



D3.3 Aggiornamento del modello idrologico e simulazioni con mappe MOLOCH ricostruite dall'algoritmo tomografico

D3.3 Hydrological model update and simulations with MOLOCH maps reconstructed from the tomographic algorithm

Work Package	WP3
Task	3.3
Data	25/07/2019
Partner principale	POLIMI- DICA
Versione	5.0
Autore	Cristina Deidda (Polimi- DICA)
Revisore	Roberto Nebuloni (CNR - IEIIT)

Riassunto	Questo documento descrive gli avanzamenti e miglioramenti apportati al modello idrologico e i risultati della prima implementazione del modello con input le mappe ricostruite dalla tomografia.
Parole chiave	Dati pluviometrici, Dati idrometrici, Dati morfologici, Modello idrologico, Mappe ricostruite



D3.3

GLOSSARIO

MOPRAM MOnitoraggio delle Precipitazioni mediante l'utilizzo di reti RAdio a Microonde

WP WorkPackages

CNR Consiglio Nazionale delle Ricerche

IEIIT Istituto di Elettronica e di Ingegneria dell'Informazione e delle Telecomunicazioni (afferisce al Consiglio Nazionale delle Ricerche)

POLIMI Politecnico di Milano

DEIB Dipartimento di Elettronica Informazione e Bioingegneria (afferisce al Politecnico di Milano)

DICA Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (afferisce al Politecnico di Milano)

RRA Rain Reconstruction Algorithm (in italiano: "algoritmo di ricostruzione della pioggia")

RRI Responsible Research and Innovation (in italiano: "ricerca responsabile e innovazione")

1. AVANZAMENTI MODELLO IDROLOGICO

Il caso di studio considerato per l'applicazione del modello idrologico è il bacino idrografico del torrente Mallero che scorre in Val Malenco (provincia di Sondrio). Il bacino considerato è caratterizzato da un regime idrologico torrentizio e da un carattere prettamente montuoso.

Il fatto che sia un bacino montano ha una grande influenza sulle portate misurate a valle. Risultano da considerare diversi fattori tra cui la fusione nivale e glaciale che possono influire notevolmente sui valori di portata realmente misurati.

Inoltre, un'analisi più approfondita delle variazioni di portata misurate ha messo in luce che il torrente Mallero è soggetto a prelievi consistenti da parte delle centrali idroelettriche presenti sulla valle.

Questi due aspetti, il considerare la fusione nivo-glaciale e i prelievi indotti dalle centrali idroelettriche, risultano di fondamentale importanza per una corretta modellazione del bacino.

La nuova versione del modello idrologico punta a implementare la versione presentata nel D2.2 includendo anche i fattori sopracitati.

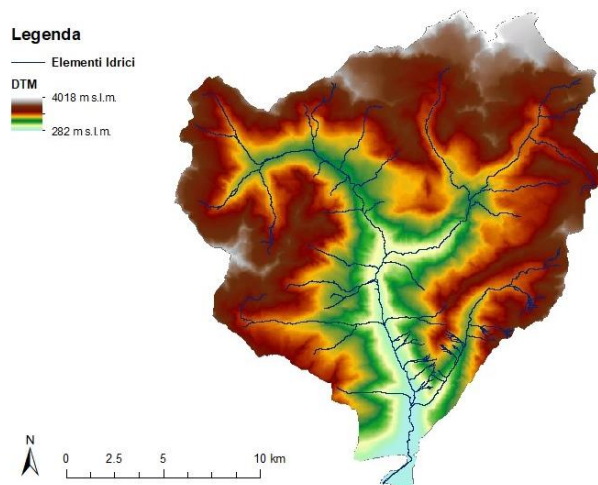


Figura 1 Modello digitale del terreno del bacino Mallero

Il modello afflussi-deflussi precedentemente presentato è stato implementato con lo scopo di meglio rappresentare il regime nivale, idrologico e antropico del bacino del Mallero.

Le caratteristiche principali della nuova versione del modello sono:

- Modellazione in continuo e non ad eventi;
- Modellazione dei prelievi da parte delle centrali idroelettriche;
- Modellazione della dinamica nivale del manto nevoso.

La nuova versione del modello è di tipo semi-distribuito, continuo e concettuale. Una delle prime differenze con la precedente versione è che simula in maniera continua, a risoluzione oraria, i processi che governano il ciclo dell'acqua e non più solo ad eventi.

Il modello è in grado di riprodurre, come output, le portate del fiume alla sezione di chiusura di Sondrio rispettando il bilancio di massa del sistema.

Il modello è stato integrato in maniera tale da poter descrivere la risposta del bacino non solo ad eventi di precipitazione liquida ma anche a eventi di neve e precipitazione miste, che sono frequenti in bacini montani, soprattutto a quote intermedie. Inoltre, simula la presenza del manto nevoso e la sua evoluzione durante l'anno idrologico.

Gli input del modello sono la precipitazione liquida e solida, le temperature atmosferiche, l'umidità relativa dell'aria e la velocità del vento.

1.1 Suddivisione in sottobacini

Per effettuare un'analisi di dettaglio dell'area di interesse, è stato utile suddividere quest'ultima tramite la bacinizzazione del territorio collinare-montano della Lombardia (Carrara, 2004). In particolare, nel lavoro di Carrara, 2004 si identificano sull'intera regione una serie di sottobacini elementari sulla base delle linee di impluvio e di displuvio.

Queste linee vengono identificate a partire dal modello digitale del terreno per le aree collinari e montuose, e a partire dal reticolo idrografico digitalizzato per le zone pianeggianti prive di una caratterizzazione morfologica adeguata. Nel bacino del Mallero vengono identificate dodici unità di risposta idrologiche (o sottobacini), idrologicamente omogenee, ognuna con caratteristiche idrologiche e geomorfologiche differenti. In Figura 1 vengono riportate le unità di risposta idrologiche, alle quali è stato assegnato un numero identificativo di riconoscimento.

