

EFFETTO del MANTO NEVOSO sulla TEMPERATURA SUPERFICIALE del SUOLO

Michel Isabellon

ARPA Valle d'Aosta, Aosta
Università degli Studi di Torino,
Dipartimento di Scienze Agrarie,
Forestali e Alimentari, Torino
michel.isabellon@gmail.com

Umberto Morra di Cella,

**Gianluca Filippa,
Paolo Pogliotti e**

Edoardo Cremonese
ARPA Valle d'Aosta, Aosta

Michele Freppaz

Università degli Studi di Torino,
Dipartimento di Scienze Agrarie,
Forestali e Alimentari, Torino

Il regime termico superficiale è un parametro correlato alle condizioni fisiche del suolo. Durante l'inverno il manto nevoso esercita un'azione isolante tra l'atmosfera e il suolo, la cui efficienza è variabile in funzione di fattori climatici (entità delle precipitazioni, temperatura dell'aria, vento) e di fattori topografici (quota, esposizione, pendenza). Nel presente lavoro sono stati analizzati quattro anni di dati orari di temperatura superficiale del suolo rilevati in 20 punti variamente distribuiti nella conca di Cervinia, comune di Valtournenche (AO). I punti sono localizzati a diversa quota, esposizione e pendenza al fine di investigare la relazione tra la temperatura dell'aria, la topografia e la distribuzione spaziale e temporale del manto nevoso. Le quattro stagioni investigate (dal 2010 al 2014) presentano innevamento con significativa variabilità, permettendo di ottenere una buona rappresentatività delle diverse condizioni possibili. Osservando i dati è possibile affermare che la temperatura superficiale del suolo è strettamente legata alla durata della copertura nevosa e alle sue dinamiche di fusione. Oltre alla quota, l'esposizione è il fattore che maggiormente influenza la permanenza della neve al suolo. Dall'analisi effettuata, infine, si evidenzia la possibile presenza di permafrost in corrispondenza dei punti più freddi che si trovano a quote superiori ai 2500 m s.l.m.



INTRODUZIONE

La temperatura superficiale del substrato (*Ground Surface Temperature - GST*) è la temperatura misurata nei primi centimetri dalla superficie, generalmente a 3, 5, 10 cm. La GST ha un'elevata variabilità spaziale e dipende dalla relazione tra vari fattori quali la temperatura dell'aria, l'incidenza della radiazione solare, la presenza di manto nevoso e la sua densità, le caratteristiche fisico-chimiche del substrato e la presenza di permafrost.

Si definisce permafrost una condizione termica che interessa ogni tipo di substrato che rimanga ad una temperatura di 0 °C per almeno 2 anni consecutivi.

La GST presenta inoltre una notevole variabilità interannuale essendo fortemente legata all'andamento della temperatura dell'aria e delle precipitazioni nevose. Durante il periodo dell'anno in cui sul substrato è assente il manto nevoso la GST rispecchia l'andamento della temperatura dell'aria e presenta una marcata ciclicità tra il giorno e la notte. Con l'arrivo dell'inverno la temperatura dell'aria diminuisce e senza neve l'andamento della GST rispecchia fedelmente quello della temperatura dell'aria, con valori anche di molti gradi sotto gli 0 °C. Questo tipo di comportamento si veri-

fica ad esempio nei punti costantemente interessati da forte vento, in cui la copertura nevosa è soggetta a continua erosione. Possibili eccezioni si segnalano ad esempio nei versanti ripidi esposti a sud, nei quali la radiazione solare incidente è in grado di aumentare la temperatura del substrato nelle ore più calde anche durante l'inverno, provocando elevati gradienti giornalieri. La presenza di un sottile strato di copertura nevosa può permettere un abbassamento notevole della temperatura per effetto di una maggior albedo della superficie e per la perdita del calore rilasciato dal suolo e non trattenuto dal manto (Zhang, 2005). Le variazioni giornaliere di temperatura sono attenuate con l'aumento progressivo della copertura nevosa: un manto nevoso sufficientemente spesso è in grado di isolare completamente il suolo dall'aria impedendone il congelamento. L'effetto di isolamento termico del manto nevoso dipende dall'elevato contenuto in aria: esso varia notevolmente in funzione dello spessore e della densità del manto, con notevoli differenze nell'arco della stagione invernale (Freppaz et al. 2011). La conducibilità termica aumenta all'aumentare della densità, con valori intorno a circa 0,15 Wm⁻¹K⁻¹ per una densità di 300 kg m⁻³ e 0,30 Wm⁻¹K⁻¹ per una densità di 400 kg m⁻³ (Sturm et al., 1997). Inoltre, data la sua elevata albedo, la neve limita fortemente la radiazione solare al suolo condizionando in maniera significativa gli scambi energetici. La variabilità spaziale della copertura nevosa e della sua durata dipende da fattori climatici come l'andamento della temperatura dell'aria e da fattori topografici a scala puntuale che influenzano l'accumulo di neve o la sua erosione da parte del vento e la diversa incidenza della radiazione solare che interviene direttamente nei processi di fusione. Considerata la rilevante variabilità dei parametri sopra elencati, è evidente come la distribuzione spaziale della copertura nevosa, strettamente connessa alle dinamiche di accumulo e di fusione, sia estremamente eterogenea nel tempo e nello spazio e vi possano essere notevoli differenze nel regime termico del substrato tra due punti poco distanti tra loro.

