

Progetto: “VAIA-FRONT Lessons learnt to future options: VAIA-FRONT”

Evento di piena del 27-29 ottobre 2018 sul bacino del Rio Rotian: stima della precipitazione e valutazione della sua severità

Data

24.02.2020

Numero Rapporto

1.2

REVISIONE NUMERO:

.2

Numero Rapporto:
Autore del Rapporto:

Rapporto 1.2
Marco Borga

LIVELLO DIFFUSIONE RAPPORTO – PU

PU	PUBBLICO
RUP	RISTRETTO UFFICIO + PARTNERS
RU	RISTRETTO UFFICIO
CO	CONFIDENZIALE

Coordinatore: Marco Borga, Università di Padova

INFORMAZIONI SUL DOCUMENTO

Titolo	Rapporto 1.2
Autore	Marco Borga
Co-autori	Mattia Zaramella

SVILUPPO DEL DOCUMENTO

Data	Revisione	Preparata da	Ufficio	Approvata da	Note
2020.02.17	1.1	Mattia Zaramella		Marco Borga	
2020.02.24	1.2	Marco Borga			

SOMMARIO

Questa Relazione ha l'obiettivo generale di conseguire la stima e la valutazione della severità della precipitazione che ha portato all'innescò delle tre colate detritiche che hanno colpito l'abitato di Dimaro il giorno 29 ottobre 2018. Muovendo da questo obiettivo, il lavoro sviluppa due obiettivi specifici: i) stima delle precipitazioni nel periodo 27-29 ottobre 2018 sulla testata del bacino idrografico del Rio Rotian; ii) valutazione del grado di severità delle precipitazioni corrispondenti, tramite analisi delle precipitazioni massime stimate (presso il bacino di studio) e registrate (presso un numero limitato di pluviometri) durante l'evento per le durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore e 3 giorni consecutivi.

Per gli scopi dell'analisi sono state utilizzate diverse sorgenti di dati: i) osservazioni radar relative alle stazioni radar di M. Macaion (Provincia di Trento), di M. Grande (Regione Veneto), e di Weissfluh, presso Davos (Canton Grigioni, Svizzera); ii) dati di precipitazione, temperatura e intensità e direzione del vento a risoluzione di 5 min dalle stazioni meteo di MeteoTrentino (Provincia Autonoma di Trento) e dell'Ufficio Idrografico di Bolzano (Provincia Autonoma di Bolzano); iii) dati di precipitazione, temperatura e intensità e direzione del vento a risoluzione di 15 min dalle stazioni meteo della Fondazione Mach; iv) archivio delle precipitazioni massime annuali di durata pari a 1, 3, 6, 12, 24 ore e 3 giorni consecutivi per il periodo 1920-2018 (e quindi comprensive dei dati di precipitazioni relativi all'evento in esame) per le stazioni di MeteoTrentino (Provincia Autonoma di Trento). Le elaborazioni statistiche sono state condotte utilizzando il metodo degli L-moments e la distribuzione GEV, risultata idonea per tutte le durate considerate.

Le stime di pioggia sono state condotte ad intervallo orario, con l'eccezione del periodo compreso fra le 17:00 e le 20:00 del 29 ottobre, caratterizzato da precipitazioni intense e corrispondente alle fasi di innescò delle colate. Per questo periodo limitato le stime sono state condotte ad intervalli di 20 minuti.

I risultati conseguiti mostrano che l'evento è stato caratterizzato da un valore cumulato di precipitazione, riferito al periodo di 3 giorni dal 27 al 29 ottobre 2018, pari a 359 mm. I massimi sulle durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore e 3 giorni consecutivi sono rispettivamente pari a 24,8 mm, 53,2 mm, 73,4 mm, 104,2 mm, 165,4 mm e 359,0 mm. I tempi di ritorno corrispondenti sono rispettivamente compresi fra 30 e 50 anni per 1 ora, fra 100 e 200 anni per 3, 6 e 12 ore, compresi fra 200 e 300 anni per 24 ore, e superiori a 300 anni per 3 giorni consecutivi. Su questa base, l'evento è pertanto da considerarsi eccezionale, dove con tale termine si individui un evento di natura idro-meteorologica caratterizzato da un tempo di ritorno superiore a 100 anni (Stephenson, 2008). Le caratteristiche di eccezionalità dell'evento sono inoltre amplificate dal verificarsi delle precipitazioni più intense nella fase finale dell'evento, quando i versanti hanno già raggiunto un buon grado di saturazione in ragione delle piogge pregresse.

La serie temporale delle precipitazioni così stimate rende ragione dell'innescò di due delle tre pulsazioni di colata che hanno interessato l'abitato di Dimaro nella serata del 29 ottobre 2018, evidenziando due picchi di precipitazione nei periodi compresi fra le 18:20 e le 19:00 CET (Central European Time), e fra le 19:20 e le 19:40 CET, sostanzialmente coincidenti con le indicazioni dedotte da una serie di interviste relative alla tempistica delle colate detritiche osservate presso l'abitato di Dimaro.

INDICE

1.	Introduzione	1
2.	Stima delle precipitazioni in corrispondenza della testata del bacino del Rio Rotian per il periodo 27-29 ottobre 2018.....	2
3.	Valutazione della severità delle precipitazioni: modello probabilistico GEV e stima dei parametri.....	14
3.1	Metodo di stima dei parametri.....	15
3.2	Stima dei parametri della distribuzione GEV tramite il metodo dei momenti lineari.....	16
3.3	Analisi regionale tramite il modello probabilistico GEV ed i momenti lineari.	17
3.4	Analisi di discordanza dei dati.....	17
3.5	Valutazione delle caratteristiche di omogeneità di una regione assegnata	17
3.6	Selezione del modello probabilistico regionale.....	18
3.7	Stima della distribuzione di frequenza regionale.....	19
3.8	Applicazione alla regione di studio	19
4.	Conclusioni.....	26
5.	Riferimenti bibliografici.....	27

1. Introduzione

Questa Relazione ha due obiettivi: i) stima della precipitazione nel periodo 27-29 ottobre 2018 sulla testata del bacino idrografico del Rio Rotian; ii) valutazione del grado di severità delle precipitazioni corrispondenti, tramite analisi delle precipitazioni massime stimate e registrate durante l'evento per le durate di: 1, 3, 6, 12, 24 ore e 3 giorni.

Per gli scopi dell'analisi sono state utilizzate diverse sorgenti di dati (Fig. 1): i) osservazioni radar relative alle stazioni radar di M. Macaion (Provincia di Trento), di M. Grande (Regione Veneto), e di Weissfluh, presso Davos (Canton Grigioni, Svizzera); ii) dati di precipitazione, temperatura e intensità e direzione del vento a risoluzione di 5 min dalle stazioni meteo di MeteoTrentino (Provincia Autonoma di Trento) e dell'Ufficio Idrografico di Bolzano (Provincia Autonoma di Bolzano); iii) dati di precipitazione, temperatura e intensità e direzione del vento a risoluzione di 15 min dalle stazioni meteo della Fondazione E. Mach di S. Michele all'Adige; iv) archivio delle precipitazioni massime annuali di durata pari a 1, 3, 6, 12, 24 ore e 3 giorni per il periodo 1920-2018 per le stazioni di MeteoTrentino (Provincia Autonoma di Trento).

Le stime di pioggia sono state condotte ad intervallo orario, con l'eccezione del periodo compreso fra le 17:00 e le 20:00 del 29 ottobre, caratterizzato da precipitazione convettiva. Per questo periodo limitato le stime sono fornite ad intervalli di 20 minuti.

La valutazione della severità delle precipitazioni innescanti un evento idrogeologico come quello che ha interessato il bacino del rio Rotian il 29 ottobre 2018 richiede un'adeguata conoscenza del regime delle piogge intense nell'area di studio. Tale conoscenza costituisce elemento di fondamentale importanza per un'esauriente definizione delle caratteristiche climatiche del territorio ed è requisito essenziale per la valutazione del rischio idraulico e idrogeologico.

L'interesse applicativo che muove l'indagine è focalizzato su tempi di ritorno potenzialmente elevati rispetto alle numerosità campionarie disponibili per ciascuna stazione pluviografica. La ricerca nel campo dell'idrologia statistica ha evidenziato che un'accurata stima dei quantili di precipitazione per tempi di ritorno elevati rispetto alla numerosità campionaria richiede l'adozione di tecniche di tipo regionale che, utilizzando l'informazione disponibile su tutte le stazioni di misura dislocate su un'area omogenea rispetto alla grandezza idrologica in esame, consentono di compensare la limitata informazione disponibile in ciascuna di esse.

L'analisi di frequenza delle altezze di pioggia massime annuali, indicate qui come variabile X , di durata compresa fra 1 ora e 3 giorni consecutivi, è stata sviluppata nell'ambito della presente indagine nell'ipotesi che le distribuzioni di probabilità di X , all'interno del territorio in esame (considerato statisticamente omogeneo) siano fra loro identiche a meno di un fattore di scala. In pratica ciò significa che è sufficiente definire a) un'unica distribuzione di frequenza adimensionale o 'curva di crescita', valida per l'intera area omogenea e b) una legge che, al variare della posizione geografica all'interno dell'area omogenea, definisce il fattore di scala o 'grandezza indice'. La curva di crescita è rappresentata da $X'(T)$, dove X' , fattore di crescita, è il quantile adimensionale con probabilità di superamento pari a $1/T$ e dove T indica il tempo di ritorno in anni. La grandezza indice è invece costituita dal valore medio dei massimi annuali delle altezze di pioggia di durata assegnata.

Nella relazione viene inizialmente illustrata (Sezione 2) la metodologia di stima delle precipitazioni per l'evento del 27-29 ottobre 2018, mentre la Sezione 3 descrive il modello probabilistico GEV e la tecnica di stima dei parametri mediante procedura regionale basata sui momenti lineari (Hosking, 1990). Viene successivamente (Sezione 4) descritta la tecnica di verifica delle ipotesi di base della procedura, mediante verifica dell'omogeneità della regione

di studio e verifica di accettabilità del modello probabilistico considerato. Nella Sezione 5 viene descritta l'applicazione della procedura all'area del bacino del rio Rotian.

2. Stima delle precipitazioni in corrispondenza della testata del bacino del Rio Rotian per il periodo 27-29 ottobre 2018

L'evento di precipitazione si sviluppa nel periodo dalle 22:40 CET (Central European Time, corrispondente all'orario solare italiano; tale riferimento temporale viene utilizzato sistematicamente in questa relazione) del 26 ottobre 2018 alle 14:25 CET del 30 ottobre 2018. Tuttavia le precipitazioni che si sono verificate il 26 ottobre sono davvero modeste (corrispondenti a 3.2 mm), mentre quelle relative al 30 ottobre, più cospicue, sono successive agli eventi di interesse ultimo per questa analisi (descrizione delle circostanze idro-meteorologiche che hanno portato all'innescio delle tre colate detritiche che hanno colpito l'abitato di Dimaro, verificatesi rispettivamente nei seguenti tre intervalli: 19:00-19:02 CET, 19:47-20:00 CET, e 23:30-23:40 CET, sulla base di 14 testimonianze qualificate raccolte dopo l'evento e descritte in Appendice. L'area di interesse è limitata alla porzione del bacino del Rio Rotian che è delimitata inferiormente dalla prima briglia a monte (posta a quota 1200 m s.l.m.) e superiormente dalla testata del bacino (a quota 1980 m s.l.m.).

Le precipitazioni nel periodo di interesse si sono sviluppate in due fasi distinte: la prima dalle 22:40 del 26 ottobre alle 18:00 del 28 ottobre, la seconda dalle 02:00 del 29 ottobre alle 14:25 del 30 ottobre, e quindi con uno iato di precipitazione (caratterizzato da precipitazioni orarie inferiori oppure eguali a 0.2 mm) pari ad 8 ore continue. La prima fase dell'evento è caratterizzata da precipitazioni in genere stratiformi, fortemente influenzate dall'orografia, e caratterizzate da uno zero termico localmente depresso ma comunque fortemente variabile nello spazio e nel tempo. La seconda parte dell'evento è invece caratterizzata dalla irruzione di un fronte freddo con formazione di convezione profonda nel pomeriggio del 29 ottobre, soprattutto a partire dalle 17:00 e fino alle 20:00. Durante tale periodo si stabilisce sulla zona di interesse una banda convettiva stazionaria che si origina in corrispondenza del gruppo montuoso del Carega ed attraversa il Trentino da Sud-Est a Nord-Ovest fino all'alto bacino del Noce. Nello stesso periodo si sono osservati venti molto intensi, che hanno avuto la possibilità di disturbare in modo significativo la misura dell'altezza di pioggia. L'analisi delle temperature porta a ritenere che fino alle 20:00 del 29 ottobre non si siano verificate precipitazioni in forma solida sul bacino di studio. Dalle 20:00 del 29 ottobre fino alle 4:00 del 30 ottobre l'esame dei dati di temperatura dell'aria indica una rapida diminuzione delle temperature per il bacino di studio, che porta a valori di temperatura negativa in corrispondenza della testata del bacino e quindi alla formazione di precipitazione in fase solida nelle prime ore del 30 ottobre.

