

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI
AGRO-FORESTALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

**ANALISI DI TREND NEGLI
EVENTI AFFLUSSI-DEFLUSSI IN
UN BACINO MONTANO: ESAME
DELL'INFLUENZA DELLA
DINAMICA NIVALE TRAMITE
UTILIZZO DI IMMAGINI
SATELLITARI**

Relatrice: Prof.ssa Eleonora Dallan

Correlatori: Prof. Marco Borga

Dott.ssa Ylenia Gelmini

Laureando: Luca Ongaro

Matricola n. 2027896

Anno Accademico 2022-2023

Riassunto

Lo studio presentato in questa tesi si concentra sull'analisi dei trend nel regime degli afflussi meteorici e dei deflussi in un bacino montano e mira a valutare l'influenza della dinamica nivale combinando dati idro-meteorologici con immagini satellitari multispettrali. L'attenzione è focalizzata sulla parte alta del bacino del Cordevole, rappresentata dal bacino del Cordevole chiuso a La Vizza (BL, Italia), dove, nonostante un'intensificazione delle precipitazioni, si osserva una lieve tendenza al calo delle portate al picco annuali e del volume di deflusso. Lo scopo dello studio è quello di identificare i trend dei principali parametri idrologici e la relazione tra la presenza di neve al suolo e il regime degli afflussi e deflussi nell'area di studio, permettendo di comprendere meglio la complessa relazione tra manto nevoso e processi idrologici nel bacino. I risultati evidenziano una significativa riduzione della copertura nevosa e del coefficiente di deflusso, a indicare una diminuzione dei deflussi a fronte di un aumento della precipitazione cumulata e dell'intensità di precipitazione; interessante è anche il trend, in significativo aumento, del rapporto tra la portata al picco e la copertura nevosa.

Abstract

Trend analysis in inflow-outflow events in a mountain basin: examining the influence of snow dynamics using satellite images

The study presented in this thesis focuses on the analysis of trends in the meteorological inflows and outflows regime in a mountain basin and aims to assess the influence of snow dynamics by combining hydro-meteorological data with multispectral satellite images. The attention is focused on the upper part of the Cordevole basin, represented by the Cordevole basin closed at La Vizza (BL, Italy), where, despite an intensification of precipitation, there is a slight downward trend in annual peak flows and runoff volume. The purpose of the study is to identify the trends of the main hydrological parameters and the relationship between the presence of snow on the ground and the inflows and outflows regime in the study area, allowing a better understanding of the complex relationship between snowpack and hydrological processes in the basin. The results highlight a significant reduction in snow cover and runoff coefficient, indicating a decrease in outflow alongside an increase in cumulative precipitation and precipitation intensity; also interesting is the significantly increasing trend in the ratio between peak flow and snow cover.

Indice

1	Introduzione	11
2	Materiali e metodi	15
2.1	Descrizione dell'area di studio	15
2.2	Dati a disposizione	22
2.3	Analisi della copertura nevosa tramite immagini satellitari mul- tispettrali	22
2.3.1	L'indice NDSI e l'analisi della copertura nevosa	23
2.3.2	Le immagini MODIS	26
2.4	Elaborazione dei dati	28
2.4.1	Selezione degli eventi	28
2.4.2	Caratteristiche degli eventi	29
2.4.3	Selezione e analisi delle mappe della copertura nevosa	31
2.4.4	Calcolo dei trend delle caratteristiche degli eventi	32
3	Risultati e discussione	33
3.1	Caratteristiche degli eventi	33
3.2	Trend delle caratteristiche degli eventi	37
4	Conclusioni	47
	Bibliografia	51

Elenco delle figure

2.1	DEM del bacino del fiume Piave e del bacino del torrente Cordevole, con rappresentazione del reticolo idrografico	16
2.2	DEM del bacino del torrente Cordevole; ingrandimento nei pressi del bacino del torrente Cordevole chiuso a La Vizza	16
2.3	Temperatura media mensile per il periodo 1994-2022 presso la stazione meteo di Passo Pordoi, dati Arpav	17
2.4	Trend della temperatura media annua per il periodo 1994-2022 presso la stazione meteo di Passo Pordoi, dati Arpav	18
2.5	Precipitazione media mensile per il periodo 1994-2022 presso la stazione meteo di Passo Pordoi, dati Arpav	19
2.6	Portata media mensile e portata al picco media mensile del torrente Cordevole per il periodo 1986-2018 nei pressi della sezione di chiusura a La Vizza	20
2.7	Carta della copertura e uso del suolo (Corine Land Cover) del bacino del torrente Cordevole chiuso a La Vizza	21
2.8	Immagini a falsi colori per l'identificazione visiva della neve . . .	25
2.9	Immagine RGB, Mappa di copertura nevosa realizzata a partire da indice NDSI (Sentinel-2) e mappa MODIS	28
2.10	Esempio di evento selezionato: quando possibile, l'evento viene considerato terminato nel momento in cui la portata torna ai valori di inizio evento	29
3.1	Boxplot delle caratteristiche degli eventi riguardanti la precipitazione	34

3.2	Boxplot delle caratteristiche degli eventi riguardanti la portata .	35
3.3	Trend della precipitazione cumulata e della durata di precipitazione	38
3.4	Trend dell'intensità media e massima di precipitazione	39
3.5	Trend della portata al picco Q_{max} e del volume di deflusso Q_{tot} .	40
3.6	Trend del coefficiente di deflusso CD e del rapporto Q_{max}/Q_{tot} .	41
3.7	Trend della copertura nivale totale e stagionale	42
3.8	Trend del lag di risposta totale e stagionale	43
3.9	Trend del rapporto della portata al picco sulla copertura nevosa pre-evento	44
3.10	Riassunto dei trend delle caratteristiche degli eventi	45

Elenco delle tabelle

2.1	Quantificazione della copertura e dell'uso del suolo nell'area di studio	21
3.1	Valori degli eventi riguardanti la precipitazione	34
3.2	Valori degli eventi riguardanti la portata	36
3.3	Riassunto dei trend stagionali di copertura nivale pre-evento e lag di risposta, con rispettivi valori di p-value	43

1 | Introduzione

I cambiamenti climatici rappresentano una minaccia globale importante, con un notevole impatto sul settore ambientale e sui regimi idrici: a un aumento delle temperature consegue, oltre a una maggiore intensità delle precipitazioni, una diminuzione della presenza di neve al suolo alle quote medie, con conseguente cambiamento nella dinamica degli afflussi e deflussi e nella disponibilità di risorse idriche [IPCC (2022)].

Numerosi studi, nel corso degli ultimi decenni, hanno analizzato gli effetti dei cambiamenti climatici sulle dinamiche meteo-nivo-idrologiche a diverse scale spaziali. Nella zona delle Alpi (*GAR, Great Alpine Region*) l'andamento della precipitazione media annua negli anni risulta molto variabile, con una tendenza all'aumento a Nord della catena alpina e una leggera tendenza alla diminuzione a sud della stessa [Brunetti et al. (2006)]. Lo studio di Brugnara et al. (2012) conferma il trend in calo nella più ristretta zona centrale delle Alpi italiane, dove si trova l'area di studio, evidenziando però una scarsa significatività dei trend, a dimostrazione di come l'elevata variabilità orografica e morfologica tipica della zona impatti sulla distribuzione delle precipitazioni a scala locale; lo stesso studio, così come lo studio di Brunetti et al. (2000), mostra un lieve aumento dell'intensità di precipitazione per tutta l'area, evidenziando però anche una discreta variabilità nei trend a scala locale.

Per l'intera zona alpina diversi studi hanno, inoltre, analizzato l'effetto della variazione delle temperature sulle dinamiche idrologiche a diverse scale spaziali: studi, come quello di Böhm et al. (2001), hanno evidenziato la tendenza all'aumento, negli ultimi decenni, delle temperature in tutto l'arco alpino, mentre studi, tra cui quello di Stewart (2009), Bavay et al. (2009) e Berghuijs et al. (2014), mostrano come un aumento delle temperature impatti significa-

tivamente su bacini montani di media quota, riducendo la presenza di neve al suolo e causando variazioni nella dinamica e disponibilità delle risorse idriche. L'analisi delle caratteristiche e delle dinamiche della copertura nevosa è stata resa più semplice e accessibile grazie all'introduzione di immagini satellitari multispettrali: svariati studi hanno dimostrato l'efficacia e l'affidabilità dell'utilizzo di immagini satellitari per l'analisi della neve presente a terra, tra cui quello di *Abdulkadhim (2019)*, *Hall et al. (2002)* e *Tekeli et al. (2005)*; molto importante in questo ambito è lo studio di *Notarnicola et al. (2013)*, in cui viene descritto l'algoritmo che ha permesso di ottenere mappe giornaliere della copertura nevosa a partire da immagini satellitari MODIS, mantenendo una buona risoluzione spaziale e un'elevata affidabilità.

Per l'area oggetto di studio nella presente tesi, rappresentata dal bacino del torrente Cordevole chiuso a La Vizza (BL), diversi lavori hanno analizzato le dinamiche e l'interazione tra le principali variabili meteo-nivo-idrologiche (*Guastini et al. (2019)*, *Penna et al. (2017)*, *Norbiato et al. (2009)* e altri), ma l'analisi dell'andamento negli anni della copertura nevosa e le interazioni con precipitazioni e portate non erano ancora stati approfonditi. Tale analisi risulta importante in questa area in quanto si osserva, a differenza di altre zone limitrofe, un aumento delle precipitazioni cumulate, a cui però corrisponde una diminuzione delle portate al picco e dei volumi di deflusso.

L'obiettivo del lavoro presentato in questa tesi è, quindi, quello di analizzare le caratteristiche degli eventi di precipitazione e portata e verificare l'eventuale presenza di trend statisticamente significativi, ponendo particolare attenzione al ruolo svolto dalla copertura nevosa.

In particolare, gli obiettivi specifici di questa tesi sono:

- Analizzare e descrivere le principali caratteristiche degli eventi di precipitazione e portata osservati nel periodo 1985-2018;
- Descrivere l'andamento dei principali parametri di precipitazione e portata e verificare la presenza di trend statisticamente significativi, utilizzando il test di Mann-Kendall [*Mann (1945)*, *Kendall (1975)*, *Helsel e*

Frans (2006)] e quantificando il tasso medio di variazione con il test non parametrico di stimatore della pendenza di Sen [*Sen (1968)*];

- Analizzare la copertura nevosa al suolo a partire da immagini satellitari MODIS, per il periodo 2003-2018, e verificare la presenza di trend statisticamente significativi con la stessa metodologia descritta nel punto precedente;
- Analizzare e quantificare le interazioni tra la dinamica nivale e afflussi e deflussi.

Questo lavoro, oltre a mostrare l'importanza e le numerose possibilità di utilizzo delle immagini satellitari multispettrali, mette in evidenza gli effetti del cambiamento climatico, sottolineando le variazioni nel regime idrico del bacino idrografico sia dal punto di vista quantitativo che dal punto di vista temporale: è necessario che queste dinamiche vengano analizzate e approfondite, in quanto un precoce e più repentino scioglimento del manto nevoso e la trasformazione delle precipitazioni nevose in precipitazioni liquide porteranno a un aumento delle portate al picco nei periodi primaverili, favorendo maggiori esondazioni [*Bavay et al. (2009)*].

2 | Materiali e metodi

2.1 Descrizione dell'area di studio

L'area di studio, corrispondente al bacino idrografico del torrente Cordevole chiuso a La Vizza (BL), si trova nella parte alta del bacino idrografico del torrente Cordevole, nei pressi di Arabba, frazione di Livinallongo Del Col Di Lana (BL), e sul confine tra Veneto e Trentino-Alto Adige: si tratta di un'area di 7.23 km², situata a una quota media pari a circa 2300 m s.l.m., con una quota minima pari a 1850 m s.l.m., presso La Vizza, e una massima pari a 3152 m s.l.m., presso la vetta del Piz Boè, appartenente al gruppo del Sella.

Il piccolo bacino montano chiuso a La Vizza è una porzione del ben più esteso bacino del torrente Cordevole, di superficie pari a 860 km², sottobacino del bacino idrografico principale del fiume Piave, di cui il torrente Cordevole è il principale affluente (*Figura 2.1*).

In *Figura 2.2* è rappresentato il modello digitale di elevazione (DEM) dell'intero bacino del Cordevole, con un ingrandimento nei pressi del bacino chiuso a La Vizza; nell'ingrandimento si osservano, oltre all'elevazione, il torrente Cordevole, che nasce sul confine tra Veneto e Trentino-Alto Adige, presso Passo Pordoi (2239 m s.l.m.), e il Rio Vauz, piccolo affluente del torrente Cordevole.

