in questo caso l'87% dei grani è maggiore di 32 mm. Dalla tabella in **Figura 58** è possibile notare che il 99.05% (50.46 kg) del campione superficiale è composto da ghiaie e ciottoli, mentre nel caso del sub-superficiale questa percentuale rimane al 83.69% (83.59 kg). Prendendo come riferimento il diametro 25 mm, per il sub-superficiale si ha il 34% di passante, mentre per il superficiale soltanto il 6% (indicati dalle frecce nel grafico). In corrispondenza del diametro 45 mm si ha un'inversione ed il materiale compreso tra 64 mm e 45 mm risulta maggiore nella componente superficiale. Questo indica che il detrito superficiale limo-argilloso è stato dilavato dall'acqua corrente. Questa caratteristica è riscontrabile anche nella percentuale fine ($\phi < 0.063$ mm), che risulta essere 25 volte inferiore rispetto alla componente sub-superficiale (tabella in **Figura 58**). Il materiale del torrente risulta quindi essere ad alta componente grossolana unitamente ad una porzione minore fine, caratteristica propria dei debris-flow.

Riassumendo, il bacino del torrente Blé presenta tutte le condizioni predisponenti affinché si verifichino debris-flow, descritte in *paragrafo 2.1*, ovvero:

- Grande disponibilità di materiale detritico mobilizzabile di granulometria eterogenea, prevalentemente grossolana con una frazione fine del 10-20%;
- Pendenze elevate della zona d'innescò e del canale attivo;
- Grandi concentrazioni di acqua in ruscellamento in occasione di eventi temporaleschi.

3.6. Eventi di debris-flow passati

Il torrente Blé è caratterizzato da frequenti fenomeni di debris-flow. Prima dell'installazione della stazione di monitoraggio ne sono avvenuti due, di cui si possiede documentazione: il 25 agosto 2018 ed il 6 agosto 2019. Di seguito sono stati brevemente descritti gli eventi innescanti ed alcuni dei danni provocati da ciascun fenomeno.

Evento del 25 agosto 2018

L'evento si è verificato il 25 agosto 2018 in seguito ad una pioggia di forte intensità e breve durata, inserita in una sequenza di episodi intermittenti meno intensi. I dati pluviometrici di riferimento provengono sia dalla stazione di Capo di Ponte, a nord dell'area del torrente Blé, (*Figura 59*) che da quella di Lozio (dati di ARPA Lombardia), a sud del bacino, in quanto sul sito esatto non era presente una stazione pluviometrica. La precipitazione più intensa è stata registrata nella notte tra il 24/08/2018 ed il 25/08/2018 in corrispondenza della stazione di Lozio (*Figura 60*). Dai dati pluviometrici disponibili è stato possibile osservare un evento piovoso precedente, meno intenso, che aveva già portato a saturazione il terreno.

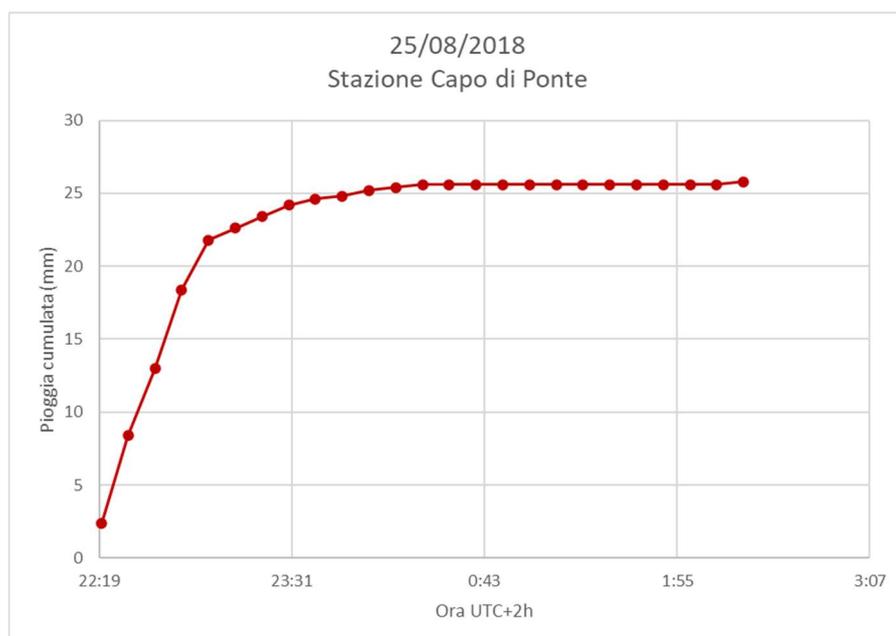


Figura 59. Dati pluviometrici della stazione di Capo di Ponte (ARPA Lombardia). In questo caso sono caduti 25.8 mm in 4 ore.

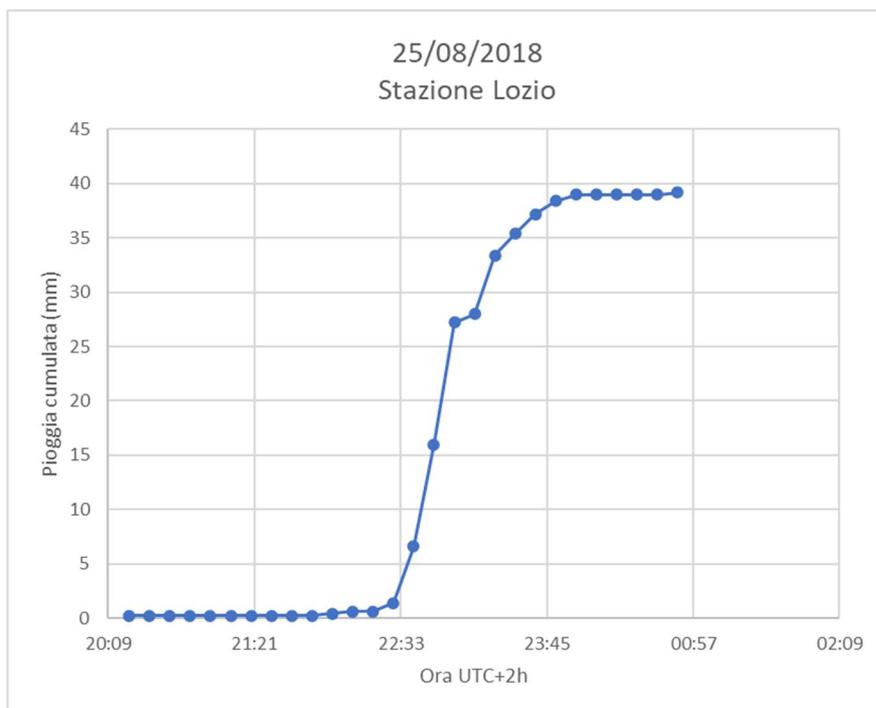


Figura 60. Dati pluviometrici della stazione di Lozio (*ARPA Lombardia*). La precipitazione registrata in questo sito è risultata la più intensa, con 39.2 mm caduti in 4 ore e 30 minuti.

In tal modo l'acqua ha generato rapidi deflussi superficiali lungo i canali secondari ed i versanti, accumulandosi in secondo luogo nell'asta principale, determinando il trasporto di ingenti quantità di detrito presente nella parte alta del bacino (*Albertelli, 2021*). Nella sola notte del 24/08/2018 sono caduti 39.2 mm di pioggia cumulata, che hanno determinato un primo evento detritico di grande energia, testimoniato dal materiale di grossa pezzatura sceso a valle. Il primo impulso è stato in gran parte trattenuto dalla prima briglia fenestrata a valle, il cui invaso al termine dell'evento risultava totalmente riempito. Nella fase di svaso sono stati recuperati grossi blocchi di dimensioni comprese tra 80 – 100 m³ per singolo blocco (*Albertelli, 2021*).

Evento del 6 agosto 2019

L'evento del 6 agosto 2019 è stato il secondo più intenso del torrente Blé dall'alluvione del 1960, e venne innescato dalle forti piogge cadute il 6 agosto, tra le ore 18 UTC+2h e le ore 19 UTC +2h. I dati pluviometrici di riferimento provengono dalle vicine stazioni di Capo di Ponte (collocata sul fondovalle a nord dell'area del torrente Blé) e di Lozio (collocata sull'abitato nel versante a sud dell'area del torrente Blé). Nonostante la poca distanza che intercorre tra questi abitati, circa 8 km in linea d'aria, si osserva immediatamente (**Figura 61 e 62**) come lo stesso evento abbia avuto intensità di pioggia oraria diversa. Questa grande variabilità spaziale coincide con il tipico comportamento di una cella temporalesca molto concentrata e poco estesa, che ha coinvolto proprio il bacino del torrente Blé (Albertelli, 2021).

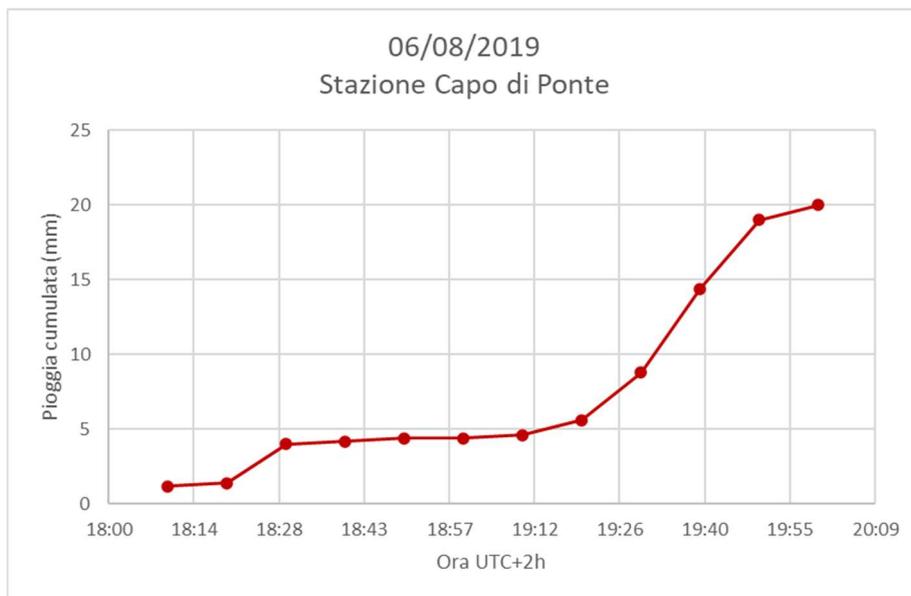


Figura 61. Dati pluviometrici della stazione di Capo di Ponte (ARPA Lombardia). In questo caso sono caduti 20 mm in 1 ora e 50 minuti.

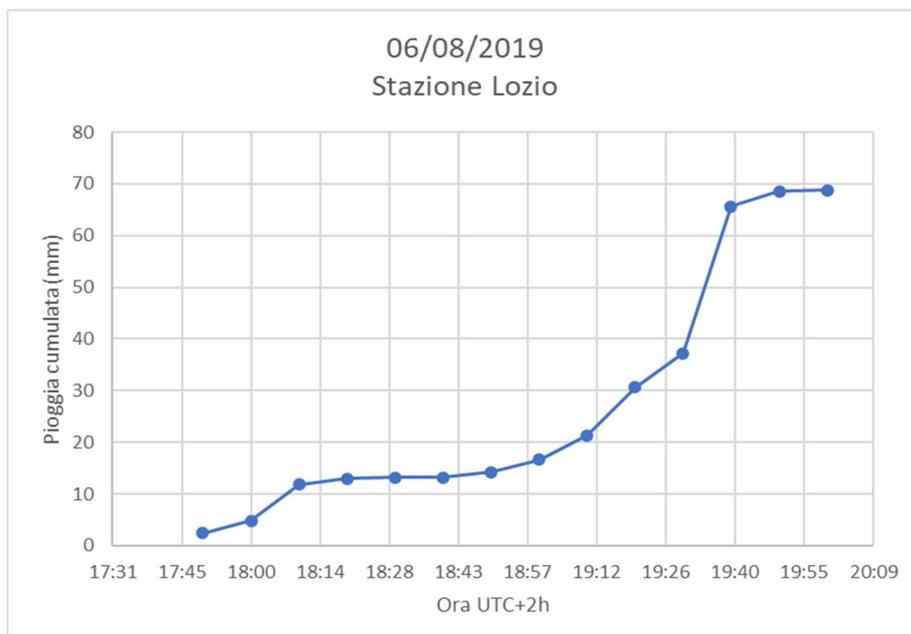


Figura 62. Dati pluviometrici della stazione di Lozio (ARPA Lombardia). La precipitazione registrata in questo sito è risultata la più intensa, con 68.8 mm caduti in 2 ore e 10 minuti.

Dal primo grafico (Capo di Ponte), in **Figura 61**, si osserva un moderato incremento di intensità raggiungendo i 20 mm/h, tra le ore 18 UTC+2h e le ore 20 UTC+2h. Nel secondo grafico (Lozio), nello stesso intervallo di tempo, si osserva un incremento di intensità più consistente, fino a 72 mm/h.

Prima dell'evento del 6 agosto 2019, un evento di colata detritica di 25'000 m³ aveva colmato completamente la briglia a monte, in data 27 luglio 2019 (**Figura 63**). Tale evento ha scalzato al piede il materiale alla base de “La Tavola”, che è scivolato in alveo accumulandosi, determinando la grande intensità del successivo evento del 6 agosto. La notevole energia del fenomeno ha sbrecciato la parte centrale della prima briglia, distruggendo anche quella più a valle, oltre al ponte della strada comunale per Cerveno, danneggiando la tubazione del metanodotto di Val Camonica. Il flusso ha raggiunto successivamente il fondovalle ostruendo temporaneamente il deflusso nel fiume Oglio. Il volume totale di tale evento è stato stimato intorno ai 50 – 80'000 m³ (*Albertelli, 2021*).



Figura 63. In alto una fotografia scattata della briglia “A” prima dell'evento del 2019. In basso la stessa a posteriore del debris-flow (*Albertelli., 2021*).

3.7. Eventi di debris-flow recenti

Durante il corso del presente studio, nel bacino del torrente Blé sono avvenuti due eventi di debris-flow: uno il 16 agosto 2021 ed uno il 22 ottobre 2022. Il primo è stato documentato in dettaglio, per il secondo invece, essendo avvenuto di recente, non si dispone di un quadro dettagliato, ma è possibile descriverne le caratteristiche principali. Di seguito sono stati brevemente descritti gli eventi innescanti. Nel *capitolo 5 e 6* questi due fenomeni verranno analizzati e confrontati con gli altri dati raccolti dal monitoraggio, sia per quanto riguarda la risposta del torrente che per il tremore sismico prodotto al loro passaggio.

Evento del 16 agosto 2021

In data 16 agosto 2021 è avvenuto l'evento più intenso fra quelli analizzati in questo lavoro di tesi.

Esso è il risultato di intense precipitazioni cadute nell'arco della giornata ed è stato perfettamente documentato dalla stazione di monitoraggio installata presso il torrente Blé qualche settimana prima (*Venturelli, 2021*). L'evento di precipitazione innescante è stato di estrema intensità, pari a 55.85 mm/h. È iniziato alle ore 17.50 UTC+2h (Coordinated Universal Time) ed ha registrato un picco di precipitazione alle ore 18.25 UTC+2h, aumentando di +12.6 mm rispetto al valore registrato nei 5 minuti precedenti. In **Tabella 5** sono riportati i valori di pioggia caduti ogni 5 minuti.

Tabella 5. Dati pluviometrici registrati dalla stazione il 16/08/2021 (*Venturelli, 2021*).

Data	Ora (UTC +2)	Pioggia (mm)
16/08/2021	17:40	0
16/08/2021	17:45	0
16/08/2021	17:50	0.2
16/08/2021	17:55	0.4
16/08/2021	18:00	0
16/08/2021	18:05	0.4
16/08/2021	18:10	3.2
16/08/2021	18:15	2.2
16/08/2021	18:20	2.8
16/08/2021	18:25	12.6
16/08/2021	18:30	11.8
16/08/2021	18:35	8.8
16/08/2021	18:40	8.8

Il fronte di colata si è arrestato in prossimità della briglia più a valle; il suo passaggio ha inciso profondamente il canale, erodendo le sponde, con conseguente innesco di una piccola frana che ha causato il collasso della stazione di monitoraggio (*Venturelli, 2021*).

L'evento meteorologico innescante è rappresentato da un fronte temporalesco che si è mosso in direzione NW-SE, colpendo la parte alta del bacino (**Figura 64**).

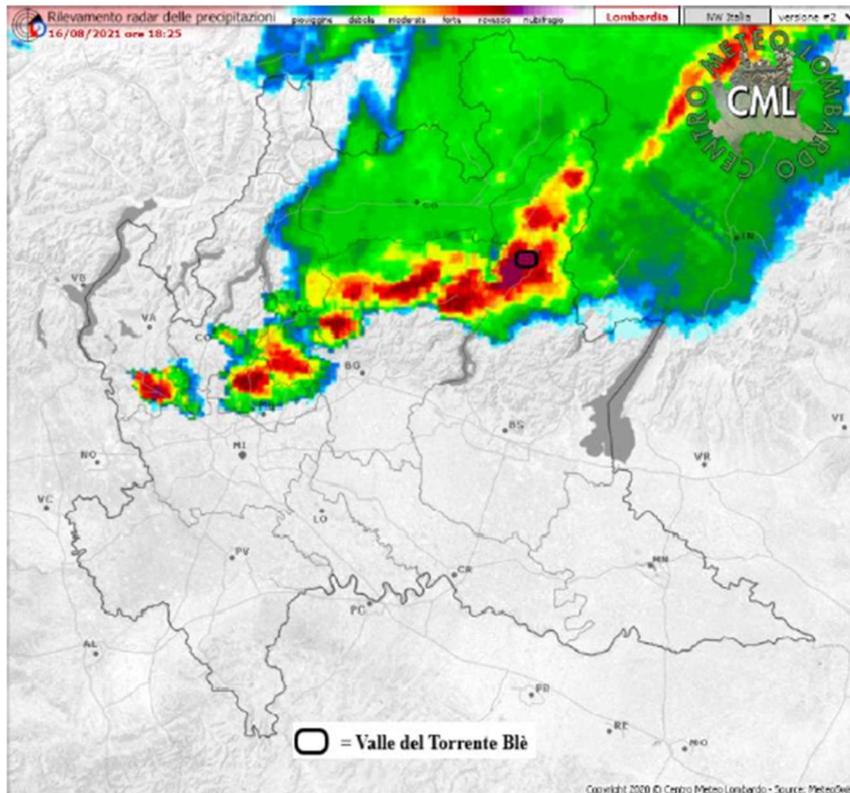


Figura 64. Rilevamento radar delle precipitazioni del Centro Meteo Lombardo del 16/08/2021 ore 18:25 (Venturelli, 2021)

Confrontando tali dati con quelli delle stazioni pluviometriche vicine è stato possibile osservare che il fenomeno temporalesco si è concentrato nel bacino del torrente Blé, con un'intensità massima di 124.8 mm/h (Venturelli, 2021).

Grazie ad un'analisi dettagliata dell'evento è stato possibile calcolare una stima della portata e del volume del debris-flow. I valori ottenuti risultano compresi nel range tra i 100 m³/s e 85 m³/s, con volume totale del debris flow che varia tra 56'100 m³ e 66'000 m³. Nella zona di deposito, inoltre, sono stati stimati 60'000 m³ di detrito, concorde ai valori di volume medio calcolati per l'evento. Durante la colata di detrito l'altezza del flusso massima è stata di 4 m ed il grande potere erosivo dell'evento ha approfondito il letto del torrente Blé di circa 3.5 m (Venturelli, 2021). Di seguito sono riportati alcuni fotogrammi dell'evento in questione (**Figura 65**).



Figura 65. Alcuni fotogrammi del video registrato dalla PiCamera durante l'evento del 16/08/2021 (*Venturelli, 2021*).

Evento del 22 ottobre 2022

Durante il secondo anno di monitoraggio è avvenuto un secondo evento di debris-flow, in data 22/10/2022, meno violento rispetto a quello precedentemente descritto.

Analizzando i dati pluviometrici ne è emerso che l'intensità di pioggia non è stata tipica per l'innescò di debris-flow. Si è trattato di una perturbazione prolungata, di 14.35 ore, in cui sono caduti in totale 83.4 mm di pioggia (**Figura 66**), per un'intensità media di 5.72 mm/h. Il momento più intenso è evidenziato in azzurro (**Tabella 6**) in cui l'intensità media ha raggiunto i 23 mm/h. Durante tale intervallo di tempo sono avvenute diverse oscillazioni di intensità il cui picco è rappresentato da 33.6 mm/h, avvenuto tra le 10:05 UTC e le 10:10 UTC.

Tabella 6. Dati pluviometrici dell'evento del 22/10/2022. In rosso sono riportati gli orari UTC e in nero il dato pluviometrico ogni 5 minuti. In blu sono evidenziati i dati del momento più intenso.

