

Analisi storica del parametro SWE in Trentino

EQUIVALENTE in ACQUA della NEVE

Il metodo
di stima a
scala locale
sviluppato
in Provincia
autonoma
di Trento

Paolo Tranquillini,
Walter Beozzo,
Paolo Cestari,
Matteo Dall'Amico,
Stefano Tasin,
Alberto Trenti
Stefano Cappelletti
Provincia Autonoma di Trento

HISTORICAL REANALYSIS OF SNOW WATER EQUIVALENT IN TRENTINO

Climate change is posing an increasing concern and the extreme weather events, be it flooding or drought, attract the attention of the public ever more frequently. The awareness of a change in the climate compels the Public Administration to provide itself with adequate tools to predict and possibly manage the impacts of these events on the environment. Principally the management of drought is becoming ever more important: on this respect, the quantification of the availability of water deriving from snow melt is particularly interesting. The snow, in fact, is like a natural reservoir of water that provides a water contribution with gradual release. Given the importance of snow accumulation in the hydrological cycle, this paper proposes a procedure to estimate the snow water equivalent (SWE) in Trentino based on the physical model SnowMaps (Dall'Amico et al, 2011, 2018). Starting from the meteorological dataset of Autonomous Province of Trento, a reanalysis of snow evolution in Trentino has been realized from the season 2007-2008 to 2017-2018, at 250 m resolution and daily aggregation, reconstructing the variables SWE, snow depth (HS) and new snow accumulation (HN). The results show a general good fit ($R^2 > 0.75$), both in terms of HS and in terms of SWE, with ground measurements and provide also interesting insights on possible errors in the historical measurements. Finally, a statistical analysis of the maps was realized, calculating the percentiles of the snow distribution for each day of the winter and SWE's aggregated values for determined areas and time intervals. This dataset becomes a very useful tool to compare the snow quantification and its water equivalent in a catchment in whatever lapse of the winter with the historical statistics, thus highlighting anomalies and anticipating possible drought conditions. This operating procedure could become a good indicator of local climate change and a practical support for water resource management.

L'attenzione sui cambiamenti climatici è sempre più alta e sui media nazionali gli eventi meteorologici estremi si contendono il ruolo da protagonista con quelli di prolungata ed insistente siccità. La consapevolezza di un cambiamento climatico in atto obbliga l'Amministrazione Pubblica a munirsi di strumenti per prevedere gli effetti sul territorio e cercare di gestirli.

In quest'ottica, nella gestione degli eventi siccitosi, diventa sempre più importante la conoscenza della potenziale disponibilità temporale e spaziale della risorsa idrica derivante dalla fusione nivale. La neve svolge infatti l'importantissimo ruolo di serbatoio naturale di risorsa idrica che permette di fornire un apporto integrativo d'acqua a rilascio graduale.

Vista allora l'importanza degli accumuli nevosi all'interno del ciclo idrologico lo studio qui presentato ha definito una procedura di stima dell'acqua contenuta nel manto nevoso trentino allo scopo di ricostruire l'andamento storico dei valori di equivalente in acqua della neve (SWE) per aree ed intervalli temporali stabiliti. Questa procedura operativa potrebbe diventare un buon indicatore per indagini di tipo climatico e un utile supporto per la gestione e la pianificazione degli utilizzi della risorsa idrica.



PREMESSE

Il problema della siccità in Trentino negli ultimi decenni si è presentato più volte se non in modo diretto, in modo indiretto, per la richiesta da parte delle autorità nazionali dei bacini idrografici in cui ricadono i fiumi e torrenti trentini di una gestione coordinata delle riserve idriche, anche nivali, disponibili presso gli invasi artificiali per far fronte a bilanci idrici complessivamente negativi. Da qui la necessità di studiare l'equivalente in acqua della neve (SWE) e la variazione dell'andamento stagionale dello stesso negli anni.

Di norma la valutazione dell'equivalente in acqua della neve (SWE- Snow Water Equivalent) avviene attraverso l'analisi del manto nevoso eseguendo profili penetrometrici e stratigrafici in campo su alcuni punti campione. Questo metodo, sicuramente molto efficace per una determinazione puntuale, mostra forti limitazioni qualora si voglia estrapolare il dato su un bacino idrografico di ampia scala dove, per ragioni meteorologiche e morfologiche del territorio, si può avere grande variabilità. Per questo motivo può essere opportuno rifarsi a modelli di calcolo che, attraverso una distribuzione statistica nello spazio delle forzanti meteorologiche e una conservazione della massa e dell'energia, siano in grado di ricostruire l'evoluzione del manto nevoso e il relativo equivalente in acqua anche su aree estese.

A tale scopo tramite il software

SnowMaps[1] della ditta MobyGis S.r.l. sono state prodotte le mappe giornaliere dei quantitativi di neve fresca (HN), di neve al suolo (HS) e del suo equivalente in acqua (SWE) dal novembre 2007 al maggio 2018.

LE MAPPE DI SNOWMAPS

SnowMaps è un sistema di modellazione della neve basato sul modello open source GEOTop[2] che attraverso un approccio fisico tipico dei modelli idrologici calcola l'evoluzione della neve sfruttando le leggi di conservazione della massa e dell'energia.

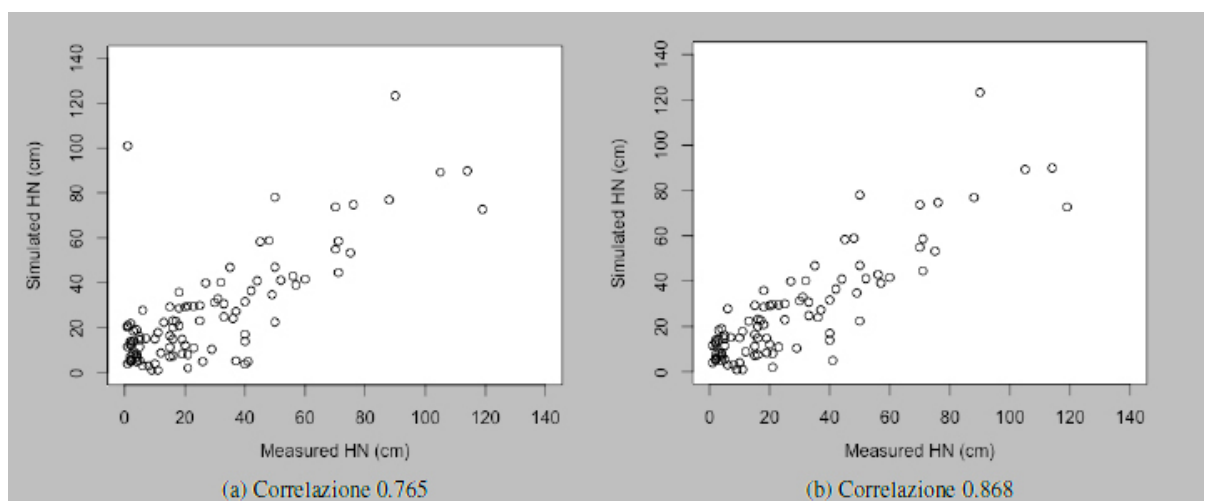
Il modello è stato utilizzato sui dati forniti dalla rete meteorologica automatica e di osservazione nivologica della Provincia autonoma di Trento (PAT) con l'aggiunta delle stazioni automatiche vicine al confine delle regioni e province limitrofe. I numeri complessivi delle stazioni utilizzate variano da 124 nella prima stagione di simulazione (2007/2008) a 227 durante la stagione 2016/2017. I parametri utilizzati sono temperatura, radiazione onda corta, pressione atmosferica, umidità, pioggia, altezza neve al suolo e fresca sulle 24 ore, velocità del vento e sua direzione. Inoltre dal modello digitale di elevazione del terreno (DEM) con risoluzione a 10 m della PAT sono state determinate e utilizzate le mappe morfologiche di elevazione, esposizione, pendenza e fattore di vista cielo per governare il bilancio energetico nella singola cella di calcolo sulla base della

ricostruzione astronomica della posizione del sole.