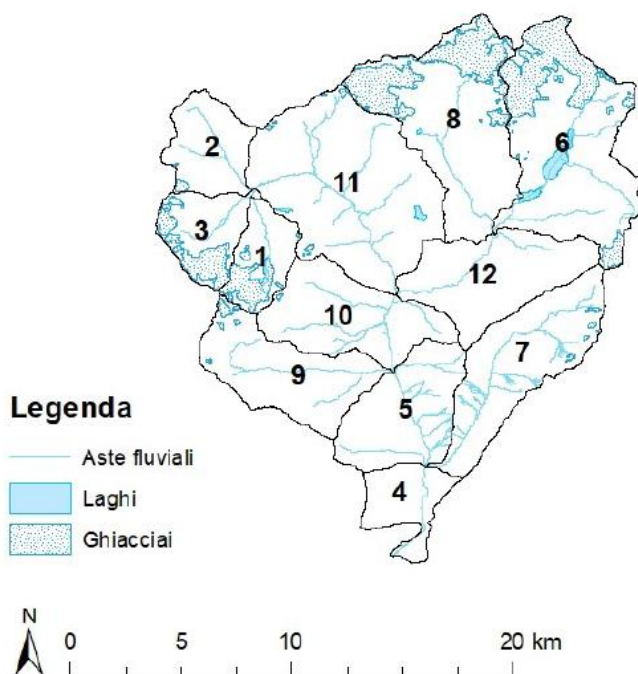


Figura 1 – Suddivisione in sottobacini dell'area di studio

Per ogni singolo sottobacino è stata prevista un'analisi geomorfologica. In particolare sono state valutate l'area, la copertura glaciale, la pendenza media, il CNII medio (Curve Number) , il volume specifico di ritenzione potenziale del terreno S_{max} e la lunghezza dell'asta principale. Tutti questi valori sono riportati in Tabella 1.

HRU	Dati					
	Area [km ²]	Area ghiacciai [km ²]	Pendenza media [%]	CNII medio [-]	S_{max} [mm]	Lunghezza asta principale [km]
1	11.22	3.15	74.6	64	47	5.500
2	14.19	0.28	67.2	77	49	5.823
3	13.12	3.96	72.9	56	33	4.488
4	11.00	0.00	61.0	63	116	4.700
5	23.29	0.00	75.2	62	107	9.082
6	47.50	11.49	52.4	69	58	10.351
7	29.64	0.22	73.4	78	73	12.151
8	42.73	11.50	62.0	64	60	9.641
9	25.08	0.48	58.2	70	79	9.967
10	25.60	0.06	61.4	62	143	9.007
11	53.10	0.30	63.9	70	123	12.430
12	26.61	0.00	64.0	65	172	11.884

Tabella 1 Caratteristiche geomorfologiche di ciascun sottobacino: area, area ghiacciai, pendenza media, CNII medio, volume specifico di ritenzione potenziale del terreno S_{max} e lunghezza dell'asta principale.

Infine le dodici unità di risposta idrologica sono state suddivise ulteriormente in zone dette aree di presa. È stato necessario individuare queste aree per poter modellare la componente antropica del bacino e, in particolare, per poter simulare i prelievi di acqua nei punti in cui si trovano le opere di presa. Questa ulteriore ripartizione del bacino non è stata definita rispetto all'omogeneità idrologica, bensì tenendo conto dei prelievi a scopi idroelettrici.

1.2 Fusione nivale

La fusione nivale e la dinamica del manto nevoso sono state prese in considerazione per la modellazione delle componenti del deflusso per ogni sottobacino.

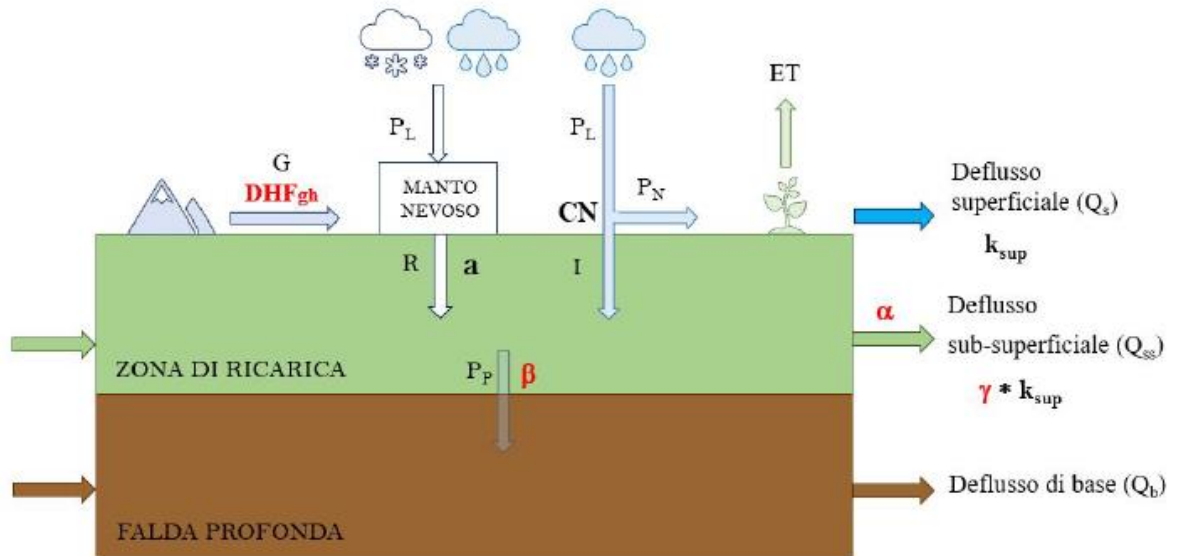


Figura 2 Schema concettuale del suolo nel modello socio-nivo-idrologico

In Figura 2 sono schematizzati la struttura concettuale del suolo e i percorsi compiuti dall'acqua per la formazione delle componenti di deflusso. Lo schema è valido per ogni HRU. La portata, Q_{tot} , simulata dal modello a Sondrio è depurata dall'evapotraspirazione e dalla captazione in corrispondenza delle opere di presa. Essa è valutata come somma di tre contributi principali:

$$Q_{tot} [m^3/s] = Q_s + Q_{ss} + Q_b.$$

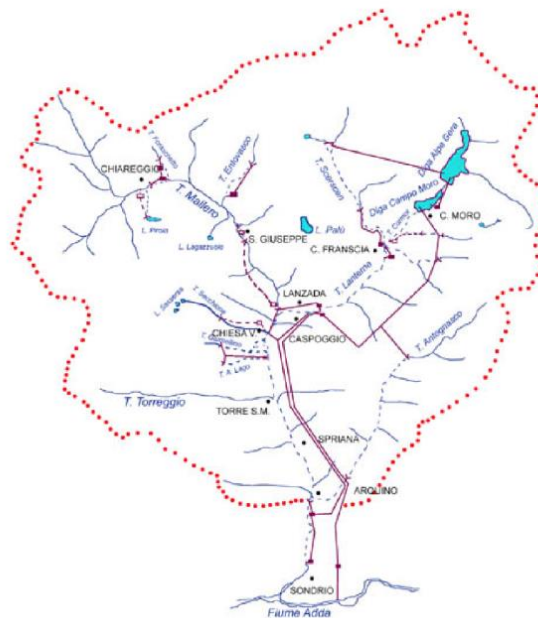
La porzione di precipitazione liquida, che non infiltra nel terreno, e la fusione glaciale (controllata dal tasso di fusione glaciale, DHF_{gh}) ruscellano sulla superficie topografica e contribuiscono così al deflusso superficiale Q_s . Il deflusso sub-superficiale Q_{ss} è alimentato dall'acqua contenuta nello strato di terreno più superficiale, chiamato 'zona di ricarica'. In quest'area viene accumulata l'acqua proveniente dalla fusione nivale e una frazione di precipitazione liquida che infiltra nel terreno non saturo. Tramite la percolazione profonda PP, una percentuale, b , di acqua immagazzinata nella zona di ricarica raggiunge la falda profonda e contribuisce al deflusso di base Q_b .

Il manto nevoso è costituito da tre principali elementi: il ghiaccio, l'acqua e l'aria (DR. De Walle, 2011). La struttura del manto varia nel tempo in funzione dell'accumulo di neve, delle

temperature atmosferiche, delle precipitazioni, del contenuto d’acqua e del vento. La nuova versione del modello tiene conto della dinamica del manto nevale includendo l’implementazione del modello HyS 2.0 (Avanzi et al., 2015a) in cui la dinamica di fusione nivale è descritta in funzione della variazione di temperatura atmosferica.

1.3 Processi antropici simulati

La presenza di numerosi impianti per la produzione di energia idroelettrica influisce sul naturale regime idrologico della Valmalenco. Le principali aste idroelettriche presenti sul bacino sono due. La prima convoglia le acque prelevate negli impianti di Arquino mentre la seconda è quella che attraversa le centrali di Campo Moro, Lanzada e Sondrio. Le due aste agiscono e modificano il deflusso superficiale in modo differente.



- Nel primo caso le acque captate e utilizzate nelle centrali (Mallero I e Mallero II) vengono reimmesse a valle degli impianti ma a monte della sezione di chiusura di Sondrio. Questo significa che non influiscono sul bilancio idrico totale, ma creano solo un ritardo sulla risposta del sistema che quindi non dipende più da fattori fisici, ma da fattori antropici.
- Per l’asta Campo Moro - Lanzada – Sondrio le portate derivate da corpi idrici superficiali per mezzo di sette opere di presa situate nella parte orientale del bacino sono sfruttate nell’impianto di Campo Moro, in quello di Lanzada e successivamente a Sondrio. Da qui sono immesse nel fiume Adda, a valle del comune di Sondrio. In questo caso l’acqua prelevata non rientra nel bilancio idrico totale poiché è immessa in una sezione fluviale che non appartiene al bacino del Mallero.

Per la modellazione dei flussi antropici sono stati applicati due diversi approcci modellistici al fine di valutare l'approccio più accurato.

- **Unimpaired flow**, il metodo non simula la presenza delle derivazioni di acqua ma solo i processi fisici. Con questo metodo si evince l'incapacità di simulare correttamente la tempistica della percentuale di acqua utilizzata per la produzione di energia attribuendole un tempo di lag basato sulle caratteristiche fisiche del bacino.
- **Modellazione dei prelievi** prevede la simulazione in modo dettagliato del comportamento antropico all'interno del bacino e richiede una quantità di informazioni sulle opere di captazione di non facile reperibilità. Questo metodo è stato applicato modellando le derivazioni di acqua nel punto esatto in cui queste avvengono.

L'idrogramma in Figura 3 presenta i risultati dell'utilizzo del primo metodo, che considera la portata naturale non condizionata dalle captazioni di acqua. Dal confronto con l'idrogramma reale si evince la poca accuratezza del metodo, per questo è stata implementata la seconda metodologia di cui sono riportati i risultati in Figura 4.

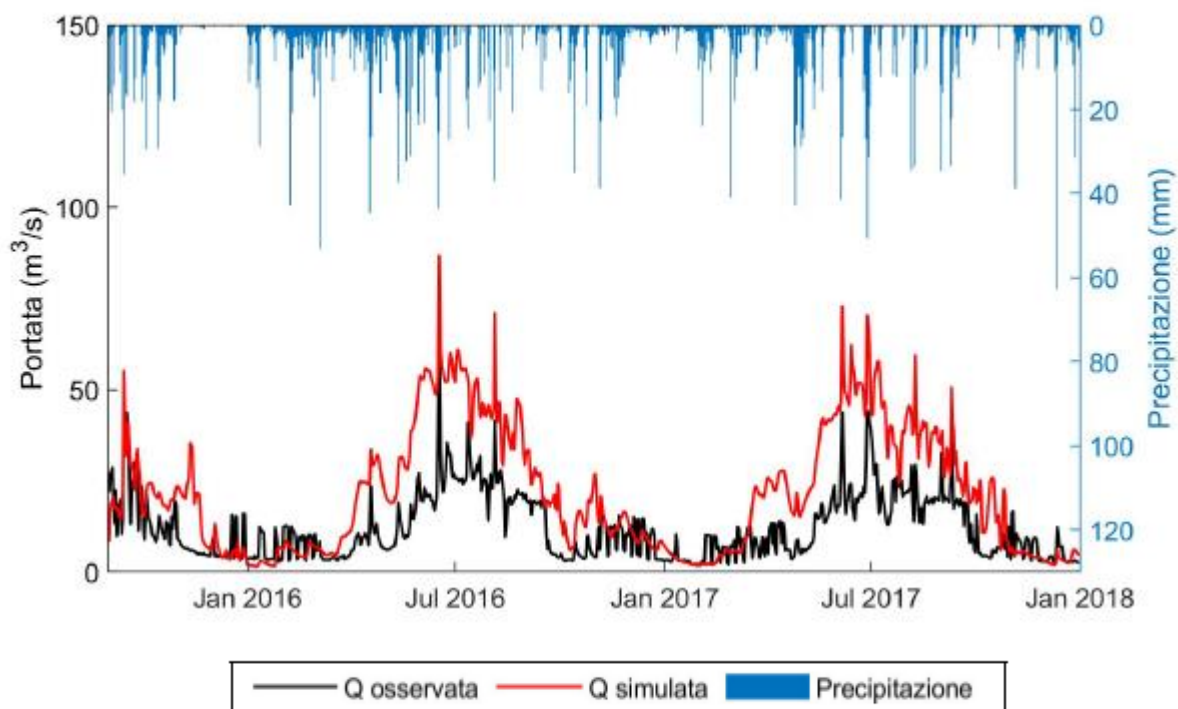


Figura 3 Metodo unimpaired flow: portata osservata comprendente i deflussi rilasciati nell'Adda

