

STANDARDIZED SNOW PACK INDEX SSPI NELLE ALPI ORIENTALI

Mauro Valt

ARPAV - Centro Valanghe di Arabba,
via Pradat 5, 32020 Livinallongo del Col di Lana
mauro.valt@arpa.veneto.it

un indicatore per lo Snow Water Equivalent (SWE)

Standardized Snow Pack Index (SSPI) in the Eastern Alps

In the last 10 years, the snowpack has been below the average for 4 winters. This highlighted the need to use appropriate drought indicators for the water resource and for the Snow Water Equivalent (SWE). The Standardized SnowPack Index (SSPI) is an indicator based on the assessment of the probability of observing a certain daily value of snow water equivalent (SWE, kg m⁻²) on certain time scales.

In this article the SSPI is calculated using the data of the automatic stations that measure the snow height and the snow density values. The snow density values of the recent bibliography and those measured directly were used.

The calculation of the SSPI of the eastern Alps (Piave river basin) for the last 10 years has shown consistency with history.

The beginning of the snowpack fusion in the middle of March and not in April (15 days) shows very different SSPI values for the Piave river basin.

Negli ultimi 10 anni, il manto nevoso è stato inferiore alla media per ben 4 inverni. Questo ha evidenziato la necessità di utilizzare degli indicatori di siccità appropriati per la risorsa idrica e per lo Snow Water Equivalent (SWE). Lo Standardized SnowPack Index (SSPI) è un indicatore basato sulla valutazione della probabilità di osservare un certo valore giornaliero di equivalente in acqua della neve (SWE, kg m⁻²) su determinate scale temporali.

Nel presente articolo viene calcolato lo SSPI utilizzando i dati delle stazioni automatiche che misurano l'altezza della neve e i valori di densità della neve. Sono stati utilizzati i valori di densità della neve della bibliografia recente e quelli misurati direttamente.

Il calcolo dello SSPI delle ALpi orientali (bacino del fiume Piave) per gli ultimi 10 anni ha evidenziato una coerenza con la storia.

L'inizio della fusione del manto nevoso a metà del mese di marzo e non ad aprile (15 giorni) evidenzia valori di SSPI molto diversi per il bacino del fiume Piave.



INTRODUZIONE

L'andamento recente delle stagioni invernali sulle Alpi italiane ha posto l'attenzione sulla scarsità della risorsa idrica disponibile sottoforma di neve nei mesi di primaverili ed estivi. La risorsa idrica immagazzinata nel manto nevoso è infatti di fondamentale importanza per la regolazione dei flussi idrici per l'agricoltura, per la produzione di energia elettrica e per le derivazioni di acqua potabile. Il monitoraggio della siccità del manto nevoso si basa sull'analisi di una serie di indicatori che rappresentano i diversi componenti del ciclo idrogeologico: l'altezza del manto nevoso al suolo (HS, cm) e la densità della neve (ρ_b , kgm^{-3}). Gli indicatori rappresentano generalmente delle anomalie statistiche della situazione attuale rispetto alla climatologia a lungo termine in una determinata area e quindi forniscono una misura della gravità probabilistica di un determinato evento (EDO European Drought Observatory <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1010>)

Tra gli indicatori di siccità meteorologica, l'indice di precipitazione standardizzato (SPI) e l'indice di precipitazione-eva-

porazione standardizzato (SPEI) sono i più noti.

Per quanto riguarda il manto nevoso, un indicatore è lo Snow Water Equivalent (SWE) che è una variabile importante nel Nord Europa e nelle regioni montuose, poiché influenza la disponibilità di acqua nel corso dell'anno, grazie all'accumulo e allo scioglimento della neve.

Lo Standardized SnowPack Index (SSPI) è l'indicatore che misura le anomalie dell'equivalente nell'acqua di neve (SWE) e può essere utilizzato per identificare il rischio di siccità idrologica all'inizio dell'estate (<http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1010>)

Tuttavia la determinazione dello SSPI presenta delle notevoli difficoltà per la mancanza di dati misurati a terra in tempo reale.

Ne "Handbook of Drought Indicators and Indices" (WMO, 2016) che fornisce informazioni sugli indicatori di siccità comunemente utilizzati, non viene citato l'indicatore SSPI, presumibilmente per la difficoltà di calcolo e la scarsità di dati omogenei a livello internazionale.

Nelle "Linee Guida sugli indicatori di Siccità e Scarsità idrica da utilizzare nelle attività degli osservatori Distrettuali per l'Uso della Risorsa Idrica" Draft Stato attuale e prospettive Future, maggio 2018" di Mariani et al. (2018), a pag. 8, si evidenzia che gli indicatori proposti fanno parte del set di indicatori individuati da un apposito gruppo di lavoro europeo "Expert Group on Water Scarcity and Droughts" (EGWSD) (TYPASA, 2013; Faergemann, 2012) istituito nell'ambito della programmazione 2010-2012 del Common Implementation Strategy (CIS) della Commissione Europea per la DQA (DIRETTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 23 ottobre 2000 che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque). Gli indicatori principali, lo Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee et al., 1993, World Meteorological Organization, 2012), il Water Exploitation Index Plus (WEI+) (Faergemann, 2012), il fraction of Absorbed Photosynthetically Ac-

tive Solar Radiation (fAPAR) (Gobron et al., 2000) sono integrati dagli indicatori Standardized Run-off Index (SRI) (Shukla e Wood, 2008), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010; Begueria et al., 2014) Spring Anomaly Index (SAI) (Romano et al., 2013) e dallo Standardized SnowPack Index (SSPI).

La definizione dello SSPI riportata è: *lo Standardized SnowPack Index (SSPI), indicatore analogo allo SPI in cui si utilizzano i valori dell'equivalente in acqua della neve (SWE-snow water equivalent; in kg m^{-2}) anziché quelli di pioggia, e di cui si consiglia l'utilizzo in quei distretti idrografici/aree in cui è rilevante per la disponibilità della risorsa idrica l'apporto fornito dal manto nevoso/snowpack.*

Nel presente lavoro, dopo una spiegazione matematica dell'indicatore SSPI, viene illustrata la sua applicazione classica e operativa in alcuni bacini nelle Alpi Orientali. Nel presente lavoro l'anno di riferimento è quello idrologico, pertanto il 2019 inizia il 1 ottobre 2018 e termina il 30 settembre 2019.

LO STANDARDIZED SNOWPACK INDEX (SSPI)

L'indicatore SSPI è basato sulla valutazione della probabilità di osservare un certo valore giornaliero di equivalente in acqua della neve (SWE, kg m^{-2}) su determinate scale temporali. Lo SSPI fornisce pertanto informazioni concernenti il volume di neve accumulato in un bacino (ad esempio Piave, Brenta, Po), standardizzato rispetto alla climatologia, a un passo temporale tipicamente decennale e mensile. Questo indicatore deve essere analizzato in combinazione con lo SPI (*Standardized Precipitation Index*) e con lo SRI (*Standardized Run-off Index*) per avere una fotografia completa della situazione di siccità.

