

e Neve Valanghe

n° 83 - dicembre 2014

*Meteorologia alpina,
Glaciologia, Prevenzione
Sicurezza in montagna*



Mappe neve del Trentino con CRIOPAT

**Modellazione della dinamica
dei manti nevosi**

**Realizzazione di mappe di
innevamento con SnowMaps**

**Monitoraggio dell'equivalente
in acqua della neve con dati MODIS**

Il Mountain Risk Research Team



**Indirizzi e numeri telefonici
dei Servizi Valanghe AINEVA
dell'Arco Alpino Italiano**

REGIONE PIEMONTE

ARPA Piemonte
Dipartimento Sistemi Previsionali
Via Pio VII 9 - 10135 Torino
Tel. 011 19681340 - fax 011 19681341
<http://www.arpa.piemonte.it>
e-mail: sistemi.previsionali@arpa.piemonte.it

REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA

Assessorato Opere pubbliche, difesa
del suolo e edilizia residenziale pubblica
Direzione assetto idrogeologico dei bilanci montani
Ufficio neve e valanghe
Loc. Amérique 33/A - 11020 Quart (AO)
Tel. 0165 776600/1 - fax 0165 776804
Bollettino Nivometeorologico
Tel. 0165 776300
<http://www.regione.vda.it>
e-mail: u-valanghe@regione.vda.it

REGIONE LOMBARDIA

ARPA Lombardia
Settore Tutela delle Risorse e Rischii Naturali
U.O. Centro Nivometeorologico
Via Monte Confinale 9 - 23032 Bormio (SO)
Tel. 0342 914400 - Fax 0342 905133
Bollettino Nivometeorologico
Risponditore telefonico e
fax on demand 02 69666554
<http://www.arpalombardia.it/meteo>
e-mail: nivometeo@arpalombardia.it

PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO

Servizio prevenzione rischi
Ufficio previsioni e pianificazione
Via Vannetti 41 - 38122 Trento
Tel. 0461 494870 - Fax 0461 238305
Bollettino Nivometeorologico
Tel. 0461 238939
Self-fax 0461 237089
<http://www.meteotrentino.it>
e-mail: ufficio.previsioni@provincia.tn.it

PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO

Ufficio Idrografico, Servizio Prevenzione
Valanghe e Servizio Meteorologico
Viale Druso, 116 - 39100 Bolzano
Tel. 0471 416140 - Fax 0471 416159
Bollettino Nivometeorologico
Tel. 0471 270555
Tel. 0471 271177 anche self fax
<http://www.provincia.bz.it/valanghe>
e-mail: Hydro@provincia.bz.it

REGIONE DEL VENETO

ARPA-Veneto Centro Valanghe di Arabba
Via Pradat 5 - 32020 Arabba (BL)
Tel. 0436 755711 - Fax 0436 79319
Bollettino Nivometeorologico
Tel. 049 8239399
<http://www.arpa.veneto.it>
e-mail: cva@arpa.veneto.it

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA

Direzione centrale risorse rurali, agroalimentari e forestali
Servizio del Corpo forestale regionale
Settore neve e valanghe
Via Sabbadini 31 - 33100 Udine
Tel. 0432 555877 - Fax 0432 485782
Bollettino Nivometeorologico
NUMERO VERDE 800860377 (in voce e self fax)
<http://www.regione.fvg.it/asp/newvalanghe/welcome.asp>
e-mail: neve.valanghe@regione.fvg.it

REGIONE MARCHE

Dipartimento per le Politiche Integrate
di Sicurezza e Protezione Civile
Centro Funzionale Multirischi
per la Meteorologia e l'Idrologia
Via del Colle Ameno, 5 - 60126 Ancona
Tel. 071 8067743 - Fax 071 8067709
<http://protezionecivile.regione.marche.it>
e-mail: centrofunzionale@regione.marche.it

Sede AINEVA

Vicolo dell'Adige, 18
38122 Trento
Tel. 0461 230305 - Fax 0461 232225
<http://www.aineva.it>
e-mail: aineva@aineva.it

Gli utenti di "NEVE E VALANGHE":

- Sindaci dei Comuni Montani
- Comunità Montane
- Commissioni Locali Valanghe
- Prefetture montane
- Amministrazioni Province Montane
- Genii Civili
- Servizi Provinciali Agricoltura e Foreste
- Assessorati Reg./Provinciali Turismo
- APT delle località montane
- Sedi Regionali U.S.T.I.F.
- Sedi Provinciali A.N.A.S.
- Ministero della Protezione Civile
- Direzioni dei Parchi Nazionali
- Stazioni Sciistiche
- Scuole di Sci
- Club Alpino Italiano
- Scuole di Scialpinismo del CAI
- Delegazioni del Soccorso Alpino del CAI
- Collegi delle Guide Alpine
- Rilevatori di dati nivometeorologici
- Biblioteche Facoltà Univ. del settore
- Ordini professionali del settore
- Professionisti del settore italiani e stranieri
- Enti addetti ai bacini idroelettrici
- Redazioni di massmedia specializzati
- Aziende addette a: produzione della neve, sicurezza piste e impianti, costruzione attrezzature per il soccorso, operanti nel campo della protezione e prevenzione delle valanghe.



Periodico associato all'USPI
Unione Stampa Periodica Italiana

Rivista dell'AINEVA - ISSN 1120 - 0642
Aut. Trib. di Rovereto (TN)
N° 195/94NC
del 28/09/1994
Sped in abb. postale Gr. IV - 50%
Abbonamento annuo 2014: Euro 18,00
da versare sul c/c postale n. 14595383
intestato a: AINEVA
Vicolo dell'Adige, 18 - 38122 Trento

Direttore Responsabile

Anselmo CAGNATI
ARPA Veneto
Coordinamento redazionale:
ARPA Lombardia e ARPA Veneto

Comitato di redazione:

Luciano LIZZERO, Maria Cristina PROLA,
Mauro VALT, Giovanna BURELLI,
Elena BARBERA, Walter BEOZZO,
Stefano SOFIA, Alfredo PRAOLINI,
Fabio GHESER

Comitato scientifico editoriale:

Valerio SEGOR,
Alberto TRENTI, Secondo BARBERO,
Francesco SOMMAVILLA,
Daniele MORO, Maurizio FERRETTI,
Michela MUNARI, Giovanni PERETTI

Segreteria di Redazione:

Vicolo dell'Adige, 18
38122 TRENTO
Tel. 0461/230305
Fax 0461/232225

Videoimpaginazione e grafica:

MOTTARELLA STUDIO GRAFICO
www.mottarella.com
Cosio Valtellino (SO)

Stampa:

LITOTIPOGRAFIA ALCIONE srl
Lavis (TN)

Referenze fotografiche:

Foto di copertina: Robert-Luciani Thierry

Lodovico Mottarella: 11
Roberto Bortoli: 2
A2A Impianti Idroelettrici: 13
ARPA Veneto: 21
Mauro Valt: 29, 30, 33, 34, 35
MRR Team: 37, 38, 39 tutte, 40 tutte, 41,
42 tutte
Mariano Tais: 47, 48, 49 tutte

**Hanno collaborato
a questo numero:**

Serena Mottarella, Stefania Del Barba,
Nadia Pregonella, Monica Rossi,
Igor Chiambretti, Enrico Filaferrò.

Gli articoli e le note firmate esprimono
l'opinione dell'Autore e non impegnano
l'AINEVA.

I dati forniti dagli abbonati e dagli inserzionisti
vengono utilizzati esclusivamente per l'invio della
presente pubblicazione (D.Lgs.30.06.2003 n.196).



4



20



28



36



12

4
**MAPPE NEVE DEL TRENTO
CON CRIOPAT**

■ L. Bruzzone, C. Marin, M. Santoni, F. Bovolo,
A. Trenti, W. Beozzo

12
**MODELLAZIONE DELLA DINAMICA
DEI MANTI NEVOSI IN ALTA VALTELLINA**

■ F. Avanzi, C. De Michele, A. Ghezzi, F. Bondiolotti,
G. Della Vedova

20
**SNOWMAPS: REALIZZAZIONE DI MAPPE
DI INNEVAMENTO A SUPPORTO DELLA
PREVISIONE VALANGHE**

■ M. Dall'Amico, F. Zambon, A. Cagnati, A. Crepez,
S. Endrizzi

28
**MONITORAGGIO DELL'EQUIVALENTE
IN ACQUA DELLA NEVE DA DATI MODIS:
IL CASO STUDIO DELL'ALTO PIAVE
(ALPI ITALIANE ORIENTALI)**

■ P. Cianfarra, M. Valt

36
IL MOUNTAIN RISK RESEARCH TEAM

■ B. Frigo, B. Chiaia, V. De Biagi, L. Dublanc,
M. Freppaz, D. Godone, M. Maggioni, D. Viglietti,
E. Ceaglio, P. Dellavedova, D. Franco, A. Godio,
H. Grosjacques, A. Prola, F. Torretta, A. Welf, D. Tosi



Questo numero di Neve e Valanghe è in gran parte dedicato ad illustrare alcuni metodi utilizzati operativamente in Italia per valutare la copertura nevosa e le sue dinamiche evolutive.

Le condizioni di innevamento sul territorio vengono generalmente monitorate dai Servizi valanghe attraverso i dati raccolti dalle reti di stazioni nivometeorologiche. Sia le stazioni tradizionali, sia le stazioni automatiche forniscono tuttavia dati puntuali di altezza del manto nevoso che devono poi essere estrapolati su aree più o meno vaste a seconda della loro rappresentatività. Questa operazione è spesso complicata in quanto vi sono molti fattori che incidono sulla distribuzione ed evoluzione del manto nevoso quali l'orografia, il contorno apparente, la quota, la presenza e la tipologia di vegetazione ecc. Per ovviare a queste difficoltà oggi è possibile utilizzare operativamente metodologie che consentono di derivare direttamente o simulare la presenza e la distribuzione del manto nevoso. In questo numero di Neve e Valanghe vengono presentate due diverse esperienze (una realizzata in Trentino e una in Veneto) mediante le quali, sulla base dei dati acquisiti dal sensore satellitare MODIS, è possibile generare operativamente mappe di copertura nevosa che possono essere utilizzate anche per la stima della risorsa idrica. In un altro articolo viene invece illustrato un approccio diverso, fisicamente basato, che permette di stimare, in modo spazializzato e sulla base della rete di nivometri e di dati meteorologici acquisiti dalle stazioni a terra, l'altezza della neve e l'equivalente in acqua della neve.

Un ulteriore problema affrontato in questo numero con il contributo del Politecnico di Milano, riguarda lo studio delle dinamiche di accumulo e fusione del manto nevoso in funzione delle forzanti climatiche, in considerazione del fatto che la fusione del manto nevoso stagionale è una componente rilevante del bilancio idrologico dei bacini montani.

Infine, viene presentata una interessante Unità di Ricerca multidisciplinare nata in Valle d'Aosta con l'obiettivo di monitorare e studiare le valanghe di neve umida, tra cui anche le valanghe da slittamento che con sempre maggior frequenza caratterizzano gli inverni delle Alpi.

Anselmo Cagnati
Direttore Responsabile

Generazione automatica
e analisi di dati e statistiche
sulla copertura nevosa mediante
immagini multi spettrali telerilevate

MAPPE NEVE DEL TRENTINO con CRIOPAT

**Lorenzo Bruzzone,
Carlo Marin,**

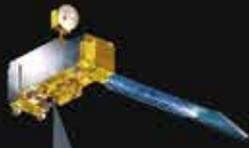
Massimo Santoni
Università degli Studi di Trento,
Dipartimento di Ingegneria e
Scienza dell'Informazione, Trento

Francesca Bovolo
FBK, Center for Information
Technology, Povo TN

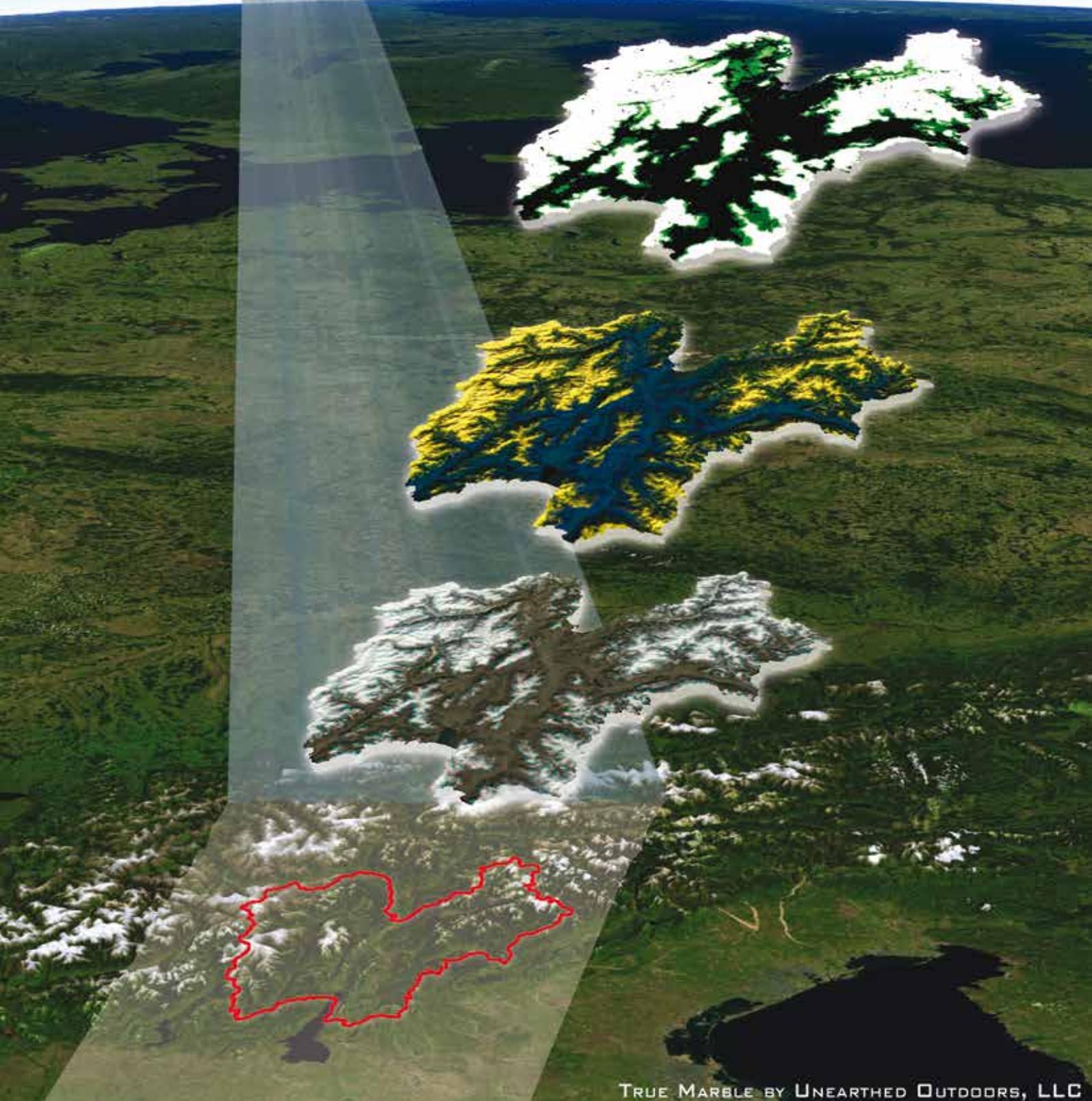
**Alberto Trenti,
Walter Beozzo**

Provincia Autonoma di Trento,
Ufficio Previsioni e Pianificazione, Trento
walter.beozzo@provincia.tn.it

Questo articolo presenta il progetto CRIOPAT nato dalla collaborazione tra l'Ufficio Previsioni e Pianificazione della Provincia Autonoma di Trento e il laboratorio di telerilevamento del Dipartimento di Ingegneria e Scienze dell'Informazione dell'Università di Trento. CRIOPAT è un sistema di analisi integrato in grado di estrarre automaticamente, con cadenza giornaliera, informazioni rilevanti sulla copertura nevosa del territorio trentino da immagini satellitari. In particolare il sistema è in grado di accedere automaticamente ai dati acquisiti dal sensore MODIS della NASA e generare mappe di copertura nevosa, mappe di persistenza nevosa e statistiche sui trend di evoluzione della copertura nevosa e sui limiti altitudinali di presenza neve del territorio trentino. Tali dati sono accessibili dagli utenti mediante intuitive interfacce web che permettono ad utenti autenticati di effettuare analisi personalizzate sui trend di evoluzione del manto nevoso per aree nivologicamente omogenee. I risultati ottenuti analizzando le immagini telerilevate a partire da febbraio del 2000 sono risultati coerenti con i dati storici in possesso dell'ufficio previsioni e pianificazione evidenziando la bontà del sistema CRIOPAT a livello operativo.



CRIOPAT



INTRODUZIONE

In Trentino i primi dati disponibili sulle osservazioni nivologiche risalgono al periodo austro-ungarico terminato con la fine della Grande guerra (novembre 1918) e l'annessione del Südtirol all'Italia. Gli uffici del Servizio Idrografico e Mareografico Italiano costituito nel 1917 hanno poi raccolto osservazioni meteorologiche e idrologiche giornalmente alle ore 9.00 in luoghi appositamente attrezzati. I parametri rilevati vanno dalla semplice constatazione della giornata nevosa alla misurazione dello spessore del manto nevoso o della neve fresca caduta al suolo. L'attenzione sui cambiamenti climatici in atto ha rinnovato l'interesse sulle serie storiche nivometriche sebbene si siano dimostrate non omogenee, discontinue e spesso mancanti delle informazioni sulle tecniche e l'ubicazione precisa delle misurazioni. Pertanto i dati disponibili risultano difficilmente spazializzabili. Negli ultimi anni lo sviluppo dei sistemi satellitari per il telerilevamento ha permesso l'acquisizione regolare di informazioni spazialmente distribuite su ampi territori. Da tali dati è possibile estrarre importanti informazioni ambientali riguardanti il nostro Pianeta mediante tecniche automatiche di elaborazione di immagini.

L'Ufficio Studi e Pianificazione della Provincia Autonoma di Trento ha voluto puntare sullo sfruttamento di queste tecnolo-

gie satellitari e sulle capacità scientifiche di Remote Sensing Laboratory (RSLab) del Dipartimento di Ingegneria e Scienza dell'Informazione (DISI) dell'Università degli Studi di Trento per ottenere delle mappe di copertura nevosa dell'intera area del Trentino a cadenza giornaliera e con una risoluzione spaziale il più possibile dettagliata. È nato così il progetto CRIOPAT il cui scopo è stato quello di creare una serie storica di immagini del Trentino che documentino l'evoluzione stagionale della copertura nevosa, in modo da superare i limiti del monitoraggio puntuale e creare i presupposti per studiare l'effetto del riscaldamento del pianeta sulla copertura nevosa del Trentino.

L'ARCHITETTURA DI CRIOPAT

Il vincolo stringente di produrre dati con cadenza giornaliera, ha condizionato fortemente la scelta della tipologia di immagini satellitari da impiegare nel progetto. Le immagini satellitari ritenute più appropriate per perseguire l'obiettivo dato sono state quelle del sensore MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) montato a bordo di due satelliti della NASA (National Aeronautics and Space Administration): *Terra e Aqua*.

La sequenza di immagini disponibile parte dal 25 febbraio 2000, data della prima acquisizione utile del sensore Terra.

Le orbite dei due satelliti sono state calcolate in modo tale che il primo attraversa il piano equatoriale alle 10.30 in direzione nord-sud, mentre il secondo lo attraversa alle 13.30 in direzione opposta. In questo modo si ottimizza la copertura del pianeta Terra. I due sensori MODIS acquisiscono entrambi in 36 bande spettrali (Tabella 1) con risoluzioni spaziali differenti. Come è possibile notare dalla Tabella 1 le prime due bande hanno una risoluzione geometrica di 250 m, cinque hanno risoluzione di 500 m e le restanti bande hanno risoluzione di 1000 m. Al fine di sfruttare il più possibile l'informazione spettrale mantenendo allo stesso tempo una risoluzione di 250 m, le cinque bande a 500 metri sono state riportate ad una risoluzione di 250 m mediante una tecnica avanzata di super-risoluzione, che verrà descritta nel seguito dell'articolo, generando così un'immagine multispettrale composta da 7 bande. La scarsa risoluzione delle bande a 1000 m ha invece pregiudicato l'utilizzo di queste ai fini del progetto. Queste scelte consentono al sistema CRIOPAT di generare dati giornalieri con una risoluzione spaziale di 250 m.

Il flusso dei dati per la generazione delle sequenze storiche di mappe di copertura nevosa è rappresentato in Figura 1. I dati vengono scaricati dal servizio Lance di NASA (<https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data>) mediante uno script automatico che seleziona tra tutte le immagini acquisite da MODIS quelle relative al territorio trentino. Tali immagini sono in proiezione sinusoidale e vengono riproiettate nel sistema UTM-WGS84. Successivamente vengono elaborate al fine di ottenere un'immagine multispettrale a 7 bande con risoluzione di 250 m. Il dato così ottenuto viene elaborato al fine di generare: i) mappe giornaliere di copertura nevosa; ii) mappe di persistenza mensile della neve al suolo; iii) statistiche sui trend di evoluzione della copertura nevosa e sui limiti altitudinali di presenza neve; iv) composizioni giornaliere in vero colore; e v) composizioni giornaliere in falsi colori che facilitano l'analisi delle informazioni contenute nelle differenti

Tab. 1 - Lunghezze d'onda e risoluzioni geometriche delle bande spettrali del sensore MODIS.

N°	LUNGHEZZA D'ONDA	RISOLUZIONE SPAZIALE	N°	LUNGHEZZA D'ONDA	RISOLUZIONE SPAZIALE
1	620-670 nm	250 m	19	915-965 nm	1000 m
2	841-876 nm	250 m	20	3.660-3.840 nm	1000 m
3	459-479 nm	500 m	21	3.929-3.989 nm	1000 m
4	545-565 nm	500 m	22	3.929-3.989 nm	1000 m
5	1230-1250 nm	500 m	23	4.020-4.080 nm	1000 m
6	1628-1652 nm	500 m	24	4.433-4.498 nm	1000 m
7	2105-2155 nm	500 m	25	4.482-4.549 nm	1000 m
8	405-420 nm	1000 m	26	1.360-1.390 nm	1000 m
9	438-448 nm	1000 m	27	6.535-6.895 nm	1000 m
10	483-493 nm	1000 m	28	7.175-7.475 nm	1000 m
11	526-536 nm	1000 m	29	8.400-8.700 nm	1000 m
12	546-556 nm	1000 m	30	9.580-9.880 nm	1000 m
13	662-672 nm	1000 m	31	10.780-11.280 nm	1000 m
14	673-683 nm	1000 m	32	11.770-12.270 nm	1000 m
15	743-753 nm	1000 m	33	13.185-13.485 nm	1000 m
16	862-877 nm	1000 m	34	13.485-13.785 nm	1000 m
17	890-920 nm	1000 m	35	13.785-14.085 nm	1000 m
18	931-941 nm	1000 m	36	14.085-14.385 nm	1000 m

© AINEVA

bande spettrali. Al fine di rendere fruibili tali prodotti in maniera semplice ed efficace i dati vengono resi disponibili sia in un database direttamente accessibile sia tramite delle intuitive e dedicate interfacce web che permettono di eseguire delle interrogazioni personalizzate dei dati statistici. Nel seguito ogni prodotto verrà descritto nel dettaglio.

Generazione mappe di copertura nevosa

L'articolato algoritmo per generare un'immagine multispettrale costituita da 7 bande a 250 m di risoluzione rappresenta uno dei punti principali del processo. L'originalità del procedimento è data dal fatto che le metodologie standard di fusione multirisoluzione prevedono che l'immagine ad elevata risoluzione utilizzata nella fusione sia acquisita su un insieme di lunghezze d'onda ampio capace di includere quello su cui sono acquisite quelle a bassa risoluzione. Tuttavia questa ipotesi non è verificata nel caso dei dati MODIS, dove le bande a 500 m (da 3 a 7 della Tabella 1) sono acquisite in lunghezze d'onda del tutto diverse e complementari a quelle in cui sono acquisite le immagini a 250 m (1 e 2 della Tabella 1). Pertanto è stata ottimizzata una tecnica nota in letteratura come Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures (ARSIS) (Sirguy et al., 2007). ARSIS estrae, mediante trasformata di Wavelet, i dettagli geometrici (O-orizzontale; V-verticale; D-diagonale) dall'immagine a maggior risoluzione (I_{250}) e li inietta in quella a minor risoluzione (I_{500}), tramite un modello statistico supposto lineare i cui parametri sono stimati mediante l'uso delle corrispondenti sotto bande di dettaglio a 1000 m di risoluzione (si veda Figura 3). Dalle 7 immagini spettrali a 250 m di risoluzione tramite un classificatore supervisionato binario di tipo Support Vector Machine (SVM) (Melgani and Bruzzone, 2004) e l'ausilio di dati ancillari quali altitudine, pendenza, esposizione e degli indici spettrali NDSI (Normalized Difference Snow Index) e NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) è stato pos-

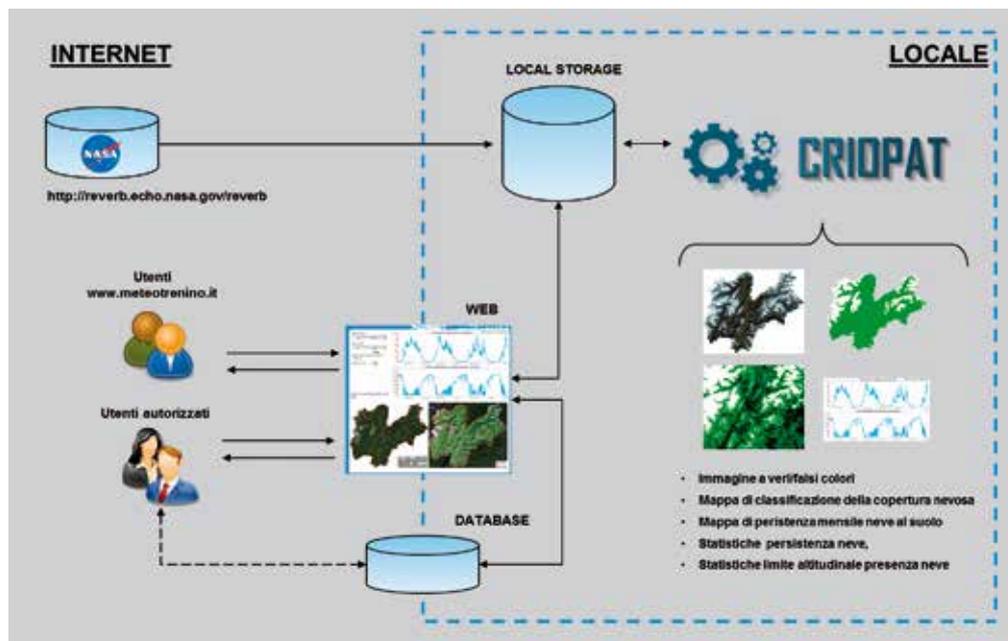


Fig. 1 - Architettura del sistema CRIOPAT.

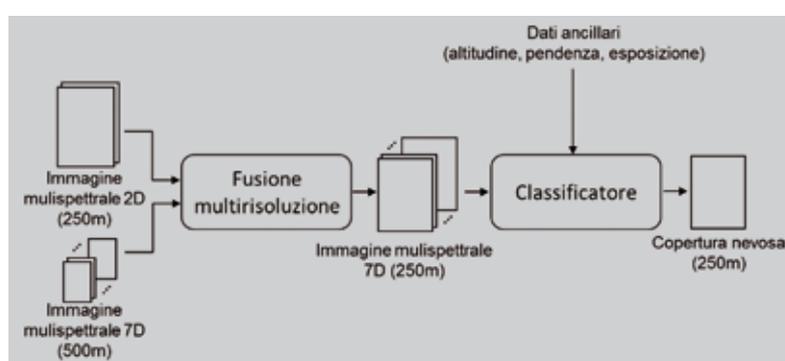


Fig. 2 - Schema a blocchi del processo di generazione delle mappe di copertura nevosa.