21-ott-22		22-ott-22									
21:25	0	00:00	0.4	02:35	0.4	05:10	0.8	07:45	0.6	10:20	1.4
21:30	0.2	00:05	0.4	02:40	0.2	05:15	0.8	07:50	0.8	10:25	1.4
21:35	0	00:10	0.2	02:45	0	05:20	0.8	07:55	0.4	10:30	2.4
21:40	0	00:15	0.4	02:50	0	05:25	0.6	08:00	1.6	10:35	2
21:45	0	00:20	0.2	02:55	0	05:30	0.2	08:05	1.6	10:40	1.4
21:50	0	00:25	0.2	03:00	0	05:35	0.2	08:10	0.6	10:45	1.8
21:55	0	00:30	0.2	03:05	0	05:40	0.2	08:15	0.4	10:50	1.4
22:00	0.2	00:35	0.2	03:10	0	05:45	0.2	08:20	1	10:55	1.8
22:05	0	00:40	0.4	03:15	0	05:50	0.4	08:25	0.2	11:00	1.2
22:10	0	00:45	0.4	03:20	0	05:55	0.2	08:30	0	11:05	2
22:15	0	00:50	0.4	03:25	0	06:00	0.4	08:35	0.2	11:10	1.4
22:20	0.4	00:55	0.2	03:30	0.2	06:05	0.4	08:40	0	11:15	1.2
22:25	0	01:00	0.2	03:35	1	06:10	1.4	08:45	0.4	11:20	1.8
22:30	0.4	01:05	0.2	03:40	0.2	06:15	0.6	08:50	0.4	11:25	0.8
22:35	0	01:10	0	03:45	0.2	06:20	0.4	08:55	0.4	11:30	0.4
22:40	0	01:15	0.2	03:50	0	06:25	0.2	09:00	0.2	11:35	0.6
22:45	0.4	01:20	0.6	03:55	0	06:30	0.4	09:05	1.6	11:40	1
22:50	0.2	01:25	0.2	04:00	0.2	06:35	0.8	09:10	0.8	11:45	0.4
22:55	0.2	01:30	0	04:05	0	06:40	0.6	09:15	0.2	11:50	0.4
23:00	0.4	01:35	0	04:10	0	06:45	0.6	09:20	1	11:55	0.2
23:05	0.4	01:40	0	04:15	0.4	06:50	0.6	09:25	0.6	12:00	0.2
23:10	0.2	01:45	0	04:20	0.2	06:55	0.8	09:30	0.2		
23:15	0.2	01:50	0.2	04:25	0.2	07:00	0.8	09:35	1		
23:20	0.2	01:55	0	04:30	0	07:05	0.6	09:40	0.8		
23:25	0.6	02:00	0.2	04:35	0	07:10	0.6	09:45	0.4		
23:30	0.4	02:05	0.4	04:40	0	07:15	1	09:50	0.8		
23:35	0.6	02:10	0	04:45	0	07:20	0.4	09:55	1		
23:40	0.2	02:15	0	04:50	0	07:25	0.2	10:00	1		
23:45	0.2	02:20	0.2	04:55	0	07:30	1.2	10:05	1.4		
23:50	0.2	02:25	0.2	05:00	0	07:35	0.8	10:10	2.8		
23:55	0.2	02:30	0	05:05	0.8	07:40	0.6	10:15	2		

Tra le 10:45 UTC+2h e le 11:35 UTC+2h (corrispondenti all'orario UTC evidenziato in verde in **Tabella 6**) è stato osservato il passaggio di due fronti di colata. Tale intervallo di tempo è precedente all'intensità massima di pioggia.

Al passaggio delle code di debris-flow si osserva il deposito di ingenti quantità di materiale, raggiungendo un'altezza di flusso di circa 4 m. Di seguito sono riportati alcuni frame dell'evento registrati dalla PiCamera installata sulla stazione di monitoraggio (**Figura 67**).

22/10/2022
STAZIONE UNIBO

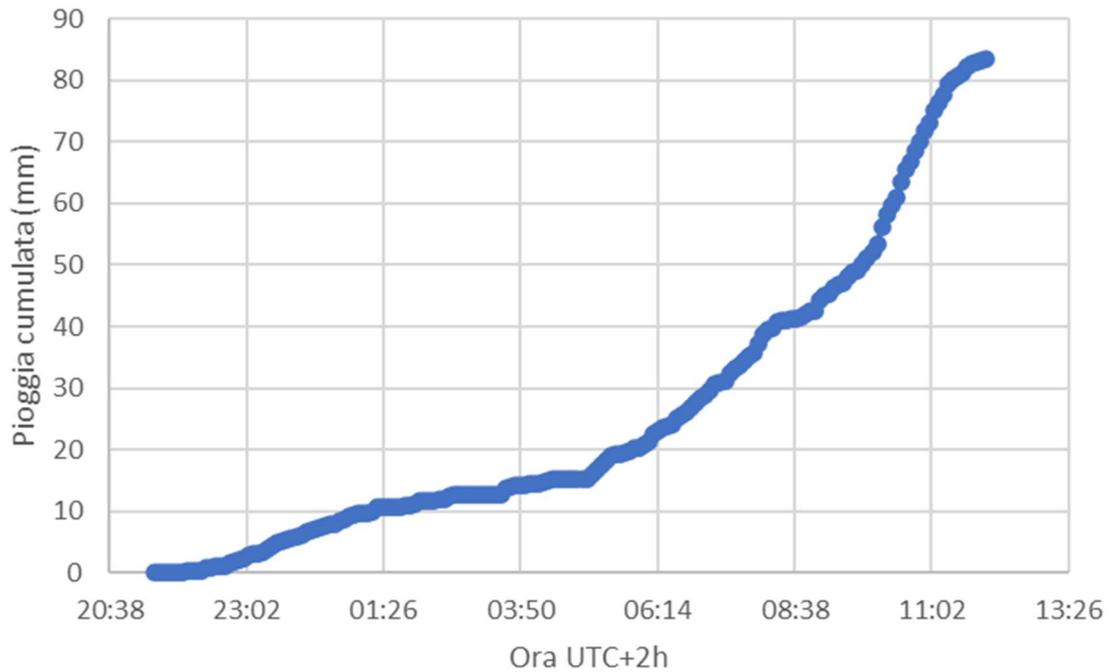


Figura 66. Il grafico mostra la pioggia cumulata dell'evento innescante il debris-flow del 22 ottobre 2022, per un totale di 83.4 mm. I valori di precipitazione sono stati presi dalla stazione di monitoraggio installata sul torrente Blè. È fondamentale osservare come la durata sia stata estrema rispetto agli altri fenomeni visti sino ad ora.

Il fenomeno è avvenuto recentemente, per cui non si conoscono nello specifico le dinamiche dell'innescò, ma si ipotizza non sia stato per erosione di fondo canale dalla parte alta del bacino, ma per mobilizzazione di uno sbarramento temporaneo posto di fronte alla frana della Tavola.



Figura 67. Frame dei video registrati dalla PiCamera in cui si osservano rispettivamente il passaggio del primo fronte e il successivo passaggio dell'ultima coda del debris-flow.

4. STAZIONE DI MONITORAGGIO

4.1. Scopo del monitoraggio

Lo scopo del monitoraggio effettuato nella valle del torrente Blé è quello di osservare la risposta idrologica del bacino a tutti gli eventi di pioggia, indipendentemente dall'innescò di una colata di detrito o meno. Pochi eventi generano debris-flow, ma tutte le perturbazioni sono importanti ai fini di stabilire il comportamento del torrente, in modo tale da definire delle soglie pluviometriche. La documentazione di tutti i parametri di "non debris-flow" può permettere di definire i limiti di innescò di tali fenomeni. Un buon sistema di monitoraggio permette infatti di aumentare le conoscenze al fine di migliorare i sistemi di allerta e mitigazione del rischio.

4.2. Strumentazione

Una delle stazioni di monitoraggio installate al torrente Blé, specificatamente la ST3/4 (*Figura 68*), è composta da:

- 3 geofoni a 4.5 Hz campionati con una frequenza di 200 Hz
- Pluviometro ARG100
- Datalogger Campbell CR200
- Pannello solare 50 Watt
- Batteria 12V 40Ah
- Data-Cube³ext
- Fotocamera Raspberry PI (risoluzione 3mpx)
- Sensore infrasuoni Electret-Microphone KEC (MAMODIS)
- Videocamera ad alta risoluzione



Figura 68. Stazione di monitoraggio montata al torrente Blé.

4.2.1. Geofoni

I tre geofoni utilizzati per lo studio sono stati disposti in linea: uno 30 m a valle della stazione, uno coincidente a quest'ultima ed uno 30 m a monte. Tale distribuzione è stata pensata per poter stimare la velocità di propagazione di un'eventuale colata. Tutti e tre i sensori rispondono alle sole oscillazioni verticali e registrano a frequenze di campionamento di 200 Hz. Inizialmente i sensori avevano frequenze proprie di 4.5 Hz, 1 Hz e 4.5 Hz, rispettivamente nei canali *pri0*, *pri1* e *pri2*. A seguito dell'evento di colata del 2021 il geofono all'altezza della stazione è stato sostituito utilizzandone un altro da 4.5 Hz. In tutte le installazioni gli strumenti sono stati interrati a debole profondità, per rendere stabile l'accoppiamento con il terreno.

Questo tipo di sensore (**Figura 69**) è utile sia in caso di evento che in condizioni di regime normale del torrente. Anche il solo ruscellamento in alveo, con il relativo trasporto solido, genera vibrazioni che vengono rilevate dal sistema. Quando le precipitazioni aumentano cresce conseguentemente il deflusso nel torrente e l'ampiezza del rumore. Questo comportamento permette di caratterizzare i processi in alveo in risposta ad eventi meteorici di diversa entità.



Figura 69. Foto di uno dei geofoni verticali utilizzati (Venturelli, 2021).

4.2.2. Pluviometro

Il pluviometro ARG100 (**Figura 70**) è stato installato all'estremità superiore del palo di ancoraggio della stazione di monitoraggio. Lo strumento è poi collegato al Datalogger Campbell CR200, per la raccolta e la lettura dei dati pluviometrici, ed alla telecamera HD, che viene attivata automaticamente quando la pioggia cumulata in 1 minuto supera i 0.4 mm, registrando un video di 2 ore. La soglia di intensità per l'attivazione del sistema è preimpostata dall'operatore in sede di installazione.

La misura del dato di pioggia prevede l'utilizzo di un meccanismo basculante, ove l'acqua piovana riempie uno dei due recipienti del sistema fino alla massima capacità; successivamente, la bilancia oscilla sul lato opposto, chiudendo il circuito e mandando un impulso al Datalogger per la registrazione del primo dato. Ogni oscillazione comporta una registrazione di 0.2 mm di pioggia. Le letture avvengono cumulando gli impulsi su 5 minuti.



Figura 70. Pluviometro ARG100 installato sulla stazione (Venturelli, 2021).

4.2.3. Datalogger

Il Datalogger Campbell CR200 (**Figura 71**) è direttamente collegato al pluviometro ARG100 ed è impiegato per acquisire e registrare il dato pluviometrico. Si possono collegare diversi tipi di sensori, in questo caso è collegato soltanto il pluviometro, per cui conta il numero di oscillazione della bilancia in un arco di 5 minuti e lo moltiplica per un valore di 0.2 mm, ottenendo il dato pluviometrico.



Figura 71. Datalogger installato sulla stazione di monitoraggio (Venturelli, 2021).

4.2.4. Pannello solare e batteria

La stazione è fornita di una batteria da 12V, 40Ah, che alimenta tutte le componenti elettriche, e da un pannello solare 50 Watt, che sfrutta l'energia solare delle ore diurne per ricaricare la batteria (**Figura 72**).



Figura 72. Batteria e pannello solare utilizzati per l'alimentazione del sistema (Venturelli, 2021).

4.2.5. Data-Cube

Il Data-Cube (**Figura 73**) è un logger di acquisizione e registrazione dei dati sismici misurati dai tre geofoni ai quali è collegato. Tale sistema presenta quattro ingressi: quello in alto a sinistra permette di acquisire i dati dai geofoni, la porta in basso a sinistra è collegata con un'antenna GPS esterna, tramite la quale è possibile ottenere il timing preciso della misura. L'ingresso in basso a destra permette l'alimentazione tramite batteria, infine, la porta in alto a destra è utilizzata per il download dei dati registrati e la verifica del corretto funzionamento del sistema. Durante il recupero dei dati l'ingresso della batteria viene temporaneamente disabilitato in quanto è il PC a fornire l'alimentazione necessaria.



Figura 73. DataCube utilizzato per analisi e raccolta dei dati (Venturelli, 2021).

4.2.6. Sistema PiCamera & MAMODIS

La fotocamera PiCamera, con risoluzione 3 megapixels (1024x768), è un modulo fotografico per la scheda madre Raspberry Pi0 (**Figura 74**). Quest'ultima funziona tramite il sistema operativo Linux, grazie al quale è possibile impostare la fotocamera in modalità normale e modalità allarme. In modalità normale la fotocamera acquisisce una foto ogni 15 minuti e la trasmette al sito MAMODIS, mentre in modalità allarme viene registrato un video a 20 frames/secondo, da cui vengono fatti degli screenshots ogni 5 minuti. Le foto ottenute vengono caricate in remoto, mentre il video viene salvato in locale.

L'ultima modalità è governata dai dati raccolti dal sensore ad infrasuoni, quando il rumore supera una certa soglia si attiva la registrazione video.

MAMODIS (Mass MOvement Detection and Identification System) è un sistema di monitoraggio specializzato nel rilevamento ed identificazione di movimenti di massa (Schimmel *et al.*, 2018). È un sistema a basso costo e di facile installazione, basato sulla combinazione di sensori ad infrasuoni e segnali sismici (**Figura 75**).



Figura 74. Fotocamera Raspberry collegata al sistema MAMODIS, raccoglie fotogrammi ogni 15 minuti.



Figura 75. Sistema di registrazione segnali a infrasuoni MAMODIS installato nella stazione.

Il sensore ad infrasuoni utilizzato nella stazione di monitoraggio è un Electret-Microphone KEC, con sensibilità -38 ± 3 dB e range di frequenza $\sim 20-20'000$ Hz.

Il sensore cattura le onde ad infrasuoni ed è direttamente collegato alla PiCamera per attivarne la registrazione del video, quando vengono superate le soglie di allarme. Queste sono divise in due livelli:

- **Livello 1**, limite associato al trasporto superficiale di sedimenti o piccole colate di detrito. Tale soglia è impostata su valori di ampiezza bassi, 15mPa, 1.0 μ m/s, che determinano la maggior parte dei falsi allarmi;
- **Livello 2**, limite associato ad una colata di detrito “matura”. Tale soglia è impostata su valori più alti di ampiezza, 30mPa, 2.0 μ m/s.

Quando una di queste due soglie viene superata, oltre all’attivazione della videocamera, viene inviato un SMS di allerta ai numeri registrati nel sistema.

5. ANALISI DEI DATI PLUVIOMETRICI

Ai fini del presente studio sono state svolte due diverse analisi per determinare la risposta idrologica del bacino. La prima fa riferimento ai valori di pioggia, la seconda (*vedi capitolo 6*) al rumore sismico prodotto nel torrente.

5.1. Scopo dell'analisi

La prima analisi è stata svolta sui dati pluviometrici raccolti dalla stazione di monitoraggio posizionata presso il torrente Blé.

Per questo lavoro sono state analizzate le risposte del torrente ad ogni evento di pioggia, tramite l'ausilio dei dati estratti dal pluviometro e dalle telecamere installate, al fine di:

1. Caratterizzare e classificare le risposte idrologiche del bacino;
2. Definire delle soglie pluviometriche;
3. Confrontare queste ultime con soglie preesistenti.

5.2. Metodologia

5.2.1. Estrazione degli eventi di pioggia

Partendo dal 2021 ad oggi, la stazione di monitoraggio ha acquisito dati pluviometrici in continuo (ad eccezione del breve periodo post evento del 16/08/2021, che ha fatto collassare la stazione nel canale). Tali valori, acquisiti ad intervalli di 5 minuti, sono stati recuperati e copiati in un foglio Excel assieme a data ed ora UTC (Coordinated Universal Time). Ai fini della presente analisi si rendeva necessario individuare dei singoli eventi di pioggia che avessero inizio e fine con date ed orari ben stabiliti. Sarebbe stato possibile effettuare tale lavoro manualmente, ma vista la lunghezza e la difficoltà si è preferito un metodo alternativo. Quest'ultimo è rappresentato da uno script MATLAB tramite il quale è stato possibile analizzare i fogli di calcolo contenenti i dati pluviometrici, grazie ad un criterio impostato nel codice stesso. In tal modo viene considerato un "unico evento di pioggia" quando vengono rilevati più di 0.2 mm caduti in 2 ore (tale condizione è mostrata in **Figura 76**).

```
clear
clc

% Inputfile1='TBLE_2021Part1.xlsx';
% Inputfile1='TBLE_2021Part2.xlsx';
% Inputfile1='TBLE_2022Part1.xlsx';
Inputfile1='25_08_18.xlsx';

% Criterio di separazione degli eventi di pioggia
D=2/24; % days
PD=0.2; % mm
tend=2;

Outputfile='res.xlsx';
%delete(Outputfile);
```

Importa file Excel con dati pluviometrici della stazione

Imposta il criterio per riconoscere i singoli eventi di pioggia

Restituisce gli eventi selezionati in un unico file Excel

Figura 76. Parti caratterizzanti del codice MATLAB utilizzato per estrapolare i singoli eventi di pioggia.

Si importa il file Excel nel codice, questo viene letto e laddove i valori rispettano il criterio vengono accorpati a formare eventi unitari. Di questi vengono estrapolate pioggia cumulata, durata, intensità, pioggia nelle 12h, 24h e 48h prima. Ogni evento è discretizzato con la data, l'ora di inizio e di fine del fenomeno.

Al termine dell'esecuzione del codice vengono restituiti in output tre prodotti: un grafico bi-logaritmico intensità/durata dei vari eventi, un grafico della pioggia cumulata nel tempo con evidenziati i vari eventi (**Figura 77**) ed una tabella Excel in cui vengono inserite tutte le specifiche di ogni evento estrapolato dal codice (**Tabella 7**).

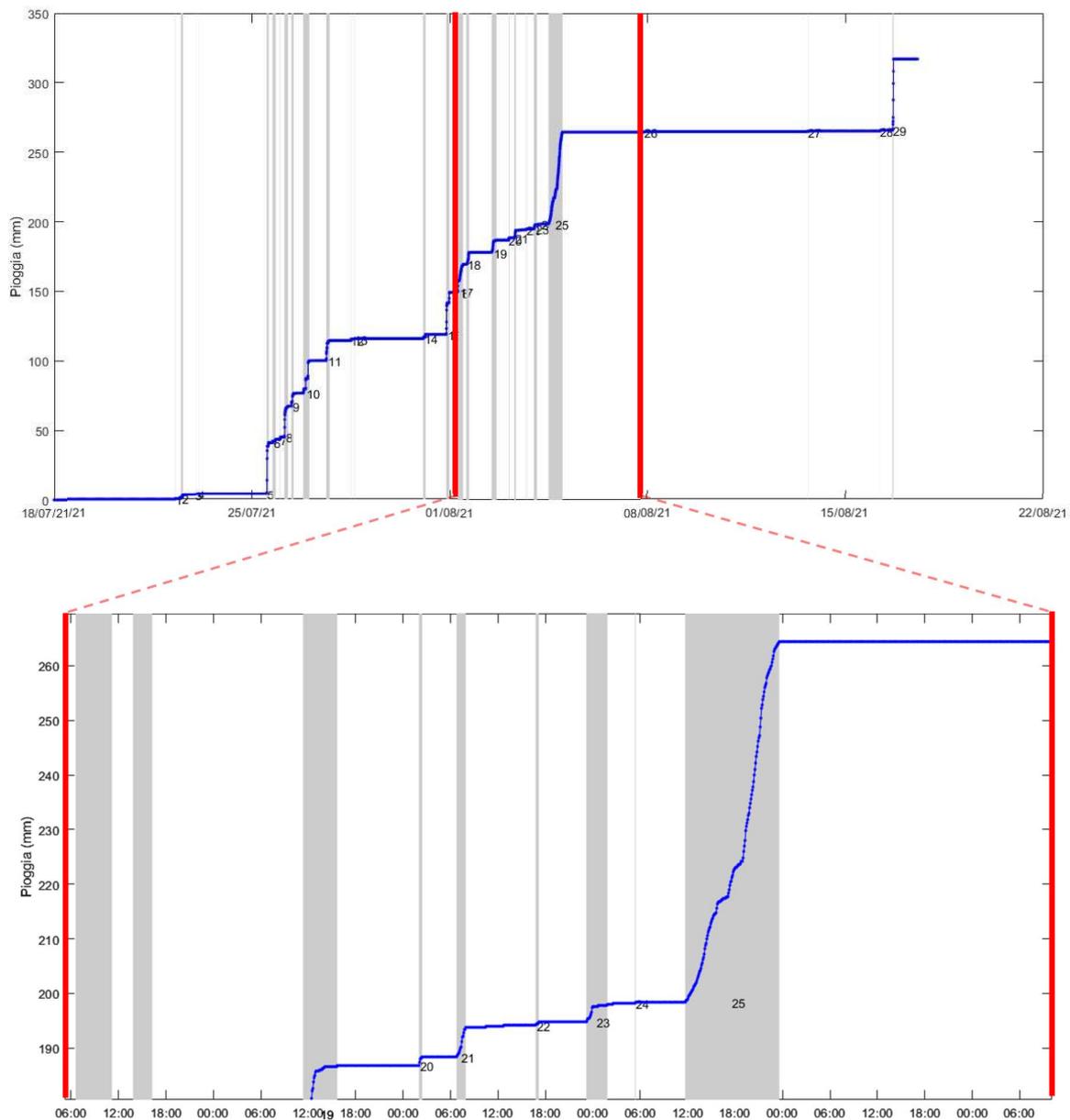


Figura 77. Esempio di curva cumulata di pioggia estrapolata dallo script. Le bande grigie evidenziano quelli che vengono accorpati come unici eventi.