La difficoltà nel calcolo di questo indicatore risiede nella stima dello SWE nel bacino montuoso. Pertanto, nell'ambito delle attività dell'EGWSD (Expert Group on Water Scarcity and Droughts) è sta-



ta proposta una modalità alternativa di calcolo del SSPI sviluppata dal *Finnish Meteorological Institute* (FMI) (Pulliainen, J., 2006) che utilizza le stime di SWE prodotte per l'intero emisfero Nord dal progetto *GlobSnow* (<http://www.globsnow.info/>) dell'ESA (European Space Agency).

Sul portale CryoLand GeoPorta (<http://cryoland.enveo.at/services/snow-services/pan-european-snow-products/standardized-snow-pack-indicator>) è possibile scaricare il file raster dello SSPI per l'area 72° N / 11° W a 35° N / 35° E in cui i pixel sono dell'ordine di 10-25 km. I valori di SSPI sono ricavati dallo SWE ricavato tramite radiometria satellitare a microonde miscelata da misurazioni della neve da stazioni meteorologiche. Il prodotto, elaborato su larga scala, fornisce informazioni sul SSPI su base decadale e mensile.

Lo SSPI è calcolato come l'anomalia (normalizzata) delle condizioni correnti di SWE valutata rispetto alla media climatologica su lungo periodo delle condizioni di SWE.

Nel Box 1 è riportata la spiegazione della metodologia di calcolo e di interpretazione dei risultati.

Lo SWE è invece dato dalla relazione

$$SWE = HS * \rho b \quad (\text{Eq. 5})$$

Dove HS è l'altezza del manto nevoso (m) e ρb è la densità del manto nevoso (kg m^{-3}).

Pertanto, in un determinato bacino montuoso, o genericamente in un'area geografica, disponendo di una serie storica di dati di HS e di ρb è possibile calcolare il relativo valore dello SSPI con la metodologia classica senza l'utilizzo dei dati telerilevati.

ALTEZZA DEL MANTO NEVOSO HS

Sul versante meridionale delle Alpi sono attive reti di monitoraggio dell'altezza giornaliera del manto nevoso gestite da Enti e Società diverse (ENEL, ARPA, Società di gestione delle Dighe, etc). La

Box 1

Lo SSPI è calcolato come l'anomalia (normalizzata) delle condizioni correnti di SWE valutata rispetto alla media climatologica su lungo periodo delle condizioni di SWE.

La formulazione dello SSPI mediato su giorni (= 10 o 30) relativo al giorno dell'anno, indicata con, è la seguente:

$$SSPI_{y,d,k} = \frac{SWE_{y,d,k} - SWE_{avg,d,k}}{SWE_{std,d,k}} \quad (\text{Eq. 1})$$

dove è il valore dello SWE mediato su giorni per il giorno dell'anno e è la corrispondente media calcolata sull'intera serie disponibile compresa tra l'anno e l'anno:

$$SWE_{y,d,k} = \frac{1}{n} \sum_{i=d-(k-1)}^{n-k} SWE_{y,i} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$SWE_{avg,d,k} = \frac{1}{y_1 - y_0} \sum_{i=y_0}^{y_1} SWE_{i,d,k} \quad (\text{Eq. 3})$$

avendo indicato con la corrispondente deviazione standard:

$$SWE_{std,d,k} = \sqrt{\frac{1}{(y_1 - y_0) - 1} \sum_{i=y_0}^{y_1} (SWE_{i,d,k} - SWE_{avg,d,k})^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

I valori di SSPI minori o uguali a -2 indicano che, statisticamente, l'accumulo nivale è notevolmente inferiore alla norma, mentre valori maggiori o uguali a 2 indicano che l'accumulo è notevolmente superiore alla norma, secondo la classificazione di Tab. 1 (http://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_ssipi.pdf)

CLASSIFICAZIONE DELLO SSPI

Classificazione della severità	Probabilità dell'evento [%]	Probabilità cumulata	Valore dello SSPI
Notevolmente superiore alla norma	2,3%	0,977 - 1	SSPI ≥ 2,00
Molto superiore alla norma	4,4%	0,933 - 0,977	1,50 ≤ SSPI < 2,00
Superiore alla norma	9,2%	0,841 - 0,933	1,00 ≤ SSPI < 1,50
Vicino alla norma	68,2%	0,159 - 0,841	-1,00 < SSPI < 1,00
Inferiore alla norma	9,2%	0,067 - 0,159	-1,50 < SSPI ≤ -1,00
Molto inferiore alla norma	4,4%	0,023 - 0,067	-2,00 < SSPI ≤ -1,50
Notevolmente inferiore alla norma	2,3%	0 - 0,023	SSPI ≤ -2,00

© AINEVA

Tab. 1

distribuzione geografica delle reti è stata molto variabile nel tempo, con una fitta rete tradizionale e manuale fino agli anni '70 (Gazzolo e Pinna, 1973), progressivamente dismessa nel tempo e sostituita o integrata da sistemi automatici di misura (Cagnati, 1986).

Dalla fine degli anni '80 il numero di stazioni automatiche è andato via via aumentando e attualmente sono disponibili serie trentennali sui principali portali dei servizi valanghe regionali o provinciali (es. www.arpa.piemonte.it, www.arpa.veneto.it, www.meteotrentino.it). Il valore di HS nelle stazioni tradizionali

è di norma riferito alle ore 8:00 del mattino secondo gli standard internazionali, mentre per le stazioni automatiche è facilmente accessibile il valore medio giornaliero (Cagnati, 2003).

I dati vengono acquisiti in tempo reale nella maggior parte delle reti odierne e sono spesso disponibili come open data.

DENSITÀ DEL MANTO NEVOSO ρb

La densità del manto nevoso viene misurata tramite campionamento verticale (Berni e Giancanelli, 1966) o orizzontale (Cagnati, 2003).

NEVE

Le misure di densità effettuate dai servizi valanghe regionali e provinciali del versante meridionale delle Alpi, gestiti con il software Yeti Nick (Valt et al., 2013), sono disponibili con serie storiche di 10-35 anni per diverse località delle Alpi.

Per alcuni settori delle Alpi italiani alcuni autori hanno proposto metodi diversi per la determinazione dello SWE o per l'identificazione della densità della neve. Bocchiola e Rosso (2007) hanno proposto una distribuzione statistica giornaliera dello SWE per le Alpi centrali, Pistocchi (2016, 2017) ha confrontato i risultati dei lavori di Jonas et al. (2009) e Sturm et al. (2010) sui dati, mentre Valt e Moro (2009) hanno identificato i caratteristici valori di densità del manto nevoso delle Alpi orientali. Nel lavoro di Valt et al. (2018) sono stati calcolati i valori caratteristici di densità del manto nevoso per la suddivisione geografica SOIUSA (Marazzi, 2005) delle Alpi meridionali.