In presenza di copertura nevosa, all'interfaccia suolo-neve, il flusso di calore proveniente dagli strati più profondi del sottosuolo mantiene la temperatura di qualche decimo di grado sopra gli 0 °C. In questo caso, durante tutto il periodo interessato da abbondante copertura nevosa, la GST dipende interamente dal flusso di calore indipendentemente dalla temperatura dell'aria. In questa fase la temperatura si stabilizza intorno a un valore di equilibrio detto *Winter Equilibrium Temperature* (WeqT). Osservando il dato di temperatura superficiale alla base del manto nevoso (*Bottom Snow Temperature - BTS*) durante questo periodo si ha un'indicazione della possibile presenza di permafrost negli strati di suolo sottostanti. Con uno strato di neve di almeno 80-100 cm durante l'inverno nel caso in cui il suolo non sia in grado di riscaldare il substrato superficiale la temperatura può scendere di alcuni gradi sotto gli 0 °C ed è probabile che negli strati sottostanti vi sia presenza di ghiaccio. Quando la temperatura scende al di sotto della soglia di -3 °C si considera probabile la presenza di permafrost, se la temperatura si attesta tra i -3 e -2 °C la presenza di permafrost è possibile, mentre probabilmente non vi sono condizioni di permafrost con temperature superiori a -2 °C (Hoelzle, 1992). Nell'arco alpino il permafrost è presente a livello sporadico, la sua formazione e la sua conservazione sono influenzate da una concomitanza di molteplici elementi, tra i quali la distribuzione della copertura nevosa assume un ruolo particolarmente significativo a parità di altre condizioni. L'aumento della temperatura e della radiazione solare incidente durante la stagione primaverile innesca il processo di fusione del manto nevoso determinando un aumento della densità e del contenuto in acqua. La GST subisce un progressivo aumento andando a stabilizzarsi sulla soglia di 0 °C, corrispondente alla data in cui il manto diventa isotermico e inizia a rilasciare acqua nel suolo. Questa fase, non reversibile, prende il nome di *zero curtain* e termina con la completa fusione del manto e il conseguente innalzamento della GST

Dall'alto verso il basso:
fig. 1 - Posizione dei sensori nell'area oggetto di indagine (Regione Autonoma Valle d'Aosta, Assessorato Territorio, Ambiente e Opere Pubbliche; Ortofoto edizione 2006 - Aut. n. 1156 del 28.08.2007).
Fig. 2 - Posizione dei sensori nell'area dell'Orionidé (Regione Autonoma Valle d'Aosta, Assessorato Territorio, Ambiente e Opere Pubbliche; Ortofoto edizione 2006 - Aut. n. 1156 del 28.08.2007).





Fig. 3 - Rispettivamente in senso orario dall'alto a sinistra: Stazione meteo del Colle Superiore di Cime Bianche; data logger HOBO UTBI - 001; localizzazione (vista invernale) di un logger in condizioni di ridotto accumulo nevoso; localizzazione di un punto di misura nel periodo estivo.