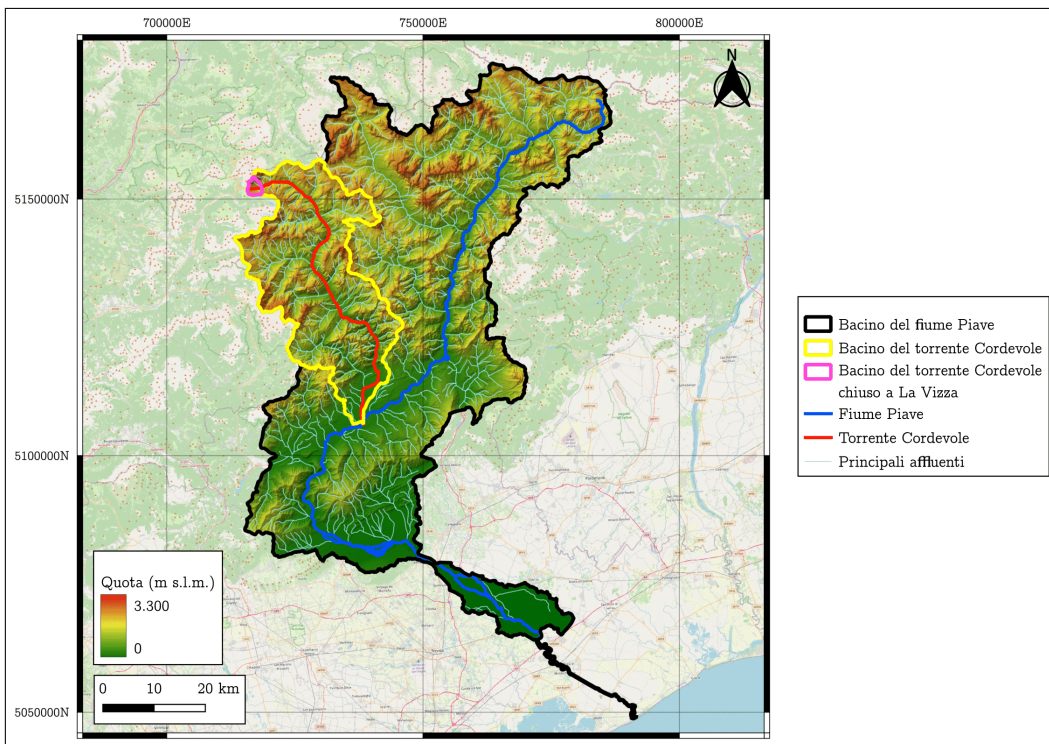


Figura 2.1: DEM del bacino del fiume Piave e del bacino del torrente Cordevole, con rappresentazione del reticolo idrografico

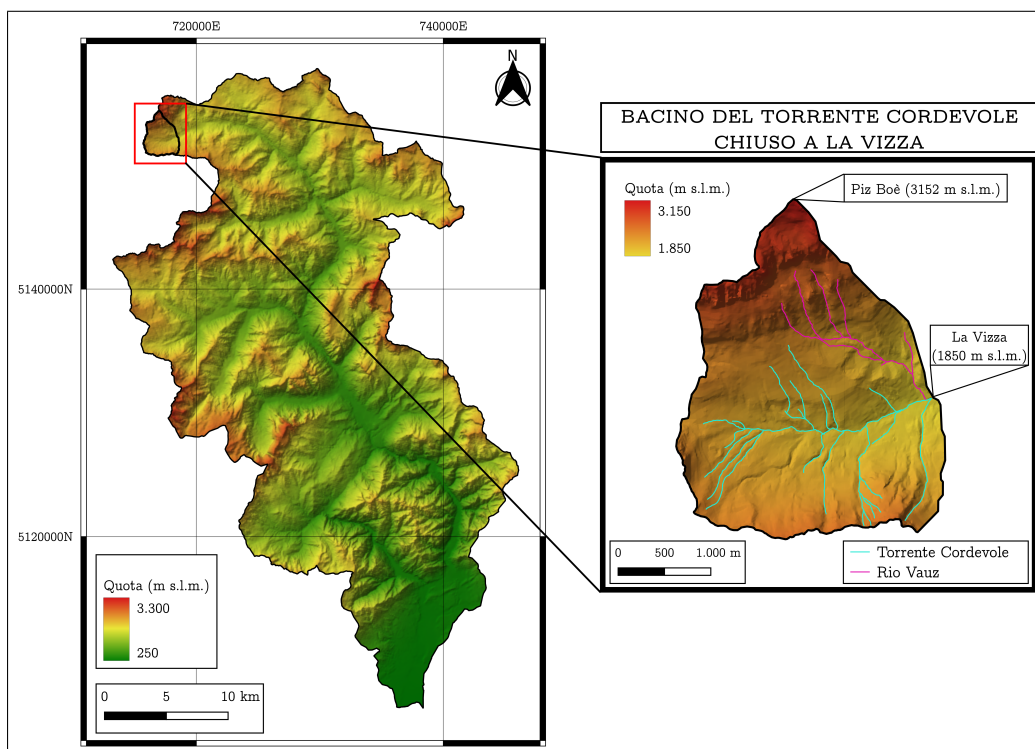


Figura 2.2: DEM del bacino del torrente Cordevole; ingrandimento nei pressi del bacino del torrente Cordevole chiuso a La Vizza

La temperatura media mensile nell'area di studio (**Figura 2.3**), ottenuta da dati Arpav per il periodo 1994-2022 presso la stazione di Passo Pordoi, oscilla tra valori minimi di $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, nel mese di gennaio, e tra valori massimi di $10.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, nel mese di luglio; le temperature medie risultano sotto lo 0 per tutto il periodo invernale.

Zone come l'area di studio, caratterizzate da una temperatura media mensile minima inferiore ai $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e una media mensile massima superiore ai $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, sono tipiche dei climi boreali o delle foreste nivali (*Boreale oder Schnee-Wald Klimate*), come definito dalla classificazione dei climi di Köppen-Geiger [Kottek et al. (2006)].

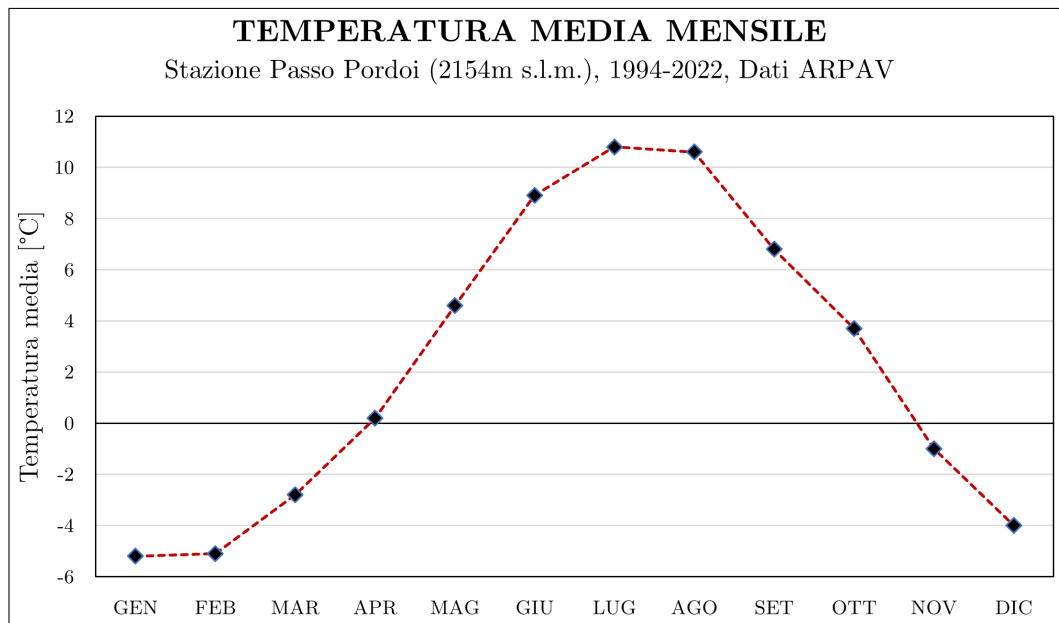


Figura 2.3: Temperatura media mensile per il periodo 1994-2022 presso la stazione meteo di Passo Pordoi, dati Arpav

La temperatura media annua, pari a $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ nel periodo 1994-2022, mostra un trend in crescita di circa $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni dieci anni [Marcon (2023)], come osservabile in **Figura 2.4**: nonostante i dati a disposizione coprano un periodo di tempo relativamente breve, pari a ventinove anni, il trend, analizzato con il test di Mann-Kendall, risulta significativo ($p\text{-value} < 0.01$).

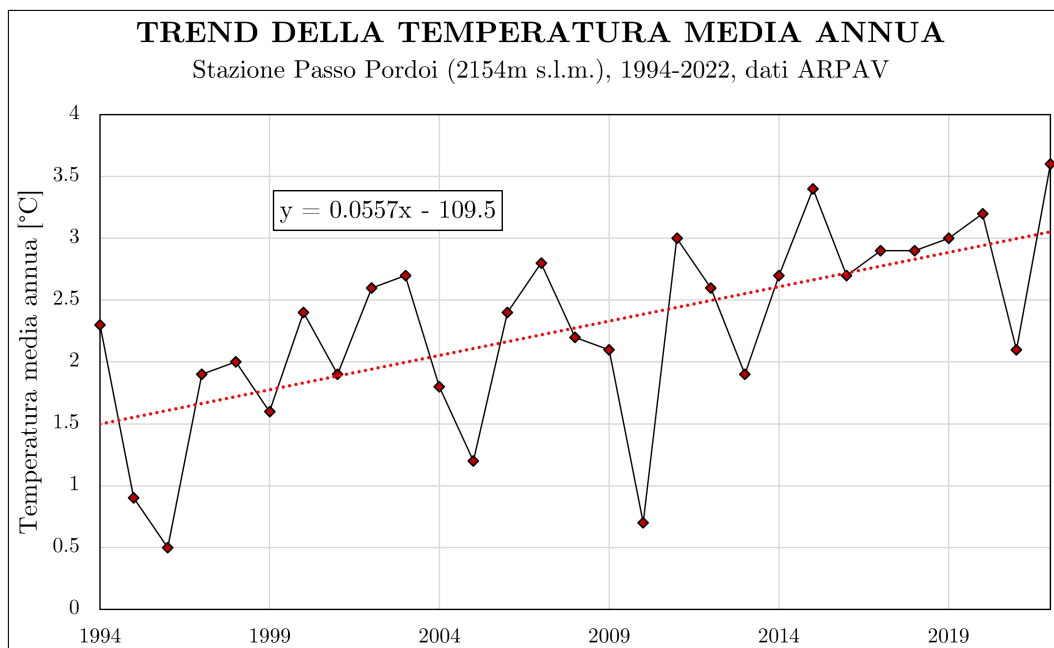


Figura 2.4: Trend della temperatura media annua per il periodo 1994-2022 presso la stazione meteo di Passo Pordoi, dati Arpav

Le precipitazioni, ottenute da dati Arpav per il periodo 1994-2022 presso la stazione di Passo Pordoi, sono concentrate nel periodo estivo, con un valore massimo medio mensile di circa 170 mm nel mese di agosto e un minimo medio mensile di circa 25 mm nel mese di febbraio (**Figura 2.5**); l'area è quindi caratterizzata da un regime pluviometrico continentale, caratteristico della maggior parte dell'arco alpino, dove le precipitazioni sono concentrate prevalentemente nel periodo estivo. La precipitazione media annua nell'area di studio, calcolata per il periodo 1994-2022 da dati Arpav, è pari a 1032 mm. Le precipitazioni nevose, a causa della quota media elevata dell'area di studio e della posizione all'interno delle Alpi, sono quantificate come approssimativamente la metà della precipitazione media annua [*Guastini et al. (2019)*], pari a circa 516 mm medi annui per il periodo 1994-2002, concentrate prevalentemente tra ottobre e aprile; lo scioglimento nivale inizia generalmente tra marzo e aprile, all'aumentare delle temperature, e continua fino a luglio [*Guastini et al. (2019)*].

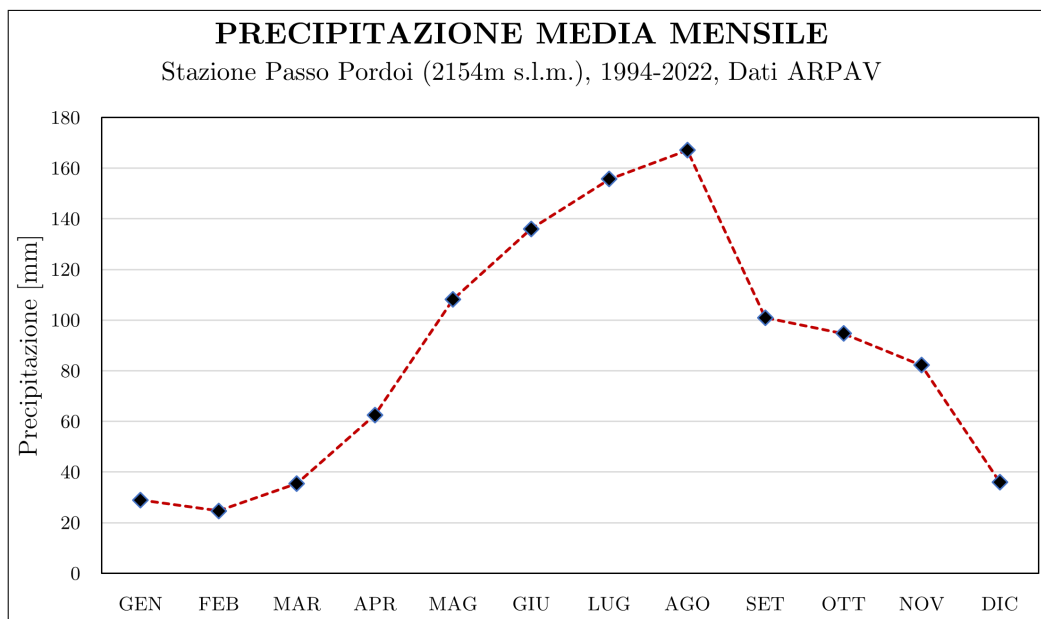


Figura 2.5: Precipitazione media mensile per il periodo 1994-2022 presso la stazione meteo di Passo Pordoi, dati Arpav

La portata del torrente Cordevole (**Figura 2.6**), misurata presso la sezione di chiusura a La Vizza, è fortemente influenzata dallo scioglimento nivale: nel periodo 1986-2018 il valore medio mensile più elevato, pari a $0.53 \text{ m}^3/\text{s}$, si osserva nel mese di maggio, mese in cui è forte lo scioglimento nivale, mentre il minimo si osserva nei mesi invernali, quando non si hanno né precipitazioni liquide né scioglimento nivale; nello stesso periodo la portata media annua risulta pari a $0.21 \text{ m}^3/\text{s}$. Sempre nella stessa figura si osserva la portata al picco media mensile: l'andamento è simile alla portata media mensile, ma rispetto a questa è maggiormente influenzata dalle precipitazioni estive, mentre cala drasticamente nel periodo invernale; la portata al picco media annua, nel periodo 1986-2018, risulta pari a $2.28 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il deflusso medio annuo risulta quindi pari a circa 905 mm, mentre il coefficiente di deflusso, dato dal rapporto tra deflusso medio annuo e precipitazione media annua, risulta pari a 0.88: un valore così elevato, tipico di zone in cui il suolo poco permeabile fa sì che la maggior parte della precipitazione si trasformi in deflusso, è dovuto all'elevato impatto che ha lo scioglimento della neve sul deflusso; se si considerano i valori medi del periodo estivo (da maggio a

settembre) il coefficiente di deflusso risulta maggiore a causa dello scioglimento della copertura nevosa, con un valore pari a 1.13, mentre per i restanti mesi (da ottobre ad aprile) il valore scende a 0.70.