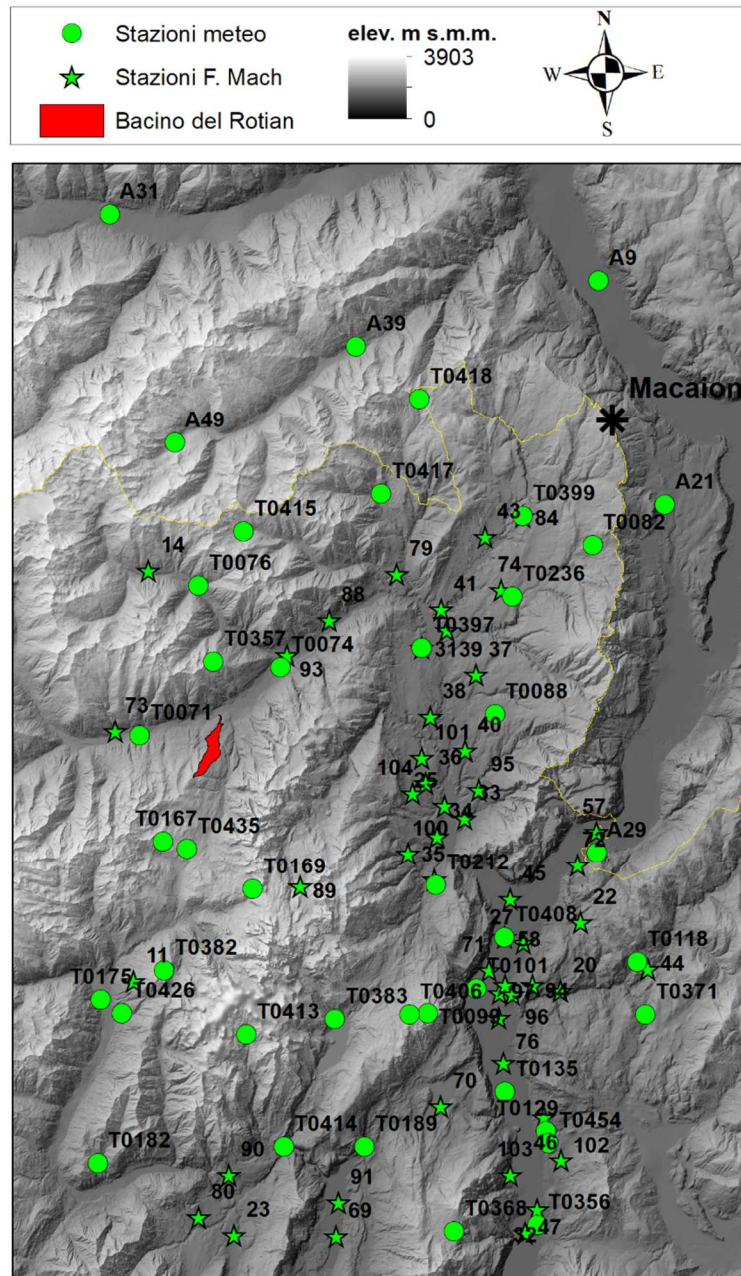


Fig. 1: Ubicazione del bacino di studio, delle stazioni di misura (precipitazione, temperatura e vento) e della stazione radar meteorologica di M. Macaion.

La natura dei fenomeni meteorologici descritti ha influenzato la selezione delle metodologie di stima delle precipitazioni utilizzate nel lavoro illustrato in questo rapporto. Come illustrato in Fig. 2, l'area di studio è infatti caratterizzata da perfetta osservabilità radar (assenza di occlusione orografica, determinata dalla interazione fra fascio radar ed orografia) per la stazione radarmeteorologica di M Macaion, mentre è affetta da occlusione alle basse elevazioni radar sia per quel che riguarda la stazione di M Grande che di Weissfluh (la Fig. 2 riporta la percentuale di potenza non occlusa dall'orografia simulata per le stazioni di M Macaion e M. Grande, per diverse elevazioni utilizzate in modo operativo dalle due stazioni; non è stato possibile replicare analoga simulazione per la stazione di Weissfluh causa la mancata disponibilità dei parametri radar di interesse). L'area di studio dista 36 km dalla stazione di M. Macaion, e circa 110 km dalla stazione di M. Grande.

Tuttavia, l'esame delle osservazioni radar di precipitazione per il periodo dall'inizio dell'evento fino alle 16:00 del 29 ottobre ha evidenziato la presenza di un profilo verticale di riflettività (Borga, 2002) marcatamente variabile nello spazio e nel tempo, tale da rendere incerta la estrapolazione del dato di riflettività radar misurato in quota verso il suolo. Lo stesso esame ha evidenziato invece strutture di precipitazioni convettive e caratterizzate da elevato gradiente di pioggia per il periodo dalle 16:00 alle 23:00 del 29 ottobre. Tale evenienza ha suggerito di utilizzare due metodologie diverse per la stima delle precipitazioni sul bacino di studio: i) stima basata su *kriging* con *drift* esterno ed uso di dati da stazioni pluviometriche per il periodo fino alle 17:00 del 29 ottobre e dalle 21 alle 24 dello stesso giorno, ii) stima basata sull'impiego congiunto di osservazioni radar e dati da stazioni pluviometriche per il periodo dalle 17:00 alle 20:00 del 29 ottobre.

L'esame delle stime radar relative alle stazioni radar più vicine (M. Macaion e M. Grande) ha rivelato la importante influenza di effetti parassiti legati all'attenuazione del segnale radar dovuto alla sua propagazione in zone di pioggia intensa. Per questo motivo, le stime radar sono state prima corrette per l'influenza dell'attenuazione e quindi calibrate utilizzando regressione lineare con corrispondenti valori pluviografici. Tale procedura non è stata applicata sistematicamente all'intero campo di pioggia, ma ad un numero limitato di celle radar, caratterizzate da buona visibilità radar e da limitati valori di attenuazione residua. Tali valori sono stati poi calibrati utilizzando concomitanti dati da pluviografo. Le stime di pioggia finali relative al periodo 17:00-20:00 sono state ottenute tramite interpolazione *kriging* dei dati pluviografici e dei dati radar corretti, utilizzando una funzione di variogramma anisotropo. Le caratteristiche di anisotropia (molto accentuata) e di direzionalità del variogramma utilizzato sono state dedotte dalle stime di pioggia ottenute sulla base dell'informazione radar.

La Tabella 1 riporta le caratteristiche delle stazioni meteo, appartenenti alcune alla rete di MeteoTrentino (indicate con Targa T), altre a quella della Fondazione Mach (indicate con numerazione semplice), utilizzate in questa relazione.

Tabella 1. Posizione e quota delle stazioni di misura della precipitazione prossime al bacino utilizzate nello studio

Nome	codice	x	y	Quota (m s.l.m.)
Mezzana	T0071	638270	5130400	905
Malè	T0074	647600	5134900	720
Pradalago (Rifugio Viviani)	T0167	639820	5123400	2084
Monte Groste' (Rifugio Graffer)	T0169	645750	5120200	2262
Pinzolo	T0175	635700	5112900	760
Pellizzano	73	636632	5130690	986
Malga Flavona	89	648880	5120380	2006
Terzolas	93	648003	5135720	730

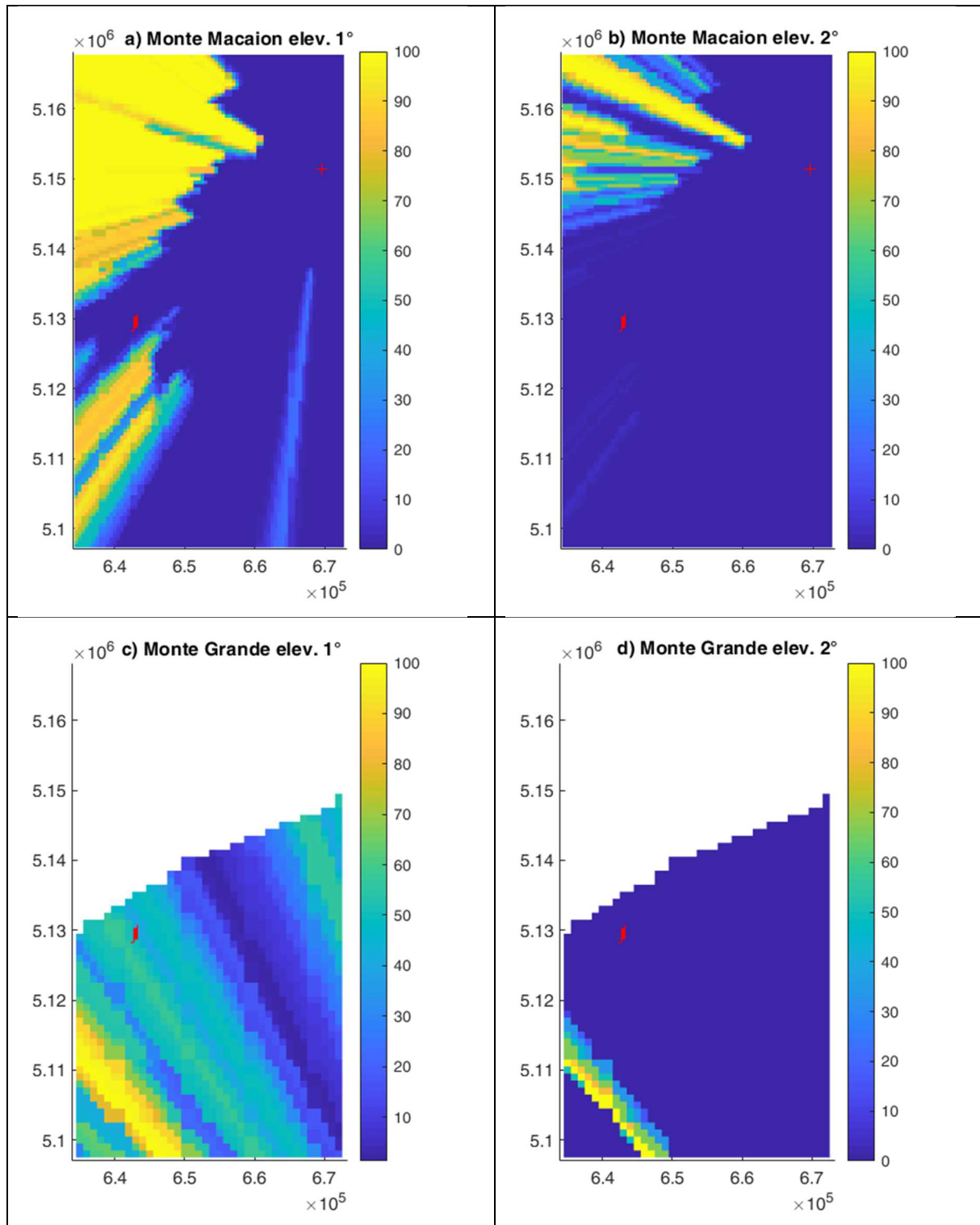


Fig. 2: Percentuale di potenza relativa al fascio radar utilizzato dalle stazioni di M Grande e M Macaion, in corrispondenza della zona di indagine e per le due elevazioni più basse del fascio radar (1° e 2°). La posizione del bacino del Rio Rotian è riportata in colore rosso. Le figure descrivono i risultati ottenuti tramite la modellazione numerica (Borga et al., 2000) della propagazione in atmosfera del fascio radar per le due stazioni radar, e la sua interazione con l'orografia (rappresentata da un modello numerico del terreno a risoluzione di 30 m).

L'evidenza di venti intensi per il periodo dalle 17:00 alle 19:00 del 29 ottobre ha inoltre suggerito di prendere in considerazione la correzione delle misure di pioggia per tener conto di possibili errori di misura delle precipitazioni da stazione pluviografica.

Le misure di precipitazione sono soggette infatti, in misura notevole, ad errori sia casuali che sistematici. L'errore sistematico è determinato da diverse concause. La più rilevante deriva dall'accelerazione, verticale ed orizzontale, del vento in corrispondenza del pluviometro, che devia la traiettoria delle più piccole gocce d'acqua. Ne deriva che la quantità d'acqua raccolta e misurata dal pluviometro durante l'evento di precipitazione è minore della quantità d'acqua che effettivamente cade al suolo.

Il valore della sottostima della misura di precipitazione dovuto al vento dipende dai seguenti fattori:

- Velocità del vento in corrispondenza della bocca del pluviografo;
- Fase della precipitazione (solida o liquida);
- Velocità di caduta delle idrometeore e distribuzione diametrica delle gocce d'acqua;
- Intensità della pioggia;
- Proprietà aerodinamiche dello strumento di misura.

L'influenza di questi fattori dipende inoltre dalle caratteristiche del sito e dal clima locale (p.es., dipende dalla temperatura dell'aria) (Kochendorfer et al., 2016; Wolff et al., 2014).

Gran parte della ricerca relativa alla valutazione dell'errore sistematico di misura di precipitazione dovuto al vento è stata indirizzata alle precipitazioni solide. Tuttavia, anche la misura delle precipitazioni liquide è influenzata in modo significativo dalla presenza e dall'intensità del vento. Eventi di precipitazione caratterizzati da co-occorrenza di piogge intense ed elevate velocità del vento sono particolarmente esposti ad errori di misura di tale tipo. Il lavoro di Archer et al. (2007) illustra le caratteristiche di un evento di piena che ha colpito il bacino del Tyne nel Regno Unito (7-8 gennaio 2005), durante il quale vennero misurate raffiche di vento di 41 m/s (150 km/hr). In ragione della conseguente sottostima di pioggia, i deflussi misurati per l'evento risultarono inferiori alla stima di pioggia areale innescante l'evento. Bruce e Clark (1966) riportano una potenziale sottostima della pioggia liquida pari a 40% per velocità del vento maggiore di 11 m/s (40 km/hr). ISPRA (2010) riporta la seguente Tab. 2, pubblicata in Hydrology Center (1988), al fine di dare una valutazione della sottostima della misura di pioggia in ragione dell'azione del vento. La lettura del rapporto di riferimento (Hydrology Center, 1988) indica che la precipitazione considerata per la redazione della tabella è quella liquida. Il rapporto, tuttavia, non offre indicazioni esaustive in grado di confermare le valutazioni riportate.

Tabella 2- Relazione fra la velocità del vento e sottostima della pioggia in percentuale (Hydrology Center, 1988)

Velocità del vento (km/hr)	Sottostima della misura (%)
0	0
10	8
20	21
30	32
40	41
60	47
80	50

Ricerche pubblicati recentemente tendono comunque a supportare i valori riportati in Tab. 2, anche se i risultati disponibili si riferiscono a valori di velocità del vento assai minori rispetto a quelli misurati nel contesto dell'episodio Vaia. Colli et al. (2018), sulla base di studi condotti

simulando con strumenti di fluidodinamica computazionale gli effetti della presenza di pluviometri di diversa forma e dimensione sul campo di vento, mostrano che la componente di turbolenza in corrispondenza della bocca del pluviometro aumenta in modo non lineare con l'aumentare della velocità del vento. Colli et al. (2017), sulla base di analisi empiriche condotte su misure comparative di sottostime di pioggia dovute a vento, trova una sottostima del 23% per velocità del vento di 8,1 m/s (29 km/h) con pluviometri (di forma cilindrica) simili a quelli utilizzati dalla Provincia Autonoma di Trento per la misura di precipitazione. Valori simili sono riportati da Pollock et al. (2018).