Tabella 7. Esempio di tabella Excel restituita in output dal codice MATLAB.

ID = numero evento; t0s = data e ora UTC di inizio; t1s = data e ora UTC di fine; P = pioggia cumulata in mm; D = durata dell'evento in ore; I = intensità dell'evento in mm/ora; P12 = pioggia caduta nelle 12h precedenti in mm; P24 = pioggia caduta nelle 24h precedenti in mm; P36 = pioggia caduta nelle 36h precedenti in mm; P48 = pioggia caduta nelle 48h precedenti in mm.

ID	t0s	t1s	P(mm)	D(hours)	I(mm/hou)	P12(mm)	P24(mm)	P36(mm)	P48(mm)
1	22/07/2021 06:55	22/07/2021 07:05	0.40	0.17	2.40	0.00	0.00	0.00	0.00
2	22/07/2021 11:35	22/07/2021 13:25	3.20	1.83	1.75	0.40	0.40	0.40	0.40
3	23/07/2021 00:05	23/07/2021 00:10	0.40	0.08	4.80	2.80	3.60	3.60	3.60
4	23/07/2021 02:15	23/07/2021 02:20	0.20	0.08	2.40	0.40	4.00	4.00	4.00
5	25/07/2021 12:25	25/07/2021 14:10	37.00	1.75	21.14	0.00	0.00	0.00	0.00
6	25/07/2021 17:25	25/07/2021 20:05	2.40	2.67	0.90	37.00	37.00	37.00	37.00
7	25/07/2021 23:50	26/07/2021 00:15	1.60	0.42	3.84	39.40	39.40	39.40	39.40
8	26/07/2021 03:30	26/07/2021 06:30	22.20	3.00	7.40	4.00	41.00	41.00	41.00
9	26/07/2021 09:20	26/07/2021 11:15	9.20	1.92	4.80	23.80	63.20	63.20	63.20
10	26/07/2021 19:25	27/07/2021 00:40	23.20	5.25	4.42	9.40	34.40	72.60	72.60
11	27/07/2021 15:00	27/07/2021 17:55	14.40	2.92	4.94	0.00	23.40	55.00	59.00
12	28/07/2021 11:55	28/07/2021 12:05	1.00	0.17	6.00	0.00	14.40	15.20	38.00
13	28/07/2021 14:50	28/07/2021 15:05	0.40	0.25	1.60	1.00	15.40	15.40	38.80
14	31/07/2021 01:15	31/07/2021 03:15	3.00	2.00	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
15	31/07/2021 20:50	31/07/2021 23:35	30.20	2.75	10.98	0.00	3.00	3.00	3.00

5.2.2. Osservazione delle immagini

Nella successiva fase d'indagine, per ogni evento catalogato in tabella, sono state analizzate le immagini disponibili al fine di documentare la risposta del bacino alle precipitazioni. Le foto sono state estratte dal sistema di monitoraggio ad infrasuoni MAMODIS. Per ogni evento sono stati presi frames che riguardano il momento stesso dell'evento, un'ora prima ed un'ora dopo. La maggior limitazione in tale analisi è stata l'impossibilità di caratterizzare i fenomeni avvenuti di notte, a causa della mancanza di luce. Le immagini del sistema MAMODIS sono tarate sull'orario UTC+2h per l'ora legale ed UTC+1h per quella solare, a differenza del pluviometro che è tarato su UTC.

Sono stati tenuti in considerazione solamente gli eventi per cui erano presenti foto di MAMODIS visibili, per cui è stata redatta una descrizione di dettaglio della risposta del torrente per ogni precipitazione.

A seconda delle variazioni di portata, torbidità ed erosione sono state identificate le seguenti categorie:

-  Non Classificabile → in caso di immagini assenti o riprese notturne;
-  Nessuna Risposta → l'evento non ha dato variazioni in alveo;
-  Aumento di Portata → il canale presenta aumento di tirante;
-  Aumento di Portata e Intorbidimento → oltre al tirante aumenta la torbidità;
-  Aumento di Portata con Intorbidimento ed Erosione → si modifica il percorso;
-  Aumento di Portata con Intorbidimento ed Erosione intensa
-  Debris-flow

Di seguito sono riportate alcune foto riferite a ciascuna delle sei classi, esclusa la “non Classificabile”.

Nessuna Risposta

Evento 12 del 28/07/2021, inizia alle 11:55 UTC e finisce alle 12:05 UTC (*Figura 78*).



Figura 78. Frame di MAMODIS corrispondente all'evento n° 12 del 2021. L'orario dell'immagine è riferito a UTC+2h. In basso sono riportate precipitazione cumulata, durata ed intensità dell'evento. Non si evince nessun cambiamento.

Aumento di Portata

Si riscontra il solo aumento di tirante in alveo e di conseguenza la portata del flusso.

Evento 21 del 03/08/2021, inizia alle 06:45 UTC e finisce alle 07:55 UTC (*Figura 79*).



Figura 79. Frame di MAMODIS corrispondente all'evento n°21 del 2021. L'orario dell'immagine è riferito a UTC+2h. In basso sono riportate precipitazione cumulata, durata ed intensità dell'evento. Rispetto all'evento precedente si vede che il regime è leggermente più alto.

Aumento di Portata e Intorbidimento

La classe è distinta per un ulteriore aumento di energia del flusso che comporta anche trasporto di particelle fini, tali da intorbidire l'acqua.

Evento 31 del 26/09/2021, inizia alle 14:45 UTC e finisce alle 17:55 UTC (**Figura 80**).

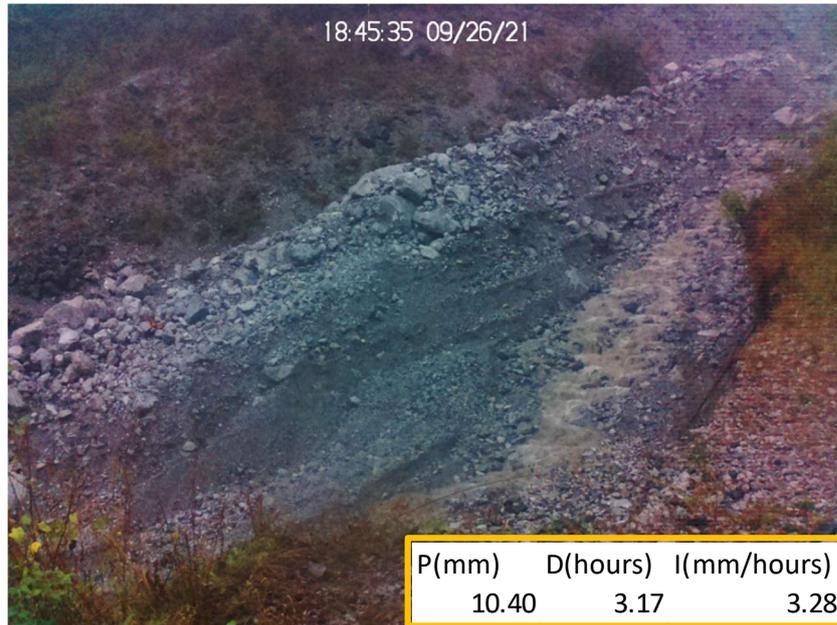


Figura 80. Frame di MAMODIS corrispondente all'evento n°31 del 2021. L'orario dell'immagine è riferito a UTC+2h. In basso sono riportate precipitazione cumulata, durata ed intensità dell'evento. In questo caso si nota come il torrente sia ingrossato rispetto al regime normale e come l'acqua sia più scura.

Aumento di Portata con Intorbidimento ed Erosione

La presente classe si diversifica dalla precedente per l'aumento del flusso nel canale, che diventa tale da erodere l'alveo e modificarne il suo percorso

Evento 82 del 09/09/2022, inizia alle 05:30 UTC e finisce alle 08:00 UTC (**Figura 81**).



Figura 81. Frame di MAMODIS corrispondente all'evento n°82 del 2022. L'orario dell'immagine è riferito a UTC+2h. In basso sono riportate precipitazione cumulata, durata ed intensità dell'evento. Il regime è ingrossato rispetto a quello normale e l'acqua è più scura, inoltre, ha eroso le sponde facendosi spazio.

Aumento di Portata con Intorbidimento ed Erosione intensa

Questa classe si distingue dalla precedente per l'aumento ulteriore dell'energia del flusso, che comporta trasporto di detrito più grossolano.

Evento 25 del 04/08/2021, inizia alle 11:40 UTC e finisce alle 23:35 UTC (*Figura 82*).



Figura 82. Frame di MAMODIS corrispondente all'evento n°25 del 2021. L'orario dell'immagine è riferito a UTC+2h. In basso sono riportate precipitazione cumulata, durata ed intensità dell'evento. Durante le riprese si notano alcuni massi che si spostano dalla loro sede originale, ad indicare l'elevata energia dell'evento.

Debris-flow

Evento 29 del 16/08/2021, inizia alle 15:45 UTC e finisce alle 16:40 UTC (*Figura 83*).



Figura 83. Frame di MAMODIS corrispondente all'evento n°29 del 2021. L'orario dell'immagine è riferito a UTC+2h. In basso sono riportate precipitazione cumulata, durata ed intensità dell'evento. In questo frame poco chiaro si vede la potenza del flusso e la sua velocità, che ne determina il grande potere erosivo.

Durante questa fase di analisi è stato utile inserire anche gli eventi passati del 6 agosto 2018 e del 25 agosto 2019, i cui dati provengono dalle stazioni di Capo di Ponte e Lozio, paesi limitrofi al bacino del T. Blé, al fine di confrontarli con i dati raccolti dalla stazione installata sulla sponda del torrente.

5.2.3. Definizione delle soglie

Per ogni anno e classe sono stati inseriti i valori di “intensità” e “durata” degli eventi di pioggia in un grafico bi-logaritmico a dispersione. Ogni serie di dati inserita corrisponde ad una diversa categoria di risposta, ai cui punti sono stati assegnati i colori delle classi viste nel paragrafo precedente.

I set di valori per ogni classe si dispongono in modo tale da tracciare le soglie che dividono una categoria dall’altra. Si è deciso, in un primo momento, di tracciare una soglia di “pre-allerta”, scelta appositamente per separare gli eventi classificati come “Aumento di Portata con Intorbidimento ed Erosione” da quelli che provocano un’erosione più intensa, con trasporto di materiale di grossa pezzatura, classificati come “Aumento di Portata con Intorbidimento ed Erosione intensa”. L’equazione che rappresenta tale soglia è stata ricavata a tentativi, partendo dall’equazione della Soglia Ceriani, modificando di volta in volta pendenza ed intercetta in modo da ottenere una soglia abbastanza rappresentativa.

Allo stesso modo, avendo assistito a due colate di detrito nel corso del monitoraggio, è stato possibile definire una “soglia di debris-flow”, che è stata ottenuta con la metodologia descritta sopra.

5.2.4. Confronto con le soglie preesistenti

Le soglie redatte grazie ai dati disponibili sono state messe a confronto con quelle preesistenti, descritte nel *paragrafo 2.4.2*. Si tratta della “Soglia Ceriani”, che dal 24 marzo 2005 viene utilizzata in tutta la Regione Lombardia come soglia di innesco di riferimento, e la “Soglia IRPI”, ideata dal CNR di Torino sulla sola provincia di Brescia, che prende come base di partenza lo studio di *Ceriani, (1994)*. Quest’ultima è stata costruita sui dati di intensità normalizzata rispetto al valore di PMA (Pioggia Media Annuale), che considera valori diversi a seconda dell’ubicazione geografica del sito in esame, compreso nella provincia di Brescia. È importante ricordare che la Soglia IRPI è più cautelativa rispetto a quella utilizzata dalla Regione Lombardia. Le soglie sono state inserite nei grafici a dispersione, per valutare se le risposte del torrente Blé fossero coerenti o meno con tali limiti. Entrambe riportate dal lavoro di IRER (*Rappelli, 2008*), sono state utilizzate nella forma non-normalizzata, in modo da poterle confrontare.

$$I = D^{-0.55} \cdot 20.0 \qquad \qquad \qquad \textit{Soglia Ceriani}$$

$$I = D^{-0.36} \cdot 4.70 \qquad \qquad \textit{Soglia IRPI non normalizzata per } D \leq 10h \textit{ sulla provincia di BS}$$

$$I = D^{-0.22} \cdot 3.40 \qquad \qquad \textit{Soglia IRPI non normalizzata per } D > 10h \textit{ sulla provincia di BS}$$

5.3. Risultati

I metodi precedentemente descritti hanno permesso di isolare 170 eventi, ricavati a partire dal 22 luglio 2021 fino al 4 novembre 2022. Il periodo invernale-primaverile (da dicembre a maggio) tendenzialmente è privo di eventi significativi, per tale motivo viene disconnessa la stazione di monitoraggio. Questo permette anche di preservare la strumentazione, scongiurando possibili danni dovuti alle basse temperature. Inoltre, mancano i dati posteriori al 16 agosto 2021 a causa del collasso della stazione nel canale. Il successivo ripristino e messa in opera risalgono al 26 settembre 2021.

Grazie all'analisi delle foto di MAMODIS è stato possibile discretizzare 83 eventi "Non Classificabili", 43 con "Nessuna Risposta", 14 hanno dato "Aumento di Portata", altri 14 "Aumento di Portata ed Intorbidimento", 13 fenomeni di "Aumento di Portata con Intorbidimento ed Erosione", 1 "Aumento di Portata con Intorbidimento ed Erosione intensa" e 2 "Debris-flow".

Questi dati sono stati inseriti nel grafico a dispersione, prima solo per i singoli anni, poi insieme. Infine, sono stati aggiunti gli eventi passati e le soglie, sia da letteratura che quelle definite nel presente studio.

5.3.1 Eventi di pioggia nel 2021

Osservando il grafico in **Figura 84** si nota come, in linea generale, gli eventi siano ben distribuiti secondo la classificazione: gli eventi che non hanno fornito risposta (punti verdi) si trovano tutti ad intensità e durate piuttosto basse, i fenomeni che hanno dato aumento di portata (punti gialli) ed aumento di portata con erosione (punti arancio chiaro) si trovano ad intensità e durate modeste, infine, avvicinandosi alla Soglia Ceriani si riscontrano eventi rappresentati da intensità e durate piuttosto alte (punti arancio scuro). È possibile affermare che, partendo dall'origine del grafico, avvicinandosi alla Soglia Ceriani vi è un aumento della risposta del torrente, direttamente proporzionale con l'entità degli eventi di pioggia, a meno di qualche outliers.

Al superamento della Soglia Ceriani si riscontrano, durante il corso del 2021, due soli eventi degni di nota, uno intenso che non ha dato colata, avvenuto il 04/08/2021 ed uno risalente al 16/08/2021, che ha generato un debris-flow piuttosto significativo. Quest'ultimo è discretizzato in figura attraverso un puntino nero, al di sopra della soglia di innesco.

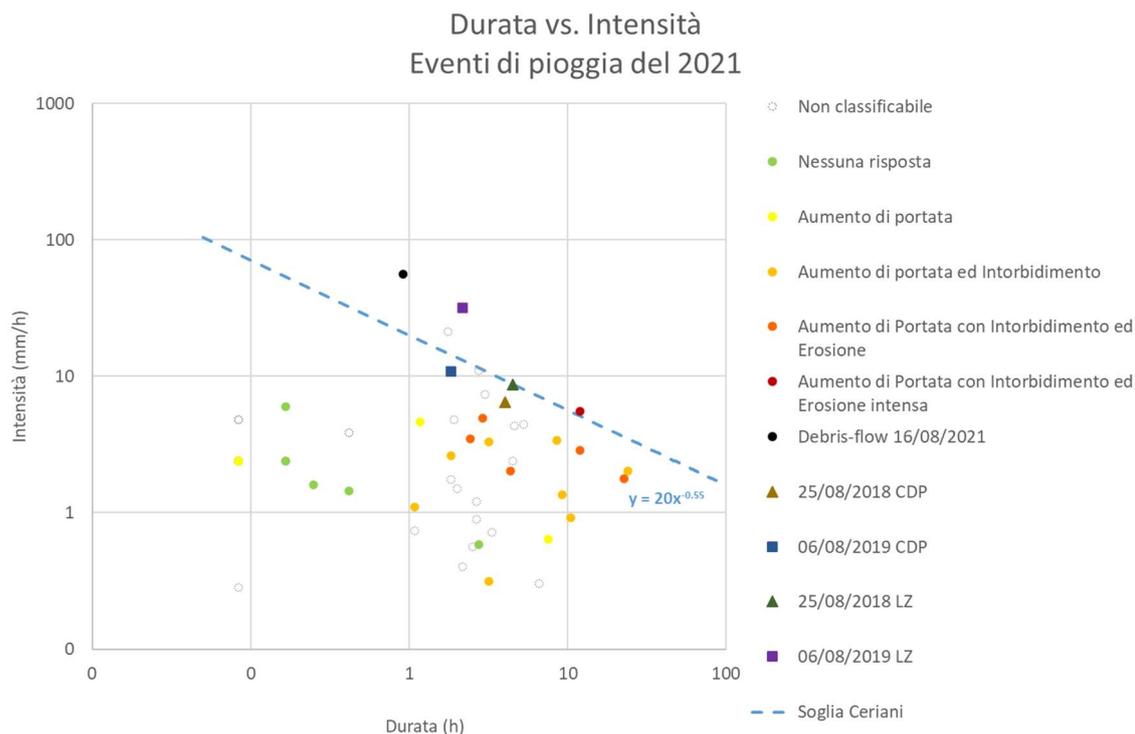


Figura 84. Grafico a dispersione con i dati discretizzati nelle varie classi, riferiti all'anno 2021. A destra è presente la legenda. È stata inserita la soglia di innesco dei debris-flow studiata da Ceriani, insieme alla relativa equazione. I punti triangolari e quadrati rappresentano gli eventi significativi avvenuti prima dell'istallazione della stazione di monitoraggio. CDP = stazione di Capo di Ponte; LZ = stazione di Lozio.

Gli eventi di colata del 2018 e del 2019, i cui dati provengono dalle stazioni meteorologiche di Lozio e di Capo di Ponte, rimangono sotto la Soglia Ceriani, escluso l'evento del 06/08/2019, con dati provenienti dalla stazione di Lozio, che ricade al di sopra della linea. Sono presenti, inoltre, diversi eventi che si discostano dalla tendenza generale, in particolare, il punto giallo all'estrema sinistra (evento n°24) ed il punto arancione che, nonostante l'aumento di tirante ed intorbidimento, si trova nella parte bassa del grafico (evento n°49).

5.3.2 Eventi di pioggia nel 2022

Dal grafico in **Figura 85** è stato possibile constatare, come per il 2021, che partendo dalla base e proseguendo verso la Soglia Ceriani vi è un aumento della risposta del torrente, direttamente proporzionale all'entità degli eventi di pioggia. Si evince che eventi di modesta intensità e breve durata oppure scarsa intensità e lunga durata non producono risposta in alveo (pallini verdi). Fra questi, troviamo dei pallini gialli che indicano aumento di portata, nonostante i valori di intensità e durata siano bassi, in particolare gli eventi n° 11, 46 e 62. Un solo pallino arancione si discosta leggermente dall'andamento, l'evento n° 22, che nonostante i relativi valori ha fornito aumento di portata ed intorbidimento. Durante il corso del 2022 è avvenuto un solo evento di debris-flow, indicato in figura attraverso il puntino nero che giace al di sopra della Soglia Ceriani, che lo isola bene dai restanti fenomeni. Anche in questo caso sono stati confrontati i dati di monitoraggio con quelli degli eventi passati ricavati dalle stazioni di Lozio e Capo di Ponte.

