LE VALLETTE NIVALI

SENTINELLE DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Come le variazioni di innevamento condizionano suolo e vegetazione negli ambienti di alta quota

Elena Quaglia, Davide Viglietti, Emanuele Pintaldi, Giampiero Lombardi, Michele Lonati, Michele Freppaz
Università degli Studi di Torino, DISAFA

Claudio Francione
Monterosa 2000 S.p.A.

THE SNOWBED HABITATS: sentinels of climate change

The LTER research site Istituto Mosso is located in the Alagna Valsesia municipality, on the Monte Rosa Massif. Since 2005 the University of Turin - DISAFA performs various research activities on snow/soil/vegetation interactions, the chemical characteristics of high-elevation lakes derived from cryosphere and the atmospheric deposition characteristics. In particular, the long-term monitoring of snowbed communities aims to evaluate the influence of the climatic and pedoclimatic variables, focusing on the effects of snow cover duration on soil carbon and nitrogen form dynamics and phenology.

Il sito LTER "Istituto Scientifico Angelo Mosso" è localizzato nel Comune di Alagna Valsesia, ai piedi del Monte Rosa. Dal 2005 l'Università di Torino - DISAFA conduce attività di ricerca sulle specifiche interazioni neve/suolo/vegetazione, sulle caratteristiche chimiche di laghi in alta quota e sulle caratteristiche delle deposizioni atmosferiche. In particolare, il monitoraggio a lungo termine delle caratteristiche del suolo e della vegetazione nelle vallette nivali ha come obiettivi specifici l'individuazione dell'influenza delle variabili pedoclimatiche e climatiche, con particolare riferimento alla durata dell'innevamento, sulle dinamiche delle forme labili di carbonio e azoto del suolo e la fenologia vegetale.

INTRODUZIONE

Il cambiamento climatico nelle aree d'alta quota delle Alpi

Durante gli ultimi anni non è più possibile parlare di ambienti di alta quota senza menzionare gli effetti del cambiamento climatico: le catene montuose del pianeta stanno già subendo le conseguenze del riscaldamento globale e, tra queste, le Alpi sono oggetto di numerosi studi finalizzati a valutarne gli impatti. Secondo le più recenti ricerche internazionali gli ecosistemi di alta montagna si rivelano particolarmente fragili di fronte alle variazioni climatiche previste per i prossimi decenni (Beniston, 2006). Alterazione della stagionalità delle precipitazioni ed aumento degli eventi estremi, incremento delle temperature soprattutto primaverili ed estive, riduzione in volume dell'innevamento e anticipo della fusione del manto nevoso sono solo alcuni dei fattori che potrebbero avere un grande impatto sugli ambienti della fascia alpina e nivale ed è probabile che noi stessi saremo testimoni di radicali modificazioni nell'aspetto e nella funzionalità di questi biomi (Freppaz et al., 2006; Hock et al., 2019).

Le vallette nivali

Caratteristiche dei suoli

All'interno del bioma di tundra alpina, le vallette nivali sono formazioni di alta quota molto particolari, un sistema di suolo e vegetazione sviluppatosi in condizioni di innevamento estremo (Björk and Molau, 2007). Sono aree di dimensioni medio-piccole e generalmente pianeggianti dove, a causa della microtopografia, la neve tende a rimanere più a lungo che nelle zone circostanti e in alcuni casi fino a 9-10 mesi all'anno. I suoli sono di solito mediamente profondi e moderatamente sviluppati, con una buona dotazione di sostanza organica e, data la lunga ed abbondante copertura nevosa, generalmente non soggetti a limitazioni idriche. Il grado di permeabilità del substrato influenza fortemente i processi di formazione del suolo (pedogenesi), con la presenza o meno di fenomeni di ristagno idrico. Gli orizzonti superficiali del suolo sono in genere arricchiti di particelle di limo e argilla che vengono intrappolate all'interno e sulla superficie del manto nevoso nel corso dell'inverno per poi essere rilasciate al suolo durante il disgelo primaverile.