Non sono disponibili misure di velocità del vento per le stazioni pluviografiche più prossime al bacino di studio. L'esame dei valori di raffica riportati per le stazioni di misura più vicine variano da 47,2 km/h per Malè a 142 km/h per P.sso Tonale, con un valore di 83,2 km/h riportato per la stazione del Dos del Sabion. Stime condotte utilizzando misure Doppler di velocità radiale degli echi radar (misure da M Macaion) inducono a stimare velocità del vento nella zona di esame variabili nel tempo e comprese fra 20 km/h per le 18:00 e 60 km/h per le 19:00, per ritornare a valori più modesti per le 20:00. E' possibile quindi notare un andamento crescente dei valori di velocità del vento con la quota e con l'intensità di pioggia. Per corroborare tale andamento, è stato possibile stabilire una relazione fra intensità di pioggia oraria e corrispondente velocità del vento (Fig. 3), nel periodo dalle 17:00 alle 20:00 del 29 ottobre. La relazione mostra come nelle prime due ore ad elevati valori di precipitazione corrispondano anche pronunciate velocità del vento; la relazione si inverte verso la fine del periodo di studio.

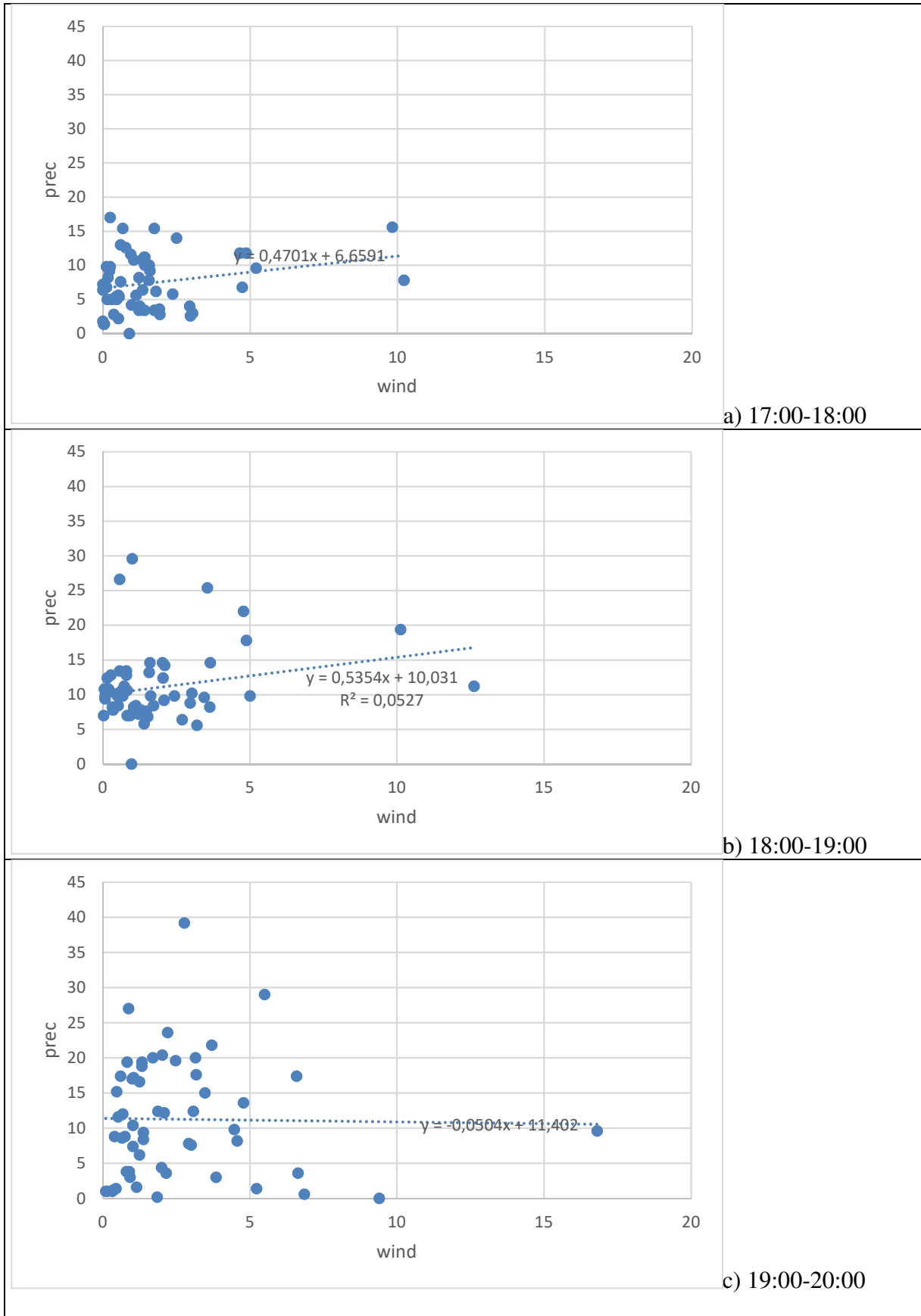


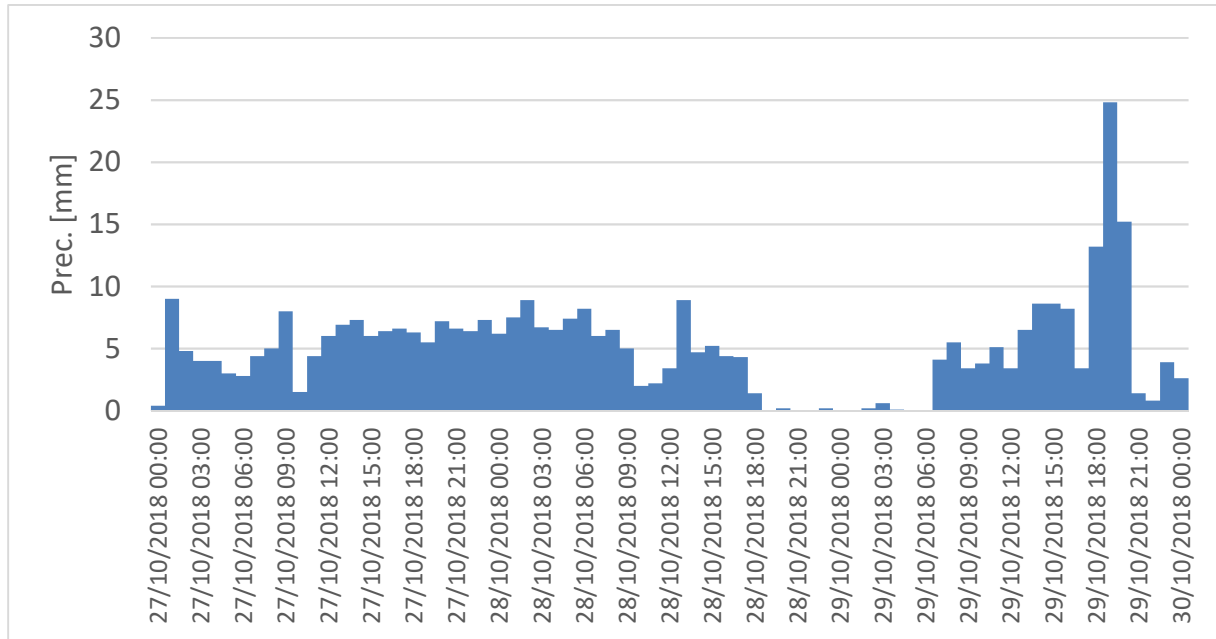
Fig. 3: Relazione fra precipitazione oraria (in mm) e corrispondente intensità del vento (in m/s) per il periodo dalle 17:00 alle 20:00 del 29 ottobre 2018.

La correzione dei valori tenendo conto dell'influenza del vento è in corso e verrà presentata in una revisione successiva del presente lavoro. Le stime riportate in questa versione della relazione sono quindi ottenute senza considerare eventuali correzioni relative all'effetto del vento sulle misure di pioggia liquida.

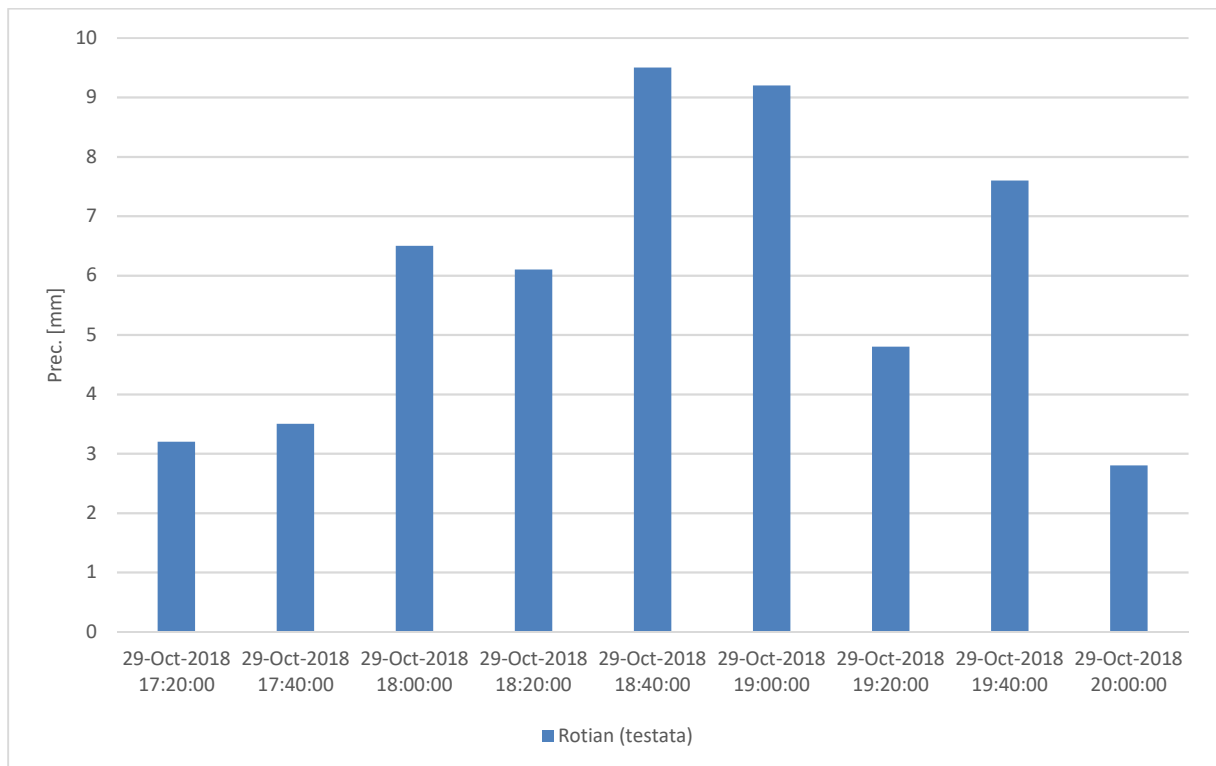
La Tab. 2 riporta le elaborazioni delle precipitazioni misurate dalle stazioni elencate in Tab. 1, con indicazione dei massimi orari ed a 3 giorni, e del valore cumulato sui 3 giorni qui di interesse. Sono marcate in *italico* le stazioni relative alle tre cumulate più elevate, tutte superiori a 300 mm. E' interessante notare che le tre stazioni corrispondenti (Malga Flavona, Pradalago e Passo Grostè, in ordine decrescente di valore di precipitazione cumulata), si collocano tutte ad una quota superiore a 2000 m s.l.m., mentre le altre stazioni, comprese fra una quota di 720 e 986 m s.l.m., sono caratterizzate da cumulate meno pronunciate comprese fra 197,4 mm e 269,6 mm. L'osservazione supporta l'indicazione relativa ad una importante influenza dell'orografia sulla altezza di precipitazione.

Tabella 2. Massimi di precipitazione osservati sulle diverse stazioni durante l'evento del 29 ottobre 2018.

Nome	codice	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore	3 gg	cum
Mezzana	T0071	11.2	22.2	36	66	114.4	222	223.2
Malè	T0074	14.6	33.6	55.6	90.6	118.0	222.4	225.0
Pradalago (Rif. Viviani)	T0167	24.0	43.2	58.2	90.2	163.2	312.6	350.0
Monte Groste' (Rif. Graffer)	T0169	25.6	66.4	101.2	163.6	183.2	322.0	327.4
Pinzolo	T0175	15.6	32.2	51.8	84.2	142.8	276.6	269.6
Pellizzano	73	9.0	19.4	33	62.4	109.4	200.0	197.4
Malga Flavona	89	19.4	44.6	72.8	122	186	352.2	<u>361.0</u>
Terzolas	93	12.8	31.2	53.2	86.2	115.4	217.2	218.4



a)



b)

Fig. 4: a) Serie temporale delle precipitazioni stimate presso la testata del bacino del Rio Rotian nel periodo 27-29 ottobre 2018, ad intervalli temporali orari; b) focus sul periodo dalle 17:00 alle 20:00 del 29 ottobre 2018, ad intervalli temporali di 20 min.

La serie temporale delle precipitazioni così stimate presso la testata del bacino Rio Rotian è riportata in Fig. 4a per il periodo complessivo di tre giorni ed in Fig. 4b per il periodo di tre ore dalle 17:00 alle 20:00 con piogge più intense. La Fig. 4a permette di apprezzare il significativo

aumento di intensità di pioggia nella seconda fase dell'evento. Tale andamento descrive una situazione favorevole all'innescò di frane superficiali e colate detritiche. Si veda a tale proposito il lavoro di Fan et al. (2020) e la bibliografia riportata nel lavoro.