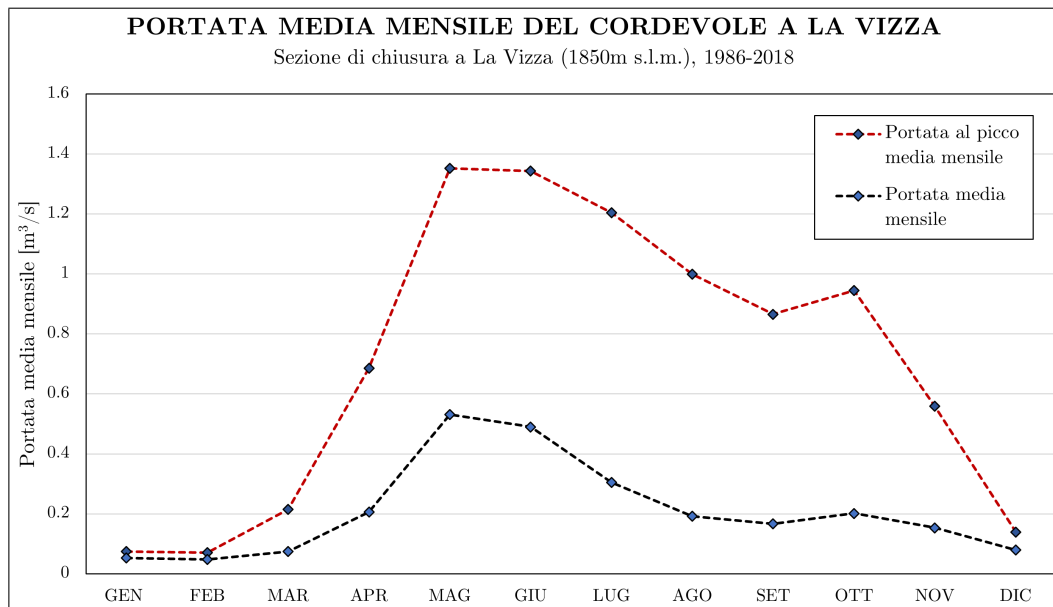


Figura 2.6: Portata media mensile e portata al picco media mensile del torrente Cordevole per il periodo 1986-2018 nei pressi della sezione di chiusura a La Vizza

Nella figura che segue (**Figura 2.7**) è rappresentata la carta della copertura e dell'uso del suolo (*Corine Land Cover*): si nota come la maggior parte dell'area, pari a circa il 60%, sia costituita da praterie naturali di alta quota, mentre è scarsa la presenza di alberi ad alto fusto (circa l'1%) a causa della quota elevata e, quindi, della vicinanza al limite superiore dei boschi e degli alberi. Gli alberi ad alto fusto presenti, concentrati nella zona più a valle dell'area di studio, sono per la maggior parte larici (*Larix decidua*) e, in quota minore, abeti rossi (*Picea abies*), mentre la maggior parte della vegetazione della zona, circa il 10% dell'area, è costituita da alnete di ontano verde (*Alnus viridis*) in forma arbustiva. Nelle zone a quote più elevate, a nord e, in misura minore, a sud dell'area di studio, sono presenti ghiaioni, roccia nuda e pareti rocciose pressoché verticali costituite da Dolomia [Penna et al. (2017)], roccia sedimentaria carbonatica caratterizzata da una media permeabilità, mentre le zone a quote più basse del bacino sono caratterizzate dalla presenza di calcari

e argille marnose, a scarsa permeabilità.

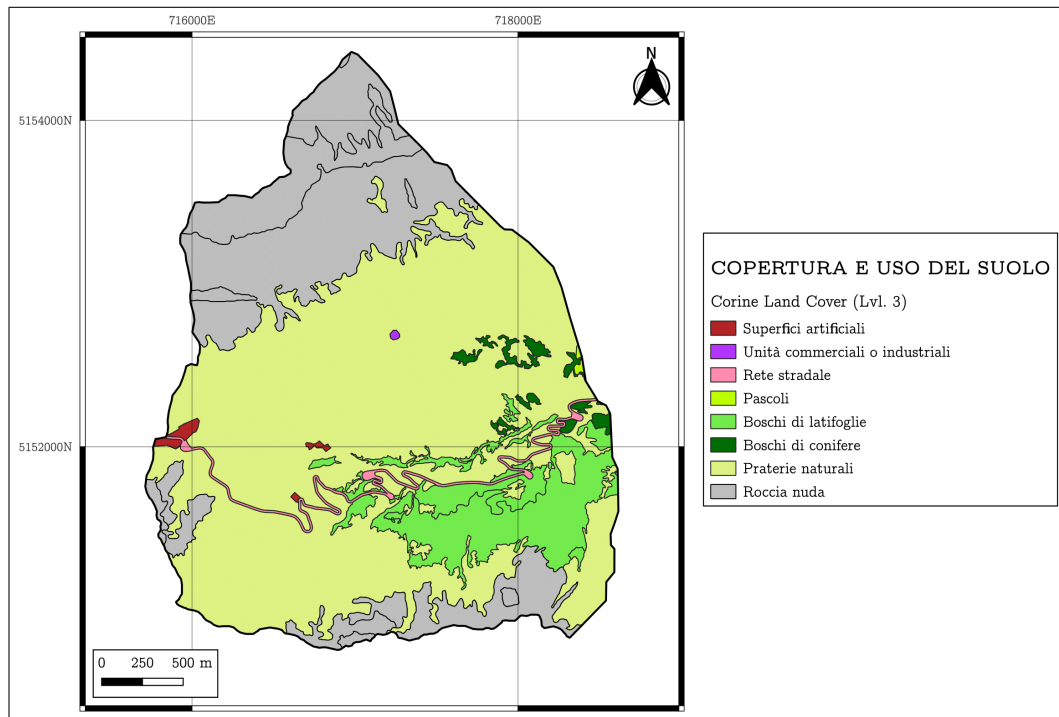


Figura 2.7: Carta della copertura e uso del suolo (Corine Land Cover) del bacino del torrente Cordevole chiuso a La Vizza

Nella **Tabella 2.1** sono riportati i valori di copertura e uso del suolo, con le dimensioni delle varie aree espresse sia in ettari che in percentuale rispetto alla totalità dell'area di studio; in tabella non sono riportati i valori delle aree a pascolo in quanto di dimensioni trascurabili.

	Superfici artificiali	Boschi di latifoglie (Alneti)	Boschi di conifere	Praterie	Superfici rocciose	Totale
Area [ha]	11.8	73.5	8.3	433.0	196.0	722.6
Area [%]	1.6	10.2	1.1	59.9	27.1	100

Tabella 2.1: Quantificazione della copertura e dell'uso del suolo nell'area di studio

2.2 Dati a disposizione

Per questo lavoro di tesi sono stati utilizzati i dati riguardanti:

- Precipitazione oraria, in mm, presso Passo Pordoi dal 1-10-1985 al 1-10-2018;
- Portata oraria del Cordevole a La Vizza, in m³/s, dal 1-10-1985 al 1-10-2018;
- Immagini satellitari multispettrali di Sentinel-2, ottenute dall'Open Access Hub di Copernicus [*European Space Agency*];
- Mappe giornaliere della copertura nevosa a partire da immagini satellitari multispettrali MODIS, dal 01-01-2003 al 31-12-2018, realizzate e fornite da Eurac.

2.3 Analisi della copertura nevosa tramite immagini satellitari multispettrali

Le immagini satellitari multispettrali e i GIS (Sistemi Informativi Geografici) in generale ricoprono un ruolo fondamentale in molteplici ambiti lavorativi, in particolar modo nel settore forestale e del monitoraggio ambientale: in questo lavoro di tesi le immagini multispettrali sono state utilizzate per l'analisi delle caratteristiche della copertura nevosa al suolo precedente a ogni evento di deflusso nell'area di studio, da affiancare a una classica analisi statistica dei dati idro-meteorologici.

Nei paragrafi che seguono vengono presentate e descritte le immagini MODIS e le mappe della copertura nevosa che ne derivano, oltre ai principi fisici utilizzati per l'analisi della copertura nevosa a partire da immagini satellitari e gli indici descrittivi che vengono realizzati.

2.3.1 L'indice NDSI e l'analisi della copertura nevosa

L'analisi della copertura nevosa tramite immagini multispettrali si basa sul modo in cui la neve riflette la radiazione elettromagnetica in base alla sua lunghezza d'onda: la neve, caratterizzata da un albedo elevato, riflette quasi la totalità della radiazione incidente nello spettro del visibile (*VIR*), mentre la parte di radiazione riflessa si riduce passando nello spettro del vicino infrarosso (*NIR*, *Near Infra-Red*) e raggiunge il minimo nello spettro dell'infrarosso a onde corte (*SWIR*, *Short Wave Infra-Red*). Queste caratteristiche della neve permettono di distinguerla dalla vegetazione, che non riflette molta radiazione nello spettro del visibile, e dalle nuvole, che riflettono molta radiazione nel visibile ma che, a differenza della neve, riflettono molta radiazione anche nello spettro dell'infrarosso a onde corte [*Hall et al. (2002)*].

Basandosi su questo diverso comportamento dei vari elementi rispetto alla radiazione incidente sono stati ideati degli indici per identificare la copertura nevosa, tra cui il più importante è l'NDSI (*Normalized Difference Snow Index*), calcolato a partire dalla radiazione incidente nel visibile (Verde) e nell'infrarosso a onde corte:

$$NDSI = \frac{(VIR - SWIR)}{(VIR + SWIR)}$$

Questo indice corrisponde a una immagine raster in cui pixel possiedono valori che variano da -1 a +1: generalmente, valori maggiori di 0 indicano una possibile presenza di neve, ma un pixel viene definito neve se il valore di NDSI è superiore a 0.4 [*Hall et al. (2001)*].

L'indice può essere inoltre perfezionato andando a eliminare pixel che non risultano essere neve in base all'analisi di ulteriori bande: vengono eliminati, ad esempio, quei pixel in cui l'NDSI è elevato ma è basso il valore di riflettanza nelle bande del visibile e del vicino infrarosso, dove dovrebbe essere elevato, in quanto la neve riflette molto nella banda del visibile e discretamente nella banda del vicino infrarosso [*Hall et al. (2001)*].

Oltre alla realizzazione di indici, utili per valutare e quantificare la copertura nevosa in una determinata zona, attraverso le immagini multispettrali è anche possibile identificare visivamente la neve semplicemente agendo sulla combinazione delle varie bande, creando immagini in grado di metterla in risalto: è possibile quindi creare delle immagini, a scopo di supporto visivo, combinando le bande per le quali si conosce il comportamento della neve nei confronti della radiazione elettromagnetica incidente, sostituendole alle bande classiche RGB (*Red*, *Green* e *Blue*); le immagini che si creano vengono dette immagini a falsi colori. In **Figura 2.8** si può osservare un esempio di immagine a falsi colori che mette in evidenza la neve: l'immagine di sinistra, data dalla combinazione delle bande NIR, RED e GREEN, è un tipo di immagine a falsi colori utilizzata tipicamente per il riconoscimento della vegetazione, in quanto questa riflette la luce nello spettro del vicino infrarosso (NIR); avendo sostituito nell'immagine la banda NIR al rosso, la vegetazione risulterà di colore rosso, facilmente distinguibile. Nonostante questa non sia una immagine creata appositamente per il riconoscimento della copertura nevosa, si può osservare come la neve risulti ben visibile, come anche confermato dalla immagine sulla destra: l'immagine a falsi colori presente sulla destra, utilizzata tipicamente proprio per l'identificazione della neve, è stata realizzata combinando le bande RED, SWIR1 e SWIR2, facendo risaltare la neve di rosso secondo lo stesso principio della vegetazione nell'immagine di sinistra, in quanto riflette la maggior parte della radiazione incidente nello spettro tra il visibile e il vicino infrarosso.