Caratteristiche vegetazionali

La vegetazione delle vallette nivali comprende specie (es. *Salix herbacea*, *Alchemilla pentaphyllea*, *Carex foetida*, ecc.) provviste di particolari adattamenti che consentono loro di sopravvivere in condizioni di prolungato innevamento e di completare il proprio ciclo riproduttivo nei pochissimi mesi disponibili. Lo spesso strato di neve che le copre fino all'inizio dell'estate protegge le specie tipiche di valletta nivale dalla minaccia delle gelate primaverili, permettendo loro di sviluppare le delicate strutture fiorali senza il rischio che vengano danneggiate da un improvviso calo delle temperature. Proprio a causa della loro elevata specializzazione, alcune specie sono potenzialmente vulnerabili ad eventuali cambiamenti delle condizioni in cui vegetano, come per esempio alla riduzione della durata dell'innevamento, rispetto alle altre specie presenti nelle praterie circostanti (Matteodo et al., 2016).

La fenologia, ovvero lo studio del susseguirsi delle fasi di sviluppo di una pianta, appare come lo strumento conoscitivo ideale per indagare eventuali cambiamenti nel ciclo vitale delle differenti specie e le relazioni di questi con un'ampia serie di variabili climatiche e ambientali. Specie il cui ciclo fenologico è fortemente legato al fotoperiodo (ovvero in alla disponibilità di ore-luce giornaliera) potrebbero presentare una minore adattabilità alle variazioni ambientali indotte dai cambiamenti climatici rispetto ad altre specie in cui il ciclo fenologico è maggiormente influenzato da variabili climatiche e stagionali (come per esempio le somme termiche o le dinamiche di scomparsa del manto ne-

L'Istituto Angelo Mosso con il suo Osservatorio.

voso). I rilevamenti fenologici possono permettere inoltre di esplorare eventuali differenze fra specie, formulando ipotesi sul loro futuro in un clima che cambia, e immaginare come le variazioni ambientali potrebbero contribuire a plasmare la distribuzione delle diverse comunità di tundra alpina.

Visti il loro isolamento geografico e le numerose peculiarità in comune con la tundra artica, le vallette nivali sono considerate come relitti alpini di questo habitat boreale, estesamente diffuso nel Nord Europa. Le vallette nivali sono spesso ritenute dei perfetti laboratori scientifici naturali dove è possibile studiare, su scala ridotta, l'effetto dei cambiamenti attualmente in corso sul nostro pianeta e, in alcuni casi, prevedere come si comporteranno in futuro gli ecosistemi di latitudine elevata.

Rilevamenti nivologici.