In particolare, la Fig. 4b evidenzia 3 intervalli di 20 minuti ciascuno caratterizzati da altezze di pioggia superiori a 7 mm. Si tratta dei periodi che vanno dalle 18:20 alle 19:00, con un'altezza di pioggia complessiva di 18,7 mm, e dalle 19:20 alle 19:40, con un'altezza di pioggia di 7,6 mm. Questi picchi sono in buona correlazione temporale con le indicazioni relative alle tempistiche delle prime due colate detritiche, verificatesi rispettivamente nei seguenti due intervalli temporali: 19:00-19:05 CET e 19:45-20:15 CET.

La Fig. 5 riporta 4 mappe di pioggia relative ai seguenti periodi: 18:40, 19:00, 19:40; 20:00, che rivestono un ruolo centrale nella comprensione della dinamica meteo-idrologica dell'evento. Viene riportata in Fig. 6 la mappa relativa alla distribuzione spaziale della precipitazione cumulata nel periodo dalle 17:00 alle 20:00.

Le mappe di Fig. 5 consentono di notare la formazione e spostamento verso est della fascia convettiva generale che ha dominato la struttura delle precipitazioni sul Trentino Occidentale nel pomeriggio del 29 ottobre. L'andamento da sud-est a nord-ovest è marcato, come pure evidenti sono i gradienti di precipitazione che si stabiliscono sui bordi della fascia convettiva. E' possibile anche notare l'impatto che stabilisce l'orografia, ed in particolare il Gruppo di Brenta, sulla formazione dei picchi di precipitazione. Il picco di precipitazione più importante si stabilisce presso la stazione Fondazione Mach di Sporminore (che registra un valore di precipitazione orario di 39,2 mm, massimo su tutta l'area di indagine, corrispondente all'innescò di una colata detritica in Val di Cadino Basso). Tale picco si forma nel momento in cui, alle 20:00 CET, la fascia convettiva si sposta completamente ad est del Gruppo di Brenta, e il movimento da sud-est delle celle convettive viene vincolato dall'orografia locale.

L'esame della mappa di precipitazione cumulata (Fig. 6) permette di evidenziare la relazione fra l'altezza di precipitazione e l'innescò delle colate detritiche nella zona di studio. In particolare, è interessante osservare che il nucleo di precipitazione intensa relativo a valori in eccesso di 47 mm, che si dispone sui due versanti orientali ed occidentali del Gruppo di Brenta, corrisponde ad almeno quattro importanti eventi di colata detritica, tutti pressochè simultanei: i) Rio Rotian (Dimaro), ii) Val della Vecchia (Meledrio); iii) Slavinon (Val di Tovel); iv) Val di Cadino Basso (Campodenno). E' evidente, infine, il forte gradiente orografico di precipitazione che si stabilisce sul bacino del Rio Rotian, con una diminuzione progressiva della precipitazione cumulata da 53,2 mm in corrispondenza della testata a 43 mm in corrispondenza dell'apice del conoide. Tale gradiente, tuttavia, non è legato ad un meccanismo classico di arricchimento orografico della precipitazione, ma all'indebolimento dei fenomeni convettivi nella progressione da sud-est a nord-ovest lungo la fascia di convezione.

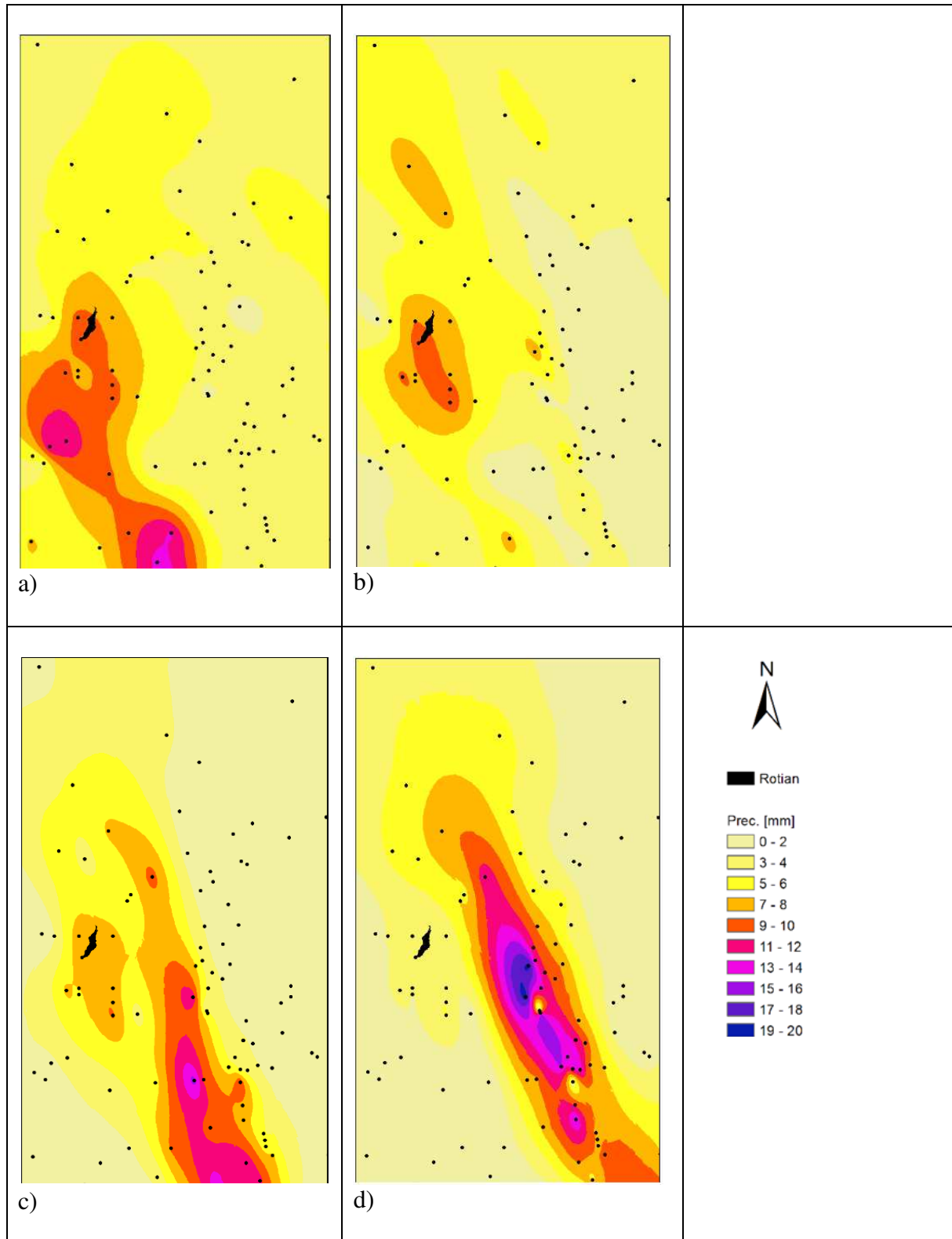


Fig. 5: Distribuzione spaziale delle precipitazioni cumulate su 20 minuti per quattro diversi periodi: a) 18:20-18:40, b) 18:40-19:00, c) 19:40; d) 19:40-20:00 CET del 29 ottobre 2018. Il bacino del Rio Rotian è marcato in colore scuro.

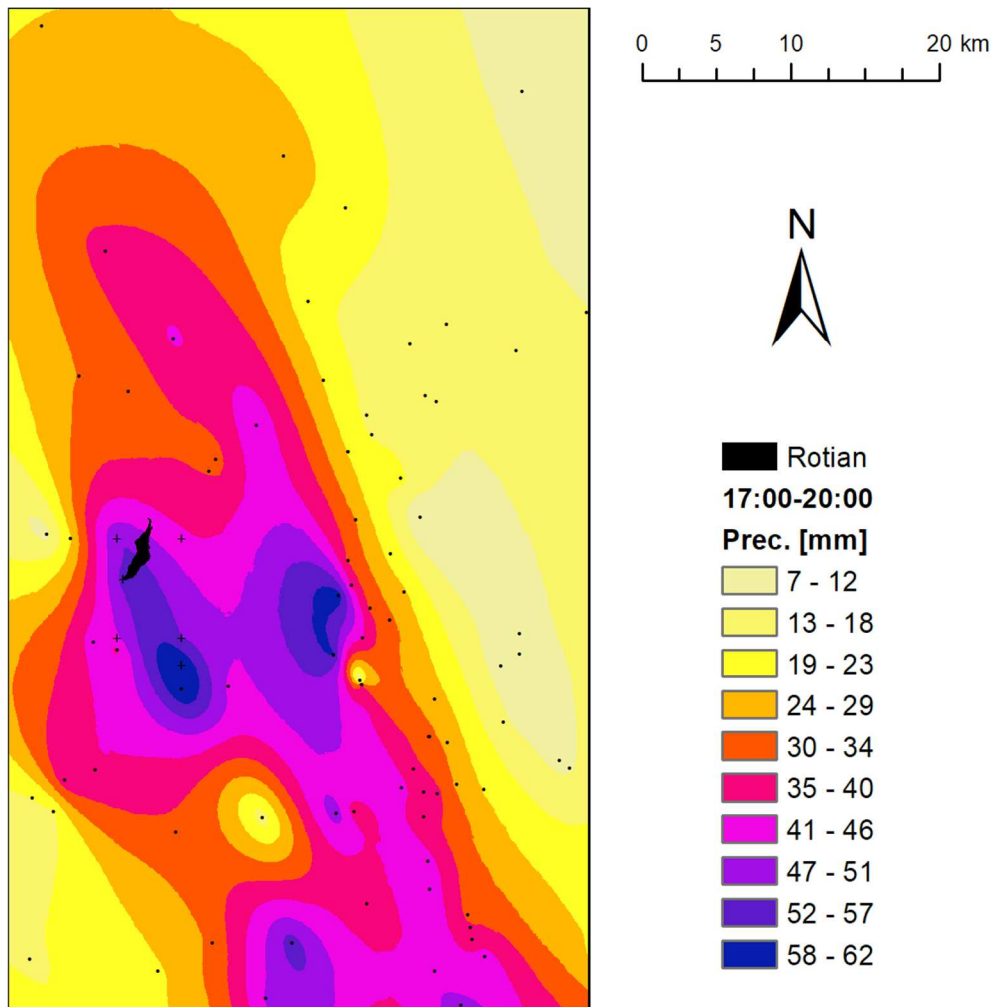


Fig. 6: Distribuzione spaziale delle precipitazioni cumulate nel periodo dalle 17:00 alle 20:00 del 29 ottobre 2018. Il bacino del Rio Rotian è marcato in colore scuro.

3. Valutazione della severità delle precipitazioni: modello probabilistico GEV e stima dei parametri

Il modello probabilistico *GEV* (Jenkinson, 1955), utilizzato in questo studio per l'analisi di severità e la stima del tempo di ritorno, riassume in un'unica espressione le tre leggi asintotiche dei valori estremi (*EV1*, *EV2* ed *EV3*).

La sua funzione di probabilità cumulata ha la seguente espressione

$$P(x) = \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k(x - \xi)}{\alpha} \right]^{1/k} \right\} \quad \text{per } k \neq 0 \quad (1)$$

dove ξ è un parametro di posizione, α un parametro di scala e k un parametro di forma. Per $k = 0$ si ottiene la distribuzione asintotica del massimo valore del I tipo (*EV I*) nota anche come legge di Gumbel, mentre rispettivamente per $k < 0$ e $k > 0$ si ottengono una *EV II* (Fréchet) ed una *EV III* (Weibull) e la distribuzione risulta rispettivamente limitata superiormente o inferiormente da $\xi + \alpha/k$. Per $k < 0$, in ragione del fatto che la distribuzione di densità di probabilità decade ad un tasso molto basso, i momenti della *GEV* sono di valore infinito per ordini maggiori di $1/k$.

La distribuzione *GEV* può anche essere derivata come distribuzione Poissoniana dei massimi annuali di una distribuzione Pareto generalizzata dei picchi oltre una soglia. In questa veste, premesso che l'espressione generale della distribuzione del massimo di un processo con occorrenze poissoniane è data da

$$P(x) = \exp \left\{ - \Lambda_q [1 - G(x)] \right\} \quad (2)$$

nella quale Λ_q è il tasso della distribuzione di Poisson e $G(x)$ è la distribuzione delle intensità del processo di base, assumendo per quest'ultima la seguente legge di tipo Pareto

$$G(x) = 1 - \left\{ 1 - k \left[\frac{(x - x_0)}{a} \right]^{1/k} \right\} \quad (3)$$

la (2) conduce alla espressione (1) della *GEV*, nella quale il parametro k ha il medesimo significato, mentre i parametri a e x_0 sono legati agli altri due parametri *GEV* mediante le relazioni

$$\xi = x_0 + \frac{a(1 - \Lambda_q^{-k})}{k}; \quad \alpha = a\Lambda_q^{-k} \quad (4)$$

Quando la *GEV* viene utilizzata nel contesto di procedure di regionalizzazione, il valore medio μ di X rappresenta la grandezza indice. La curva di crescita della variabile $X' = X/\mu$ è formalmente identica all'equazione (1), con parametri $\xi' = \xi/\mu$, $\alpha' = \alpha/\mu$ e $k' = k$. I coefficienti di asimmetria *CS* e di variazione *CV* delle due variabili X e X' coincidono tra loro.

Il quantile *T*-ennale può essere calcolato tramite questa distribuzione nel modo seguente

$$x_T = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \left\{ 1 - \left[-\ln\left(\frac{T-1}{T}\right) \right]^k \right\} \quad (5)$$

3.1 Metodo di stima dei parametri

La stima dei parametri della distribuzione teorica a partire dal campione rappresenta un momento cruciale del procedimento di inferenza statistica. Nel presente lavoro, i parametri sono stati determinati tramite il metodo dei momenti lineari (*L-moments*), caratterizzato da interessanti proprietà di efficienza statistica (soprattutto nel caso di campioni caratterizzati da un certo grado di asimmetria) sia rispetto al metodo dei momenti convenzionali che al metodo della massima verosimiglianza (Hosking e Wallis, 1997).