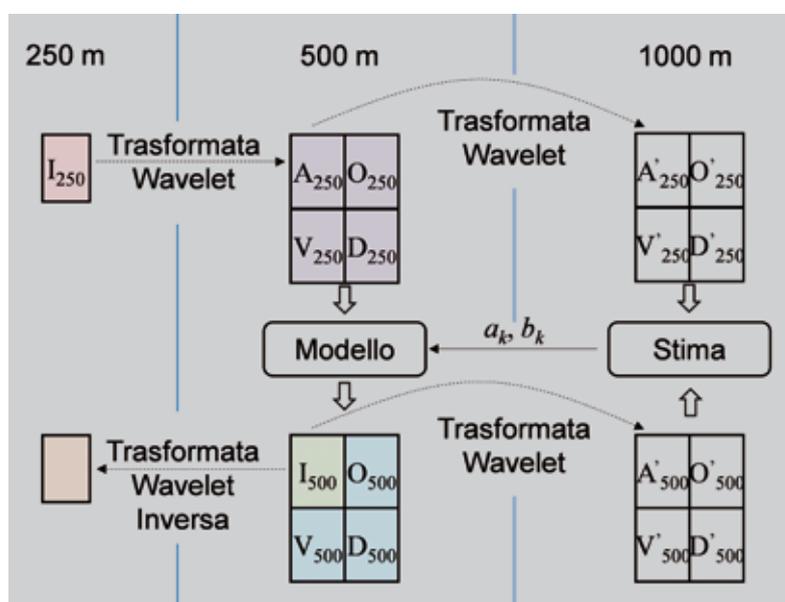


Fig. 3 - Schema a blocchi del metodo di fusione multirisoluzione sviluppato (ARSIS).

sibile calcolare le immagini di copertura nevosa caratterizzate da tre classi: "neve", "non neve" e "nuvole". In particolare, le informazioni di altitudine, esposizione e pendenza sono state ottenute dal LIDAR acquisito nel volo 2006 - 2007 della Provincia di Trento e dal dato SRTM (Shuttle

Radar Topography Mission) versione 4.1 riportato ad una risoluzione di 250 m. L'indice di neve normalizzato NDSI (utile per distinguere la classe "neve" dalla classe "nuvole") e l'indice di vegetazione normalizzato NDVI (utile per distinguere tra la classe "neve" e la classe "non neve")

sono stati calcolati come segue:

$$NDSI = \frac{\text{banda 4} - \text{banda 6}}{\text{banda 4} + \text{banda 6}}$$

$$NDVI = \frac{\text{banda 2} - \text{banda 1}}{\text{banda 2} + \text{banda 1}}$$

Poiché il classificatore utilizzato è di tipo supervisionato, esso necessita di essere allenato sulla base di informazione a priori nella fase di progettazione del sistema. A tal fine sono stati definiti dei campioni di *training* per le classi di interesse ovvero degli esempi da cui il classificatore potesse imparare a riconoscere le classi "neve", "non neve" e "nuvole". Considerato che il sistema elabora immagini acquisite durante tutto l'anno, sono stati creati due set di campioni di *training*: uno per l'inverno (dal 1° novembre al 30 aprile) e uno per l'estate (dal 1° maggio al 31 ottobre) con lo scopo di aumentare l'accuratezza della classificazione.

Particolare attenzione è stata dedicata al problema legato alla mappatura della neve in ombra (neve non direttamente

illuminata dal sole nel momento dell'acquisizione). I pixel associati a neve in ombra, pur essendo parte della classe "neve", presentano caratteristiche radiometriche diverse dai pixel di neve non in ombra. Questa problematica è particolarmente rilevante per aree come quella del Trentino dove le montagne e la topografia irregolare comportano la presenza di varie zone d'ombra anche nelle immagini satellitari alla risoluzione geometrica di quelle acquisite da MODIS. Per questo motivo sia nella scelta delle informazioni fornite in ingresso al classificatore sia nella scelta dei campioni di training è stata dedicata particolare attenzione alla modellazione di entrambe le sotto-classi legate alla neve: "neve in ombra" e "neve esposta alla radiazione solare". A questo proposito i dati ancillari legati al modello digitale del terreno giocano un ruolo molto importante.

Le mappe di copertura nevosa prodotte riportano in colore bianco le zone in cui è stata identificata la presenza di neve e in grigio quelle in cui è stata rilevata la copertura nuvolosa. Tutto ciò che non appartiene a una di queste due classi è stato lasciato trasparente.

Infine la mappa ottenuta è stata sovrapposta ad una rappresentazione pittorica del Trentino per migliorare l'impatto visivo e favorire l'interpretazione del risultato da parte degli utenti.

La validazione delle mappe di classificazione generate dal sistema è stata fatta sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo. Dal punto di vista qualitativo le mappe ottenute con il sistema automatico sviluppato sono state confrontate visiva-

mente con le immagini MODIS alla risoluzione di 250 m. L'analisi ha dimostrato che le mappe sono conformi a quanto si percepisce osservando le immagini telerilevate. Per poter effettuare la validazione quantitativa, è stato necessario definire una verità a terra. Essa è costituita da un insieme di punti (pixel) la cui classe informativa è nota a priori.

L'individuazione dei punti di verità a terra è stata effettuata mediante foto-interpretazione.

Per alcune delle immagini disponibili è stata svolta un'analisi visiva che ha permesso di assegnare la classe di appartenenza ad un sottoinsieme di pixel.

Sono stati quindi definiti pixel di "neve", "non neve" e, a seconda delle condizioni meteorologiche, pixel di "nuvole".

I campioni (che sono differenti da quelli usati per l'allenamento del classificatore) sono stati utilizzati per la validazione dei risultati di classificazione. La validazione quantitativa ha portato ad un'accuratezza media di classificazione superiore al 92%. Si noti che il sistema fornisce come prodotto ausiliare anche la mappa di copertura nuvolosa giornaliera corrispondente all'ora di acquisizione del satellite.

Generazione di dati statistici

Dalle mappe di copertura nevosa sono stati derivati due prodotti statistici al fine di avere a disposizione strumenti per una valutazione oggettiva delle mappe di copertura nevosa ed eventualmente poter fare le prime considerazioni sulle dinamiche in atto. Essi sono:

- la percentuale di area coperta da neve;
- il limite altitudinale della presenza di neve;

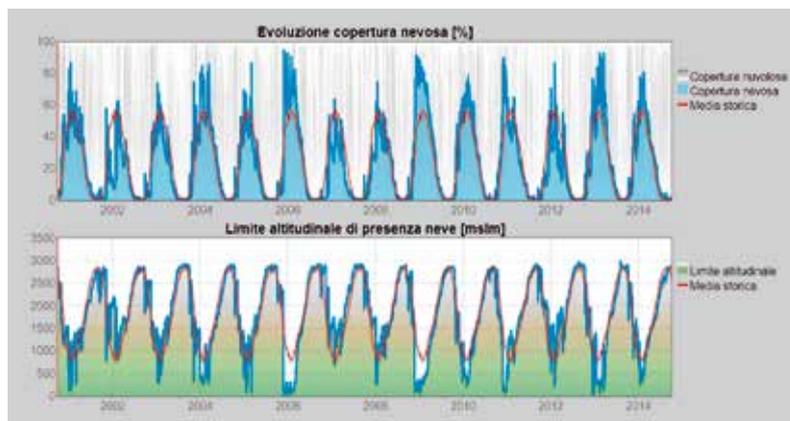
Entrambi i prodotti sono calcolati considerando alternativamente: la regione Trentino nel suo insieme, le 4 macro aree o le 21 zone omogenee dal punto di vista nivologico di Figura 4.

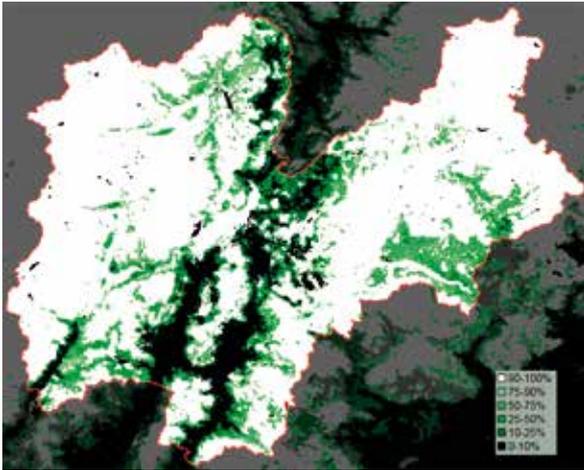
Questi parametri sono stati registrati in un database Access/MySQL al fine di facilitarne l'impiego per la visualizzazione e l'analisi statistica. In Figura 5 è riportato un esempio di tali grafici per l'intera area del Trentino.

Fig. 4 - Zone di interesse: in rosso le macro zone, e in bianco le zone omogenee dal punto di vista nivologico.



Fig. 5 - Grafici della copertura nevosa e del limite altitudinale relativi al periodo 25 febbraio 2000 - 13 ottobre 2014.





Da sinistra a destra:
Fig. 6 - Mappa mensile di persistenza nevosa per il mese di novembre 2012.

Fig. 7 - Composizioni in falso colore del 17 Novembre 2013 con nebbie di fondovalle.

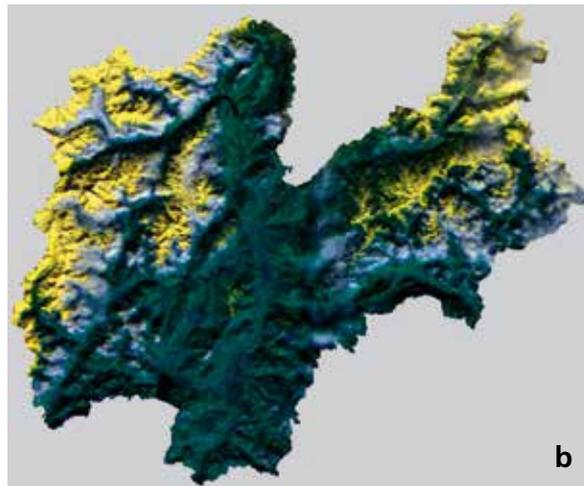
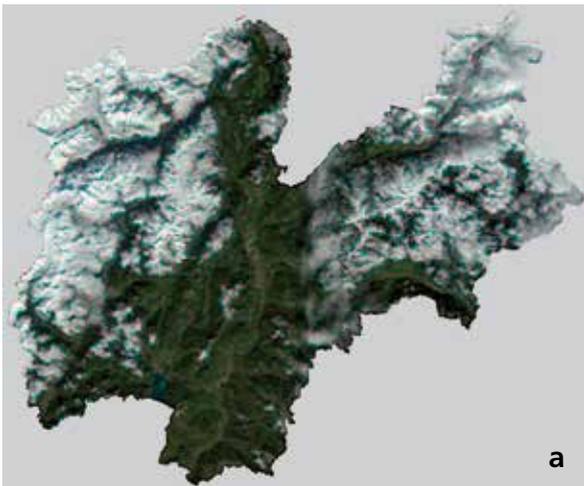


Fig. 8 - Composizioni in vero colore a) e in falso colore b) del 16 novembre 2012 in presenza di copertura nuvolosa parziale.

Generazione mappe di persistenza neve al suolo

In aggiunta a quanto descritto fin qui, sono state calcolate anche delle mappe mensili di persistenza della neve al suolo che indicano per ciascun pixel (area a terra di 250 m) la percentuale di tempo in cui esso è stato interessato dalla presenza di neve.

Le classi di persistenza adottate sono:

- 0 a 10%;
- da 10 a 25%;
- da 25% al 50%;
- dal 50% al 75%;
- dal 75% al 90%;
- dal 90% al 100%.

Per codificarle è stata usata una scala colori che va dal verde (bassa percentuale di copertura nevosa) al bianco (elevata percentuale di copertura nevosa) per favorire la percezione qualitativa dell'informazione. Le classi di persistenza sono state calcolate eliminando per ciascun pixel i giorni di copertura nuvolosa. Un esempio di tale prodotto è riportato in Figura 6.

Generazione immagini veri e falsi colori

Data la disponibilità di bande dell'infrarosso acquisite dal sensore MODIS, è stata definita una composizione in falso colore in grado di supportare in modo efficace l'analisi visiva delle immagini consentendo una miglior distinzione tra le classi di "neve" e "nuvole". Il falso colore è così composto: nel canale del rosso la banda 1, nel canale del verde la banda 2 e nel canale del blu la banda 5 sommata alle bande 6 e 7. L'infrarosso fornisce un'informazione direttamente legata alla temperatura della superficie investigata ed è pertanto particolarmente utile per identificare la copertura nevosa (più fredda) e distinguerla così da quella nuvolosa o altre coperture (più calde).

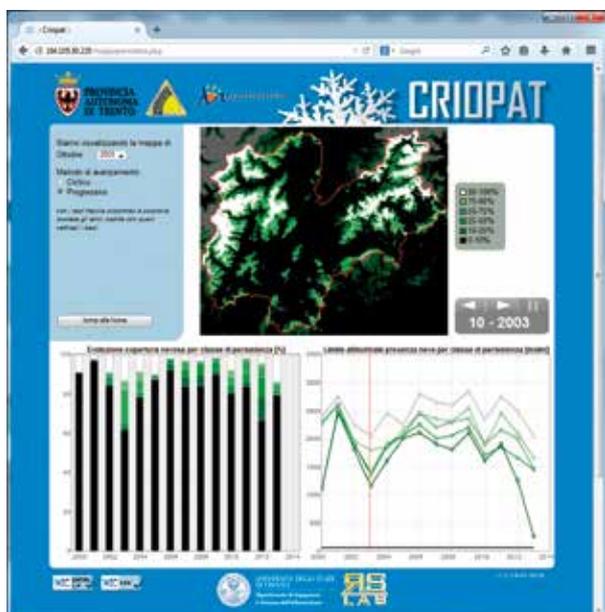
Si osservi per esempio la Figura 7 che evidenzia la presenza di nuvolosità in fondovalle. Il colore giallo è dato da una superficie a bassa temperatura e con riflettanza elevata nello spettro del rosso (potenzialmente neve) mentre le sfumature

verdi e blu corrispondono a zone di bassa riflettanza e più calde (potenzialmente e rispettivamente associabili a terreno nudo e nebbie di bassa quota).

Se si confrontano la composizione in vero colore di Figura 8a e quella in falso colore di Figura 8b (entrambe ottenute dall'immagine MODIS del 16 novembre 2012) si può notare che nella prima le nebbie di fondo valle risultano difficilmente distinguibili dalla neve presente in quota (si consideri ad esempio la zona della val di Pejo a nord-ovest) poiché entrambe assumono colore bianco/grigio, mentre nella seconda la distinzione è netta poiché le nebbie e la neve sono caratterizzate da temperature molto diverse, più calde le prime e più fredde le seconde.

L'interfaccia web per l'analisi completa dei dati

Per agevolare la consultazione di tutti i prodotti generati dal sistema è stata creata un'interfaccia web accessibile da personale autenticato tramite login e pas-



Dall'alto verso il basso:
Fig. 9 - Interfaccia web in cui è stata selezionata la macro zona del Trentino occidentale.

Fig. 10 - Interfaccia web per l'analisi dei dati relativi alla persistenza della neve al suolo.

La prima area, in alto a sinistra, permette di selezionare il periodo e la zona da analizzare (Figura 4). La seconda area, posta in basso, riporta la composizione in vero colore ottenuta con i prodotti a risoluzione migliorata di 250 m e la mappa di copertura nevosa del giorno di interesse la cui data è evidenziata nel riquadro grigio con cursori di selezione avanti e indietro. Infine, la terza area contiene i grafici dell'andamento in percentuale della copertura nevosa e del limite altitudinale della presenza di neve con le relative medie storiche in tratto continuo rosso calcolate su tutti gli anni antecedenti all'anno idrologico attuale.

La media è calcolata considerando un intervallo fisso all'interno del mese (intervalli 1-9; 10-19; 20-fine mese).

Una barra di colore rosso mette in evidenza la data in esame così da poter confrontare il dato di copertura nevosa e di limite altitudinale giornaliero con quelli del periodo esaminato.

I grafici fanno sempre riferimento alla zona di interesse selezionata nell'area in alto a sinistra dell'interfaccia web.

Se durante l'utilizzo si sceglie, per esempio, di analizzare il Trentino occidentale (come in Figura 9) una serie di informazioni estratte dal database sull'area di interesse comparirà nell'area in alto a sinistra. Esse comprendono sia misure riguardanti il periodo selezionato, come la percentuale di copertura nevosa media sul periodo selezionato e la percentuale di copertura nevosa media degli ultimi 7 giorni, sia misure giornaliere come la superficie totale (in ha), la superficie nevosa (in ha), la percentuale di superficie coperta da neve, e il limite altitudinale della copertura nevosa (in m s.l.m.) per il dato giorno sotto analisi.

I grafici riportati nell'area centrale in alto rappresentano l'andamento della copertura nevosa e il limite altitudinale relativi al periodo e alla zona indicata.

Una maschera che enfatizza l'area interessata e oscura il resto del territorio compare nell'area delle immagini in basso.

È interessante notare la presenza di un grafico grigio ombreggiato sullo sfondo del grafico di copertura nevosa. Esso rappresenta l'andamento della copertura nuvolosa giornaliera utile per comprendere l'affidabilità delle informazioni estratte da CRIOPAT per il giorno considerato.

Bisogna infatti considerare che la presenza di nuvole occulta la superficie terrestre al sensore MODIS impedendo di stabilire se sotto la coltre nuvolosa vi sia presenza o meno di neve e conseguentemente di ottenere dati consistenti di copertura nevosa e di limite altitudinale.

Per evitare le oscillazioni sul dato causate dall'effetto indesiderato della copertura

nuvolosa è stata fatta l'ipotesi che ad ogni pixel coperto da nuvole sia assegnata la classe "non neve" o "neve" sulla base dell'ultimo giorno utile privo di nuvole. In questo modo il limite altitudinale di presenza di neve viene determinato identificando tra i pixel assunti coperti da neve quello che ha l'altitudine più bassa. È stato inoltre inserito un meccanismo per limitare l'impatto di possibili pixel classificati in modo errato.

Si quantizza l'informazione sull'altitudine in passi da 50 m e si calcola l'istogramma della copertura nevosa in funzione dell'altitudine normalizzandolo rispetto al numero totale di campioni alle differenti quote. L'andamento naturale che ci si aspetta di ottenere considerando tale istogramma è monotono crescente.

Nel caso in cui siano presenti dei picchi nell'istogramma che ne alterano l'andamento atteso (per esempio picchi a bassa quota isolati) questi non vengono considerati nel calcolo del limite altitudinale di presenza neve. Il sistema restituisce come limite altitudinale quello che corrisponde alla prima fascia altitudinale che supera il 20% di copertura nevosa.

Tramite il tasto "opzioni" è inoltre possibile visualizzare l'immagine in falso colore, la mappa stimata della copertura del manto nevoso priva della copertura nuvolosa e la posizione delle stazioni nivologiche presenti sul territorio trentino. Una volta completata l'analisi della copertura nevosa giornaliera è possibile passare alla pagina di analisi dei dati riguardanti la persistenza della neve al suolo calcolata su base mensile mediante il pulsante "Mappe di persistenza neve al suolo" (a sinistra nell'interfaccia di analisi della copertura nevosa di Figura 9).

L'interfaccia di tale pagina è riportata in Figura 10.

Come per la pagina principale anche questa pagina è divisa in 3 aree.

La prima area, in alto a sinistra, permette di selezionare l'anno su cui eseguire l'analisi e il metodo di scorrimento (ciclico sull'anno o progressivo sulla serie storica) per valutare i trend dell'andamento della persistenza della neve al suolo.

La seconda area, in alto a destra, contiene la mappa di persistenza mensile della neve al suolo. La terza, in basso, riporta i grafici raffiguranti l'andamento annuale della percentuale della copertura nevosa (a sinistra) e l'andamento del limite altitudinale per ogni classe di persistenza (a destra).

Interfaccia web accessibile dal pubblico

Al fine di divulgare al pubblico i risultati ottenuti da CRIOPAT una interfaccia web più semplice e intuitiva rispetto a quella completa ad uso interno descritta precedentemente, è stata pubblicata sul sito di Meteotrentino (<http://www.meteotrentino.it/neve-ghiacci/criopat/criopat.aspx>) e riportata in Figura 11.

All'apertura della pagina web l'utente pubblico senza autenticazione può visualizzare le immagini dell'ultimo giorno disponibile (generalmente il giorno prima della data corrente) e con l'ausilio della barra temporale consultare l'intero archivio fino al 25 febbraio 2000.

Il riquadro grigio posto nel centro pagina riporta la data dell'immagine visualizzata, la console con i tasti "avanti" e "indietro" per scorrere singolarmente ogni immagine e il tasto "play" che consente di eseguire l'intera sequenza di immagini a partire dalla data selezionata alla frequenza di un'immagine per secondo. La composizione in vero colore posta in alto (Figura 11) è ottenuta utilizzando le bande spettrali di MODIS acquisite nelle lunghezze d'onda del rosso (banda 1 alla risoluzione nativa di 250 m), del blu e del verde (rispettivamente banda 3 e banda 4 a risoluzione migliorata).

Le tre bande spettrali menzionate sono state opportunamente elaborate per migliorare l'impatto visivo delle immagini risultanti e fornire all'utente evidenza qualitativa della situazione al suolo rispetto alla presenza/assenza di neve e, in caso di situazioni meteorologiche avverse, della presenza di nuvole. La mappa di copertura nevosa posta in basso (Figura 11) è il risultato del processo di classificazione in cui ogni pixel è assegnato ad

una delle tre classi: "neve", "non neve" e "nuvole" già descritte in precedenza.

CONCLUSIONI

Questo articolo ha descritto il funzionamento del sistema CRIOPAT per l'analisi della copertura nevosa del territorio trentino. Il sistema è in grado di accedere automaticamente ai dati acquisiti dal sensore MODIS della NASA e generare a cadenza giornaliera mappe di copertura nevosa, mappe di persistenza nevosa e statistiche sui trend di evoluzione della copertura nevosa e sui limiti altitudinali di presenza neve sul territorio trentino.

Tali dati sono accessibili sia in un database dedicato sia mediante intuitive interfacce web che permettono ad utenti autenticati di effettuare analisi personalizzate sui trend di evoluzione del manto nevoso.

Il sistema produce come prodotto ausiliario la mappa di copertura nuvolosa giornaliera all'ora di acquisizione dell'immagine satellitare.

Oltre al collaudo eseguito direttamente dai produttori di CRIOPAT, i nivologi dell'Ufficio Previsioni e Pianificazione incaricati di emettere il bollettino valanghe hanno periodicamente confrontato le mappe di copertura nevosa generate giornalmente con le informazioni in loro possesso, trovandole ordinariamente coerenti.

La limitata estensione temporale (13 anni) della serie di dati prodotti dalle mappe di copertura nevosa non permette di evidenziare trend significativi riconducibili ai cambiamenti climatici in atto (il cui sviluppo è su scale temporali molto più estese), ma la futura analisi delle mappe prodotte con l'ausilio delle serie storiche dei dati acquisiti dalle stazioni meteorologiche potrà fornire interessanti osservazioni in merito.

La natura passiva dei dati telerilevati MODIS utilizzati per la stima della copertura nevosa soffre di un'intrinseca incertezza nel caso di presenza persistente ed estesa di copertura nuvolosa.

Nel sistema CRIOPAT ciò viene gestito da un lato con un opportuno meccanismo di stima, dall'altro riportando congiunta-

mente ai dati di copertura nevosa quelli di copertura nuvolosa per rendere evidente all'utente quali dati siano stati estratti da misure dirette e quali da stime.

Si noti che un possibile semplice upgrade del sistema è quello di sostituire i dati MODIS con i dati forniti quotidianamente dal nuovo sensore NPP Suomi, che dal punto di vista operativo può essere considerato il successore di MODIS.

In conclusione i risultati ottenuti dal sistema CRIOPAT si sono rivelati molto soddisfacenti e lo sviluppo di nuove missioni satellitari apre una prospettiva di ulteriore sviluppo del sistema ad una scala geometrica più dettagliata. Si tenga presente che l'architettura del sistema e i blocchi sviluppati sono generali e quindi potenzialmente estendibili a qualsiasi territorio al di fuori del Trentino.

Fig. 11 - Interfaccia web accessibile dal pubblico attraverso il sito di www.meteotrentino.it.



Bibliografia

- Melgani, F., L. Bruzzone, 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 42, N.8
- Sirguey, P.; R. Mathieu, Y. Arnaud, M.M. Khan, J. Chanussot, 2008. Improving MODIS Spatial Resolution for Snow Mapping Using Wavelet Fusion and ARSIS Concept. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Vol. 5, N.1

SITI INTERNET

- <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data>. Servizio dati near-real time NASA
- <http://www.meteotrentino.it/neve-ghiacci/criopat/criopat.aspx>. Interfaccia web sul sito di Meteotrentino

MODELLI della dei DINAMI MANTI NEVOSI in ALTA VALTELLINA

**Francesco Avanzi,
Carlo De Michele,
Antonio Ghezzi**
Politecnico di Milano,
Dipartimento di Ingegneria Civile
e Ambientale, Milano
francesco.avanzi@polimi.it

**Roberto Gianatti,
Giacomo Della Vedova**
A2A Impianti idroelettrici, Grosio SO

La fusione delle coltri nivali stagionali è una componente rilevante del bilancio idrologico di molti bacini montani del nostro pianeta. In questo contesto, la Valtellina rappresenta un importante caso di studio, in quanto sede di molti consorzi di produzione di energia idroelettrica, nonché di importanti comprensori turistici invernali e di intensiva produzione agricola. Poiché le dinamiche di accumulo e fusione dei manti nevosi dipendono fortemente dalle forzanti climatiche, la predizione degli scenari futuri di dinamica della risorsa idrica in quest'area rappresenta un elemento strategico per il futuro economico e sociale dell'intero paese. In questo contesto, si propone l'applicazione di un modello di dinamica nivale a tre siti di misura posti in alta Valtellina. Il modello predice le dinamiche locali di equivalente idrico nivale mediante la valutazione accoppiata dell'altezza del manto e della sua densità media. Le predizioni vengono quindi confrontate con misure in sito.

I siti di misura sono localizzati in val Grosina occidentale (Malghera), val Grosina orientale (Eita) e val Cancano (Val Cancano). I risultati mostrano che il modello è utile per predire le dinamiche di accumulo e fusione nelle aree alpine considerate.

AZIONE MICA



LA NEVE E LA VALTELLINA

Nelle aree montane, i manti nevosi stagionali rappresentano una componente chiave dei processi idrologici (Bavera e De Michele 2009). Essi costituiscono infatti una riserva naturale di acqua che si accumula lungo l'inverno e che viene resa disponibile nella stagione di fusione per la formazione del deflusso superficiale e l'infiltrazione nei terreni. Tali flussi alimentano impianti di produzione di energia, comparti agricoli, acquedotti civili ed ecosistemi naturali (Ranzi et al., 1999). Durante la stagione invernale, più del 50% dell'Eurasia e del Nord America è coperto da neve stagionale (Pepe et al. 2005).

Nel contesto del fiume Po, le aree montane generano mediamente più del 50% della portata annuale (Vanham 2012, Da Ronco e De Michele 2014). In Valtellina, in circa l'80% dei corsi d'acqua, questa viene derivata per la produzione di energia (Villa et al., 2009). La stessa valle (sede del fiume Adda), insieme alla Valchiavenna, fornisce al mercato nazionale circa il 12% dell'energia idroelettrica, e circa il 50% dell'energia idroelettrica usata in Lombardia (ARPA Sondrio, 2008). La produzione complessiva si aggira attorno ai 5.5 miliardi di kWh/anno (ARPA Sondrio, 2008). La Valtellina è anche sede di molti comprensori sciistici, e luogo di importante produzione agricola. Tuttavia, il clima delle Alpi sta variando. In particolare, si prevedono un aumento delle temperature medie, una riduzione dell'entità delle coltri nivali, e un conti-

nuo arretramento dei ghiacciai (Brunetti et al. 2000, Brunetti et al., 2001, Latenser e Schneebeli 2003, Smiraglia e Diolaiuti 2008). Questi elementi dimostrano come lo studio delle dinamiche di massa delle coltri nivali stagionali nel contesto del bacino dell'Adda rappresenti un aspetto importante per il futuro economico e sociale della Lombardia e dell'Italia.

Questa operazione può essere condotta mediante misure o modelli. Con l'installazione in campo di strumentazione (come in Avanzi et al. 2014b) e/o l'effettuazione di misure manuali è possibile monitorare l'evoluzione nel tempo della disponibilità di risorsa idrica locale (cfr. Valgoi 2011, o Cugerone et al., 2012). Tipiche grandezze di misura sono l'altezza del manto, la sua densità media e l'equivalente idrico nivale. Quest'ultima grandezza è definita come l'altezza d'acqua che risulterebbe dalla completa fusione della coltre nivale in un punto (Avanzi et al., 2012). Mediante modelli, invece, è possibile simulare le stesse quantità a partire da dati di forzanti meteorologiche quali la temperatura dell'aria e i tassi di precipitazione nelle due forme (liquida e solida). Tali modelli consentono di predire scenari futuri di disponibilità della risorsa idrica. Qualunque modello necessita di una rigorosa calibrazione e validazione (cioè di verifica delle predizioni sul campo) mediante il confronto con delle misure (Avanzi et al., 2014). Ciò rende le attività sperimentali e modellistiche parimenti importanti per i fini qui descritti.