I dati di densità del manto nevoso dei servizi valanghe sono acquisiti nell'arco delle 24 ore dal momento del rilievo e quindi, aggregati, possono dare l'indicazione della densità della neve in tempo reale durante la stagione invernale. Ad inizio e alla fine della stagione invernale, nei mesi di novembre, aprile e maggio quando gli impianti di risalita sono chiusi, si nota una carenza di dati per la difficoltà di accesso ai campi neve.

Nel presente lavoro sono stati utilizzati i dati relativi al bacino del Piave e del Cordevole, ricadenti nelle aree 31 e 32 della classificazione SOIUSA.

In Tab. II sono riportati le polinomiali di ordine 2 delle singole stagioni invernali. Il valore di R² è molto variabile anche in relazione all'andamento della stagione invernale.

Con i modelli di simulazione del manto nevoso, tipo Snowpack (Lehning et al. 2002) è possibile disporre in tempo re-

ale anche dei dati simulati di densità del manto nevoso.

Il vantaggio dei dati di Snowpack è la disponibilità in tutto il periodo in cui il manto nevoso è presente, sia ad inizio che a fine stagione.

Nel presente lavoro sono stati confronti i dati delle simulazioni di Snowpack con le misure a terra degli ultimi 5 anni per poter verificare la possibilità che questo flusso di dati continuo possa sostituire o integrare i dati misurati.

Nella Tab. II, sono riportate le rispettive equazioni stagionali delle simulazioni di Snowpack.

IL DATA SET DELLE DOLOMITI VENETE

Nel presente lavoro viene considerato un data set di dati dal 2010 al 2019, anche se è disponibile la serie storica di oltre 30 anni di dati di altezza neve e densità del manto nevoso. La scelta di un periodo breve è motivata dal fatto che dal 2010 ad oggi, si sono succedute delle stagioni invernali caratterizzate da una variabilità della neve al suolo: le stagioni 2009-2010 e 2013-2014 sono state estremamente nevose, mentre quelle del 2015-2016 e 2017-2018 sono state poco nevose, le rimanenti nella media. Sono stati considerati i dati di altezza neve delle stazioni nivometeorologiche automatiche della rete regionale gestita da ARPA Veneto ubicate nelle Dolomiti (Fig. 1), i dati di densità del manto nevoso elaborati per l'area delle Dolomiti (Valt et al. 2018), i dati di densità forniti da SnowPack per le ultime 5 stagioni invernali.

L'area di studio e di calcolo dell'indice SSPI è il bacino del fiume Piave (chiuso a Soverzene) e del Cordevole, affluente di destra del Piave, per circa 2000 km² di superficie complessivi (Fig. 2).

I due bacini hanno una estensione che comprende meno del 7% del territorio al di sotto dei 1000 m di quota, l'11% fra i 1000 e i 1250 m, una ripartizione intorno al 18-19% nelle 3 fasce superiori di 250 m ciascuna di altitudine, il 14% fra i 2000 e i 2250 m e il 12% oltre tale quota.

Tab. 2

Fig. 1 - Estratto da Google Earth con l'ubicazione delle stazioni nivometeorologiche automatiche (AWS) e per le quali sono disponibili le elaborazioni di SnowPack. Colorati i vari sottobacini del fiume Piave e Cordevole.

	Misure a terra	da Snowpack
2010	$y = 0,0072x^2 - 0,5725x + 278,61$ R ² = 0,732	
2011	$y = 0,0028x^2 + 0,381x + 258,43$ R ² = 0,5706	
2012	$y = 0,016x^2 - 2,2196x + 307,2$ R ² = 0,518	
2013	$y = 0,0101x^2 - 1,4129x + 321,43$ R ² = 0,5165	
2014	$y = 0,0067x^2 - 0,1699x + 256,02$ R ² = 0,8439	
2015	$y = 0,0229x^2 - 4,2408x + 434,9$ R ² = 0,6157	$y = 0,0032x^2 + 0,596x + 169,46$ R ² = 0,905
2016	$y = 0,0174x^2 - 2,4352x + 295,32$ R ² = 0,7141	$y = 0,0039x^2 + 1,0468x + 60,088$ R ² = 0,9183
2017	$y = 0,0122x^2 - 0,8091x + 196,43$ R ² = 0,5458	$y = 0,0068x^2 - 0,0012x + 170,2$ R ² = 0,8339
2018	$y = 0,0037x^2 + 0,1634x + 233,96$ R ² = 0,5252	$y = 0,0039x^2 + 0,1994x + 261,67$ R ² = 0,787
2019	$y = 0,0136x^2 - 1,4386x + 273,18$ R ² = 0,5305	$y = 0,002x^2 + 1,0159x + 163,06$ R ² = 0,8657
2010-2019	$y = 0,0115x^2 - 1,4485x + 299,91$ R ² = 0,5437	

© AINEVA



Nell'area mediamente si misurano 100-120 cm di neve fresca a 750-850 m, 230-300 cm a 1200 m in funzione della esposizione della valle ai venti di scirocco (maggiore in quelle con sviluppo W-E), 340-400 cm a 1600 m, 600-700 cm di neve a 2200 m.

La neve al suolo permane 100-110 giorni a 1200 m di quota, 125 giorni a 1600 m e 150 giorni a 2200 m di quota.

Lo spessore di massima altezza della neve al suolo viene raggiunto nella prima decade di marzo.

Nei 2 bacini la risorsa idrica nivale è monitorata da diversi Enti (ENEL, ARPAV, etc.) con la redazione di specifici report (www.arpav.veneto.it) anche a supporto delle attività del Distretto Idrografico delle Alpi Orientali (<http://www.alpiorientali.it/15-alpiorientali.html>).

ELABORAZIONE DEI DATI

Per il periodo 2000-2019 è stato calcolato il valore medio giornaliero di altezza della neve al suolo (HS) come media di tutte le stazioni (AWS), non tenendo conto delle differenze altitudinali e senza considerare dei pesi in funzione della superficie della fascia altimetrica in cui ricadono. Questa scelta è stata fatta in considerazione dell'ampia distribuzione geografica delle stazioni, che non permette specifiche affinzioni del metodo di indagine.

Nella Fig. 3 sono rappresentate le varie stagioni invernali. E' possibile osservare la scarsità di neve degli inverni 2012 e 2017, la scarsità di neve fino al 1 febbraio degli inverni 2012, 2016, 2017 e 2019 (4 inverni su 10) e poco di più nel 2015, gli inverni maggiormente nevosi del 2010, 2011, 2013 e 2018 e l'estremamente nevoso del 2014.