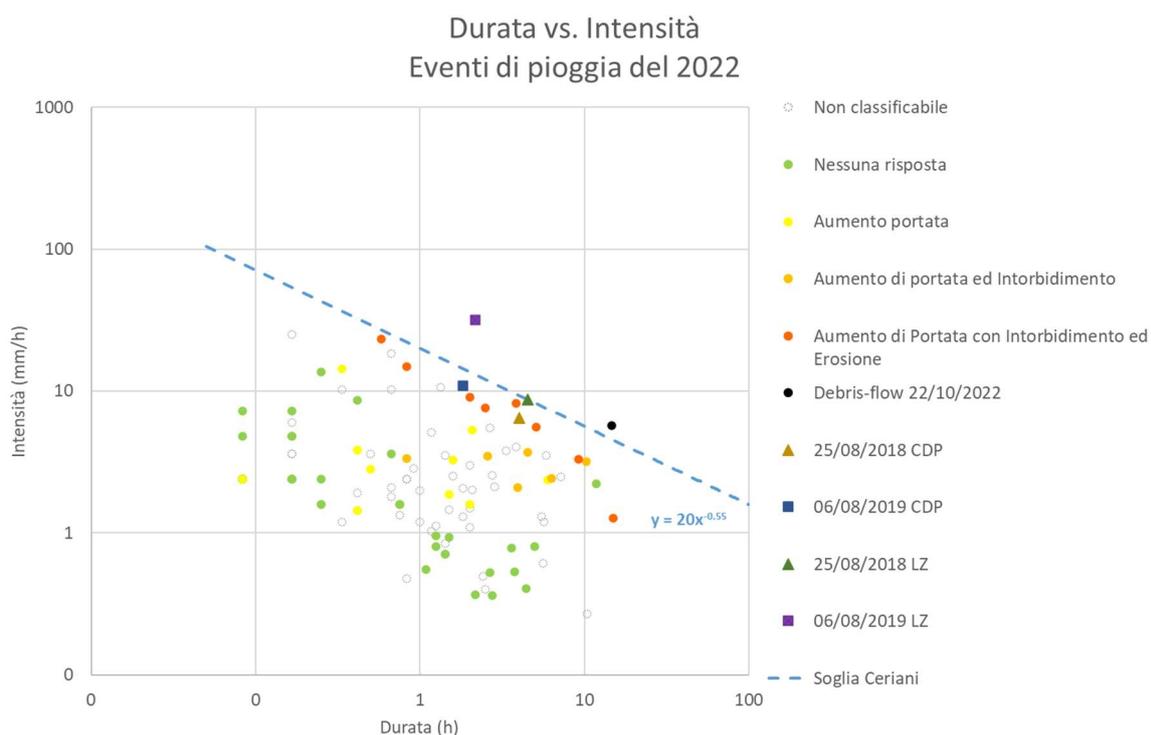


Figura 85. Grafico a dispersione con i dati discretizzati nelle varie classi riferiti all'anno 2022. A destra è presente la legenda. È stata inserita la soglia di innesco dei debris-flow studiata da Ceriani, insieme alla relativa equazione. I punti triangolari e quadrati rappresentano gli eventi significativi avvenuti prima dell'istallazione della stazione di monitoraggio. CDP = stazione di Capo di Ponte; LZ = stazione di Lozio.

5.3.3 Grafico cumulativo degli eventi degli anni 2021-2022

In un secondo momento sono stati uniti i dati del 2021 e del 2022, con l'aggiunta degli eventi di debris-flow passati, della Soglia Ceriani e della Soglia IRPI-CNR non normalizzata.

Il risultato ottenuto in **Figura 86** mostra la tendenza generale descritta anche nei grafici precedenti, in **Figure 84 e 85**, ossia l'aumento della risposta del torrente alle crescenti intensità e durata dei fenomeni piovosi innescanti.

Nel presente grafico si nota come la Soglia IRPI-CNR, ideata anche per altri fenomeni franosi, tenda ad essere più cautelativa rispetto alla Soglia Ceriani.

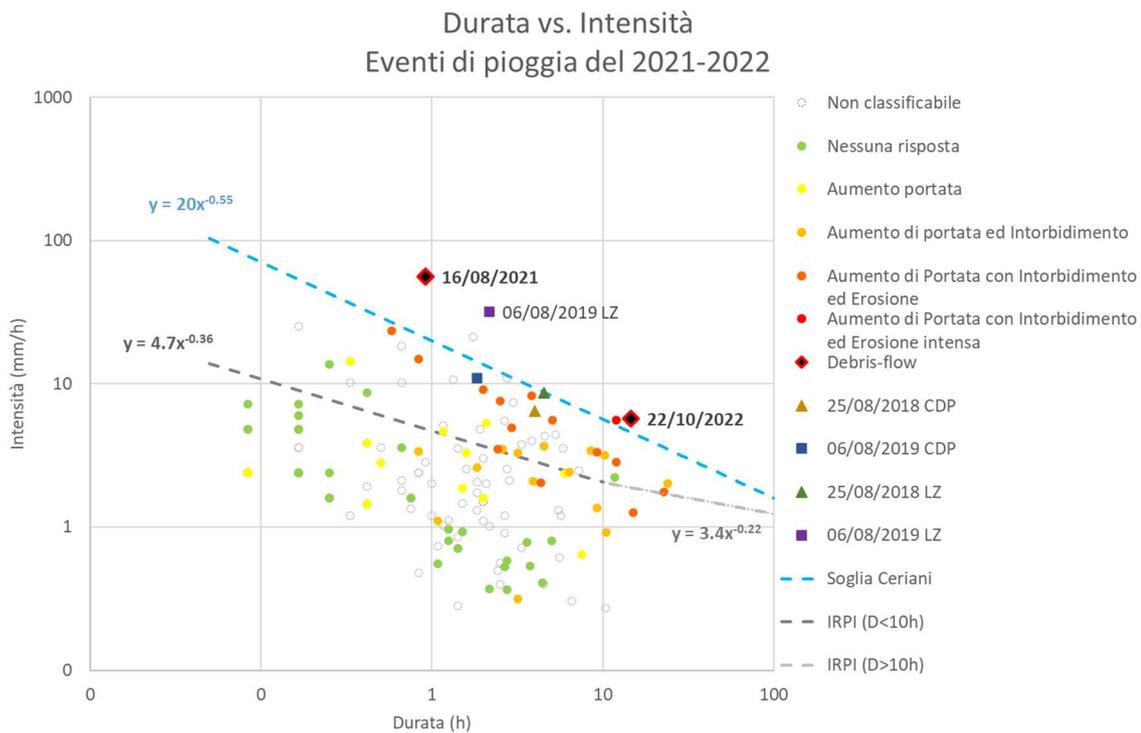


Figura 86. Grafico cumulativo degli anni 2021-2022. Contiene anche gli eventi passati, le soglie Ceriani e IRPI non-normalizzate, con le rispettive equazioni. A destra è rappresentata la legenda. CDP = stazione di Capo di Ponte; LZ = stazione di Lozio.

5.3.4. Aggiunta delle soglie sperimentali

Sulla base di queste analisi è stato possibile definire delle soglie pluviometriche che separano le diverse risposte del torrente. In particolare, sono state definite una soglia di “pre-allerta”, che separa gli eventi che forniscono aumento di portata, intorbidimento ed erosione da quelli che danno erosione più intensa, senza evolvere in debris-flow. Tale soglia presenta equazione:

$$I = D^{-0.54} \cdot 17.0$$

La seconda soglia sperimentale è definita di “innesco di debris-flow”, che separa gli eventi con aumento di portata, intorbidimento ed erosione intensa dalle colate di detrito. Essa si presenta con la seguente equazione:

$$I = D^{-0.8} \cdot 43.0$$

D = durata fittizia decisa dall’operatore per tracciare la soglia;
I = intensità restituita.

Tali soglie, insieme ai dati degli eventi di debris-flow passati e alla Soglia Ceriani, sono state inserite in un ultimo grafico (**Figura 87**), i cui risultati sono stati commentati nel *paragrafo 5.4*.

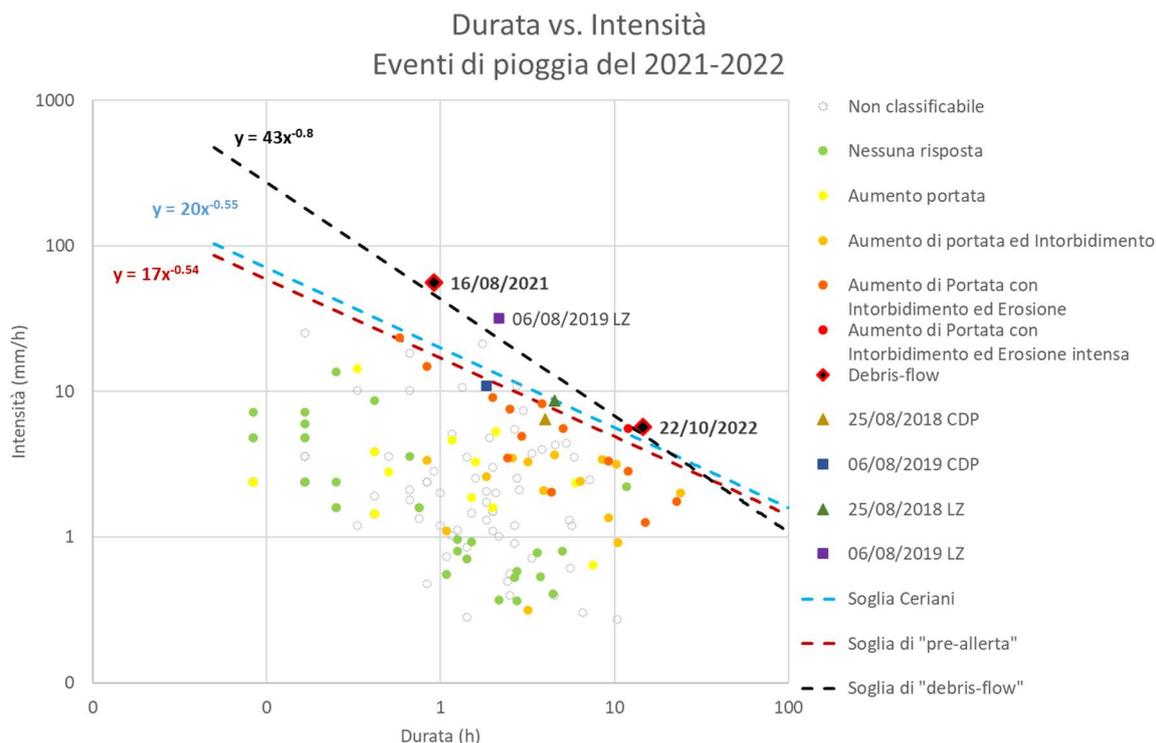


Figura 87. Grafico cumulativo degli anni 2021-2022. Contiene anche gli eventi passati e la soglia Ceriani con la rispettiva equazione. A destra è rappresentata la legenda. CDP = stazione di Capo di Ponte; LZ = stazione di Lozio. Vengono aggiunte le soglie di “pre-allerta” (in rosso) e di “debris-flow” (in nero) definite dal seguente studio. Entrambe sono state riportate con le rispettive equazioni.

Nella parte sottostante la prima soglia, colorata in rosso nel grafico, si trovano gli eventi che hanno dato aumento di portata senza ingente trasporto di materiale a valle. Al di sopra si riscontrano eventi più intensi, che non hanno dato debris-flow ma solo un elevato aumento del trasporto solido. La soglia di “pre-allerta” è sormontata dalla Soglia Ceriani, che definisce bene il limite oltre il quale si hanno colate. Entrambe, comprendono anche eventi intensi che non hanno provocato debris-flow, come nel caso del pallino rosso. Per questo motivo si è reso necessario costruire un’ulteriore soglia di “innesco di debris-flow” che isolasse nel miglior modo possibile le sole colate di detrito. Questa viene rappresentata con la linea nera, al di sopra della quale si trovano i tre eventi di debris-flow, due avvenuti durante il monitoraggio, uno del 06/08/2019 i cui dati provengono dalla stazione di Lozio. Entrambe le soglie sono state definite modificando la pendenza e l’intercetta contenute nell’equazione della Soglia Ceriani, in modo da adattare al meglio le funzioni con i punti di interesse.

5.4. Discussione

Dati riferiti all’anno 2021

Durante il 2021 è possibile osservare che è avvenuto un solo debris-flow, rappresentato nel grafico in **Figura 84** con il punto nero a sinistra, avvenuto il 16 agosto 2021. Come si può osservare in **Tabella 11** tale evento risulta essere il più intenso fra i debris-flow passati e quelli avvenuti durante il monitoraggio. La precipitazione innescante ha raggiunto i 55.85 mm/h, determinando una colata detritica di enorme potenza.

È possibile osservare anche un altro evento di notevole entità (punto rosso), contenuto nel grafico come “Aumento di Portata con Intorbidimento ed Erosione intensa”, avvenuto il 4

agosto 2021, che non ha comportato debris flow a causa della sua elevata durata ma modesta intensità, insufficiente a scatenare un fenomeno importante.

Durante l'analisi sono stati osservati degli outliers che, nonostante la loro scarsa intensità e durata, hanno provocato risposte considerevoli. Tale comportamento è molto probabilmente dovuto alla pioggia caduta nelle ore precedenti, che ha portato a saturazione il sedimento. Per esempio, come riportato in **Tabella 8**, l'evento n°24 mostra che nelle 48 ore precedenti sono caduti 20.20 mm di pioggia.

Tabella 8. Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli eventi n° 24 e n°49, che in *Figura 84* rappresentano degli outliers. La colorazione esprime le classi di risposta del torrente. Vengono riportate le piogge cumulate nelle 12, 24, 36 e 48h precedenti.

ID evento	P(mm)	D(hours)	I(mm/h)	P12(mm)	P24(mm)	P36(mm)	P48(mm)
24	0.20	0.08	2.40	3.40	9.80	11.40	20.20
49	1.00	3.17	0.32	5.00	7.20	7.20	7.20

Dati riferiti all'anno 2022

L'anno di monitoraggio 2022 ha restituito un secondo grafico (*Figura 85*) in cui si nota a grandi linee la stessa distribuzione dei dati del 2021. Anche in tal caso si osservano degli outliers, che forniscono una risposta nel torrente più o meno intensa associata ad entità dei fenomeni piuttosto bassa. Tale risposta può essere nuovamente associata ad eventi precedenti che hanno portato a saturazione il sedimento come, per esempio, l'evento n°11, in cui nelle 48 ore precedenti sono caduti 16.80 mm di pioggia (**Tabella 9**).

Tabella 9. Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli eventi n° 11, 22, 46 e 62, che in *Figura 85* rappresentano degli outliers. La colorazione esprime le classi di risposta del torrente. Vengono riportate le piogge cumulate nelle 12, 24, 36 e 48h precedenti.

ID evento	P(mm)	D(hours)	I(mm/h)	P12(mm)	P24(mm)	P36(mm)	P48(mm)
11	0.60	0.42	1.44	14.80	16.80	16.80	16.80
22	2.80	0.83	3.36	1.20	1.20	1.20	1.20
46	1.40	0.50	2.80	0.00	12.20	12.60	12.60
62	0.20	0.08	2.40	0.00	0.00	0.00	1.80

Durante l'anno è avvenuto un solo evento di colata detritica, in data 22 ottobre 2022. Osservando i dati in **Tabella 11**, l'intensità di tale evento si discosta da quelle degli altri eventi occorsi, sia in passato che recentemente, allontanandosi dai valori "tipici" per l'innescò. Esso ha avuto più o meno la medesima durata dell'evento n°19 (**Tabella 10**), che aveva causato una risposta modesta, tuttavia, l'intensità di 5.72 mm/h, causata da una maggior quantità di pioggia caduta durante l'evento, ha permesso al fenomeno temporalesco del 22 ottobre di innescare una colata di detrito, ricadendo in tal modo al di sopra della soglia. L'innescò si ipotizza sia dovuto al cedimento di uno sbarramento di detriti posizionato di fronte la frana de "La Tavola".

Tabella 10. Confronto fra eventi n° 19 e n°103. Quest'ultimo è relativo al debris-flow del 22/10/2022. I colori esprimono la classe di risposta del torrente.

ID evento	P(mm)	D(hours)	I(mm/h)
19	19.00	15.00	1.27
103	83.40	14.58	5.72

Dalla **Figura 86**, grafico a dispersione cumulativo dei due anni analizzati, è possibile stabilire che gli eventi più recenti, che hanno comportato l’innesco delle colate detritiche (quadrantini neri con contorno rosso), superano la Soglia Ceriani del 1994. Purtroppo, quest’ultima sta al di sotto di alcuni eventi che non hanno dato colate di detrito, ma solo risposte intense.

La soglia IRPI-CNR, valida anche per altri fenomeni franosi, risulta essere invece troppo cautelativa, incorporando anche precipitazioni che non hanno fornito eventi di trasporto solido.

Inserendo i dati degli eventi storici, osservabili in **Tabella 11**, si nota che soltanto la pioggia del 6 agosto 2019, i cui dati sono stati recuperati dalla stazione di Lozio, ricade al di sopra della Soglia Ceriani, mentre gli altri ne rimangono al di sotto. Ad essa è associata l’intensità più elevata dopo quella dell’evento del 16 agosto 2021, con un valore di 31.75 mm/h. Tale discrepanza è probabilmente dovuta al fatto che, anche se molto vicine al torrente Blé, entrambe le stazioni non risultano rappresentative. Questo problema è legato dall’estrema localizzazione delle celle temporalesche nelle aree alpine, a causa delle elevate quote circostanti. È possibile, quindi, che se i dati fossero stati raccolti dalla stazione che si trova nell’attuale posizione nel bacino, entrambi gli eventi sarebbero ricaduti al di sopra della soglia.

In linea generale, dalla presente analisi è risultato che grazie all’osservazione dei soli dati di pioggia e le relative immagini, è possibile stabilire una buona classificazione degli eventi di pioggia. L’entità delle diverse precipitazioni permette di distinguere diverse soglie pluviometriche (**Figura 87**), ovvero limiti che separano le diverse risposte idrologiche del torrente le une dalle altre. Tali soglie consentono di separare in maniera adeguata quelli che sono stati gli eventi di debris-flow, gli eventi intensi privi di colata detritica e gli eventi di modesta o scarsa intensità. È possibile osservare, inoltre, come la “soglia di debris-flow”, riferita nello specifico al comportamento del torrente Blé, sia più elevata ed inclinata rispetto alla Soglia Ceriani, rendendo quest’ultima più cautelativa.

Tabella 11. Tabella riassuntiva delle caratteristiche pluviometriche degli eventi innescanti i debris-flow passati e recenti.

Evento	Stazione meteo	Pioggia cumulata (mm)	Durata (h)	Intensità (mm/h)
25-ago-18	Capo di Ponte	25.8	4.00	6.45
	Lozio	39.2	4.30	8.71
06-ago-19	Capo di Ponte	20	1.50	10.9
	Lozio	68.8	2.10	31.75
16-ago-21	UNIBO	51.2	0.55	55.85
22-ott-22	UNIBO	83.44	14.35	5.72

6. ANALISI DEI DATI SISMICI

Nel presente capitolo viene descritta la seconda parte di analisi dei dati, che si basa sul comportamento del torrente in termini di aumento del rumore sismico dato da precipitazioni, aumento di portata, trasporto e collisione del detrito all'interno dell'alveo.

6.1. Scopo dell'analisi

L'analisi è stata svolta sui dati sismici raccolti dai tre geofoni collegati alla stazione di monitoraggio, posizionata presso il torrente Blé.

Anche per questo lavoro svalutando le differenze di ampiezza e frequenza del segnale sismico, prima della precipitazione e durante il picco massimo di ampiezza, al fine di:

1. Analizzare e descrivere l'andamento dei segnali sismici;
2. Determinare se gli aumenti di ampiezza nel segnale sono correlabili con l'entità degli eventi di pioggia;
3. Classificare gli eventi sulla base del rapporto di ampiezza tra picco e rumore di fondo;
4. Classificare gli eventi sulla base del rapporto di frequenza tra rumore di fondo e picco dell'evento;

6.2. Metodologia

6.2.1. Registrazione dei segnali sismici

L'analisi utilizza i dati registrati da un array lineare di tre geofoni, equispaziati tra di loro, con frequenza di campionamento di 200 Hz. I sensori sono stati sostituiti in seguito al collasso della prima stazione installata, occorso a causa dall'evento di colata del 16 agosto 2021. Prima di tale data i geofoni, nominati da monte verso valle *pri0*, *pri1* e *pri2* (**Figura 88**), erano rispettivamente di 4.5, 1, e 4.5 Hz. Successivamente sono stati installati tutti e tre da 4.5 Hz.

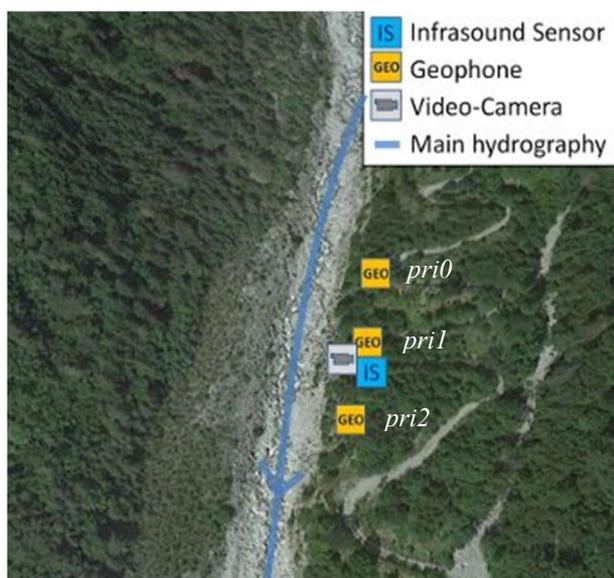


Figura 88. Collocazione dei geofoni rispetto alla stazione di monitoraggio ed al torrente. Immagine presa dal sito di MAMODIS (<http://mamodis.ddns.net/>)

L'utilizzo di rilevatori di vibrazioni al suolo (Ground Vibrations Detector, GVD) presenta una serie di vantaggi significativi:

- Sono sensori passivi, facilmente adattabili alle difficili condizioni di campo;
- Possono essere installati in luoghi sicuri al di fuori del canale attivo;
- Forniscono un monitoraggio in continuo;
- Permettono il monitoraggio di un ampio spettro di processi.

Questa tecnica risulta conveniente, in quanto, permette di monitorare in continuo grandi aree da una distanza di sicurezza, soprattutto nel caso delle colate detritiche che sono fenomeni rapidi e poco frequenti. Per implementare tale sistema è necessaria la presenza di un canale di flusso ben definito (Coviello et al., 2019).