al di sopra di 0° C. Durante il processo di fusione la temperatura della neve aumenta rapidamente raggiungendo le condizioni di isoterma (0 °C) in un paio di giorni (Zhang, 2005). In questa fase è la neve a impedire un immediato aumento della temperatura del suolo rispetto a quella dell'aria, ritardandone il riscaldamento. A fine autunno e durante l'inverno la copertura nevosa determina valori di temperatura del suolo superiori a quelli dell'aria, viceversa, durante la stagione tardo primaverile e soprattutto estiva, la persistenza del manto nevoso produce l'effetto opposto isolando il suolo dal calore proveniente dall'atmosfera (Guglielmin, 1997). Nelle depressioni sottovento, negli anfratti, nei versanti a nord meno esposti alla radiazione solare primaverile e non particolarmente soggetti al vento, normalmente si registrano accumuli di neve di maggior spessore che sono sottoposti a fusione più tardiva; pertanto la neve permane più a lungo mantenendo temperature più basse per una parte della stagione più calda con una relativa influenza sulla media annuale. L'obiettivo dell'analisi riportata in questo articolo è indagare la variabilità della GST in

	PENDENZA (°)				ESPOSIZIONE				QUOTA (m s.l.m.)	
	0-10	10-30	30-50	flat	N	E	S	W	2000-2500	2500-3000
r1	X			X						X
r3		X			X					X
r4		X				X				X
r5		X					X			X
r6		X						X		X
r7			X		X					X
r8			X			X				X
r9			X				X			X
r10			X					X		X
r11		X			X				X	
r12		X				X			X	
r13		X					X		X	
r14		X						X	X	
r15			X		X				X	
r16			X			X			X	
r17			X				X		X	
r18			X					X	X	
r19	X			X					X	

Tab. 1 - Caratteristiche topografiche dei punti di misura. Per fare un'indagine della variabilità della GST i punti sono stati scelti in seguito ad una analisi della topografia in modo da indagare le esposizioni e le pendenze più rappresentative.

funzione della morfologia e dello spessore del manto nevoso nel corso della stagione.

MATERIALI E METODI

In questo articolo si presentano i risultati del monitoraggio della GST nel sito LTER localizzato nella conca di Cervinia (Valtournenche, AO) nel periodo 2010-2014.

La rete di misura è costituita da 20 sensori per la misura in continuo della GST in punti compresi tra 2.100 e 3.100 m s.l.m. distribuiti tra l'area interessata dagli impianti sciistici

e l'area dell'Oriondè ai piedi del Cervino (Fig. 1 e Fig. 2). Sono stati utilizzati i miniacquisitori di temperatura HOBO Onset UTBI-001 collocati a 5 cm di profondità, con un intervallo di acquisizione di un'ora durante tutto l'arco dell'anno (Fig. 3). Il dataset si estende per 4 anni (dal 13/10/2010 al 25/09/2014). Per fare un'indagine della variabilità della GST i punti sono stati scelti in seguito ad una analisi della topografia in modo da indagare le esposizioni e le pendenze più rappresentative (Tab. 1).

Fig. 4 - Andamento della GST nel punto r3.

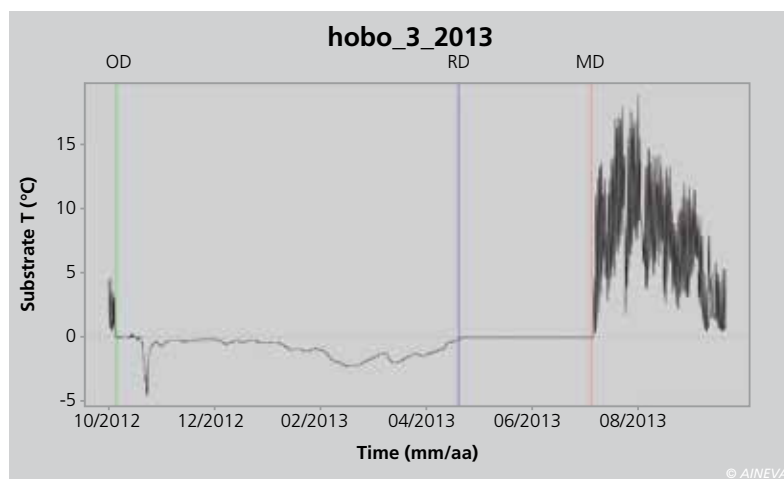


Fig. 5 - Tipico andamento invernale della GST in un punto interessato dalla presenza di permafrost. Punto BH7 presso il Colle di Cime Bianche 3100 m. In blu la neve misurata dal nivometro.