1.4 Risultati

L'analisi dettagliata delle caratteristiche del bacino in esame, la messa in luce delle componenti di maggiore importanza nei processi fisici del caso di studio e il confronto tra diversi approcci presenti in letteratura ha portato alla definizione finale del modello idrologico. Il risultato è un modello socio-nivo-idrologico che risolve il bilancio idrologico di un bacino montano altamente antropizzato integrando al suo interno sia i processi fisici sia quelli generati dalle azioni dell'uomo.

Esaminati diversi approcci per la modellazione dei vari aspetti cruciali del modello è stata scelta la loro migliore combinazione per la valutazione dell'idrogramma alla sezione di chiusura, ovvero:

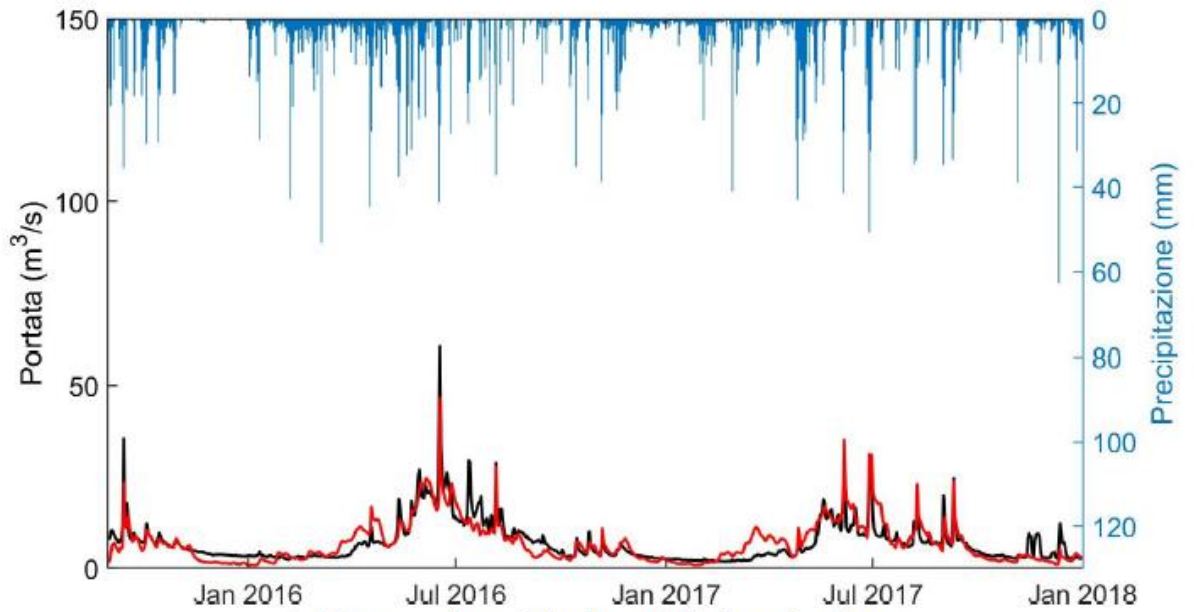
- Input di precipitazione: dato pluviometrico corretto;
- Dinamica nivale: modello HyS 2.0;
- Componente antropica: modellazione dei prelievi.

I risultati sono riportati nelle pagine seguenti. In Figura 4 è riportato il confronto tra gli idrogrammi simulati e reali alla sezione di chiusura. In entrambi i grafici sono riportate le precipitazioni riferite all'intero bacino del Mallero espresse in mm/d nell'immagine in alto, mentre in mm/h in quella in basso. Si nota che l'idrogramma a scala oraria di Figura 4(b) tende a sovrastimare particolarmente i picchi estivi rispetto a quello a scala giornaliera di Figura 4(a).

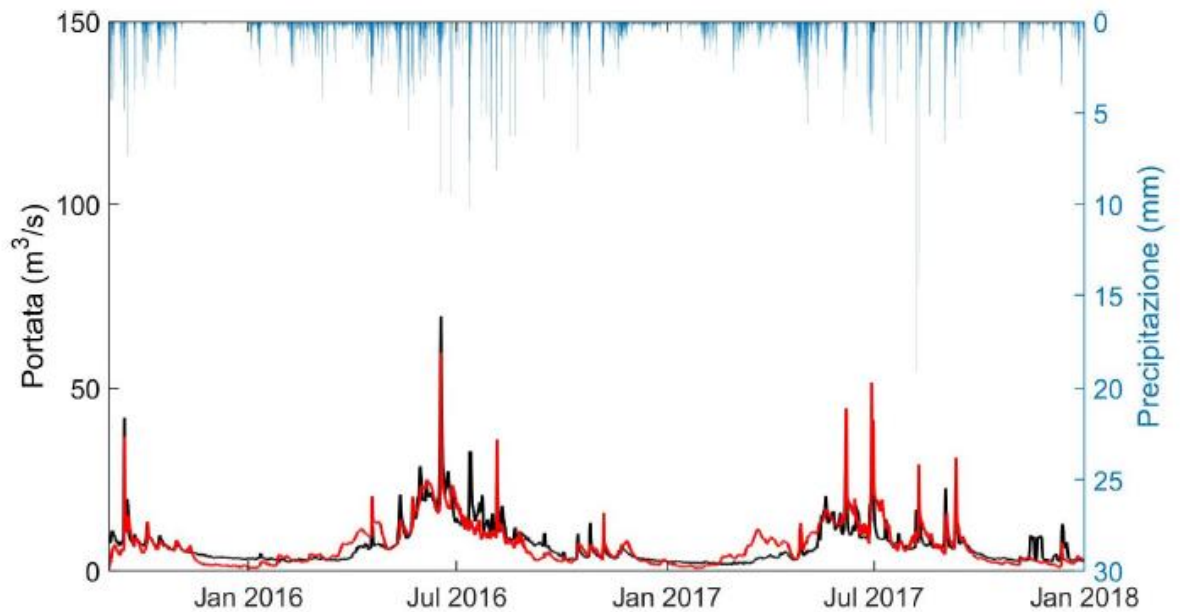
In Tabella 2 sono riassunti gli indici che valutano in modo quantitativo la bontà degli idrogrammi della portata misurata e stimata riportati a scala giornaliera e oraria rispetto alla portata osservata. Si riportano in particolare RMSE, E'_{KG} e D_v (indici utilizzati in idrologia per valutare i risultati dei modelli) valutati su tutto il periodo di simulazione. Dai valori di questi indici si può dedurre che l'idrogramma a scala giornaliera risulta migliore di quello a scala oraria non solo da un punto di vista qualitativo, ma anche a livello quantitativo. Infatti RMSE e D_v sono maggiori nell'idrogramma a scala oraria piuttosto che in quello a scala giornaliera, mentre E'_{KG} è in quest'ultimo caso più vicino al valore unitario. Per questo motivo, nei paragrafi successivi, vengono riportati dei confronti solo tra idrogrammi a scala giornaliera, implementati utilizzando moduli differenti.