I momenti lineari, che rappresentano uno sviluppo della teoria dei momenti pesati in probabilità (*Probability Weighted Moments*, Greenwood et al., 1979), sono quantità analoghe ai momenti convenzionali ma sono stimati, contrariamente a questi ultimi, come funzioni lineari dei dati (la lettera *L* che caratterizza i diversi momenti sottolinea infatti la proprietà di linearità). Come il metodo dei momenti convenzionali si fonda sul calcolo di quantità quali il coefficiente di variazione *CV*, il coefficiente di asimmetria (o skewness) *CS* ed il coefficiente di appiattimento (o *kurtosi*), così il metodo dei momenti lineari richiede il calcolo dei rapporti di momenti lineari come *L-CV*, *L-skewness* ed *L-kurtosi*.

Un importante vantaggio dei momenti lineari deriva dal loro calcolo come funzione lineare dei dati. Come tali, essi risentono in misura inferiore della variabilità campionaria e della distorsione, determinata dalla elevazione a potenza dei dati, che caratterizza negativamente i momenti convenzionali. E' ben noto, infatti, che stime di *CV* e *CS* basate su campioni di limitata numerosità (inferiori a 100 elementi) soffrono di significativa distorsione e variabilità campionaria (Fisher, 1929; Hazen, 1930; Wallis et al., 1974). Wallis et al. (1974) hanno mostrato come le proprietà campionarie (distorsione e varianza) degli stimatori convenzionali dei momenti statistici dipendano dal tipo di distribuzione di probabilità cui appartiene il campione. Per questo motivo, le metodologie introdotte per limitare l'influenza della distorsione su tali stime sono generalmente coronate da limitato successo. I momenti lineari introdotti a Hosking (1990) sono, per contro, quasi indistorti per tutte le distribuzioni ed anche per basse numerosità campionarie. I momenti lineari sono descritti in letteratura, fra gli altri, da Hosking (1990), Stedinger et al. (1993), Wallis (1989), Vogel e Fennessey (1993) e Wang (1996).

I primi quattro momenti lineari sono definiti nel modo seguente:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= E[X_{1:1}] \\ \lambda_2 &= \frac{1}{2} E[X_{2:2} - X_{1:2}] \\ \lambda_3 &= \frac{1}{3} E[X_{3:3} - 2X_{2:3} + X_{1:3}] \\ \lambda_4 &= \frac{1}{4} E[X_{4:4} - 3X_{3:4} + 3X_{2:4} - X_{1:4}] \end{aligned} \quad (6)$$

ed hanno dimensioni equivalenti a quella della variabile considerata (in questo caso, quindi, mm).

I rapporti dei momenti lineari sono definiti come segue

$$\tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad \tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2}; \quad \tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \quad (7)$$

e sono adimensionali. Per analogia con i momenti convenzionali, i rapporti τ_2 , τ_3 , e τ_4 sono indicati nel seguito come *L-CV*, *L-skewness* ed *L-kurtosi*.

Nella (6), $X_{j:m}$ indica la variabile posta in posizione j in un campione di dimensione m ordinato in senso crescente ed $E[\]$ indica l'operatore valore atteso. Il calcolo dei momenti lineari è tradizionalmente effettuato utilizzando i momenti pesati in probabilità. E' possibile, tuttavia, fondare la stima dei momenti lineari direttamente sulla loro definizione, secondo la procedura descritta da Wang (1996). Utilizzando quest'ultima opzione, e prendendo il caso di λ_2 come esempio, il momento viene calcolato (i) selezionando tutte le possibile coppie di valori del campione, (ii) calcolando per ciascuna coppia la differenza come indicato in (6), (iii) calcolando la media di tutte le differenze così ottenute, ed infine (iv) dividendo il risultato per due. Generalmente λ_2 assume valori che sono all'incirca la metà dei valori della deviazione standard del campione. Il momento lineare di primo ordine è invece equivalente alla media del campione. Si nota che i rapporti dei momenti lineari possono assumere valori compresi in un intervallo limitato, essendo $|\tau_r| < 1$ per $r=3,4$ e $0 < \tau_2 < 1$ per campioni costituiti da elementi di valore positivo.

I momenti lineari possono essere utilizzati per costruire i diagrammi dei rapporti dei momenti, in modo analogo a quanto è possibile fare utilizzando i rapporti dei momenti convenzionali (Cunnane, 1988). Tali diagrammi vengono costruiti rappresentando la relazione fra τ_2 e τ_3 e quella fra τ_3 e τ_4 , e come tali possono descrivere graficamente le proprietà delle diverse distribuzioni di probabilità. In particolare il diagramma (τ_2 , τ_3) viene utilizzato per scegliere fra modelli probabilistici a due parametri e quello (τ_3 , τ_4) fra modelli a tre parametri (Stedinger et al., 1993: p. 18.27). In quest'ultimo diagramma le distribuzioni di probabilità possono essere rappresentate graficamente da un punto (per il caso di distribuzioni a due parametri; per es.: distribuzione di Gumbel), da una linea (per il caso di distribuzioni a tre parametri; per es.: lognormale a tre parametri e *GEV*) oppure da porzioni di piano limitate da curve (per il caso di distribuzioni a quattro parametri, per es.: *TCEV* e *Wakeby*). Lo stesso diagramma può ospitare le stime relative ad una o più serie di dati, e può pertanto essere utilizzato al fine di individuare quale distribuzione, o quale gruppo di distribuzioni di probabilità, fornisce una soddisfacente approssimazione per l'insieme di campioni a disposizione.

Le relazioni teoriche fra τ_3 e τ_4 , valide per le diverse distribuzioni di probabilità, sono state sviluppate da Hosking (1991); una sintesi di tale lavoro è riportata da Stedinger et al. (1993).

3.2 Stima dei parametri della distribuzione *GEV* tramite il metodo dei momenti lineari

In maniera analoga a quanto avviene con il metodo dei momenti convenzionali, i momenti lineari possono essere utilizzati per la stima dei parametri di una assegnata distribuzione. A tal fine, è sufficiente che i momenti lineari della distribuzione vengano espressi in funzione dei parametri stessi, e successivamente che i momenti lineari della distribuzione siano eguagliati a quelli campionari.

Nel caso della distribuzione *GEV*, per la stima dei parametri ξ , α e k si possono utilizzare le seguenti espressioni (Stedinger et al., 1993, p. 18.18)

$$k = 7.8590c + 2.955c^2$$

$$\alpha = \frac{k\lambda_2}{\Gamma(1+k)(1-2^{-k})}$$

$$\xi = \lambda_1 + \frac{\alpha}{k[\Gamma(1+k)-1]}$$

dove

$$c = \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)}$$

(8)

3.3 Analisi regionale tramite il modello probabilistico GEV ed i momenti lineari

Hosking e Wallis (1997) hanno sviluppato una procedura articolata per la regionalizzazione statistica, che si è imposta come uno standard nel campo nella valutazione degli estremi in idrologia (si rimanda in ogni caso a Klemes (2000) per alcune considerazioni critiche sulla tecnica di regionalizzazione e sull'utilizzazione dei momenti lineari). La procedura include i seguenti quattro passaggi:

- analisi di discordanza dei dati;
- valutazione delle caratteristiche di omogeneità della regione;
- selezione del modello probabilistico regionale;
- stima della distribuzione di frequenza regionale.

I passaggi sono descritti con qualche maggiore dettaglio nel seguito.

3.4 Analisi di discordanza dei dati

Questo passo, comune ad ogni analisi statistica, si colloca nel contesto dell'analisi di qualità dei dati, intesa ad identificare e rimuovere errori ed inconsistenze nei dati.

Nell'ambito dell'analisi di qualità è stato utilizzato uno statistico, qui indicato come 'misura di discordanza', D , introdotto da Hosking e Wallis (1993) (si vedano a questo proposito anche le correzioni apportate da Hosking e Wallis (1995), e la presentazione generale riportata da Hosking e Wallis (1997), a cui si rimanda per una dettagliata presentazione dell'indice statistico). Lo statistico consente di individuare stazioni con serie di dati i cui momenti lineari differiscono marcatamente rispetto a quelli del gruppo costituente l'insieme regionale. La misura di discordanza è calcolata per ogni stazione del campione. Elevati valori per lo statistico D qualificano un sito come potenzialmente discordante. Hosking e Wallis (1997) hanno individuato valori critici di D per diverse dimensioni (numero di stazioni) del campione regionale, sulla base di un livello di significatività del 10%. Secondo gli autori prima menzionati, un sito è marcato come discordante se, per un numero di stazioni maggiore o uguale a 15, il corrispondente valore di D supera una soglia pari a tre. La misura di discordanza è significativa solo per regioni che contengono almeno cinque siti di misura.

3.5 Valutazione delle caratteristiche di omogeneità di una regione assegnata

Una 'regione' omogenea è costituita da stazioni la cui distribuzione di frequenza è relativamente simile (a parte un fattore di scala). La verifica delle caratteristiche di omogeneità può essere condotta accertando che le (inevitabili) differenze fra i vari siti siano dovute unicamente agli effetti del campionamento. A tal fine è stato qui utilizzato uno statistico

indicato come ‘*misura di eterogeneità*’, H , introdotto da Hosking e Wallis (1993, 1997), illustrato brevemente di seguito.

In una regione omogenea tutti i siti dovrebbero esibire gli stessi valori per quanto riguarda i momenti lineari di popolazione. I valori campionari di questi ultimi sono caratterizzati tuttavia da una intrinseca variabilità, dovuta agli effetti di campionamento. Risulta logico quindi confrontare la dispersione dei momenti lineari campionari con la dispersione attesa, determinata dal solo effetto di campionamento, che caratterizza una regione omogenea e di caratteristiche di campionamento (durata delle osservazioni ed eventuale struttura di correlazione dei dati) identiche a quelle osservate. Qualora la dispersione osservata risulti maggiore di quella attesa, l’assunzione di omogeneità per la regione considerata dovrebbe essere riconsiderata.

Le caratteristiche di omogeneità possono essere valutate su tre diversi livelli:

- per il solo $L-CV$;
- per $L-CV$ ed $L-skewness$;
- per $L-skewness$ ed $L-kurtosi$.

Nell’ambito dell’indagine è stato deciso di verificare la omogeneità sia su $L-CV$ che su $L-skewness$; infatti, il calcolo della distribuzione GEV è fondato su questi due statistici, e pertanto la loro variabilità esercita una significativa influenza sulla variabilità delle stime dei quantili (almeno per valori di tempo di ritorno inferiori a 500 anni). Al fine di stabilire le caratteristiche di dispersione campionaria, si ricorre a simulazioni Monte Carlo (a tale scopo sono state effettuate diverse simulazioni per determinare il numero minimo di ripetizioni necessarie, individuato infine in 500). Per mantenere generalità di approccio, la simulazione Monte Carlo è stata fondata sull’impiego della distribuzione $kappa$ (Hosking e Wallis, 1993), a quattro parametri, calcolata sulla base dei momenti lineari regionali. L’utilizzazione di una distribuzione generale diversa dalla GEV - e da cui comunque la GEV può essere derivata - ha lo scopo di evitare una eccessiva influenza della selezione finale della distribuzione sugli esiti del confronto. Si supponga, infatti, che l’ipotesi di omogeneità (calcolata sulla base della GEV) venga rigettata; un risultato così conseguito non consente di chiarire se tale regione sia da considerarsi eterogenea, oppure sia omogenea ma caratterizzata da una distribuzione regionale diversa dalla GEV .

Lo statistico H quantifica il confronto precedentemente descritto, e può essere utilizzato, secondo Hosking e Wallis (1993), per verificare le caratteristiche di omogeneità di una regione. Una regione risulterà quindi accettabilmente omogenea se $H < 1$, potenzialmente eterogenea se $1 < H < 2$, eterogenea se $H > 2$. E’interessante comunque notare qui che, secondo il Flood Estimation Handbook (Robson, 1999), un approccio regionale, anche se fondato su una regione qualificata come debolmente eterogenea, fornisce risultati più accurati di un’analisi statistica puntuale (*single site*).

3.6 Selezione del modello probabilistico regionale

Nella analisi statistica regionale, una singola distribuzione di frequenza viene utilizzata per rappresentare i dati corrispondenti a diverse stazioni. In tutta generalità, si può assumere che la regione potrà essere in qualche misura eterogenea, e che non esista una singola distribuzione in grado di descrivere perfettamente i dati per tutti i siti di misura. Lo scopo della analisi regionale non può essere, quindi, quello di identificare la ‘vera’ distribuzione di frequenza, ma bensì (in modo, forse, più pragmatico) di identificare una distribuzione in grado di consentire una accurata stima dei quantili per ciascun sito di misura (e quindi, potenzialmente, nell’ambito dell’intera regione). Da questo punto di vista, risultano importanti le caratteristiche di robustezza della procedura di stima, vale a dire la capacità della distribuzione di conseguire stime accurate dei quantili anche quando i dati regionali provengono da distribuzioni in qualche modo diverse rispetto a quella utilizzata per la stima. A tal fine, Hosking e Wallis (1993, 1997)

hanno sviluppato un test tramite il quale è possibile valutare l'ipotesi che i momenti lineari regionali sono consistenti con quelli della distribuzione.

Nel caso della distribuzione *GEV* stimata tramite il metodo dei momenti lineari, i momenti *L-CV* ed *L-skewness* sono utilizzati per la parametrizzazione. La valutazione di accettabilità viene quindi effettuata confrontando la *L-kurtosi* risultante dalla distribuzione con quella regionale. Anche in questo caso, è necessario tener conto di possibili variazioni dovute alla sola variabilità campionaria, procedendo, come nel caso precedente, per simulazioni. Uno statistico (*Z*) (Hosking e Wallis, 1993) è stato quindi utilizzato per descrivere tale capacità descrittiva. Per valori di *Z* minori in valore assoluto di 1.64, la qualità della ricostruzione offerta dal modello probabilistico candidato può essere giudicata buona.

3.7 Stima della distribuzione di frequenza regionale

I parametri della distribuzione di frequenza regionale sono stimati combinando i valori dei parametri in corrispondenza delle singole stazioni, e tenendo conto della relativa numerosità campionaria. Questa fase non richiede nessuna valutazione soggettiva. Le espressioni utilizzate per la stima dei parametri della distribuzione *GEV* a partire dai momenti lineari sono quelle riportate alla sezione 3.2.