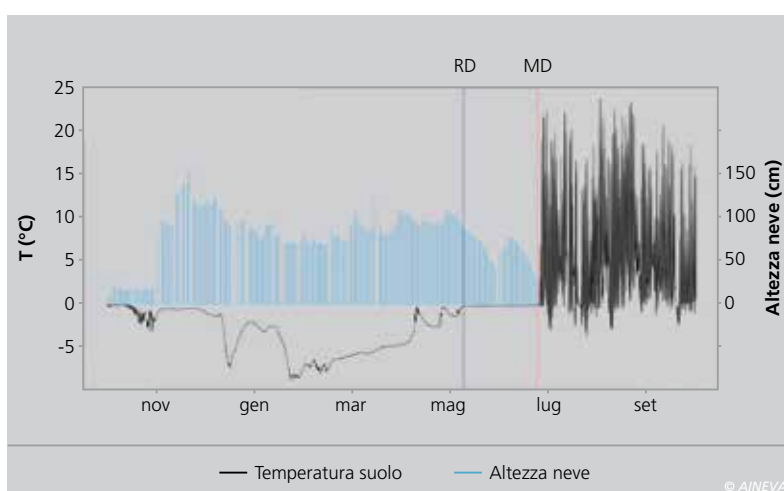
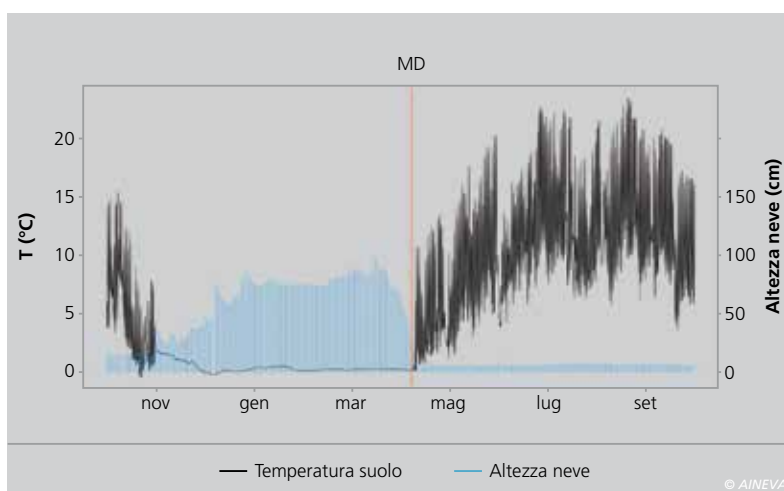


Fig. 6 - Tipico andamento invernale della GST in un punto senza permafrost. Sito di Torgnon (pascolo a 2100 m s.l.m.).



Dinamica del manto nevoso e andamento della GST

Al fine di determinare la durata della copertura nevosa in ciascun punto di misura è stata condotta un'analisi che permette, a partire dai soli dati di temperatura di calcolare: (i) la data di inizio accumulo della neve (*onset date*, OD), (ii) la data in cui il manto nevoso diventa isoterma (*basal ripening date*, RD) e (iii) la data di fusione completa del manto nevoso (*melt-out date*, MD)

(Schmid et al., 2012). Osservando il grafico (Fig. 4), la data di RD è riconducibile ad un prolungato periodo in cui la temperatura si stabilizza su 0 °C. Tale condizione si verifica nel momento della stagione invernale in cui il manto inizia a fondere ed a rilasciare acqua nel terreno ed è individuabile soltanto nei casi in cui l'andamento della temperatura all'interfaccia suolo-neve assume valori negativi durante l'inverno, poiché in caso contrario la temperatura non si

discosta dalla soglia di 0 °C durante tutta la stagione invernale. La data di MD, invece, corrisponde a un brusco innalzamento della temperatura al di sopra degli 0 °C.

Per testare la precisione del metodo utilizzato per la determinazione delle date di MD ed RD, sono stati confrontati i dati relativi alla GST in 4 siti test in cui è presente un nivometro (nivometro a ultrasuoni Campbell&Scientific SR50) che rileva, in continuo (un valore registrato ogni 10 minuti), l'altezza del manto nevoso.

In questi siti è possibile confrontare l'andamento della temperatura superficiale e le variazioni di spessore della copertura nevosa. Due punti ricadono presso il sito di monitoraggio del permafrost di Cime Bianche a 3.100 m, e forniscono un ottimo esempio di andamento della GST in un sito con presenza di permafrost. In particolare, osservando il grafico (Fig. 5), rappresentativo per entrambi i siti posti a Cime Bianche, è possibile osservare un abbassamento della temperatura anche al di sotto di -6 °C nonostante la presenza di un manto nevoso consistente.