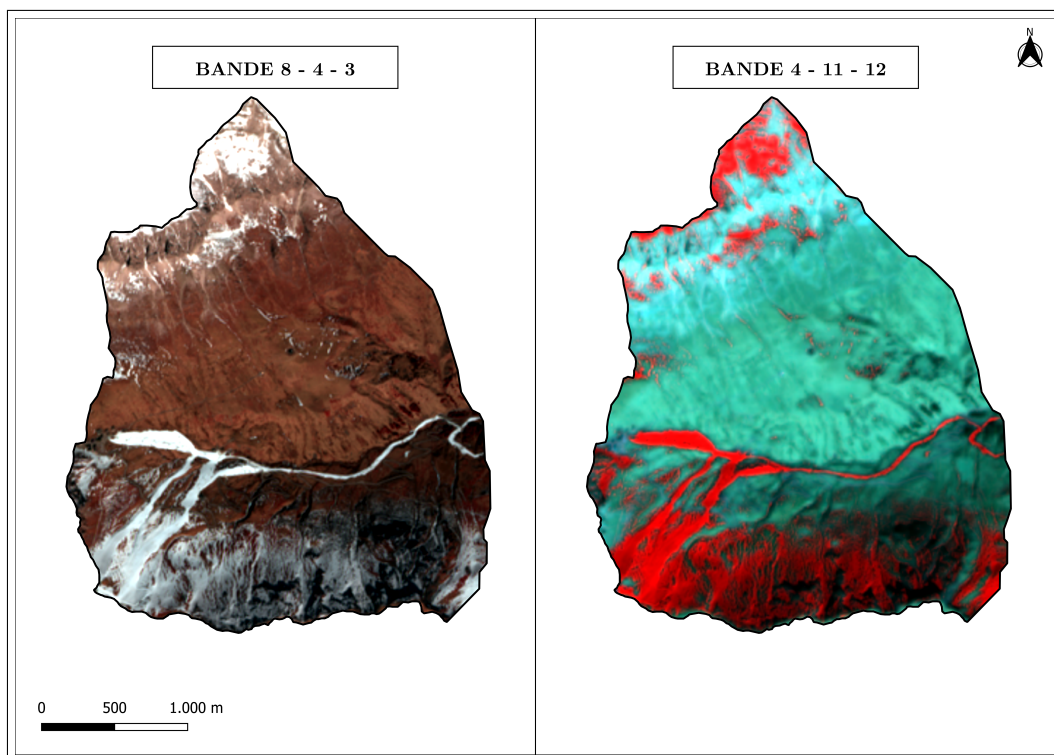


Figura 2.8: Immagini a falsi colori per l'identificazione visiva della neve

Inizialmente in questo lavoro si erano considerate queste immagini per l'alta risoluzione spaziale. Le immagini multispettrali raccolte da Sentinel-2, missione dell'European Space Agency, e da Landsat 8, missione di Nasa in collaborazione con l'USGS (*United States Geological Survey*), sono infatti caratterizzate da una risoluzione spaziale ottimale, pari a 10 e 20 metri per Sentinel e 30 metri per Landsat, ma hanno come difetto una risoluzione temporale relativamente scarsa: le immagini Sentinel-2 sono disponibili, grazie alla presenza di due satelliti sulla stessa orbita, per la stessa area ogni due-cinque giorni in base alla zona (cinque all'equatore, due-tre alle medie latitudini) [*European Space Agency*], mentre le immagini Landsat 8 sono disponibili per la stessa area ogni sedici giorni [*USGS*]. Per questo lavoro di tesi è stato fondamentale avere a disposizione immagini satellitari caratterizzate da una risoluzione temporale giornaliera, in modo da poter descrivere la copertura nevosa per ogni evento selezionato. Come compromesso sono state, quindi, utilizzate le immagini raccolte dallo strumento MODIS della Nasa, caratterizzate da una risoluzione temporale giornaliera, fondamentale per l'analisi di eventi vicini tra loro, ma

anche da una risoluzione spaziale scarsa, da 250m a 1000m in base alla banda.

2.3.2 Le immagini MODIS

Il MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) è uno strumento, o sensore, presente sui satelliti AQUA e TERRA lanciati dalla Nasa a cavallo tra il 1990 e il 2000 con lo scopo di osservare la Terra e le dinamiche atmosferiche e superficiali, fornendo immagini multispettrali con una risoluzione temporale di uno-due giorni e in trentasei bande spettrali [Nasa]; la risoluzione spaziale varia in base alle bande, con una risoluzione di 250 m per le prime due bande, 500 m per le bande dalla tre alla sette e 1000 m per le restanti ventinove bande.

Le immagini Modis, utilizzate spesso per l'analisi della copertura nevosa e per la realizzazione di indici NDSI (*Normalized Difference Snow Index*), sono state utilizzate in questo lavoro di tesi per quantificare la percentuale di area di studio ricoperta da neve nei giorni precedenti agli eventi selezionati. L'indice NDSI viene realizzato utilizzando le bande 4 e 6 [Abdulkadhim (2019), Hall et al. (2001)], rispettivamente visibile e infrarosso a onde corte, creando un'immagine raster con pixel di risoluzione pari a 500 m.

Analizzare la percentuale di area coperta da neve in un bacino montano di area ridotta (7.23 km²) utilizzando immagini con una risoluzione spaziale di 500 m risulta sicuramente impreciso e poco affidabile, motivo per cui è stato necessario cercare di quantificare l'area coperta da neve analizzando indici e immagini prodotti a partire dalle prime due bande delle immagini MODIS, bande nello spettro del rosso e dell'infrarosso, caratterizzate da una risoluzione spaziale di 250 m. Per questo lavoro di tesi sono state quindi utilizzate delle mappe derivate dalle immagini MODIS, con una risoluzione di 250 m e in grado di riconoscere la copertura nevosa, nate da uno studio dell'*Institute for Applied Remote Sensing* di Eurac in collaborazione con l'Università di Zurigo, Svizzera, e l'Università di Oslo, Norvegia [Notarnicola et al. (2013)]. In questo studio l'identificazione della copertura nevosa viene determinata secondo i seguenti passaggi:

- In primis viene identificata la neve a partire da un indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), calcolato con le prime due bande dell'immagine MODIS, per evitare una sovrastima della copertura nevosa a causa della elevata riflettanza della vegetazione nuova, soprattutto a fine inverno, e in base alla riflettanza nello spettro coperto dalla banda 1;
- La banda termica (banda 31) viene utilizzata come verifica;
- Successivamente individuano le nuvole utilizzando le bande 6 e 4, sfruttando la diversa riflettanza in queste bande rispetto alla neve, utilizzando anche la banda termica per il rilevamento dei cirri, più simili alla neve dal punto di vista della riflettanza in queste bande; per ridurre al minimo la probabilità di immagini con elevata copertura nuvolosa, quando possibile, vengono unite le mappe realizzate a partire dai sensori MODIS installati sui satelliti AQUA e TERRA, che acquisiscono immagini in diversi momenti della stessa giornata. Il prodotto finale è una mappa della copertura nevosa in grado di riconoscere i pixel con neve, senza neve, con acqua e con nuvole, a una risoluzione migliore rispetto ai classici indici NDSI realizzati con le stesse immagini, mantenendo comunque una accuratezza che oscilla tra l'85% e il 95% rispetto a immagini Landsat 8 e MODIS [Notarnicola et al. (2013)].

Nella figura che segue (**Figura 2.9**) sono rappresentate, oltre a una immagine a colori normali (RGB), due mappe della copertura nevosa rappresentanti la situazione dello stesso giorno: la prima, in centro, è una mappa realizzata a partire da dataset Sentinel-2, dal quale è stato creato un indice NDSI, successivamente corretto sfruttando le bande 2 e 8, ovvero eliminando quei pixel dove il valore di NDSI era elevato ma era ridotto il valore di riflettanza nelle due bande; la seconda, a destra, è una mappa della copertura nevosa realizzata da Eurac ed esempio del tipo di mappe utilizzate per l'analisi in questo lavoro di tesi. Questa figura mostra chiaramente le differenze di risoluzione spaziale, rispettivamente pari a 20 m e 250 m, tra le due mappe, con la mappa MODIS

che risulta meno accurata, soprattutto se viene considerata un'area di dimensioni così ridotte. L'indice NDSI indica come il 23.5% dell'area sia coperto da neve, mentre per la mappa MODIS è pari al 43.2%. Tale discrepanza è dovuta a diversi motivi: affinché un pixel della mappa MODIS venga indicato come coperto da neve è necessario che almeno il 50% di questo pixel possieda della neve [Tekeli et al. (2005)]; si osserva, inoltre, la presenza di nuvole nella mappa MODIS, dovute a un rilevamento effettuato da parte dei satelliti in momenti diversi della stessa giornata. Nonostante ciò, soprattutto grazie alla risoluzione temporale giornaliera, le mappe MODIS sono sufficienti per poter analizzare la copertura nevosa pre-evento e il suo trend nel corso degli anni.

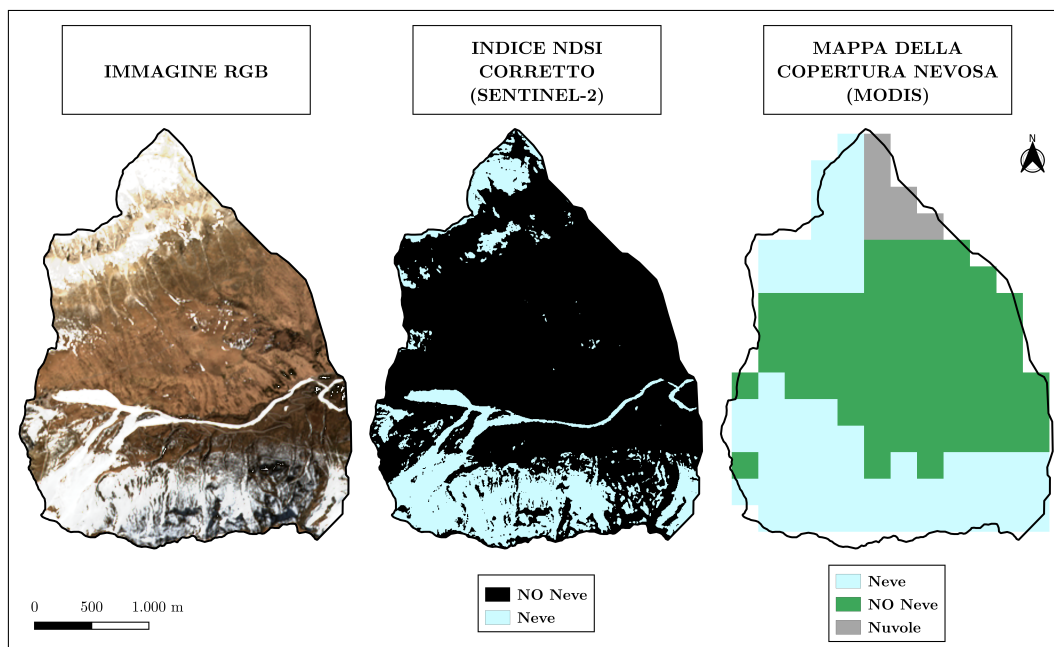


Figura 2.9: Immagine RGB, Mappa di copertura nevosa realizzata a partire da indice NDSI (Sentinel-2) e mappa MODIS

2.4 Elaborazione dei dati

2.4.1 Selezione degli eventi

Utilizzando i dati riguardanti precipitazione oraria, in mm, e portata oraria, in m^3/s , per l'area di studio è stato effettuato un processo di identificazione e

selezione degli eventi idonei allo studio seguendo le metodologie descritte da E. Guastini et al. (2019):

- Gli eventi devono avere una precipitazione cumulata uguale o maggiore a 5 mm;
- Gli eventi devono essere separati da almeno 6 ore con assenza di precipitazioni;
- Gli eventi devono avere una portata al picco Q_{max} maggiore di almeno 0.01 mm/h rispetto alla portata pre-evento.

Applicando questi criteri sono stati identificati, tra il 1985 e il 2018, 912 eventi idonei per lo studio. Nella figura che segue (**Figura 2.10**) viene riportato un esempio di evento selezionato.

Date time	P	Q	Q				P
19/10/1998 11:00	0.8	0.315					
19/10/1998 12:00	0	0.325	Min	0.315	0.155	Differenza	0.052
19/10/1998 13:00	1.6	0.335	Max	0.420	0.207		
19/10/1998 14:00	4.8	0.345					
19/10/1998 15:00	2.2	0.42					
19/10/1998 16:00	2.4	0.395					
19/10/1998 17:00	2.8	0.37					
19/10/1998 18:00	1.4	0.36					
19/10/1998 19:00	0.4	0.355					
19/10/1998 20:00	0	0.34					
19/10/1998 21:00	0	0.34					
19/10/1998 22:00	0	0.33					
19/10/1998 23:00	0	0.33					
20/10/1998 00:00	0	0.33					
20/10/1998 01:00	0	0.33					
20/10/1998 02:00	0	0.33					
20/10/1998 03:00	0	0.33					
20/10/1998 04:00	0	0.315					
						Somma	16.40

Figura 2.10: Esempio di evento selezionato: quando possibile, l'evento viene considerato terminato nel momento in cui la portata torna ai valori di inizio evento

2.4.2 Caratteristiche degli eventi

A partire dagli eventi selezionati e utilizzando il software Matlab, piattaforma di programmazione per l'analisi di dati [Mathworks], sono state estratte, per ciascun evento, le caratteristiche riguardanti precipitazione e portata:

- Precipitazione cumulata P_{cum} , calcolata come sommatoria della precipitazione oraria per la durata di ciascun evento;
- Durata di precipitazione, calcolata come ore, per ciascun evento, con precipitazione oraria maggiore di 0;
- Intensità massima di precipitazione I_{max} , calcolata come valore massimo, per ciascun evento, di mm/h di precipitazione oraria;
- Intensità media di precipitazione I_{avg} , calcolata come valore medio, per ciascun evento, di mm/h di precipitazione oraria;
- Volume di deflusso Q_{tot} , calcolato come volume totale defluito alla sezione di chiusura a La Vizza per ciascun evento, espresso in mm;
- Coefficiente di deflusso CD, calcolato come rapporto tra deflusso Q_{tot} e precipitazione P_{cum} per ciascun evento;
- Portata al picco Q_{max} , calcolata come valore massimo di portata misurato per ciascun evento;
- Rapporto della portata al picco sul volume di deflusso, calcolato per ciascun evento in $m^3 s^{-1} m^{-3}$;
- Lag di risposta, inteso come distanza, in ore, tra il momento centrale dell'evento di precipitazione e la portata al picco Q_{max} ;
- Rapporto della portata al picco Q_{max} sulla copertura nivale.