Il presente lavoro illustra i risultati dell'applicazione di un semplice modello di dinamica nivale a dati sperimentali di input e di validazione misurati in tre siti posti in alta Valtellina. Il modello, semplice ma fisicamente basato, predice le dinamiche locali di accumulo e di ablazione dell'equivalente idrico nivale a partire dalla simulazione accoppiata di densità media del manto (ρ) e altezza del manto (h). I siti in esame sono posti in val Grosina Occidentale (Malghera), in val Grosina Orientale (Eita) e in val Cancano (Val Cancano). Si riporta in Figura 1 una mappa della Lombardia con le posizioni delle tre stazioni considerate. La validazione di questo modello in Val-

tellina può fornire utili indicazioni circa un suo utilizzo estensivo al fine di predire le dinamiche nivali future nell'area.

I SITI DI MISURA DI A2A

I dati utilizzati nel presente lavoro provengono dal database A2A (www.a2a.eu) e vengono acquisiti in continuo per la gestione dei serbatoi idroelettrici dell'alta Valtellina. In questo contesto sono stati utilizzati i dati di altezza di neve (m), temperatura dell'aria (°C), precipitazione totale (mm) ed equivalente idrico nivale (SWE, mm). Essi vengono acquisiti mediante strumentazione automatica nei siti di Malghera, Eita e Val Cancano.

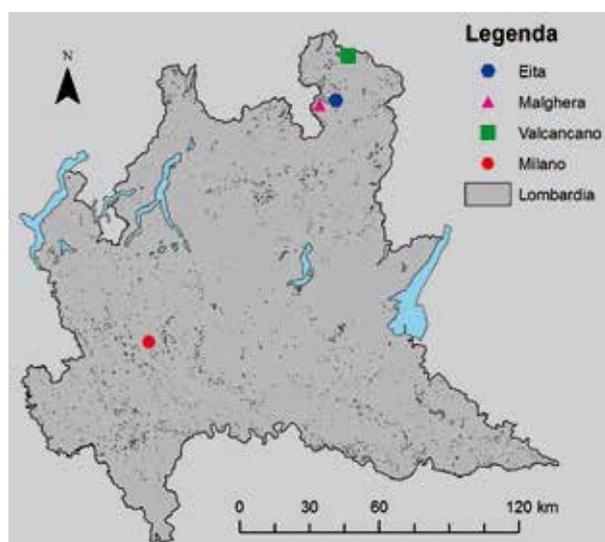
La strumentazione presente nei tre siti di misura è della stessa tipologia, descritta nel seguito, e fornisce un dato ogni quarto d'ora. Per gli scopi del presente lavoro, il dato è stato aggregato a risoluzione oraria usando il dato dell'ora in punto.

La misura dell'equivalente idrico

L'equivalente idrico è misurato da uno *snow pillow* (o cuscinetto per la misura della densità, si veda Valgoi 2011). Lo strumento consiste in un tappetino di materiale plastico, installato sulla superficie del terreno nel punto di misura desiderato, e contenente un liquido antigelo. La misura della pressione idrostatica del fluido nel cuscinetto avviene mediante opportuni trasduttori e permette di determinare, in tempo continuo, il peso del manto di neve depositato sopra di esso, e quindi l'altezza della lama d'acqua equivalente (in m o mm w.e.). La tecnologia rappresenta oggi uno standard di misura dell'equivalente idrico in molte aree del pianeta quali l'ovest degli Stati Uniti (cfr. Avanzi et al., 2012 e Serreze et al. 1999), o il Canada, o i paesi scandinavi (Sorteberg et al. 2001).

La relativa lunga esperienza nell'uso di questi strumenti ha permesso di definirne in maniera approfondita le diverse tipologie di errore. Esse includono: 1) errori di trasmissione, quali dati mancanti nei report elettronici, dati negativi o dati eccessivamente elevati; 2) oscillazioni erronee del dato sub-giornaliero, causate da varia-

Fig. 1 - Posizione delle tre stazioni considerate nell'analisi nel contesto della regione Lombardia.



zioni della pressione del fluido sul sensore che non corrispondono a reali variazioni di peso del manto. Queste oscillazioni sono dovute al fatto che il volume occupato dalla soluzione antigelo varia al variare della temperatura; 3) sovrastime e sottostime dovute alle diverse caratteristiche termiche e meccaniche dello strumento, della neve e del terreno circostante. Queste diversità determinano per esempio fusione differenziale o *snow bridging* (ovvero ponti di ghiaccio tra la coltre indisturbata e quella sopra il sensore, che alleggeriscono o sovraccaricano il manto oggetto della misura); 4) malfunzionamenti, quali perdite di fluido dovute a forature del cuscinetto ad opera di agenti atmosferici e/o ad animali. Per un'ampia documentazione su tutte queste sorgenti di errore, si veda ancora, Cox et al. (1978), Julander et al. (1998), McGurk (1986), Johnson and Schaefer (2002), Johnson (2004), Johnson e Marks (2004), Avanzi et al. (2014).

La misura dell'altezza neve

Ciascuno dei siti A2A in alta Valtellina monta un nivometro ad ultrasuoni per la misura automatica dell'altezza di neve al suolo. Questo strumento (si veda Gubler, 1981) permette di misurare in maniera automatica e pseudo-continua l'altezza di neve inviando, a partire da un'altezza nota dal suolo, un segnale ultrasonico.

Esso viene riflesso dalla superficie del manto di neve (o del terreno) e ricevuto dallo stesso strumento che ha inviato il segnale. Conoscendo la velocità del suono in aria, e misurando il tempo di volo necessario al segnale, è possibile determinare l'altezza del manto mediante differenza tra l'altezza del sensore dal suolo e la semi distanza percorsa dal segnale.

I nivometri hanno trovato un utilizzo molto ampio in tutto il mondo, sia per il basso costo dello strumento, sia per l'utilità che ha oggi la misura automatica e remota del dato di altezza di neve anche per applicazioni diverse dalla ricerca scientifica e dalla gestione della risorsa idrica (come la gestione dei comprensori sciistici). Come esempio, basti citare l'ampio utilizzo di nivometri fatto da diverse agenzie di prote-

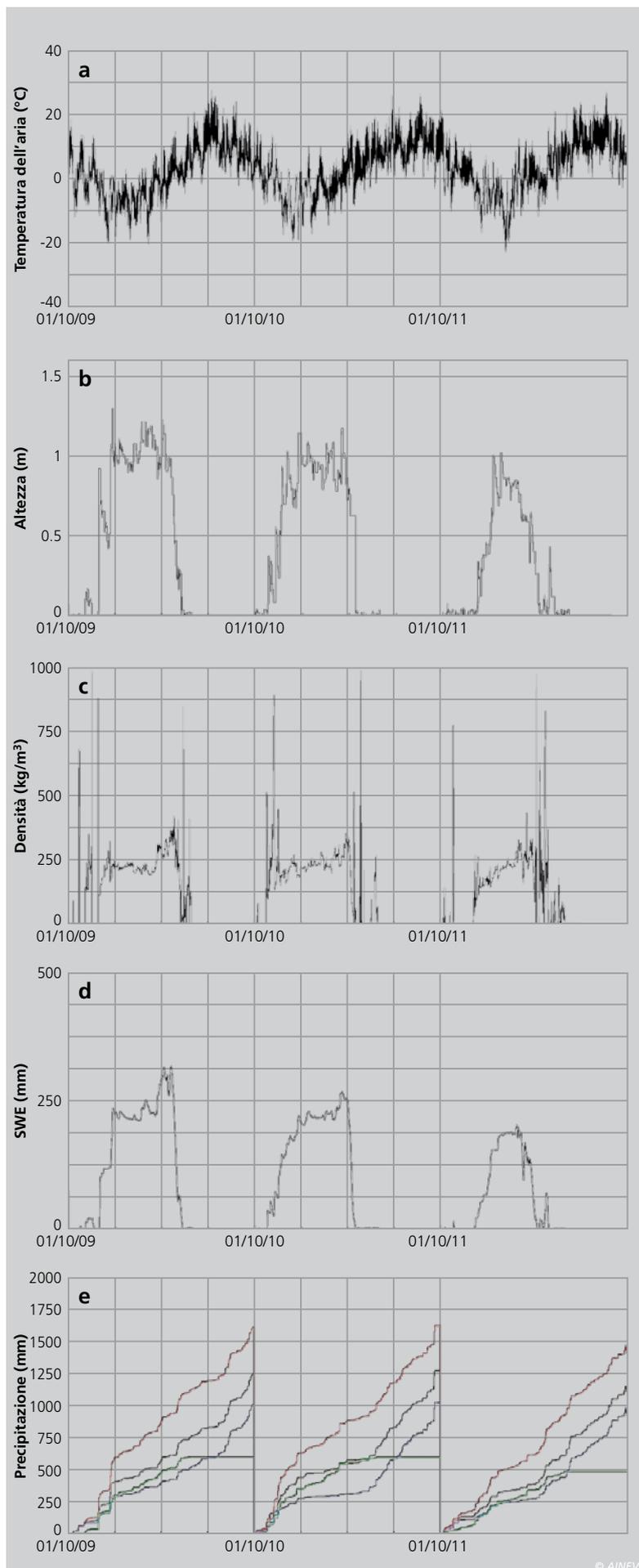
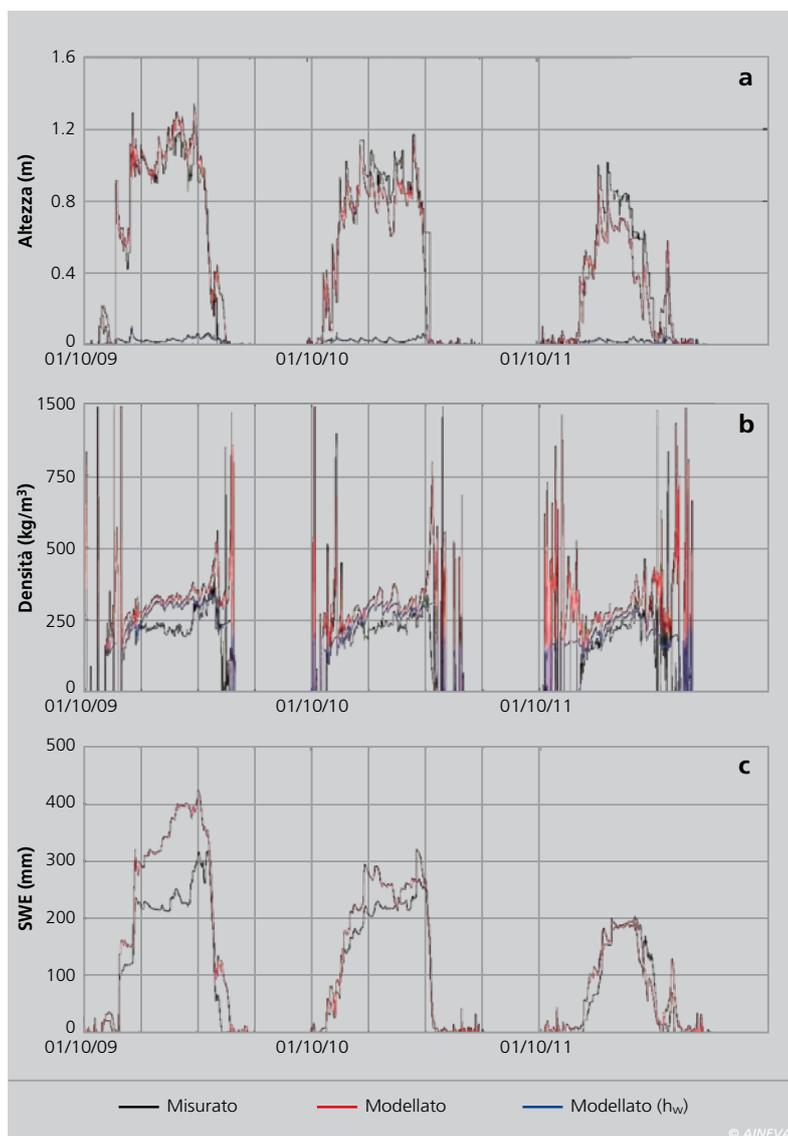


Fig. 2 - Esempio di misure automatiche disponibili ai siti A2A in alta Valtellina. I dati provengono dalla stazione automatica di Val Cancano. In pannello a), vengono riportati i dati di temperatura dell'aria. In pannello b), vengono riportati i dati di altezza di neve, in pannello c) un esempio di dato di densità media e in pannello d) un esempio di dato di equivalente idrico nivale. In pannello e) vengono riportati il dato di precipitazione totale (in nero) e le curve ricostruite di cumulata solida (in verde), di cumulata liquida (in blu) e di cumulata totale (in rosso).

Fig. 3 - Confronto tra dati misurati (in nero) e modellati (in rosso) per la stazione di Val Cancano. In particolare, nel pannello a) vengono riportati i dati misurati di altezza del manto e i dati modellati di altezza complessiva e di altezza d'acqua (in blu). Nel pannello b) vengono riportati i dati misurati di densità del manto e i dati modellati di densità media e di densità secca (in blu), mentre nel pannello c) vengono riportati i risultati misurati e modellati in termini di equivalente idrico.



zione dell'ambiente (Terzago et al., 2012, Cremonini et al., 2013). Parallelamente, però, le tipologie di errore associate a questo strumento sono generalmente meno note rispetto a quanto detto per gli *snow pillows* (Avanzi et al., 2014). Esse comprendono: 1) errori di trasmissione, come nel caso dei *pillows*; 2) fluttuazioni del dato a risoluzione sub-giornaliera, dovute per lo più al fatto che la velocità di propagazione del segnale ultrasonico dipende dalla temperatura del mezzo (in questo caso l'aria). Molte tipologie di nivometri montano al loro interno un piccolo termometro che permetta di stimare un fattore correttivo, ma in molti casi, anche per possibili malfunzionamenti del termometro stesso, le correzioni non appaiono sufficienti (Osterhuber et al., 1994); 3) vibrazioni del sensore dovute al vento; 4) interferenze dovute a fiocchi di

neve che transitano nel cono di vista dello strumento durante una misura o a erba che cresca a lato dello strumento quando l'altezza di neve è bassa (Avanzi et al., 2014).

La misura della precipitazione e della temperatura

La misura della precipitazione è effettuata mediante un pluviometro riscaldato. Esso registra la quantità di precipitazione caduta (solida, liquida o mista), conservandone nel tempo i mm d'acqua. Lo strumento non è in grado di distinguere le diverse tipologie di precipitazione. La tecnologia è ormai standard, e i principali tipi di errore noti comprendono i già discussi errori di trasmissione, l'intasamento da neve, l'*under-catch* (ovvero la registrazione di una quantità di precipitazione minore rispetto a quella reale) causato dal vento, e la presenza di fluttuazioni del dato

per motivi identici a quelli presentati per il *pillow*. Si veda a riguardo Larson and Peck (1974). La misura di temperatura dell'aria viene effettuata in maniera automatica mediante l'utilizzo di un termogigrometro o un semplice termometro.

Il trattamento del dato

Riportiamo in Figura 2 un esempio di dato misurato presso la stazione di Val Cancano per le stagioni invernali 2009/2010, 2010/2011 e 2011/2012. Nel prosieguo, ciascuna stagione invernale verrà indicata in termini di anni idrologici. Ciascun anno idrologico (per esempio il 2012) ha inizio il primo di Ottobre dell'anno precedente (per esempio il 2011) e termina al 30 di Settembre dello stesso anno. Di conseguenza, ciascuna delle stagioni citate corrisponde ai tre anni idrologici 2010, 2011 e 2012. Nel pannello a) di Figura 2 viene riportato il dato di temperatura dell'aria. Sono stati eliminati tutti i dati mancanti e i dati superiori ai 40 °C (eventuali errori di trasmissione), sostituendo a ciascuno di esso il dato registrato all'ora precedente. Questo dato mostra un chiaro andamento sinusoidale stagionale.

Il pannello b) riporta il dato di altezza di neve, H , trattato rimuovendo i valori negativi e fuori range, azzerando le interferenze estive dovute all'erba, e trattando i dati per eliminare le oscillazioni dovute all'effetto della temperatura dell'aria (secondo l'approccio di *processing-modeling* riportato in Avanzi et al., 2014).

In pannello c) viene riportato il dato di densità media della coltre, ricavata mediante la semplice relazione

$$\rho = \frac{\rho_w SWE}{H}$$

dove ρ è la densità media del manto, ρ_w la densità dell'acqua (1000 kg/m³) e SWE l'equivalente idrico (riportato in pannello d). Il dato di SWE ha subito trattamenti simili a quelli già descritti in precedenza. Infine, nel pannello e) vengono riportati il dato originale di precipitazione totale (misurata, in nero), la cumulata degli eventi solidi (derivata, in verde) e la cumulata di eventi liquidi (derivata, in blu).

Il dato originale (nero) è stato trattato eliminando i dati mancanti e rimuovendo sistematicamente tutte le variazioni negative del dato cumulato, dovute alternativamente ad oscillazioni del trasduttore o a locali fenomeni di evaporazione.

La cumulata di eventi solidi è stata derivata a partire dal dato originale di altezza di neve (pannello b). A tale scopo, si è imposto che ogni variazione positiva di altezza del manto corrispondesse ad un evento di densità funzione della temperatura dell'aria.

Confrontando per ogni giorno l'eventuale aumento di precipitazione totale (nera) e di precipitazione solida (verde), sono stati calcolati, per differenza, gli eventi liquidi (cumulata blu). A causa del fenomeno dell'intasamento descritto in precedenza, è possibile che molti eventi solidi (registrati correttamente dal nivometro) non siano stati registrati dal pluviometro. Ne deriva che in inverno la precipitazione registrata dal pluviometro può essere inferiore a quella determinata dal solo nivometro, che in queste situazioni viene assunta come valore vero di precipitazione totale. Sommando, per ogni ora, i valori di cumulata solida (verde) e liquida (blu) viene quindi ottenuta una stima della pluviometrica totale "vera" (in rosso). Come si vede, essa è maggiore rispetto a quella misurata, proprio per il fenomeno dell'*under-catch*. Per un'esaustiva descrizione dei trattamenti effettuati, si veda Avanzi et al. (2014).

L'APPLICAZIONE DEL MODELLO DINAMICO

Il modello

I dati descritti nella sezione precedente sono stati utilizzati per forzare, calibrare e validare il modello proposto da De Michele et al. (2013), e applicato estensivamente negli Stati Uniti occidentali da Avanzi et al. (2014). Tale modello permette di predire le dinamiche dell'equivalente idrico nivale (Figura 2, pannello d) mediante la simulazione dell'altezza del manto e della sua densità media. Si rimanda ai già citati articoli di De Michele et al. (2013) o Avanzi et al. (2014), oltre ad Avanzi et al.

(2012, in italiano) per i dettagli riguardo la formulazione e le ipotesi.

Il modello implementa la conservazione della massa della componente secca di una coltre nivale (i grani di ghiaccio) e della componente liquida (l'acqua di fusione o di precipitazione).

Inoltre, viene introdotta una terza equazione che valuti nel tempo il valore di densità media secca (ovvero il rapporto tra la massa della componente secca e il volume occupato dalla coltre) modellandone il processo di compattazione e di perturbazione dovuta alle nuove nevicate, di densità media inferiore dell'esistente.

A partire da queste equazioni, il modello predice l'evoluzione nel tempo dell'altezza della coltre nivale (h_S), dell'altezza del volume di acqua liquida nel manto (h_W), e della densità secca (ρ_D). Note queste va-

riabili nell'arco del tempo di simulazione, è possibile determinare la densità media della coltre

$$\rho = \frac{\rho_D h_S + \rho_W h_W}{h}$$

e il valore di SWE come

$$SWE = \frac{\rho h}{\rho_W}$$

Dove h è l'altezza complessiva del sistema, coincidente per la maggior parte della stagione con l'altezza della coltre nivale h_S , e solo negli ultimi istanti della stagione maggiore di essa a causa della sovrassaturazione dei pori ad opera dell'acqua liquida (cfr. Avanzi et al. 2012).

I dati di input del modello sono la temperatura dell'aria, e le precipitazioni nelle due forme (solida e liquida).

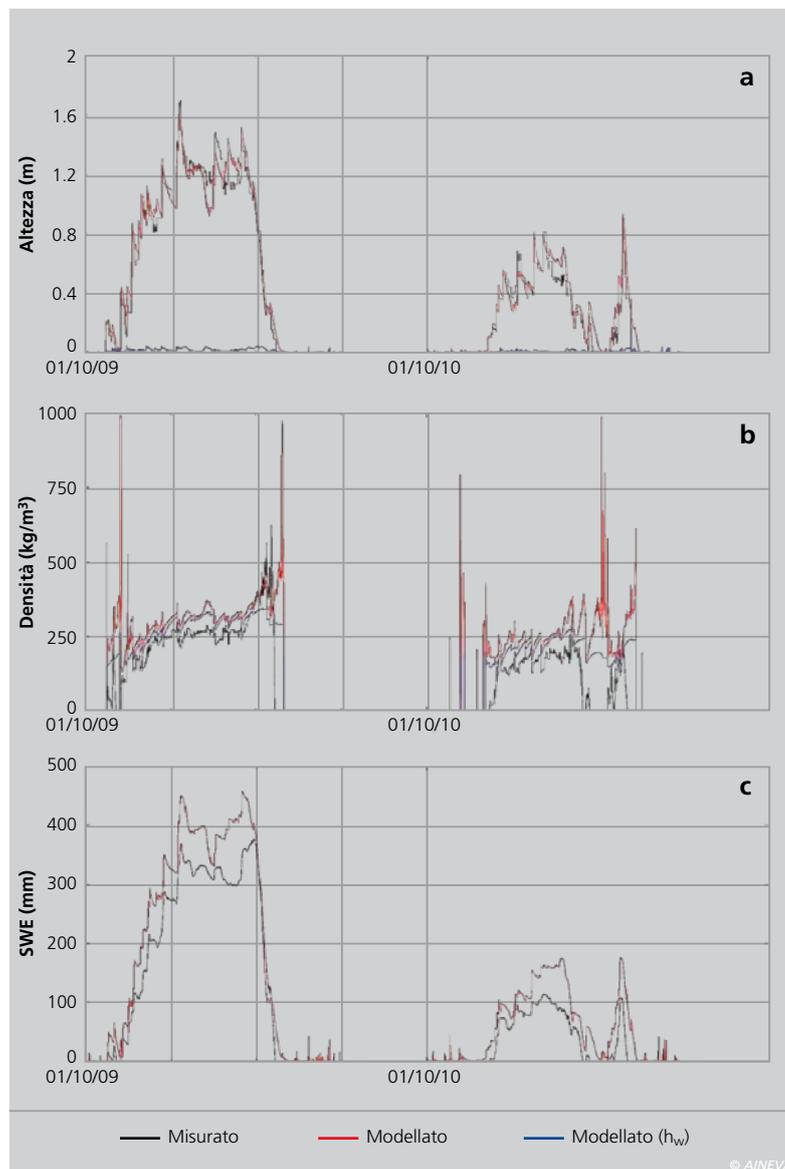
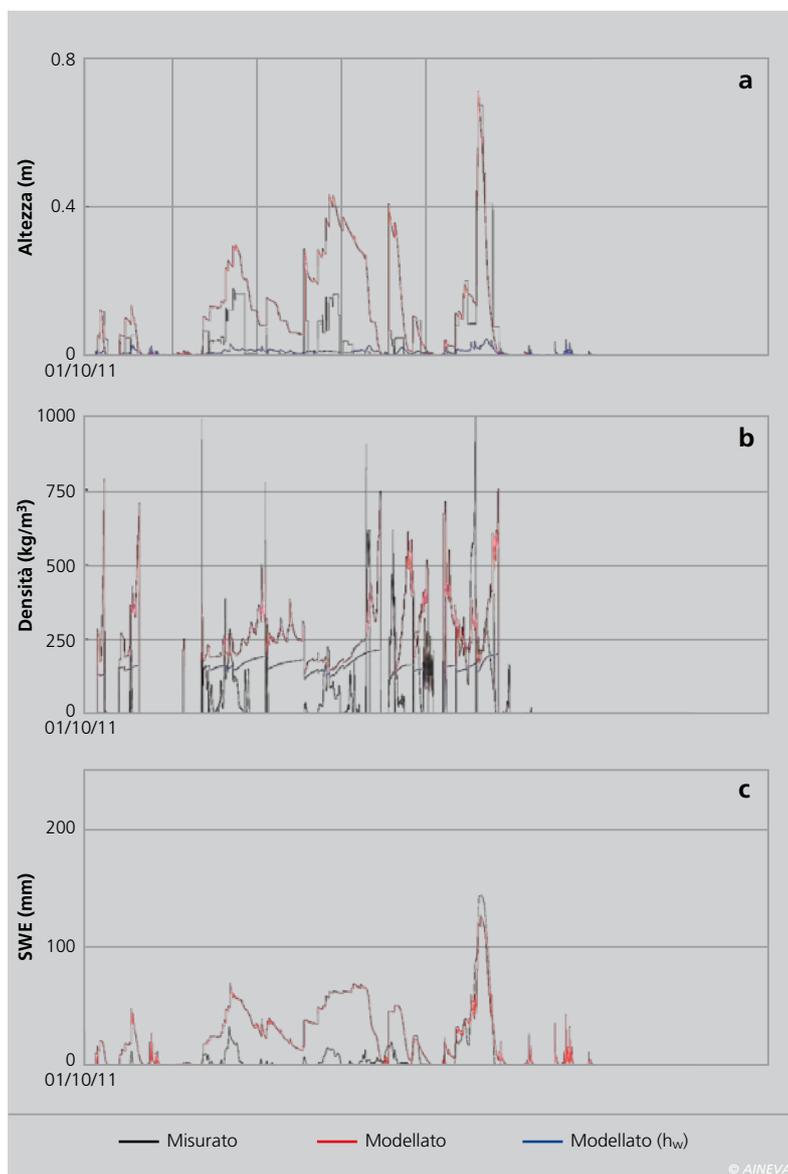


Fig. 4 - Confronto tra dati misurati (in nero) e modellati (in rosso) per la stazione di Eita. In particolare, nel pannello a) vengono riportati i dati misurati di altezza del manto e i dati modellati di altezza complessiva e di altezza d'acqua (in blu). Nel pannello b) vengono riportati i dati misurati di densità del manto e i dati modellati di densità media e di densità secca (in blu), mentre nel pannello c) vengono riportati i risultati misurati e modellati in termini di equivalente idrico.

Fig. 5 - Confronto tra dati misurati (in nero) e modellati (in rosso) per la stazione di Malghera.

In particolare, nel pannello a) vengono riportati i dati misurati di altezza del manto e i dati modellati di altezza complessiva e di altezza d'acqua (in blu). Nel pannello b) vengono riportati i dati misurati di densità del manto e i dati modellati di densità media e di densità secca (in blu), mentre nel pannello c) vengono riportati i risultati misurati e modellati in termini di equivalente idrico.



Alcuni risultati ed osservazioni

Si riportano in Figura 3, 4 e 5 alcuni esempi delle simulazioni effettuate.

La Figura 3 riporta i risultati della simulazione per il sito di Val Cancano. In questo caso, il primo anno a disposizione (2010) è stato usato a fini di calibrazione.

I dati misurati (in nero) sono gli stessi riportati in Figura 2. Nel pannello a) di Figura 3, la linea rossa rappresenta la simulazione di altezza di neve, e la linea blu la simulazione dell'altezza d'acqua nel manto (h_w). Nel pannello b), la linea blu rappresenta la simulazione della densità secca del manto (ρ_p), mentre la linea rossa rappresenta la simulazione della densità media (ρ). Nel pannello c), la linea rossa rappresenta la simulazione dell'equivalente idrico (SWE). La stessa convenzione è applicata anche ai dati riportati in Figura

4 (risultati per gli anni idrologici 2011 e 2012 al sito di Eita, calibrazione effettuata sulla stagione 2011), e in Figura 5 (estratto esemplificativo dell'anno idrologico 2012 per il sito di Malghera, calibrazione effettuata sull'anno 2010, non riportato per brevità).

La simulazione mostra risultati molto buoni per quanto riguarda l'altezza del manto, sia a Val Cancano, sia a Eita.