Sito LTER Istituto Mosso

I Laboratori Scientifici "Angelo Mosso", (Alagna Valsesia - 2901 m slm), più noti come Istituto Mosso furono costruiti tra il 1905 e il 1907, quando apparve ormai evidente che la capanna Regina Margherita sulla Punta Gnifetti (4554 m slm) nel massiccio del Monte Rosa, come centro di ricerca d'alta quota, era diventato insufficiente alle sempre più numerose richieste di utilizzo da parte della comunità scientifica internazionale. Da qui l'idea promossa dal Prof Angelo Mosso di affiancare all'Osservatorio della Capanna Regina Margherita un'ulteriore struttura in grado di mettere a disposizione dei ricercatori laboratori sempre più ampi e di permettere soggiorni di studio anche protratti ad alta quota. Questo progetto divenne presto realtà grazie all'intervento determinante della Regina Margherita, del re Vittorio Emanuele III, del Ministero della Pubblica Istruzione, dell'Agricoltura, del Club Alpino Italiano e varie personalità dell'epoca. Anche dall'estero alcune Università interessate al progetto riuscirono ad ottenere alcuni cospicui contributi da parte dei governi di Francia, Germania, Svizzera, Austria, Olanda e Stati Uniti. Il 22 Luglio del 1904 fu scelto il terreno al Col d'Olen. Si trattava di una superficie di circa 100.000 metri quadrati che comprendeva un lago, successivamente battezzato lago Bodwitch, in onore del fisiologo americano che portava quel nome. Il primo luglio 1905 ebbero inizio i lavori che terminarono nel 1907, anno in cui, il 27 agosto, ebbe luogo l'inaugurazione. Da questo momento iniziò l'attività dell'Istituto, intitolato proprio al suo promotore, Angelo Mosso. Era il primo laboratorio che provvedeva una sistemazione confortevole a studiosi di svariate discipline: medicina, biologia, botanica e geologia, glaciologia. In particolare nel 1927, con la nomina del gressonaro Umberto Monterin a Direttore dei Regi Osservatori Geofisici del Monte Rosa, il laboratorio del Col d'Olen assunse un ruolo di primaria importanza anche nello studio della meteorologia e glaciologia. Dal 1927 al 1940 l'intensa attività di Umberto Monterin portò all'acquisizione di numerose osservazioni meteorologiche e glaciologiche, che ad oggi costituiscono un patrimonio scientifico di notevole interesse per l'attività di ricerca in ambiente alpino. Le osservazioni furono possibili anche nel corso dei mesi invernali grazie alla collaborazione di un gruppo di alpini concessa dall'autorità militare. Nel 2005 l'installazione al Col d'Olen, da parte del Comando Truppe Alpine - Servizio Meteomont, di una moderna stazione nivo-meteorologica, nell'ambito di una specifica Convenzione con l'Ateneo di Torino, ha permesso di continuare la raccolta dei dati in maniera automatica. Dal 2010 l'Istituto A. Mosso è stato inserito all'interno della Rete Italiana per la ricerca ecologica a lungo termine (LTER). La Rete Italiana per la Ricerca Ecologica di Lungo Termine (LTER-Italia) è una rete di siti terrestri, d'acqua dolce, di acque di transizione e marine, sui quali si conducono ricerche ecologiche su scala pluridecennale. Vi appartengono 25 siti (al 2018), distribuiti su tutto il territorio nazionale, gestiti dai principali Enti di Ricerca, Università e Istituzioni che si occupano di ricerca e monitoraggio ecologici in Italia. LTER studia gli ecosistemi, le loro le dinamiche ed evoluzione, le relazioni tra biodiversità e funzionalità ecologica, la qualità delle acque, la produttività, il ruolo della disponibilità di risorse, gli effetti dell'inquinamento e dei cambiamenti climatici. In particolare nel sito LTER Istituto Mosso vengono condotte una serie di indagini in aree di studio permanenti localizzate in vallette nivali volte a determinare la dinamica del carbonio e dell'azoto nel suolo e nelle acque superficiali, così come la fenologia vegetale. Il monitoraggio della matrice suolo è iniziato nel 2008 ed è stato affiancato dal monitoraggio della fenologia vegetale a partire dal 2016 (Magnani et al., 2017a, b; Rogora et al., 2018; Freppaz et al., 2019). Le attività di

ricerca sono proseguite negli anni grazie al sostegno della società Monterosa 2000 SpA che le ha supportate nell'ambito degli investimenti per lo sviluppo del Comprensorio sciistico sull'Altopiano di Cimalegna, nonché di diversi progetti nazionali ed internazionali. Obiettivo principale è la valutazione degli effetti della variabilità climatica, ed in particolare della variazione dell'innevamento, sulle componenti suolo e vegetazione all'interno di habitat particolarmente sensibili al cambiamento climatico quali le vallette nivali.

AREA DI STUDIO E DISEGNO SPERIMENTALE

L'area di studio si snoda nelle parti superiore dei valloni dell'Olen e di Cimalegna (Comune di Alagna Valesia), all'interno dei quali sono stati identificati 7 siti localizzati a quote comprese fra i 2686 e 2854 m slm. Ciascun sito presenta una prima porzione dedicata al campionamento del suolo e una seconda porzione mantenuta indisturbata per i rilievi vegetazionali; in ciascun sito sono collocati due sensori di temperatura, il primo sulla superficie del suolo e il secondo nel topsoil (a 10 cm di profondità).