Per la densità media della neve sono stati considerati diversi approcci:

- densità giornaliera $\rho_{d,souisa}$ del manto nevoso mediata su k giorni (10) ricavata con l'equazione espresse nel lavoro di Valt et al. (2018) per le alpi italiane per l'area SOIUSA 31-Dolomiti (equazione unica per tutte le stagioni invernali);

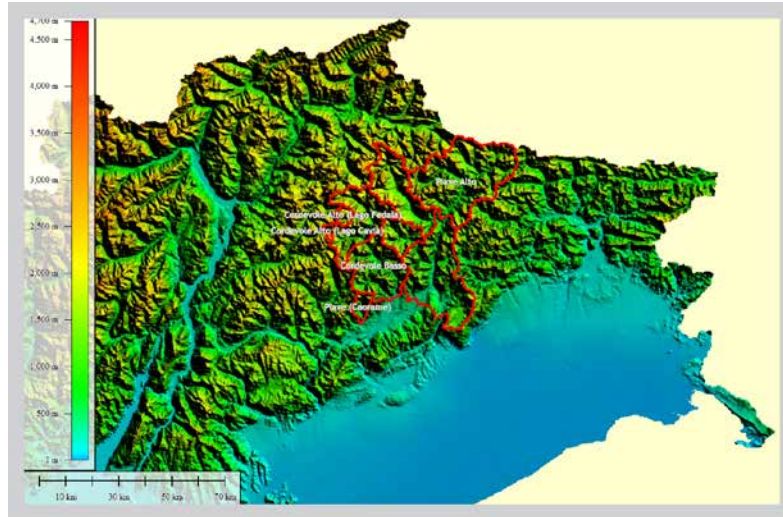


Fig. 2 - Area di studio di calcolo dell'indice SSPI, bacino del fiume Piave e del Cordevole.

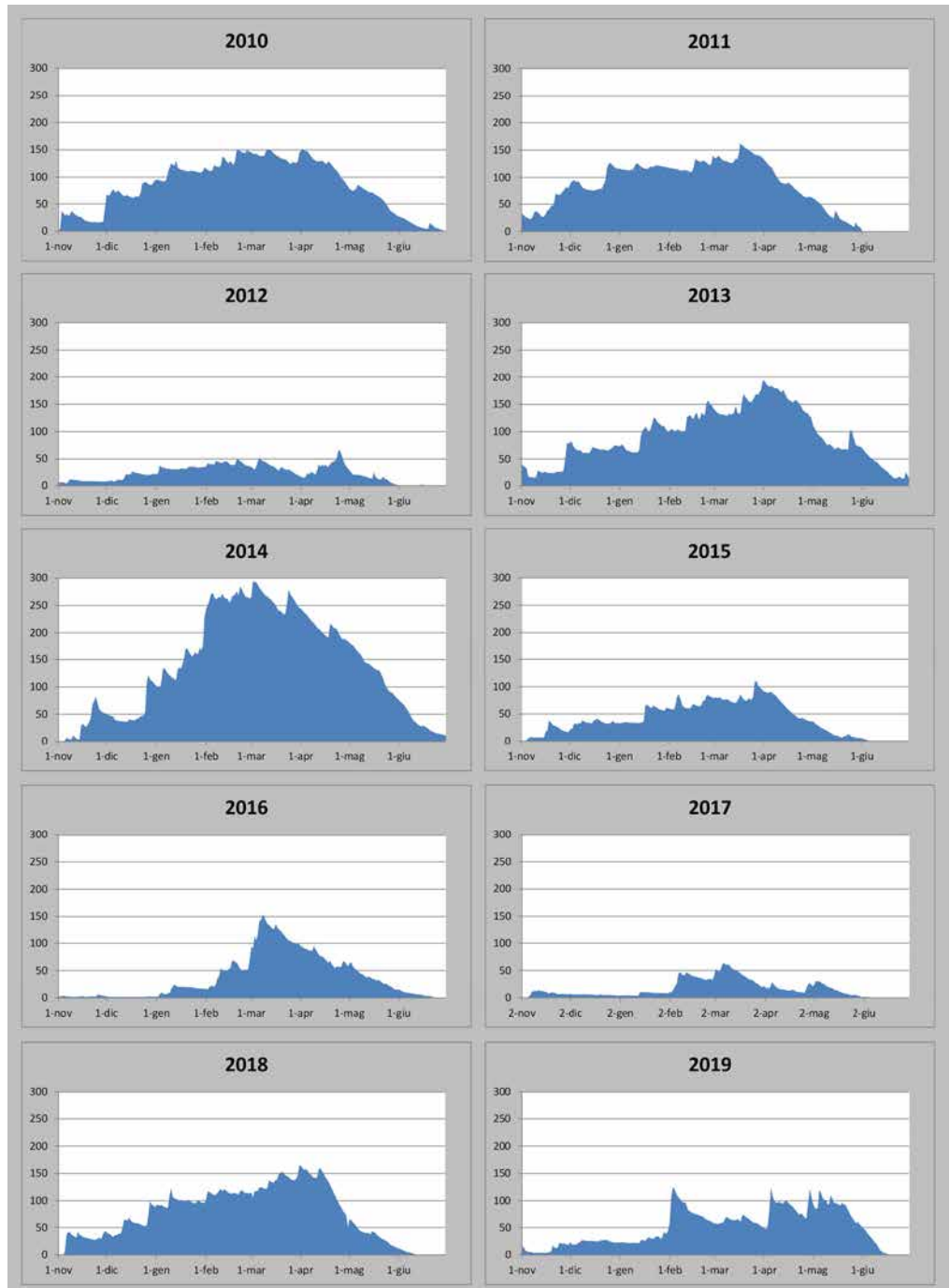


Fig. 3 - Altezza manto nevoso (HS) medio per stagione invernale in cm del bacino del Piave e del Cordevole.

NEVE

Fig. 4 - Andamento della densità del manto nevoso. In ascissa i giorni della stagione invernale da novembre (d=1) a fine maggio (d=212), in ordinate il valore di densità in kgm^{-3} per le 4 diverse tipologie di aggregazione dei dati.