L'andamento dell'ampiezza, che si ottiene dalla trasformazione del segnale analogico di tensione del geofono, è una misura conveniente dell'intensità del rumore sismico, che può essere generato da diverse fonti, sia antropiche che naturali (Coviello et al., 2019).

Tipicamente i geofoni monoassiali sono i GVD più utilizzati per il rilevamento delle colate detritiche, in quanto estremamente efficaci, soprattutto se installati direttamente nel terreno e non in un corpo diga o su grandi massi, che causerebbero un significativo smorzamento del segnale (Coviello et al., 2015; Kean et al., 2015). Tale disposizione fa sì che l'aumento di ampiezza risulti visibile già alcuni secondi prima del passaggio del fronte del flusso detritico in corrispondenza della sezione trasversale. Questa caratteristica estremamente importante non viene implementata da altri dispositivi, rendendo i geofoni essenziali allo scopo del monitoraggio (Coviello et al., 2019). Inoltre, sono sensori di facile installazione e basso costo rispetto ai sismometri classici. L'output prodotto è una tensione direttamente proporzionale alla velocità di vibrazione del terreno in una specifica gamma di frequenze, che dipende dalla frequenza propria del sensore.

Le frequenze proprie dei geofoni e quelle di campionamento devono essere ragionate per una registrazione ottimale del dato. In particolare, il sensore è bene che abbia frequenza di 4.5 o 10 Hz, mentre la frequenza di campionamento deve essere superiore a 100 Hz (Abancó et al., 2014; Coviello et al., 2015; Schimmel & Hübl, 2015).

6.2.2. Estrazione dei segnali di ampiezza e frequenza

Una volta raccolti i dati sismici grezzi, questi possono essere digitalizzati in due modi: la trasformazione in ampiezza o quella in impulsi. La prima può essere definita come l'involuppo del segnale grezzo, calcolato come la media dei valori assoluti del sismogramma in una finestra temporale di 10 secondi. La seconda, invece, avviene impostando una soglia di ampiezza che, ogni qualvolta viene superata, determina il conteggio di un impulso (Coviello et al., 2019).

Nel presente lavoro è stata presa in considerazione la prima di queste trasformazioni, definita "short term average" (STA), che prevede il calcolo dell'ampiezza media del valore assoluto del segnale grezzo, all'interno di finestre di 10 secondi l'una. In tal modo è stato possibile ottenere un prodotto chiaramente leggibile evitando la perdita di informazioni.

I segnali così ottenuti sono stati analizzati, descrivendone l'andamento. Quest'ultimo è stato messo in correlazione con le immagini scattate dalla PiCamera collegata al sistema MAMODIS, per verificare se la risposta nel segnale coincidesse con quella visibile nel torrente.

In primo luogo, sono stati convertiti i files grezzi registrati dai geofoni ed archiviati nel DataCube. Il salvataggio dei dati registrati in continuo avveniva alla fine di ogni giornata, quindi, erano riconoscibili per data di archiviazione.

Dall'analisi precedente erano già noti gli eventi classificabili e quelli che invece non erano analizzabili dalle immagini. Si è deciso di convertire solamente quelli che potevano essere confrontati con i frame di MAMODIS, nonostante che l'ausilio dei segnali avrebbe permesso di capire il comportamento dell'evento anche durante le ore notturne.

La conversione in file "mseed", attraverso un'istruzione implementata nel prompt dei comandi di Windows, è stata necessaria al fine di ottenere dati leggibili in MATLAB, per ognuno dei tre geofoni collegati alla stazione.

Nel prompt viene richiamata la cartella d'origine dei files e attraverso una riga di comando è stato possibile convertire il singolo file e destinarlo a una cartella "mseed".

```
C:\Tesi\DataCube\originali\bin>
cube2mseed--verbose--outpudir=..\mseed..\originali\namefile.BS0
```

In corrispondenza del termine sottolineato sono stati di volta in volta sostituiti i files da convertire, per ognuno dei quali si ottengono tre prodotti "mseed", uno per ogni canale di registrazione (*Figura 89*).



```
c0bs0210727083618.pri0
c0bs0210727083618.pri1
c0bs0210727083618.pri2
```

Figura 89. Tre file mseed estratti, ognuno per il rispettivo geofono.

La fase successiva prevedeva la conversione di tali files in segnali di velocità ed ampiezza, attraverso uno script MATLAB, denominato "DataCube_Overview.m", che ha permesso di estrarre a piacimento la durata del segnale di interesse.

```
f='..\DataCube\mseed\2021\072721_836\c0bs0210727083618';
ch={'pri0' 'pri1' 'pri2'};
starttime=[2021-07-27 14:00:00];
endtime='2021-07-27 20:00:00';
```

In questa riga viene richiamato il file attraverso il percorso

Nelle ultime due righe vengono definiti gli intervalli di inizio e fine entro i quali si vuole estrarre l'evento

Questo procedimento è stato effettuato su ogni file, selezionando come intervallo di tempo dai 30 minuti prima dell'inizio della pioggia fino a 2 ore dopo la fine della stessa. I prodotti così ottenuti mostrano un segnale di velocità ed uno di STA di ampiezza su finestre di 10 s, come in *Figura 90*.

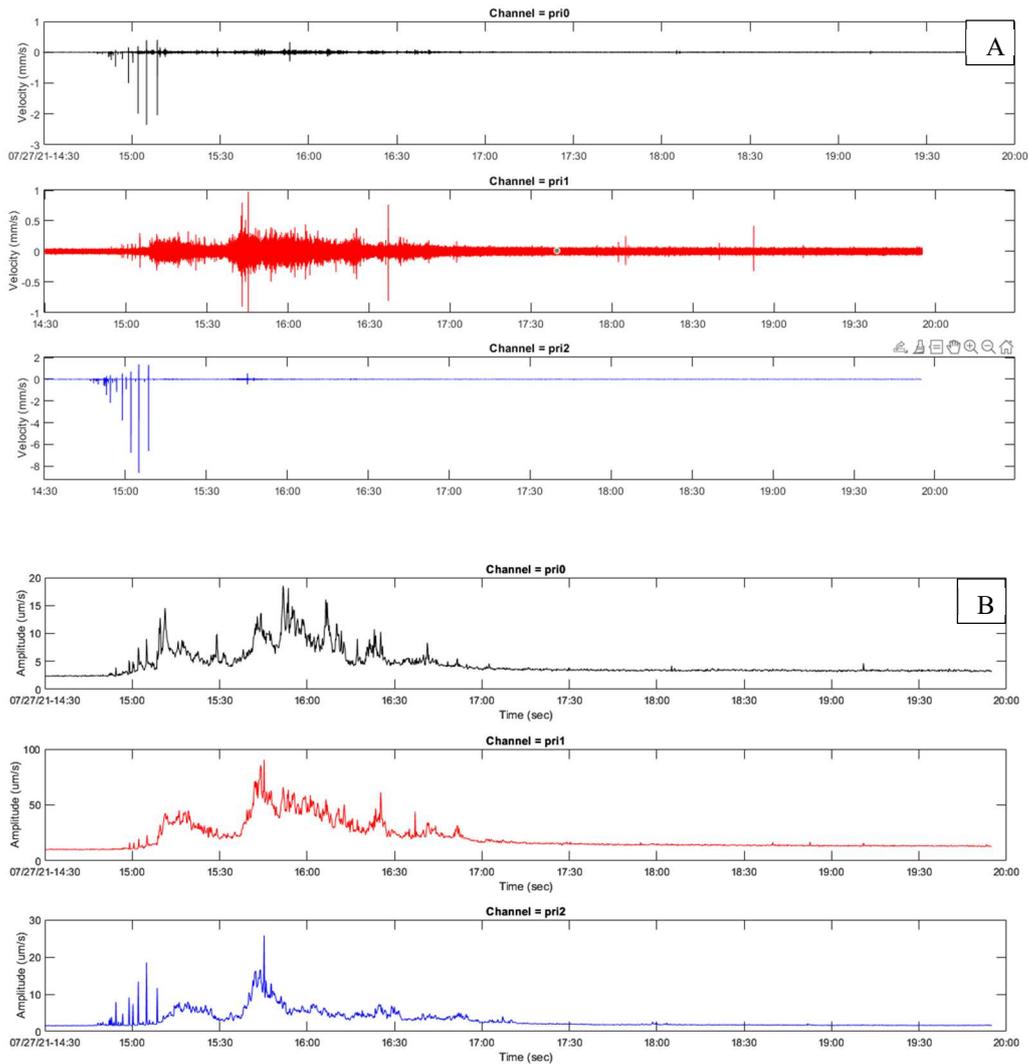


Figura 90. A) i tre canali rappresentano le velocità registrate dai tre geofoni rispettivamente a 4.5 Hz, 1 Hz e 4.5 Hz; B) STA su finestre da 10 secondi dello stesso evento, mostra l'andamento in ampiezza.

Il solo segnale di ampiezza è stato confrontato con i dati pluviometrici disponibili e le immagini della telecamera MAMODIS, per verificare eventuali correlazioni. In alcuni casi sono stati trascurati degli eventi a causa dell'elevato rumore di fondo osservabile, probabilmente imputabile al rumore antropico prodotto da mezzi meccanici che si trovavano nelle vicinanze.

In un successivo step sono state selezionate due finestre temporali, ognuna di 5 minuti: una in corrispondenza del momento pre-pioggia (*W1*), una durante il picco dell'evento (*W2*) (**Figura 91A**). Questi due intervalli sono stati inseriti in un ulteriore script MATLAB denominato "DataCube_Windows.m", il quale ha permesso di fare l'analisi di Fourier delle finestre selezionate e determinarne la frequenza di picco $\pm 20\%$, in modo da considerare il 40% dei valori nell'intorno del picco principale, stabilendo un margine di variabilità (**Figura 91B**). Il secondo prodotto è un dettaglio delle finestre di interesse (**Figura 91C**) del segnale di ampiezza (STA su 10 s) ottenuto precedentemente, di cui è stata calcolata l'ampiezza media. Questi risultati hanno permesso di visualizzare le differenze tra il rumore di fondo ed il rumore durante l'evento. Una volta ottenuti, i valori di frequenza di picco ed ampiezza media sono, stati segnati in una tabella Excel, per ognuna delle due finestre.

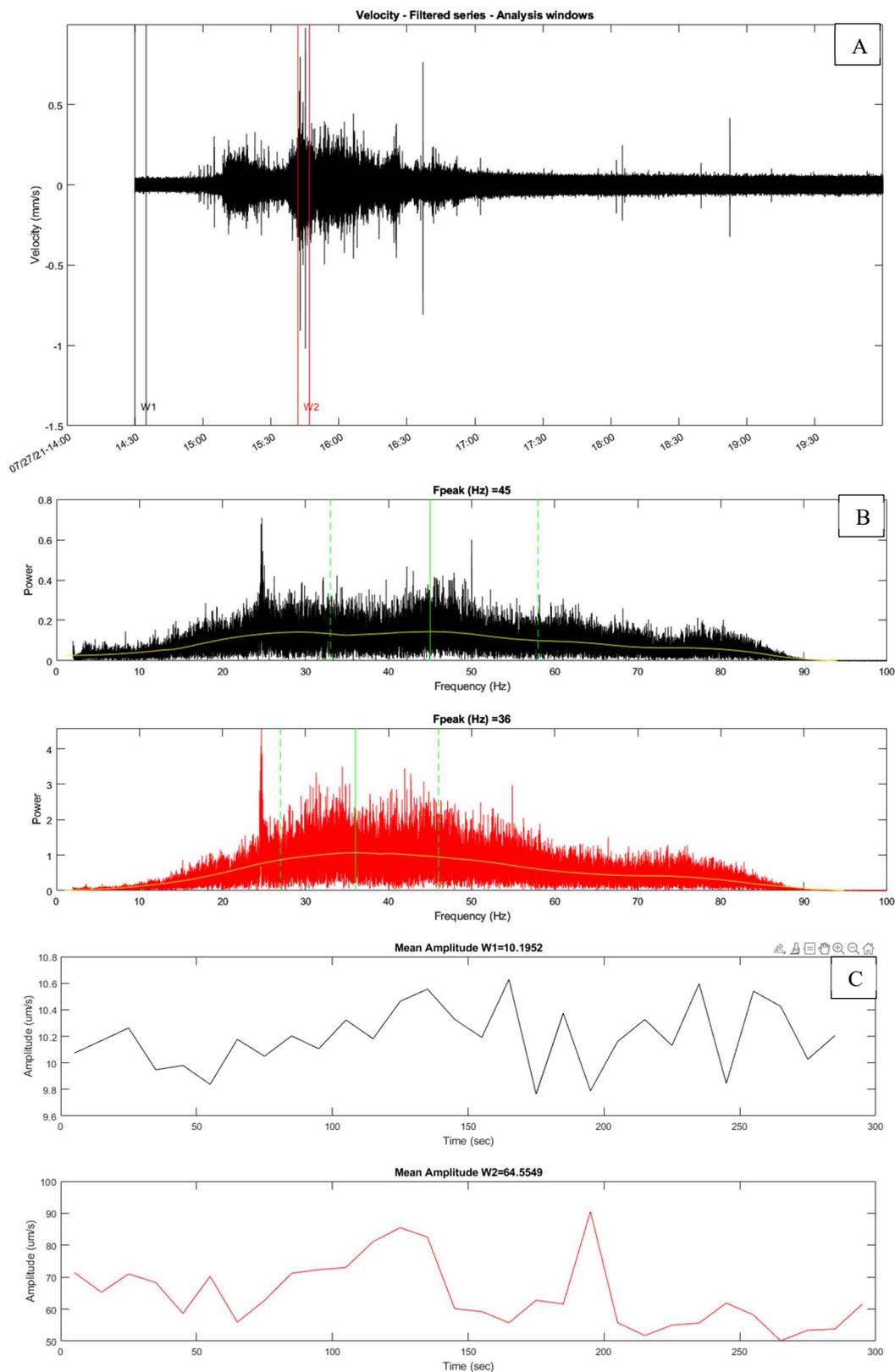


Figura 91. A) in questo primo grafico è rappresentata la totalità del segnale in termini di velocità (mm/s) nel quale sono state isolate le due finestre temporali di interesse: quella nera, chiamata W1, corrisponde al momento pre-pioggia, quella rossa, W2, corrisponde al picco dell'evento; B) il segnale rappresenta gli spettri di Fourier delle due rispettive finestre, discretizzate nei medesimi colori, per ognuna delle quali viene evidenziata la frequenza di picco massimo $\pm 20\%$; C) rappresentazione delle ampiezze delle due finestre, rappresentate con gli stessi colori, dalle quali viene estrapolata l'ampiezza media per ciascuna delle due.

6.2.3. Definizione dei rapporti di ampiezza e classificazione

Per ciascun evento sono state estrapolate le ampiezze medie delle finestre $W1$ e $W2$. Successivamente, per valutare l'incremento rispetto al rumore di fondo, si è scelto di fare il seguente rapporto:

$$\frac{AW2}{AW1}$$

I valori così ottenuti sono una rappresentazione speditiva di quanto la pioggia e le sue conseguenze abbiano un impatto sull'ampiezza del segnale sismico.

Successivamente i rapporti di ampiezza di ogni evento sono stati classificati sulla base degli aumenti di rumore più significativi, ottenendo la seguente discretizzazione:

	$AW2/AW1 < 2$
	$AW2/AW1 2 - 10$
	$AW2/AW1 10 - 50$
	$AW2/AW1 > 50$

È stato poi generato un grafico a dispersione con l'ausilio delle bolle, ove in ascissa sono rappresentati i valori di durata dell'evento, in ordinata quelli d'intensità e, infine, il diametro delle bolle è definito dalla classificazione dei rapporti di ampiezza.

6.2.4. Confronto delle ampiezze medie

Per definire al meglio le differenze tra i due anni di monitoraggio si è deciso di visualizzare le ampiezze medie ottenute tramite ortogrammi e box diagram. Nel primo è stata inserita una linea rossa e una diversa colorazione della serie di dati a partire dal valore successivo all'evento del 16/08/2021, in quanto è stata sostituita la stazione di monitoraggio. Tale grafico mostra solo l'andamento dell'ampiezza, mentre il secondo mostra quali sono i valori di ampiezza più frequenti e quali quelli che si discostano maggiormente. Per una necessità rappresentativa si è deciso di trascurare, durante la costruzione di questi ultimi grafici, i valori relativi agli eventi più intensi (outliers) in quanto essendo molto più alti degli altri rendevano il grafico poco leggibile.

6.2.5. Definizione dei rapporti di frequenza e classificazione

Avendo estrapolato anche i dati delle frequenze di picco si è voluto mettere in evidenza le differenze generali tra l'andamento delle finestre $W1$ e $W2$ dei due anni di monitoraggio. Inizialmente sono state analizzate per i soli due fenomeni di debris-flow e successivamente in linea generale tramite box diagram, come nel caso delle ampiezze. In un secondo momento sono state valutate le frequenze di picco effettuando il rapporto tra quelle di pre-evento ($FW1$) e quelle di picco massimo ($FW2$) mettendole a confronto con l'entità degli eventi di pioggia, per valutarne la variazione della risposta.

A tale scopo è stato creato un grafico a dispersione cumulativo dei due anni di studio, ove in ascissa è riportata la durata (h) ed in ordinata l'intensità di pioggia (mm/h). Le serie di dati sono state discretizzate sulla base del rapporto $FW1/FW2$, il cui risultato è stato suddiviso secondo le seguenti classi:

- $FW1/FW2 < 0.8$
- $0.8 < FW1/FW2 < 1.1$
- $1.1 < FW1/FW2 < 1.4$
- $1.4 < FW1/FW2 < 2$
- $FW1/FW2 > 2$

6.3. Risultati

Il grafico in **Figura 92** mostra una transizione graduale della potenza dei fenomeni all'avvicinarsi alla "soglia di debris-flow". Al di sopra della stessa si trovano gli unici due eventi che hanno dato colata di detrito.

Vicino all'origine del grafico, si hanno gli eventi che hanno dato rapporto $AW2/AW1 < 2$. Questi occupano la quasi totalità dello spazio sottostante la soglia, con maggior densità alla base.

Più ci si avvicina alla soglia e più i rapporti di ampiezza tendono ad aumentare, in accordo con gli aumenti di intensità e durata degli eventi (**Figura 93**). Questi vengono discretizzati con pallini gialli ed arancioni, le cui dimensioni sono proporzionali al rapporto di ampiezza.

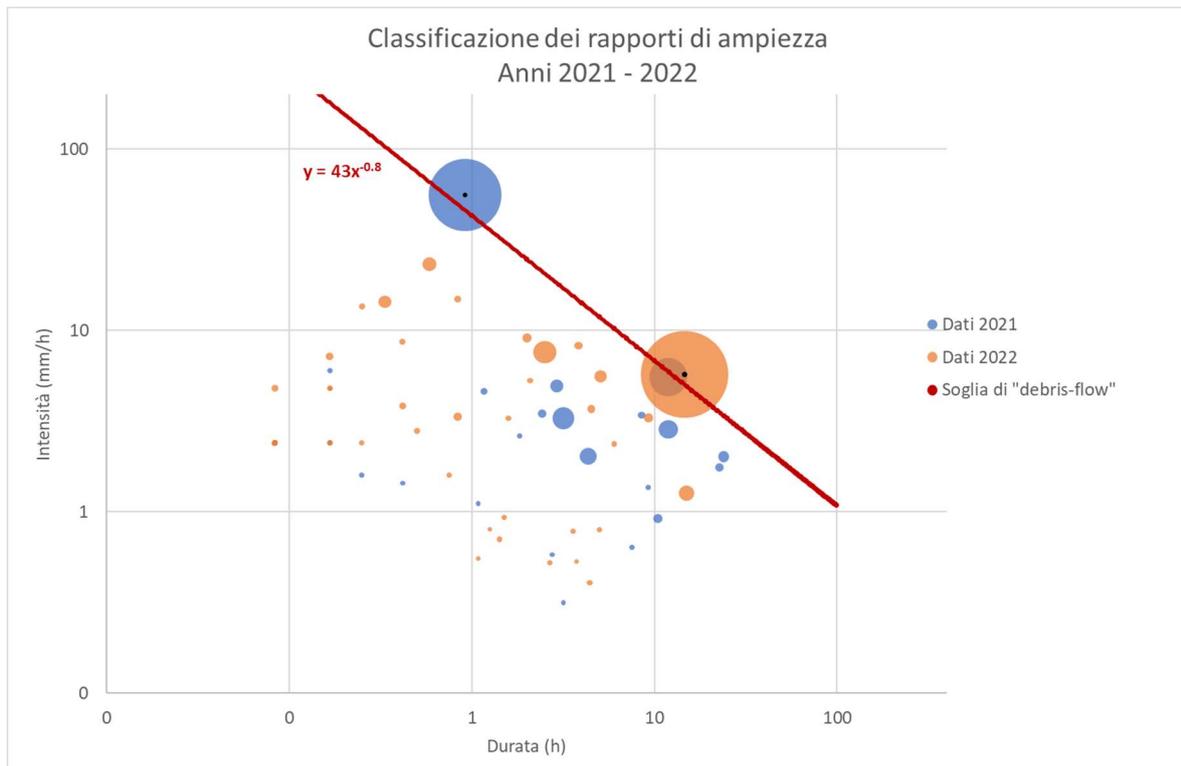


Figura 92. Grafico a dispersione con bolle dei dati di monitoraggio effettuato tra il 2021 e il 2022. È stata impostata anche la soglia di “innesco di debris-flow” con la rispettiva equazione. A destra è presente la legenda. Gli assi sono entrambi a scala logaritmica.