Il territorio indagato è quello amministrativo della Provincia autonoma di Trento allargato ai bacini idrografici secondari afferenti al reticolo idrografico del territorio provinciale. La griglia di calcolo usata è di 250 m mentre i postulati assunti sono che sotto i 0 °C la precipitazione è solida e sopra i 2°C è liquida. Tra 0 e 2°C la precipitazione viene suddivisa tra neve e pioggia in funzione lineare della temperatura.

Il controllo di coerenza dei risultati in sede di produzione è stato condotto con varie modalità. Una in particolare è consistita nel confrontare in 4 campi neve attrezzati anche con nivometri (Passo Rolle, Passo Tonale, Passo Sommo e Malga Bissina) l'osservazione di neve fresca accumulata su una tavoletta nelle 24 ore con la cumulata delle differenze orarie dell'altezza della neve al suolo di HS filtrato. Gli esiti sono stati positivi con indice di correlazione superiore a 0.75 anche se sono state evidenziate coppie di punti fuori range imputabili ad errori nei dati di osservazione o di anomalie del sensore nivometrico ad ultrasuoni. Con l'aiuto dei rendiconti stagionali pubblicati sul sito ufficiale di Meteotrentino e l'analisi di tutti gli eventi meteorologici sono state corrette alla fonte le situazioni anomale ed estromesse dall'analisi le coppie errate ottenendo indici di correlazione superiori a 0.84 (Figura 1). Il controllo finale dei prodotti da parte del personale di MobyGis si è svolto con una

Fig. 1 - Stazione di Passo Rolle. Confronto tra i valori giornalieri di neve fresca misurata e simulata con il relativo indice di correlazione prima (a) e dopo (b) la sottrazione di 7 coppie di punti considerate errate.



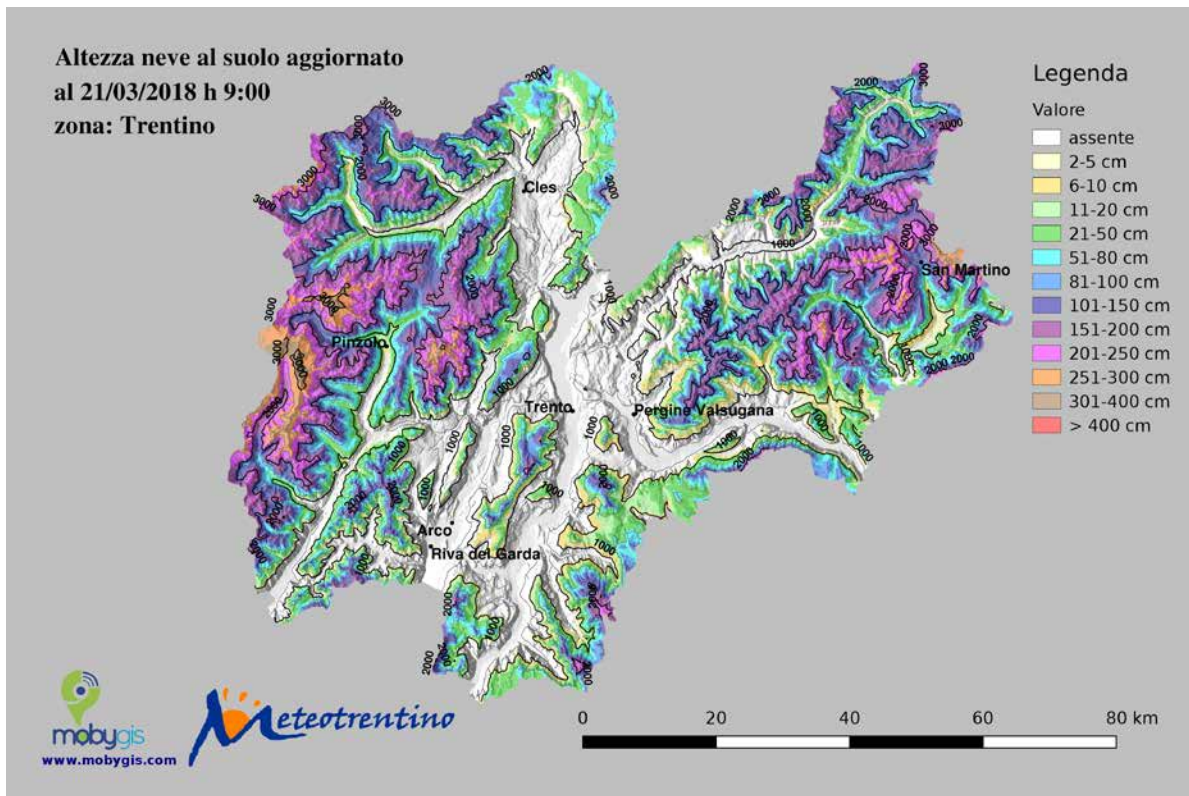


Fig. 2 - Mappa dell'altezza della neve al suolo (HS) del 21 marzo 2018 alle ore 9:00 prodotta con il software SnowMaps

valutazione visiva della sovrapposizione dei grafici delle serie temporali dello spessore della neve al suolo HS prodotto dal modello con quello misurato dai nivometri automatici e dagli osservatori nivologici. In generale il confronto è stato buono, sia durante i momenti di accumulo che di fusione.

Sono state quindi prodotte mappe neve (HS, HN, SWE) in formato geotiff per ogni giorno alle ore 9:00 per 11 anni dal 1° novembre al 1° giugno (Figura 2). Inoltre per 80 punti di osservazione sono stati prodotti i valori di altezza neve al suolo (HS) e di altezza neve fresca sulle 24 ore (HN) sempre alle ore 9:00 per verificare puntualmente la coerenza dei valori simulati con le osservazioni in campo. Per la sola stagione 2017-2018 le tre tipologie di mappe sempre alle ore 9:00 sono state prodotte ogni giorno con tre - quattro ore di ritardo utilizzando dati acquisiti in tempo reale, comprensivi di errori e ritardi nella trasmissione[3]. Per questo motivo e per permettere un equo tempo di calcolo il prodotto giornaliero non poteva essere pronto prima delle ore 12.00. Il funzionamento in tempo reale è stato un ottimo campo di prova per testare le potenzialità operative del si-

stema. Ricordiamo infatti che l'obiettivo è quello di avere uno strumento che permetta il controllo immediato della disponibilità idrica nivale tramite il confronto con situazioni concrete del passato.