Risoluzione dell'idrogramma	RMSE [m ³ /s]	E'_{KG} [-]	D_v [%]
Giornaliera	0.82	0.86	1.82
Oraria	3.99	0.85	1.90

Tabella 2 Indici riassuntivi della simulazione della portata finale



(a) Idrogrammi e precipitazione a risoluzione giornaliera.



(b) Idrogrammi e precipitazione a risoluzione oraria.

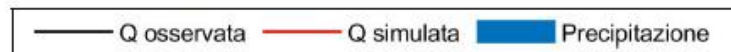
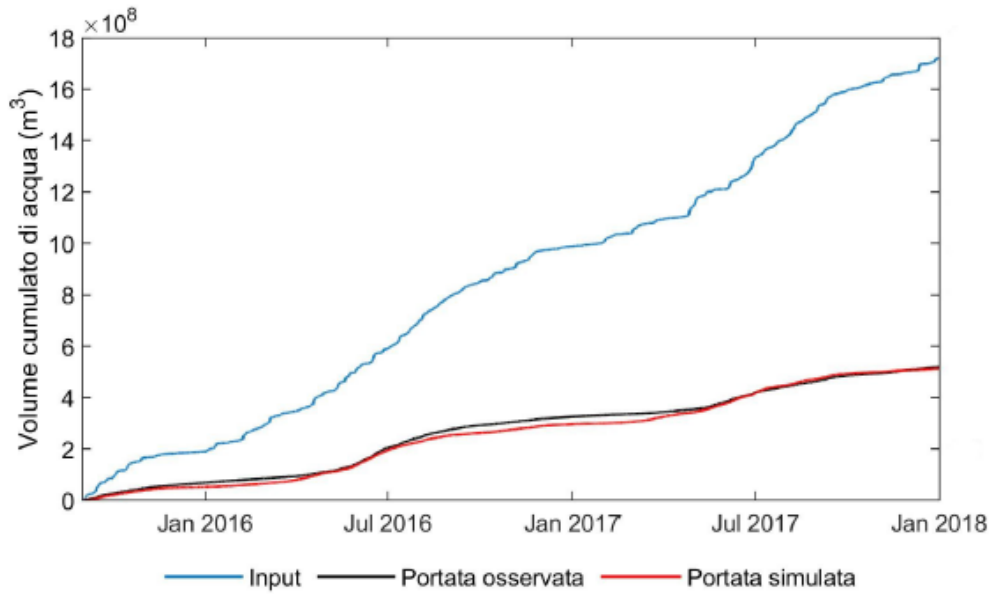


Figura 4 Idrogramma simulato alla sezione di chiusura ottenuto con input il dato pluviometrico, considerando la dinamica nivale e la modellazione dei prelievi come modulo antropico.



(a) Cumulate degli input del modello (precipitazione totale e fusione glaciale), della portata osservata e della portata simulata.

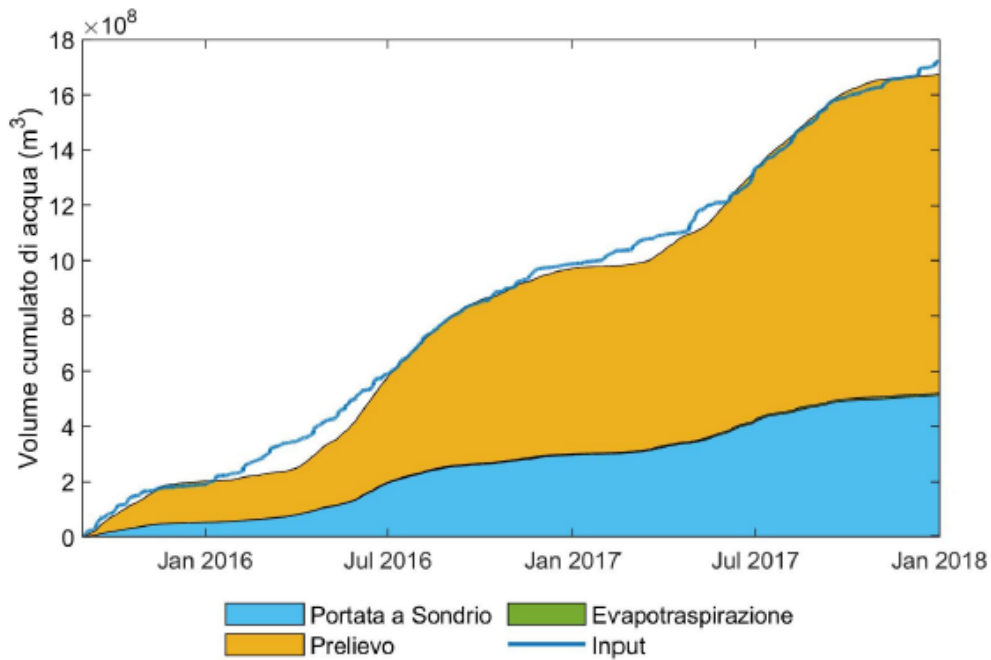


Figura 5 Bilancio di massa a scala giornaliera usando la combinazione migliore dei metodi