La durata della copertura nevosa è stata determinata sulla base dei dati di temperatura del suolo: in accordo con quanto riportato in bibliografia (Danby e Hik, 2007), il suolo è stato considerato coperto dalla neve quando la differenza tra la sua temperatura massima e minima giornaliera non ha superato 1°C. Con lo stesso approccio è stata stimata la data di fusione del manto nevoso espressa in giorni giuliani, ovvero in giorni a partire dal primo di gennaio. Sono stati calcolati numerosi altri parametri pedoclimatici, potenzialmente capaci di incidere sulle dinamiche del suolo e della vegetazione, tra cui:

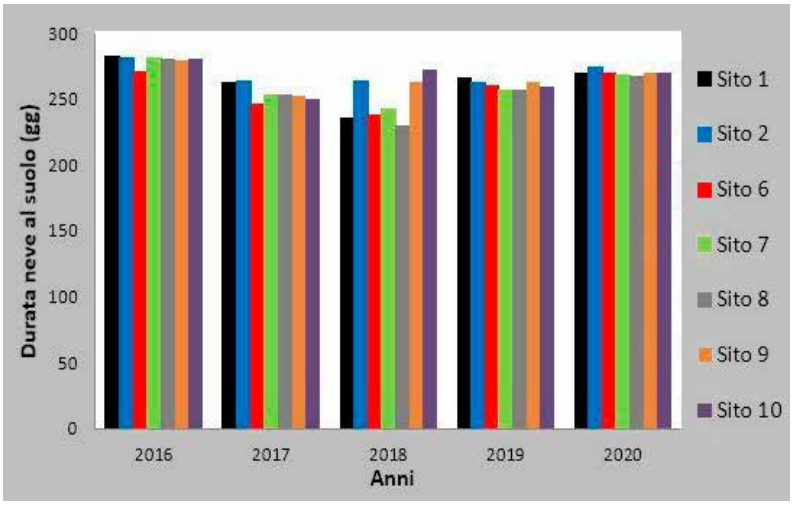


Fig. 1 - Durata della copertura nevosa nei 7 siti di studio.