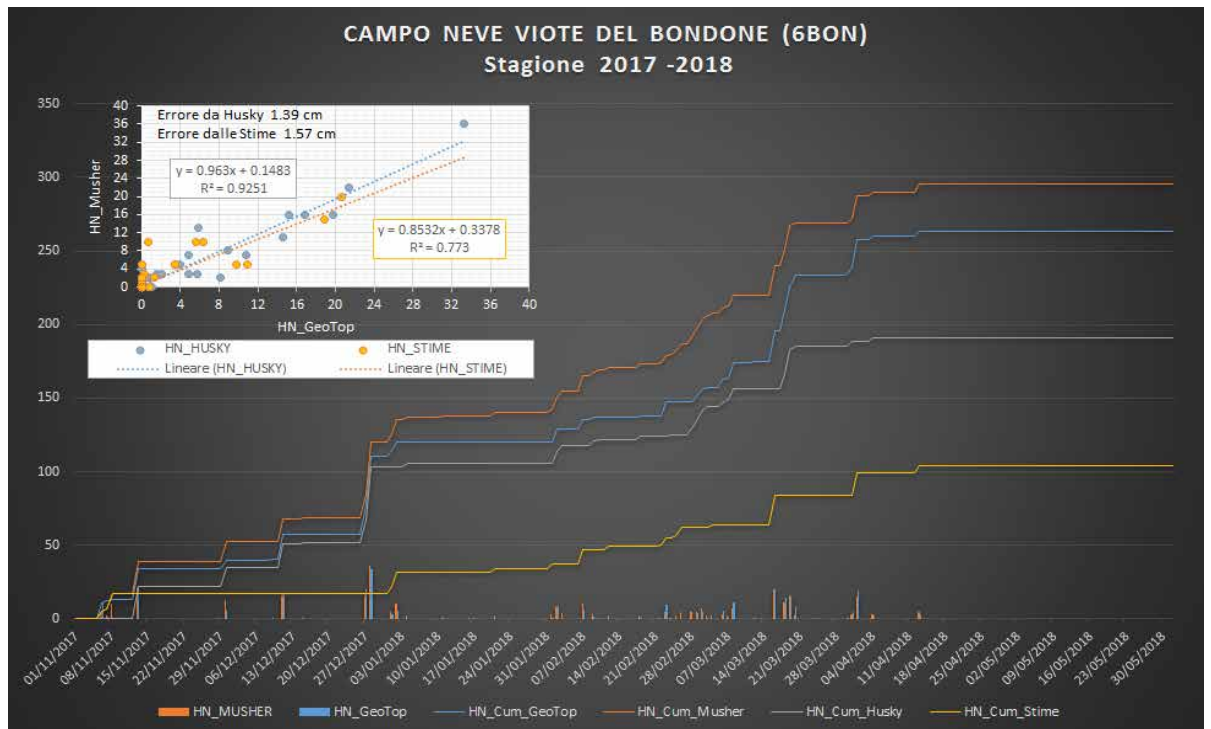
La sperimentazione in tempo reale ha evidenziato la necessità di un continuo confronto tra gli operatori modellistici e il personale della PAT addetto al controllo, al fine di mantenere il flusso della simulazione il più coerente possibile ed evitare derive modellistiche. Tali confronti si rendevano necessari a valle di condizioni meteo critiche (es. accumuli nevosi, rialzi termici) o in presenza di problematiche sui dati provenienti dalla rete di acquisizione. In particolare, durante gli eventi di accumulo, il modello può risentire di incertezze legate alla quota della nevicata e alla copiosità della precipitazione, che possono variare da valle a valle a seconda dei venti e della presenza di inversioni. Anche repentini rialzi termici, tipici del periodo tardo invernale o primaverile, possono creare fusioni localizzate difficilmente riproducibili in modo automatico dal modello di calcolo e per le quali è necessario un controllo a posteriori intersecando le immagini satellitari e le misure in campo.

VALUTAZIONE E VERIFICA DEI PRODOTTI SNOWMAPS

Per valutare la coerenza con la realtà dei prodotti di SnowMaps il settore valanghe di Meteotrentino ha effettuato dei controlli visivi casuali e un controllo sistematico sugli 80 punti di osservazione. Per quanto riguarda l'andamento spaziale dell'innevamento le mappe riportano una generale coerenza con le caratteristiche topografiche quali quota e ombreggiamento. Le discordanze comunque rilevate hanno permesso di effettuare delle indagini specifiche mediante l'analisi degli eventi nevosi rilevando sia errori di modellazione che errori di archiviazione dei dati osservati. In passato possibili imprecisioni di osservazione venivano archiviati tout court perché l'attenzione sul dato era relegata alla sua capacità di fornire indicazioni sull'imminente pericolo valanghe. Oggi le lunghe serie di dati della rete nivometrica hanno anche un valore idrologico e climatologico che induce gli utilizzatori del dato a effettuare le necessarie correzioni.

Analogamente a quanto fatto in sede di

Fig. 3 - Grafico delle cumulate di neve fresca (HN) al campo neve delle Viote del Bondone (6BON) per la stagione 2017-2018. Sono messe a confronto la cumulata del Database Musher (HN_Cum_Musher - grafo lineare arancione), somma della cumulata delle nevicate osservate (HN_Cum_Husky - grafo lineare grigio) e di quelle stimate (HN_Cum_Stime - grafo lineare giallo), con quella del modello GeoTop (HN_Cum_GeoTop - grafo lineare blu). Sono inoltre riportati a confronto gli istogrammi delle nevicate giornaliere registrate dalla rete di osservazione (HN_Musher) e dal modello (HN_GeoTop). Nel riquadro bianco le rette di confronto con i relativi indici di correlazione tra i dati del modello (HN_GeoTop) e quelli di osservazione (HN_Musher) suddivisi in stime (grafo giallo) e misure (grafo grigio), viene anche riportato l'errore del modello rispetto ad "Husky" (nevicate osservate) e alle "Stime" calcolato come scarto quadratico medio. L'indice di correlazione 0,9 con le osservazioni è molto buono, più scarso quello con le stime (0,7).



produzione sulle quattro stazioni sopra menzionate, per ogni campo neve e ogni stagione si è valutata la correlazione tra i dati SnowMaps e quelli osservati e, dove possibile, anche con le stime di neve fresca (Figura 3). Le stime di neve fresca vengono effettuate dai previsori nivologici sulla base dell'interpretazione dei prodotti di nowcasting meteorologico, della visione complessiva di tutti i dati trasmessi dalla rete automatica e da quella manuale degli osservatori nivologici, dai dati radar, dalle numerose webcam disponibili sul territorio e da metodi sperimentali di crowdsourcing rivolti esclusivamente alla raccolta di dati neve. Le stime di neve fresca non sono state prese in considerazione nella modellazione per due ragioni sostanziali: la prima è che sono disponibili solo per le ultime stagioni in modo sempre più organizzato dal 2012, la seconda è che in questo modo il confronto con i dati del modello può fornire un indicatore di qualità sia per il modello che per le stime stesse. Sui dati esaminati di poco più di una trentina di campi neve attivi durante le 11 stagioni simulate il modello ha individuato mediamente 777 nuove potenziali osservazioni di giornate nevose a stagione e ne ha trascurate 432. Dividendo questi numeri per i 35 campi neve me-

diamente attivi si ottiene rispettivamente 22 giornate nevose non rilevate e 12 non riconosciute dal modello, in sostanza e a grandi linee, una decina di giorni nevosi in più per stagione. Le osservazioni non registrate dalla rete si concentrano sui periodi autunnali e primaverili quando gli impianti sciistici sono chiusi e i campi neve risultano difficilmente accessibili. Considerazioni più sostanziali si possono fare prendendo come nuove nevicate quelle che il modello considera superiori ai 5 cm di neve fresca. Così facendo le potenziali nuove osservazioni scendono a 274 medie per stagione (22% in più) che su 35 campi neve vogliono dire poco meno di otto giorni nevosi. Al contrario il modello ha trascurato mediamente solo l'1,5% delle giornate nevose significative osservate. Lo scarto medio tra i valori di neve fresca simulati coincidenti con quelli rilevati è di 3,6 cm, inferiore alla tolleranza di 5 cm che si tende ad assumere per gli studi nivologici che contemplano le misure nivometriche. Un valore che conforta anche osservandolo nel caso specifico dell'esempio di figura 3, dove nel riquadro bianco l'errore tra modello e osservazioni nel campo neve delle Viote del Bondone è di soli 1,39 cm e di 1,57 cm con quelli stimati dal nivologo di turno.

LE MAPPE STATISTICHE

Per poter confrontare la disponibilità idrica del manto nevoso con quella del passato è stato pensato uno strumento grafico di immediata consultazione, ossia delle mappe statistiche in grado di indicare la disponibilità idrica in neve sciolta sul territorio rispetto al recente passato. Le mappe giornaliere dal 1° novembre 2007 al 1° giugno 2017 delle tre variabili nivologiche esaminate (HS, HN e SWE) sono state rielaborate tramite media mobile per determinare una condizione mediamente rappresentativa di uno specifico giorno, smussando di fatto l'effetto di eventi di accumulo nevoso. La media mobile è stata centrata su una finestra temporale di 7 giorni. Dalle mappe mediate disponibili per ogni giorno del periodo di calcolo sono state create sempre per ogni singolo giorno sette mappe delle statistiche che indicano per ogni cella di calcolo il valore del 20°, 40°, 60°, 80° percentile, il minimo (0° percentile), la media e il massimo (100° percentile) in dieci anni delle tre variabili esaminate. Con le sei mappe dei percentili è possibile poi riclassificare la mappa di ogni singolo giorno per comprendere se localmente i quantitativi di neve in termini di neve

Nella pagina a fianco, dall'alto: fig. 4 - Mappa statistica dell'indice SWE alla data del 31.12.2017. Risulta evidente la scarsa disponibilità idrica derivante dall'innevamento al suolo nelle regioni occidentali dell'Adamello - Presanella e del Cevedale rispetto agli ultimi dieci anni.