3.8 Applicazione alla regione di studio

Per gli scopi dell'analisi sono stati analizzati complessivamente i dati relativi a 5 stazioni pluviografiche collocate in prossimità del bacino di studio, riportate in Tab. 3 insieme alla numerosità campionaria corrispondente alle diverse durate. Per tali stazioni sono stati valutati i massimi osservati in ciascun anno nel periodo 1919-2018; per tre stazioni delle 5 sono stati esaminati i massimi di precipitazione misurati durante l'evento del 29 ottobre 2018. Le stazioni considerate sono caratterizzate da numerosità campionaria pari ad almeno 30 anni. Sono state escluse dall'analisi altre 5 stazioni ugualmente prossime al bacino di studio (Rabbi, Pradalago, Cogolo, Mezzana e Monte Grostè) perché caratterizzate da numerosità campionaria limitata (≤ 30 anni).

L'analisi delle osservazioni pluviometriche è usualmente compiuta ipotizzando che le caratteristiche statistiche del processo di pioggia siano invariante durante il periodo di osservazione. Tale assunzione porta a trascurare i possibili effetti dovuti al cambiamento climatico locale e globale. L'errore così commesso può ritenersi in prima approssimazione ininfluenza, in mancanza spesso di osservazioni estese a sufficienza per quantificare tali fenomeni. L'ipotesi di assenza di *trend* nelle serie temporali disponibili è stata comunque valutata statisticamente in questo studio utilizzando il test di Mann-Kendall (Mann, 1945). Utilizzando un livello di significatività pari a 5%, il test ha consentito di rigettare l'ipotesi di presenza di *trend* in tutti i casi considerati.

L'applicazione del modello probabilistico *GEV* richiede, come accennato in precedenza, la verifica di qualità dei dati. L'analisi del test di discordanza (tramite il valore dello statistico *D*) ha permesso di verificare la qualità dei dati per tutte le stazioni considerate.

Nelle Fig. 6 – 8 sono stati riportati i grafici relativi al diagramma dei rapporti fra momenti lineari (τ_3 e τ_4), (*L-skewness* ed *L-kurtosi*), per le durate rispettivamente pari a 1 ora, 24 ore e 3 giorni. In Fig. 8 sono stati infine riportati, sempre sullo stesso diagramma, i valori medi ponderati regionali di τ_3 e τ_4 per le diverse durate di pioggia.

L'esame delle Figure 6-8 consente di rilevare alcune caratteristiche:

- i valori di τ_3 e τ_4 manifestano un elevato grado di dispersione, che tende a diminuire all'aumentare della durata della precipitazione;

- i valori medi ponderati di τ_3 e τ_4 tendono a concentrarsi vicino alla distribuzione di Gumbel all'aumentare della durata della precipitazione, mentre invece sono distintamente diversi per la durata oraria. L'analisi consente pertanto di scindere il comportamento degli eventi dominati dalla componente convettiva (durate fino ad un'ora) rispetto agli altri.

Alcuni risultati relativi all'applicazione della procedura di regionalizzazione sono riportati in Tabella 5. I risultati ivi riportati confermano quanto già emerso nell'analisi delle Figure 6 - 8, ed offrono alcune utili indicazioni circa la verifica dell'ipotesi di omogeneità della regione e la selezione della distribuzione di frequenza.

Tabella 3. Numerosità dei dati disponibili

Nome	codice	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore	3 gg
Peio	T0064	53	53	53	53	53	73
Cogolo Pont	T0068	57	57	57	57	57	77
Male	T0074	61	63	64	63	65	71
Pinzolo	T0175	50	49	50	50	50	70
Val Breguzzo	T0177	38	38	38	38	38	48

Tabella 4. Massimi di precipitazione osservati sulle diverse stazioni durante l'evento del 27-29 ottobre 2018 (in mm)

Nome	codice	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore	3 gg
Peio	T0064						
Cogolo Pont	T0068						
Male	T0074	14,6	33,6	55,6	90,6	118	222,4
Pinzolo	T0175	15,6	32,2	51,8	84,2	142,8	276,6
Val Breguzzo	T0177	13,8	28,4	52,2	99,0	178,8	293,2
Testata Rotian		24,8	53,2	73,4	104,2	165,4	359,0

Per quanto riguarda l'ipotesi di omogeneità (relativamente alle durate orarie e pluriorarie), l'impiego dei test descritti in precedenza ha permesso di appurare un buon grado di omogeneità della regione di studio.

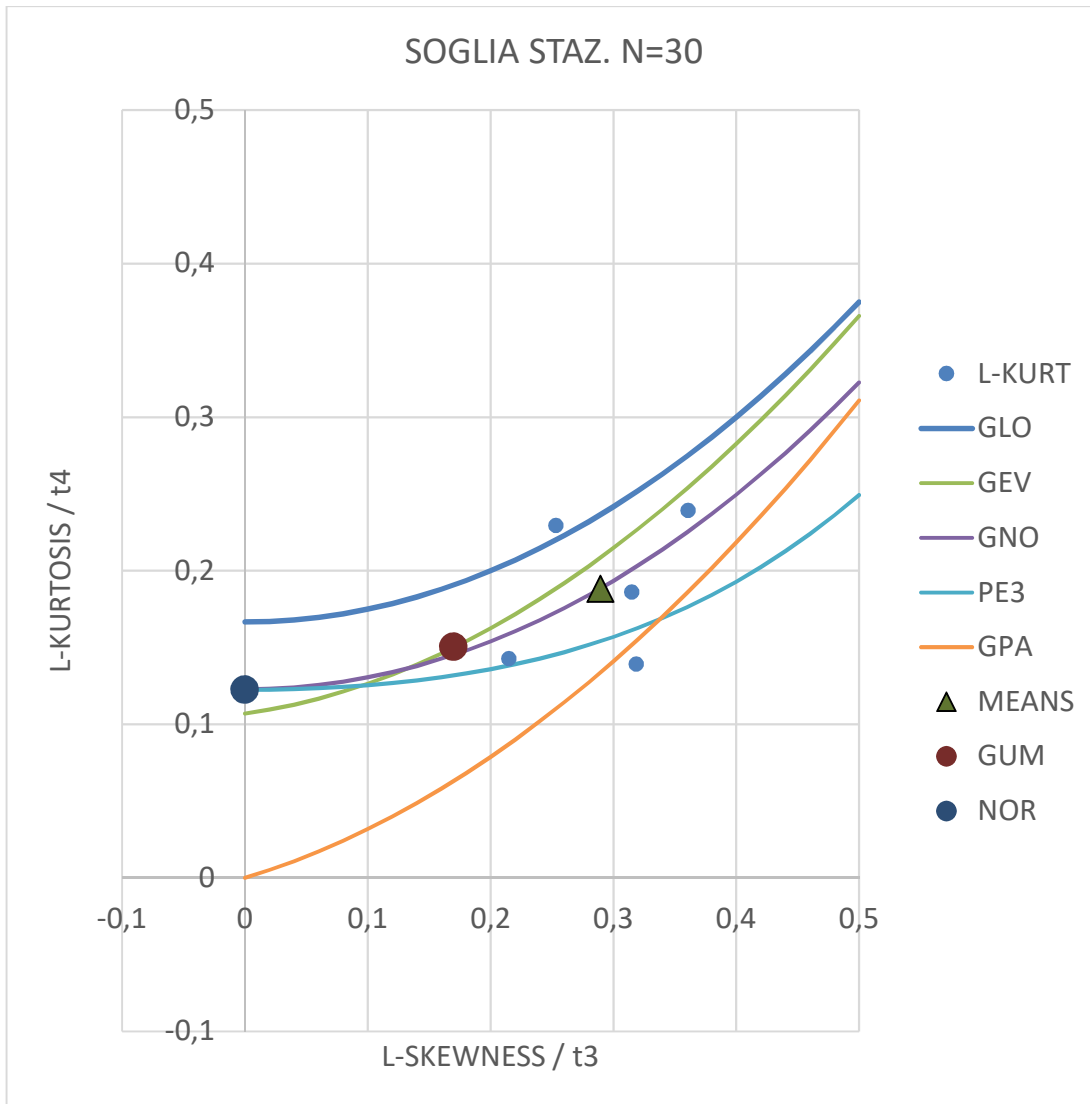


Figura 6: Diagramma dei rapporti τ_3 e τ_4 per precipitazioni di durata pari a 1 ora. G: Distribuzione di Gumbel; GLO: Generalised Logistic; GEV: Generalised Extreme Value; GPA: Generalised Pareto; PE3: Pearson type 3.

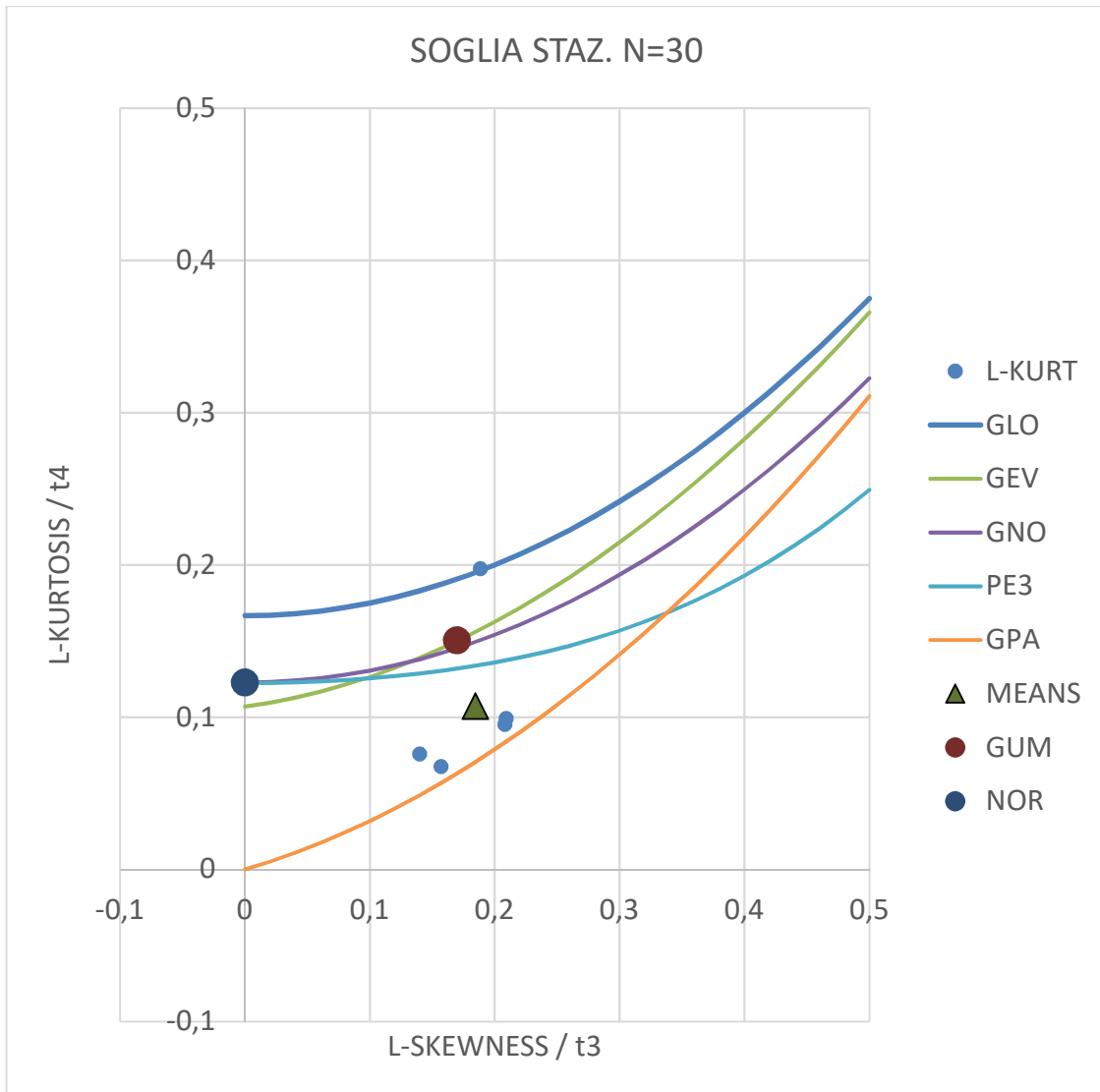


Figura 7: Diagramma dei rapporti τ_3 e τ_4 per precipitazioni di durata pari a 24 ore. G: Distribuzione di Gumbel; GLO: Generalised Logistic; GEV: Generalised Extreme Value; GPA: Generalised Pareto; PE3: Pearson type 3.