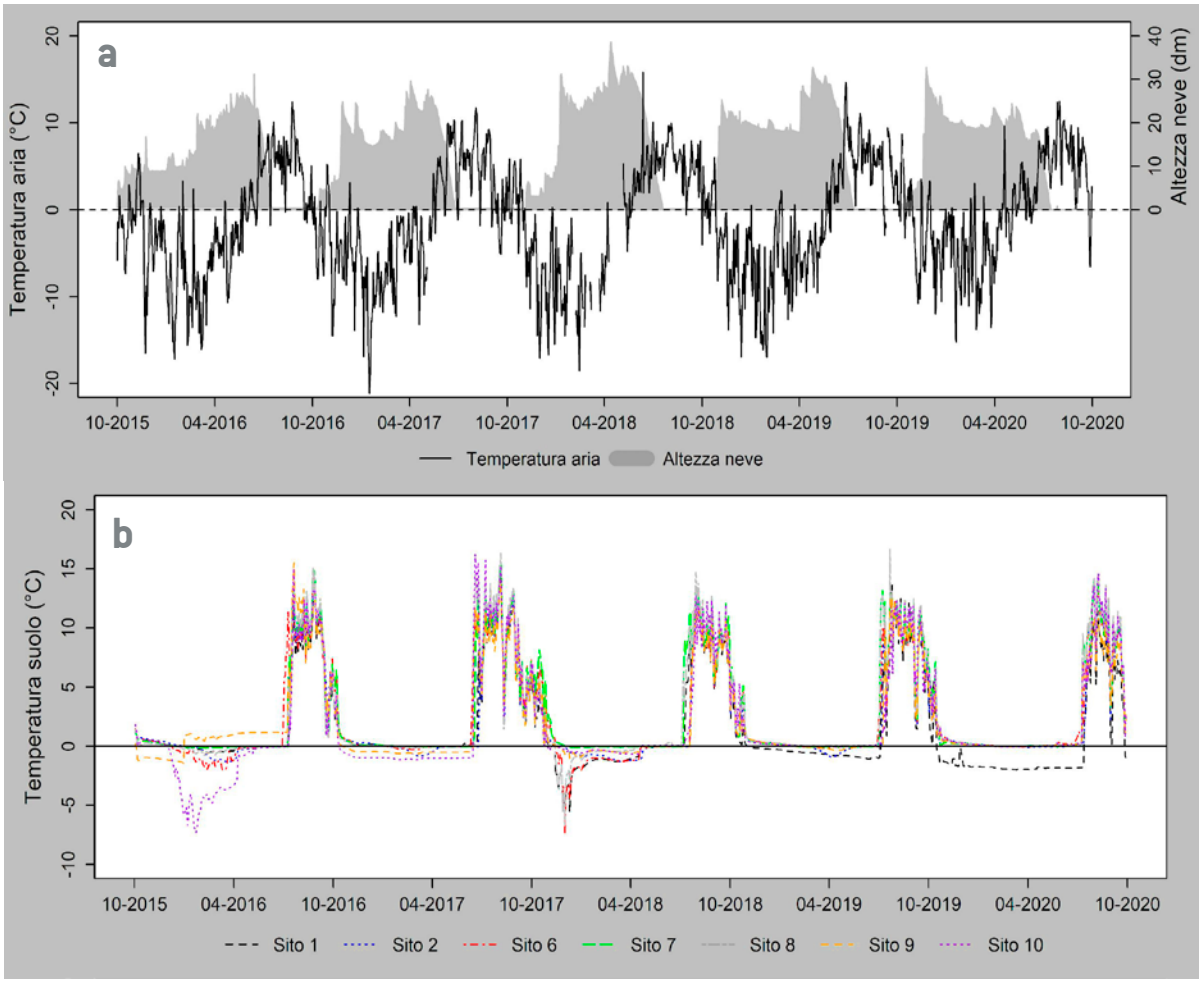


Fig. 2 - a) In alto la temperatura dell'aria e l'altezza della neve registrate dalla stazione nivometeorologica del Comando Truppe Alpine - Servizio Meteomont localizzata presso l'Istituto Scientifico Angelo Mosso. b) In basso l'andamento della temperatura del suolo (10 cm di profondità) registrata nei 7 siti oggetto di studio.

(i) il numero di cicli di gelo/disgelo, ovvero quando la temperatura media giornaliera del suolo passa da valori positivi a negativi per poi tornare sopra 0°C (Phillips and Newlands, 2011);
(ii) la durata e l'intensità del congelamento del suolo, rilevabili quando lo spessore del manto nevoso non è in grado di garantire un isolamento termico efficace (elevate densità o spessore ridotto).