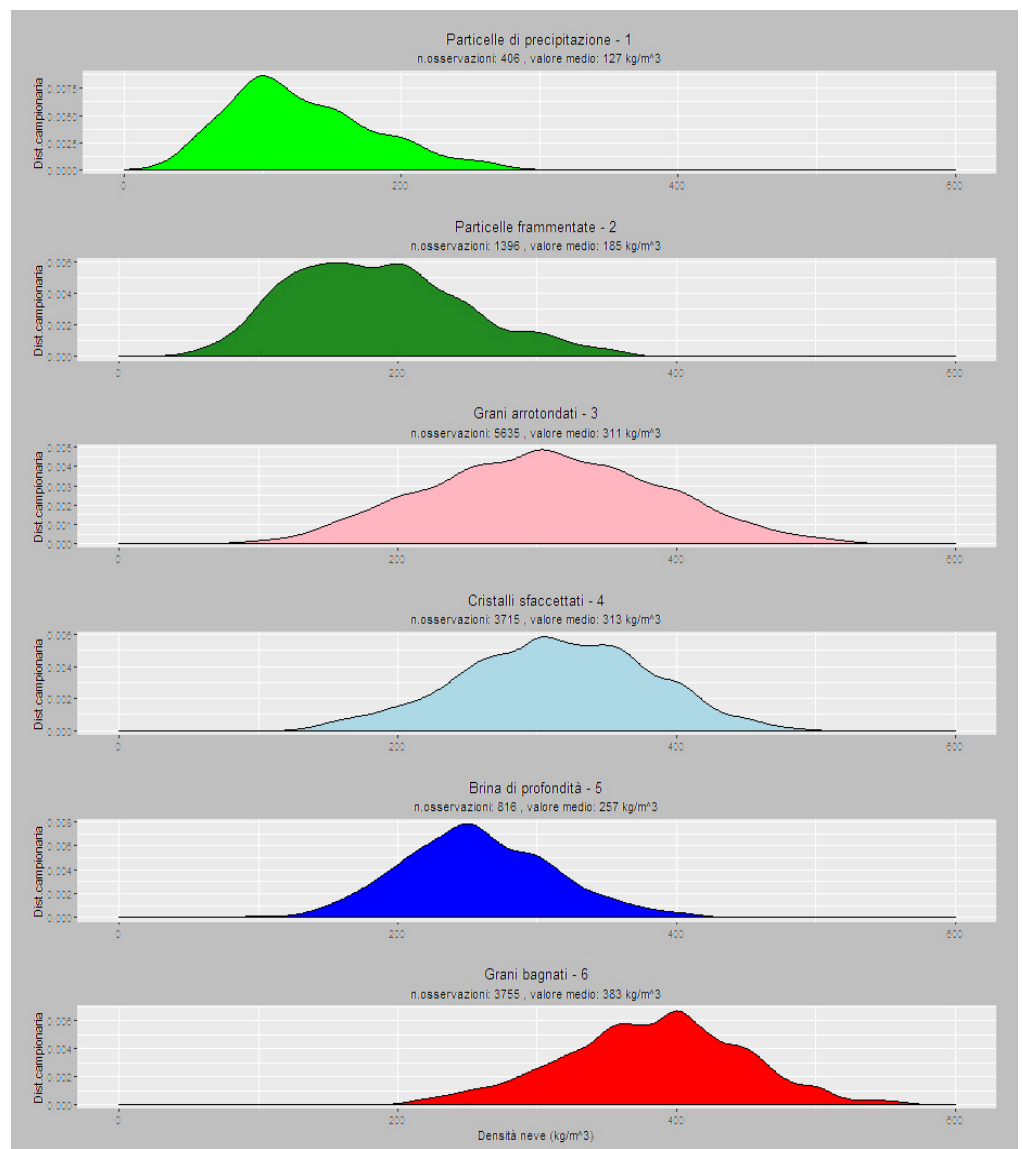
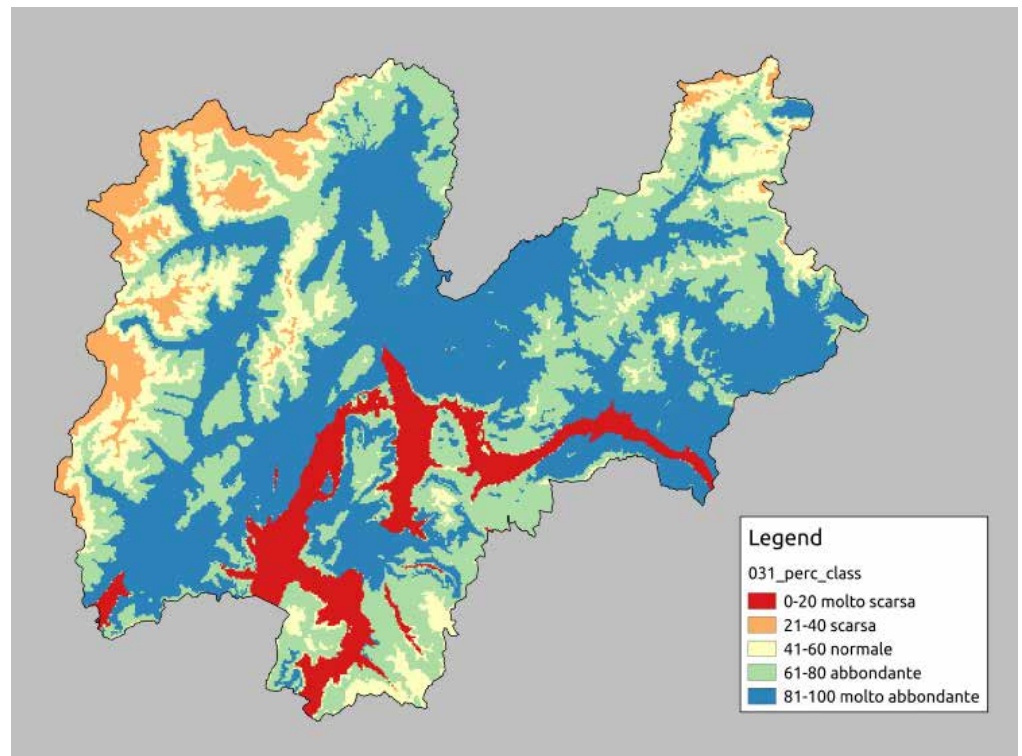
Fig. 5 - Distribuzione statistica della densità [kg/m3] per le varie tipologie di grano di neve emersa dal campione estratto ed esaminato dalle rilevazioni trentine disponibili dagli anni '80. La colorazione dei grafici si differenzia per tipologia di cristallo secondo la convenzione adottata dalla IACS - International Association of Cryospheric Sciences [5].

al suolo (HS) o di equivalente in acqua (SWE) sono scarsi o abbondanti sulla base dell'appartenenza dello specifico valore ad una delle classi percentili individuate (Figura4). Questo strumento estremamente utile per avere un quadro esplicito della situazione fornisce un'informazione qualitativa.

Potrebbe però essere necessario fare una valutazione quantitativa indicando la disponibilità idrica che mediamente viene accumulata nel manto nevoso su un singolo bacino idrografico in un determinato periodo dell'anno e confrontarla con il relativo valore calcolato in un giorno specifico. Dalle mappe giornaliere di SWE è possibile allora ricavare un valore globale di equivalente in acqua per una determinata zona e un preciso intervallo temporale, dato fondamentale per poter fare successive valutazioni di disponibilità idrica. Per un uso quantitativo dei prodotti Snow Map la stima di SWE richiede necessariamente una validazione al fine di poter dare un peso e una valenza scientifica al dato ricavato. I valori di equivalente in acqua della neve risultanti dal modello sono stati quindi validati attraverso un confronto puntuale con le misure ricavate dai profili stratigrafici effettuati nei campi neve provinciali.