Le variabili ottenute sono state graficamente rappresentate attraverso dei grafici a scatola e baffi, detti *boxplot* o *boxchart*, in grado di mettere in evidenza il valore mediano della variabile, il 25° percentile e il 75° percentile, gli estremi, come 5° percentile e 95° percentile, e gli *outliers*, valori estremi al di sotto del 5° percentile oppure al di sopra del 95° percentile.

2.4.3 Selezione e analisi delle mappe della copertura nevosa

Le mappe della copertura nevosa realizzate e fornite da Eurac, disponibili per il periodo 2003-2018, sono state in primis selezionate, andando a individuare le immagini risalenti al giorno precedente a ciascun evento. Per evitare di effettuare errori a causa di una percentuale di copertura nuvolosa troppo elevata, per questo studio si è deciso di utilizzare immagini con una copertura nuvolosa inferiore o uguale al 10%, escludendo circa il 36% delle immagini. È stato scelto di abbassare il valore percentuale pensato inizialmente, pari al 20%, in quanto permette una diminuzione della quantità di dati inaccurati a fronte di una perdita relativamente piccola di immagini, pari circa a 50.

Nel caso di immagini pre-evento caratterizzate da una elevata copertura nuvolosa è stata scelta, quando possibile, un'immagine nei sette giorni precedenti all'evento caratterizzata da una copertura nuvolosa ridotta e da una precipitazione cumulata giornaliera inferiore a 10 mm.

Le immagini così selezionate, pari a 308 delle 479 a disposizione, sono state elaborate in QGIS, applicazione GIS Open Source, e ritagliate sull'area di studio con lo strumento *'Ritaglia raster con maschera'*, utilizzando come maschera il file vettoriale del bacino idrografico del Cordevole chiuso a La Vizza. Per ciascuna mappa è stato successivamente realizzato un istogramma utilizzando lo strumento *'Istogramma del raster'*, in modo da quantificare il numero di pixel che sono neve, suolo, acqua, e nuvole. A partire da queste informazioni è stata calcolata la percentuale di area di studio coperta da neve per i giorni precedenti a ogni evento, come percentuale di pixel neve sul totale.

2.4.4 Calcolo dei trend delle caratteristiche degli eventi

I trend delle varie caratteristiche degli eventi sono stati calcolati utilizzando il test di Mann-Kendall [*Mann (1945), Kendall (1975), Helsel e Frans (2006)*] e quantificando il tasso medio di variazione con il test non parametrico di stimatore della pendenza di Sen [*Sen (1968)*]. Per calcolare i trend è stata utilizzata in Matlab la funzione *ktaub*, che restituisce direzione e significatività del trend (*p-value*), e la pendenza di Sen. Per questo studio si è scelto di definire i trend significativi per valori di *p-value* inferiori a 0.05. Le variabili calcolate sono state successivamente rappresentate attraverso grafici a dispersione, detti *scatter plot*, accompagnati da una linea di tendenza e i rispettivi valori di pendenza *Sen's Slope*, riportati come variazione percentuale su base decennale, e significatività *p-value*. Le linee di tendenza sono caratterizzate da una equazione pari a:

$$y = m \cdot x + q$$

dove *m* corrisponde al valore di *Sen's Slope*, *x* corrisponde alla differenza tra la data di ogni punto e la data iniziale e *q* rappresenta il valore medio della variabile.

I trend sono stati calcolati per:

- Precipitazione cumulata e durata di precipitazione;
- Intensità media e massima di precipitazione;
- Portata al picco Q_{max} e volume di deflusso Q_{tot} ;
- Rapporto Q_{max} su Q_{tot} e coefficiente di deflusso;
- Copertura nivale pre-evento;
- Lag di risposta;
- Rapporto Q_{max} su copertura nivale pre-evento.

Per la copertura nivale pre-evento e per il lag di risposta è stata riportato anche il trend a scala stagionale, in modo da poter osservare l'andamento in base alla stagione.

3 | Risultati e discussione

3.1 Caratteristiche degli eventi

Per descrivere le caratteristiche dei 912 eventi, selezionati secondo i criteri illustrati in precedenza nel paragrafo 2.4.1, sono stati realizzati dei *boxplot*, o diagrammi a scatola e baffi, dei principali parametri riguardanti precipitazione (*Figura 3.1*) e portata (*Figura 3.2*). In *Figura 3.1* sono rappresentati i *boxplot* di precipitazione cumulata, durata di precipitazione e intensità di precipitazione: gli eventi selezionati per questo lavoro di tesi presentano una precipitazione cumulata mediana pari a 15.20 mm, con un valore compreso tra 5 mm e 57 mm nel 95% dei casi, mentre il valore mediano di durata di precipitazione pari a 45 minuti, con il 95% degli eventi compresi entro le 3 ore di durata.

L'intensità media di precipitazione presenta un valore mediano che si attesta attorno a 1.66 mm/h, con il 95% degli eventi compresi entro i 4.60 mm/h, mentre l'intensità massima è caratterizzata da un valore mediano pari a 5.20 mm/h, con il 95% degli eventi compresi entro 13.60 mm/h.

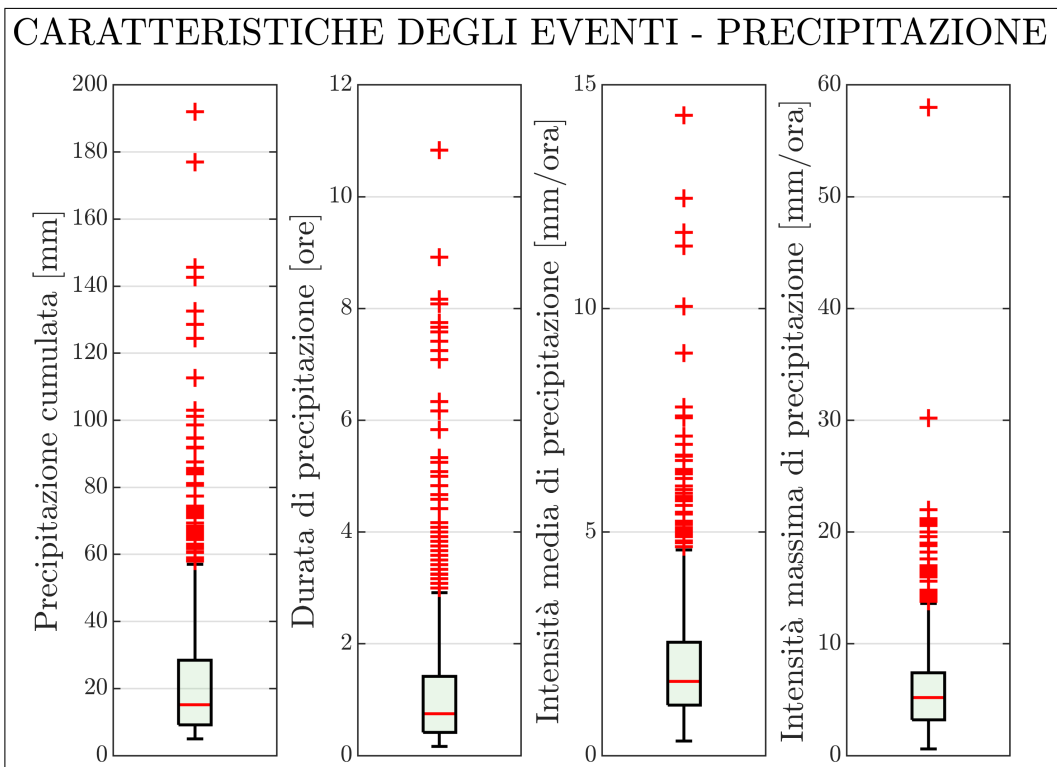


Figura 3.1: Boxplot delle caratteristiche degli eventi riguardanti la precipitazione

Nella tabella che segue (**Tabella 3.1**) sono riportati i valori principali dei parametri riguardanti la precipitazione.

	MEDIANA	5° PERCENTILE	25° PERCENTILE	75° PERCENTILE	95° PERCENTILE	PICCO
Precipitazione cumulata [mm]	15.20	5.00	9.20	28.40	57.00	192.00
Durata di precipitazione [h]	0.75	0.17	0.42	1.42	2.92	10.83
Intensità media di precipitazione [mm/h]	1.66	0.33	1.13	2.53	4.60	14.32
Intensità massima di precipitazione [mm/h]	5.20	0.60	3.20	7.40	13.60	58.00

Tabella 3.1: Valori degli eventi riguardanti la precipitazione

In **Figura 3.2** sono, invece, rappresentati i boxplot delle caratteristiche degli eventi riguardanti la portata, ovvero portata al picco (Q_{max}), volume di deflusso (Q_{tot}), coefficiente di deflusso (CD) e rapporto portata al picco su volume di deflusso (Q_{max}/Q_{tot}).

Gli eventi selezionati sono caratterizzati da una portata al picco mediana pari a $0.53 \text{ m}^3/\text{s}$, con il 95% degli eventi caratterizzati da una portata al picco inferiore a $1.46 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre il volume di deflusso mediano è pari a $0.54 \times 10^4 \text{ m}^3$, con il 95% dei casi caratterizzato da un volume di deflusso inferiore a $3.43 \times 10^4 \text{ m}^3$.

Il valore mediano del rapporto tra la portata al picco e il volume di deflusso è pari a $8.57 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ed è inferiore a $3.90 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ nel 95% dei casi, mentre il valore mediano del coefficiente di deflusso è pari a 0.05, nel 95% dei casi inferiore a 0.12.

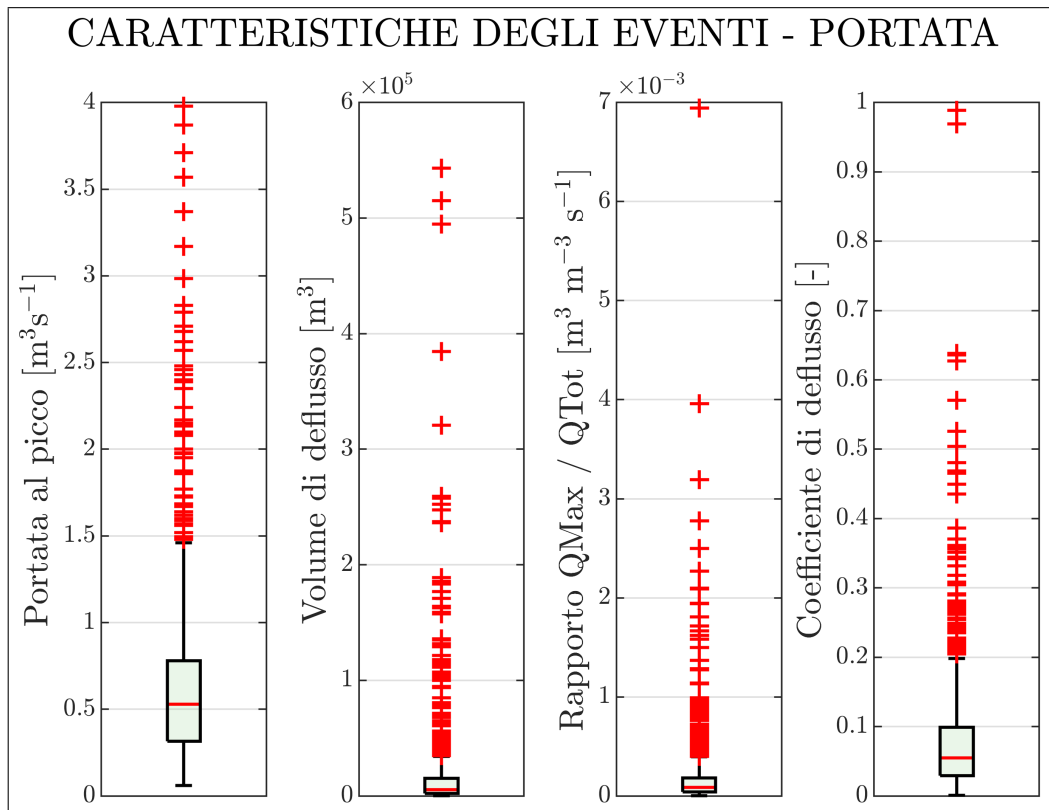


Figura 3.2: Boxplot delle caratteristiche degli eventi riguardanti la portata

I principali valori dei parametri riguardanti la portata sono rappresentati nella tabella che segue (**Tabella 3.2**).