Tra i punti di misura nella Conca, gli unici che mostrano questo tipo di andamento sono quelli posti alle quote più elevate, sia che si trovino in punti in cui vi è costante presenza di neve (r10, r3, r6) sia in punti in cui la neve è ridotta a causa del vento (r7). Gli altri due punti di test, invece, sono situati a bassa quota in corrispondenza di due stazioni di monitoraggio a 2.100 m s.l.m. nel comune di Torgnon, uno in un pascolo e l'altro in un bosco di larice. Confrontando i dati di GST e i dati di altezza neve misurati dai nivometri possiamo notare l'andamento tipico della GST durante il periodo di copertura nevosa in due punti senza permafrost. Il grafico in Fig. 6 riporta l'andamento del sito a pascolo di Torgnon, al quale è rapportabile l'andamento del sito posto nella foresta di larice. In questo caso, la temperatura del suolo durante l'inverno si attesta attorno a 0 °C.

Come ultimo test per verificare l'accuratezza del metodo utilizzato per estrarre le date di MD ed RD dai dati di temperatura, si è inoltre operato un confronto tra le date ricavate tramite il processamento automatico

e le date stabilite tramite una osservazione visiva dei grafici. Tali date non differiscono significativamente ad eccezione dei punti in cui non è possibile stabilire con precisione le date poiché le variazioni di temperatura del suolo sono attenuate, a causa della scarsa copertura nevosa.

RISULTATI

Relazione tra GST e durata del manto nevoso

Confrontando su più anni l'andamento delle GST in un punto si può chiaramente notare la differenza della data di inizio della copertura nevosa e di fusione.

Confrontando la durata del manto nevoso di un punto con le date di fusione nelle tre stagioni si evidenzia una marcata differenza tra gli anni. La prima stagione (2010/11) è stata caratterizzata da una fusione anticipata per un avvio precoce della stagione primaverile (inizio di aprile). La seconda e la quarta stagione (2011/12 e 2013/14) presentano valori intermedi rispetto alle altre due. La terza stagione (2012/13) ha visto prolungarsi la durata della copertura nevosa fino al mese di maggio inoltrato a causa di abbondanti neviccate tardive. Osservando serie di dati a disposizione di ARPA utilizzate per la stima dell'andamento dell'SWE a scala regionale emerge che il periodo di fusione della neve nelle stagioni 2011/12 e 2013/14 è in linea con la media degli ultimi 10 anni, mentre gli altri due anni risultano notevolmente anomali.

Esaminando le temperature medie annuali della superficie del substrato (MAGST, *Mean Annual Ground Surface Temperature*) di tutti i siti si può notare che i dati a disposizione presentano delle differenze tra gli anni. Mettendo in relazione la MAGST con il numero di giorni di copertura nevosa (*snow days*, SD) si può notare che la temperatura media annuale tende a diminuire all'aumentare del numero di giorni di neve. Questo può essere riconducibile ad una permanenza prolungata del manto nevoso che ritarda il riscaldamento del suolo isolandolo dall'aumento della temperatura dell'aria e dall'aumento di radiazione solare. Inoltre, se si considera la media della temperatura limitata al periodo di copertura nevosa (MUGST, *Mean Under Snow GST*) si può notare che lo scarto tra gli anni assume proporzioni visibilmente inferiori dovute all'effetto isolante della copertura nevosa sugli sbalzi termici durante la stagione invernale.

Tenendo conto della soglia di -2°C di temperatura superficiale possiamo asserire che gli unici punti indagati in cui è lecito aspettarsi la presenza di permafrost nel sottosuolo sono ad una quota superiore a 2500 m. Si è così tentato di suddividere il *dataset* prendendo in considerazione due *subset*: in un caso soltanto i punti al di sopra dei 2500 m s.l.m., nel secondo i punti compresi nell'area interessata dagli impianti sciistici, in corrispondenza dei quali nella stagione 2012-2013 sono state effettuate

le misure manuali di Hs. Nonostante i due subset non siano rappresentativi di tutte le condizioni, è stata riscontrata la stessa tendenza rispetto all'intero *dataset* (Fig. 7). Si è svolta un'analisi del rapporto tra MAGST e SD con lo scopo di determinare le differenze tra uno stesso punto in anni in cui le precipitazioni sono diverse per ipotizzare gli effetti di un eventuale trend di riscaldamento. L'analisi in funzione delle caratteristiche di ogni punto ha permesso di fare alcune considerazioni. Quota ed esposizione sono i caratteri che maggiormente influenzano la MAGST e il numero di giorni interessati da copertura nevosa. Partendo dal presupposto che la GST varia poco durante il periodo interessato da copertura nevosa, si può notare che all'aumentare della quota la neve persiste più a lungo sul suolo, con un effetto di abbassamento della MAGST.