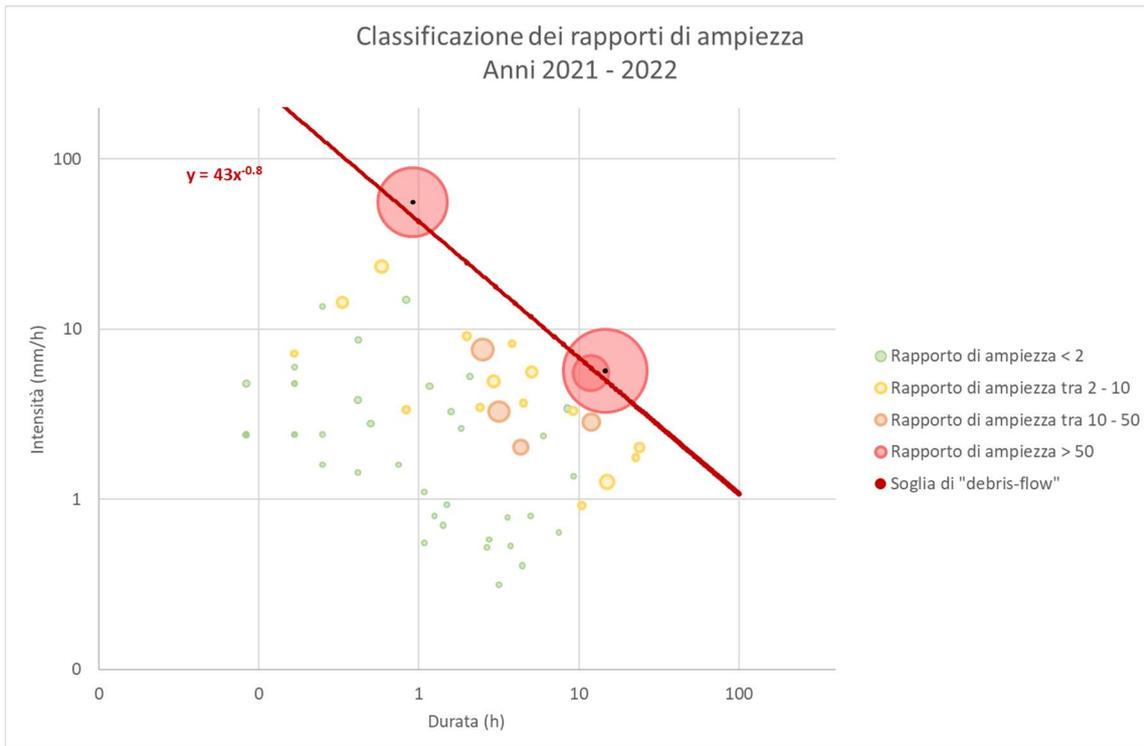


Figura 93. Grafico a dispersione con bolle per classificare gli eventi sulla base del loro rapporto di ampiezza e collocarli, tramite durata e intensità, rispetto alla soglia di “innesco di debris flow”. A destra è presente la legenda. Gli assi sono entrambi a scala logaritmica. Vicino alla soglia è rappresentata la propria equazione.

Sono successivamente state messe a confronto le ampiezze registrate nel 2021 con quelle raccolte nel 2022, sia per le finestre *AW1* che le *AW2*. Tale paragone è stato fatto attraverso ortogrammi e box diagram (**Figure 94, 95, 96 e 97**).

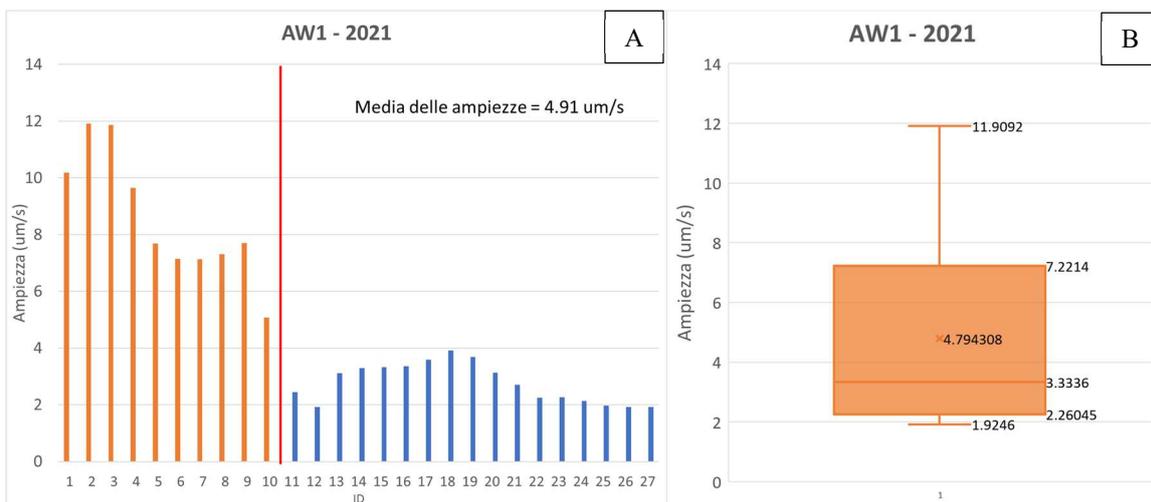


Figura 94. A) ortogramma che mostra le ampiezze medie misurate durante le finestre pre-evento del 2021. La linea rossa separa i dati con due colorazioni diverse, ad indicare il momento in cui è stato sostituito l’array di geofoni, successivamente all’evento del 16/08/2021; B) box diagram che mostra una dispersione da 1.92 $\mu\text{m/s}$ a 11.9 $\mu\text{m/s}$.

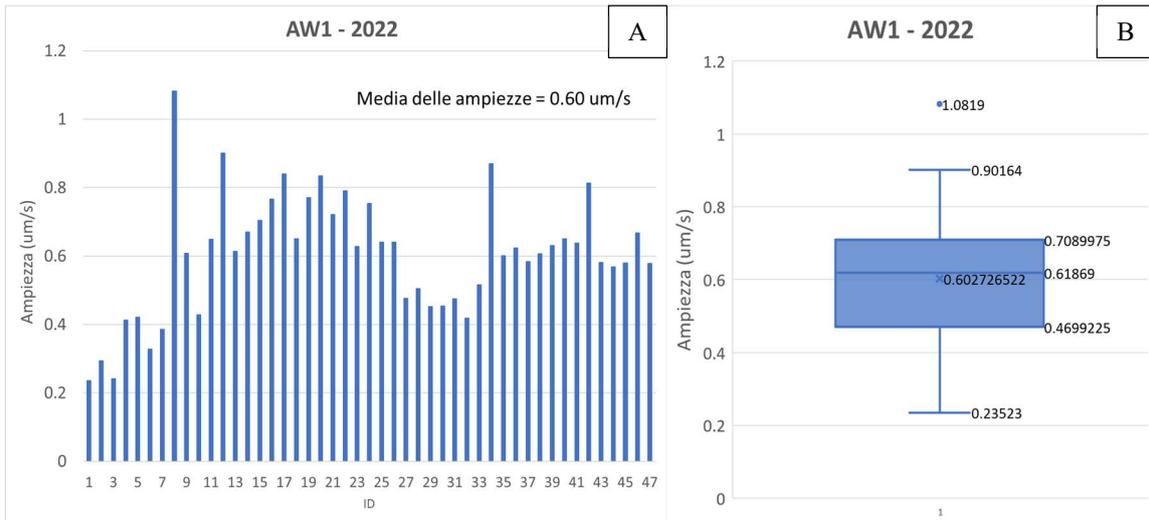


Figura 95. A) ortogramma che mostra le ampiezze medie misurate durante le finestre pre-evento del 2022; B) box diagram che mostra una dispersione da 0.23 $\mu\text{m/s}$ a 0.90 $\mu\text{m/s}$. In questo caso è presente un outlier di 1.08 $\mu\text{m/s}$.

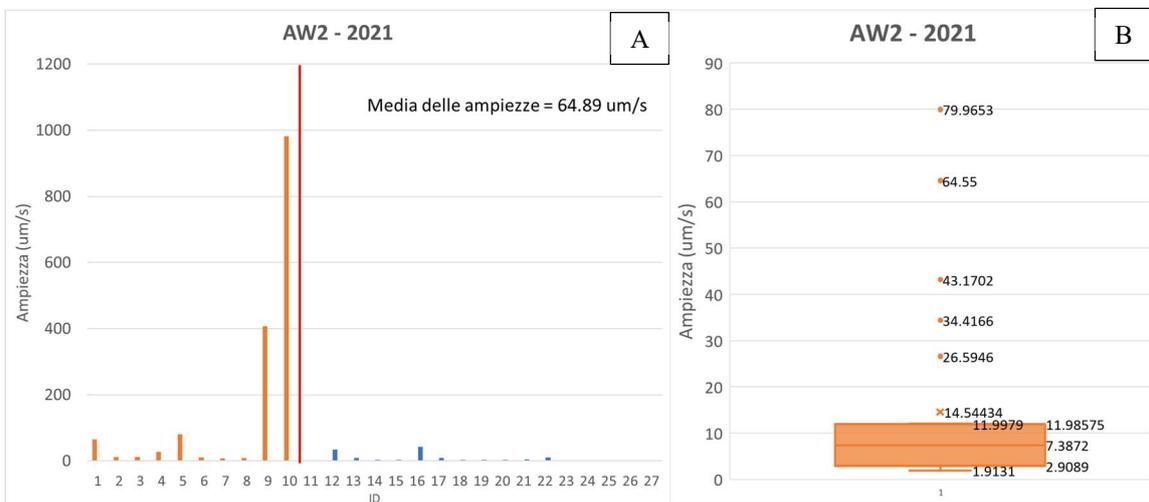


Figura 96. A) ortogramma che mostra le ampiezze medie misurate durante le finestre di picco del 2021. Anche in tal caso è presente la linea rossa; B) box diagram che mostra una dispersione da 1.91 $\mu\text{m/s}$ a 14.54 $\mu\text{m/s}$. In questo caso sono presenti molti outliers che arrivano ad un massimo di 79.9 $\mu\text{m/s}$.

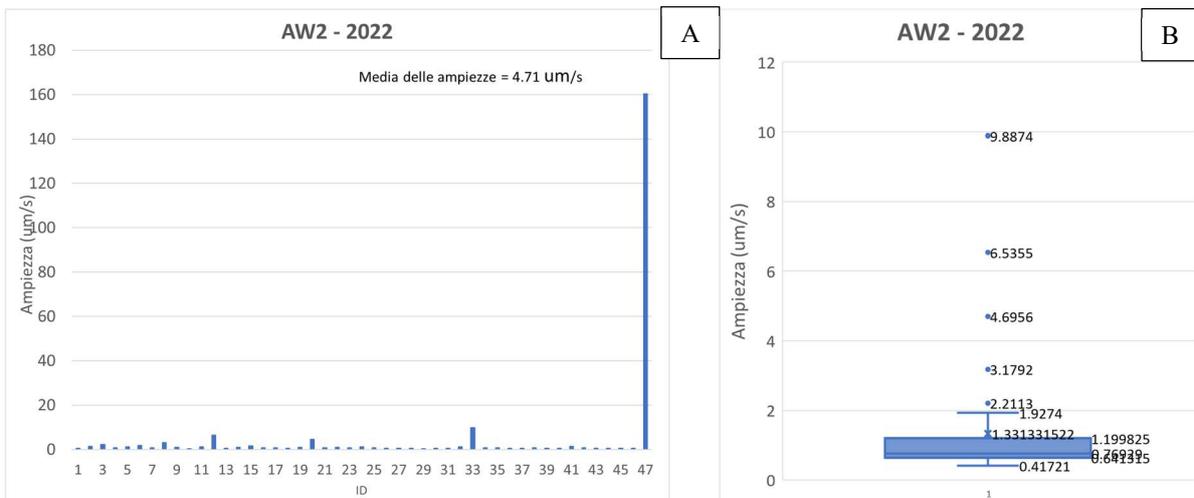


Figura 97. A) ortogramma che mostra le ampiezze medie misurate durante le finestre di picco del 2022; B) grabox diagram che mostra una dispersione da 0.41 $\mu\text{m/s}$ a 1.92 $\mu\text{m/s}$. In questo caso sono presenti diversi outliers, il cui massimo arriva a 9.88 $\mu\text{m/s}$.

I risultati ottenuti mostrano che tra il 2021 ed il 2022 la dispersione dei dati, osservata nei box diagram, diminuisce. Lo stesso vale anche per l'ortogramma, i cui valori tendono ad una diminuzione generalizzata già dopo la linea rossa in **Figure 94 e 96**, che delimita il cambio del geofono *pril* da 1 Hz a 4.5 Hz. In linea generica nei grafici delle *AW2* (**Figure 95 e 97**) si riconoscono solamente i picchi degli eventi estremi, non potendo apprezzare realmente l'andamento generale dei dati.

Avendo ottenuto informazioni relative alle frequenze di picco, si è deciso di analizzarle in modo preliminare. Inizialmente sono state messe a confronto le frequenze di picco pre-evento (*FW1*) e di picco (*FW2*) dei soli due fenomeni di debris-flow, presentati nelle **Figure 98 e 99**.

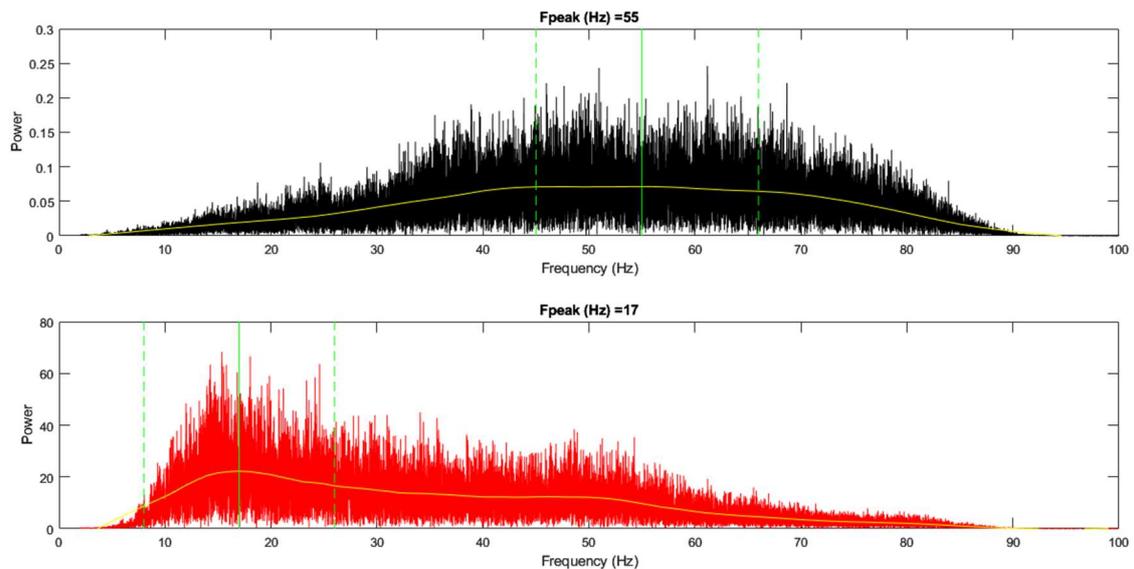


Figura 98. Le linee tratteggiate verdi indicano l'intervallo del 40% dei valori intorno. Frequenze di picco riferite alle finestre pre-evento e di picco del fenomeno di colata del 16 agosto 2021. Nel primo caso la *Fpeak* era di 55 Hz, durante il massimo di 17 Hz. Le linee tratteggiate verdi indicano l'intervallo del 40% dei valori intorno alla frequenza di picco.

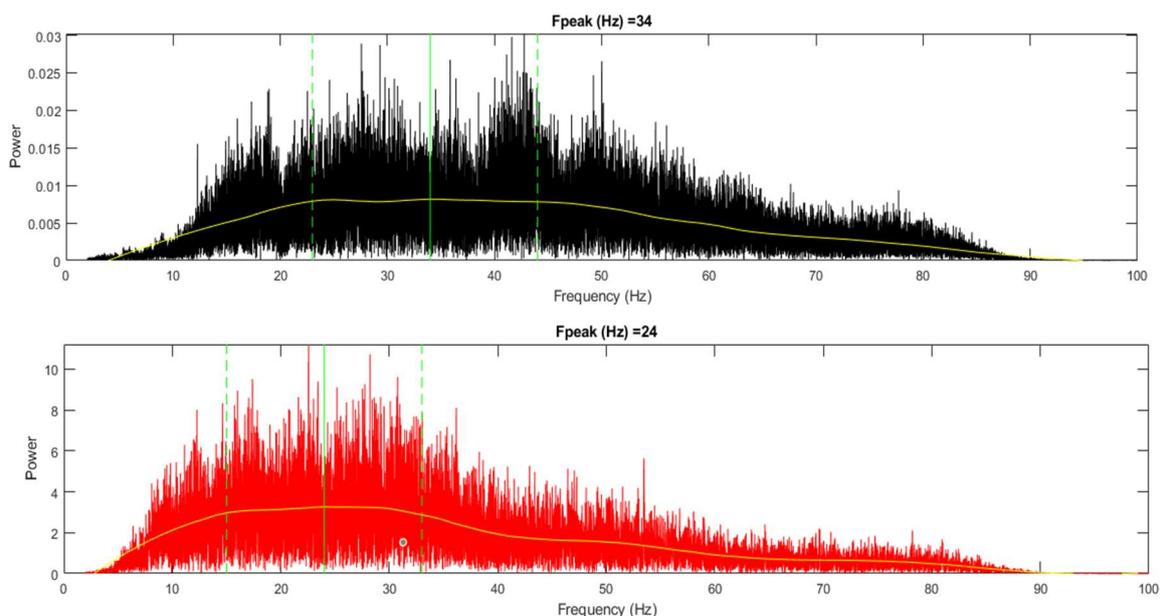


Figura 99. Frequenze di picco riferite alle finestre pre-evento e di picco del fenomeno di colata del 22 ottobre 2022. Nel primo caso la *Fpeak* era di 34 Hz, durante il massimo di 24 Hz.

In questi due casi si riconosce che l'andamento delle frequenze segue una proporzione opposta rispetto alle ampiezze, ovvero, che più l'evento è intenso e minore è la frequenza di picco. Ne è emerso che in corrispondenza del passaggio di una colata di detrito si ha una diminuzione della $FW2$ rispetto al $FW1$ (rumore di fondo naturale). Tale abbassamento della frequenza di picco diventa maggiormente evidente più il debris-flow è violento.

Tutti i valori della frequenza di picco sono poi stati inseriti nei box diagram, per valutarne l'andamento generale. Ne è emerso che la tendenza dei due anni è molto simile, mostrando una diminuzione della frequenza durante il picco degli eventi. Nel 2021 si nota un abbassamento delle frequenze di picco, passando da una mediana di 32.3 Hz di $FW1$ ad una di 30.5 Hz di $FW2$ (Figure 100 e 101). Nel 2022 si osserva un minimo aumento tra $FW1$ e $FW2$, passando da una mediana di 27.6 Hz ad una di 31.3 Hz.

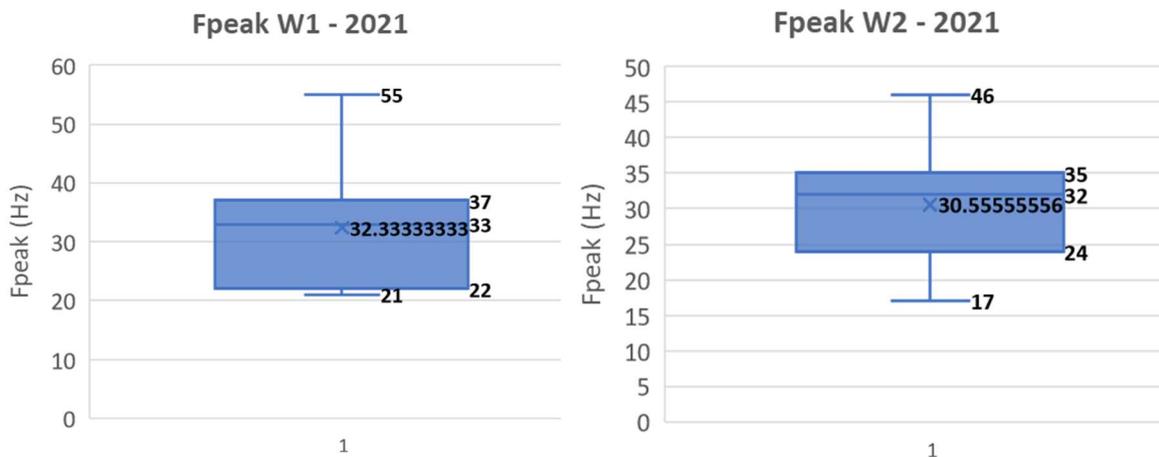


Figura 100. Box diagram delle finestre pre-evento e di picco riferite all'anno 2021. Si osserva come la dispersione dei valori tenda a diminuire con l'aumento di intensità dell'evento.