In Figura 5 viene riportato graficamente il bilancio di massa della modellazione effettuata con la combinazione di moduli migliori. In particolare, Figura 5(a) mostra le cumulate su tutto il periodo di analisi (da settembre 2015 fino a dicembre 2017) dei volumi di acqua in input al modello e di quelli che raggiungono la sezione di Sondrio. Come volumi in input al modello si intendono la precipitazione liquida, quella solida e la fusione glaciale. Mentre per quanto riguarda l'acqua in arrivo a Sondrio, sono riportate sia le portate osservate dall'idrometro che quelle simulate utilizzando la migliore combinazione dei moduli, a scala giornaliera. Si può notare che anche a livello di cumulate vi è una buona ripresa del dato osservato da parte del modello simulato. Si nota tuttavia che la differenza tra l'input e la portata simulata è molto consistente e pari a 1.2 miliardi di m³ di acqua su un periodo di circa due anni e mezzo. Per capire a cosa sia dovuta questa differenza è stato costruito il grafico in Figura 5 (b). Da questo si nota che una percentuale dell'acqua in input al modello non giunge alla sezione di chiusura perché in parte evapotraspira e in parte viene prelevata.

	Contributi volumetrici cumulati [%]		
	Primo anno (set2015-set2016)	Secondo anno (set2016-set2017)	Periodo totale (set2015-dic2017)
Q	31.81	29.76	30.63
ET	0.46	0.43	0.44
E	67.73	69.81	68.93

Tabella 3 Contributi volumetrici di acqua cumulati su tre diversi periodi, espressi in percentuale rispetto all'input di acqua cumulato fino a quel giorno.

Dalla Tabella 3 si verifica che la quantità di acqua prelevata è pari al 68.93% dell'input cumulato fino a quel giorno mentre quella evapotraspirata è pari solamente allo 0.44%. Bisogna inoltre considerare che i prelievi riportati in Figura 5 (b) sono stati simulati con il metodo di modellazione dei prelievi e sono quindi diversi dalla quantità di acqua che giunge realmente alla centrale idroelettrica di Sondrio. Questo è in parte dovuto al fatto che i prelievi simulati tengono anche conto di tutta l'acqua prelevata, compresa quella stoccata nelle dighe.

2. INTEGRAZIONE MODELLO IDROLOGICO E MAPPE

Uno degli obiettivi principali del progetto MOPRAM è quello di realizzare un collegamento tra la ricostruzione tomografica delle mappe e l'implementazione delle stesse all'interno del modello idrologico per la valutazione delle portate. Per far questo, il modello idrologico deve essere pensato in modo da poter accettare come input le mappe ricostruite con l'algoritmo di ricostruzione tomografica e quindi, in generale, un dato 2D e non solo un dato puntuale. In generale, infatti, gli input di precipitazione possono essere di tipo puntuale (es. il dato pluviometrico) o un input bidimensionale (mappa di precipitazione).

La nuova versione del modello idrologico è stata implementata in modo da poter ricevere come input sia dati puntuali (es. pluviometri) che mappe.

L'inclusione di mappe come input al modello ha previsto una prima fase di elaborazione delle mappe tramite il software ArcGis. Sovrapponendo la distribuzione spaziale della pioggia data dalla mappa con la superficie del bacino è possibile risalire alla quantità di precipitazione che cade in ogni sottobacino.

Questo processo è stato inserito nell'algoritmo del modello che data la mappa di pioggia iniziale è in grado di calcolare la quantità di precipitazione che interessa ogni unità elementare (sottobacino) e procedere alla modellazione. La media dei valori di precipitazione associati alle celle interne a ciascun sottobacino sono considerati come precipitazione puntuale nel baricentro del sottobacino.

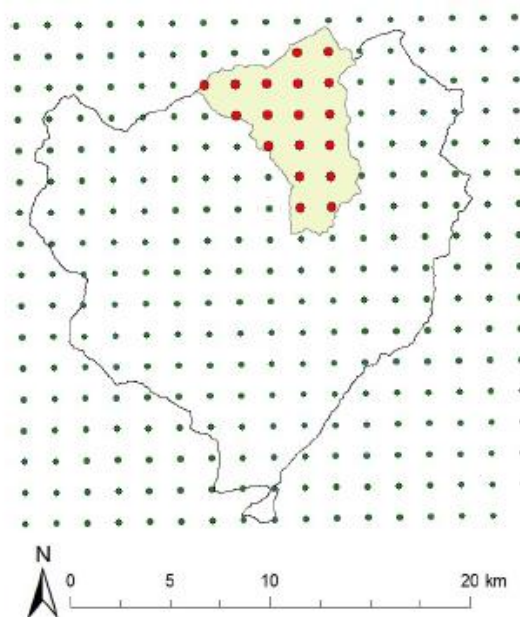


Figura 6 Spazializzazione del dato bidimensionale per un sottobacino, raffigurato in verde. In rosso sono i centri delle celle della mappa di pioggia appartenenti a tale sottobacino

2.1 VALIDAZIONE ALGORITMO RRA CON MODELLO IDROLOGICO

Una volta predisposto il modello idrologico per l'assimilazione di dati bidimensionali come input si è eseguita una prima fase di validazione dell'algoritmo RRA. Questa fase di lavoro ha reso necessaria una stretta cooperazione dei tre team CNR-DEIB-DICA del progetto MOPRAM, per poter creare un efficiente collegamento tra le unità che lavorano sull'algoritmo e la ricostruzione tomografia con il modello idrologico. Per eseguire una prima fase di validazione dell'algoritmo, sono state usate come base per la ricostruzione tomografica le mappe fornite dal Modello MOLOCH.