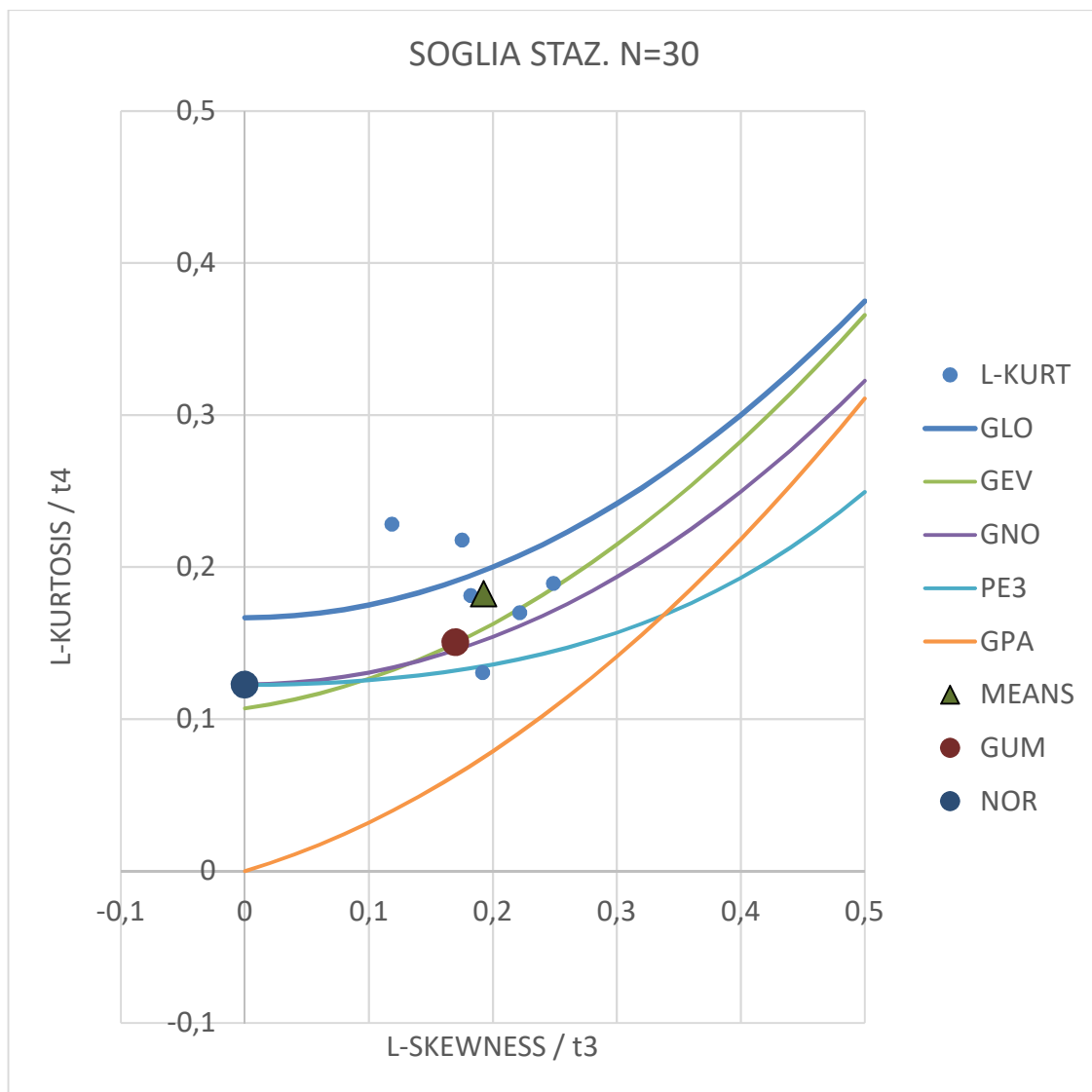


Figura 8: Diagramma dei rapporti τ_3 e τ_4 per precipitazioni di durata pari a 3 giorni. G: Distribuzione di Gumbel; GLO: Generalised Logistic; GEV: Generalised Extreme Value; GPA: Generalised Pareto; PE3: Pearson type 3.

Tabella 5. Risultati della procedura di regionalizzazione

Durata	τ_2	τ_3	τ_4	Distribuzione accettata ¹
1 ora	0,2057	0,2894	0,1883	GNO, GEV
3 ore	0,1589	0,2143	0,1629	GEV, GNO
6 ore	0,1353	0,1464	0,1504	GEV, GNO
12 ore	0,1592	0,15	0,1125	GNO, GEV
24 ore	0,1833	0,1845	0,1072	GEV, GNO
3 gg	0,1799	0,1742	0,1705	GEV, GNO

¹ Vengono riportate in sequenza le prime due distribuzioni che risultano accettabili

Per quanto riguarda la scelta della distribuzione, viene confermato che la distribuzione *GEV* risulta accettabile per tutte le durate, anche se la distribuzione *GNO* dimostra anch'essa buone caratteristiche di rappresentazione del campione disponibile.

Tabella 6. Quantili della curva di crescita per $Tr= 50, 100, 200$ anni e per le diverse durate di pioggia (1 ora – 3 gg).

TR (anni)	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore	3 giorni
K	-.178	-.068	-.021	-0,02	-.023	-.019
50	2.184	1.819	1.9	1.899	1.901	1.881
100	2.548	2.019	2.09	2.008	2.1	2.01
200	2.958	2.228	2.201	2.191	2.301	2.21

Tabella 7. Media dei massimi annuali di precipitazione per le diverse stazioni e per le diverse durate (in mm)

Nome	codice	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore	3 gg
Peio	T0064						
Cogolo Pont	T0068						
Male	T0074	14,7	24,2	33,5	48,4	66,8	96,6
Pinzolo	T0175	16,1	24,4	35,2	53,0	80,1	116,6
Val Breguzzo	T0177	21,5	33,2	46,5	66,5	96,7	134,8
Testata Rotian		15,1	24,5	34,3	49,6	68,3	98,1

Tabella 8. Rapporto fra il valore massimo di precipitazione osservato durante l'evento del 29 ottobre 2018 e la corrispondente media dei massimi annuali (per ogni durata e per ogni stazione) (valore adimensionale)

Nome	codice	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore	3 gg
Peio	T0064						
Cogolo Pont	T0068						
Male	T0074	0,99	1,38	1,65	1,87	1,76	2,30
Pinzolo	T0175	0,96	1,31	1,47	1,58	1,78	2,37
Val Breguzzo	T0177	0,64	0,85	1,12	1,48	1,84	2,17
Testata Rotian		1,64	2,17	2,14	2,10	2,42	3,66

Tabella 9. Valutazione dei tempi di ritorno per le diverse stazioni e per le diverse durate di precipitazione (in anni)

Nome	codice	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore	3 gg
Peio	T0064						
Cogolo Pont	T0068						
Male	T0074	<50	<50	<50	<50	<50	200-300
Pinzolo	T0175	<50	<50	<50	<50	<50	200-300
Val Breguzzo	T0177	<50	<50	<50	<50	<50	100-200
Testata Rotian		<50	100-200	100-200	100-200	200-300	>300

Sulla base dei risultati precedentemente riportati, la distribuzione GEV è stata utilizzata per la regionalizzazione e per la valutazione delle curve di crescita sintetizzate nella Tabella 6. In questa Tabella sono riportati i quantili della curva di crescita per i seguenti tempi di ritorno (in anni): $Tr= 50, 100, 200$ e per le diverse durate di pioggia.

Le curve di crescita (Tab. 4) tendono ad accorparsi in due gruppi: il primo costituito dalle piogge di durata di 1 ora, per le quali i quantili 200-ennali risultano maggiori di 2,9, il secondo dalle piogge di durata compresa fra 3 ore e 3 giorni, per le quali i quantili 200-ennali risultano compresi fra 2,2 a 2,3. Il risultato, come ribadito in precedenza, risulta congruente con l'interpretazione della differente natura dei processi fisici che determinano i massimi annuali delle piogge di varia durata. I massimi delle piogge di durata minore o pari ad 1 ora tendono

infatti a verificarsi nel corso di fenomeni temporaleschi o, comunque, associati a fenomeni di pioggia convettiva. Quelli delle piogge di durata maggiore invece si verificano in occasione di eventi frontali stratiformi in grado di ‘sostenere’, su durate più lunghe e per estensioni spaziali maggiori, valori di intensità elevata.

La Tabella 6 riporta anche i valori del parametro k della distribuzione *GEV*. In tutti i casi il valore di k è negativo. E’ possibile notare la sostanziale omogeneità dei valori di k per le durate superiori ed uguali a 3 ore, con valori molto prossimi a zero, come risulta anche dall’analisi visuale del diagramma dei rapporti lineari τ_3 e τ_4 (che indica una buona accettabilità, per queste durate, della distribuzione di Gumbel).

La Tabella 8 riporta il rapporto fra il valore massimo di precipitazione osservato durante l’evento del 27-29 ottobre 2018 e la corrispondente media dei massimi annuali (per ogni durata e per ogni stazione). L’esame della tabella mostra come i rapporti crescano generalmente con la durata, con un picco per una durata di 3 giorni.

La Tabella 9, infine, riporta le valutazioni dei tempi di ritorno per le precipitazioni massime relative all’evento del 29 ottobre 2018 per le diverse stazioni e le diverse durate, ottenute confrontando i risultati riportati in Tabella 6 con quelli riportati in Tabella 4. L’esame dei valori riportati in Tabella indica come i valori riportati per tutte le durate inferiori o uguali a 24 ore siano inferiori a 50 anni di tempo di ritorno, mentre le precipitazioni corrispondenti a 3 giorni sono caratterizzate da tempi di ritorno estremamente elevati, nell’intervallo fra 100 e 200 anni per la stazione di Val Breguzzo e superiori a 200 anni per le stazioni di Malè e Pinzolo.

I massimi sulle durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore e 3 giorni consecutivi in corrispondenza della testata del Rio Rotian sono rispettivamente pari a 24,8 mm, 53,2 mm, 73,4 mm, 104,2 mm, 165,4 mm e 359,0 mm. La Tabella 9 evidenzia che i tempi di ritorno corrispondenti sono rispettivamente compresi fra 30 e 50 anni per 1 ora, fra 100 e 200 anni per 3, 6 e 12 ore, compresi fra 200 e 300 anni per 24 ore, e superiori a 300 anni per 3 giorni consecutivi. Su questa base, l’evento è pertanto da considerarsi eccezionale, dove con tale termine si indichi un evento di natura geofisica caratterizzato da un tempo di ritorno superiore a 100 anni (Stephenson, 2008).

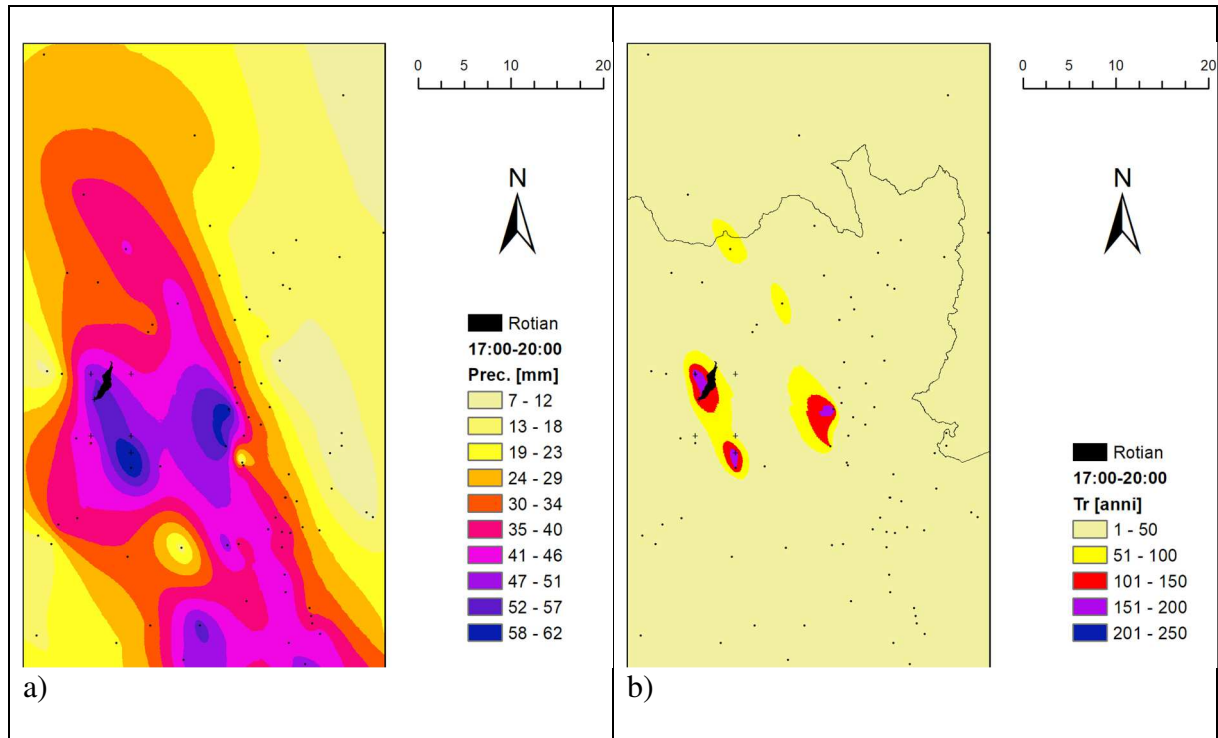


Fig. 9: a) Distribuzione spaziale delle precipitazioni cumulate nel periodo dalle 17:00 alle 20:00 del 29 ottobre 2018 e b) valutazione della loro severità espressa in tempo di ritorno corrispondente. Il bacino del Rio Rotian è marcato in colore scuro.

La Fig. 9b riporta permette di apprezzare la distribuzione spaziale dei tempi di ritorno corrispondenti alla precipitazione caduta nell'intervallo di 3 ore comprese fra le 17:00 e le 20:00. La distribuzione dei temi di ritorno è condizionata dall'altezza di pioggia e dalla distribuzione delle statistiche storiche di pioggia di durata pari a 3 ore, che vedono una progressiva diminuzione dei quantili di pioggia progredendo verso nord-ovest. Nella mappa che così si ottiene è possibile individuare le aree del Rio Rotian e del Rio Cadino Basso, entrambe caratterizzate da tempi di ritorno importanti (maggiori di 100 anni) e dall'innescò di rilevanti colate detritiche.

4. Conclusioni

L'indagine qui riportata ha l'obiettivo generale di conseguire la stima e la valutazione della severità della precipitazione che ha portato all'innescò delle tre colate detritiche che hanno colpito l'abitato di Dimaro il giorno 29 ottobre 2018. Muovendo da questo obiettivo, il lavoro sviluppa due obiettivi specifici: i) stima delle precipitazioni nel periodo 27-29 ottobre 2018 sulla testata del Rio Rotian; ii) valutazione del corrispondente grado di severità, tramite analisi delle precipitazioni massime stimate presso il bacino di studio e registrate presso un numero limitato di pluviometri durante l'evento per le durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore e 3 giorni consecutivi. Le stime di pioggia sono state condotte ad intervallo orario, con l'eccezione del periodo compreso fra le 17:00 e le 20:00 del 29 ottobre, caratterizzato da precipitazioni più intense e corrispondente all'innescò di due colate detritiche. Per questo periodo limitato le stime sono fornite ad intervalli di 20 minuti.