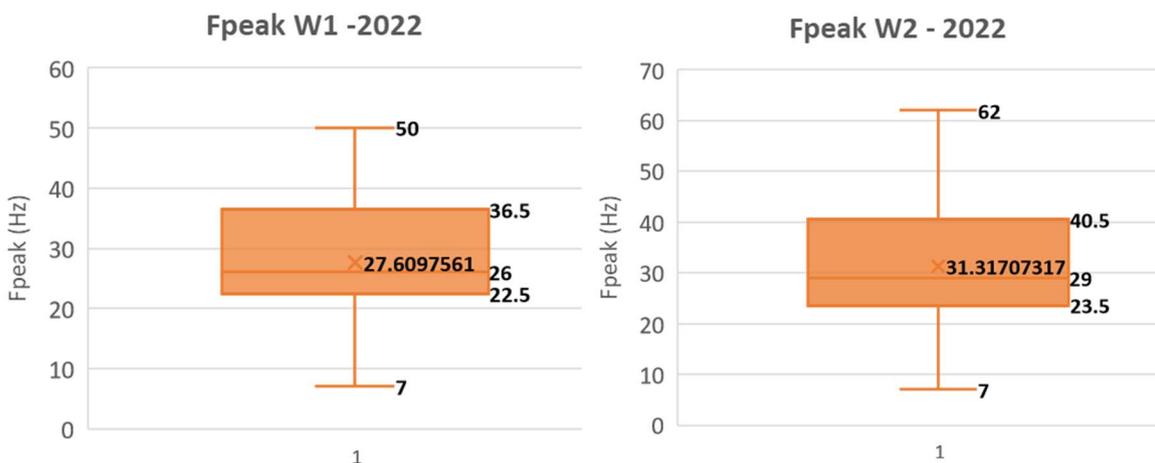


Figura 101. Box diagram delle finestre pre-evento e di picco riferite all'anno 2022. Si osserva come la dispersione dei valori tenda ad aumentare leggermente con l'aumento di intensità dell'evento.

Nel tentativo di correlare la variazione della frequenza di picco in relazione all'entità degli eventi è stato creato un grafico a dispersione cumulativo dei due anni di studio. Le serie di dati sono state discretizzate sulla base delle classi presentate nel *paragrafo 6.2.5.*, ottenendo il grafico riportato in **Figura 102**.

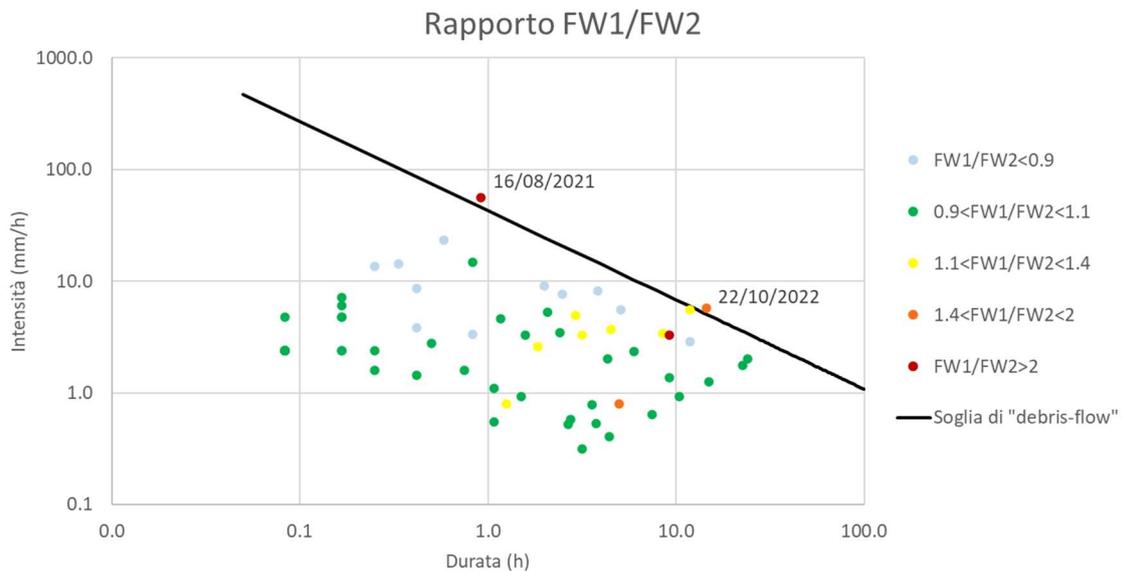


Figura 102. Grafico a dispersione che correla entità degli eventi di pioggia con il rapporto di frequenza ottenuto. A destra è rappresentata la legenda che indica le classi di $FW1/FW2$. La linea nera corrisponde alla soglia di “innesco di debris-flow”, per evidenziare i fenomeni di colata avvenuti durante il monitoraggio.

Laddove il risultato è minore dell'unità si ha avuto un aumento di frequenza, se risulta vicino all'unità la variazione di frequenza è stata nulla o minima. Solamente nel caso in cui il rapporto superi una certa soglia (discretizzata a 2) la diminuzione tra $FW1$ e $FW2$ è stata notevole. Solo due eventi risultano in questa classe, uno è il debris-flow del 16/08/2021, in cui la frequenza è passata da 55 Hz a 17 Hz (3.24 volte minore), l'altro è un evento che ha dato risposta di notevole intensità senza però evolvere in colata, ove la frequenza è passata da 50 Hz a 17 Hz (2.94 volte minore). Il secondo evento di debris-flow, avvenuto il 22/10/2022, risulta nella classe $1.4 < FW1/FW2 < 2$, indicando che tra rumore di fondo e picco dell'evento non vi è stata grande diminuzione di frequenza, passando da 34 Hz a 24 Hz (solamente 1.42 volte minore). Di questa classe si osserva un altro dato anomalo (punto arancio in basso a destra), che è il risultato di una pioggia abbastanza prolungata ma poco intensa.

In linea generale si nota che anche eventi che hanno valori di durata ed intensità piuttosto elevati forniscono rapporti di frequenza molto vicini all'unità, per il resto la distribuzione assume carattere piuttosto casuale, talvolta con aumento di frequenza tra $FW1$ e $FW2$ (punti azzurri).

6.4. Discussioni

Dalla presente analisi, si nota una transizione graduale di aumento di ampiezza di vibrazione avvicinandosi alla soglia di “innesco di debris-flow”, in accordo con l’aumento di intensità del fenomeno, al contrario sembra esserci una diminuzione di frequenza di picco al passaggio di debris-flow. Nel grafico delle ampiezze, in **Figura 93**, si osserva la maggior dimensione della bolla del debris-flow del 22/10/2022 in confronto a quello del 2021. Questo si può spiegare con il fatto che le *AWI* nel 2021 erano più alte rispetto alle *AWI* del 2022 di circa otto volte (**Figura 94A**). Ne deriva che effettuando il rapporto, nel 2021, questo risulta minore del 2022, in cui la media delle ampiezze è risultata essere di $0.60 \mu\text{m/s}$, rispetto a $4.91 \mu\text{m/s}$ dell’anno precedente. Com’è possibile osservare dagli ortogrammi nel *paragrafo 6.3.*, i valori di ampiezza del 2021 seguono un andamento generale più alto rispetto al 2022, fino al momento in cui non è stato sostituito il geofono nel canale *pri1*, passando da 1 a 4.5 Hz, momento delimitato dalla linea rossa (**Figura 94A**).

Oltre a questa differenza si nota che nel 2022 i valori di *AWI* diminuiscono ulteriormente (**Figura 96A**). Tale variazione può essere quasi certamente imputata al fatto che la morfologia dell’alveo è mutata notevolmente tra i due anni, passando da un canale tortuoso ad una superficie abbastanza uniforme. La morfologia dell’alveo è importante, in quanto gradini ed irregolarità tendono probabilmente a generare rumore maggiore rispetto al passaggio su una superficie più uniforme. Tale maggiore uniformità è dovuta ai lavori in alveo effettuati nei mesi di maggio e giugno 2022, che hanno visto l’impiego di mezzi meccanici, testimoniati anche dalle immagini della telecamera (**Figura 103**).

A causa dell’elevato rumore prodotto dalle macchine operatrici alcuni eventi sono stati trascurati.



Figura 103. Testimonianza dei lavori in alveo del T. Blé con utilizzo di mezzi meccanici. Il segnale dell’evento avvenuto in questa data non è stato considerato a causa dell’elevato rumore prodotto dal macchinario.

La diminuzione di ampiezza tra i due anni è osservabile anche nei box diagram, i cui valori diminuiscono notevolmente nei dati di *AWI*, passando da una mediana di $3.33 \mu\text{m/s}$ nel 2021 a $0.61 \mu\text{m/s}$ nel 2022 (**Figure 94B e 96B**), oltre ad una diminuzione di intervallo di dispersione. Si può inoltre osservare che in entrambi gli anni la differenza tra *AW1* ed *AW2*

si traduce in un ovvio aumento di ampiezza del rumore sismico, oltre alla presenza di numerosi outliers, che indicano di fatto gli eventi più intensi, tolti quelli che hanno prodotto debris-flow che rendevano il diagramma difficile da leggere.

Il grafico di classificazione di ampiezza è stato poi messo a confronto con quello di classificazione di risposta del torrente, riportato in **Figura 86**. È risultato che l'andamento dell'aumento di ampiezza coincide in gran parte con la risposta del torrente, verificando la correlazione tra aumento del rumore sismico con l'aumento di energia del flusso nel canale. Successivamente è stata svolta l'analisi delle frequenze di picco, prima con il confronto dei soli due eventi di debris-flow registrati durante il monitoraggio (**Figure 98 e 99**), da cui è emerso che durante le colate di detrito le frequenze di picco si abbassano notevolmente rispetto al rumore di fondo, stabilendosi tra i 10 e i 30 Hz (17 Hz per la colata del 2021 e 24 Hz per quella del 2022). I dati ottenuti sono in accordo con quanto affermato da *Arattano et al., (2014)* secondo il quale risiedono tra i 10 e i 60 Hz. Le frequenze di picco dei restati eventi sono state raccolte ed analizzate tramite box diagram, in **Figure 100 e 101**. Per entrambi gli anni l'andamento generale è molto simile, ovvero una diminuzione della frequenza di picco passando da *FW1* (rumore di fondo) a *FW2* (picchi degli eventi). Nel 2022 si osserva un dato leggermente maggiore nella *FW2* rispetto alla *FW1*. Tale differenza non risulta essere di notevole entità, definendo così la tendenza di entrambi gli anni molto simile.

In seguito, dalla correlazione tra le classi di rapporto *FW1/FW2* e l'entità degli eventi è emerso che, in linea generale, il rapporto è maggiore laddove è avvenuto un debris-flow e rimane vicino, o corrispondente all'unità nel caso di risposte del torrente meno intense o nulle, indicando nessuna variazione tra *FW1* e *FW2*. Nel grafico in **Figura 102**, si osservano alcuni dati anomali, uno dei quali (il punto rosso a destra) è associato ad un evento che ha causato un abbassamento notevole della *FW2* rispetto alla *FW1* (da 50 Hz a 17 Hz), senza però innescare un debris-flow. Purtroppo, le testimonianze e la strumentazione a disposizione non hanno permesso di fornire spiegazione a tale anomalia. Lo stesso tipo di comportamento si riscontra nel punto arancione in basso a destra, il cui rapporto di frequenza risulta discretamente alto nonostante l'evento non sia stato intenso. Le altre anomalie consistono invece in rapporti inferiori all'unità, indicando un aumento di frequenza tra *FW1* e *FW2*. Anche in questo caso non sono spiegabili attraverso testimonianze, risultando quindi casuali. I debris-flow si discostano dal resto dei rapporti, indicando una maggior diminuzione da *FW1* a *FW2* proporzionale alla magnitudo del dissesto. Per esempio, l'evento del 16/08/2021, che è risultato il debris-flow più significativo degli ultimi cinque anni, fornisce un rapporto nettamente maggiore rispetto al fenomeno del 22/10/2022, che è risultato meno violento. Questo è ipotizzabile sia dovuto all'innescò causato dal cedimento di uno sbarramento di detriti in corrispondenza della frana de "La Tavola", invece che per innescò tramite erosione di fondo canale nella parte alta del bacino. In linea di massima, si può affermare che l'aumento di intensità di pioggia e il conseguente innescò di debris-flow generano aumento di ampiezza ed una diminuzione di frequenza di picco rispetto al rumore di fondo, proporzionale all'entità della colata. Quest'ultimo aspetto è riscontrabile al solo passaggio di un debris-flow, mentre i fenomeni intensi che non generano colata forniscono un rapporto comunque vicino all'unità. Tale caratteristica risulta essere di grande importanza, perché indica che fino a quando non si assiste ad un'evoluzione della dinamica del flusso (genesì di debris-flow), le frequenze di picco non subiscono diminuzioni notevoli. A generare tali differenze è, con tutta probabilità, il transito del fronte di colata, che determina il trasporto massiccio di massi di grandi dimensioni. Questi collidono fra di loro e con il substrato, generando elevato l'rumore e, molto probabilmente, le basse frequenze.

7. CONCLUSIONI

I debris-flow sono da tempo oggetto di studi, i quali hanno portato a definirli come i fenomeni franosi più pericolosi fra quelli esistenti, perché caratterizzati da un elevato contenuto d'acqua, dall'ingente quantitativo di materiale di grande granulometria e dalla notevole velocità del flusso, che implica un comportamento repentino ed il loro breve tempo di esaurimento. Questi eventi necessitano di fattori predisponenti affinché si inneschino, rappresentati dalle precipitazioni intense e di breve durata, dalle elevate pendenze del bacino e dal materiale prevalentemente grossolano, con una frazione minore del 10-20% di limo e argilla. Il flusso detritico che si instaura possiede una gradazione longitudinale distinta in diversi settori, il più importante dei quali è rappresentato dal fronte di colata (**Figura 4**), il cui detrito di grossa pezzatura determina l'elevato potere erosivo e distruttivo, che talvolta provoca ingenti danni alle infrastrutture e più raramente può causare vittime. Per tale motivo le comunità che abitano le aree interessate da debris-flow sono costantemente minacciate dal possibile innesco di un evento.

In particolare, la regione Lombardia è interessata da innumerevoli fenomeni franosi, il 41% dei quali è costituito da debris-flow (**Figura 18**), che sono fenomeni difficili da contenere con opere strutturali ed impossibili da prevenire, perciò, l'unico intervento efficace di gestione del rischio è rappresentato dal monitoraggio costante delle zone di interesse.

A tale scopo, nel 2021 la Regione Lombardia ha finanziato diverse stazioni di monitoraggio ed il relativo progetto di ricerca scientifica su alcune colate di detrito presenti in Val Camonica. In questo elaborato si fa riferimento al bacino del torrente Blé, il cui corso d'acqua è spesso interessato da fenomeni di debris-flow, talvolta molto violenti. Esso attraversa l'abitato di Ono San Pietro (BS) e si immette in destra idrografica nel fiume Oglio. Per scongiurare numerosi danni all'abitato e alla sua popolazione, il progetto di Regione Lombardia ha lo scopo di aumentare la conoscenza sulla dinamica dei fenomeni, attraverso l'analisi delle immagini time-lapse, dei dati pluviometrici e sismici, in modo da identificare i fattori di controllo sull'innesco e definire possibili strumenti di allerta.

Le installazioni delle stazioni di monitoraggio sono iniziate nel 2021 e nel luglio dello stesso anno è stata installata quella presso il T. Blé, costituita da sensori appositamente scelti per registrare il comportamento del flusso in una sezione ben definita del canale. È stata disposta in sinistra idrografica rispetto al corso d'acqua, alcune centinaia di metri a valle dell'antica frana de "La Tavola" (**Figura 38**), la quale presenta una dinamica di scorrimento verso Nord. Questa viene scalzata al piede dal passaggio del torrente, provocando continui cedimenti di materiale calcareo, proveniente dalle circostanti pendici della Concarena, costituite prevalentemente dal Calcere di Esino (ESI).

In generale, il bacino del T. Blé è caratterizzato da elevate pendenze (**Figura 36**) che permettono, in occasione di eventi temporaleschi, l'aumento di velocità dell'acqua di ruscellamento, la quale si infiltra nel detrito sciolto, che costituisce il 21% dell'uso del suolo del bacino (**Figura 33**), lo prende in carico e si incanala nell'alveo, determinando talvolta l'evoluzione in debris-flow. Queste dinamiche sono state registrate durante i due anni di monitoraggio, tramite la stazione installata, le cui componenti fondamentali sono i tre geofoni, il pluviometro, il sensore ad infrasuoni MAMODIS collegato ad una PiCamera, ed una telecamera ad alta risoluzione (**Figura 62**).

Questi strumenti permettono di registrare i dati sia in condizioni normali che durante i debris-flow, mentre la PiCamera permette di scattare fotogrammi ogni 15 minuti, i quali vengono caricati sul sito del sistema di monitoraggio ad infrasuoni MAMODIS, da cui sono state scaricate le immagini webcam utilizzate per il presente elaborato.

I dati su cui si basa la presente tesi, oltre alle foto appena citate, sono quelli registrati dal pluviometro e dai tre geofoni, che hanno permesso, come descritto nei *capitoli 5 e 6*, il confronto tra gli eventi di pioggia, il rumore sismico e le immagini, per classificare la risposta del torrente in base all'entità della variazione osservabile in alveo.

I singoli eventi di pioggia sono stati estratti attraverso uno script MATLAB, che ha permesso di analizzare i dati pluviometrici ed isolare come eventi unici solamente quelli in cui la pioggia superava i 0.2 mm caduti in 2 ore. Per ciascun evento sono stati osservati i relativi fotogrammi, ottenendo sette classi, definite sulla base di variazioni di portata, intorbidimento ed erosione del canale. I dati di durata (h) ed intensità (mm/h) delle piogge, di ciascuna precipitazione, sono stati riportati in un grafico bi-logaritmico a dispersione e discretizzati secondo le classi di risposta del torrente (**Figura 87**).

Dai risultati ottenuti è emerso che sia per il 2021 che per il 2022 i dati seguono un andamento graduale, con aumento di risposta del torrente passando dalla base del grafico verso la Soglia Ceriani (riferimento ufficiale per l'innescò di debris-flow della Regione Lombardia), proporzionalmente all'entità di ciascun fenomeno. Al superamento della soglia si riscontrano tre eventi, due dei quali hanno effettivamente provocato l'innescò di debris-flow, uno avvenuto il 16 agosto 2021 e l'altro il 22 ottobre 2022, mentre il terzo è stato classificato come evento molto intenso che, tuttavia, non si è evoluto in colata di detrito. Per tale motivo si è deciso di costruire una soglia di "innescò di debris-flow" specifica per il bacino del torrente Blé, costruita manualmente modificando a tentativi pendenza ed intercetta dell'equazione della Soglia Ceriani, fino al raggiungimento della migliore disposizione possibile. Allo stesso modo è stata costruita una soglia di "pre-allerta", che però divide eventi caratterizzati da aumento di portata, intorbidimento ed erosione da quelli più intensi, ma che non evolvono in colata di detrito.

Essendo a conoscenza dell'avvenimento in passato di due debris-flow, avvenuti il 25/08/2018 ed il 06/08/2019, i cui dati sono stati registrati dalle vicine stazioni di Lozio e di Capo di Ponte, si è voluto fare un confronto con quelli testimoniati dal presente monitoraggio. Ne è emerso che solo quello del 6 agosto 2019, i cui valori sono riferiti alla stazione di Lozio, risulta essere al di sopra della soglia di "innescò debris-flow", i restanti presentano valori di intensità sottosoglia. Probabilmente, questo risultato può suggerire che i dati delle stazioni siano poco rappresentativi della precipitazione effettiva che ha interessato il bacino del T. Blé, considerando la puntualità delle celle temporalesche in montagna e le ubicazioni delle stazioni al di fuori dell'area in esame.

Per caratterizzare ulteriormente la risposta del torrente ci si è avvalsi dell'analisi descritta nel *capitolo 6*, che si basa sull'acquisizione e caratterizzazione dei dati sismici registrati dai tre geofoni. Al momento dell'installazione i sensori erano rispettivamente a 4.5 Hz, 1 Hz e 4.5 Hz, ma a causa di un crollo dovuto al debris-flow del 16 agosto 2021, la strumentazione è stata sostituita e ripristinata in data 26 settembre 2021, installando tre geofoni a 4.5 Hz.