	MEDIANA	5° PERCENTILE	25° PERCENTILE	75° PERCENTILE	95° PERCENTILE	PICCO
Portata al picco Q_{\max} [m^3/s]	0.53	0.06	0.315	0.78	1.46	3.98
Volume di deflusso Q_{tot} [m^3]	5.37×10^3	1.08×10^2	2.10×10^3	1.51×10^4	3.43×10^4	5.43×10^5
Q_{\max}/Q_{tot} [$\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$]	8.57×10^{-5}	2.61×10^{-6}	4.13×10^{-5}	1.80×10^{-4}	3.9×10^{-4}	6.9×10^{-3}
Coefficiente di deflusso CD	0.05	0.76×10^{-3}	0.03	0.10	0.12	0.99

Tabella 3.2: Valori degli eventi riguardanti la portata

3.2 Trend delle caratteristiche degli eventi

Nelle figure che seguono sono rappresentati i trend dei principali parametri meteo-nivo-idrologici degli eventi. L'andamento della precipitazione cumulata e la durata di precipitazione sono osservabili in **Figura 3.3**. Il grafico dell'andamento della durata di precipitazione nel corso degli anni mostra l'assenza di un trend statisticamente significativo, confermato soprattutto da un valore *p-value* $\gg 0.05$. Al contrario, la precipitazione cumulata mostra un trend statisticamente più rilevante, con un *p-value* pari a 0.055, vicino alla soglia di significatività adottata in questo studio. Il trend mostra un leggero aumento, pari al 2.83% su base decennale, in contrasto con il trend negativo osservato da *Brugnara et al. (2012)* per il periodo 1922-2009 nella zona centrale delle Alpi, che mostra una diminuzione compresa tra l'1% e l'1.5% per la maggior parte dell'area, nonostante i trend siano statisticamente significativi solo localmente. Se si considera un'area più ampia, equivalente a tutto l'arco alpino, e per un periodo di tempo più lungo (1500-2000), *Casty et al. (2005)* riporta l'assenza di trend significativi per quanto riguarda la precipitazione. Per il bacino del Cordevole chiuso a La Vizza il trend delle precipitazioni mostra risultati contrastanti rispetto alle zone limitrofe a causa dell'elevata variabilità geo-morfologica e orografica caratteristica della zona alpina e dimostra come l'andamento delle precipitazioni possa essere molto variabile su scala locale.

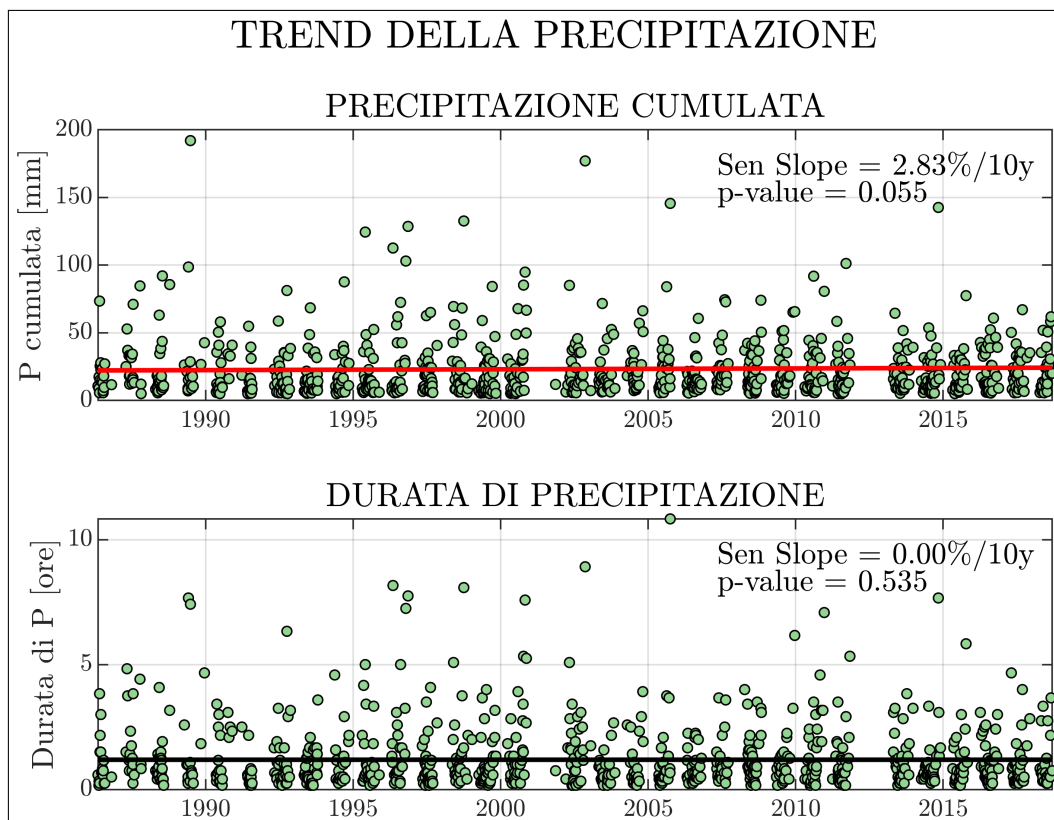


Figura 3.3: Trend della precipitazione cumulata e della durata di precipitazione

Nella figura che segue (**Figura 3.4**) è, invece, rappresentato l'andamento dell'intensità di precipitazione, sia media che massima: entrambi i trend mostrano un andamento in crescita e sono fortemente significativi, con, rispettivamente, un *p-value* pari a 0.007 e 0.005 e un aumento del 4.29% e del 4.69% su base decennale. L'aumento della precipitazione cumulata sembra, quindi, guidato principalmente dall'aumento dell'intensità di precipitazione, dato che la durata degli eventi di precipitazione risulta pressochè costante, senza la presenza di un trend significativo.

Il trend osservato mostra quindi un generale aumento dell'intensità di precipitazione, in linea con i trend osservati per la zona alpina tra Veneto e Trentino [Brugnara et al. (2012)] e per il Nord Italia in generale [Brunetti et al. (2000)].

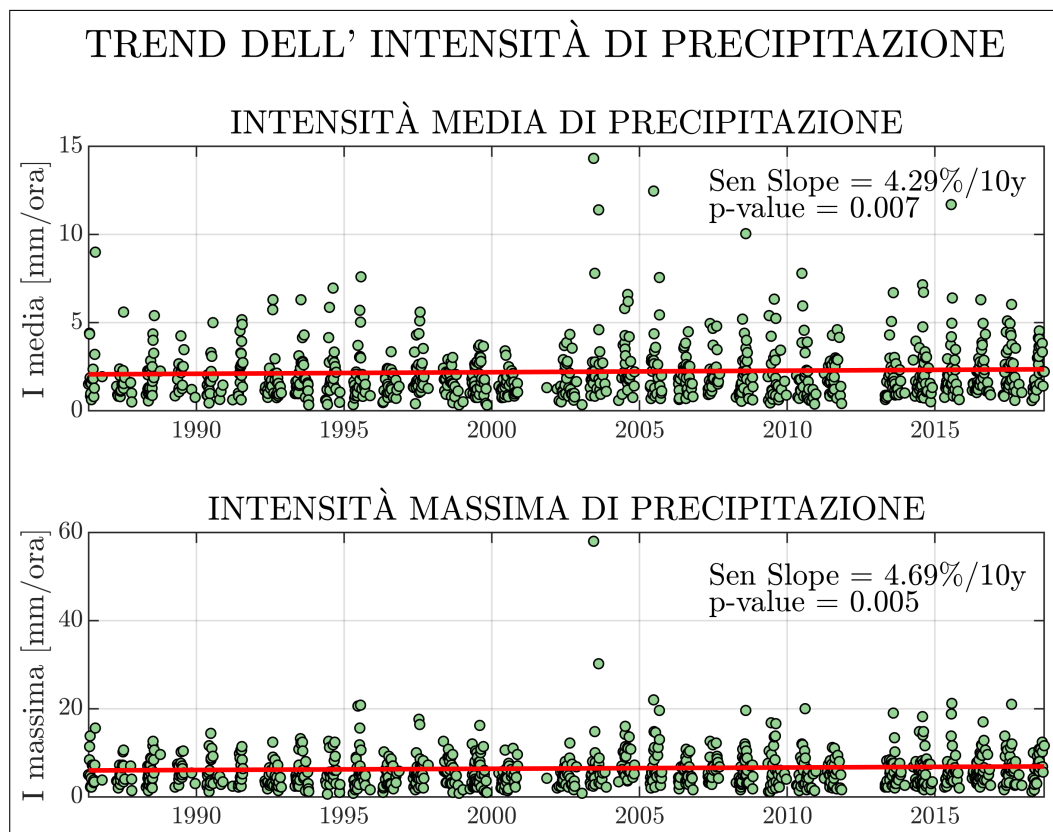


Figura 3.4: Trend dell'intensità media e massima di precipitazione

Nonostante il trend della precipitazione cumulata, di poco non significativo, mostri un andamento crescente, l'andamento della portata al picco Q_{max} e del volume di deflusso Q_{tot} è in leggero calo, pari, rispettivamente, al 1.39% e allo 0.94% su base decennale e statisticamente non significativo (p -value rispettivamente pari a 0.34 e 0.29) (*Figura 3.5*).

L'andamento in leggero calo, o pressochè stazionario, riscontrato, con assenza di un trend significativo, può essere dovuto a una serie di fattori concomitanti: i cambiamenti climatici, a quote medie, stanno causando un generale aumento delle temperature, come osservabile per l'area di studio nella *Figura 2.4*, e una conseguente minore presenza di neve [*Stewart (2009)*], il cui scioglimento, soprattutto in bacini montani, rappresenta una frazione importante dei deflussi. La diminuzione della copertura nevosa e il leggero aumento della precipitazione cumulata vanno quasi a bilanciarsi, causando solo una minima diminuzione dei deflussi.

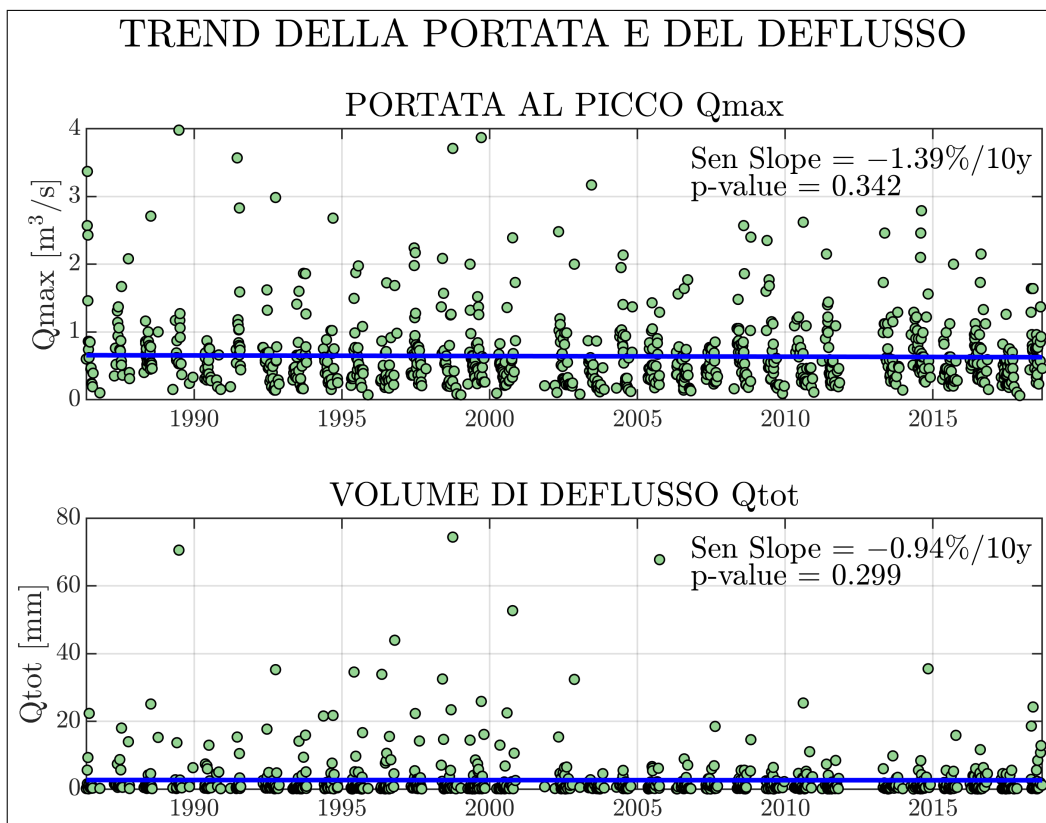


Figura 3.5: Trend della portata al picco Q_{max} e del volume di deflusso Q_{tot}

Seppur non vi sia un trend significativo né per i deflussi né per la precipitazione cumulata, risulta fortemente significativo il trend del coefficiente di deflusso (p -value pari a 0.007), dato dal rapporto tra questi due parametri: il trend (**Figura 3.6**) mostra un andamento in deciso calo, pari al 5.23% su base decennale, a indicare una netta diminuzione dei deflussi rispetto agli afflussi durante gli eventi.

A quote medie, come quelle dell'area di studio, le temperature in aumento causano un calo della copertura nevosa e un suo precoce scioglimento [Stewart (2009)]: lo scioglimento anticipato causa un minore apporto da neve al deflusso nei mesi estivi, quando si concentra la maggior parte degli eventi e la maggior parte della precipitazione cumulata nella nostra area di studio (**Figura 2.5**). Questo sfasamento porta a una generale diminuzione del coefficiente di deflusso durante gli eventi, in quanto calano i deflussi a fronte di una precipitazione cumulata in leggero aumento.

Sempre in **Figura 3.6** si può osservare l'andamento del rapporto tra la portata

al picco e il volume di deflusso, il quale non evidenzia nessun trend significativo: l'andamento del rapporto risulta, in ogni caso, pressoché stabile (+0.50% su base decennale).