IL VALORE PUNTUALE DI SWE DAI PROFILI STRATIGRAFICI DEL MANTO NEVOSO

Le misure dirette effettuate in montagna consistono in profili stratigrafici e penetrometrici eseguiti secondo lo standard AINEVA. Durante il rilievo stratigrafico, per raggiungere necessariamente una certa rapidità di esecuzione, non sempre vengono pesati ed esaminati tutti gli strati. Conseguentemente per poter determinare lo SWE di un profilo nivometrico è necessario stimare la densità della neve anche degli strati in cui non è stata effettuata la misurazione diretta. A tal fine si sono utilizzati i "valori di densità della neve in funzione della forma dei grani e della durezza sulle Alpi Orientali (Dolomiti)" ottenuti dagli studi di Valt e Cagnati.[4]



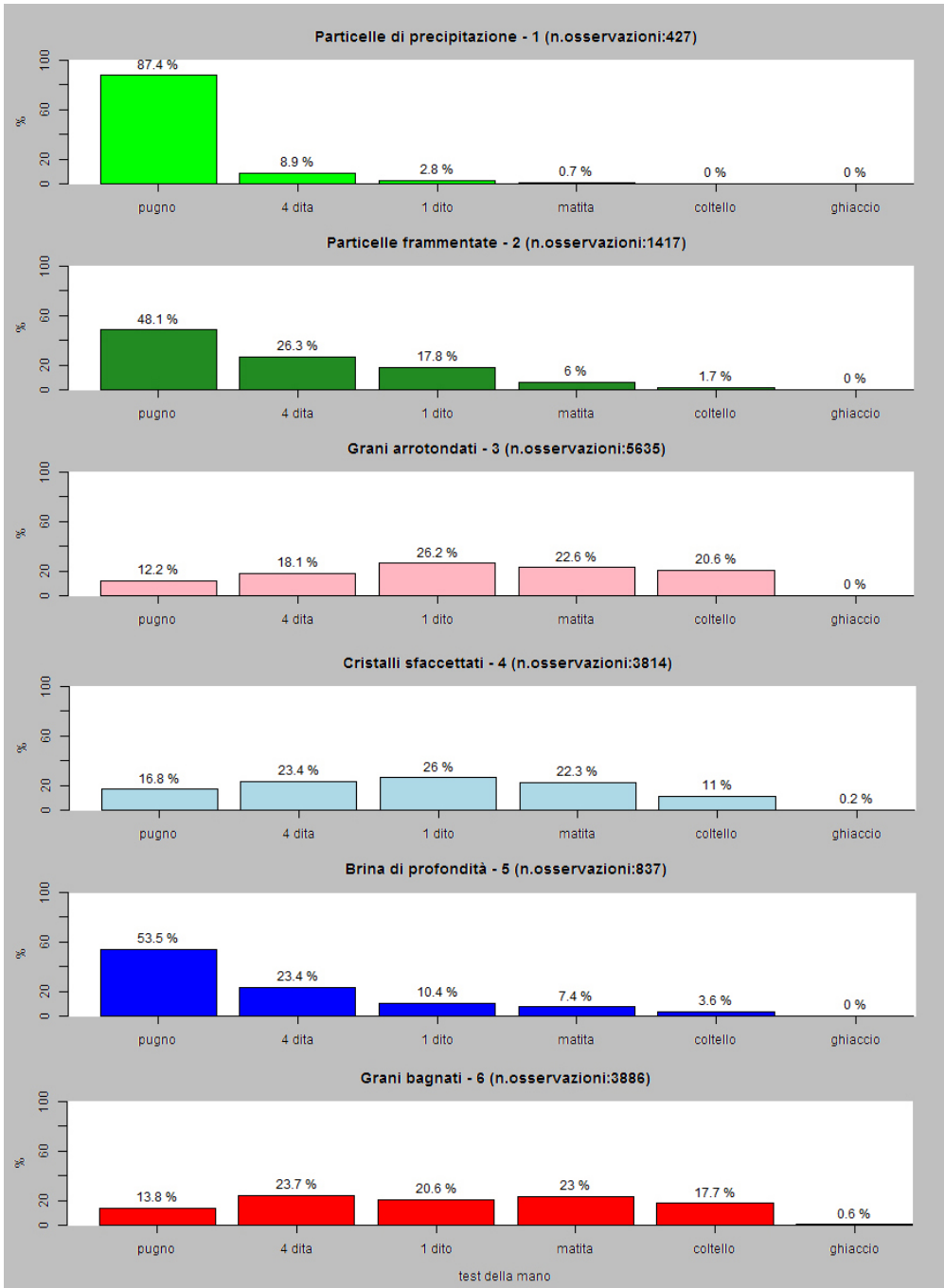
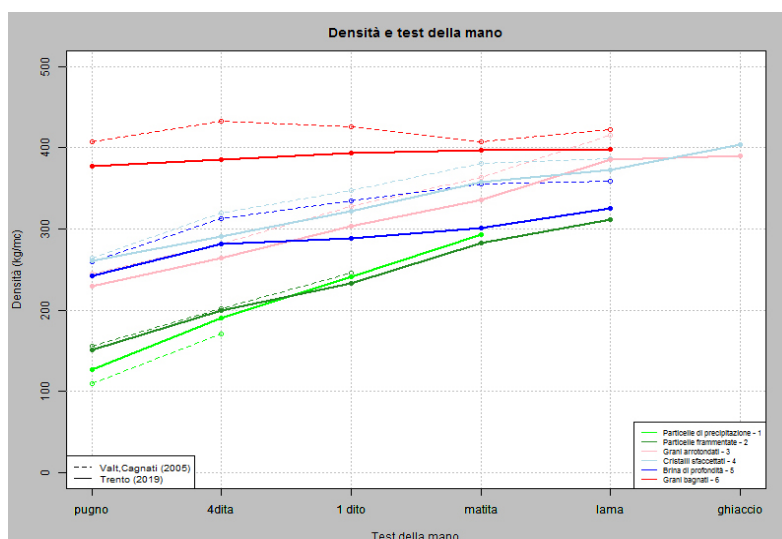


Fig. 6 - Distribuzione statistica in classi di durezza "R" secondo il test della mano [5],[6] per le varie tipologie di grano emersa dal campione estratto ed esaminato dalle rilevazioni trentine disponibili dagli anni '80. La colorazione dei grafici si differenzia per tipologia di cristallo secondo la convenzione adottata dalla IACS - International Association of Cryospheric Sciences [5].



Nel database Husky che raccoglie tutte le osservazioni nivologiche della rete di monitoraggio trentina sono presenti circa 7000 rilievi nivometrici con quasi 46000 strati di neve caratterizzati da una tipologia principale di grano e una specifica dimensione. Di questi strati, a 26200 circa è associato un valore di densità misurato direttamente con strumento carotatore mentre sui rimanenti è necessario assegnarne una utilizzando la tabella suddetta. In via preliminare si è però ritenuto necessario valutare se le densità della neve dei rilievi svolti in Trentino fossero in linea con i risultati di Valt e Cagnati. Si è realizzata quindi una statistica di distribuzione delle densità in funzione della forma dei grani ottenendo degli andamenti simili a quelli già pubblicati (figura 5). L'elaborazione ha escluso in automatico gli outliers (valori minori di $[Q1-1.5 IQR]$ o valori maggiori di $[Q3 + 1.5 IQR]$ dove Q1 è il primo quartile, Q3 è il terzo quartile e IQR è la distanza $Q3 - Q1$) considerati errori di rilevazione. In figura 6 sono riportati i risultati statistici della distribuzione delle classi di osservazione del test della mano diversificate per tipologia di cristalli. Confrontando i risultati ottenuti con i valori pubblicati si nota una differenza che mediamente è stata stimata in circa il 7% (figura 7). In generale le densità trovate sono state inferiori a quelle pubblicate, tranne che per le particelle di precipitazione (tipo 1) risultate mediamente superiori. Per capire meglio la causa delle differenze riscontrate (geografica, metodologica o procedurale) saranno necessari successivi approfondimenti ma per lo studio in essere tali differenze non sono state ritenute significative e sono stati pertanto utilizzati i valori pubblicati da Valt e Cagnati[4] per la stima della densità degli strati non pesati.