In sede di analisi i segnali sismici grezzi, registrati durante ogni evento, sono stati convertiti per risultare leggibili dal software MATLAB, tramite il quale sono stati estratti i profili di velocità e l'STA (short term average) per ognuno dei tre geofoni collegati, ovvero il valore assoluto del segnale grezzo, del quale viene calcolata l'ampiezza media all'interno di finestre di 10 secondi. Solo quest'ultimo è stato osservato in dettaglio e confrontato con le immagini webcam ed i dati pluviometrici, per verificare se il tremore sismico fosse concorde alla risposta del torrente ed alla pioggia innescante. Il risultato ha effettivamente fornito buona concordanza, perciò, si è proseguito con l'analisi di uno solo dei segnali dei tre geofoni (*pri1*), del quale sono state selezionate due finestre temporali di 5 minuti l'una, in corrispondenza del momento pre-pioggia (*W1*) e durante il picco dell'evento (*W2*). Di questi due intervalli è stata ricavata la frequenza di picco $\pm 20\%$ e l'ampiezza media (**Figura 91**), per permettere di visualizzare le differenze tra il rumore di fondo ed il tremore durante il

picco. I rapporti tra le ampiezze delle finestre di picco ($AW2$) e le ampiezze pre-pioggia ($AW1$), successivamente divisi in quattro classi, sono stati utilizzati come parametro di discretizzazione in un grafico a dispersione a bolle (durata in ascissa ed intensità in ordinata), con diametro di ogni bolla direttamente proporzionale al valore del rapporto (**Figura 93**). È stato osservato che, partendo dalla base del grafico e muovendosi verso la soglia di “innesco di debris-flow”, la dimensione delle bolle aumenta proporzionalmente all’entità dell’evento, presentando la grandezza massima in corrispondenza dei due eventi di colata. Il maggior diametro della bolla dell’evento del 22/10/2022 in confronto a quello del 2021 è dato dal fatto che le $AW1$ nel 2021 erano più alte del 2022 di circa otto volte, determinando un rapporto inferiore. Tale comportamento è confermato dagli ortogrammi (**Figure 94 95, 96 e 97**), fino a quando non è stato sostituito il geofono nel canale *pri1* successivamente al 16/08/2021. Inoltre, nel 2022 i valori di $AW1$ diminuiscono ulteriormente a causa dei lavori effettuati nei mesi di maggio e giugno 2022, atti ad uniformare l’alveo.

Le frequenze di picco, invece, hanno mostrato che nel caso dei soli due fenomeni di debris-flow osservati durante il monitoraggio, $FW1$ risulta essere maggiore di $FW2$, indicando un abbassamento al passaggio di una colata detritica, stabilendosi tra i 10 Hz e i 30 Hz (**Figure 98 e 99**). Diversamente, tramite i diagram box costruiti su tutti i dati delle frequenze di picco, è stato osservato che in generale non si riscontrano differenze tra $FW1$ e $FW2$ (**Figure 100 e 101**). Gli eventi sono stati classificati sulla base del rapporto $FW1/FW2$ e poi inseriti all'interno di un grafico a dispersione, con durata in ascissa ed intensità di pioggia in ordinata, in maniera tale da correlare l'entità della precipitazione con la variazione di frequenza (**Figura 102**).

È emerso che nel caso dei debris-flow del 16/08/2021 e del 22/10/2022 il rapporto si discosta dal resto dei risultati, proporzionalmente alla magnitudo degli eventi. Per esempio, il primo è risultato il debris-flow più violento degli ultimi cinque anni, mentre il secondo quello meno intenso, probabilmente per il fatto che quest’ultimo è risultato dall’innesco per cedimento di uno sbarramento di detrito ai piedi della frana de “La Tavola” e non per erosione di fondo canale nella parte alta del bacino. Per quanto riguarda le risposte del torrente meno intense o nulle, il loro rapporto rimane vicino all’unità, dividendo nettamente la variazione di frequenza di una colata di detrito da un qualsiasi altro evento.

In conclusione, è stato possibile caratterizzare il comportamento del torrente Blé sotto punti di vista che finora non erano stati presi in considerazione, andando a studiare nel dettaglio la risposta causata da precipitazioni di diversa entità.

L’avvenimento di due colate di detrito durante il corso del monitoraggio ha permesso, durante l’analisi dei dati pluviometrici, la costruzione di soglie specifiche per il bacino del torrente Blé, una di “pre-allerta” ed una di “innesco di debris-flow”. Ne è emerso che la Soglia Ceriani risulta, in questo caso, più vicina alla prima di queste soglie, dimostrandosi più cautelativa rispetto alla seconda. Inoltre, è stato osservato che il rumore sismico aumenta nettamente durante i debris-flow, al contrario, le frequenze di picco diminuiscono, mentre in generale, in caso di avvenimento di eventi intensi che non evolvono in colate di detrito, questo non avviene. Tale fattore potrebbe indicare che finché non si genera un debris-flow, le frequenze di picco non subiscono diminuzioni notevoli. La suddetta differenza è ipotizzabile sia dovuta al transito del fronte di colata, che avviene solo in concomitanza alle colate di detrito. Questa discrepanza rappresenta un’ottima base di partenza per studi futuri, atti ad implementare il riconoscimento delle basse frequenze come indice di innesco di debris-flow, da utilizzare in un ipotetico sistema di allarme. Attraverso un monitoraggio continuo e prolungato, i cui sensori rimangano invariati nel tempo, sarebbe inoltre possibile studiare più accuratamente le soglie sperimentali ideate per confermarne la loro validità ed associarle, infine, al suddetto sistema di allerta.

BIBLIOGRAFIA

- ABANCÓ C., HÜRLIMANN M., & MOYA J. (2014). *Analysis of the ground vibration generated by debris flows and other torrential processes at the Rebaixader monitoring site (Central Pyrenees, Spain)*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(4), 929–943.
- ALBERTELLI M.L., (2021). *Studio geologico, geomorfologico, idrologico e idrogeologico finalizzato a valutare le condizioni di stabilità del torrente Blé e della frana de “La Tavola”*.
- ANDERSON S.A., SITAR N., (1995). *Analysis of rainfall-induced debris flows*. *J Geotech Eng* 544–552
- APOSTOLOV A., BENOÎT J., (2017). *Motion tracking “smart rock” device for the study of landslide and debris flow mechanisms*. In: 3rd North American Symposium on Landslides. Roanoke (USA). pp. 889–900.
- ARATTANO M., MOIA F., (1999). *Monitoring the propagation of a debris flow along a torrent*. *Hydrol. Sci. J.* 44, 811–823.
- ARATTANO M, MARCHI L, (2005). *Measurements of debris flow velocity through cross correlation of instrumentation data*. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 5, 137-142.
- ARATTANO M., MARCHI L., (2008). *Systems and sensors for debris-flow monitoring and warning*. *Sensors* 8, 2436–2452.
- ARATTANO M., ABANCÓ C., COVIELLO V., & HÜRLIMANN M. (2014). *Processing the ground vibration signal produced by debris flows: The methods of amplitude and impulses compared*. *Computers & Geosciences*, 73, 17–27.
- BADOUX A., GRAF C., RHYNER J., KUNTNER R., MCARDELL B., (2009). *A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance*. *Nat. Hazards* 517–539.
- BARDOU E., ANCEY C., BONNARD C. & VUILLET L., (2003). *Classification of debris-flow deposits for hazard assessment in alpine areas*. *Proceedings of the 3rd International Conference on debris flow hazards mitigation*, 799–808.
- BEL C., (2017). *Analysis of Debris-Flow Occurrence in Active Catchments (French Alps) From Field Monitoring Data*. PhD-thesis. Université Grenoble Alpes.
- BERGER C., MCARDELL B., FRITSCHI B., SCHLUNEGGER F., (2010). *A novel method for measuring the timing of bed erosion during debris flows and floods*. *Water Resour. Res.* 46.
- BERTI M., GENEVOIS R., SIMONI A., TECCA P. R., (1999). *Field observations of a debris flow event in the Dolomites*. *Geomorphology*, 29(3–4), 265–274.
- BERTI M. & SIMONI A., (2005). *Experimental evidences and numerical modelling of debris flow initiated by channel runoff*. *Landslides*. 2005. 171-182.
- BERTI M., SIMONI A., (2010). *Field evidence of pore pressure diffusion in clayey soils prone to landsliding*. *J. Geophys. Res.* 115, F03031.
- BERTI M., BERNARD M., GREGORETTI C., SIMONI A., (2020). *Physical Interpretation of Rainfall Thresholds or Runoff-Generated Debris Flows*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(6).

BRUNETTI M., MAUGERI M., MONTI F. & NANNI T. (2006). *Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenized instrumental time serie*, in “International Journal of Climatology”, 26, pp. 345-381

BUFFONI L., BRUNETTI M., MANGIANTI F., MAUGERI M., MONTI F. & NANNI T. (2003). *Ricostruzione del clima italiano negli ultimi 130 anni e scenari per il XXI secolo*, in Atti del Workshop “CLIMAGRI”, Cagliari, 16-17 gennaio. Sito web: www.climagri.it

CAINE N., (1980). *The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flow*. In “Geografiska Annaler”, 62 (1-2), pp. 659-675.

CERIANI M., LAUZI S. & PADOVAN N. (1992). *Rainfalls and landslides in the alpine area of Lombardia Region, Central Alps, Italy*, in *Proceedings of the International Symposium “Intrapraevent 1992”*, Bern, pp.9-20.

CERIANI M., LAUZI S. & PADOVAN, N., (1994). *Rainfall thresholds triggering debris-flows in the alpine area of Lombardia Region, central Alps - Italy*. Proc. Man and Mountain. 123-139.

CERIANI M. & CARELLI M., (2000). *Carta delle precipitazioni medie, minime e massime annue del territorio alpino lombardo (registrate nel periodo 1891 – 1990)*. Scala 1:250.000. Regione Lombardia, Direzione Generale Territorio ed Urbanistica, U.O. Difesa del Suolo, Struttura Rischi Idrogeologici e Sismici.

CHAMBERS J., MELDRUM P., GUNN D., WILKINSON P., MERRITT A., MURPHY W., WEST J., KURAS O., HASLAM E., HOBBS P., PENNINGTON C., MUNRO C., (2013). *Geophysical-geotechnical sensor networks for landslide monitoring*. In: Proceedings of the Second World Landslide Forum. Rome. pp. 1–6.

CHANG S.Y., (2003). *Evaluation of a system for detecting debris flows and warning road traffic at bridges susceptible to debris flow hazard*. Proceedings of the Third International Conference on Debrisflow. Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Davos, 10-12. Rickenmann, D.; Chen, C. L., Eds.; Millpress: Rotterdam, 2003; pp. 731–742.

COMITI F., MARCHI L., MACCONI P., ARATTANO M., BERTOLDI G., BORGA M., BRARDINONI F., CAVALLI M., D’AGOSTINO V., PENNA D., THEULE J., (2014). *A new monitoring station for debris flows in the European Alps: first observations in the Gadria basin*. Nat. Hazards 73, 1175–1198.

COVIELLO V., ARATTANO M., & TURCONI L., (2015). Detecting torrential processes from a distance with a seismic monitoring network. Natural Hazards, 78(3), 2055–2080.

COVIELLO V., ARATTANO M., COMITI F., MACCONI P., & MARCHI L., (2019). *Seismic characterization of debris flows: Insights into energy radiation and implications for warning*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 124, 1440–1463.

CROSTA G.B., DAL NEGRO P., (2003). *Observations and modelling of soil slip-debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the Sarno 1998 event*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 3, 53–69.

CROZIER, M. J., (1996). *Magnitude/frequency issues in landslide hazard assessment*. In: Mausbacher, R. and Schulte, A. (Eds) Beitrage zur Physiogeographie. Barsch F estschrift, Heidelberger Geographische Arbeiten. Heft 104, p. 221-236.

CRUDEN & VARNES, (1996). *Landslides: Investigation & Mitigation*. Landslides (Vol. 6).

- D'AGOSTINO, V., MARCHI L., (2003). *Geomorphological estimation of debris flow volumes in alpine basins*. In: Rickenmann D, Chen C (eds) Proc 3rd Int Conf on Debris Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Davos, 2:1097–1106
- DAVIES T.R.H., (1997). *Using hydrosience and hydrotechnical engineering to reduce debris flow hazards*. Proceedings of the First International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, San Francisco, August 7-9,; Chen C.; Ed.; Water Resources Engineering Division - ASCE: New York, 1997; pp. 787-810.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2004). *Impacts of Europe's changing climate*, Report n.2, Copenhagen, pp. 107.
- GODT J.W., BAUM R.L., LU N., (2009). *Landsliding in partially saturated materials*. Geophys. Res. Lett. 36, L02403.
- GOSSO G., SPALLA M.I., SILETTO G.B., BERRA F., BINI A., FORCELLA F., (2011). *Note illustrativa della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50,000, foglio 057 – MALONNO*. ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), Servizio Geologico d'Italia; pp. 69-
- GOVI M. & SORZANA P.F., (1980). *Landslide susceptibility as a function of critical rainfall amount in Piedmont basin (Northwestern Italy)*, in “Studia Geomorphologica CARPatho-Balcanica”, Krakow, 14, pp.43-61.
- GOVI M., MORTARA G. & SORZANA P.F., (1985). *Eventi idrologici e frane*, in “Geologia applicata e idrogeologia”, XX, Parte II, pp. 359-375.
- GREGORETTI C., DEGETTO M., BERNARD M., CRUCIL G., PIMAZZONI A., DE VIDO G., BERTI M., SIMONI A., LANZONI S., (2016). *Runoff of small rocky headwater catchments: field observations and hydrological modeling*. Water Resour. Res. 52, 8138–8158.
- HABIB E., KRAJEWSKI W., KRUGER A., (2001). *Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements*. J. Hydrol. Eng. 6, 159–166.
- HU K., WEI F., LI Y., (2011). *Real-time measurement and preliminary analysis of debris-flow impact force at Jiangjia Ravine, China*. Earth Surf. Process. Landforms 36, 1268–1278.
- HÜBL J., SUDA J., PROSKE D., KAITNA R., SCHEIDL C., (2009). *Debris flow impact estimation*. In: Popovska, C., Jovanovski, M. (Eds.), 11th Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. Ohrid, Macedonia. pp. 137–148.
- HÜBL J., SCHIMMEL A., KOSCHUCH R., (2018). *Evaluation of different methods for debris flow velocity measurements at the Lattenbach Creek*. Interpraevent 2018. pp. 2–8 Toyama, Japan, Japan.
- HUNGR O., MORGAN G.C., VAN DINE D.F., LISTER R.D., (1987). *Debris flow defenses in British Columbia*. In Debris Flows / Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation; Costa, J.E. and Wieczorek, G.F., Eds.; Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, 7, pp. 201-222.
- HUNGR O., EVANS S. G., BOVIS M. J., & HUTCHINSON J. N., (2001). *A review of the classification of landslides of the flow type*. Environmental and Engineering Geoscience, 221–238.
- HÜRLIMANN M., ABANCÓ C., MOYA J., VILAJOSANA I., (2014). *Results and experiences gathered at the Rebaixader debris-flow monitoring site, Central Pyrenees, Spain*. Landslides 11, 939–953.

HÜRLIMANN M., COVIELLO V., BEL C., GOU X., BERTI M., GRAF C., HÜBL J., MIYATA S., SMITH J. B., YIN H. Y., (2019). *Debris-flow monitoring and warning: Review and examples*. Earth-Science Reviews 199.

HUTCHINSON J.W., (1988). *General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, edited by: Bonnard, C., Balkema, Rotterdam: 3–35.

IVERSON R.M., (1997). *The physics of debris flow*. Reviews of geophysics, 35(3), 245 – 296.

IVERSON R.M., REID M.E., LAHUSEN R.G., (1997). *Debris-flow mobilization from landslides*. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 25, 85–138.

JACQUEMART M., MEIER L., GRAF C., MORSDORF F., (2017). *3D dynamics of debris flows quantified at sub-second intervals from laser profiles*. Nat. Hazards 89, 785–800.

JAKOB M., & HUNGR O., (2005). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, Berlin pp.739.

JONES S.B., WRAITH J.M., OR D. (2002). *Time domain reflectometry measurement principles and applications*. 16(1), 141–153.

KEAN J.W., COE J.A., COVIELLO V., SMITH J.B., MCCOY S.W., ARATTANO M., (2015). *Estimating rates of debris flow entrainment from ground vibrations*. Geophys. Res. Lett. 42, 6365–6372.

LAHUSEN R., (2005). *Debris-flow instrumentation*. In: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), *Debris- Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, Berlin, pp. 291–304.

LAI V.H., TSAI V.C., LAMB M.P., ULIZIO T.P., BEER A.R., (2018). *The seismic signature of debris flows: flow mechanics and early warning at Montecito, California*. Geophys. Res. Lett. 45, 5528–5535.

LEE H.C., BANERJEE A., FANG Y.M., LEE B.J., KING C.T., (2010). *Design of a multifunctional wireless sensor for in-situ monitoring of debris flows*. IEEE Trans. Instrum. Meas. 59, 2958–2967.

LIU K.F., CHEN S.C., (2003). *Integrated debris flow monitoring system and virtual center*. Proceedings of the Third International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Davos, 10-12; Rickenmann, D.; Chen, C. L., Eds.; Millpress: Rotterdam, 2003; pp. 767-774.

MAGNO M., BRUNELLI D., GIUFFRIDA R., LEONARDI S., BENINI L., (2014). *A portable hybrid hydrogen fuel cell-battery power unit for wireless sensor network*. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2014) 1–6.

MARRA F., NIKOLOPOULOS E.I., CREUTIN J.D., BORGA M., (2016). *Space-time organization of debris flows-triggering rainfall and its effect on the identification of the rainfall threshold relationship*. J. Hydrol. 541, 246–255.

MCARDELL B. W, P. BARTELT, KOWALSKI J., (2007). *Field observations of basal forces and fluid pore pressures in a debris flow*, geophys. Res. Lett, 34.

- MCCOY S. W., KEAN J. W., COE J. A., STALEY D. M., WASKLEWICZ T. A., TUCKER G. E., (2010). *Evolution of a natural debris flow: In situ measurements of flow dynamics, video imagery, and terrestrial laser scanning*. *Geology*, 38, 735-738.
- MCCOY S.W., COE J.A., KEAN J.W., TUCKER G.E., STALEY D.M., WASKLEWICZ T.A., (2011). *Observations of debris flows at Chalk Cliffs, Colorado, USA: part 1, in situ measurements of flow dynamics, tracer particle movement and video imagery from the summer of 2009*. *Ital. J. Eng. Geol. Environ.* 65–75.
- MCCOY S.W., KEAN J.W., COE J.A., TUCKER G.E., STALEY D.M., WASKLEWICZ T.A., (2012). *Sediment entrainment by debris flows: in situ measurements from the headwaters of a steep catchment*. *J. Geophys. Res.* 117, F03016.
- NAGL G., HÜBL J., (2017). *A check-dam to measure debris flow-structure interactions in the Gadria torrent*. In: Mikoš, M., Vilímek, V., Yin, Y., Sassa, K. (Eds.), *Advancing Culture of Living With Landslides*. Springer International Publishing, Cham, pp. 465–471.
- NIKOLOPOULOS E.I., CREMA S., MARCHI L., MARRA F., GUZZETTI F., BORGA M., (2014). *Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence*. *Geomorphology* 221, 286–297.
- OR, D., (2001). *Who Invented the Tensiometer?*. *Soil Science Society of America Journal*, 65(1).
- PIERSON T. C., (1980). *Erosion and deposition by debris flows at Mt. Thomas, North Canterbury, New Zealand*. *Earth Surf. Processes*, 5, 227–247.
- RAPPELLI F., (2008). *Definizione delle soglie pluviometriche d'innescio di frane superficiali e colate torrentizie: accorpamento per aree omogenee*. IRER – Istituto Regionale di Ricerca della Lombardia. Pg. 23-28
- REGIONE LOMBARDIA, PROTEZIONE CIVILE, PREVENZIONE E POLIZIA LOCALE, (2000). *Inventario dei fenomeni franosi in Lombardia*. Progetto IFFI – Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia. Pg. 53 - 56
- SAVAGE W.Z., BAUM R.L., (2005). *Instability of steep slopes*. In: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, pp. 53–79.
- SCHIMMEL A., & HÜBL J. (2015). *Automatic detection of debris flows and debris floods based on a combination of infrasound and seismic signals*. *Landslides*, 13(5), 1181–1196.
- SCHIMMEL A., HÜBL J., MCARDELL B.W., WALTER F., (2018). *Automatic identification of alpine mass movements by a combination of seismic and infrasound sensors*. *Sensors* 18 (5).
- SCHMIDL J, SCHMUTZ C, FREI C, WANNER H, SCHÄR C, (2002). *Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century*. 22(9), 1049–1074.
- SIDLE R.C., SWANSTON D.N., (1982). *Analysis of a small debris slide in coastal Alaska*. *Can Geotech J* 19(2):167–174
- THEULE J.I., LIÉBAULT F., LOYE A., LAIGLE D., JABOYEDOFF M., (2012). *Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 731–749.

VENTURELLI M., (2021). *Analisi geologico tecnica del bacino di colata del torrente Blè (BS)*. Università di Bologna. Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali. Tesi di Laurea Magistrale – Geologia e Territorio.

WENDELER C., VOLKWEIN A., ROTH A., DENK M., WARTMANN S., (2007). *Field measurements and numerical modelling of flexible debris flow barriers*. Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics Prediction and Assessment. pp. 681–687.

WENTWORTH C.K., (1922). *A scale of grade and class terms for clastic sediments*. J. Geology V. 30, 377-392.

WIECZOREK G.F., (1987). *Effect of rainfall intensity and duration on debris flow in central Santa Cruz mountains, California*, in *Debris Flow/Avalanches: process, recognition and migration*. *Reviews in Engineering Geology*, Volume VII, Geological Society of America, Boulder, Colorado.

WIECZOREK G.F., GLADE T., (2005). *Climatic factors influencing occurrence of debris flow*. In: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, Berlin, pp. 325–362.

SITOGRAFIA

<https://www.geoportale.regione.lombardia.it>

https://www.meteoblue.com/it/tempo/historyclimate/climatemodelled/breno_italia_3181569

<https://www.intrageo.it/geologia/geomorfologia/che-cosa-e-un-debrisflow/#Lecaratteristichediundebrisflow>

<http://www.turismovallecamonica.it/it/content/benvenuti-valle-camonica-la-valle-dei-segni>

<http://mamodis.ddns.net>