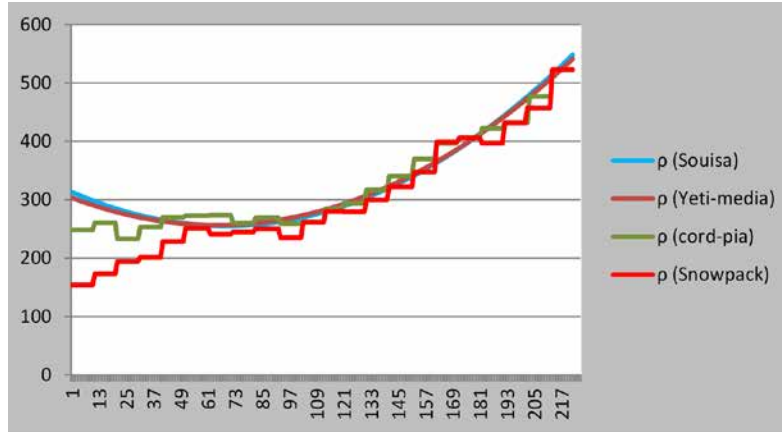
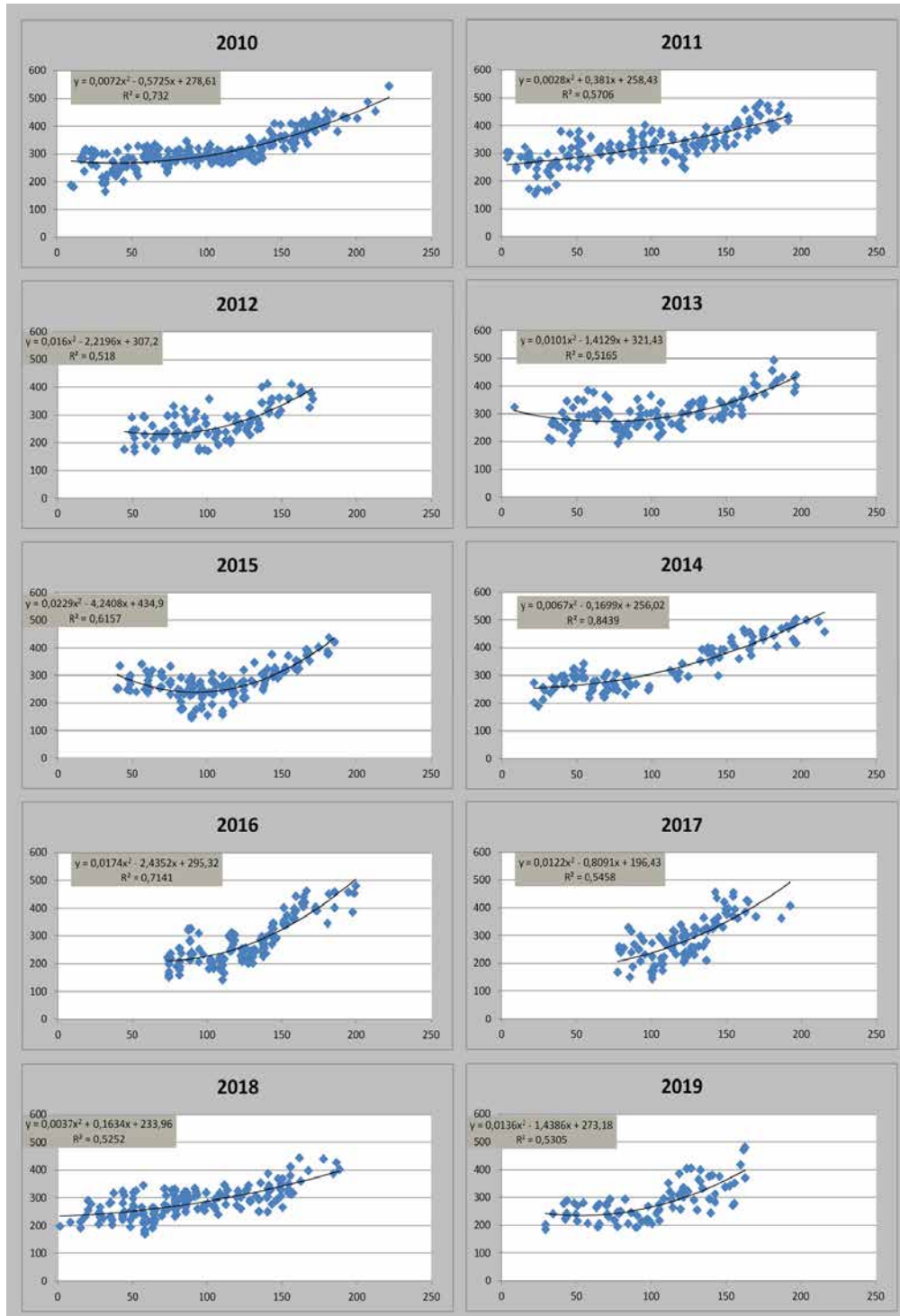


Fig. 5 - Andamento stagionale della densità del manto nevoso in kg m^{-3} .



- densità giornaliera $\rho_{d,yeti}$ del manto nevoso mediata su k giorni (10) per stagione invernale ricavata con l'equazione elaborata con le misure di densità effettuate nel bacino del Piave e del Cordevole fra il 2010 e il 2019 (equazione specifica per stagione invernale);
- densità giornaliera $\rho_{d,cord-pia}$ del manto nevoso mediata su k giorni (10) calcolata come media dei singoli valori di densità delle misure effettuate nel bacino del Piave e Cordevole;
- densità giornaliera $\rho_{d,snowpack}$ del manto nevoso mediata su k giorni (10) del valore di densità del manto nevoso fornite del modello.

In Fig. 4 sono rappresentati i diversi andamento stagionali delle 4 tipologie di dati di densità del manto nevoso. Sono molto simili fra di loro, eccetto nel mese di novembre.

In Fig. 5, la nuvola di misure per stagione invernale con la rispettiva polinomiale di ordine 2, riassunte anche in Tab. II. Dalla nuvola dei dati è stata ricavata anche la densità $\rho_{d,cord-pia}$ integrando le decadi (k=10) senza dati di inizio e fine stagione invernale, con il valore medio del periodo ricavato con i dati delle altre stagioni invernali.

In Fig. 6 sono raffigurati i dati di $\rho_{d,cord-pia}$ e di $\rho_{d,snowpack}$, per le stagioni invernali dal 2015 al 2019 per le quali è possibile effettuare un confronto e quindi una verifica della buona correlazione fra i dati misurati e quelli simulati. I dati simulati consentono di disporre di dati significativi anche ad inizio e fine stagione. In generale, ad inizio stagione i dati di $\rho_{d,snowpack}$ sono più bassi di quelli $\rho_{d,yeti}$ in quanto i primi corrispondenti alla reale neve fresca di inizio stagione mentre i secondi, più elevati, legati alla forma della coda della polinomiale.

I valori di densità disponibili $\rho_{d,souisa}$, $\rho_{d,yeti}$ e $\rho_{d,cord-pia}$ corrispondono a livelli diversi di dettaglio della disponibilità di informazioni sui valori di densità della neve per le Alpi Italiane.