Il monitoraggio del pedoclima prosegue in continuo dal 2015, mentre i campionamenti del topsoil nella stagione priva di copertura nevosa sono stati condotti a partire dal 2016 con periodicità mensile. I campioni prelevati sono stati analizzati in laboratorio per la determinazione dell'umidità e delle forme labili di azoto e carbonio (azoto ammoniacale, azoto nitrico, carbonio organico disciolto, azoto totale disciolto, azoto organico disciolto, azoto microbico e carbonio microbico). All'interno di ciascun sito la porzione dedicata al rilievo della vegetazione consiste in un quadrato permanente di 4 x 4 m, all'interno del quale vengono monitorate 10 specie vegetali, scelte tra quelle più frequenti e abbondanti nella totalità degli 7 siti. I rilevamenti fenologici sono stati realizzati nel corso del quinquennio 2016-2020 (periodicamente, tra i 7 e i 9 rilevamenti per anno, a seconda dell'andamento della stagione vegetativa). Lo sviluppo degli individui appartenenti a ciascuna delle 10 specie è stato registrato tramite osservazione diretta e l'attribuzione di una fenofase, un codice numerico variabile da 0 e 59, in cui la decina indica uno stadio principale (emergenza, emissione foglie, abbozzi fiorali, fioritura, fruttificazione, disseminazione) e l'unità indica i diversi livelli intermedi. I dati provenienti dai sensori di temperatura sono utilizzati per il calcolo delle somme termiche cumulate e il numero di giorni trascorsi dalla data di fusione della neve . Queste ultime, insieme ai giorni giuliani, che vengono usati come proxy del fotoperiodo, sono le variabili utilizzate nell'analisi delle variazioni di fenologiche delle 10 differenti specie vegetali monitorate (Quaglia et al., 2020).

Al fine di valutare il contributo delle diverse variabili che influenzano e che a loro volta sono influenzate dal sistema suolo-vegetazione si è condotta anche l'analisi della chimica dei laghi localizzati nei pressi delle vallette nivali. In ogni data di campionamento del suolo sono stati effettuati prelievi di acqua nei laghi Bodwitch e Cimalegna: la qualità dei corpi idrici è ritenuta fortemente dipendente dal pedoambiente e dalla vegetazione, ad esempio può avvertire se si stanno verificando perdite di nutrienti. In collaborazione con il CNR-IRSA è invece condotta l'analisi chimica delle precipitazioni liquide e del manto nevoso, in modo da poter valutare l'input stagionale di soluti al sistema suolo-pianta.