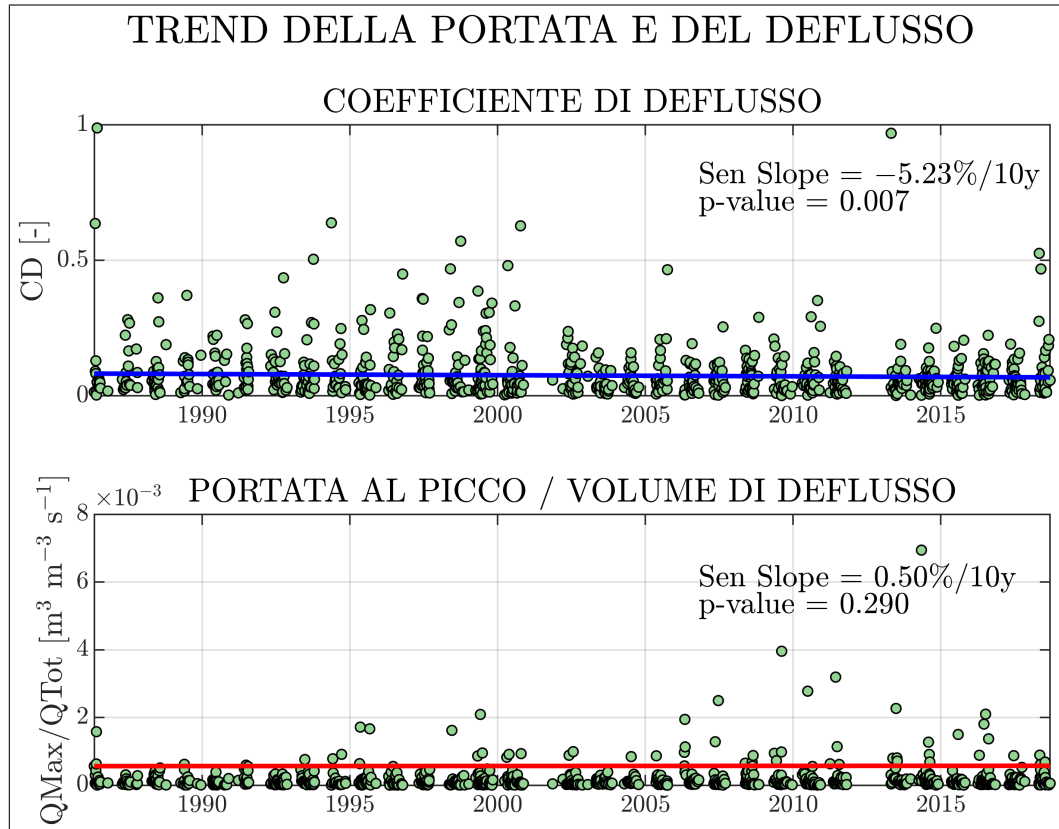


Figura 3.6: Trend del coefficiente di deflusso CD e del rapporto Q_{max}/Q_{tot}

L'andamento della copertura nivale pre-evento, riportato in **Figura 3.7**, è descritto da un forte trend negativo (-9.75%) statisticamente significativo (p -value pari a 0.011). L'aumento delle temperature, quantificabile in media pari a circa 0.5 °C ogni 10 anni per l'area di studio (**Figura 2.4**), causa una diminuzione della presenza di neve al suolo nei bacini montani di quote medie [Stewart (2009)] e, come riporta Beniston (2012) un innalzamento della *snowline*, o limite delle nevi perenni, di 150m di quota ogni grado di aumento della temperatura media.

In **Figura 3.7** è riportato anche l'andamento della copertura nivale pre-evento suddiviso per stagione: l'andamento risulta stabile in l'inverno, molto variabile

ma stabile in primavera, in calo in estate e in calo, seppur molto variabile, in autunno.

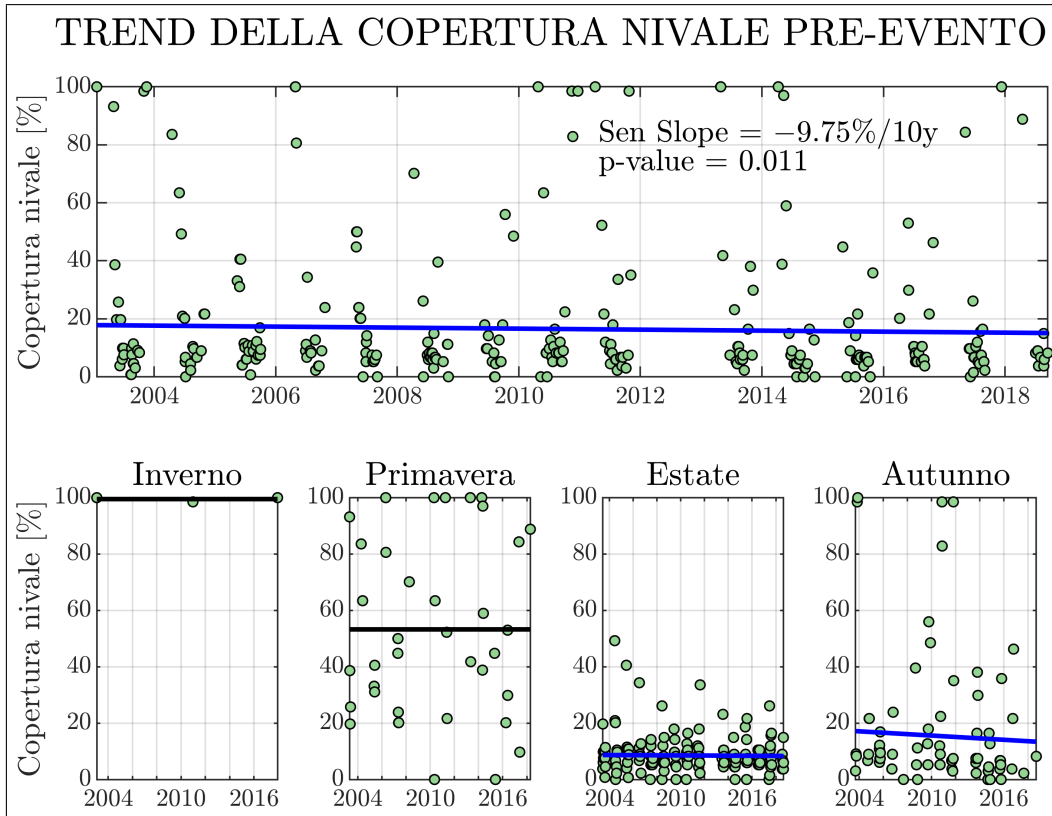


Figura 3.7: Trend della copertura nivale totale e stagionale

In **Figura 3.8** è riportato l'andamento del lag di risposta, calcolato come differenza, in ore, tra il momento centrale dell'evento di precipitazione e il picco di portata: il trend, non significativo (p -value pari a 0.642), non mostra nessuna variazione su base decennale, mentre la suddivisione degli eventi in base alla stagione permette di osservare una certa variabilità, comunque non descritta da un trend significativo. Nella tabella successiva (**Tabella 3.3**) vengono riportati i trend stagionali con i rispettivi valori di p -value sia per la copertura nivale pre-evento che per il lag di risposta: come si può osservare dai valori di p -value, nessun trend è significativo a scala stagionale.

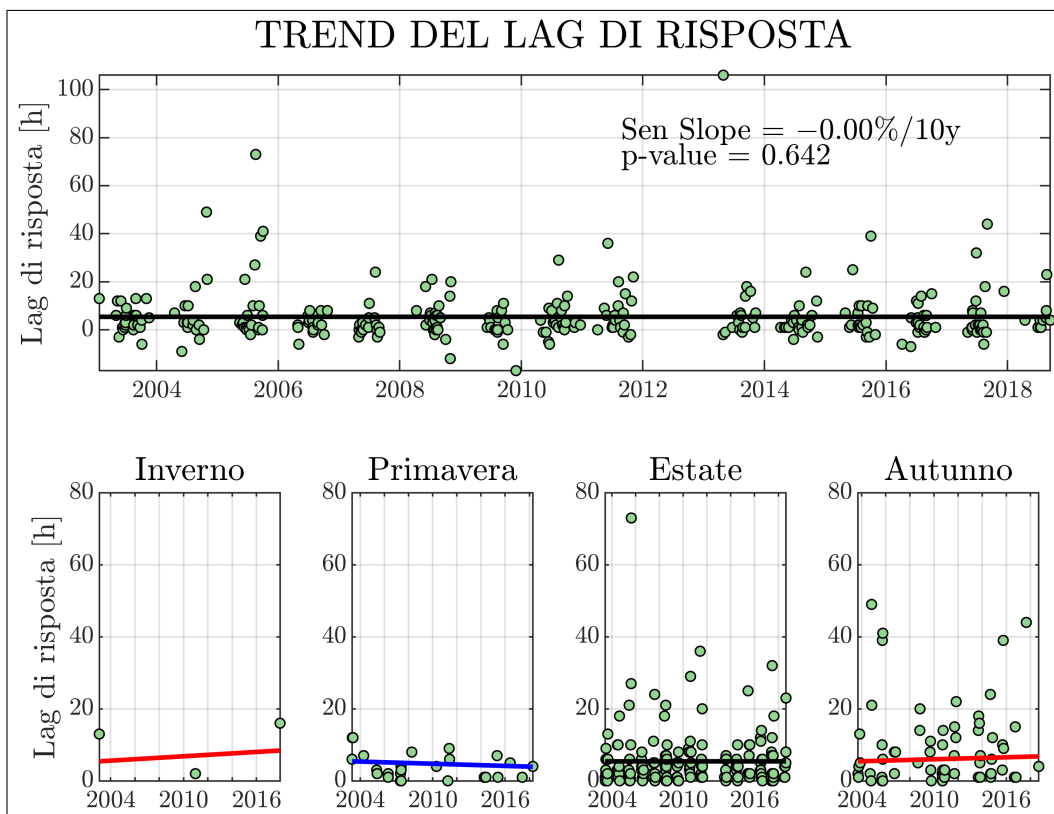


Figura 3.8: Trend del lag di risposta totale e stagionale

COPERTURA NIVALE PRE-EVENTO			LAG DI RISPOSTA		
	TREND	P-VALUE		TREND	P-VALUE
INVERNO	0%/10y	0.602 (NS)	INVERNO	37.18%/10y	0.602 (NS)
PRIMAVERA	0%/10y	0.931 (NS)	PRIMAVERA	-18.47%/10y	0.459 (NS)
ESTATE	-2.5%/10y	0.240 (NS)	ESTATE	0%/10y	0.459 (NS)
AUTUNNO	-14.55%/10y	0.115 (NS)	AUTUNNO	16.84%/10y	0.579 (NS)

Tabella 3.3: Riassunto dei trend stagionali di copertura nivale pre-evento e lag di risposta, con rispettivi valori di p-value

Nella figura successiva (**Figura 3.9**) è riportato il grafico dell'andamento del rapporto tra la portata al picco Q_{max} e la copertura nevosa: nonostante l'andamento della portata al picco non mostri nessun trend significativo, il rapporto tra queste due variabili mostra un andamento descritto da un trend significativo (p -value pari a 0.045) e in deciso aumento, pari al 12.92% su base decennale. Il netto aumento di questo rapporto è dovuto a una forte diminuzione della copertura nevosa, a fronte di una portata al picco quasi invariata: nonostante un minore contributo della neve alla formazione di deflusso, la portata al picco rimane comunque elevata e, di conseguenza, aumenta di molto il rapporto tra queste due variabili.

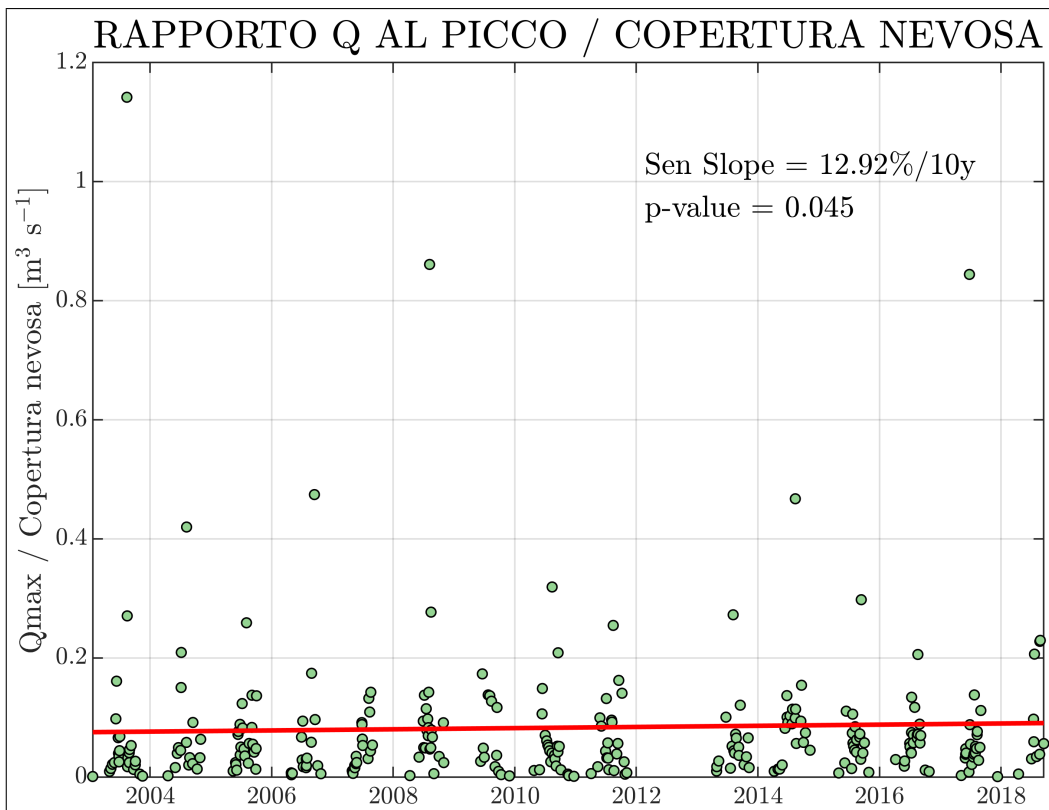


Figura 3.9: Trend del rapporto della portata al picco sulla copertura nevosa pre-evento

Di seguito è riportata la **Figura 3.10**, dove sono riassunti tutti i trend delle caratteristiche principali degli eventi, con la relativa significatività.