IL CONFRONTO TRA VALORE SWE MISURATO E QUELLO DA MODELLO

Definito il metodo per determinare il valore puntuale di SWE del manto nevoso si è passati al confronto puntuale con il dato estratto dalle mappe ad aggregazione

giornaliera mediante script Python in ambiente GIS GRASS. Dei 64 campi neve provinciali censiti nel 2017 ne sono stati selezionati 35 (Figura 8), per abbondanza e accuratezza delle misure disponibili. Le misure utilizzate per la validazione del modello fanno riferimento al periodo che va da dicembre 2007 ad aprile 2018.

Dall'attività di confronto tra i valori di SWE misurato e simulato è emerso che per una buona parte dei punti di controllo esaminati il modello SnowMaps simula con sufficiente approssimazione il valore misurato dell'equivalente in acqua della neve SWE nei campi neve, sia in termini qualitativi (come andamento nel tempo), sia in termini quantitativi (come valore) (Figura 9). La variabilità dei risultati a scala locale comporta però necessariamente una certa accortezza nel trattare il dato fornito dal modello, si è visto infatti che in alcuni casi il valore simulato può allontanarsi di parecchi punti percentuali dal valore misurato. Il prodotto finale va quindi interpretato con spirito critico ed utilizzato con cautela.

Va detto in ogni caso che possibili divergenze tra i valori sono sicuramente da imputare all'incertezza, all'indeterminatezza e alla grande variabilità delle forzanti meteorologiche utilizzate come input nel modello numerico di simulazione. Il modello non considera il trasporto eolico ma solamente i processi fisici di apporto nevoso da nevicata, compattazione e fusione su celle di calcolo di 250 m di lato che non permettono di rilevare effetti morfologici locali. In più va tenuto conto che, soprattutto in primavera ed in autunno, la nevicata è intervallata o accompagnata da pioggia, caratteristica questa difficilmente replicabile e simulabile in maniera fedele dal modello.

LE POTENZIALI DISPONIBILITÀ D'ACQUA DA FUSIONE SUL TERRITORIO

Conclusa la fase di analisi e validazione del modello di simulazione si sono estratti dalle mappe i dati aggregati di SWE per bacini idrografici provinciali di primo livello

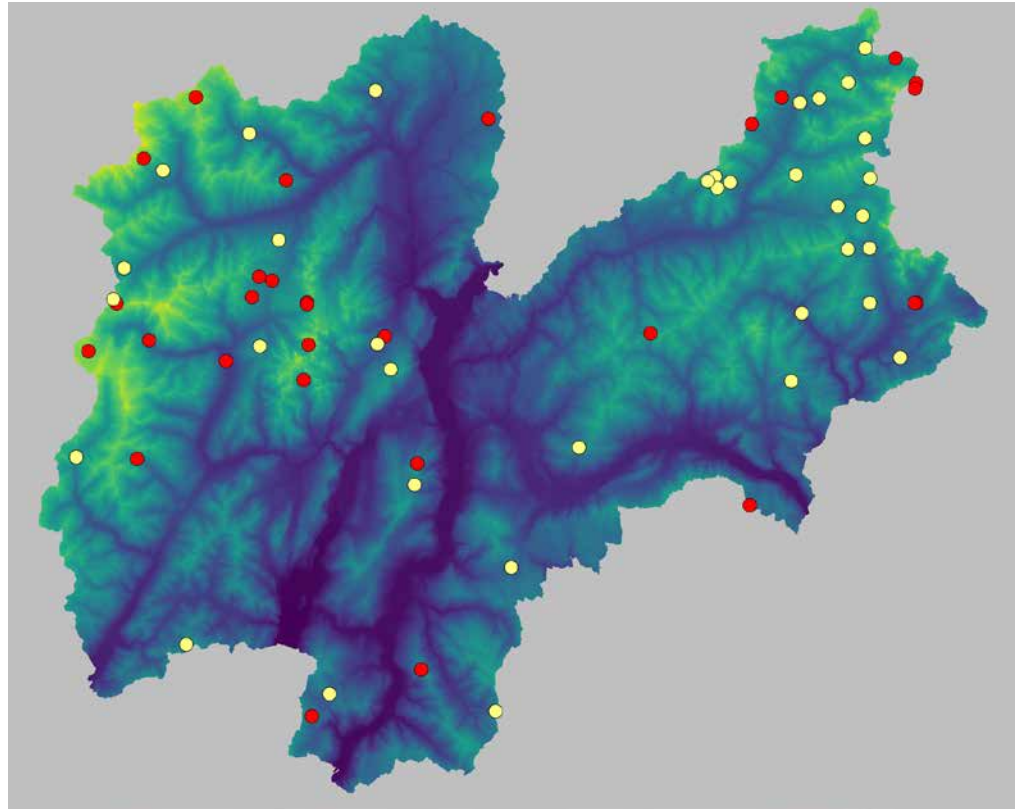


Fig. 8 - Mappa della localizzazione dei campi neve provinciali; in giallo sono segnati i campi utilizzati per confrontare i valori di SWE ricavati dai rilievi con quelli ottenuti dal modello GeoTop.

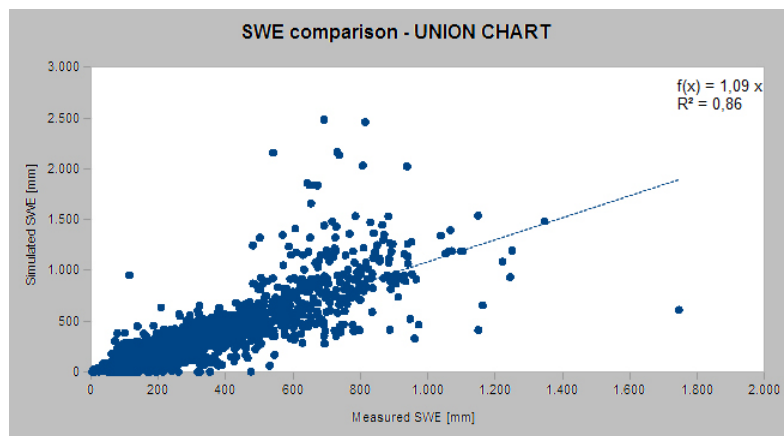


Fig. 9 - Grafico a dispersione di confronto tra dato misurato e simulato di SWE su tutti i campioni disponibili.

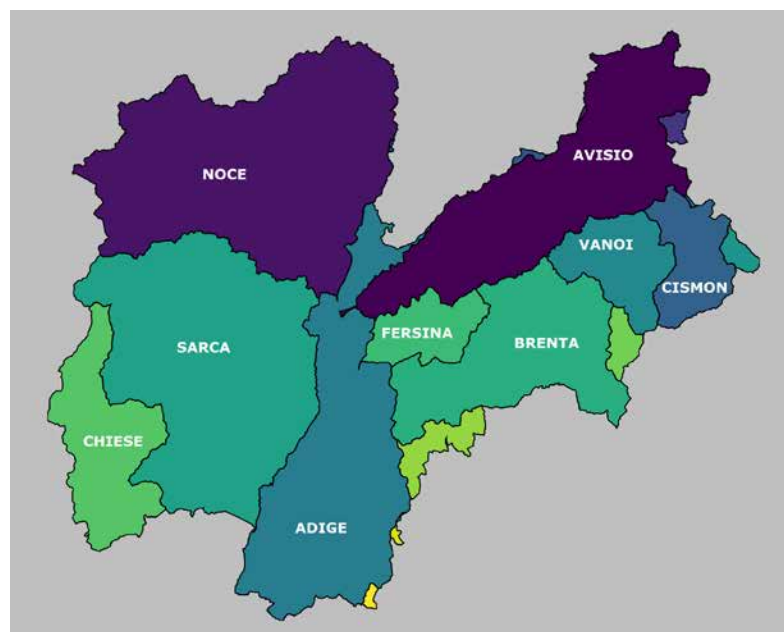


Fig. 10 - Mappa dei bacini idrografici provinciali di primo livello utilizzati per ricavare le statistiche aggregate per area del parametro SWE.