Per quanto riguarda l'esempio di Malghera, è interessante notare come il modello si dimostri affidabile anche in caso di coltri nivali molto scarse. In tutti i casi, inoltre, le simulazioni sono sempre in fase con le misure. Questo significa che il modello proposto è in grado di cogliere in maniera abbastanza affidabile i tempi tipici dell'accumulo e della fusione del manto.

La simulazione della densità media è più

problematica. Dai risultati modellati in Figura 3, 4 e 5 è possibile dedurre come, in generale, il modello qui utilizzato tenda spesso a sovrastimare la densità secca della coltre nivale. La densità media (in rosso) ha come limite inferiore la densità secca, e risente quindi dell'errore nella simulazione di quest'ultima.

La sovrastima della densità media e gli errori nella simulazione dell'altezza di neve si combinano nella predizione dell'equivalente idrico, che ne è il prodotto (a meno di una costante, la densità dell'acqua liquida). È interessante osservare come esso risulti generalmente sovrastimato, e sempre in corrispondenza dei punti in cui la predizione della densità media e dell'altezza di neve è particolarmente difficile. Tuttavia, anche in questo caso la dinamica di accumulo e ablazione è sostanzialmente ben riprodotta dal modello.

Potenzialità e applicazioni

Lo studio qui presentato offre interessanti spunti di applicazione e di ricerca per il futuro.

In primo luogo, è interessante osservare come il modello qui proposto riesca a riprodurre in maniera abbastanza affidabile la dinamica di fusione di una coltre nivale alpina, e le tempistiche dei processi di accumulo e ablazione, al di là della già discussa difficoltà a modellarne la densità media. Questo è probabilmente dovuto al fatto che, per tale modellazione, viene adottato qui un approccio alla *degree-day*, che impone un tasso di fusione proporzionale alla temperatura dell'aria, se positiva (cfr. Hock 1999 e Hock 2003). Questo approccio si dimostra estremamente affidabile qualora i parametri vengano calibrati sul sito in analisi.

In secondo luogo, dimostra grandi potenzialità per il futuro il fatto che il modello offra buone prestazioni anche in casi di accumulo estremamente variabili, e talvolta limite (come l'anno idrologico 2012 nel sito di Malghera, Figura 4). In quest'ultimo caso, la difficile riproduzione del dato misurato è probabilmente imputabile, almeno in parte, a rumore strumentale nella definizione dei dati di input.

In terzo luogo, il fatto che il modello qui presentato richiede come soli dati in input la precipitazione totale, l'altezza di neve e la temperatura dell'aria può permettere un suo utilizzo anche in zone scarsamente strumentate. Come accennato in precedenza, infatti, tali variabili sono monitorate in maniera estremamente diffusa su tutto l'arco alpino. Questo però richiede un'approfondita analisi futura sulle cause dell'errore nella predizione della densità media.

CONCLUSIONI

In questo contributo, si è proposta l'applicazione di un modello dinamico a tre siti di misura posti in alta Valtellina (un sito in val Grosina occidentale, uno in val Grosina orientale, e uno in val Cancano). Il modello predice localmente le dinamiche della densità media e dell'altezza di un manto nivale, fornendo utili previsioni sulla disponibilità di acqua sotto forma di neve nel tempo (SWE). Nelle stazioni di misura vengono misurate in modo automatico l'altezza del manto, l'equivalente idrico, la precipitazione totale e la temperatura dell'aria. L'applicazione ha mostrato ottimi risultati per quanto riguarda la simulazione dell'altezza di neve, risultati accettabili per quanto riguarda la simulazione dell'equivalente idrico, e frequenti sovrastime per quanto riguarda la simulazione della densità media del manto. Quest'applicazione dimostra comunque ottime potenzialità per la previsione delle dinamiche di fusione di un manto stagionale alpino.

In futuro, maggiore attenzione dovrà essere posta nella caratterizzazione delle dinamiche della densità media.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ing. Giancarlo Messina per l'utile contributo fornito nel trattamento dei dati originali delle stazioni A2A.

Si ringraziano inoltre i Sigg. Bruno Pianta e Riccardo Capetti (A2A) per l'assistenza logistica fornitaci. Alcuni dei tematismi riportati in Figura 1 sono stati ottenuti dal Geoportale della Regione Lombardia (<http://www.cartografia.regione.lombardia.it/geoportale>).

Bibliografia

- ANDERSON, E. A. 1976. A Point Energy and Mass Balance Model of a Snow Cover. NOAA Technical Report NWS Vol. 19, pp. 172.
- ANDERSON, J., WIRT, J. 2008. Ultrasonic Snow Depth Sensor Accuracy, Reliability, and Performance. Proceedings of the 76th Annual Western Snow Conference, Hood River, Oregon, pp. 99–102.
- ARPA Sondrio, 2008, Rapporto sullo stato dell'ambiente nella provincia di Sondrio, Cap. 1, Il territorio.
- AVANZI, F. 2011. A Dynamic Model of Snowpack Density, Depth and Mass Content and Its Validation with SNOTEL Hourly Data. Tesi di laurea specialistica, Politecnico di Milano.
- AVANZI, F., DE MICHELE, C., GHEZZI, A., JOMMI, C., 2012, La dinamica della densità di una coltre nivale stagionale, Neve e Valanghe, Vol. 77, pp. 44 – 53.
- AVANZI, F., DE MICHELE, C., GHEZZI, A., JOMMI, C., PEPE, M., 2014, A processing–modeling routine to use SNOTEL hourly data in snowpack dynamic models, Advances in Water Resources, Vol. 73, pp. 16–29.
- AVANZI, F., CARUSO, M., JOMMI, C., DE MICHELE, C., GHEZZI, A., 2014b. Continuous-time monitoring of liquid water content in snowpacks using capacitance probes: A preliminary feasibility study. Vol. 68, pp. 32–41.
- BARNETT, T. P., ADAM, J. C., LETTENMAIER, D. P. 2005. Potential Impacts of a Warming Climate on Water Availability in Snow-dominated Regions. Nature, Vol. 438, pp. 303–309.
- BAVERA, D., DE MICHELE, C. 2009. Snow Water Equivalent Estimation in the Mallerio Basin Using Snow Gauge Data and MODIS Images and Fieldwork Validation. Hydrological Processes, Vol. 23, pp. 1961–72.
- BRUNETTI, M., BUFFONI, M., MAUGERI, M., NANNI, T. 2000. Trends of Minimum and Maximum Daily Temperatures in Italy from 1865 to 1996. Theoretical and Applied Climatology, Vol. 66, pp. 49–60.
- BRUNETTI, M., MAUGERI, M., NANNI, T. 2001. Changes in Total Precipitation, Rainy Days and Extreme Events in Northeastern Italy. International Journal of Climatology, Vol. 21, pp. 861–71.
- COX, L. M., BARTEE, L. D., CROOK, A. G., FARNES, P. E., SMITH, J. L. 1978. The Care and Feeding of Snow Pillows. In Proceedings of the 46th Annual Western Snow Conference, Otter Rock, Oregon, pp. 40–47.
- CREMONINI, R., PROLA, M.C., BARBERO, S., SOLERO, E., BONANSEA, E., ALIBRANDO, M., CARRINO, M., TERZAGO, S. 2013. Monitoraggio della neve al suolo in Piemonte mediante l'utilizzo di sistemi webGIS. Neve e Valanghe Vol. 78, pp. 12 – 17.
- CUGERONE, K., ALLAMANO, P., SALANDIN, A., BARBERO, S. 2012. Stima Della Precipitazione in Siti Di Alta Quota. Neve e Valanghe, Vol. 77, pp. 36–43.
- DA RONCO, P., DE MICHELE, C., 2014. Cloudiness and snow cover in Alpine areas from MODIS products. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. Vol. 11, pp. 3967–4015.
- DE MICHELE, C., AVANZI, F., GHEZZI, A., JOMMI, C., 2013. Investigating the Dynamics of Bulk Snow Density in Dry and Wet Conditions Using a One-dimensional Model. The Cryosphere, Vol. 7, pp. 433–44.
- GUBLER, H. 1981. An Inexpensive Remote Snow–depth Gauge Based on Ultrasonic Wave Reflection from the Snow Surface. Journal of Glaciology, Vol. 27, pp. 157 – 163.
- HOCK, R., 1999. A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. Journal of Glaciology, Vol. 45, No. 149, pp. 101–111.
- HOCK, R., 2003. Temperature index melt modelling in mountain areas. Journal of Hydrology, Vol. 282, pp. 104–115.
- JOHNSON, J., SHAEFER, G. L. 2002. The Influence of Thermal, Hydrologic, and Snow Deformation Mechanisms on Snow Water Equivalent Pressure Sensor Accuracy. Hydrological Processes, Vol. 16, pp. 3529–42.
- JOHNSON, J. 2004. A Theory of Pressure Sensor Performance in Snow. Hydrological Processes, Vol. 18, pp. 53–64.
- JOHNSON, J., MARKS, D. 2004. The Detection and Correction of Snow Water Equivalent Pressure Sensor Errors. Hydrological Processes, Vol. 18, pp. 3513–25.
- JULANDER, R. P., WILSON, G. R., NAULT, R. 1998. The Franklin Basin Problem. Proceedings of the 66th Annual Western Snow Conference, Snowbird, Utah, pp. 153 – 156.
- KUMAR, M., MARKS, D., DOZIER, J., REBA, M., WINSTRAL, A. 2013. Evaluation of Distributed Hydrologic Impacts of Temperature-index and Energy-based Snow Models. Advances in Water Resources, Vol. 56, pp. 77–89.
- LARSON, L. W., PECK, E. L. 1974. Accuracy of Precipitation Measurements for Hydrologic Modeling. Water Resources Research, Vol. 10, pp. 857 – 863.
- LATERNER, M., SCHNEEBELI, M., 2003, Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931 – 99), International Journal of Climatology, Vol. 23, pages 733 – 750
- MCGURK, B. J. 1986. Precipitation and Snow Water Equivalent Sensors: An Evaluation. Proceedings of the 54th Annual Western Snow Conference, Phoenix, Arizona, pp. 71–80.
- OSTERHUBER, R. S., EDENS, T., MCGURK, J., 1994. Snow Depth Measurement Using Ultrasonic Sensors and Temperature Correction. In Proceedings of the 62nd Annual Western Snow Conference, Santa Fe, New Mexico, pp. 159–62.
- PEPE, M., BRIVIO, P. A., RAMPINI, A., ROTA NODARI, F., BOSCHETTI, M., 2005. Snow Cover Monitoring in Alpine Regions Using ENVISAT Optical Data. International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, pp. 4661–67.
- RANZI, R., GROSSI, G., BACCHI, B., 1999. Ten years of monitoring areal snowpack in the Southern Alps using NOAA – AVHRR imagery, ground measurements and hydrological data. Hydrological Processes, Vol. 13, pp. 2079 – 2095.
- RYAN, W. A., DOESKEN, N. J., FASSNACHT, S. R., 2008. Preliminary Results of Ultrasonic Snow Depth Sensor Testing for National Weather Service (NWS) Snow Measurements in the US. Journal of atmospheric and oceanic technology, Vol. 25, pp. 2748–57.
- SCHAEFLI, B., GUPTA, H. V., 2007. Do Nash values have value?. Hydrological Processes, Vol. 21, pp. 2075–2080.
- SERREZE, M. C., CLARK, M. P., ARMSTRONG, R. L., MCGINNIS, D. A., PULWARTY, R. S., 1999. Characteristics of the Western United States Snowpack from Snowpack Telemetry (SNOTEL) Data. Water Resources Research, Vol. 35, pp. 2145–60.
- SMIRAGLIA, C., DIOLAIUTI, G., 2008. Lo stato di salute dei ghiacciai lombardi: verso l'estinzione di una risorsa fondamentale?, in Clima e Ghiacciai, l'evoluzione delle risorse glaciali in Lombardia. 212 pp.
- SORTEBERG, H. K., ENGESET, R. V., UDNAES, J. C., 2001. A National Network for Snow Monitoring in Norway: Snow Pillow Verification Using Observations and Models. Phys. Chem. Earth, Vol. 26(10), pp. 723–29.
- SPROLES, E. A., NOLIN, A. W., RITTGER, K., PAINTER, T. H., 2013. Climate Change Impacts on Maritime Mountain Snowpack in the Oregon Cascades. Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 17(7), pp. 2581–97.
- TERZAGO, S., PROLA, M.C., FRATIANNI, S., CREMONINI, R., BARBERO, S. 2012. Validazione di misure nivometriche automatiche. Neve e Valanghe, Vol. 75, pp. 36 – 43.
- VANHAM, D., 2012. The Alps under climate change: implications for water management in Europe. Journal of Water and Climate Change Vol. 3 No. 3 pp. 197–206.
- VALGOL, P., 2011, Cuscinetto per la misura della densità della neve SNOW PILLOW. Neve e Valanghe, Vol. 72, pagine 48 – 53
- VILLA, F., ROSSETTI, A., BRAMBILLA, M., GIACOMELLI, P., MAGGI, V., CAVALLINI, A., 2009, Stima della componente glaciale nel bilancio idrico. Il caso studio del bacino valtellinese del fiume Adda, Rendiconti online Soc. Geol. It., Vol. 8, pp. 159 – 161.

REALIZZAZIONE DI MAPPE DI INNEVAMENTO

SNOW

Matteo Dall'Amico
MobyGIS Srl, Trento
matteo@mobygis.com

Filippo Zambon
Mountain-eering Srl, Bolzano

Anselmo Cagnati,
Andrea Crepaz
ARPAV, Servizio Neve
e Valanghe di Arabba, Arabba BL

Stefano Endrizzi
Università di Zurigo, Zurigo CH

La neve è una risorsa fondamentale in ambiente montano: oltre ad essere un'attrazione turistica per amanti degli sport invernali, contribuisce all'apporto idrico per la ricarica delle falde durante la fusione. Tuttavia, la neve può rappresentare anche un pericolo, ad esempio per il possibile distacco di valanghe, per gli ostacoli prodotti alla viabilità lungo le vie di comunicazione e per le piene improvvise in caso di rapido scioglimento nivale in momenti di rialzo termico. La quantificazione a scala regionale dell'altezza ed equivalente in acqua della neve, permette quindi di ottimizzare la gestione della neve nei settori turistico, energetico, idrologico e di protezione civile, ambiti strategici in ambienti montani.

Il presente articolo si prefigge di descrivere un innovativo sistema di monitoraggio della neve chiamato SnowMaps, che permette di stimare l'altezza della neve a scala regionale attraverso un approccio fisicamente basato. Viene proposto un caso di studio nel territorio montano della Regione del Veneto nonché un approfondimento sull'applicazione di tale strumento come supporto alla redazione del bollettino valanghe.

MAPS

**A SUPPORTO
DELLA PREVISIONE
VALANGHE**



LA MODELLAZIONE SPAZIALE DELLA NEVE

La modellazione spaziale della neve può essere eseguita attraverso due differenti modalità: approccio statistico e approccio fisicamente basato. Secondo l'approccio statistico, l'altezza della neve viene messa in correlazione con alcune caratteristiche territoriali esplicative, quali l'elevazione, la radiazione potenziale incidente, la temperatura media annua dell'aria ecc. (Stoffel et al., 2006, Foppa et al., 2005). Se la bontà della correlazione supera una soglia limite, la neve viene poi spazializzata lungo tali variabili esplicative.

Secondo l'approccio fisicamente basato, tipico dei modelli idrologici, l'altezza della neve viene calcolata in ogni punto del dominio risolvendo le equazioni di bilancio della massa, dell'energia e della quantità di moto. Le forzanti esterne sono rappresentate dai flussi energetici e di precipitazione e vengono determinate attraverso una distribuzione statistica nello spazio delle variabili meteorologiche (es. temperatura e umidità dell'aria, velocità e direzione del vento, radiazione e precipitazione), misurate nelle stazioni meteorologiche, tenendo conto delle caratteristiche topografiche (elevazione, pendenza, esposizione) del territorio in esame.

Rispetto all'approccio statistico, l'approccio fisicamente basato presenta alcuni vantaggi: a) viene mantenuta l'eterogeneità topografica del territorio, fondamentale in ambiente montano; b) le informazioni sulla neve vengono fornite in modo continuo nel tempo, anche in assenza di misure di neve (l'approccio statistico funziona solo in presenza di un numero di misure di neve adeguato); c) le stime vengono fornite da remoto, senza la necessità di organizzare apposite campagne di misura; d) oltre all'altezza della neve (HS), vengono calcolate anche la neve fresca caduta (HN) e l'equivalente in acqua della neve (SWE).

IL MODELLO SNOWMAPS

SnowMaps rappresenta un innovativo sistema di calcolo che, sfruttando la rete esistente di nivometri e stazioni meteo, permette di

calcolare da remoto l'altezza e l'equivalente in acqua della neve in tempo reale, sia a scala locale che regionale. SnowMaps sfrutta un approccio fisicamente basato, secondo il quale l'evoluzione della neve viene calcolata in ogni punto del dominio risolvendo le equazioni di bilancio della massa, dell'energia e della quantità di moto (Dall'Amico et al, 2011). SnowMaps è stato testato in via sperimentale nel corso della stagione invernale 2011-2012 in collaborazione con il Servizio Neve e valanghe di Arabba e poi applicato in via operativa nelle regioni Friuli-Venezia Giulia e Veneto nella stagione 2012-2013, con l'aggiunta del Trentino, dell'Alto Adige e della Lombardia nella stagione 2013-2014, raggiungendo un'estensione di circa 30.000 km² ed utilizzando i dati meteorologici provenienti giornalmente da più di 400 stazioni meteorologiche.

Il modello SnowMaps è composto da tre componenti principali: 1) il modulo di pre-processamento dei dati meteorologici; 2) la libreria Meteolo (Bavay and Egger, 2014), dedicata al processamento dei dati meteorologici (filtro, interpolazione temporale e spaziale); 3) il modello idrologico fisicamente basato GEOTop (Endrizzi et al., 2014) che calcola l'evoluzione del manto nevoso (accumulo, compattazione, fusione, densità, altezza, equivalente in acqua) attraverso un bilancio di massa e di energia.

Il modulo di pre-processamento

Il modulo di pre-processamento ha l'obiettivo di estrapolare, dalle misure delle stazioni meteo, delle variabili aggiuntive estremamente utili per il calcolo dei flussi energetici e di massa in ingresso a GEOTop. In particolare, il modulo si divide in due parti: 1) calcolo della nuvolosità (TAUcloud) e 2) il calcolo della precipitazione nevosa caduta durante un evento (HN2HNW).

TAUcloud

La misura della nuvolosità è estremamente importante per la stima dei flussi energetici, sia per il calcolo della radiazione ad onda corta (SW_{in}), in quanto le nuvole attenuano o annullano la componente diretta della radiazione, sia per il calcolo della radiazione ad onda lunga (LW_{in}), in quanto le nuvole agiscono come corpi emmissivi. Definendo

con SW_i ($W m^{-2}$) la radiazione ad onda corta incidente misurata da un piranometro e SW_t ($W m^{-2}$) la radiazione potenzialmente ottenibile in un dato istante di tempo in presenza di cielo completamente sereno, la trasmittività delle nuvole TAU_{ci} , (inverso della nuvolosità) viene calcolata dal rapporto tra SW_i ed SW_t . Essa viene successivamente trattata come una variabile meteorologica e spazializzata nel dominio di calcolo.

HN2HNW

La stima della precipitazione nevosa caduta in montagna è estremamente problematica, sia per la mancanza di una rete pluviometrica ad alta quota, sia per la difficoltà di misura della precipitazione nevosa (Larcher, 2009), sia per la presenza di gradienti con la quota (Sevruk, 1983). Il modulo HN2HNW si prefigge di stimare la precipitazione nevosa caduta in montagna (HN) sulla base dell'analisi del segnale misurato dal nivometro automatico (Comai, 2014). Tale valore viene successivamente moltiplicato per la densità della neve fresca (Jordan, 1999) stimata durante l'evento per determinare la precipitazione piovosa equivalente. In questo modo è possibile integrare le misure di precipitazione ottenute dai pluviometri in fondo valle con una stima della precipitazione in quota, fondamentale per riprodurre in modo corretto l'evoluzione della precipitazione nevosa in montagna.

Meteolo: interpolazione e spazializzazione delle forzanti

Meteolo (Bavay and Egger, 2014) è una libreria di calcolo sviluppata dall'Istituto Federale Svizzero per lo studio della neve e delle valanghe dedicata all'analisi dei dati meteorologici. In particolare, Meteolo permette di: a) filtrare i dati i dati meteo per verificarne la congruenza ed eliminare i dati eccedenti delle soglie pre-impostate; b) interpolare i dati nel tempo, al fine di estrapolare i dati tra due istanti di tempo ed eventualmente di operare un *gap filling* (riempimento dei buchi) dei dati mancanti; c) interpolare le variabili meteo nello spazio, secondo le preferenze di algoritmo specificate dall'utente (es. IDW, *kriging* etc.). In Fig. 1 viene riportata la spazializzazione della temperatura dell'aria (TA) secondo

l'algoritmo IDW con *lapse rate* (LR), ossia con correzione con la quota. In Fig. 2 viene riportata un esempio di spazializzazione della precipitazione (HNW) secondo l'algoritmo IDW senza *lapse rate*, dove si nota che la componente orografica non incide sulla mappa di precipitazione calcolata.

L'utilizzo in modalità tempo reale richiede una grande attenzione alla qualità dei dati meteorologici in ingresso. In particolare, è necessario impostare dei filtri automatici di verifica dei dati meteorologici, che permettano di segnalare malfunzionamenti della stazione e/o dati non fisicamente plausibili nei vari periodi dell'anno.

GEOtop: evoluzione del manto nevoso

GEOtop (Endrizzi et al., 2014) è un modello idrologico fisicamente basato in grado di determinare i flussi energetici e di infiltrazione nel suolo e le portate nei corsi d'acqua in un bacino idrografico.

Esso calcola i flussi turbolenti superficie-atmosfera, risolve l'equazione dell'energia nel suolo e nella neve determinando la temperatura della neve e del suolo, anche in presenza di cambiamento di fase dell'acqua, ed infine risolve l'equazione di Richards in 3D determinando il contenuto d'acqua nel suolo. Per quanto riguarda il modulo neve, esso calcola gli accumuli di neve fresca, i metamorfismi di compressione e la densità della neve.

Equazioni di conservazione

Le equazioni di conservazione della massa e dell'energia pongono in forma differenziale i principi generali di conservazione, secondo cui la somma della variazione nel tempo della quantità conservata (massa o energia), della divergenza dei flussi entranti nel sistema, più un eventuale termine sorgente si eguaglia a zero:

$$\int \frac{\partial R}{\partial t} dV + A(F_i - F_o) + \int S dV = 0 \quad (1)$$

V è il volume di controllo, R è la quantità conservata (massa o energia), F_i e F_o rappresentano i flussi entranti ed uscenti rispettivamente, A è la superficie del volume di controllo e S il termine sorgente.

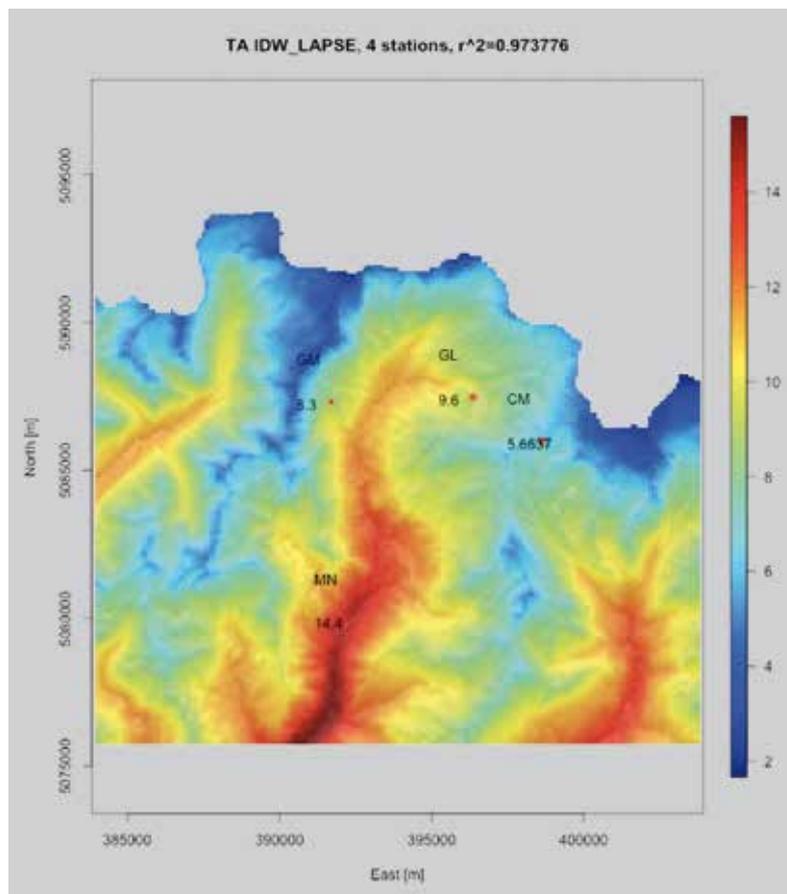


Fig. 1 - Spazializzazione della temperatura dell'aria (IDW-Lapse Rate).

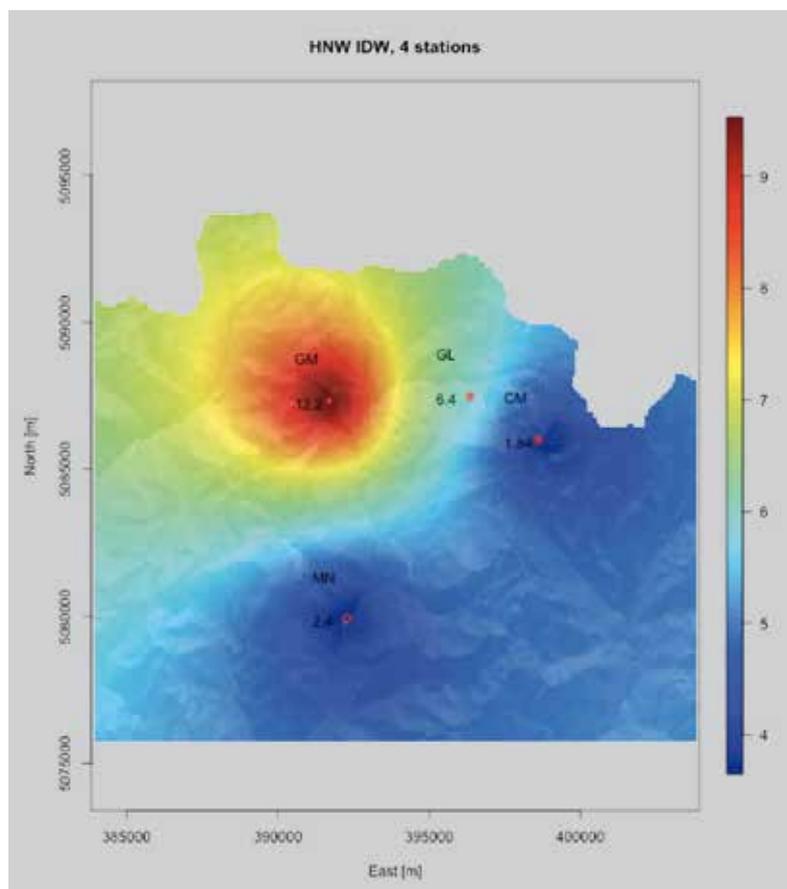


Fig. 2 - Spazializzazione della precipitazione (IDW).

I termini dell'eq. (1) per la neve vengono esplicitati nelle Tab. 1 e 2.

In termini pratici, l'equazione afferma che

è possibile determinare lo stato della neve in ogni punto (x,y) di calcolo nel tempo t^{n+1} se si conoscono: a) lo stato iniziale al tem-

po tⁿ, b) i flussi F entranti nel sistema che rappresentano le condizioni al contorno e 3) i termini sorgenti S .

Flussi radiativi e turbolenti

Il calcolo dei flussi radiativi e turbolenti tra l'atmosfera e la superficie della neve permette di determinare il bilancio superficiale (EB), ossia la condizione al contorno nell'equazione di conservazione dell'energia.

Esso viene calcolato in accordo a Endrizzi et al. (2014), tenendo conto del valore aggiornato dell'albedo della neve sulla base dell'età della neve in giorni e dell'eventuale caduta di neve fresca (Dickinson et al., 1993).

Accumulo di neve fresca (HN)

La precipitazione può cadere come solida o liquida a seconda delle condizioni termo-igrometriche locali. In generale si può scrivere:

$$HNW = P_r + P_s \quad (2)$$

dove P_r e P_s (mm s⁻¹) indicano la parte

di precipitazione che si stima cada come pioggia e neve rispettivamente nell'unità di tempo. La stima viene fatta a seconda della temperatura a bulbo secco o a bulbo umido dell'aria, impostando due soglie: T_1 , temperatura sotto la quale la precipitazione cade al 100% come neve e T_2 , temperatura sopra la quale la precipitazione cade al 100% come pioggia. Tra T_1 e T_2 viene operata un'interpolazione lineare.