MOLOCH è un modello meteorologico deterministico ad area limitata sviluppato dal CNR-ISAC (Istituto di scienze dell'atmosfera e del clima) per fenomeni convettivi. Il modello MOLOCH fornisce delle mappe di precipitazione 2D per tutto il territorio italiano basandosi sull'integrazione delle equazioni formulate per un'atmosfera non idrostatica e compressibile, con sessanta livelli atmosferici e sette livelli di suolo. La ricostruzione della precipitazione 2D tramite tomografia è stata infatti effettuata con l'algoritmo RRA a partire da dati di attenuazione sintetici calcolati sulla base delle mappe di precipitazione MOLOCH, assunte come reali. Quindi, date le mappe di precipitazione MOLOCH per degli eventi di precipitazione, queste sono state ricostruite mediante l'algoritmo di tomografia. Si rimanda al Deliverable 3.2 per i dettagli tecnici.

La validazione prevede il confronto tra le portate ottenute con il campo di precipitazione ricostruito mediante tomografia e con il campo di precipitazione previsto da MOLOCH.

Nelle immagini in Figura 7 sono riportati i confronti tra gli idrogrammi a risoluzione giornaliera per tre eventi particolarmente significativi caratterizzati da abbondanti precipitazioni liquide. In Figura 8 si riportano gli idrogrammi ottenuti per gli stessi eventi ma a scala oraria.

In ogni figura sono presenti le portate simulate con dato tomografico attribuendo da uno a sei celle di precipitazione al singolo evento e la portata simulata con il modello idrologico utilizzando le mappe di precipitazione MOLOCH in ingresso.

I confronti tra dato tomografico e dato MOLOCH variano in funzione dell'evento simulato. Per l'evento del 4-7 agosto 2016 si osserva che la ricostruzione tomografica con 1 cella sintetica di precipitazione riesce a riprodurre in modo ottimale la portata simulata dal dato MOLOCH. Al contrario nell'evento 8-12 settembre la ricostruzione tomografica è più fedele se si ipotizzano 3 celle di precipitazione. Nell'evento compreso tra il 27 giugno e il 2 luglio sembra invece che in nessun modo la tomografia riesca a riprodurre la distribuzione spaziale di MOLOCH. Le portate sono infatti sempre sotto stimate. Globalmente si può inoltre notare che più grande è il numero di celle di precipitazione associato all'evento, maggiore è la quantità totale di acqua simulata.

Da ciò si osserva che l'algoritmo riesce a riprodurre in modo adeguato la spazializzazione, e quindi la quantità totale di precipitazione caduta, solo nel caso in cui sia associato all'evento il corretto numero di celle di precipitazione.

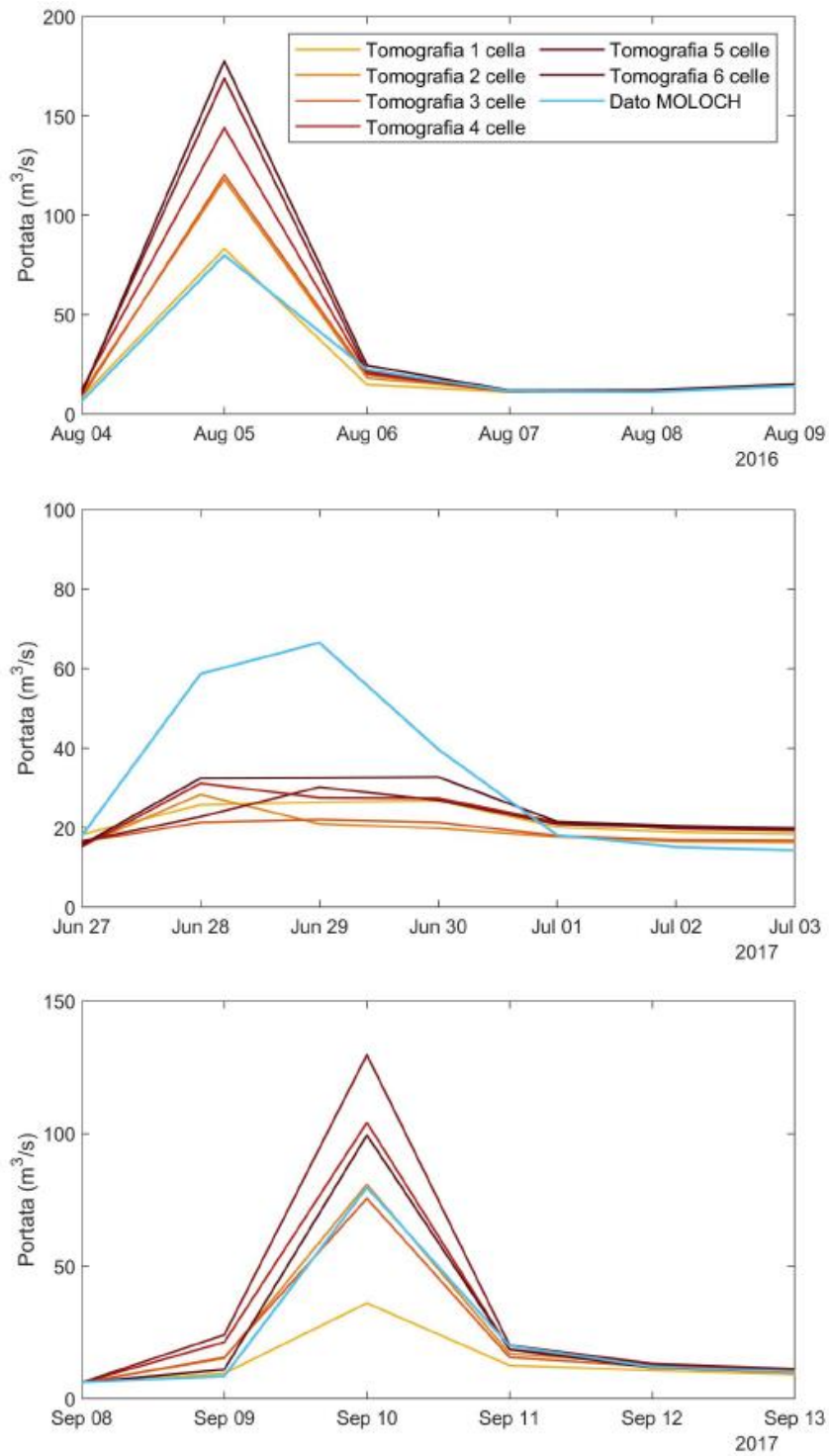


Figura 7 Idrogrammi a scala giornaliera, simulati alla sezione di chiusura per tre eventi differenti..