I risultati conseguiti mostrano che l'evento è stato caratterizzato da un valore cumulato di precipitazione, riferito al periodo di 3 giorni dal 27 al 29 ottobre 2018, pari a 359 mm. I massimi

sulle durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore e 3 giorni consecutivi sono rispettivamente pari a 24,8 mm, 53,2 mm, 73,4 mm, 104,2 mm, 165,4 mm e 359,0 mm.

La serie temporale delle precipitazioni rende ragione dell'innescò di due delle tre pulsazioni di colata che hanno interessato l'abitato di Dimaro nella serata del 29 ottobre 2018, evidenziando due picchi di precipitazione nei periodi compresi fra le 18:20 e le 19:00 CET (Central European Time), e fra le 19:20 e le 19:40 CET, sostanzialmente coincidenti con le indicazioni dedotte da una serie di 14 interviste relative alla tempistica delle colate detritiche osservate presso l'abitato di Dimaro.

L'analisi di severità delle piogge è basata su una procedura di regionalizzazione statistica, sviluppata da Hosking e Wallis (1993, 1997) e fondata sull'utilizzazione dei momenti lineari, all'analisi del regime delle piogge intense nella zona di studio. Tale regione è stata riconosciuta come omogenea per le durate qui di interesse. L'analisi ha permesso di evidenziare come la distribuzione GEV consenta una buona descrizione delle caratteristiche statistiche del campione disponibile per le durate orarie. La distribuzione di Gumbel offre invece una buona descrizione per le durate più elevate (3-24 ore e 3 gg). L'ipotesi di assenza di trend nei dati di precipitazione massima annuale è stata verificata, ed è stata rigettata per tutte le stazioni.

I tempi di ritorno corrispondenti ai massimi di precipitazione stimati presso la testata del Rio Rotian sono rispettivamente compresi fra 30 e 50 anni per 1 ora, fra 100 e 200 anni per 3, 6 e 12 ore, compresi fra 200 e 300 anni per 24 ore, e superiori a 300 anni per 3 giorni consecutivi. Su questa base, l'evento è pertanto da considerarsi eccezionale, dove con tale termine si indichi un evento di natura idro-meteorologica caratterizzato da un tempo di ritorno superiore a 100 anni (Stephenson, 2008). Le caratteristiche di eccezionalità dell'evento sono inoltre amplificate dal verificarsi delle precipitazioni più intense nella fase finale dell'evento, quando i versanti avevano già raggiunto un buon grado di saturazione in ragione delle piogge pregresse.

5. Riferimenti bibliografici

- Archer, D. R., Leesch, F., & Harwood, K., 2007: Learning from the extreme River Tyne flood in January 2005. *Water and Environment Journal*, 21, 133–141.
- Bacchi, B. e V. Villi, 2001: Valutazione delle Piene del Triveneto. Pubblicazione del CNR - GNDCI - n. 2511 1 - 322 CNR-GNDCI Padova, Brescia.
- Borga, M., 2002: Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 267 (1-2), 26-3.
- Borga, M., M Stoffel, L Marchi, F Marra, & M Jakob, 2014: Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology* 518, 194-205
- Bruce, J. P., & Clark, R. H. (1966). *Introduction to hydrometeorology* (319 pp.). Oxford, UK: Pergamon Press.
- Cunnane, C., 1988: Methods and merits of regional flood frequency analysis, *J. Hydrol.*, 100, 269-290.
- Fan, L., Lehmann, P., Zheng, C., & Or, D., 2020: Rainfall intensity temporal patterns affect shallow landslide triggering and hazard evolution. *Geophysical Research Letters*, 47. e2019GL085994 <https://doi.org/10.1029/2019GL085994>
- Fisher, R.A., 1929: Moments and product moments of sampling distributions, *R. London Math. Soc.*, 2(30), 199.

- Greenwood, J.A., J.M. Landwehr, N.C. Matalas & J.R. Wallis, 1979: Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form, *Water Resour. Res.*, 15(5), 1049-1054.
- Hazen, A., 1930: Flood flows, John Wiley, New York.
- Hosking, J.R.M. & J.R. Wallis, 1993: Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resour. Res.*, 29(2), 271-281.
- Hosking, J.R.M. e J.R. Wallis, 1995: Correction to: "Some statistics useful in regional frequency analysis". *Water Resour. Res.*, 31, 1, 251.
- Hosking, J.R.M. e J.R. Wallis, 1997: Regional frequency analysis. Cambridge University Press, 224 pp.
- Hosking, J.R.M., 1990: L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, *J. R. Stat. Soc., Ser. B.*, 52(2), 105-124.
- Hosking, J.R.M., 1991: Approximations for use in constructing L-moments ratio diagrams. Research Report RC-16635, IBM Research Division, T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, N.Y.
- Hydrology Center, 1988: Hydrologist's field manual. Publication No. 15 of the Hydrology Centre Christchurch. 158 pp.
- Jenkinson, A.F., 1955: The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly J. Royal Met. Soc.*, 87-158.
- Klemes, V., 2000: Tall tales about tails of hydrological distributions. *J. Hydrol. Eng.*, ASCE, 5(3), 232-239.
- Kochendorfer, J., Nitu, R., Wolff, M., Baker, C. B., Rasmussen, R., Earle, M., et al. (2016). Errors, biases, and corrections for weighing gauge precipitation measurements from the WMO solid precipitation intercomparison experiment. Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, Madrid, Spain, September 27–30, 2016.
- Mann, H.B., 1945: Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
- Robson, A.J., 1999. Distributions for flood frequency analysis. In: Flood Estimation Handbook. Vol 3, Statistical Procedures for Flood Frequency Estimation, Chapter 15, 139–152, A.J. Robson and D.W. Reed (Eds.). Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Stedinger, J.R., R.M. Vogel & E. Foufoula-Georgiou, 1993 : Frequency analysis of extreme events, in Handbook of Applied Hydrology, cap. 18, Ed. D.A. Maidment, McGraw-Hill, New York.
- Stephenson, D., 2008: Definition, diagnosis and origin of extreme weather and climate events, In Diaz, H. F., and Murnane R. J. (eds) Climate Extremes and Society. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 340 pp.
- Vogel, R.M. e N.F. Fennessey, 1993: L moments diagrams should replace product moment diagrams, *Water Resour. Res.*, 29(6), 1745-1752.
- Wallis, J.R., 1989: Regional frequency analysis using L moments, Res. Rep. 14597, 17 pp., IBM Res. Div., T.J. Watson Res. Cent., Yorktown Heights, N.Y..
- Wallis, J.R., N.C. Matalas & J.R. Slack, 1974: Just a moment!, *Water Resour. Res.*, 27(12), 3149-3158.
- Wang, Q.J., 1996: Direct sample estimators of L moments, *Water Resour. Res.*, 32(12), 3617-3619.
- Wolff, M., Isaksen, K., Petersen-Øverleir, A., Ødemark, K., Reitan, T., & Bækkan, R. (2014). Derivation of a new continuous adjustment function for correcting wind-induced loss of solid precipitation: Results of a Norwegian field study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(11), 10043–10084.

APPENDICE

Non esistono registrazioni ufficiali circa la tempistica degli eventi di colata che hanno colpito l'abitato di Dimaro nella serata e nella notte del 29 ottobre 2018. Al fine di documentare la dinamica degli eventi, sono state raccolte una serie di interviste tramite la somministrazione di un questionario uniforme a 14 testimoni privilegiati. Il questionario, discusso preventivamente con l'Amministrazione Comunale, è riportato in Fig. A1. La raccolta delle interviste è avvenuta con modalità concordate con l'Amministrazione Comunale. Gli intervistati hanno accettato di rispondere in modo non anonimo, anche al fine di poter poi ripetere le interviste in momenti successivi.

La raccolta delle interviste si è sviluppata nel periodo da inizio aprile a fine Maggio 2019. Le 14 persone intervistate sono state scelte principalmente in base al luogo in cui si trovavano al momento dell'evento, così da fornire una testimonianza il più possibile accurata dei fatti accaduti lungo il conoide alluvionale. In particolare, sono state intervistate tredici persone di sesso maschile e una persona di sesso femminile con età comprese tra i 25 e i 74 anni. Le interviste sono state poste inizialmente agli abitanti delle abitazioni poste nella parte alta del conoide, che sono stati i primi ad essere evacuati e portati in salvo dai soccorritori subito dopo l'inizio della colata detritica. Queste persone hanno riportato testimonianze piuttosto precise per quanto riguarda la prima fase dell'evento. In seguito sono state intervistate le persone che risiedono nella parte centrale del conoide e prossime al Dolomiti Camping Village. Essendo stati più a lungo bloccati nelle loro case, hanno potuto descrivere con maggiore chiarezza la seconda fase della colata ed esporre la situazione delle prime tre o quattro ore dell'evento. Sono stati successivamente intervistati alcuni abitanti nella parte più bassa del conoide; costoro hanno potuto descrivere i fatti verificatisi durante tutta la notte e hanno assistito a tutte e tre le fasi di colata. Infine, a conferma delle informazioni così ricavate, sono stati intervistati alcuni Vigili del Fuoco Volontari ed un operatore di un mezzo d'escavo, che hanno lavorato durante tutta la notte nelle tre diverse aree sopra distinte.

Il questionario (Fig. A1) è composto di tre sezioni. La prima sezione è relativa alla qualificazione dell'osservatore e della sua posizione al momento degli eventi.

La seconda sezione concerne osservazioni relative alla colata detritica, alla loro tempistica ed ai processi innescanti. Le domande sono le seguenti:

- quante fasi di frane/colate sono state osservate;
- istante d'inizio e di fine di ogni pulsazione;
- osservazioni relative al volume di materiale trasportato, quali presenza di massi ciclopici e di detriti arborei;
- osservazioni relative all'altezza di pioggia (in caso di presenza di pluviometri privati), presenza di grandine, fulminazioni, intensità del vento e rumori generati dall'approssimarsi della colata;
- istante in cui è stata avvertita l'interruzione dell'illuminazione pubblica.

La parte finale del questionario riguarda il livello di informazione dell'intervistato. Le domande riguardano la conoscenza delle previsioni relative al fenomeno ed il grado di accuratezza di queste ultime (valutazione espresso in scala Likert), per poi passare alle domande riguardanti le azioni intraprese per la gestione del rischio sia individuale che della comunità durante l'evento. Viene richiesta, infine, una valutazione, espressa in scala Likert, relativa alla preparazione per reagire nel modo migliore all'evento.

Qualificazione dell'osservatore													
1	Cognome e nome	15	Osservazioni relative al trasporto di massi ciclopici										
2	Età/genere	16	L'approssimarsi della colata è stato preceduto da intenso rumore?										
3	Dove si trovava al momento della osservazione riportata nella testimonianza	Illuminazione pubblica											
4	Ha subito danni? In quale maniera?	17	Note relative all'istante in cui è stata interrotta l'illuminazione pubblica										
Osservazioni relative alla colata detritica, ai processi innescanti ed a i danni		Livello di informazione circa il fenomeno ed azioni intraprese											
5	Quante fasi di frane/colate detritiche ha visto o ha percepito? (max tre nel seguito, commentare se ci sono osservazioni di altre colate in numero superiore a tre)	18	Era a conoscenza delle previsioni relative al fenomeno? Se sì, da quale fonte?										
6	Istante inizio e fine della prima colata	Riportare orario (giorno:ora:minuti) dell'inizio e della fine											
7	Istante inizio e fine della seconda colata	Riportare orario (giorno:ora:minuti) dell'inizio e della fine											
8	Istante inizio e fine della terza colata	Riportare orario (giorno:ora:minuti) dell'inizio e della fine											
9	Osservazioni relative al volume del materiale trasportato	19	Le previsioni ricevute erano accurate? (da 1 a 5, con 1 accuratezza minima, 5 accuratezza max)										
10	Osservazioni relative al trasporto di detriti arborei (alberi etc)	20	Quali azioni ha intrapreso per la gestione del rischio individuale (durante l'evento)										
11	Presenza di grandine (sì, no)	21	Quali azioni ha intrapreso per la gestione del rischio del suo gruppo familiare (durante l'evento)										
12	Ha notato fulminazioni (sì, no)	22	Quali azioni ha intrapreso per la gestione del rischio della sua comunità (durante l'evento)										
13	Osservazioni di altezza di pioggia (se sono disponibili pluviometri privati)	23	Come giudica la sua preparazione per reagire nel modo migliore all'evento? (da 1 a 5, con 1 accuratezza minima, 5 accuratezza max)										
14	Note relative all'intensità del vento (periodo in cui il vento è stato particolarmente intenso)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		1	2	3	4	5					
1	2	3	4	5									
		Note											

Fig. A1: Questionario utilizzato per il rilevamento delle informazioni circa la colata detritica del 29 ottobre 2018 sul conoide di Dimaro

Vengono qui riportati i soli risultati relativi alla tempistica delle pulsazioni di colata (Tab. A1). Si può notare che non tutti gli intervistati hanno risposto alle domande relative a tali tempistiche: 9 persone hanno riportato indicazioni per la prima colata, 4 per la seconda, 5 per la terza.

Tabella A1. Valutazione delle tempistiche delle colate (tre pulsazioni) sulla base delle interviste

Tempistiche delle colate detriche (ore:minuti)			
	Prima colata	Seconda colata	Terza colata
tempi	19:01	19:47	23:40
	19:01	20:15	23:40
	19:05	20:00	23:45
	19:02	19:20	23:30
	19:00		23:30
	18:59		
	19:02		
	19:02		
	19:00		
Media	19:01	19:51	23:37
Range¹	19:00-19:02	19:47-20:00	23:30-23:40

¹ Il range è stato calcolato eliminando da ciascuna serie i valori massimi e minimi.

L'esame delle risposte mostra che le indicazioni relative alla prima colata cadono in un intervallo assai modesto, fornendo in tal modo una possibile valutazione dell'accuratezza delle risposte. Più ampi sono gli intervalli relativi alle altre due colate, in ragione della probabile difficoltà degli intervistati a fissare un orario in condizioni di pericolo e di stress importante.