La quantità di neve fresca HN viene quindi determinata moltiplicando P_s per la densità della neve fresca ρ_{sn} (kg m⁻³) che viene parametrizzata in funzione di TA e VW in accordo a Jordan (1999).

Metamorfismo di compattazione

L'equazione governante la compattazione dello spessore della neve D risulta (Jordan, 1999):

$$\frac{1}{D} \frac{\partial D}{\partial t} = C_1 + C_2 \quad (3)$$

dove C_1 (s⁻¹) è il tasso di compattazione della neve dovuto al metamorfismo distruttivo,

tipico della neve fresca, e C_2 (s⁻¹) il tasso di compattazione relativo al metamorfismo di pressione, dovuto al peso della neve soprastante. Tali parametrizzazioni vengono riportate in Endrizzi et al. (2014).

Metamorfismo di fusione

La neve, può essere soggetta a fusione in funzione delle condizioni termodinamiche e del flusso energetico netto. In caso di fusione, il nuovo spessore viene calcolato in proporzione al nuovo contenuto di ghiaccio, tenendo la densità costante. In caso di rigelamento (*refreezing*) dell'acqua, esso avviene a spessore costante aumentando la densità.

Densità della neve

La neve viene solitamente discretizzata in vari strati (*layer*) per seguirne in modo ottimale l'evoluzione. Detto D_i lo spessore del layer i -esimo, alla fine del Δt di calcolo, si ottengono le nuove variabili di stato del sistema (contenuto di ghiaccio θ_i , contenuto di acqua θ_w e spessore D) da cui si ottiene lo spessore del manto nevoso (HS):

$$HS = \sum_{i=1}^N D_i \quad (4)$$

la densità dello strato di neve:

$$\rho_{sn} = \rho_w \theta_w + \rho_i \theta_i \quad (5)$$

ed infine l'equivalente in acqua (SWE) della neve

$$SWE = \frac{1}{\rho_w} \sum_{i=1}^N (\rho_{sn})_i \cdot D_i \quad (6)$$

dove N il numero totale di layer di neve nel punto.

APPLICAZIONE DEL MODELLO SnowMaps

Il modello è stato applicato nella zona montana del Veneto, un territorio complesso di 5.500 km², costituito da una zona prealpina a ridosso della pianura veneta, che si estende dal Lago di Garda fino alle Prealpi Carniche, e da una zona dolomitica più interna. La piovosità decresce progressivamente dalla prima alla seconda zona, da una media annuale di 2300 mm del Pasubio, nelle Pre-

Tab. 1 - Termini delle equazioni di conservazione.

Variabile	Equazione Energia	U.d.M.	Equazione Massa	U.d.M.
R	$U = (\rho_i c_i \theta_i + \rho_w c_w \theta_w) \cdot T + L_f \rho_w \theta_w$	J m ⁻³	$\rho_w \theta_w + \rho_i \theta_i$	-
F	$G + J_e$	W m ⁻²	$\rho_w J_w$	m s ⁻¹
F (condizioni al contorno)	$EB: = SW + LW (T_s) + H (T_s) + ET (T_s, \theta)$	W m ⁻²	HNW - E	m s ⁻¹
S	S_e	W m ⁻³	$\rho_w S_w$	s ⁻¹

© AINEVA

Tab. 2 - Descrizione delle variabili usate nelle equazioni di conservazione.

Termine	Descrizione	U.d.M.
U	Energia interna	J m ⁻³
EB	Bilancio di energia superficiale	W m ⁻²
$G = \lambda \nabla T$	Flusso di conduzione del calore	W m ⁻²
$J_w = -K$	Flusso di massa dovuto allo scioglimento nivale	m s ⁻¹
$J_e = \rho_w (L_f + c_w T) J_w$	Flusso di avvezione dovuto all'apporto energetico dallo scioglimento nivale	W m ⁻²
λ	Conducibilità termica della neve	W m ⁻¹ K ⁻¹
ρ_i	Densità del ghiaccio	Kg m ⁻³
ρ_w	Densità dell'acqua	Kg m ⁻³
c_i	Conducibilità termica del ghiaccio	J Kg ⁻¹ K ⁻¹
c_w	Conducibilità termica dell'acqua	J Kg ⁻¹ K ⁻¹
L_f	Calore latente di fusione dell'acqua	J Kg ⁻¹
θ_i	Contenuto volumetrico del ghiaccio	-
θ_w	Contenuto volumetrico dell'acqua	-
K	Conducibilità idraulica della neve	m s ⁻¹
SW	Radiazione ad onda corta netta	W m ⁻²
LW	Radiazione ad onda lunga netta	W m ⁻²
H	Flusso di calore sensibile	W m ⁻²
ET	Flusso di calore latente	W m ⁻²
E	Flusso di evaporazione	m s ⁻¹
T	Temperatura della neve	
T _s	Temperatura superficiale	

© AINEVA

alpi vicentine, fino a 1100 mm/a sui lembi più settentrionali delle Dolomiti.

Nella zona prealpina l'altezza media del manto nevoso, calcolata su 23 anni, dal 1990 al 2013, raggiunge il suo massimo nella prima decade di marzo con 135 cm a Campomolon (1735 m s.l.m.) e 93 cm a Campogrosso (1464 m s.l.m.). Nelle Dolomiti, nella stessa decade, si raggiungono valori medi simili a quote ben più elevate (133 cm a Monti Alti di Ornella, 2250 m, 1985-2013). Per quanto riguarda le temperature si citano, a titolo di esempio, quattro stazioni poste alla stessa quota (1000 m circa); Boscochiesanuova, nel veronese, ha una temperatura media annua di 9,0 °C (2000-2013), Asiago 6,6 °C (1997-2013), Caprile (Alleghe) 6,7°C (1984-2013) e Santo Stefano di Cadore 6,4°C (1985-2013). Le temperature, più che dalla dislocazione geografica, sono influenzate dalla conformazione morfologica del territorio, che determina, specie in periodo invernale, le ore di soleggiamento e, spesso, a fondovalle, la comparsa dell'inversione termica.

Per le simulazioni sono stati utilizzati i dati meteorologici provenienti da 40 stazioni, di cui 30 comprendenti l'altezza del manto nevoso. I dati meteorologici comprendono la temperatura (TA), l'umidità (RH) e la pressione (P) dell'aria, la velocità (VW) e la direzione del vento (DV), la radiazione globale incidente (ISWR) e la precipitazione (HNW), nonché i valori di HS (ove presenti) per determinare i valori misurati di HNW in occasione degli eventi nevosi.

Per tener conto dell'eterogeneità topografica del territorio sono state date in ingresso al modello le mappe di elevazione, esposizione, pendenza e fattore di vista del cielo. In Fig. 3 è riportata l'ubicazione delle stazioni nivo-meteorologiche utilizzate in tutto il dominio di calcolo.

RISULTATI

SnowMaps fornisce informazioni sull'evoluzione del manto nevoso sotto forma di mappe, ossia immagini del territorio in cui a ciascun punto viene associato un colore, la cui decodifica (tramite legenda) permette di conoscere l'altezza della neve ad una particolare data. Ad esempio,

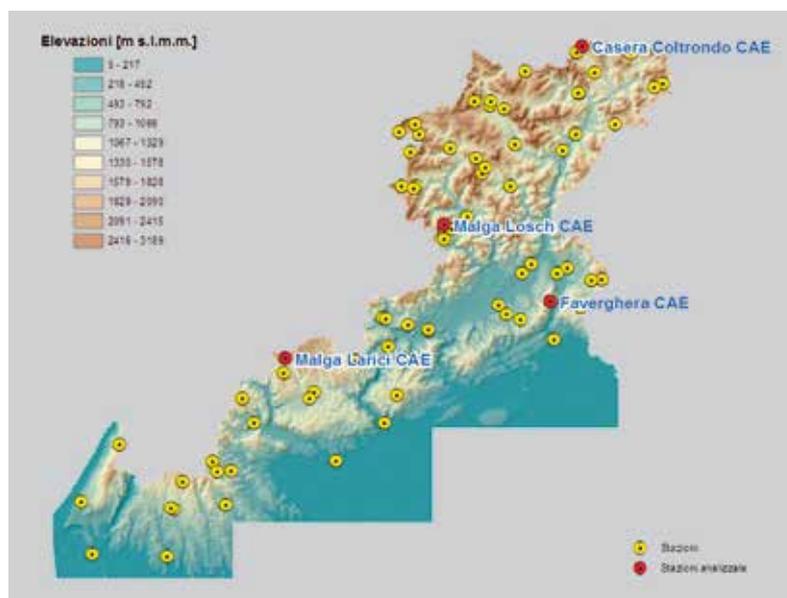


Fig. 3 - Ubicazione delle stazioni nivo-meteorologiche.

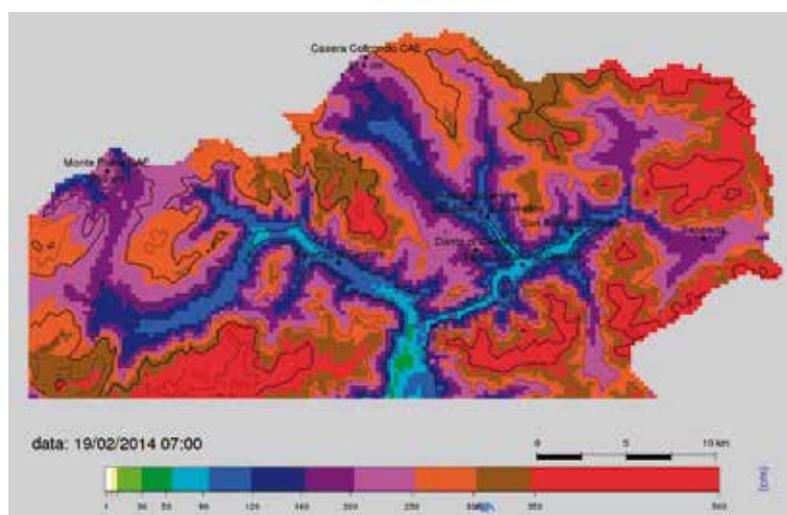


Fig. 4 - Esempio di mappa dell'altezza del manto nevoso del Comelico (BL).

la Fig. 4 riporta la mappa dell'altezza del manto nevoso (HS) del Comelico (BL) relativa alla data del 19 febbraio 2014. Dalla mappa si può evincere che nella località Sappada sono presenti circa 160-200 cm di neve mentre ad Auronzo circa 100 cm. La mappa riporta inoltre le curve di livello attraverso le quali si percepisce l'altezza della neve presente nelle valli e nei versanti alle varie quote.

I risultati del modello, nei punti corrispondenti alle stazioni nivometriche, sono stati poi confrontati con i dati misurati per permettere un confronto visivo. Infine, è stata calcolata la somma delle deviazioni (*root mean squared deviation* - RMSD) per ottenere un indice identificativo della bontà della simulazione, sia in termini assoluti che relativi (percentuali).

Nelle Fig. 5-7 sono riportati, a titolo di esempio, dei confronti visivi misurato (li-

nea rossa) - modellato (linea nera) fra le altezze neve misurate e simulate nelle tre stagioni invernali 2011-2012, 2012-2013 e 2013-2014 per quattro stazioni dislocate sul territorio montano veneto. Due sono situate in zona dolomitica, Casera Coltrondo sita al confine con l'Alto Adige a nord est del Passo di Monte Croce Comelico, a quota 1960 m s.l.m. e Malga Losch, posta nelle Dolomiti meridionali, alla base dell'Agner, a quota 1735 m s.l.m.; le altre in zona prealpina, Faverghera, a 1605 m s.l.m., in quella orientale, sulla dorsale fra le province di Belluno e Treviso, Malga Larici a 1605 m s.l.m. sull'altopiano di Asiago.

La prima stagione è stata poco nevosa, mentre l'ultima ha riportato quantitativi nevosi quasi eccezionali. Si può notare come, in tutte le stagioni, i valori simulati siano stati abbastanza simili a quelli registrati, con buona simulazione sia dei processi di

Fig. 5 - Confronti per 4 stazioni fra le altezze neve misurate (linea rossa) e simulate (linea nera) per la stagione 2011-12.

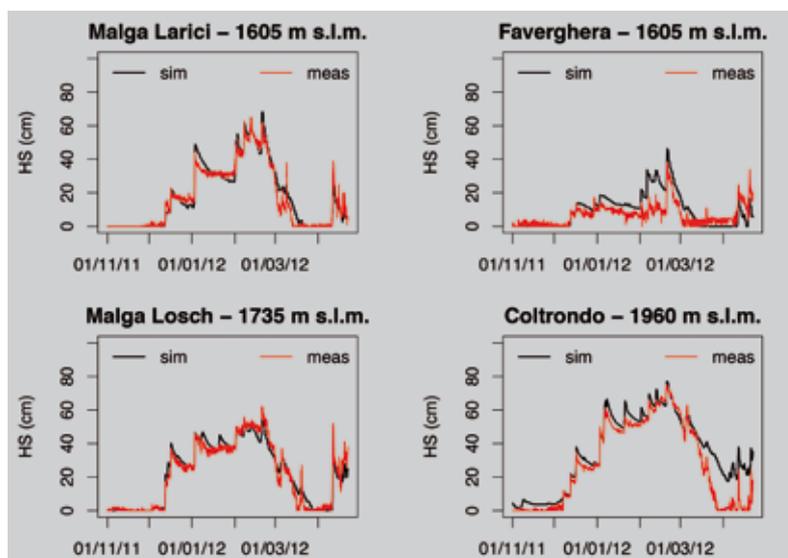


Fig. 6 - Confronti per 4 stazioni fra le altezze neve misurate (linea rossa) e simulate (linea nera) per la stagione 2012-13.

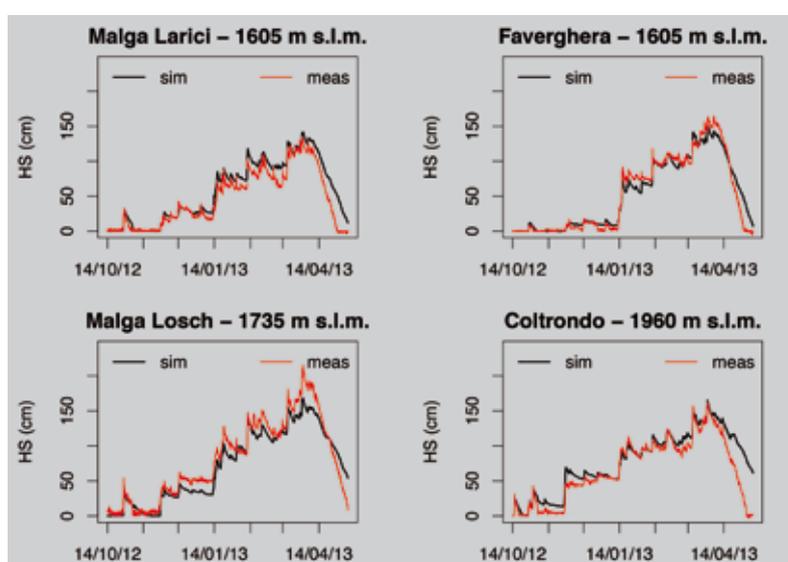
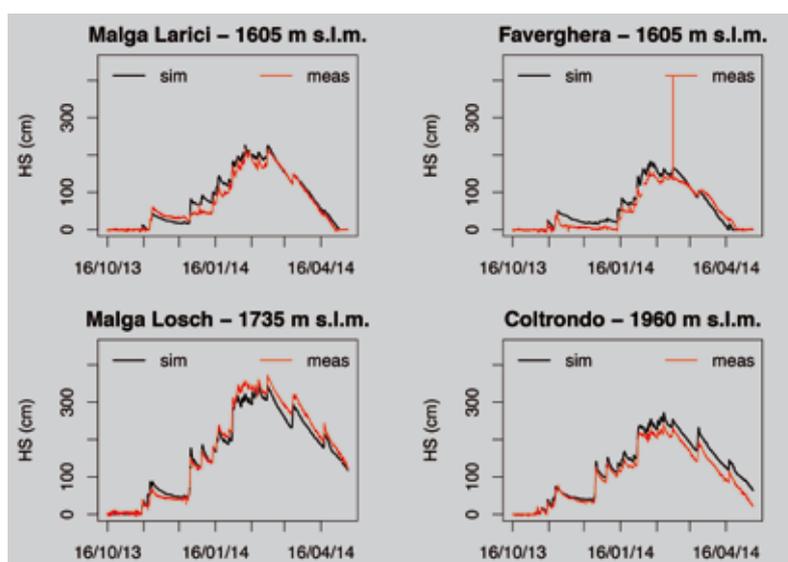


Fig. 7 - Confronti per 4 stazioni fra le altezze neve misurate (linea rossa) e simulate (linea nera) per la stagione 2013-14.



accumulo che di quelli di fusione primaverile, in particolare nell'ultima stagione invernale. L'analisi quantitativa (Fig. 8-9), sviluppata per le medie giornaliere, per le quattro stazioni negli ultimi due anni rileva

un RMSD inferiore ai 20 cm (pari a meno del 15% relativo), tranne per Malga Losch, dove nell'ultimo anno, particolarmente nevoso, si sale a circa 35 cm, corrispondenti ad un RMSD relativo di circa il 25%.

In Fig. 10 è riportata la correlazione fra l'RMSD assoluto di tutte le stazioni e la quota, al fine di verificare se la componente altitudinale è importante nella generazione dell'errore. Dal grafico si può notare come, in realtà, in ambiente veneto, siano la dislocazione geografica e la morfologia del territorio a influenzare maggiormente l'errore del modello, in particolare in ambito prealpino, dove alcune stazioni del vicentino (Campogrosso e Campomolon) risultano essere eccezionalmente nevose e difficilmente simulabili.

UTILIZZO PRATICO DELLE INFORMAZIONI

Il modello è stato utilizzato presso il Centro Valanghe Arabba a partire dalla stagione invernale 2011-2012. Le mappe, realizzate a scadenza quindicinale, sono state analizzate e confrontate con la situazione reale, monitorata tramite le 16 stazioni nivo-meteorologiche in quota, nonché mediante i dati di altezza neve forniti da osservatori volontari distribuiti sul territorio.

Si è trattato di un continuo feedback fra la componente modellistica e gli operatori nivologici sul territorio che ha permesso un continuo affinamento dei vari processi simulati dal modello SnowMaps.

Le mappe di altezza del manto nevoso sono risultate progressivamente più verosimili alla situazione reale, tanto da poter costituire un utile supporto alla previsione valanghe in quanto hanno consentito di integrare le varie informazioni derivanti da osservazioni dirette sul territorio, generalmente di carattere puntuale e non sempre coprenti tutte le fasce altitudinali, con dati spazializzati che hanno fornito un quadro più esauriente della distribuzione del manto nevoso sull'intero territorio.

CONCLUSIONI

SnowMaps rappresenta un innovativo sistema di calcolo che, sfruttando la rete esistente di nivometri e stazioni meteo, permette di calcolare da remoto l'altezza e l'equivalente in acqua della neve in tempo reale, sia a scala locale che regionale. Rispetto ad un approccio modellistico di

tipo statistico, SnowMaps offre i seguenti vantaggi:

- consente una migliore rappresentazione dell'eterogeneità della neve in accordo alla topografia e alla climatologia del territorio, fondamentale in ambiente montano;
- non occorrono necessariamente misure di altezza e densità della neve per elaborare le stime in quanto sfrutta i dati meteorologici esistenti, permettendo quindi di ridurre i costi del rilievo dati (es. campagne di misura dedicate, rilievo densità, ecc.);
- permette di ottenere stime sull'evoluzione della neve anche in tarda primavera, quando le stazioni nivometriche manuali sono generalmente sprovviste di dati, fornendo una stima dell'equivalente in acqua della neve in alta quota;
- permette di ottenere informazioni accessorie, quali il contenuto d'acqua del terreno o la precipitazione efficace (somma algebrica di pioggia, evapotraspirazione e scioglimento nivale), importante per la gestione delle piene.

Oltre ad essere diventate un prezioso strumento operativo, le elaborazioni di SnowMaps sono state rese disponibili al pubblico sul sito dell'ARPAV, a supporto delle attività di outdoor degli utenti della montagna durante il periodo invernale e anche degli operatori che frequentano il territorio veneto per scopi lavorativi. Infine, in prospettiva, SnowMaps potrebbe divenire fondamentale al fine di ridurre la quantità di rilievi in campo e quindi le spese a carico delle strutture operative sul territorio.

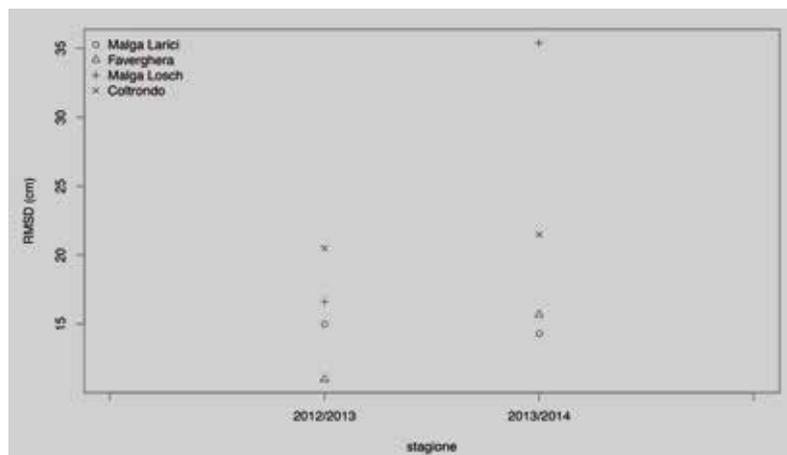


Fig. 8 - RMSD assoluto del valore medio giornaliero per le 4 stazioni.

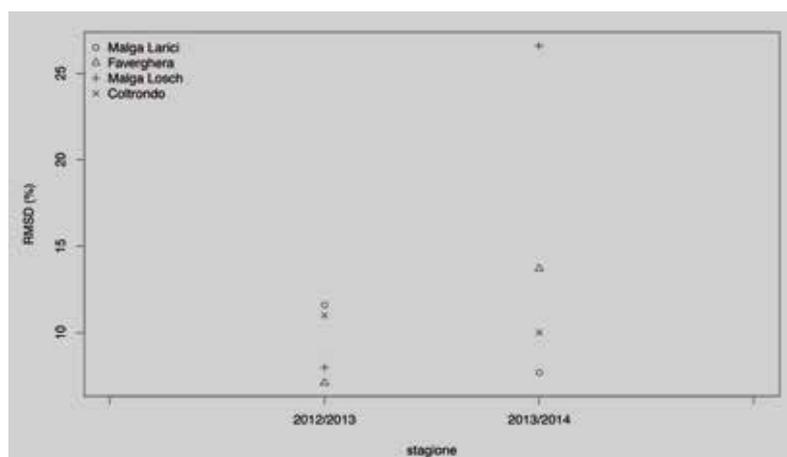


Fig. 9 - RMSD relativo del valore medio giornaliero per le 4 stazioni.

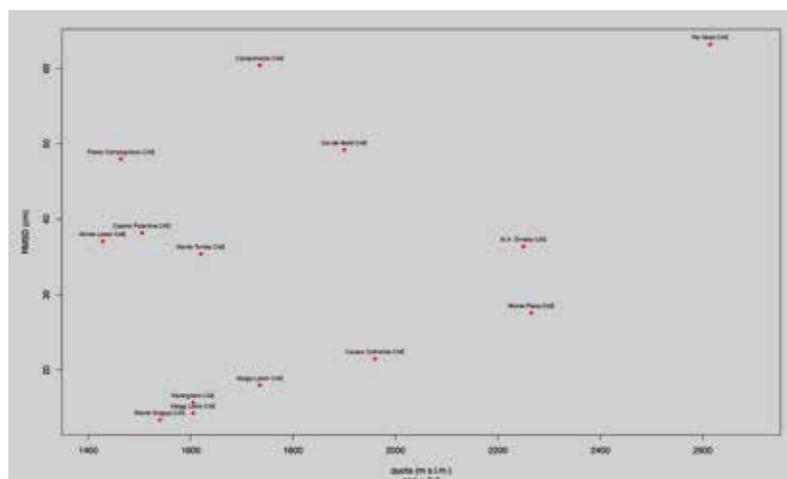


Fig. 10 - Correlazione fra RMSD assoluto e quota.

Bibliografia

- Bavay, M. and Egger, T. (2014): Meteolo 2.4.2: a preprocessing library for meteorological data, Geosci. Model Dev. Discuss., 7, 3595–3645, doi:10.5194/gmd-7-3595-2014.
- Comai T. (2014). Analisi spaziale e temporale delle precipitazioni nevose nelle Alpi Italiane, tesi di laurea magistrale in ingegneria per l'ambiente ed il territorio, Università degli studi di Trento.
- Dall'Amico, M., Endrizzi, S., and Rigon, R. (2011). Snow mapping of an alpine catchment through the hydrological model GEOTop. In Proceedings Conference Eaux en montagne, Lyon 16-17 mars, pages 255–261. Société hydroélectrique de France.
- Dall'Amico, M., Endrizzi, S., Gruber, S., and Rigon, R. (2011). GEOTop Users Manual. Version 1.0, Technical report, Mountaineering Srl, Siemensstr. 19 Bolzano, Italy.
- Dickinson R. E., A. Henderson-Sellers, and P. J. Kennedy (1993). Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Land Model. Technical report, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA.
- 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, doi:10.5194/gmd-7-2831-2014.
- Foppa, N., A. Stoffel, and R. Meister (2005). Snow depth mapping in the Alps: Merging of in situ and remotely-sensed data, EARSeL eProceedings, 4 (1), 119–129.
- Jordan, R., Andreas, E. L., and Makshtas, A. P. (1999). Heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4, J. Geophys. Res., 104, 7785–7806.
- Larcher F.; Allamano P.; Claps P. (2009). Estimation of the heated rain gauge error at a high-elevation site in the Italian Alps. Relazione tecnica, Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino.
- Meyers, T. and Dale, R. (1983). Predicting daily insolation with hourly cloud height and coverage., Journal of Climate and Applied Meteorology, 22, 537–545, 1983.
- Sevruck B. (1983). Correction of measured precipitation in the Alps using the water equivalent of new snow. Nordic Hydrology, 14(2), 49–58.
- Stoffel, A., N. Foppa, and N. Raderschall (2006). Mapping snow depth in the Alps, ISSW Proceedings, Telluride, CO, USA.

MONITORAGGIO dell'EQUIVALENTE in ACQUA della NEVE da DATI MODIS

il caso studio dell'alto Piave (Alpi italiane orientali)

Paola Cianfarra

Università degli Studi Roma Tre,
Dipartimento di Scienze, Roma
paola.cianfarra@uniroma3.it

Mauro Valt

ARPAV, Servizio Neve e
Valanghe di Arabba, Arabba BL

Le informazioni sulla variabilità spazio-temporale della risorsa idrica derivante dallo scioglimento nivale (Snow Water Equivalent, SWE) sono di fondamentale importanza sia per le stime del bilancio idrico che per i processi geologici, come la gestione del rischio idrogeologico. In questo lavoro viene presentata una metodologia per la stima dello SWE basata sia sull'analisi di dati multispettrali (immagini satellite MODIS) sia di misure dirette a terra. La metodologia proposta è stata messa a punto attraverso il monitoraggio della copertura nevosa nella parte alta del bacino del Piave (Alpi italiane orientali), nei quattro anni compresi tra il 2010 ed il 2013. In particolare è stata studiata la variabilità spazio-temporale dell'estensione della copertura nevosa e della densità della neve alla scala del bacino analizzato al fine di determinare lo SWE dell'area di studio.



INTRODUZIONE

Lo studio della variabilità spaziale e temporale della risorsa idrica derivante dallo scioglimento nivale (Snow Water Equivalent, SWE) è di fondamentale importanza per la stima del bilancio idrico di una regione. Molte comunità, specialmente in aree montuose, si basano sulla risorsa idrica derivante dallo scioglimento nivale per la produzione di energia idroelettrica, per l'irrigazione dei campi, per la distribuzione di acqua potabile. Una corretta stima consente inoltre un'ottimale gestione e prevenzione del rischio idrogeologico. Il monitoraggio dello scioglimento nivale è importante anche per la valutazione del suo impatto sui flussi primaverili ed estivi nei bacini pesantemente alimentati da neve (Ranzi et al., 1999), sugli ecosistemi d'acqua dolce e sulle falde idriche (Coughlan and Running, 1997).