Nella pagina a fianco, in basso: fig. 7 - Confronto tra i dati pubblicati per le aree dolmitiche [4] e quelli ottenuti dall'analisi delle rilevazioni trentine disponibili dagli anni '80 della densità della neve in funzione di durezza (test della mano) e tipologia del grano.

NEVE

Fig. 11 - Grafico del valore medio decennale del parametro SWE [mm] per tutto il territorio provinciale nel periodo esaminato da novembre 2007 – maggio 2018.

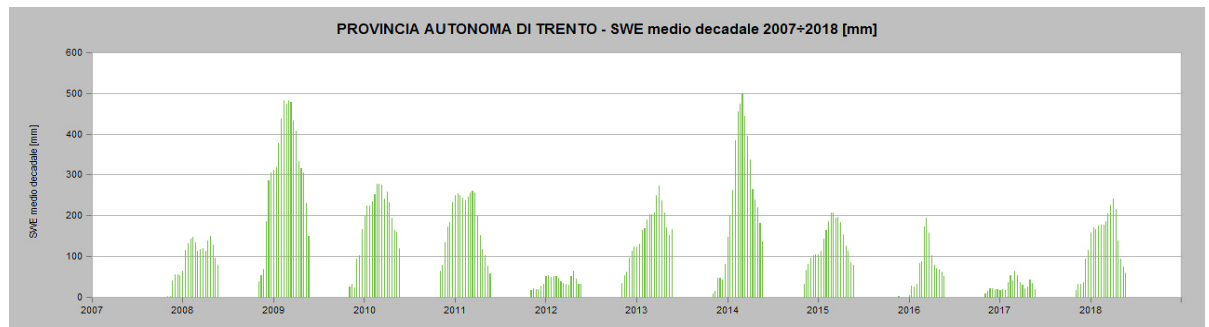


Fig. 12 - Grafico del valore medio decennale del parametro SWE [Mm³] per tutto il territorio provinciale nel periodo esaminato da novembre 2007 – maggio 2018.

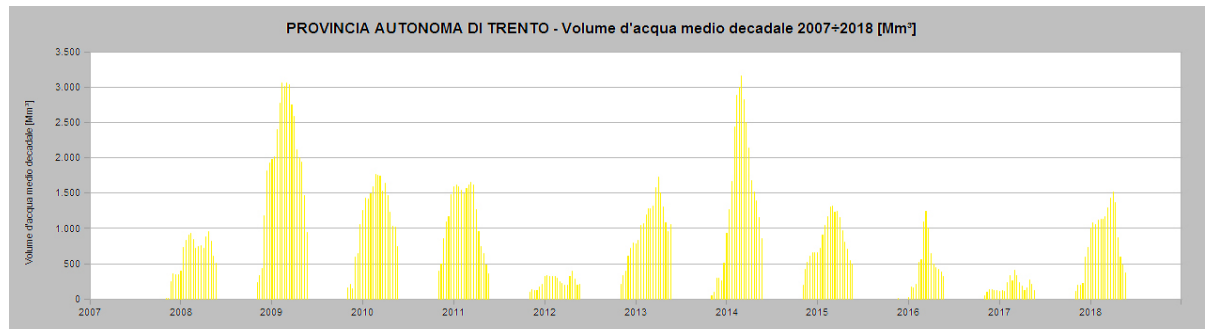
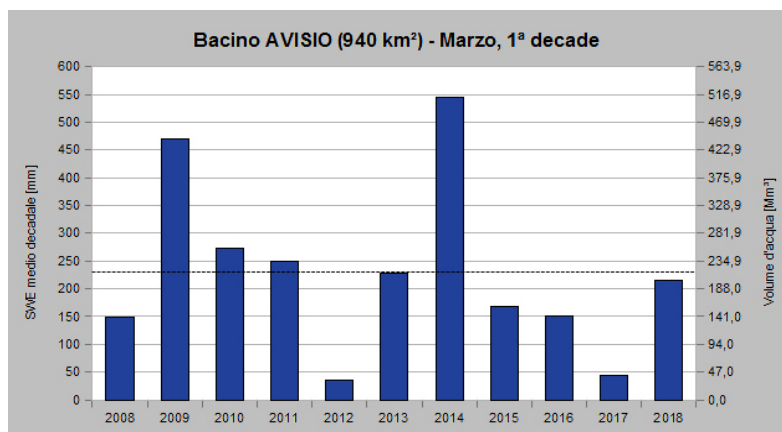


Fig. 13 - Grafico del valore di equivalente in acqua SWE mediato sulla prima decade di marzo per il bacino dell'Avisio in millimetri sull'asse delle ordinate di sinistra e in volume d'acqua [Mm³] sull'asse di destra per il periodo che va dalla stagione 2007-08 alla stagione 2017-18. Nel grafico è rappresentata anche la retta della media dei valori annuali per il campione considerato.



(Figura10) a intervalli temporali stabiliti. Si è quindi immaginato che la potenziale riserva idrica contenuta nella neve possa teoricamente arrivare alla sezione di chiusura del bacino come risorsa primaria disponibile, tralasciando ipoteticamente tempi e lunghezze di percorrenza, fenomeni di evapotraspirazione e di infiltrazione dell'acqua. Anche per il calcolo del dato giornaliero complessivo di equivalente in acqua della neve per singolo bacino idrografico è stato realizzato uno specifico codice in PyGRASS. Attraverso una sovrapposizione delle mappe SWE di SnowMaps con quelle dei bacini di primo livello questo codice estrae il dato globale di equivalente in acqua per bacino come somma dei valori puntuali di SWE assegnati a ciascuna cella della griglia di calcolo. Il dato complessivo così stimato è stato successivamente elab-

borato dal programma in modo da fornire il valore medio puntuale di SWE per bacino in mm di acqua equivalente. Dal dato medio puntuale di SWE, conoscendo la superficie di ciascun bacino, è stato poi ricavato il corrispondente valore medio di volume d'acqua, misurato in Mm³. Entrambe le grandezze sono state calcolate per singolo bacino idrografico di primo livello e per l'intero territorio provinciale, con cadenza temporale giornaliera e decennale. Per una visione di insieme della variazione temporale delle grandezze ricavate nel periodo d'indagine e per tutto il territorio provinciale sono stati riportati i grafici di figura 11 e 12 dai quali si può dedurre come mediamente i valori massimi accumulati di acqua nella neve al suolo ogni stagione rappresentino circa un quinto della risorsa idrica pluviale che cade annualmente sul Trentino e che negli

anni più abbondanti come il 2009 e il 2014 si arriva anche alla metà della disponibilità pluviale media annua.

Per ogni bacino idrografico il valore medio di equivalente in acqua è stato confrontato con l'analogo storico degli anni precedenti al fine di evidenziare l'andamento negli anni delle potenziali scorte idriche contenute nella neve. Lo studio e l'interpretazione di questi dati ha quindi permesso di generare una serie di grafici di confronto che mostrano l'andamento negli anni del dato medio puntuale di SWE [mm] e del corrispondente volume d'acqua [Mm³] per ogni decade e per tutti i bacini esaminati (figura 13), a titolo esemplificativo nonché per tutto il territorio provinciale. Sugli stessi grafici è stata rappresentata anche la retta della media dei valori annuali per il campione considerato (periodo 2007÷2018).