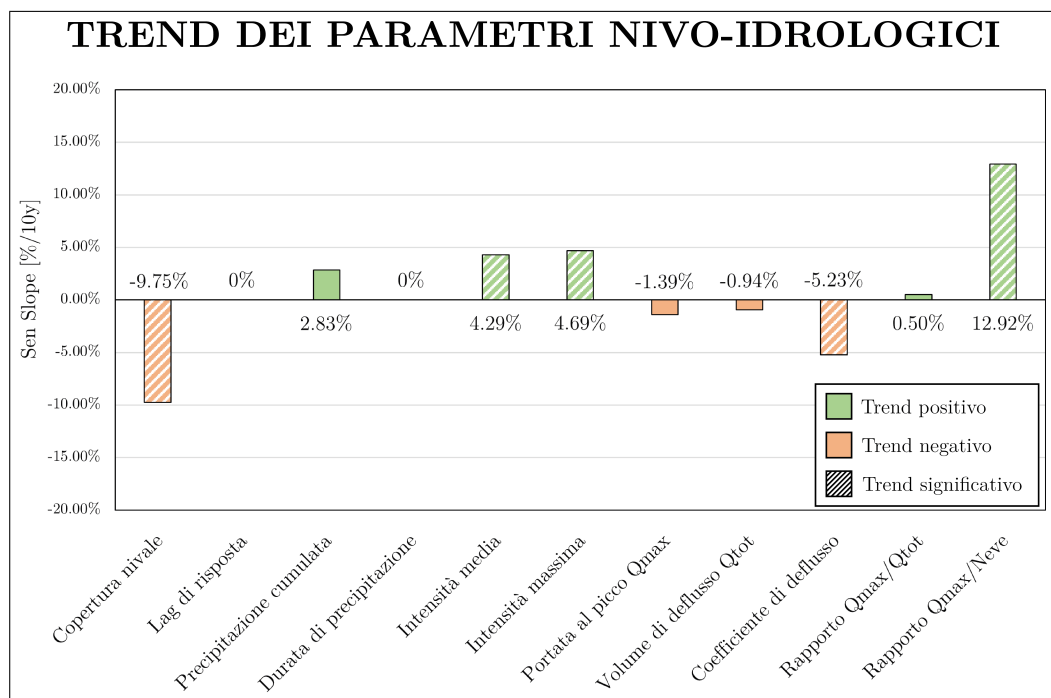


Figura 3.10: Riassunto dei trend delle caratteristiche degli eventi

4 | Conclusioni

Lo studio presentato in questa tesi è stato impostato con l'obiettivo di ottenere, a partire da serie storiche di precipitazione e portata per l'area del bacino idrografico del torrente Cordevole chiuso a La Vizza (BL), dei risultati statisticamente significativi che permettano di osservare e valutare l'impatto del cambiamento climatico e dell'innalzamento delle temperature sulla complessa dinamica degli afflussi e deflussi nel bacino di studio.

Le temperature, che mostrano un trend positivo significativo, sono in aumento di circa 0.5 °C ogni 10 anni (**Figura 2.4**) e impattano sensibilmente sulle dinamiche del bacino montano, in cui le precipitazioni nevose sono quantificabili come circa il 50% della precipitazione media annua [*Guastini et al. (2019)*]. Nonostante un trend positivo delle precipitazioni annuali (+2.83%/10 anni, **Figura 3.3**), statisticamente non significativo ma da tenere in considerazione a causa di un valore di *p-value* basso (0.055), la percentuale di copertura nevosa pre-evento mostra un trend statisticamente significativo in netto calo, pari al 9.75% ogni 10 anni (**Figura 3.7**), a causa dell'innalzamento delle temperature.

Le precipitazioni totali, che presentano un trend significativo in aumento per quanto riguarda l'intensità, sia media che massima (rispettivamente +4.29% e +4.69% ogni 10 anni, **Figura 3.4**), tendono quindi ad aumentare. Vista la diminuzione della copertura nevosa, si può dedurre che le precipitazioni in forma liquida tendano a prevalere sulle precipitazioni solide. Nonostante ciò i deflussi, invece, risultano in diminuzione: l'andamento di portata al picco Q_{max} e di volume totale di deflusso Q_{tot} mostra un leggero calo (pari, rispettivamente, a 1.39% e 0.94% su base decennale, **Figura 3.5**) ma non si evidenzia la presenza di trend statisticamente significativi, mentre è significativo il trend,

in calo, del coefficiente di deflusso (pari a 5.23% su base decennale, **Figura 3.6**). Il calo del coefficiente di deflusso è da attribuire a un calo dei deflussi a fronte di un aumento degli afflussi: in bacini montani di media-alta quota, dove la percentuale di precipitazione che scende come neve è in calo, si prevede una diminuzione dei deflussi [*Berghuijs et al. (2014)*]. Nonostante un calo della copertura nevosa venga associato a un calo dei deflussi, nell'area di studio l'aumento delle precipitazioni mantiene debole il calo delle portate, causando un incremento del rapporto tra la portata al picco Q_{max} e la copertura nevosa (trend statisticamente significativo, aumento pari al 12.92% su base decennale, **Figura 3.9**). Come riportato da *Bavay et al. (2009)*, l'aumento delle temperature può portare, inoltre, a uno scioglimento anticipato e più repentino del manto nevoso, con conseguente aumento dei valori di portata al picco nei mesi primaverili e una maggiore tendenza alla formazione di piene ed esondazioni.

In questa tesi sono state mostrate le possibilità e le potenzialità dell'integrazione di immagini multispettrali telerilevate e dati idro-meteorologici, al fine di analizzare e comprendere al meglio l'impatto dei cambiamenti climatici sulle dinamiche degli afflussi e deflussi per il bacino di studio. Questo studio ha infatti permesso di mettere in evidenza l'importanza di avere a disposizione dataset e immagini satellitari da poter analizzare e da cui poter estrarre informazioni preziose; elaborazioni, trend e modelli risultano sempre più importanti nel supporto al lavoro sul campo e a livello decisionale, fornendo dati e previsioni in maniera chiara ed efficace.

In particolar modo le immagini satellitari multispettrali sono ormai fondamentali in svariati ambiti, tra cui quello ambientale e forestale: sfruttando il diverso modo in cui la radiazione incidente viene riflessa dalla superficie che colpisce, che varia in base al tipo di superficie e alle sue caratteristiche, è possibile elaborare le immagini satellitari in modo da ottenere diversi prodotti utili a supporto dell'analisi e del lavoro che si sta svolgendo. Si possono, ad esempio, ottenere informazioni sullo stato di salute della vegetazione, sulla copertura del suolo o, come nel caso di questo studio, sulla presenza di neve al

suolo.

Il punto di forza di questo studio è quello di avere avuto a disposizione immagini multispettrali caratterizzate da una risoluzione temporale giornaliera: le immagini utilizzate per l'analisi della copertura nevosa sono, infatti, rilevate dal sensore MODIS, presente sui satelliti AQUA e TERRA della Nasa, ogni giorno, permettendo di avere una copertura totale degli eventi analizzati. Queste immagini sono, tuttavia, anche il punto debole dello studio, in quanto la risoluzione spaziale non è elevata e in molti casi le immagini sono caratterizzate da una elevata copertura nuvolosa, che le rende inutilizzabili. Per risolvere il problema sono state sostituite le immagini del giorno precedente a ogni evento con elevata copertura nuvolosa con immagini pulite entro una settimana precedente all'evento. La presenza di numerosi tipi di immagini satellitari e di dataset permette di poter ridurre al minimo le criticità, ad esempio combinando diverse bande delle immagini multispettrali oppure integrando i dati con quelli ottenibili da altre immagini raccolte in diversi momenti della giornata (ad esempio immagini Sentinel-2 e Landsat 8), diminuendo l'impatto della copertura nuvolosa o della scarsa risoluzione spaziale: l'evoluzione della tecnologia permetterà di osservare e analizzare l'ambiente in maniera sempre più precisa e complessa, garantendo la possibilità di comprendere l'evoluzione di processi complessi, come i processi idrologici in un bacino montano, e la loro risposta ai cambiamenti climatici.

Bibliografia

- Abdulkadhim, A. H. (2019). Estimating snow cover area in south of Turkey using the Normalized Difference Snow Index (NDSI) from MODIS Satellite Images. *Journal of Physics: Conference Series*, 1279(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1279/1/012047>
- Bavay, M., Lehning, M., Jonas, T., & Löwe, H. (2009). Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments. *Hydrological Processes*, 23(1), 95–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.7195>
- Beniston, M. (2012). Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 412-413, 291–296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.046>
- Berghuijs, W., Woods, R., & Hrachowitz, M. (2014). A Precipitation Shift from Snow towards Rain Leads to a Decrease in Streamflow. *Nature Climate Change*, 4, 583–586. <https://doi.org/10.1038/nclimate2246>
- Böhm, R., Auer, I., Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., & Schöner, W. (2001). Regional temperature variability in the European Alps: 1760–1998 from homogenized instrumental time series. *International Journal of Climatology*, 21(14), 1779–1801. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.689>
- Brugnara, Y., Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., & Simolo, C. (2012). High-resolution analysis of daily precipitation trends in the central Alps over the last century. *International Journal of Climatology*, 32(9), 1406–1422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.2363>

- Brunetti, M., Buffoni, L., Maugeri, M., & Nanni, T. (2000). Precipitation intensity trends in northern Italy. *International Journal of Climatology*, *20*(9), 1017–1031. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1097-0088\(200007\)20:9<1017::AID-JOC515>3.0.CO;2-S](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1097-0088(200007)20:9<1017::AID-JOC515>3.0.CO;2-S)
- Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Auer, I., Böhm, R., & Schöner, W. (2006). Precipitation variability and changes in the greater Alpine region over the 1800–2003 period. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *111*(D11). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2005JD006674>
- Casty, C., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J., & Böhm, R. (2005). Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *International Journal of Climatology*, *25*(14), 1855–1880. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.1216>
- European Space Agency. (n.d.-a). *Copernicus Open Access Hub*. Recuperato luglio 5, 2023, da <https://scihub.copernicus.eu/>
- European Space Agency. (n.d.-b). *Sentinel-2 Mission Guide*. Recuperato luglio 26, 2023, da <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- Guastini, E., Zuecco, G., Errico, A., Castelli, G., Bresci, E., Preti, F., & Penna, D. (2019). How does streamflow response vary with spatial scale? Analysis of controls in three nested Alpine catchments. *Journal of Hydrology*, *570*, 705–718. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.022>
- Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2001). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms*. Recuperato agosto 23, 2023, da <https://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/?c=atbd&t=atbd>
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., & Bayr, K. J. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, *83*(1), 181–194. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00095-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00095-0)

- Helsel, D., & Frans, L. (2006). Regional Kendall Test for Trend. *Environmental Science and Technology*, 40, 4066–4073. <https://doi.org/10.1021/es051650b>
- IPCC. (2022). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (pp. 175–312). <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>
- Kendall, M. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin, London.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Mann, H. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 163–171.
- Marcon, M. (2023). *Analisi dei trend idrometeorologici del torrente Cordevole a La Vizza*.
- Mathworks. (n.d.). *Matlab*. Recuperato luglio 3, 2023, da <https://it.mathworks.com/products/matlab.html>
- Nasa. (n.d.). *About*. Recuperato luglio 26, 2023, da <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- Norbiato, D., Borga, M., Merz, R., Blöschl, G., & Carton, A. (2009). Controls on event runoff coefficients in the eastern Italian Alps. *Journal of Hydrology*, 375(3), 312–325. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.044>
- Notarnicola, C., Duguay, M., Moelg, N., Schellenberger, T., Tetzlaff, A., Monsorno, R., Costa, A., Steurer, C., & Zebisch, M. (2013). Snow Cover Maps from MODIS Images at 250 m Resolution, Part 1: Algorithm Description. *Remote Sensing*, 5(1), 110–126. <https://doi.org/10.3390/rs5010110>

- Penna, D., Zuecco, G., Crema, S., Trevisani, S., Cavalli, M., Pianezzola, L., Marchi, L., & Borga, M. (2017). Response time and water origin in a steep nested catchment in the Italian Dolomites. *Hydrological Processes*, *31*(4), 768–782. <https://doi.org/10.1002/hyp.11050>
- Sen, P. (1968). Estimates of the Regression Coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*, 1379–1389.
- Stewart, I. T. (2009). Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions. *Hydrological Processes*, *23*(1), 78–94. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.7128>
- Tekeli, A. E., Akyürek, Z., Arda Şorman, A., Şensoy, A., & Ünal Şorman, A. (2005). Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing of Environment*, *97*(2), 216–230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.013>
- USGS, N. (n.d.). *Landsat 8*. Recuperato luglio 26, 2023, da <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>