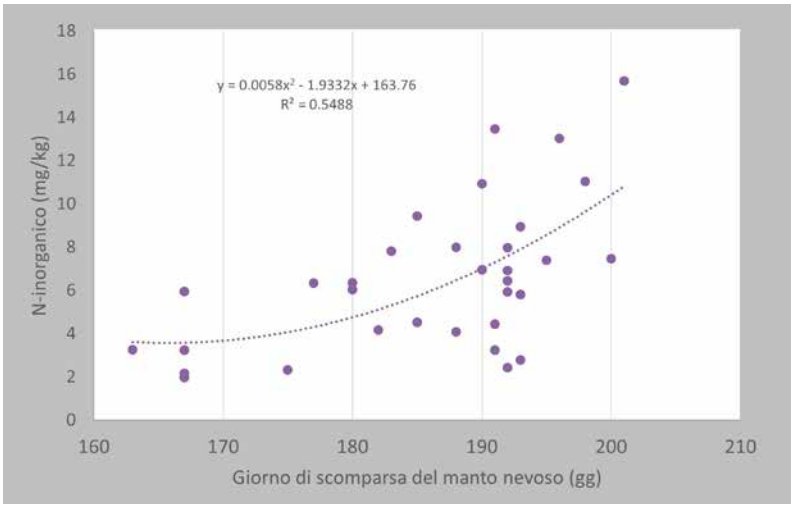


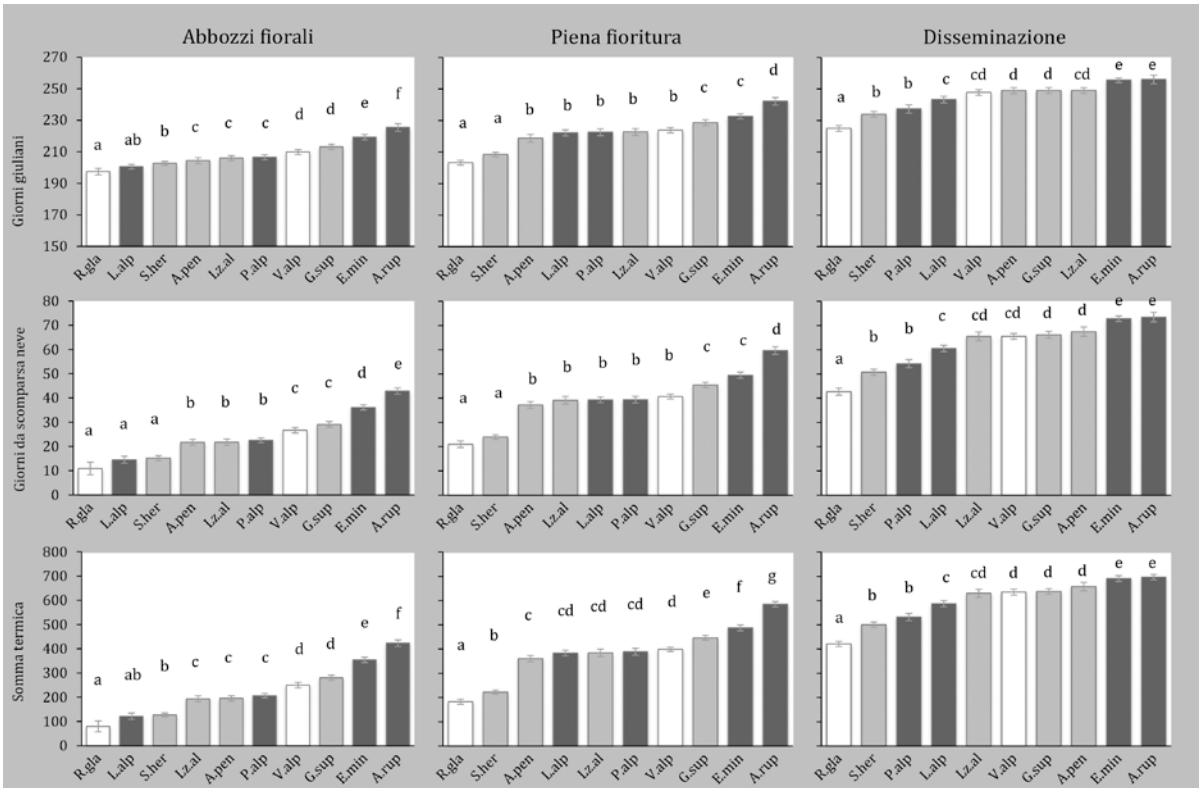
Fig. 3 - Concentrazione di azoto inorganico del suolo misurata nel primo campionamento estivo in funzione della data di scomparsa del manto nevoso. I giorni riportati in ascissa sono i numeri di giorni nell'anno.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Andamento nivo-meteorologico e forme labili di carbonio e azoto nel suolo

Il periodo di monitoraggio è stato caratterizzato da una significativa variabilità interannuale in termini di temperature dell'aria e innevamento, così come della durata della neve al suolo. Quest'ultima è stata complessivamente maggiore nel corso degli inverni 2015-2016 (2016 nella Figura 1) e 2019-2020 (2020 nella Figura 1) mentre l'inverno 2017-2018 (2018 nella Figura 1) è stato caratterizzato da una copertura nevosa complessivamente più breve nonostante gli importanti apporti nevosi primaverili. Le stagioni 2015-2016 e 2017-18 sono state caratterizzate da nevicate piuttosto tardive e il manto nevoso, ad inizio stagione, non è stato sufficiente a garantire un efficace isolamento (Figura 2): si sono verificati intensi e prolungati congelamenti del suolo, con valori inferiori anche a -5°C, potenzialmente dannosi per le comunità microbiche e vegetali.