La GST è inoltre direttamente influenzata dalla temperatura dell'aria e diminuisce all'aumentare della quota. L'esposizione ha un effetto importante sulla MAGST in quanto agisce direttamente sulla quantità di radiazione solare durante l'anno, influenzando in misura importante il momento della fusione.

Al fine di identificare i principali fattori che determinano la MAGST in un punto, è stata svolta una regressione ad albero che permette di classificare in maniera gerarchica la relazione statistica che intercorre tra una serie di predittori (nel caso in esame

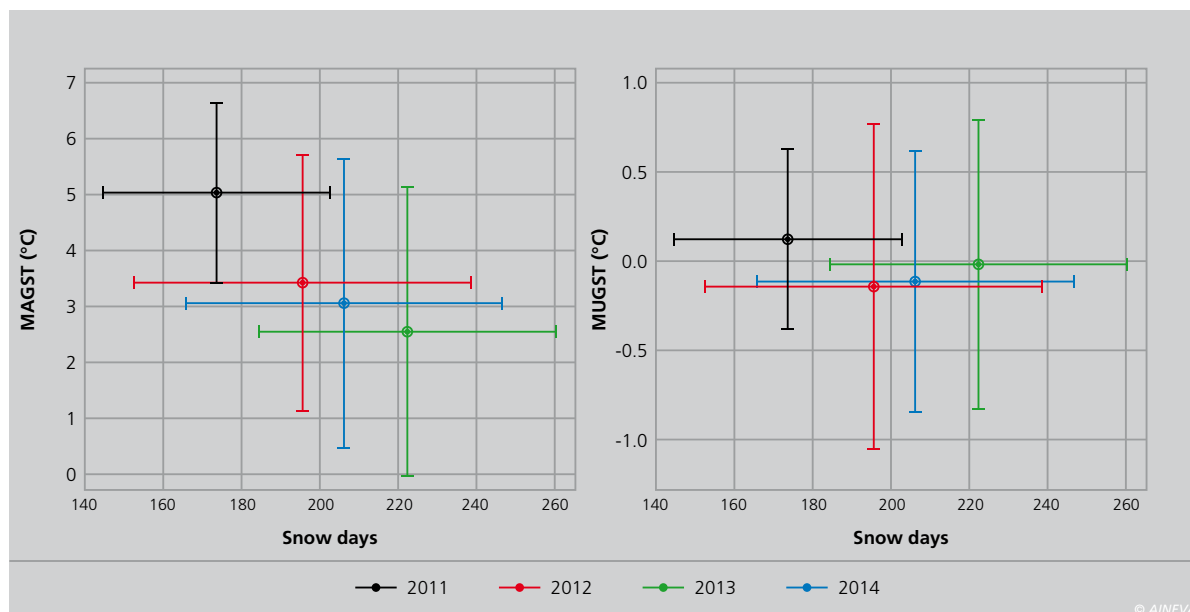
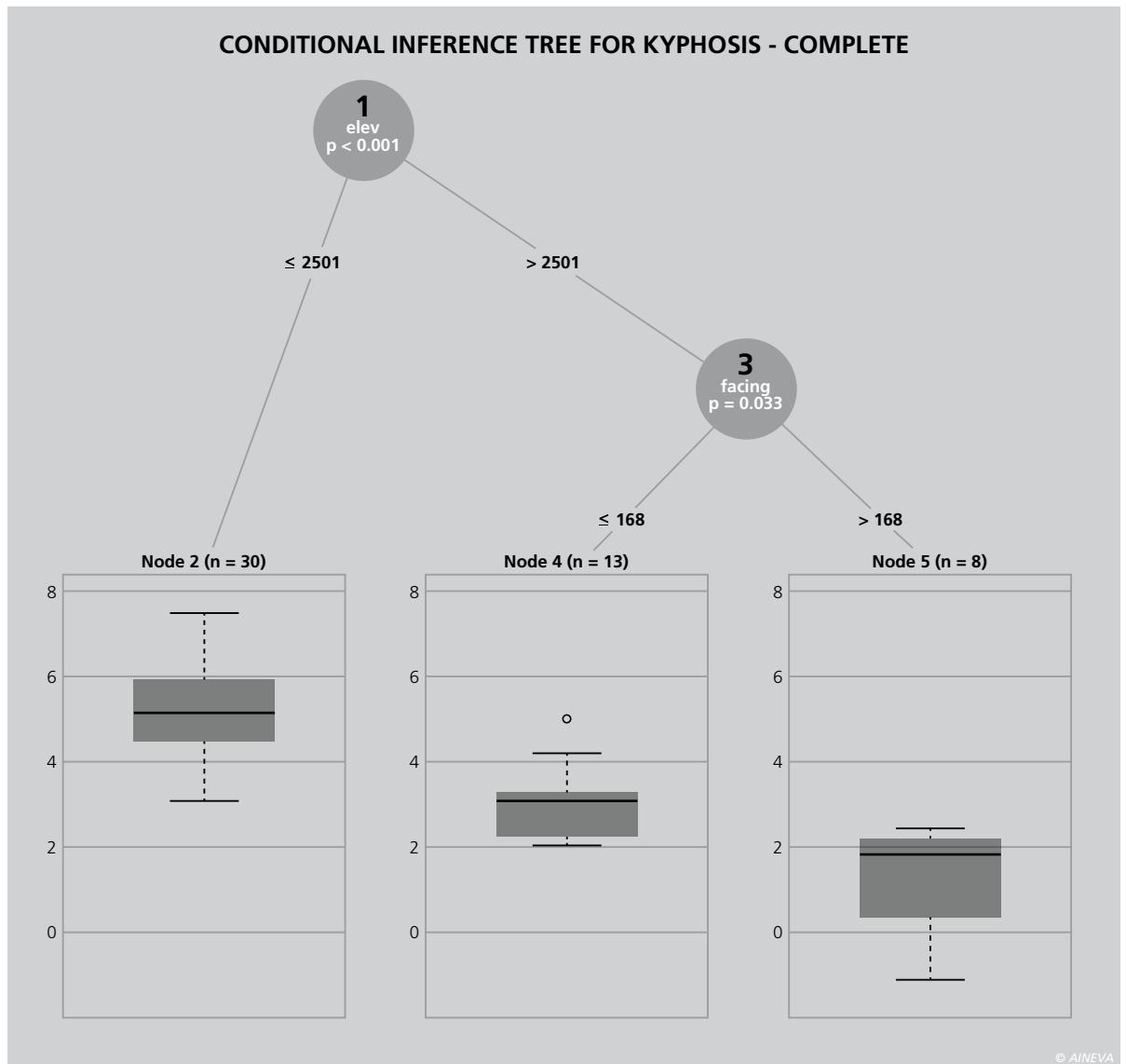