Nella comunità scientifica esiste un acceso dibattito sul rapporto tra variabilità dell'estensione della copertura nevosa e cambiamenti climatici, sia a scala locale che regionale (Valt e Cianfarra, 2010).

È inoltre largamente riconosciuta l'importanza del monitoraggio di questa variabilità (Hall et al., 1995).

La neve è uno dei parametri fondamentali per il bilancio radiativo terrestre (Foster and Chang, 1993), sia per la sua elevata albedo che per la notevole estensione areale (il 49% dell'emisfero settentrionale è coperto da neve durante la stagione invernale, Brown, 2000).

Inoltre la neve al suolo influenza anche i processi biologici, chimici e geologici (Walsh et al., 1985; Robinson and Kukla, 1985; Allen and Walsh, 1993; Robinson et al., 1993).

I processi di accumulo, ridistribuzione e

fusione della neve dipendono da numerosi fattori, tra cui la gravità, il vento e lo scambio di calore che avviene all'interfaccia tra neve ed aria in superficie e tra neve e terreno in profondità (Elder et al., 1991). Di conseguenza la neve mostra una significativa variabilità nello spazio e nel tempo (Yuang & Woo, 1999) e la quantificazione di tale variabilità alla scala locale e regionale è di primaria importanza per la valutazione della risorsa idrica.

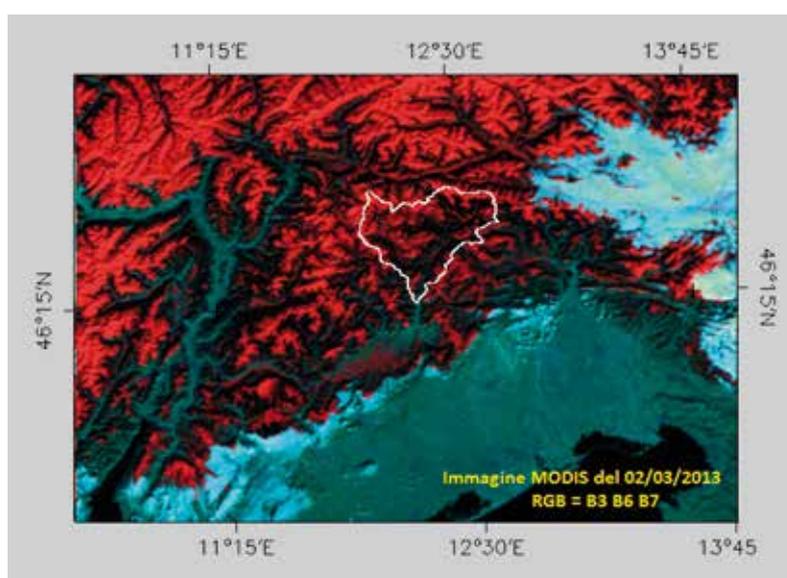
Un aspetto largamente investigato è la stima dello SWE a partire da misure puntuali (Elder et al., 1991). Tale stima infatti richiede l'uso di metodi statistici che consentono di prevedere i valori di SWE in aree dove non esistono misure dirette, e la valutazione dell'affidabilità del valore predetto (Carroll and Cressie, 1997). Tuttavia la copertura nevosa può essere monitorata anche da dati telerilevati con costi bassi. Le immagini da satellite attualmente disponibili rappresentano un buono strumento per derivare mappe di innevamento e per aiutare la stima dello SWE in aree dove non sono disponibili misure dirette.

Nel presente lavoro viene descritto tale approccio basato sul telerilevamento.

La metodologia è stata messa a punto nella parte alta del bacino idrografico del fiume Piave, localizzato nella parte orientale delle Alpi italiane, e comprende: 1. l'identificazione dell'estensione areale della copertura nevosa (Snow Covered Area, SCA) a partire da immagini da satellite MODIS; 2. il calcolo statistico dell'altezza (HS) media del manto nevoso dalle disponibili reti di monitoraggio; 3. il calcolo del valore medio di densità della neve (ρ) derivato dall'analisi automatica di migliaia di profili nivologici e serie storiche.

Infine lo SWE per intervalli di altitudine viene calcolato come il prodotto della SCA per il valore medio di HS per ρ . Per validare l'approccio proposto le stime di SWE derivate dal telerilevamento sono confrontate con quelle calcolate sulla base di misure dirette effettuate sul terreno e pubblicate in appositi report bisettimanali (www.arpa.veneto.it).

Fig. 1 - Ubicazione dell'area investigata su immagine MODIS del 02/03/2013 rappresentante la parte orientale dell'arco alpino in falsi colori. Combinazione di bande RGB = B3 B6 B7. I toni rossi nell'immagine si riferiscono alle aree innevate.



AREA DI STUDIO

Il presente studio si concentra nella parte alta del bacino del fiume Piave, uno dei maggiori fiumi che scorre nell'Italia nord-orientale (Figura 1). Tale fiume ha origine sulle Alpi orientali e scorre verso il mar Adriatico dove sfocia a nord est di Venezia, copre un'area di 4037 km² nei limiti amministrativi della regione Veneto. I fiumi Boite e Ansiei, ed i laghi Comelico, Santa Caterina e Cadore (misurati presso Valle di Cadore, Vodo di Cadore, Pieve di Cadore, Santa Caterina and Comelico) sono i sotto-bacini presi in considerazione nel presente studio.

Questi sono tipici bacini montuosi caratterizzati da quote che superano i 3000 m, pendenze elevate (valore medio 21,6%), e valli sospese. Hanno simili caratteristiche fisiografiche e di copertura vegetale. La quota media è di circa 1618 m e l'estensione areale di 1375 km quadrati.

I bacini studiati sono caratterizzati da un notevole apporto di risorsa idrica derivante dalla fusione della neve e sono quasi completamente coperti da neve durante l'intera stagione invernale.

La risorsa idrica derivante dalla fusione nivale nel periodo primaverile - estivo viene utilizzata per irrigazione, produzione di energia idroelettrica, per il sostentamento degli ecosistemi di acqua dolce.

Quindi le informazioni sulla quantità d'acqua contenuta nella copertura nevosa e sulla sua fusione in primavera sono essenziali per le comunità di questo bacino. Infatti, l'area è particolarmente ben monitorata e oltre 30 stazioni di misura sono dislocate nel territorio e sono gestite da diverse istituzioni, come ARPA ed ENEL. In particolare nel periodo di fusione (tra il 1° febbraio ed il 1° giugno) viene svolta una campagna di misure dedicate al calcolo dello SWE, effettuate con frequenza bisettimanale, che include la misura dello spessore del manto nevoso e, in particolari siti, anche la stima della sua densità presso stazioni automatiche o manuali dislocate tra i 600 m e i 2630 m.

I valori puntuali misurati vengono poi assegnati alle zone da cui la misura deriva e sono utilizzati per il calcolo dello SWE

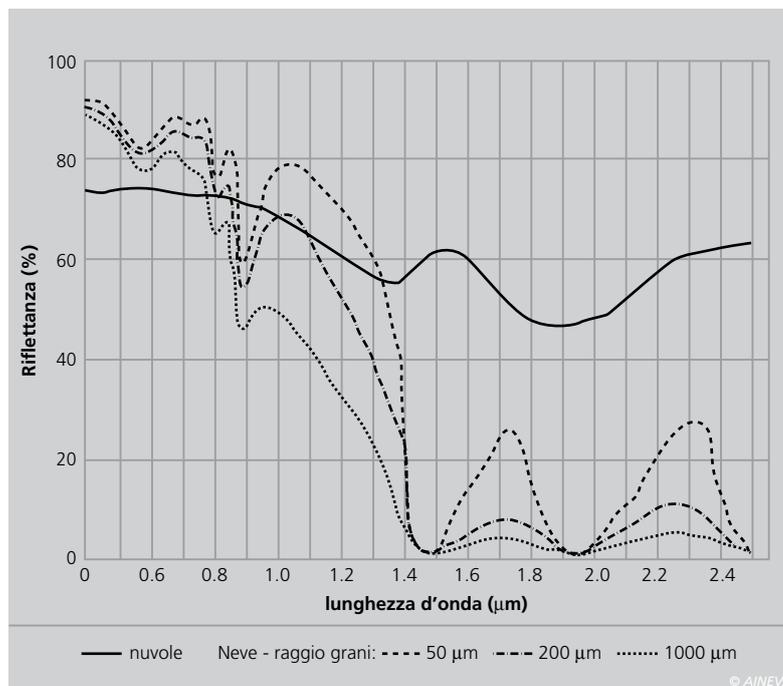


Fig. 2 - Firma spettrale di diversi tipi di neve e delle nuvole.

come prodotto tra HS, la densità media della neve e la sua estensione areale nella zona. Infine lo SWE alla scala dell'intero bacino è calcolato come il contributo dello SWE di ciascuna zona analizzata. Le stime di SWE così effettuate sono poi pubblicate su report bisettimanali della risorsa idrica della Regione Veneto (www.arpa.veneto.it).

È importante notare che un'accurata stima dello SWE dipende dalla disponibilità di personale qualificato sia per la misura sul terreno di H_s e ρ , che per la manutenzione delle stazioni automatiche per il monitoraggio della neve.

Per questa ragione si sta cercando di trovare metodologie alternative, a basso costo ma efficaci, per monitorare la variabilità temporale e spaziale della neve. La crescente disponibilità di immagini satellitiche multispettrali, in tempo quasi reale e con moderata risoluzione spaziale (250 m – 500 m) rappresenta uno strumento promettente per questo scopo.

TELERILEVAMENTO DELLA COPERTURA NEVOSA

I sensori satellitari sono in uso per il monitoraggio dell'estensione della copertura nevosa a scala continentale ed emisferica dal 1966 quando i primi satelliti furono messi in orbita. Questa prima generazione

di satelliti (NOAA/AVHRR) permise di mappare l'estensione areale della copertura nevosa usando sensori che lavoravano nelle bande del visibile, dell'infrarosso riflesso e dell'infrarosso termico con una risoluzione spaziale di circa 1 km/pixel (Matson et al, 1986). Anche sensori a microonde passive sono stati utilizzati con successo dal 1978 per le misure della copertura nevosa con una minore risoluzione spaziale (decine di km) (Hall et al., 1995; Derkens et al. 2002).

Altri studi di mappatura della neve sono stati fatti a scala meno regionale o locale usando dati Landsat (Rango et al., 1982; Vogel, 2002). Tuttavia la bassa risoluzione temporale di questo set di dati e la possibile copertura nuvolosa preclude e limita l'utilizzo di immagini Landsat.

Recentemente nuove tecniche basate sull'utilizzo di webcam si stanno sviluppando per il monitoraggio della copertura nevosa (Salvatori et al., 2011).

Il MODIS è uno spettrometro a scansione a bordo dei satelliti *Terra* ed *Aqua* che acquisisce in 36 bande spettrali dal visibile all'infrarosso termico (Barnes et al., 1998).

La risoluzione spaziale del MODIS varia in funzione delle bande spettrali da 250 m fino ad 1 km.

Le immagini MODIS sono distribuite gratuitamente dalla NASA poche ore dopo la

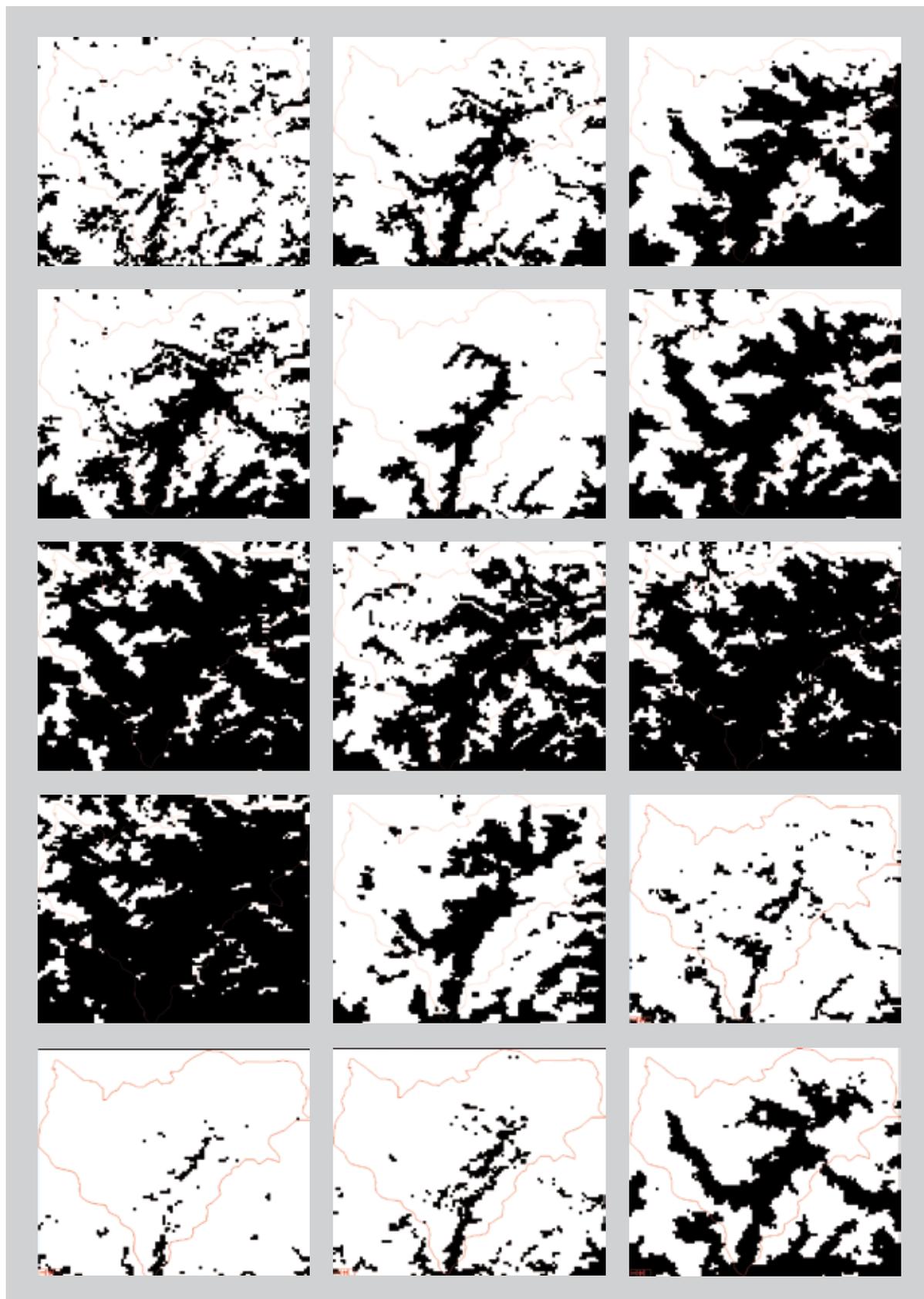
loro acquisizione (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>). Per queste caratteristiche le immagini multispettrali MODIS rappresentano attualmente il miglior compromesso tra risoluzione spaziale e temporale (sono

disponibili immagini giornaliere) per il monitoraggio in tempo quasi reale della copertura nevosa.

La neve ha tipicamente bassa riflettanza nell'infrarosso alla lunghezza d'onda di $1.6 \mu\text{m}$ (corrispondente alla banda 4

del MODIS) ed una relativa alta riflettanza (90-100%) nella parte visibile dello spettro (banda 6 del MODIS). Le nuvole invece sono caratterizzate da alta riflettanza a $1.6 \mu\text{m}$ (vedi Figura 2). Tale differenza è utilizzata per identificare

Fig. 3 - Le 15 mappe di innevamento durante la stagione della fusione nivale derivate da elaborazione e classificazione di immagini MODIS. In bianco le aree innevate.



pixel caratterizzati da copertura nevosa in immagini satellite (Hall et al., 1995). Il Normalized Difference Snow Index (NDSI), definito come $(B4-B6)/(B4+B6)$ per i dati MODIS, con l'utilizzo di un certo valore di soglia (generalmente maggiore di 0,4, in accordo con gli Autori), consente di identificare la neve e separare la neve dalle nuvole nelle immagini satellite. Sfortunatamente non esiste un valore unico di soglia per il NDSI, ma valori affidabili per il *mapping* della copertura nevosa possono essere stabiliti in funzione delle caratteristiche fisiografiche della regione investigata, della presenza e del tipo di vegetazione e della stagione. Laghi e fiumi possono avere valori di NDSI nel range di quelli tipici della neve, tuttavia l'acqua ha una bassa riflettanza nel vicino infrarosso (banda 2 del MODIS) e per questa sua caratteristica può essere discriminata dalla neve.

Dunque nell'uso di procedure automatiche per il *mapping* della neve con dati MODIS, viene generalmente imposto un valore soglia anche per la riflettanza nella banda 2.

Infine, per evitare che pixel scuri come quelli caratterizzati dalla presenza di abeti, vengano erroneamente classificati come neve, anche per la banda 4 viene scelto un valore di soglia (Hall, 2002).

In questo studio sono analizzate 15 immagini MODIS con risoluzione spaziale di 500 m/px (immagini L1B, MOD02HKM) relative alla stagione di fusione compresa tra febbraio ed aprile nei 4 anni tra il 2010 ed il 2013.

Sono state selezionate immagini con bassa copertura nuvolosa e acquisite in date il più possibile vicine alle campagne di misura a terra per il calcolo di SWE (vedi figura 3).

Sono state elaborate immagini della riflettanza al top dell'atmosfera (Top of atmosphere reflectance, TOA) ed il processing comprende diversi passaggi. Prima di tutto è stata effettuata una correzione geometrica e georeferenziazione al sistema UTM zona 32 N, WGS 84, per eliminare le distorsioni presenti nelle immagini scaricate dall'ftp della NASA.



Data acquisizione immagine (gg mm anno)	soglia NDSI >	Soglia B2 >	Soglia B4 >
01 02 2010	0.35	0.04	0.04
01 03 2010	0.3	0.05	0.05
02 04 2010	0.25	0.05	0.05
31 01 2011	0.25	0.03	0.03
01 03 2011	0.2	0.01	0.01
02 04 2011	0.2	0.04	0.04
18 04 2011	0.2	0.01	0.01
03 02 2012	0.35	0.05	0.05
03 03 2012	0.2	0.01	0.01
26 03 2012	0.25	0.04	0.04
14 04 2012	0.2	0.01	0.01
04 02 2013	0.35	0.03	0.03
02 03 2013	0.3	0.03	0.03
22 03 2013	0.2	0.01	0.01
14 04 2013	0.2	0.01	0.01

Tab. 1 - Un pixel nell'immagine MODIS viene classificato come "neve" se sono contemporaneamente soddisfatte le tre condizioni di valori maggiori delle soglie riportate in tabella.

Poi è stata ritagliata una sottoscena relativa alla regione investigata compatibile con il modello digitale del terreno (DEM) disponibile per le successive stime di SWE per intervalli di altitudine.

È stato calcolato il NDSI ed infine è stato applicato un albero decisionale basato sul NDSI, sulla banda 2 e la banda 4 per la classificazione della neve. L'identificazione dei valori soglia è la parte più delicata del lavoro di classificazione delle immagini poiché tali valori dipendono, nell'area investigata, da molti fattori come le caratteristiche fisiografiche locali, gli intervalli di altitudine, le ombre, la densità ed il tipo di vegetazione e la stagione.

I valori soglia utilizzati nel presente lavoro sono riportati nella tabella 1.

La selezione dei valori soglia è stata assistita dalla fotointerpretazione ed ana-

lisi delle immagini del bacino derivanti da webcam relative allo stesso giorno di acquisizione dell'immagine satellite analizzata e, dove possibile, della stessa fascia oraria.

Le mappe di innevamento ottenute sono state confrontate per conferma con le misure puntuali sul terreno nella regione investigata. Il confronto tra le mappe di SCA ed il DEM dell'area studiata ha permesso di ottenere la SCA per intervalli di altitudine.

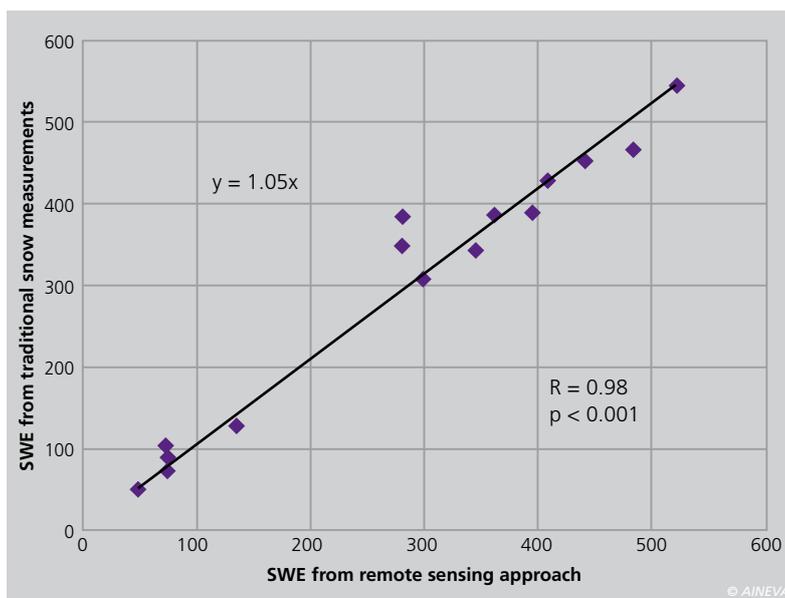
SWE DAL TELERILEVAMENTO

Per stimare lo SWE è necessario conoscere lo spessore HS, la densità ρ_s e l'estensione SCA della copertura nevosa.

Nel presente lavoro la SCA è stata calcolata attraverso l'analisi delle immagini



Fig. 4 - Confronto tra lo SWE calcolato con l'approccio del telerilevamento e lo SWE derivato dalle tradizionali misure sul terreno presso le stazioni manuali o automatiche.



MODIS, come descritto nel precedente paragrafo.

La stima della densità del manto nevoso è complessa in quanto questo delicato parametro dipende dalle condizioni climatiche e dalle caratteristiche fisiografiche dell'area investigata (Elder et al., 1991). Inoltre il suo monitoraggio richiede tempo e solo poche misure dirette di densità della neve sono disponibili. Quindi sono state sviluppate relazioni empiriche o semi-empiriche tra la densità della neve e le caratteristiche geomorfologiche e climatiche di un'area (Elder et al. 1991).

Tuttavia alcuni autori considerano la densità della neve come un parametro conservativo e nelle loro stime di SWE utilizzano semplicemente la media valori di densità misurati.

In questo lavoro invece è stato usato un originale approccio statistico basato sull'analisi di serie storiche (1985-2012) in cui le misure nivologiche effettuate nella parte orientale delle Alpi italiane sono classificate sulla base dello spessore della neve e della stagione (Valt & Moro, 2009) per determinare in ogni area la densità della neve relativa ad un strato

di neve con lo stesso contenuto in acqua, la stessa forma dei cristalli e la stessa durezza (Valt & Moro, 2009).

In questo modo è possibile derivare la densità anche di strati di neve per cui non è stata effettuata la misurazione diretta. L'analisi automatica di oltre 10.000 profili nivologici da 50 stazioni di misura attraverso il software YETI NIK (Aineva, Valt 2012b) ha permesso di valutare la densità media della neve per diverse classi di spessore, per intervalli di altitudine e per stagione lì dove non erano disponibili misure dirette.

Questo ha dunque consentito di tenere in considerazione la variabilità spaziale della densità della neve legata a caratteristiche geomorfologiche e climatiche del bacino. Lo SWE nell'area di studio deriva dal contributo cumulativo dello SWE_i derivante da ogni classe di altitudine (i):

$$SWE = \sum_{i=1}^n SWE_i$$

Dove SWE_i=SCA_i·HS_i; ρ_s/ρ_w in cui n denota il numero della classe di altitudine, HS_i è la densità media del manto nevoso calcolata considerando le misure di densità della neve nella classe i da un totale di 34 stazioni di misura, ρ_s è la densità della neve calcolata automaticamente dalle serie storiche nella classe i , e ρ_w è la densità dell'acqua.

VALIDAZIONE DEL METODO BASATO SUL TELERILEVAMENTO

Per la validazione del metodo proposto basato sull'analisi di immagini satellite MODIS e dati a terra, lo SWE calcolato per i sottobacini analizzati nella parte alta del fiume Piave è stato confrontato con le tradizionali misure dirette di SWE fatte presso le stazioni di misura automatica o manuale attualmente utilizzate dalle amministrazioni pubbliche per gestire la risorsa idrica.

Queste stime tradizionali di SWE sono disponibili e pubblicati online nei report bisettimanali sulla risorsa idrica della regione veneto (www.arpa.veneto.it).

Il confronto fra le due stime di SWE è stato

effettuato tra coppie di misure relative alla stessa data o con una massima differenza temporale di sei giorni.

Questa differenza temporale è riconducibile alla disponibilità di immagini satellite con ridotta copertura nuvolosa in concomitanza con le misure a terra. La figura 4 mostra che i due set di SWE sono caratterizzati da una forte correlazione lineare con coefficiente di correlazione $R=0,98$ e $p<0,001$ ($DOF=13$).

L'equazione di correlazione lineare è caratterizzata da un coefficiente angolare di 1,05 e intercetta 0 che conferma l'affidabilità della stima di SWE da dati satellite in tempo quasi reale.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro viene presentata una metodologia per monitorare la variabilità della copertura nevosa e per la stima dello SWE nella parte alta del bacino del Piave, Alpi orientali. La metodologia è basata sul monitoraggio di 4 anni (2010-2013) della copertura nevosa attraverso l'analisi di immagini satellite multi spettrali (MODIS) e dati a terra.

L'approccio del telerilevamento ha permesso di derivare la SCA per intervalli di altitudine attraverso l'uso di alberi decisionali basati sul computo del miglior valore soglia da applicare al NDSI, e alle bande MODIS 4 e 2.

Valori decrescenti del NDSI sono stati identificati da Febbraio ad Aprile nelle quattro stagioni primaverili analizzate.

Questo testimonia il ruolo cruciale svolto dalla stagione della fusione nella valutazione del miglior valore soglia del NDSI per il mapping della copertura nevosa. L'analisi statistica di migliaia di profili da 50 stazioni attraverso il software YETI NIK ha permesso di valutare la densità della neve per classi di spessore, per intervalli di altitudine e per stagione dove misure dirette non erano disponibili. Infine lo SWE del bacino è stato calcolato come il contributo cumulativo dello SWE di ogni classe di altitudine che a sua volta risulta dal prodotto della SCA e del valore medio di HS e della densità media. Il calcolo prende in considerazione la variabilità spaziale e temporale della SCA e della densità della neve che dipende dalle caratteristiche geomorfologiche e climatiche del bacino. L'approccio presentato basato sul remote sensing per valutare la SCA da immagini satellite in tempo quasi reale, assieme alle misure dirette di spessore del manto nevoso e l'analisi automatica di serie storiche per derivare la densità, si è rivelato uno strumento economico ed efficiente per monitorare la variabilità spaziale e temporale della copertura nevosa e dello SWE alla scala del bacino dell'alto Piave. Poiché la disponibilità di dati MODIS risale al 2000 e grazie alla presenza di lunghe serie storiche per l'intero arco Alpino, è auspicabile applicare la presente metodologia ad una scala temporale più ampia e all'intera catena alpina per evidenziare i trend climatici degli ultimi 15 anni.