I valori statistici descritti di tutte le decadi del periodo esaminato, per ogni bacino e per l'intera provincia trentina sono poi stati raccolti in grafici riassuntivi con rappresentato il valore medio, massimo e minimo (figura 14 e 15)

CONCLUSIONI

Le mappe giornaliere di innevamento prodotto rappresentano un utile strumento di governo anche se devono essere utilizzate con senso critico per i limiti evidenziati dal

modello e per la natura e qualità dei dati d'ingresso. Inoltre la classificazione delle mappe giornaliere di altezza della neve al suolo e del suo equivalente in acqua in classi percentili da scarsa ad abbondante permette di avere una visione immediata della situazione delle riserve idriche da innevamento.

Da un punto di vista quantitativo lo studio effettuato e la successiva interpretazione dei dati presentati in semplici grafici di sintesi ha permesso di evidenziare le potenziali disponibilità d'acqua per ogni bacino idrografico mostrandone l'andamento negli anni presi in esame. Per comprendere le quantità in gioco e il ruolo fondamentale svolto dagli accumuli nevosi all'interno del ciclo idrologico si pensi che le riserve idriche contenute nella neve in alcuni periodi dell'anno assumono lo stesso ordine di grandezza della capacità complessiva degli invasi provinciali. La riserva idrica nevosa rappresenta quindi una fondamentale risorsa per far fronte alle esigenze idriche civili ed agricole nei periodi siccitosi.

Già dal breve arco temporale esaminato si è potuto constatare un'estrema variabilità delle riserve nivali stagionali con una continua alternanza tra trend negativi e positivi. Si è riscontrato che il massimo di SWE si realizza generalmente durante le prime due decadi di marzo. Negli ultimi anni analizzati si sono ottenuti valori di

SWE più bassi rispetto ai dati medi, dovuti a un ritardo delle nevicate nelle decadi di novembre e dicembre e a una fusione più rapida della neve accumulata nel mese di maggio, a causa di un tendenziale aumento delle temperature.

Il metodo sviluppato mette in evidenza interessanti potenziali e risvolti pratici purché si investa maggiormente sulla qualità dei dati raccolti eliminando le ambiguità riscontrate. Si deve quindi incentivare una raccolta più accurata del dato nivometrico mirando anche alla gestione della risorsa idrica e ampliando il periodo di monitoraggio ai primi mesi autunnali e a quelli tardo primaverili. Anche il metodo di determinazione dello SWE dai profili stratigrafici dovrà essere migliorato con ulteriori analisi volte anche alla valutazione della accuratezza e precisione dei rilievi. In questo modo sarà più semplice governare i risultati del sistema SnowMaps individuandone e correggendone le ambiguità. Per un uso del sistema in tempo reale si dovranno investire ulteriori risorse per effettuare validazioni dei dati in ingresso, altrimenti è altamente probabile che i risultati debbano essere riprocessati a fine stagione per conferirgli attendibilità.

A scala di bacino idrografico di primo livello il modello nel complesso ha dato buoni risultati evidenziando la capacità di mediare gli errori. Sicuramente i prodotti realizzati

rappresentano un utile strumento per la gestione della risorsa idrica in campo agricolo e civile che permettono di paragonare la situazione stagionale odierna con quelle del passato.

La Provincia autonoma di Trento ha quindi investito nuove risorse per estendere ulteriormente nel passato il periodo di analisi e costruire un campione di dati più significativo. Una finestra temporale di analisi più lunga potrebbe mettere in evidenza possibili effetti dei cambiamenti climatici a scala locale ed eventuali trend significativi e dare quindi importanti informazioni per una corretta pianificazione della gestione della risorsa idrica.

Bibliografia

- [1] Dall'Amico M., Cagnati A., Crepaz A., Endrizzi S., Zambon F. (2014). Snowmaps: realizzazione di mappe di innevamento a supporto della previsione valanghe. *Neve e Valanghe*, 83, 20-27. Consultabile su: http://www.aineva.it/wp-content/uploads/2017/11/nv83_3.pdf
- [2] Endrizzi S., Gruber S., Dall'Amico M. and Rigon R. (2014), GEOtop 2.0: simulating the combined energy and water balance at and below the land surface accounting for soil freezing, snow cover and terrain effects, *Geosci. Model Dev.*, 7, 2831-2857.
- [3] Dall'Amico M., Endrizzi S., Tasin S. (2018) MYSNOWMAPS: OPERATIVE HIGH-RESOLUTION REAL-TIME SNOW MAPPING International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, 2018.
- [4] Valt M., Cagnati A. (2005). Stima della densità della neve conoscendo la forma dei grani e la durezza. *Neve e Valanghe*, 55, 40-45 (Tabella Fig.7).
- [5] IACS UNESCO (Paris, 2009) The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP-VII Technical Documents in Hydrology N°83
- [6] Cagnati A. 2003 Sistemi di Misura e metodi di osservazione nivometrico-idrologici. AINEVA, Trento, 186 pp.

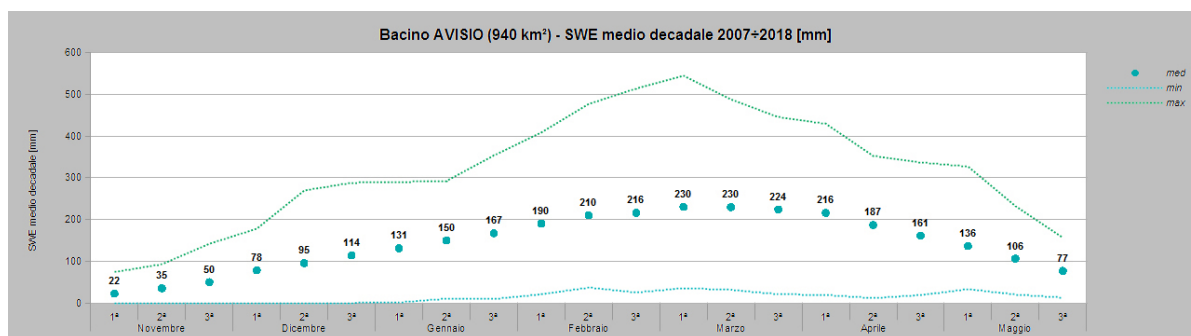


Fig. 14 - Grafico del valore in millimetri di equivalente in acqua SWE medio decadale per il bacino dell'Avisio per il periodo che va dalla stagione 2007-08 alla stagione 2017-18. A pallini blu il minimo riscontrato per decade e a pallini verdi il massimo.

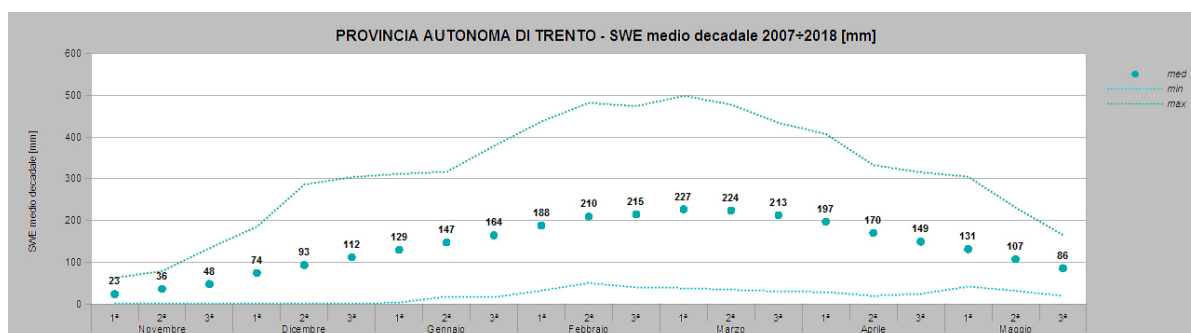


Fig. 15 - Grafico del valore in millimetri di equivalente in acqua SWE medio decadale per tutta la Provincia per il periodo che va dalla stagione 2007-08 alla stagione 2017-18. A pallini blu il minimo riscontrato per decade e a pallini verdi il massimo.