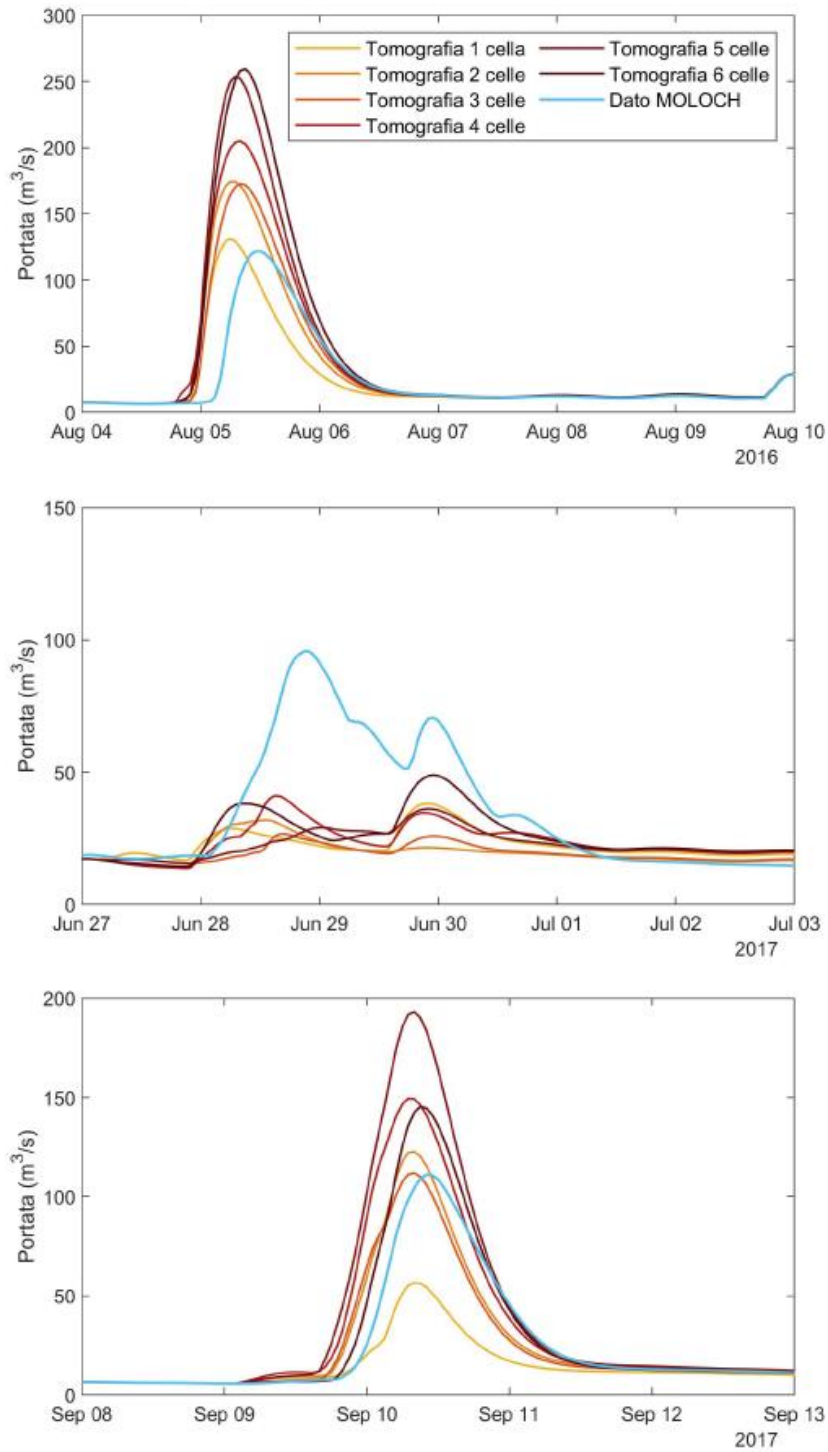


Figura 8 Idrogrammi a scala oraria, simulati alla sezione di chiusura per tre eventi differenti.

È da sottolineare che la qualità della ricostruzione tomografica dipende dal numero di link sul territorio e dalla distribuzione della rete dei link nel bacino. Il caso studio considerato ha una distribuzione dei link non ottimale, in quanto non coprono completamente il bacino e quindi non possono dare un'informazione esatta poiché vi sono alcune aree del bacino non coperte dai link. Considerato questo punto si può vedere che la tomografia, anche con una carente distribuzione dei link nel territorio come in questo caso, è in grado di simulare e evidenziare i punti di incremento di portata.

Questo primo confronto è stato utile per mettere in evidenza gli aspetti strategici dell'algoritmo RRA su cui è necessario porre l'attenzione per migliorarne le capacità di ricostruzione della distribuzione spaziale sul territorio. Tra questi vi è sicuramente il numero di celle di precipitazione con cui si descrive il singolo evento di pioggia.

Inoltre, l'importanza di questa analisi sta nel mettere in comunicazione i due filoni di lavoro MOPRAM (ricostruzione tomografica e modellazione idrologica) rendendo ora possibile alimentare il modello con le mappe ricostruite. Questo step è necessario per analizzare i risultati della tomografia in termini di portate e non solo di precipitazione cumulata, in quanto per lo scopo dello studio del rischio idrogeologico la portata è il fattore più importante da simulare.

RIFERIMENTI

- [1] DR. DeWalle, A. Rango (2011). «Principles of snow hydrology». In: Cambridge University Press.
- [2] Deliverable D2.2 “Verifica e validazione dei dati pluviometrici e analisi preliminare dell'integrazione in modelli idrologici”
- [3] Deliverable D3.2 “Algoritmo di ricostruzione tomografica RRA e risultati delle simulazioni”
- [4] Avanzi, F. et al. (2015b). «Orographic Signature on Extreme Precipitation of Short Duration». In: Journal of Hydrometeorology 16, pp. 278–294. URL: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0063.1>
- [5] De Michele, C. et al. (2013). «Investigating the dynamics of bulk snow density in dry and wet conditions using a one-dimensional model». In: The Cryosphere 7, pp. 433–444.
- [6] Avanzi, F. et al. (2015a). «Bulk volumetric liquid water content in a seasonal snowpack: modeling its dynamics in different climatic conditions». In: Advances in Water Resources 86, pp. 1–13.