Bibliografia

- Allen T.R. and Walsh S.J. (1993) - Characterizing multitemporal alpine snowmelt patterns for ecological inferences. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 59 (10): 1521-1529.
- Barnes W.L., Pagano T.S., Salomonson V.V. (1998) - Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36 (4): 1088-1100.
- Brown R.D. (2000) - Northern hemisphere snow cover variability and change, 1915-97. *J Climate*, 13: 2339-2355.
- Carrol S.S. and Cressie N.A.C. (1997) - Spatial modeling of snow water equivalent using covariances estimated from spatial and geomorphic attributes. *Journal of Hydrology*, 190: 42-59.
- Coughlan J.C. and Running S.W. (1997) - Regional ecosystem simulation: A general model for simulating snow accumulation and melt in mountainous terrain. *Landscape Ecology*, 12: 119-136.
- Derkens C., Walker A., LeDrew E., Goodison B. (2002) - Time-series of passive-microwave-derived central North American snow water equivalent imagery. *Ann. Glaciol.*, 34: 1-7.
- Elder K, Dozier J., Michaelsen J. (1991) - Snow accumulation and distribution in an alpine watershed. *Water Resources Research*, 27 (7): 1541-1552.
- Foster J.L. and Chang A.T.C. (1993) - Snow cover, In Parkinson CL and Foster JL eds. *Atlas of Satellite Observations Related to Global Change*, R J Gurney, Cambridge University Press, Cambridge, 361-370.
- Hall D.K., Riggs A.G., Salomonson V.V. (1995) - Development of Methods for Mapping Global Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data. *Remote Sens. Environ.*, 54: 127-140.
- Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., Digirolamo N.E., Bayr K.J. (2002) - MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83: 181-194.
- Matson M., Roeplewski C.F., Varnadore M.S. (1986) - An Atlas of Satellite-Derived Northern Hemisphere Snow Cover Frequency. National Weather Service, Washington DC, 1-75
- J., Foster J., Marks D. (1983) - Resolution in operational remote sensing of snow cover. *IAHS Publ*, 145: 371-381.
- Ranzi R., Grossi G., Bacchi B. (1999) - Ten years of monitoring areal snowpack in the Southern Alps using NOAA-AVHRR imagery, ground measurements and hydrological data. *Hydrological Process* 13: 2079-2095.
- Rees W.G. (2006) *Remote Sensing of Snow and Ice*, 1st edn. Taylor and Francis Group, CRC Press, Broken Sound Parkway NW.
- Robinson DA, Dewey KF and Heim RR Jr (1993) Global snow cover monitoring: An update. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 74, 1689-1696
- Robinson D.A., Kukla G. (1985) - Maximum surface albedo of seasonally snow covered land in the Northern Hemisphere. *J Climate Appl. Meteorol.* 24: 402-411.
- Salvatori R., Plini P., Giusto M., Valt M., Salzano R., Montagnoli M., Cagnati A., Crepez G., Sigismondi D. (2011) - Snow cover monitoring with images from digital camera systems. *Italian Journal of Remote Sensing*, 43 (2): 137-145. doi: 10.5721/ItJRS201143211
- Valt M., Moro D. (2009) - Average snow cover density values in the Eastern Alps mountain. EGU General Assembly, Vienna 19-24 April 2009, *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-5289
- Valt M., Cianfarra P. (2012) - Recent snow cover variability in the Italian Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 64: 146-157.
- Valt M., Chiambretti I., 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, Richnavsky J, Biskupic M and Kyzek F eds., 38-43.
- Vogel S.W. (2002) - Usage of high-resolution Landsat 7 band 8 for single-band snow-cover classification. *Ann. Glaciol.*, 34: 53-57
- Walsh J.E., Jasperson W.H., Ross B. (1985) - Influences of snow cover and soil moisture on monthly air temperature. *Monthly Weather Rev.* 113: 756-768.
- Yang D., Woo M.K. (1999) - Representativeness of local snow data for large scale hydrologic investigations. *Hydrological Process* 13: 1977-1988.

MOUNTAIN RESEARCH

Ricerca a supporto della gestione del rischio valanghe di neve bagnata e da slittamento in Valle d'Aosta

**Barbara Frigo,
Bernardino Chiaia,
Valerio De Biagi**

Politecnico di Torino,
Dipartimento di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica, Torino

**Laura Dublanc,
Michele Freppaz,
Danilo Godone,
Margherita Maggioni,
Davide Viglietti**

NatRisk-DISAFA,
Università degli Studi di Torino, Torino

**Elisabetta Ceaglio,
Paola Dellavedova**
Fondazione Montagna sicura,
Courmayeur, Aosta

Diego Franco, Alberto Godio
Politecnico di Torino,
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente,
del Territorio e delle Infrastrutture, Torino

**Henri Grosjacques,
Alessandro Prola,
Franco Torretta,
Arnoldo Welf**
Monterosa s.p.a.,
Gressoney-La-Trinité, Aosta

Dario Tosi
Università della Valle d'Aosta -
Université de la Vallée d'Aoste, Aosta

Gli autori fanno parte del Mountain Risk
Research Team (MRR Team), Verrès, Aosta

Nel 2013, in Valle d'Aosta, nasce il Mountain Risk Research Team - MRR Team, Unità di Ricerca (UdR) giovane e multidisciplinare con anima tecnico-scientifica integrata a quella giuridico-sociale che opera nel campo dei rischi naturali in ambiente montano.

In particolare, l'unità di ricerca sta sviluppando il Progetto Operativo "Rischio, Ricerca e Innovazione" (R.R.I.) con l'obiettivo di sviluppare ed implementare strumenti per il monitoraggio e la previsione di valanghe di neve umida, nonché di sviluppare best practices per la loro gestione in termini di sicurezza e riduzione dei costi, anche sociali.

La ricerca si svolge nel territorio valdostano del comprensorio sciistico Monterosa Ski, laboratorio a cielo aperto del Team (Fig. 1).

L'articolo presenta il gruppo di ricerca e il suo ruolo di supporto all'innovazione tecnologica regionale e di ricerca a livello internazionale, per poi porre in evidenza le problematiche trattate all'interno del progetto R.R.I. di previsione, prevenzione e gestione di queste particolari tipologie di fenomeni valanghivi. Proseguendo con la descrizione dei tre obiettivi di progetto, si riporta una panoramica delle numerose attività sviluppate ed i primi risultati conseguiti. Tra questi, ampio spazio verrà dato alla presentazione dei siti sperimentali concepiti e realizzati grazie a questo progetto ed alle attività svolte grazie ad essi, fiori all'occhiello dell'UdR.



RISK TEAM

IL GRUPPO DI RICERCA INTERDISCIPLINARE

L'Unità di Ricerca MRR Team nasce grazie al "Bando per la creazione e lo sviluppo di Unità di Ricerca" (D.G.R. 1988/2011 e s. m. i.), finanziamento messo a disposizione dai Programmi Operativi 2007-2013 del Fondo Sociale Europeo e del Fondo Europeo di Sviluppo Regionale valdostano per creare una vivace e robusta collaborazione tra professionisti, ricercatori ed esperti con scopi occupazionali e di innovazione tecnologica. L'UdR si inserisce nel settore "Tecnologie per il monitoraggio del rischio e la sicurezza del territorio alpino", definendo metodologie, linee guida e tecnologie innovative di supporto a tecnici amministratori e responsabili del settore per una gestione condivisa dei rischi naturali in montagna.

Il Team è stato l'occasione per consolidare istituzionalmente una rete di eccellenze

locali che già da tempo collaborano insieme, quali i due Atenei regionali (l'Università della Valle d'Aosta - Université de la Vallée d'Aoste e il Politecnico di Torino), la Fondazione Montagna sicura, il Centro NatRisk del DISAFA di concerto con la Monterosa S.p.A., impresa valdostana che opera in uno dei settori più importanti per l'economia regionale (l'industria dello sci) e da sempre attenta sostenitrice dell'innovazione tecnologica.

La supervisione delle attività del Team spetta al "Dipartimento programmazione, difesa del suolo e risorse idriche" (Assessorato opere pubbliche, difesa del suolo e edilizia residenziale pubblica) della Regione autonoma Valle d'Aosta, attento sia ai risultati immediatamente fruibili per il monitoraggio alpino, sia all'accrescimento delle competenze tecnico-scientifiche regionali che contribuiscono a rendere la Valle d'Aosta un punto di riferimento

per la gestione operativa dei rischi in ambiente montano.

IL PROGETTO DI RICERCA

Le valanghe di neve bagnata (*wet-snow avalanches*) insieme alle *glide-snow avalanches*, ovvero le valanghe da slittamento del manto nevoso (Jones et al., 2004; Mitterer and Schweizer, 2012), rappresentano attualmente uno dei maggiori fattori di incertezza nelle attività di previsione valanghe, a causa della difficoltà nel prevederne il distacco e le dimensioni (Fig. 2) (Peitzsch et al., 2012).

Inoltre, a seguito del cambiamento climatico in atto che potrebbe portare a manti nevosi più umidi e ad un generale aumento del contenuto d'acqua nel substrato (Lazar and Williams, 2008), la frequenza di questo tipo di valanghe potrebbe aumentare, sebbene ad oggi nessun trend chiaro sia stato ancora identificato.

Le valanghe da slittamento, tipicamente di fondo, si generano a seguito di fenomeni di *snow gliding* (lento scivolamento verso valle del manto nevoso influenzato dalla rugosità del substrato e dal contenuto d'acqua all'interfaccia neve/ suolo) e sono spesso precedute dalla formazione di evidenti fessurazioni nel manto nevoso, le *glide cracks* o "bocche di balena" (Fig. 3). L'elevato potenziale distruttivo causato dall'ampio volume di neve coinvolto, la forte pressione d'impatto che può svilupparsi su edifici, foreste, infrastrutture, e la difficoltà nel gestire il problema con i comuni sistemi di distacco artificiale - le valanghe da slittamento e le valanghe bagnate non reagiscono positivamente alle tradizionali misure di distacco programmato - pongono questo tipo di fenomeno all'attenzione di coloro che sono chiamati a gestire il rischio valanghe, sia nell'ambito delle pubbliche amministrazioni, sia dei comprensori sciistici.

I temi di ricerca affrontati dal Team nel progetto R.R.I. (Ricerca, Rischio e Innovazione) rispecchiano queste necessità, circoscritte ad una limitata porzione di territorio (il comprensorio sciistico), mirando allo sviluppo di strumenti per il mo-

Fig. 1 - Il comprensorio Monterosa Ski ai piedi del Monte Rosa. In evidenza la posizione dei siti sperimentali.



Fig. 2 - Valanghe di neve bagnata e da slittamento.



monitoraggio e la previsione delle valanghe di neve bagnata e da slittamento, e alla definizione di procedure atte a ridurre i costi ed a migliorare le procedure di gestione estive ed invernali delle piste da sci all'interno del Monterosa Ski. Questi si possono riassumere in una serie di proposte gestionali innovative riferite a queste tipologie di valanghe al fine di:

- individuare i valori soglia dei parametri meteorologici, nivologici e pedologici predisponenti il verificarsi di tali fenomeni, monitorati grazie a tecnologie innovative;
- supportare i tecnici durante la messa in sicurezza di un comprensorio sciistico, implementando il Piano di Intervento per il Distacco Artificiale di Valanghe (PIDAV) grazie a proposte innovative di distacco artificiale anche con riferimento all'analisi costi/benefici delle misure di protezione;
- supportare i tecnici nelle attività di realizzazione e manutenzione delle piste da sci in periodo estivo con particolare attenzione alle pratiche per ridurre la vulnerabilità dei suoli all'erosione.

Fulcro strategico del progetto sono l'individuazione ed il monitoraggio di indicatori ambientali, scelti al fine della comprensione dei meccanismi di formazione e distacco delle valanghe di neve bagnata e per scivolamento, nonché della loro previsione. L'attenzione è stata volta al monitoraggio della formazione di *glide cracks* e della loro evoluzione - al fine di una migliore comprensione del ruolo dell'acqua libera all'interfaccia neve/suolo come fattore principale che caratterizza il processo di scivolamento - unitamente alla realizzazione dei siti sperimentali di monitoraggio. Ciò ha comportato inoltre la concezione, lo sviluppo e la relativa validazione di sensoristica innovativa dedicata (per es. per la misura della densità e del contenuto volumetrico d'acqua nel manto nevoso) e testata durante l'inverno 2013/14, primo inverno di progetto. Sulla base di informazioni storiche raccolte dal personale del comprensorio, sono stati individuati tre siti sperimentali nel comune di Gres-



Fig. 3 - Formazione di glide cracks.



Fig. 4 - Localizzazione dei siti sperimentali Pista Nera (a destra della foto) e Sant'Anna I (a sinistra della foto).

soney-La-Trinité (AO):

- 1) Pista Nera - zona di distacco di una valanga per scivolamento (Gressoney-la-Trinité, 2230 m s.l.m., ESE, 40°) posta a monte dell'omonima pista da sci (Fig. 4);
- 2) Sant'Anna I - zona di distacco di una valanga da slittamento (Gressoney-la-Trinité, 2120 m s.l.m., E, 36°) posta a valle della stazione di arrivo della funivia per Sant'Anna (Fig. 4);
- 3) Sant'Anna II - zona in piano, posta a monte della stazione di arrivo della funivia per Sant'Anna (Gressoney-la-Trinité, 2170 m s.l.m., 360°, in piano), nei pressi dei campi neve AINEVA MOD 1 (gestito da personale del comprensorio sciistico) e MOD 4 (gestito da personale del Corpo Forestale Valdostano), allestito per il test di strumentazione innovativa (Fig. 5).

La strumentazione installata nei siti Pista Nera e Sant'Anna I comprende *glide-snow shoes* (piccoli slittini in alluminio collegati ad un potenziometro in grado di rilevarne lo spostamento), sensori di temperatura (T107) e contenuto volumetrico d'acqua (WCR CS616) posti nel suolo (a profondità di: 5 e 15 cm) e nello strato basale del manto nevoso.

I sensori sono collegati a *datalogger* (Campbell CR1000) collocati in posizioni sicure al di fuori delle zone di distacco delle valanghe, raggiungibili in sicurezza durante l'inverno e forniti di doppia alimentazione (batteria e pannello solare). Il sito Pista Nera è inoltre monitorato da una webcam (per gentile concessione del Consorzio Turistico Gressoney Monte Rosa) con lo scopo di registrare e trasmettere immagini relative ai movimenti del manto nevoso, permettendo così la

Fig. 5 - Localizzazione del sito St Anna II.



Fig. 6 - Kit per rilievi nivologici e sonda portatile WCR CS616.



Fig. 7 - Localizzazione del sito Pista Larici.



verifica delle condizioni del sito anche da remoto.

Il sito sperimentale Sant'Anna II è invece dedicato al test dei sensori elettromagnetici WCR - *Water Content Reflectometer* (e.g. Kovacs et al., 1995) per le misure di densità e umidità della neve, variabili chiave per i fenomeni di scivolamento. Accoppiati alle sonde WCR CS616 poste nel suolo e a 20 cm nella neve, sono stati installati sensori low cost (*iButton*®) per la misura in continuo di temperatura e umidità della neve.

Contestualmente sono stati collocati dei sensori per la misura dello SWE (*Snow Water Equivalent*) e della densità del manto nevoso: 5 celle di carico, di 2 differenti case costruttrici, installate in appositi involucri in acciaio inox, collocate in aree di prova con superficie di 4÷5 m², secondo una disposizione casuale. Tutta la strumentazione è stata collegata ad un *datalogger* alimentato mediante un pannello fotovoltaico con batteria tampone per il funzionamento in continuo. A corredo di questa sensoristica, si trova installato un dispositivo georadar con antenna avente frequenza principale di 900 MHz; l'antenna è stata disposta al suolo con radiazione verso l'alto in modo da monitorare lo spessore e la stratificazione del manto nevoso. A cadenza settimanale, si effettuano misure di caratterizzazione del manto nevoso associate a misure di contenuto volumetrico in acqua tramite utilizzo di un riflettometro portatile (sensore WCR CS616 – Fig. 6).

Particolare è il quarto sito sperimentale Pista Larici, localizzato nella zona a monte dell'omonima pista da sci in Ayas (2100 m s.l.m., ONO), dedicato al secondo obiettivo di progetto (proposte di sistemi innovativi di bonifica di manti nevosi umidi). In questo tratto di pista particolarmente problematico dal punto di vista gestionale per l'interferenza di valanghe di neve bagnata, soprattutto in condizioni primaverili (Fig. 7), sono state individuate due aree rappresentative di distacchi spontanei ed indotti di valanghe di neve bagnata, in cui sono stati installati i sensori di temperatura e umidità (*iButton*®)

all'interfaccia neve/ suolo e nel suolo, e dove si caratterizza settimanalmente il manto nevoso con misure del contenuto volumetrico in acqua grazie alla sonda portatile WCR CS616. In queste situazioni particolarmente critiche per la gestione della sicurezza piste, soprattutto in periodo primaverile (aumenti repentini di temperatura, eventi di pioggia su neve,...), si realizzano più profili nivologici durante l'arco della giornata, ponendo attenzione alla crescente umidificazione del manto nevoso, per il confronto con l'eventuale attività valanghiva, spontanea o provocata dal personale del comprensorio. Forte interesse scientifico ai fini del distacco di valanghe di neve umida è l'utilizzo innovativo delle sonde WCR CS616 testate nei vari siti sperimentali del Team. Non essendo nate come strumenti di misura in neve, la calibrazione di queste sonde è stata realizzata presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture del Politecnico di Torino verificando la sensibilità delle misure di permittività elettrica alla temperatura soprattutto in prossimità della variazione di stato dell'acqua in camera termostattizzata e calibrandone la risposta in funzione di densità della neve, stimata in sito attraverso un confronto diretto tra misure di densità gravimetriche e misure con dispositivo WCR portatile. È ben noto come, ad oggi, non esistano misure di protezione sia fisse (attive e non) che temporanee con una efficacia pari a quella per le valanghe di neve asciutta. Ne sono esempio le tecniche tradizionali di distacco artificiale (con esplosivo o miscele gassose) che, operate su manti nevosi umidi o bagnati, non producono effetti positivi. Per confermare scientificamente questa intuizione, il progetto ha previsto un'importante raccolta dati (svolta all'interno del comprensorio di Monterosa Ski) e creazione di un relativo database organizzato riferito alle attività di bonifica con diversi sistemi di distacco artificiale al fine di valutarne l'efficacia su manti nevosi umidi. Una prima valutazione basata sulle osservazioni ed esperimenti per distacchi indotti su manto

nevoso umido durante il primo inverno di progetto mostra una scarsa efficacia sia dei sistemi a gas sia dell'esplosivo, proprio a causa della maggiore attenuazione del potere dirompente degli stessi. Misure alternative esistono purtroppo esclusivamente solo teoricamente: ne è esempio il suggerimento di Bartelt et al. (2012) che prevede l'utilizzo di esplosivo sullo *stauchwall* (zona di compressione alla base del lastrone già fratturato a monte). Proprio per questo si stanno prototipando metodi alternativi per il distacco provocato mediante tecniche meccaniche e di incremento di carico sul manto nevoso testando anche l'uso di esplosivi non-detonanti (Frigo et al., 2013). Riguardo le difese passive, si sta valutando l'efficacia di frangi flusso sperimentali installate proprio in sito Pista Larici nell'estate del 2013. Lo scopo di queste opere è quello di rallentare l'eventuale scorrimento di masse nevose umide fluidificate in movimento (Fig. 8). L'efficacia e l'efficienza di queste

opere di difesa fisse è stata inizialmente testata nel corso della stagione invernale 2013/2014, durante la quale non si sono però verificati distacchi di dimensioni importanti.

Tra le poche misure di protezione efficaci rimane la naturale presenza di bosco con caratteristiche specifiche. Il fattore determinante che controlla la capacità protettiva delle foreste montane e influenza direttamente la probabilità di distacco in foresta è la struttura forestale in termini di copertura, densità degli alberi, dimensione e distribuzione dei gap in combinazione con la topografia. Le condizioni forestali (struttura e composizione) che riducono la possibilità di distacco includono una copertura superiore > 30%, l'assenza di radure (*gap*) > 25m in lunghezza, e un aumento dell'asperità del suolo associata alla presenza di alberi in piedi o caduti che eccedono la profondità del manto nevoso (Teich et al., 2012; Viglietti et al., 2010).

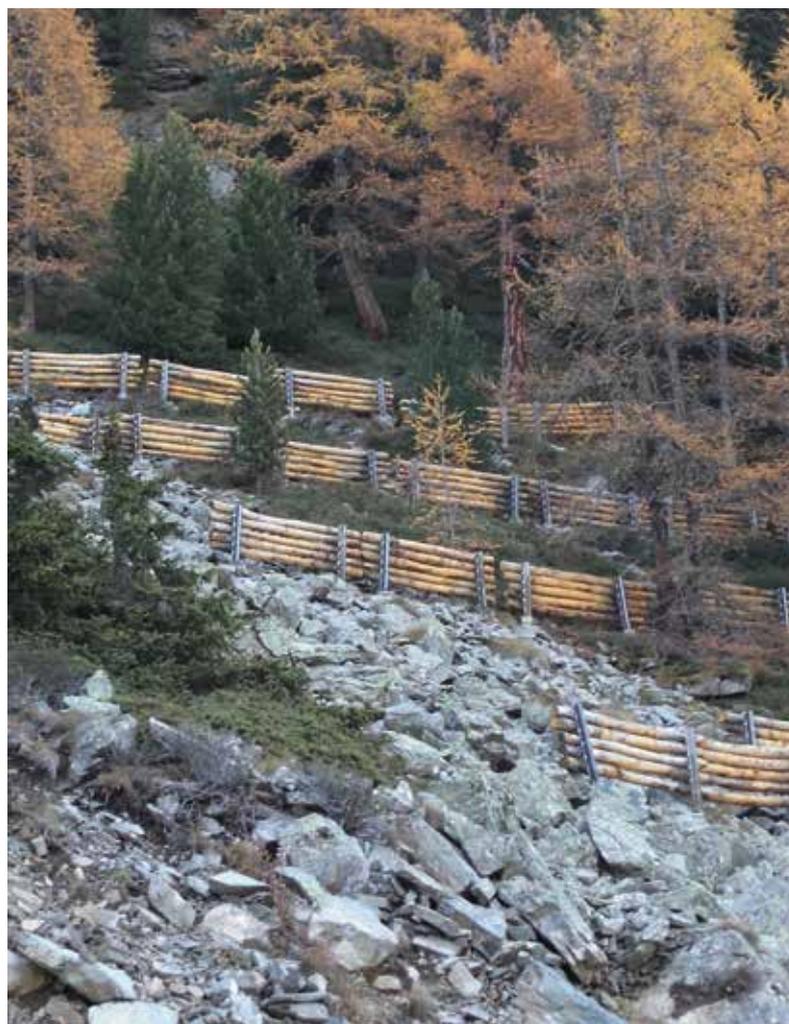


Fig. 8 - Le opere frangi flusso installate nell'estate 2013 presso il sito Pista Larici.



Fig. 9 - In prossimità del tracciato la vegetazione stenta a svilupparsi.

Fig. 10 - Strato basale del manto nevoso rilevato presso il sito St Anna I a seguito dell'evento di valanghe da slittamento del 24 novembre 2013.



Alla valutazione di efficacia/efficienza delle varie metodologie per la messa in sicurezza del comprensorio sono seguite le analisi costi/benefici dei diversi metodi di bonifica dei pendii soggetti a valanga, con un confronto tra sistemi di distacco artificiale, protezioni alternative testate (tra cui la gestione selvicolturale e la chiusura temporanea di parti di comprensorio sciistico). È stata svolta, in particolare, l'analisi di "quanto costa una

valanga" sia per il comprensorio sciistico Monterosa Ski sia per la comunità durante il primo week-end di febbraio 2014, in cui venne chiusa la SR 44 della Valle del Lys per pericolo valanghe (Segor et al., 2014). La tematica delle misure di prevenzione del rischio valanghe è anche trattata da un punto di vista giuridico/economico. La legge regionale vigente, infatti, attribuisce al gestore delle piste da sci l'onere di garantire l'agibilità e la manutenzione

delle piste. Più in generale, i fenomeni valanghivi interessano la sicurezza delle zone dedicate all'attività sportiva, così come aree connesse e strumentali, quali piste di collegamento, linee e strutture di impianti a fune, strade di collegamento e fabbricati, dedicati a attività commerciali o amministrative, inseriti nel comprensorio sciistico. Sempre nel contesto dell'analisi costi/benefici, il Team affronta il tema ponendo in luce i diversi profili di responsabilità del gestore degli impianti e degli attori pubblici di governo del territorio, per individuare il soggetto che debba assumere l'onere dei possibili interventi al fine della sicurezza delle aree interessate connesse o inserite in comprensorio sciistico.

Sulla base di tale analisi, lo studio intende valutare, anche sulla base di dati di natura economica e di considerazioni sui limiti giuridici, nonché di vincoli di bilancio e di libertà di azione dei soggetti pubblici coinvolti, quali tipologie di costi e di interventi possano apparire più utili e meno gravosi per i gestori delle piste da sci.

La prevenzione del rischio valanghe in comprensorio è sviluppata analizzando la vulnerabilità degli elementi propria di uno ski resort: tipicamente le caratteristiche tecniche dei tracciati (pendenza, dislivello, lunghezza e larghezza), dell'innnevamento naturale/artificiale e della battitura.

In tal senso, il Team sta sviluppando un modello per la gestione dei flussi di sciatori basato su un approccio a "rete". Considerate le connessioni tra le diverse parti del comprensorio sciistico, ossia i punti di partenza e di arrivo degli impianti di risalita, le biforcazioni tra le piste di sci, il modello è in grado di stimare il flusso di persone sulla base di variabili che tengono in considerazione le capacità sciistiche degli sciatori (De Biagi et al., 2013).

Sito sperimentale consacrato a quest'analisi di vulnerabilità e del conseguente rischio in pista è il piccolo ma rappresentativo distaccamento di Monterosa Ski in Antagnod (Val d'Ayas) (Fig. 1).

La ricerca dell'UdR continua anche sulla vulnerabilità dei suoli nelle piste da sci,

strettamente legata alle forti modifiche effettuate nelle aree montane nel corso degli ultimi decenni, necessarie a soddisfare la crescente domanda turistica legata agli sport invernali. In generale, la costruzione e gestione delle piste da sci ha un forte impatto sulle caratteristiche del suolo a quote elevate, influenzandone le proprietà chimiche e fisiche. Alterando significativamente la naturale forma del terreno nelle piste da sci, il suolo presenta generalmente un ridotto contenuto di sostanza organica ed una struttura debolmente sviluppata, fattori che concorrono ad incrementare la vulnerabilità ai processi erosivi (Freppaz et al., 2013). Anche le attività di battitura del manto nevoso effettuate in periodo invernale possono alterare le condizioni del suolo (es. riduzione della temperatura del suolo per effetto dell'aumento della densità del manto nevoso), con effetti sullo sviluppo della vegetazione e sui processi chimico-fisici del suolo (Fig. 9) (Rixen, 2013). Va da sé che una corretta realizzazione e gestione dei suoli nelle piste da sci sia fondamentale per ridurre i fenomeni erosivi e il potenziale innesco di fenomeni di dissesto superficiale.

L'adeguata preparazione del suolo prima degli inerbimenti e la sua corretta gestione negli anni successivi rappresentano fattori fondamentali per garantire la

funzionalità delle piste da sci, riducendo la necessità di interventi straordinari ad esempio nel caso di precipitazioni intense nel periodo estivo, agevolando nello stesso tempo la gestione invernale dei tracciati.

In relazione a ciò, l'UdR ha eseguito nel periodo estivo una serie di campionamenti lungo alcuni tracciati del comprensorio sciistico Monterosa Ski, nonché nei siti di monitoraggio Sant'Anna I e Pista Nera. I campioni di suolo sono stati prelevati nell'orizzonte organo-minerale, nei primi 10 cm di suolo. In ogni sito di campionamento (una dozzina in totale) sono stati prelevati 2 campioni di suolo, uno in corrispondenza del tracciato della pista e uno nelle immediate vicinanze, in zone non disturbate da azioni meccaniche di preparazione e livellamento del tracciato. Le analisi in laboratorio si sono concentrate in particolare sulla determinazione della vulnerabilità all'erosione mediante valutazione della stabilità degli aggregati ad umido (WAS Index) e di alcune proprietà chimiche (carbonio organico e azoto totale) e fisiche del suolo (tessitura reale).

IL PRIMO INVERNO DI PROGETTO

Nel corso dell'inverno 2013-2014, nei siti strumentati per il monitoraggio dei processi di *snow gliding*, Pista Nera e

Sant'Anna I, sono state osservate tre *glide-snow avalanches*, registrate con successo dai movimenti degli slittini tramite datalogger (Frigo et al., 2014).

I primi due eventi si sono verificati a seguito delle intense nevicate registrate tra il 19 e il 22 novembre 2013, che hanno portato più di 1 m di neve fresca nei siti. Nel sito Pista Nera la valanga si è distaccata alle h 23.06 del 21 novembre durante l'apice della nevicata, mentre nel sito Sant'Anna I l'evento si è verificato al termine della nevicata, alle h 18.35 del 24 novembre a seguito della prima giornata soleggiata e calda registrata dopo le nevicate.

Particolarmente interessante il rilevamento di uno strato basale nel manto nevoso intriso d'acqua e di soluzione di suolo, risalite per capillarità nel manto nevoso più freddo ed asciutto (Fig. 10).

Una prima analisi dei dati mostra una relazione diretta tra i movimenti più intensi del manto nevoso e l'umidità del suolo, come già rilevato da Ceaglio et al. (2012) (Fig. 11).

Il terzo evento si è verificato il 18 marzo 2014 alle h 14.00 nel sito Pista Nera a seguito di un prolungato periodo di bel tempo (assenza di nevicate dal 5 marzo), dell'aumento delle temperature dell'aria e dell'assestamento del manto nevoso (Fig. 12).