I valori di $\rho_{d,souisa}$ sono disponibili dalla letteratura (Valt et al., 2018; Guyenonn

et al., 2019) per tutte le aree italiane suddivise secondo SOUISA (Marazzi, 2005). I valori $\rho_{d,yeti}$ e $\rho_{d,cord-pia}$ provengono da elaborazioni dei dati di bacino che possono corrispondere anche all'intersezione di 2 o più parti di aree SOUISA con approcci di calcolo diversi. I valori derivati dalle equazioni $\rho_{d,yeti}$ possono essere una buona soluzione per la ricostruzione veloce di data base di riferimento ma mal si adattano alla gestione del tempo reale che necessiterebbe di continue variazioni della equazione durante la stagione invernale, in funzione della disponibilità dei dati. I valori calcolati come $\rho_{d,cord-pia}$ sono una buona soluzione per la gestione del tempo reale e quindi dell'analisi del flusso di dati di densità a disposizione dei servizi valanghe o dei gestori delle reti di monitoraggio. Questi dati, essendo legati ai rilievi in campo, hanno importanti carenze ad inizio e fine stagione e possono rappresentare un limite. I valori di $\rho_{d,snowpack}$, pur simulati, rappresentano una buona soluzione soprattutto per la gestione del tempo reale. Il flusso di dati del modello è generalmente giornaliero o anche a scadenze ancor più ridotte (6 ore) ed è facilmente gestibile.

RISULTATI

È stato determinato l'indice $SSPI_{cord-pia}$ per singola stagione invernale (Fig. 7). Complessivamente in 10 anni sono state 1530 le giornate con l'indice nella media (72 %), 266 giornate con un indice inferiore alla media (13%) e 334 le giornate con un indice superiore (15%) (Tab.III).

Le caratteristiche delle singole stagioni invernali evidenziano gli inverni nevosi del 2011, 2013 e 2014 e quelli con periodi di siccità prolungata come nel 2017 e 2016, rispettivamente con 113 e 92 giornate con l'indice inferiore alla media.

Sulla base dei 10 anni di dati, non emerge alcun periodo con un indice di siccità nivale molto (probabilità dell'evento

inferiore al 4,4%) o notevolmente inferiore (probabilità dell'evento inferiore al 2,3%) alla media (Tab. II).

L'indice del 2011 evidenzia una rapida decrescita nel periodo primaverile rispetto al 2010, pur essendo le 2 stagioni invernali molto simili come innevamento. Infatti, nella seconda decade del mese di marzo, gli spessori di neve al suolo, sono simili nelle 2 annate. L'inizio anticipato dell'ablazione di 15 giorni nel 2011, ha prodotto una diminuzione dell'indice rispetto alla stazionarietà del 2010.

Gli inverni 2012 e 2017, caratterizzati da poca neve, sono anche molto simili come SSPI, come anche le stagioni 2016 e 2018, caratterizzate da un recupero del valore dello SSPI in tarda primavera dopo un inizio siccitoso. Anche la stagione 2013, il cui valore massimo di HS è nei primi giorni di aprile (come il 2010), è caratterizzata da un elevato valore di SSPI in primavera. La stagione 2018, caratterizzata da una accelerata ablazione a partire dalla seconda decade del mese di aprile, evidenzia un abbassamento dell'indice, pur rimanendo "vicino alla media".

A titolo sperimentale è stato determinato $SSPI_{souisa}$ utilizzando 30 anni di dati altezza neve (1990-2019) utilizzando la $\rho_{d,souisa}$. La scelta del lungo periodo di analisi per lo spessore del manto, utilizzando un valore medio di densità uguale per tutte le stagioni invernali, è stata effettuata per poter verificare se gli estremi dello SSPI determinati nel decennio 2010-2019, sono legati alla sola variabilità recente o se hanno una conferma sul lungo periodo. In Tab. IV sono riassunti i risultati. Nelle stagioni 2017 e 2016 sono 52 e 11 le giornate con un indice di molto inferiore alla media, che non risultavano nella variabilità 2010-2019. Questo indica che i 2 inverni hanno avuto periodi con una siccità importante rispetto al lungo periodo, ma più "nella normalità" rispetto al tempo recente.

Gli inverni 2010 e 2016 hanno un numero di giorni con un indice più elevato

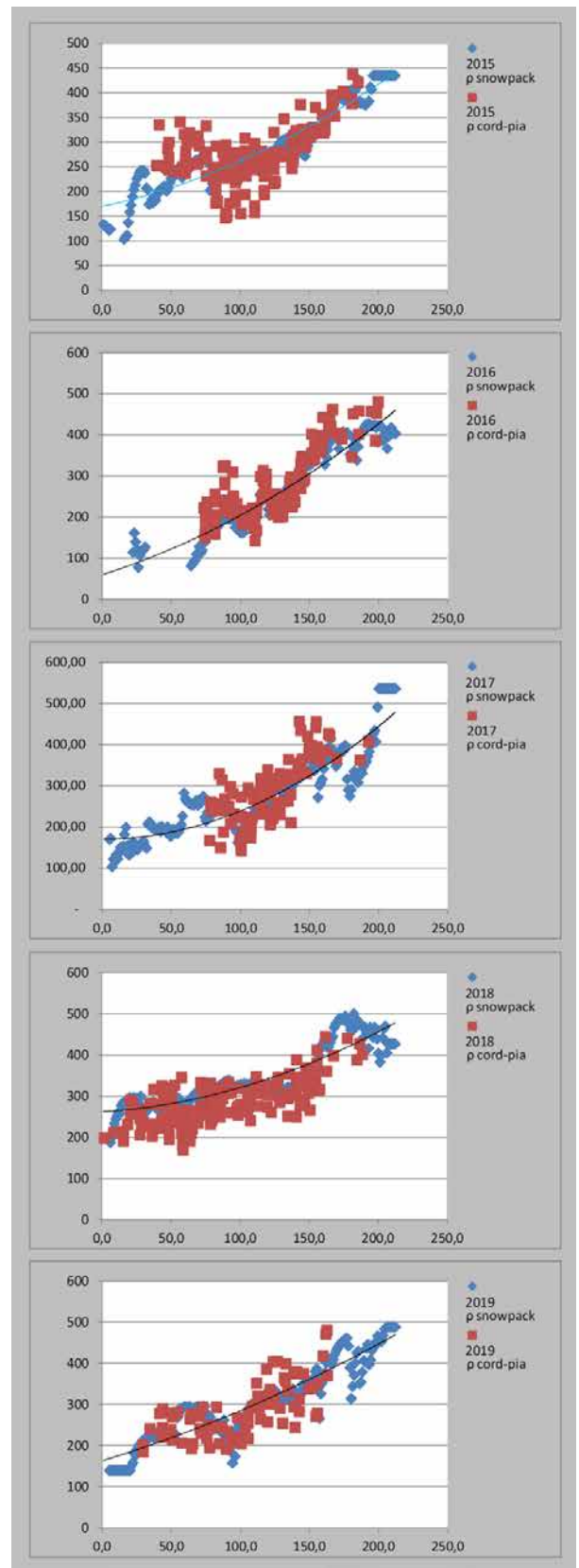


Fig. 6 - Andamento stagionale di $\rho_{d,cord-pia}$ e di $\rho_{d,snowpack}$ per le 5 stagioni invernali considerate.

sul lungo periodo che nel breve. Questo è dovuto alla importante nevosità del 2014 che, nelle elaborazioni del periodo 2010-2019, tende a "comprimere" verso la normalità le giornate che sul lungo periodo sono giudicate con un indice SSPI maggiore.