Fig. 7 - Relazione tra temperatura media annua (MAGST) e giorni di neve (SD) (sinistra) e relazione tra temperatura al di sotto della copertura nevosa (MUGST) e giorni di neve (destra). I valori sono relativi alla media di tutti i punti.

Fig. 8 - Tree Analysis per la valutazione dell'incidenza dei vari parametri nella relazione tra MAGST e SD.



esposizione, quota e pendenza) ed una variabile "risposta" (nel caso la MAGST). Come previsto, dall'analisi è emerso che il fattore di maggior influenza è la quota, seguito dall'esposizione, mentre per quanto riguarda gli altri attributi, quali ad esempio la pendenza, la relazione non è risultata significativa (Fig. 8).

Su due punti a debole pendenza (r1, r19), posti rispettivamente a 2.500 e 2.100 m di quota, sono stati riscontrati accumuli di neve abbondanti e continui nel corso della stagione, con relativi andamenti della temperatura nel corso dell'inverno di poco distanti dall'isoterma a 0 °C. In tutti gli altri punti a pendenze superiori è stata riscontrata un'elevata variabilità della copertura nevosa dovuta a molteplici fattori che non ha permesso di effettuare significative valutazioni. Un chiaro esempio può essere fornito a tal fine dal comportamento nei

punti r7 e r18, con una pendenza simile rispettivamente di 39 e 36°. In questi due punti la pendenza non è un fattore significativo nello stabilire la quantità di neve accumulata in quanto nel punto r7, posto a 2.974 m, la costante azione del vento raramente permette alle precipitazioni nevose di dare luogo ad accumuli superiori a 10 cm. Al contrario, nel punto r18, posto a 2.196 m, alla neve caduta si aggiunge quella trasportata da continue colate provenienti dalla porzione di versante sovrastante, che danno origine ad accumuli superiori a 2 m durante tutta la stagione invernale. Un altro fattore di indagine preso in considerazione è rappresentato dalle caratteristiche del suolo, in termini di grado di copertura della vegetazione e di abbondanza di materiale roccioso. Anche in questo caso non è stata rilevata alcuna relazione significativa.