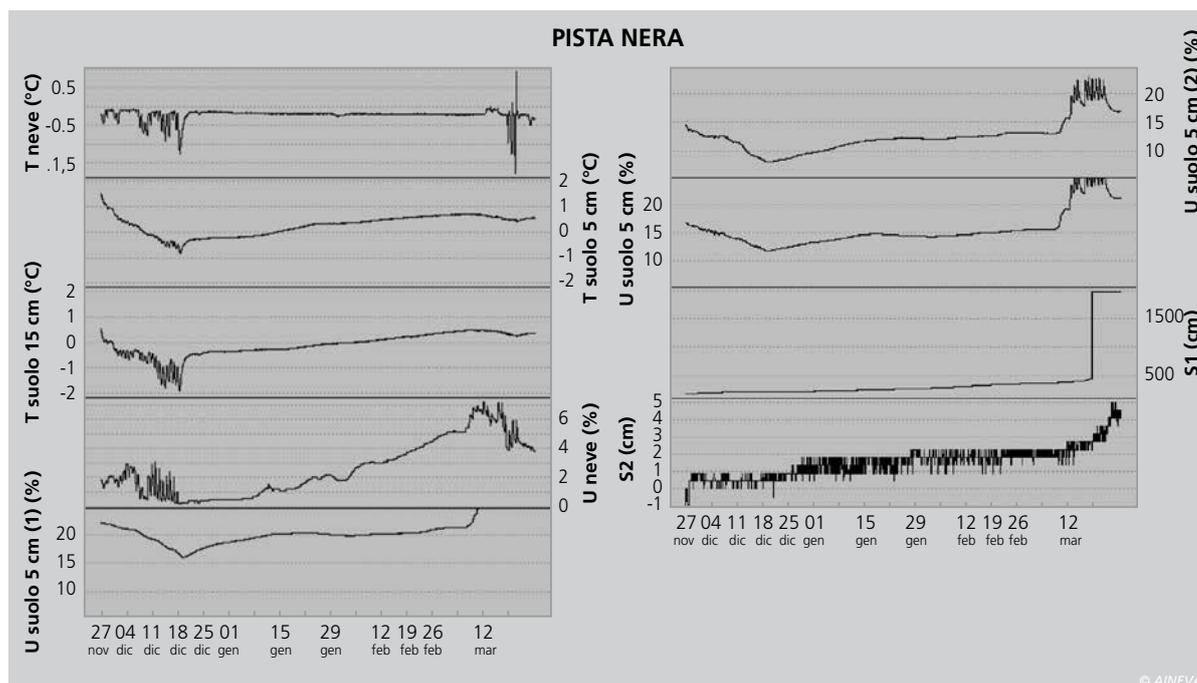


Fig. 11 - Andamento della temperatura (T), del contenuto in acqua (U) nel suolo e nella neve e spostamento degli slittini (S1-S2) nel sito Pista Nera nel corso della stagione invernale 2013/2014.

Grazie ai diversi dati relativi ai profili nivologici associati alle misure di contenuto volumetrico d'acqua raccolti presso Sant'Anna II e Pista Larici, è stato possibile testare ed ulteriormente sviluppare la strumentazione innovativa per il monitoraggio dell'umidità della neve.

Si è infatti potuto appurare come l'utilizzo di sensoristica nata per altri scopi, come le sonde WCR CS616 e gli *iButton*, sia efficace anche per il manto nevoso, seppur alcune criticità debbano essere ancora risolte. Ne è esempio la prima curva di calibrazione (ora in fase di validazione)

della sonda WCR CS616 per la stima del contenuto in acqua e della densità della neve, parametro questo ad oggi non misurabile in continuo.

Per quanto riguarda la valutazione della presenza e dello stato del bosco al limite di piste/tracciati e del suo effetto come protezione antivalanga, non si hanno informazioni dirette, in quanto durante il primo anno di attività (inverno 2013/2014) non si sono verificati eventi valanghivi in bosco meritevoli di rilievo. Tuttavia, si è proceduto ad un'analisi in ambiente GIS delle aree boscate a bordo pista e di quelle potenzialmente soggette a fenomeni valanghivi al fine di individuare quelle ritenute rappresentative ovvero potenzialmente valanghive qualora il bosco non espletasse la sua funzione protettiva. Nell'autunno 2014, sono state condotte indagini in campo (Fig. 13) mirate alla determinazione di alcuni parametri (e.g., composizione, densità e stato di salute del bosco) e simulazioni con il software RAMMS-modulo valanghe (WSL-SLF) per verificare la potenziale massima estensione valanghiva in assenza di una sufficiente copertura forestale e la relativa interferenza con le piste (Fig.14).

Relativamente ai suoli nelle piste da sci, le prime analisi rivelano come questi presentino elevate percentuali di scheletro e pietrosità superficiale, e ridotta potenza, stimata tra i 20 e i 40 cm per la piste localizzate a quota inferiore, e spessori ancora inferiori alle quote più elevate.

La dotazione di sostanza organica è risultata maggiore nelle aree indisturbate rispetto alle piste da sci, in cui il contenuto medio di carbonio organico è risultato compresa fra 0,3 e 1,5%.

La perdita di aggregati per setacciatura ad umido nelle piste da sci è risultata inversamente correlata al contenuto di carbonio organico, ad evidenziare come anche modesti apporti di sostanza organica possano significativamente ridurre l'erodibilità di queste superfici.

CONCLUSIONI

Il Progetto Operativo "R.R.I.-Rischio, Ricerca e Innovazione" del MRR Team sta

Fig. 12 - 18 marzo 2014: valanghe da slittamento registrate nel sito sperimentale Pista Nera.



Fig. 13 - Foresta di protezione a bordo pista.



svolgendo attività importanti al fine di una migliore comprensione di fenomeni, quali le valanghe bagnate e da slittamento, sempre più frequenti in un contesto di cambiamento climatico.

Tali fenomeni sono argomento di ricerca molto attuali, come dimostrato dal crescente numero di lavori scientifici disponibili in letteratura. La peculiarità del progetto R.R.I. risiede nella forte collaborazione tra ricerca e operatività, con lo scopo di trasferire la conoscenza teorica dei ricercatori in strumenti pratici di gestione del rischio per i tecnici. Si sottolinea come il progetto sia nato da una esigenza pratica dei gestori alla sicurezza di un comprensorio sciistico che, nella loro attività quotidiana, hanno evidenziato un aumento di eventi valanghivi di neve bagnata e da slittamento. Il contributo della ricerca mira a fornire misure e strumenti adeguati per poter affrontare tale problematica in maniera efficiente ed efficace. Parallelamente all'analisi della fattibilità tecnica delle diverse misure, l'estensivo lavoro di analisi dei costi/benefici delle diverse misure di protezione, con particolare riferimento alle valanghe di neve bagnata e/o da slittamento, risulta di fondamentale importanza al fine di una corretta scelta gestionale da parte del personale del comprensorio sciistico. Nello specifico, questo primo anno di attività ha confermato una forte operatività del Team, frutto della sua professionalità e conoscenza scientifica/tecnologica interdisciplinare, carta vincente per affrontare

a 360 gradi la problematica della gestione dei rischi naturali.

In particolare, le analisi dei dati raccolti durante l'inverno 2013/14 hanno l'intento di individuare i valori di soglia dei fattori predisponenti il fenomeno dello *snow gliding* insieme ad un valido sistema di allertamento dedicato alla gestione della sicurezza in pista. Una nuova raccolta dati è attiva durante la stagione invernale 2014/2015. La metodologia di analisi, i metodi e le procedure che saranno identificati per la gestione del rischio delle valanghe di neve umida e da slittamento nel comprensorio della Monterosa Ski, saranno le basi per il servizio di previsione, prevenzione e gestione di questo pericolo anche in altri ambienti antropizzati, come strade e villaggi.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Assessorato attività produttive, energia e politiche del lavoro della Regione autonoma Valle d'Aosta, la struttura Politiche della formazione e dell'occupazione del medesimo Assessorato per il supporto alla realizzazione del progetto di specializzazione individuale della dott.ssa Laura Dublanc nel settore della ricerca e dello sviluppo tecnologico in seno al MRR Team.

Un ringraziamento al Corpo Forestale della Valle d'Aosta (stazioni di Gaby e di Brusson) per la collaborazione nella realizzazione dei rilievi nivologici e ai colleghi dell'Ufficio neve e valanghe e del Centro Funzionale regionali (Dipartimento

programmazione, difesa del suolo e risorse idriche - Assessorato opere pubbliche, difesa del suolo e edilizia residenziale pubblica). Questo lavoro è realizzato con il contributo dell'Unione Europea, della Regione autonoma Valle d'Aosta e del Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali.

*In fondo alla pagina:
Fig. 14 - Rilievi forestali in zone a monte delle piste da sci del comprensorio Monterosa Ski.*

Bibliografia

- Bartelt, P., Feistl, T., Bühler, Y., and Buser, O. (2012). Overcoming the stauwall: viscoelastic stress redistribution and the start of full-depth gliding snow avalanches, *Geophysical Research Letters*, 39, L16501, doi:10.1029/2012GL052479.
- Ceaglio, E., Freppaz, M., Filippa, G., Ferraris, S., Zanini, E., Segor, V. (2012). A characterization of snow gliding and potential predisposing factors in a full-depth slab avalanche release area (Aosta Valley, NW Italian Alps). *Proceedings of ISSW 2012*, October 16-22, Anchorage, Alaska, USA, 561-568.
- De Biagi V., Frigo B., Chiaia B. (2013). A network-based approach for the study of criticalities in ski-resorts. *Proceedings of ISSW 2013*, October 7- 11, Grenoble (F) – pp. 1177-1180.
- Freppaz M., Filippa G., Corti G., Cocco S., Williams M.W., Zanini E. (2013) *Soil Properties on Ski-Runs. The Impacts of Skiing and Related Winter Recreational Activities on Mountain Environments*. Bentham Science Publishers, Bussum, 45- 64.
- Frigo, B., Prola, A., Welf, A., Durand, N., Dellavedova, P., Segor, V. (2013). Avalanche risk management in Winter 2012/13 in Monterosa Ski resort – Aosta Valley (I). *Proceedings of ISSW 2013*, October 7 - 11, Grenoble (F), 800-807.
- Frigo, B., Ceaglio, E., Chiaia, B., Dellavedova, P., Dublanc, L., Franco, D., Freppaz, M., Godio, A., Godone, D., Grossjacques, H., Maggioni, M., Prola, A., Torretta, F., Viglietti, D., Welf, A. (2014). "Risk, Research and Innovation" Project on wet-snow and glide-snow avalanches in Aosta Valley (NW Italian Alps): The experimental approach. *Proceedings of ISSW 2014*, International Snow Science Workshop, September 29 - October 3, Banff, Alberta, Canada, 670-675.
- Jones, A., (2004). Review of glide processes and glide avalanche release. *Avalanche News*, 69, 53-60.
- Kovacs, A., Gow, A. and Morey, R. (1995). The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. *Cold Regions Science and Technology*, 23, 245-256.
- Lazar, B. and Williams, M. (2008). Climate change in western ski areas: Potential changes in the timing of wet avalanches and snow quality for the Aspen ski area in the years 2030 and 2100. *Cold Regions Science and Technology*, 51, 219-228.
- Mitterer, C. and Schweizer, J. (2012). Towards a better understanding of glide-snow avalanches. *International Snow Science Workshop ISSW 2012*, Anchorage AK, U.S.A., 16-21 September 2012, 610-616.
- Peitzsch, E.H., Hendrikx, J., Fagre, D.B. and Reardon, B. (2012). Examining spring wet slab and glide avalanche occurrence along the Going-to-the-Sun Road corridor, Glacier National Park, Montana, USA. *Cold Regions Science and Technology*, 78, 73-81.
- Segor V., Dellavedova P., Pitet L., Bovet E., Durand N., Frigo B., Chiaia B., Maggioni M., Antonello G., Torretta F. (2014). Avalanches on the roads: operational and research aspects for the management of risk within the project Alcotra n. 144 "MAP3". *International Snow Science Workshop ISSW 2014*, Banff, AB, CANADA, 16-21 September 2012, 242-249.
- Rixen, C. (2013). Skiing and Vegetation., in Rixen, C., Rolando, A. (eds.), *The Impacts of Skiing and Related Winter Recreational Activities on Mountain Environments*. Bentham Science Publishers, Bussum, 65-78.
- Teich, M., Bartelt, P., Grêt-Regamey, A. and Bebi, P. (2012). Snow avalanches in forested terrain: influence of forest parameters, topography and avalanche characteristics on runout distance. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 44(4), 509-519.
- Viglietti, D., Letey, S., Motta, R., Maggioni, M. and Freppaz, M. (2010). Snow avalanche release in forest ecosystems: A case study in the Aosta Valley Region. *Cold Regions Science and Technology*, 64(2), 167-173.



La sperimentazione delle sonde penetrometriche AvaTech SP1

AINEVA e gli uffici regionali e provinciali afferenti hanno appena avviato la sperimentazione, in campo, delle sonde penetrometriche SP1 prodotte dall'AvaTech Inc. di Park City, Utah, U.S.A. e presentate, per la prima volta, all'ISSW 2014 di Banff (Canada). Si tratta di sonde penetrometriche digitali, di ultima generazione, sviluppate da un team d'ingegneri e tecnici informatici del MIT (Massachusetts Institute of Technology) che permettono in una decina di secondi di realizzare un profilo penetrometrico del manto nevoso, di elevato dettaglio, sino alla profondità di 150 cm (Fig. 1).

Il profilo è immediatamente visibile su un apposito display e i dati, tramite connessione bluetooth ad uno smartphone, possono essere condivisi, in tempo reale, sull'apposita piattaforma web AvaNet (Fig. 2). Leggerezza, portabilità e flessibilità dello strumento sembrano promettere un notevole passo in avanti nella raccolta di dati in campo. In particolare, sarà possibile indagare con maggiore precisione la variabilità spaziale e temporale dei livelli critici. La sperimentazione testerà, lungo tutto l'Arco Alpino Italiano e gli Appennini Marchigiani, la risoluzione, precisione e performance dello strumento comparandola con i dati ricavati dalla penetrometria tradizionale e dal profilo stratigrafico del

manto nevoso. Se la sperimentazione confermerà le prime impressioni d'uso, le sonde penetrometriche AvaTech SP1 potranno rivelarsi un prezioso e flessibile strumento a sostegno delle reti regionali e provin-

ciali di raccolta dati a fini previsionali. Maggiori informazioni tecniche sullo strumento sono reperibili al sito <http://www.avatech.com/>.

Igor Chiambretti

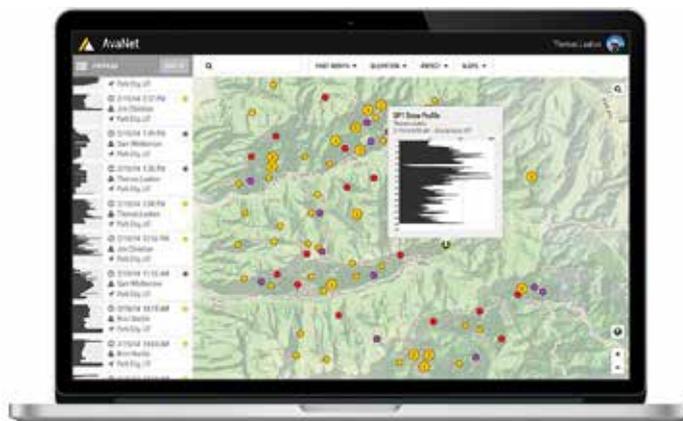


Fig. 2 - Una delle schermate della piattaforma web AvaNet.



Fig. 1 - La sonda penetrometrica digitale AvaTech SP1.



A Roma il 18° Meeting EAWS

Il 5 e 6 giugno 2015 si terrà a Roma il 18° meeting di EAWS (European Avalanche Warning Services). Il meeting è un evento biennale che ha lo scopo di consentire ai servizi valanghe europei d'incontrarsi e di discutere, trovando soluzioni comuni su diversi temi che riguardano

l'operatività degli uffici e i prodotti previsionali. Al meeting partecipano trentacinque servizi di previsione valanghe nazionali, regionali e locali dei seguenti paesi: Islanda, Norvegia, Svezia, Finlandia, Scozia, Spagna, Regione Autonoma Catalana, Francia, Svizzera, Italia, Slovenia, Austria, Germania, Repubblica Ceca, Slovacchia, Polonia e Romania. Come membri speciali partecipano anche una rappresentanza dei servizi valanghe di Canada, Stati Uniti e Nuova Zelanda. Diversi gli argomenti all'ordine del giorno: le Situazioni Tipo di pericolo valanghe (standardizzazione e definizioni); la

nuova Scala di Magnitudo delle valanghe; proposte d'implementazione della Matrice Bavarese; approvazione delle nuove icone No Snow e No Info; la previsione valanghe locale versus la previsione sinottica; approvazione del nuovo regolamento EAWS; discussione e aggiornamento sulla previsione delle valanghe a lastroni di fondo, delle valanghe di scivolamento e delle valanghe di neve a debole coesione umida o fradicia; codifiche e scambio dati (aggiornamento sugli standard). Durante la giornata di registrazione dei partecipanti (il pomeriggio del 4 giugno 2015) e le pause caffè, il 5 e 6 giugno, si terranno anche le ses-

sioni poster sui seguenti argomenti: previsione valanghe; comunicazione, nuovi media e bollettini; raccolta e scambio dati; protezione civile e previsione del rischio. L'evento sarà ospitato nella Sala Cavour presso la sede del Ministero per le Politiche Agricole Alimentari e Forestali e l'organizzazione logistica sarà a cura del Corpo Forestale dello Stato, Servizio Meteomont mentre il coordinamento tecnico-scientifico sarà a cura di AINEVA il cui responsabile tecnico riveste, dal 2013, il ruolo di coordinatore del gruppo di lavoro EAWS.

Igor Chiambretti

CONVEGNO CISA IKAR 2014

Per la prima volta il convegno annuale della CISA-IKAR si è svolto oltreoceano a Lake Tahoe, località al confine tra California e Nevada, negli USA.

Il convegno è iniziato con un workshop dal taglio molto pratico con diversi atelier a 2500 metri di quota. Le ditte che producono ARTVA e airbag hanno mostrato le ultime innovazioni tecnologiche. In particolare la ditta Mammüt ha condotto dei test sulle interferenze tra ARTVA e oggetti metallici e dispositivi elettronici, stilando alcune raccomandazioni: per non subire interferenze, l'ARTVA in trasmissione deve essere indossato ad almeno 20 cm di distanza da ogni possibile fonte elettromagnetica. In fase di ricerca si raccomanda di tenere lo strumento distante almeno 50 cm da tutti gli oggetti che interferiscono e, se possibile, spegnere ogni dispositivo elettronico (per es. smartphone). Si è visto che anche gli orologi da polso (soprattutto quelli con altimetro e/o gps) causano interferenze se distano 10-15 cm ovvero se sono indossati sul polso della mano che tiene l'ARTVA. È stata presentata una recente strategia nell'utilizzo della sonda da valanga (slalom probing), con una ricerca "in linea" più efficace. Interessanti le tre simulazioni relative a casi di ipotermia.

Sono state analizzate le problematiche che incontra il soccorso organizzato quando interviene negli incidenti di massa in montagna. Il problema principale è che ci sono più pazienti di quanti possano essere gestiti dalle risorse disponibili utilizzando le procedure di routine. Si è visto che si possono migliorare gli aspetti medici con un efficiente triage. A volte è necessario ridurre il trattamento agli aspetti di base: trattare il freddo, il bagnato e il dolore.

AlNEVA ha poi partecipato alle sessioni organizzate dalla commissione valanghe. Ogni paese ha presentato le statistiche relative agli incidenti da valanga, evidenziando alcune caratteristiche peculiari (per l'Italia vedi articolo "Gli incidenti da valanga" Neve e Valanghe n.81 di aprile 2014).

Stefano Pivot

Seminario internazionale Valanghe e diritto

1 - 3 giugno 2015

Centro congressi di Davos, Svizzera



Informazioni

L'obiettivo del seminario è quello di mettere in collegamento i professionisti operanti nel settore neve e valanghe e i giuristi al fine di approfondire le conoscenze e la comprensione reciproca.

In una prima fase il seminario fornirà una panoramica sullo stato attuale della valutazione del pericolo di valanghe e della gestione dei rischi.

In una seconda fase i riflettori verranno puntati sugli aspetti giuridici dell'attività svolta dai responsabili della sicurezza. Sulla base di alcuni esempi di casi specifici provenienti dai paesi alpini verranno trattati gli aspetti penali e assicurativi.

Nel corso di alcuni workshop verranno discussi e analizzati, tra gli altri, argomenti come obblighi di diligenza dei responsabili della sicurezza, relazioni di accertamento e interrogatori in caso di incidenti da valanga.

Luogo centro congressi di Davos

Lingue tedesco, francese, italiano
(traduzione simultanea)

Destinatari responsabili della sicurezza, guide alpine, maestri di sport sulla neve, capi-comitiva, giuristi, esperti in questioni assicurative, rappresentanti delle autorità e appassionati di sport invernali

Relatori professionisti del settore neve e valanghe, pubblici ministeri, giuristi, periti nominati dai tribunali dei paesi alpini, esperti in questioni assicurative e collaboratori dell'SLF

Organizzazione WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF

Direzione Hansueli Rhyner, SLF

Costo CHF 650.- (tassa di partecipazione alla conferenza, pernottamento escluso)

Iscrizione iscrizione online sino al 15 aprile 2015 all'indirizzo www.slf.ch/more/lur

Informazioni WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF

Marion Berner, +41-81-417 02 25,
berner@slf.ch o lur@slf.ch

Programma

Lunedì 1° giugno 2015

Dalle ore 11:00: Registrazione presso il Centro congressi (ingresso "Promenade")

13:45-14:00: Apertura

14:00-18:00: Formazione delle valanghe. Prevedibilità degli eventi valanghivi. Valutazione del pericolo di valanghe dal punto di vista pratico (zone fuoripista, comprensori sciistici, vie di comunicazione / centri abitati)

18:00: Aperitivo "Ice Braker"

20:30-21:30: Visita dell'istituto SLF (facoltativa)

Martedì 2 giugno 2015

08:00-12:00: Aspetti penali e assicurativi di un incidente da valanga. Panoramica della prassi giuridica per gli incidenti da valanga nei paesi alpini A, D, F, I e CH

14:00-14:45: Tavola rotonda sul tema dell'interrogatorio con persone interessate e pubblico ministero

15:00-17:30: Workshop 1: Obbligo di diligenza dei servizi di previsione valanghe

Workshop 2: Interrogatorio e relazione di accertamento

Workshop 3: Questioni legali nei comprensori sciistici

Workshop 4: Questioni legali nelle zone escursionistiche e fuoripista

19:30: Cena presso il Centro congressi

Mercoledì 3 giugno 2015

08:00-09:30: Diritto al rischio ed evoluzione del rischio durante gli sport invernali fuoripista

10:00-12:30: Presentazione dei risultati ottenuti dalla sintesi dei workshop

12:30: Fine del seminario, buffet in piedi



SNOW MAPS OF TRENITINO WITH CRIOPAT

Automated generation and analysis of data and statistics on snow coverage through remotely gathered multispectral images

L. Bruzzone, C. Marin, M. Santoni, F. Bovolo, A. Trenti, W. Beozzo

This paper presents the CRIOPAT project, resulting from the cooperation between the Forecasting and Planning Office of the Autonomous Province of Trento and the Remote Sensing Laboratory of the Department of Information Engineering and Computer Science of the University of Trento. CRIOPAT is an integrated analysis system that is able to gather daily important information about snow coverage on the Trentino region through satellite images. In detail, the system can automatically access the data acquired by the NASA MODIS sensor and generate snow coverage maps, monthly snow persistence maps and statistics on the evolutionary trend of snow and the altitude limits of snow presence on the Trentino region. The data generated from the

system are accessible by users via friendly web interfaces that allow authenticated users to carry out dedicated analyses on the snow evolutionary trends for homogeneous areas. The results obtained through the analysis of remotely gathered images as from February 2000 are in line with the historical data processed by the weather forecasting office of the province of Trento. This underlines the operational effectiveness of the CRIOPAT system.

MODELLING OF SNOWPACK DYNAMICS IN ALTA VALTELLINA

F. Avanzi, C. De Michele, A. Ghezzi, F. Bondiolotti, G. Della Vedova

Melting of seasonal snowpacks is an important component of the hydrological balance of mountain watersheds.

For example, alpine areas contribute more than 50% of the total annual flows of the Po river basin. In this context, the Valtellina valley (Lombardia, Northern Italy) represents an important case study, for the fact of having many hydroelectric power plants, important winter tourism resorts, and intensive agricultural production.

Because of the influence of climate variations on snow accumulation and melting dynamics, the prediction of future scenarios of water availability in this area is strategic for the economic and social future of the whole country. The article deals with the implementation of a snowpack dynamic model to three different measuring sites located in Alta Valtellina. The model predicts the dynamics of snow water equivalent at a site through combined analysis of snow depth and its average snow density. Predictions are then compared with data from three experimental sites located in western Val Grosina valley (Malghera), eastern Val Grosina valley (Eita) and in the Cancano valley (Val Cancano). These results show that the proposed model can be an important tool for the evaluation of snowpack accumulation and melting dynamics in the Italian Alps.

SnowMaps: drawing up of snowfall maps to support avalanche forecasting

M. Dall'Amico, F. Zambon, A. Cagnati, A. Crepaz, S. Endrizzi

Snow is a fundamental resource

in the mountain: in addition to being a tourist attraction for winter sport lovers, it is also a precious water supply during snow melting. However, snow can also represent a danger, for example due to possible avalanche release, causing obstacles on roads, and sudden floods in case of rapid snow melting caused by temperature rises. Quantifying snow height and snow water equivalent therefore allows experts to optimise snow management in the tourism, energy, hydrologic and civil defence sectors, which are strategic in the mountain areas. This article illustrates an innovative snow monitoring system called SnowMaps, which allows for quantification of snow height on a regional scale through a physically-based approach.

The article also proposes a case study in the mountain area of Veneto region and in-depth analysis of the implementation of this tool as a support for avalanche forecasting.

Snow water equivalent monitoring from MODIS data: the case study of the upper Piave river basin (eastern Italian Alps)

P. Cianfarra, M. Valt

Monitoring the snow water equivalent (SWE) in mountain regions is of utmost importance for water budget assessment and for hydro-geological risk management. This work presents a methodology to estimate SWE based on the analysis of both multispectral data (MODIS satellite images) and field measurements.

The study area is the headwater of the Piave river basin in the Eastern part of the Italian Alps during the melting season of the 2010-2014 period. SWE was determined by taking into account the variability of the snow covered area and of snow density.

Obtained results are promising and the developed methodology could be successfully used to highlight the climatic trends of the last 15 years of the entire Italian Alps thanks to the availability of historical time series and satellite images.





THE MOUNTAIN RISK RESEARCH TEAM
Research to support management of wet and glide-snow avalanches in Valle d'Aosta

B. Frigo, B. Chiaia, V. De Biagi, L. ublanc, M. Freppaz, D. Godone, M. Maggioni, D. iglietti, E. Ceaglio, P. Della vedova, D. Franco, A. Godio, H. Grosjacques, A. Prola, F. Torretta, A. Welf, D. Tosi

The Mountain Risk Research Team - MRR Team (established in the framework of the "Call for the creation and development of Research Units" - DGR n. 1988 dated 26/08/2011) is a multidisciplinary research unit with a scientific-technical core, integrated with the legal and social aspects, in the field of natural hazards in mountain environment. In particular, the MRR Team, which includes universities, research institutes and

a ski enterprise of Aosta Valley is developing the Operational Project "RRI - Risk, Research and Innovation". In this framework, the wet and glide-snow avalanches are studied. These avalanches are highly dangerous because of the large possible involved volume of snow and the difficulty of forecasting their release. Before the '60s, these phenomena have only partially attracted the scientific interest but afterwards the knowledge on formation and processes related to wet-snow and glide-snow avalanches has grown significantly. Particularly, the role of free water at the snow/soil interface has been analyzed as key factor responsible of the gliding rate and the acceleration of the gliding snowpack. The scientific and technological objectives pursued in this project by the MRR Team are (1) to develop tools for monitoring



and prediction of wet-snow and glide-snow avalanches and (2) to define a procedure (best practice) of risk management in terms of safety and cost reduction in the Alpine ski-resort Monterosa Ski. The experimental approach on the analysis of formation of wet and glide-snow avalanches is based on the set-up of four test sites within the Monterosa Ski resort in Aosta Valley (NW Italian Alps) during summer 2013. The paper describes the objectives, the activities and the test sites with some preliminary data and results.