SNOWPACK

Il Centro Valanghe di Arabba (Arpa Veneto) utilizza le elaborazioni di SnowPack dal 2004 (Lehning et al., 2002) nei processi di previsione valanghe a supporto anche delle attività di Protezione Civile. Fra i parametri di output disponibili c'è anche la densità del manto nevoso, che è stata utilizzata per il tempo reale dello SSPI durante la stagione invernale 2019. Per il periodo 2015-2019, è stato determinato il valore dell'indice $SSPI_{snowpack}$ utilizzando i valori di densità $\rho_{d,snowpack}$. Anche il valore di HS è disponibile nelle simulazioni, ma non è stato utilizzato per diminuire le variabili rispetto al SSPI, $SSPI_{cord-pia}$ e $SSPI_{cord-pia}$.

Lo $SSPI_{snowpack}$ presenta una elevata correlazione, fra 0,89 e 0,99, con lo $SSPI_{cord-pia}$. Solo nella stagione 2015 è inferiore a 0,70 a causa dei valori di densità del manto nevoso sono molto diversi fra $\rho_{d,cord-pia}$ e $\rho_{d,snowpack}$ nel mese di novembre.

CONCLUSIONI

Lo Standardized Snowpack Index (SSPI) può essere determinato per bacino montano disponendo di una serie storica di dati di altezza neve al suolo (HS) e di valori di densità del manto nevoso (ρ_b). I principali servizi valanghe dell'arco alpino italiano dispongono di entrambi le informazioni e quindi è possibile determinare lo SSPI anche con questa metodologia. I vantaggi della metodologia proposta è che può essere adattata a livello di bacino alpino e quindi con una risposta migliore rispetto alla metodologia filandese da telerilevamento con pixel di 10-25 km di lato.

L'utilizzo del flusso dei dati di Snowpack facilita il tempo e la valutazione dello SSPI ad inizio stagione ma soprattutto nella fase dell'ablazione alpine (aprile-giugno) quando il flusso di dati delle misure dirette a terra diminuisce o si interrompe. L'analisi dei dati con serie storiche brevi (10 anni) o lunghe (30 anni) evidenzia caratteristiche di siccità diverse negli anni con scarsa risorsa idrica nivale disponibile. L'anticipo della ablazione di 15

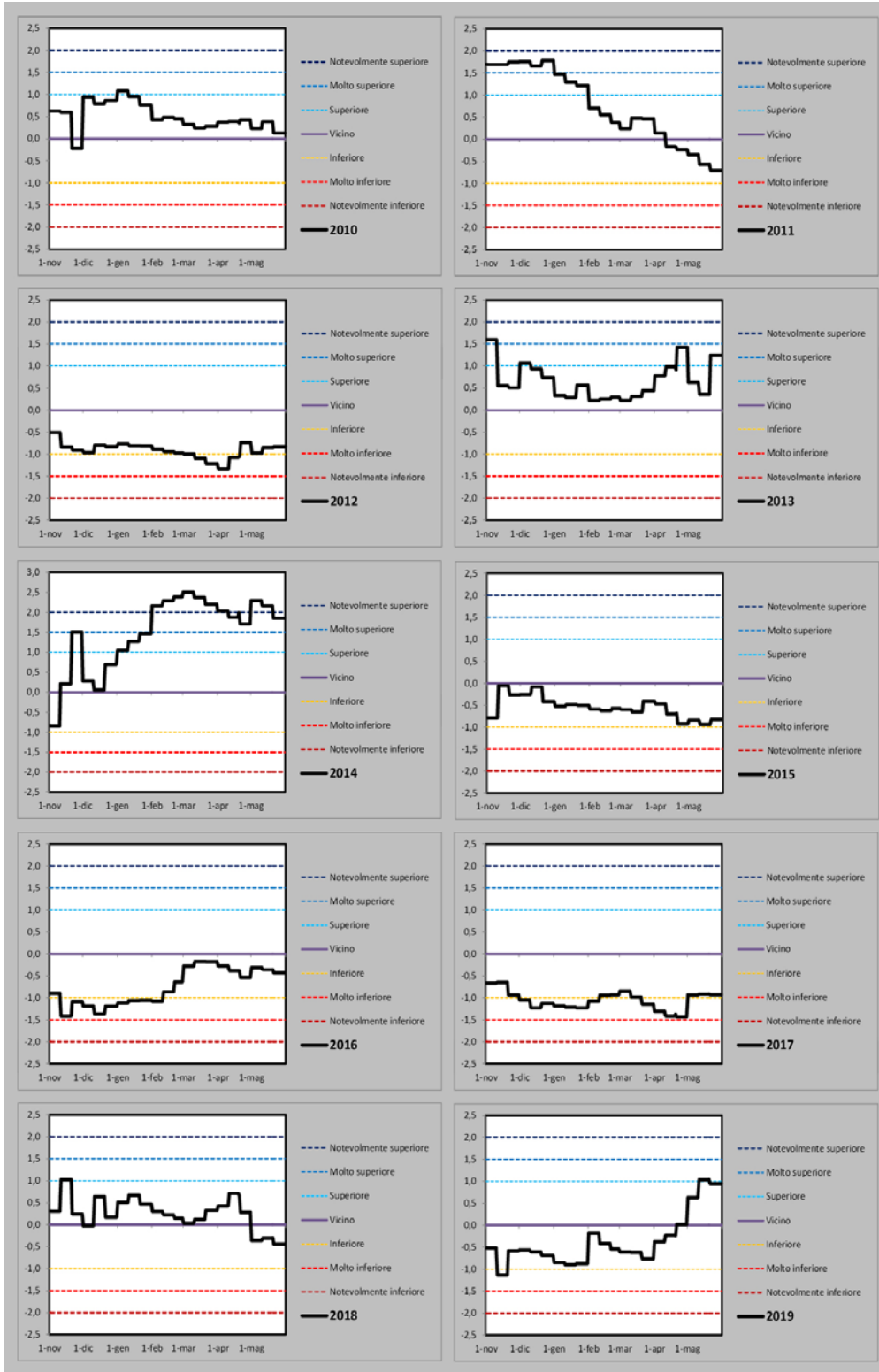


Fig. 7 - Indice SSPI calcolato per il periodo 2010-2019.