CONCLUSIONI

La temperatura superficiale del suolo (GST) è un parametro importante perché il suo andamento stagionale permette di comprendere alcuni dei molteplici aspetti connessi alle caratteristiche fisiche del suolo influenzando in maniera importante la sua stabilità. In assenza di neve il suo andamento è strettamente legato a quello della temperatura dell'aria, mentre durante la stagione invernale un manto nevoso di sufficiente spessore è in grado di isolare il suolo dall'atmosfera, stabilizzando la temperatura e proteggendo il suolo dal congelamento. Lo spessore e la durata della copertura nevosa dipendono in proporzioni variabili a seconda dei singoli casi da fattori climatici e topografici. La presenza di permafrost interferisce su questa dinamica impedendo all'energia geotermica di giungere in superficie e

determinare l'aumento della temperatura della porzione superficiale del substrato e, conseguentemente, causando l'abbassamento della GST di qualche grado al di sotto degli 0 °C, indipendentemente dalla presenza di uno strato isolante di neve. Nel 2010 ARPA Valle d'Aosta ha avviato una specifica campagna di monitoraggio nella conca di Cervinia al fine di indagare l'influenza della copertura nevosa sul regime termico superficiale del suolo, in relazione ad alcuni aspetti topografici.

I risultati delle analisi hanno evidenziato come all'aumentare della durata della copertura nevosa corrisponda una diminuzione della GST. È emerso inoltre che i fattori principali che influenzano il rapporto tra la GST e la durata della copertura nevosa sono quota e in misura minore l'esposizione, mentre le altre variabili topografiche (pendenza) e le caratteristiche del substrato (copertura vegetale e presenza di rocciosità superficiale) non hanno mostrato una relazione con la temperatura superficiale del suolo.

La variabilità della durata del manto nevoso negli anni investigati permette di os-

servare la relazione tra la GST e la durata della copertura nevosa in un ampio *range* di variabilità. Il *range* più elevato di numero di giorni di neve per lo stesso punto nei diversi anni è, infatti, di 66 giorni.

Questo studio ha permesso di capire meglio la relazione tra durata della copertura nevosa e temperatura superficiale del suolo. La serie pluriennale di misure puntuali di GST è, inoltre, un utile dataset di validazione per modelli di distribuzione della temperatura superficiale del suolo che vengono utilizzati per la produzione di mappe di potenziale presenza di permafrost.

RINGRAZIAMENTI

Lavoro eseguito nell'ambito della borsa di studio di ricerca 73B/2014 dal titolo: "Monitoraggio delle caratteristiche del suolo in ambienti sopraforestali d'alta quota (pascoli alpini)". L'attività di ricerca si è svolta presso l'Area Operativa Cambiamenti Climatici di ARPA Valle d'Aosta ed è stata finanziata dal Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari (DISAFA) dell'Università degli Studi di Torino.

Bibliografia

- Freppaz M., Rixen C., Wipf S., Stoekli V., Zanini E. (2011). Influenza della densità del manto nevoso sulla temperatura e la mineralizzazione netta dell'azoto in suoli montani della Valle d'Aosta. *Revue Valdôtaine d'Histoire Naturelle*, 65:171-178.
- Guglielmin, M. (1997). Il permafrost alpino: concetti, morfologia e metodi di individuazione (con tre indagini esemplificative in alta Valtellina). *Quaderni Geodinamica Alpina e Quaternaria*, 5:113.
- Hoelzle, M. (1992). Permafrost occurrence from bts measurements and climatic parameters in the eastern Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 3(2):143-147.
- Schmid M.-O., Gubler S., Fiddes J., Gruber S. (2012). Inferring snowpack ripening and melt-out from distributed measurements of near-surface ground temperatures. *The Cryosphere*, 6(5):1127-1139.
- Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. (1997). The thermal conductivity of seasonal snow. *Journal of Glaciology*, 43(143):26-41.
- Zhang T. (2005). Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews of Geophysics*, 43(4).