SSPI	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
3,00	0	0	0	0	0	89	0	0	0	0
2,00	0	0	0	0	0	41	10	0	61	0
1,50	10	10	0	0	0	31	31	0	31	10
1,00	31	161	0	0	0	41	171	0	69	192
0,00	161	41	99	120	212	10	0	171	51	10
-1,00	10	0	113	92	0	0	0	41	0	0
-1,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 3

© AINEVA

giorni, rispetto alla prima decade di aprile, comporta una diminuzione importante dell'indice per tutta la primavera. Lo sviluppo futuro sarà l'applicazione a livello di arco alpino italiano con serie storiche di 10 e 30 anni e l'analisi comparata con gli output derivati dalla metodologia norvegese (Pulliainen, 2006) e pubblicato sul sito *GlobSnow* (<http://www.globsnow.info/>).

SSPI	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
3,00	0	0	0	0	0	131	0	0	0	0
2,00	0	0	0	0	0	10	31	0	41	10
1,50	21	30	0	0	0	20	49	0	52	28
1,00	40	141	0	31	0	31	132	0	68	164
0,00	110	41	81	89	212	20	0	91	51	10
-1,00	41	0	79	81	0	0	0	121	0	0
-1,50	0	0	52	11	0	0	0	0	0	0
-2,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

© AINEVA

Bibliografia

- Berni A. e Giancanelli E., (1966). La campagna di rilievi nivometrici effettuata dall'ENEL nel periodo febbraio - giugno 1966. *Energia elettrica*, n. 9, 542-533
- Begueria S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B., (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34, 3001- 3023. DOI: 10.1002/joc.3887.
- Bocchiola D. e Rosso R., (2007). The distribution of daily snow water equivalent in the central Italian Alps. *Water Resources*, 30 (2007), 135-147.
- Cagnati A., (1986). La misura di altezza del manto nevoso con il metodo ecometrico. *Neve e valanghe* n. 4, 48-51
- Cagnati A., (2003). Strumenti di misura e metodi di osservazione nivometeorologici: manuale per i rilevatori dei servizi di previsione valanghe. AINEVA, Trento, 133 pp.
- Faergemann H., (2012). Update on water scarcity and droughts indicator development, May 2012, presented at the Water Director's Meeting, 4-5 June 2012, Denmark. Disponibile su CIRCABC della Commissione Europea all'indirizzo: [https://circabc.europa.eu/sd/d/4d22ad88-707e-4856-af63-253353c7eed8/1_Update on Water Scarcity and Droughts indicator development May 2012.doc](https://circabc.europa.eu/sd/d/4d22ad88-707e-4856-af63-253353c7eed8/1_Update%20on%20Water%20Scarcity%20and%20Droughts%20indicator%20development%20May%202012.doc).
- Gobron N., Pinty B., Verstraete M.M., Widlowski J.-L., (2000). Advanced Vegetation Indices Optimized for Up-Coming Sensors: Design, Performance and Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 2489-2505.
- Guyennon N., Valt M., Salerno F., Petrangeli A.B. e Romano E. (2019). Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Italian Alps , *Cold Regions Science and Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102859>
- Jonas T., Marty C., e Magnusson J., (2009). Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the swiss alps. *J. Hydrol.* 378, 161-167.
- Lehning M., Bartelt P.B., Brown R.L., Fierz C., Satyawali P. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss Avalanche Warning Services. Part II: Snow Microstructure, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 35/3, 147-167
- Marazzi, S. (2005). Atlante orografico delle Alpi: SOIUSA: suddivisione orografica internazionale unificata del sistema alpino. Priuli & Verlucca
- Mariani S., Braca G., Romano E., Lastoria B., BUsetini M. (2018). Linee Guida sugli indicatori di Siccità e Scarsità idrica da utilizzare nelle attività degli osservatori Distrettuali per l'Uso della Risorsa Idrica. Draft , 58 pp
- McKee T.B., Doesken N.J., e Kleist, J., (1993). The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, January 17-23, 1993, Anaheim CA, pp. 179-186.
- Gazzolo T., Pinna M., (1973). La nevosità in Italia nel Quarantennio 1921-1960 (gelo, neve e manto nevoso). Ministero dei Lavori Pubblici, Consiglio Superiore, Servizio Idrografico. Pubblicazione n. 26 del Servizio. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma, 216 pp.
- Pistocchi A., (2016). Simple estimation of snow density in an Alpine region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 6, 82-89.
- Pistocchi A., Bagli S., Callegari M., Notarnicola C. e Mazzoli P., (2017). On the Direct Calculation of Snow Water Balances Using Snow Cover Information , *Water*, 2017,9,848: doi:10.3390/w9110848
- Pulliainen, J., (2006) . Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, vol. 101, pp. 257-269.
- Romano E., Del Bon A., Petrangeli A.B., e Preziosi E., (2013). Generating synthetic time series of springs discharge in relation to standardized precipitation indices. Case study in Central Italy. *Journal of Hydrology*, 507, 86-99. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.020.
- Shukla S., Wood A.W., (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35, L02405. DOI: 10.1029/2007GL032487.
- TYPSA, (2013). Service contract for the support to the follow-up of the Communication on Water scarcity and Droughts. *Water Scarcity&Drought Indicators' Fact Sheets*.
- Sturm M., Taras B., Liston G.E., Derksen C., Jona, T., and J. Lea, (2010). Estimating Snow Water Equivalent Using Snow Depth Data and Climate Classes. *J. Hydrometeorol.* 11, 1380-1394, <http://dx.doi.org/10.1175/2010JHM1202.1>
- Valt, M., Chiambretti, I., e Dellavedova, P., (2012). YETI - a software to service the avalanche forecaster: Proceedings of Advances in Avalanche Forecasting - Section 2 New approaches and tools for avalanche forecasting, Podbanské, Slovakia, 22nd Oct. 2012, Eds. Richnavsky, J., Biskupic, M., and Kyzek, F., p. 38-43.
- Valt M., Romano E. e Guyennon N., (2018). Snowcover density and Snow Water Equivalent in the Italian Alps. Proceedings, International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, 2018, 452-456
- Valt M. e Moro D. (2009). Average snowcover density in eastern Alps Mountain. *Geophysical Research Abstract- Vol. 11, EGU 2009-5289-2009*
- Vicente-Serrano S.M., López-Moreno J.I., Begueria S., Lorenzo-Lacruz J., Azorin-Molina C., Morán-Tejeda, E., (2012). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2) , 318-332. DOI: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000433.
- World Meteorological Organization (2012). Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M., Hayes, M., Wood, D.). WMO-No. 1090, Geneva.
- World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP). (2016). Handbook of Drought Indicators and Indices. (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva. ISBN 978-92-63-11173-9.