La durata del manto nevoso può essere influenzata da molteplici fattori tra cui apporti nevosi tardo-autunnali e tardo-primaverili e dai tassi di fusione a fine stagione in funzione della temperatura dell'aria e/o precipitazioni liquide (Isabellon et al., 2015). La data di fusione completa del manto nevoso risulta estremamente importante in quanto influenza la concentrazione della maggior parte delle forme di azoto e carbonio nel suolo. Ad esempio, a fusioni del manto nevoso tardive corrisponde un incremento delle forme di azoto inorganico nel suolo in occasione del primo campionamento estivo e quindi nella prima fase della ripresa vegetativa (Figura 3). Tale incremento è imputabile all'interazione di diverse variabili tra cui l'input di azoto inorganico derivato dal manto nevoso e dalle precipitazioni primaverili (Freppaz et al., 2018), il ridotto assorbimento radicale da parte della vegetazione ancora in parte sepolta dalla neve (Cooper et al., 2011) e la relativa competizione con le comunità microbiche (Legay et al., 2013). Le precipitazioni primaverili, infatti, oltre che incidere in modo importante sul



Dall'alto: Fig. 4 - Confronto del tempo di comparsa (espresso come giorni giuliani, giorni dalla data di fusione della neve e somma termica) di tre differenti fenofasi (Abbozzi fiorali, Piena fioritura, Disseminazione) in 10 differenti specie rilevate nei siti di studio. L'altezza della colonna rappresenta il valore medio della variabile in corrispondenza delle fenofasi indicate, per ognuna delle 10 specie (A.rup=Agrostis rupestris, A.pen=Alchemilla pentaphyllea, E.min=Euphrasia minima, G.sup=Gnaphalium supinum, L.alp=Leucanthemopsis alpina, Lz.al=Luzula alpinopilosa, P.alp=Poa alpina, R.gla=Ranunculus glacialis, S.her=Salix herbacea, V.alp=Veronica alpina). Le specie sono disposte in ordine crescente di valore e categorizzate in tre gruppi in base al colore della colonna (Bianco=specie tipica di ghiaione, grigio=specie tipica di valletta nivale, nero=specie tipica di prateria). Infine, lettere diverse indicano valori significativamente diversi (GLMM con posthoc di Tukey, p<0.05).

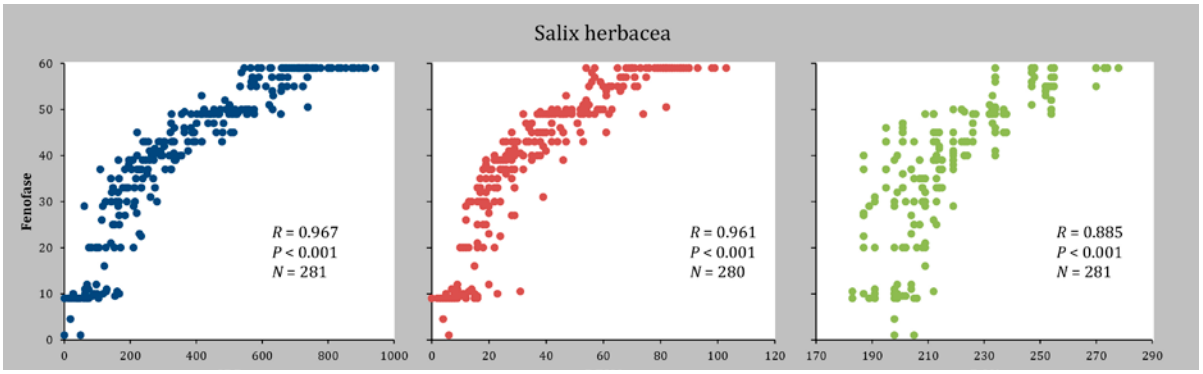


Fig. 5 - Correlazione tra le fenofasi di Salix herbacea durante l'intero quinquennio di monitoraggio e le tre variabili somma termica, giorni dalla fusione e giorni giuliani. Vengono indicati il numero di osservazioni (N), la significatività statistica (P) e il coefficiente di Spearman (R) il quale, all'aumentare del valore, indica una correlazione migliore.

giorno di fusione del manto nevoso, riescono a trasportare in alta quota consistenti quantitativi di azoto inorganico che derivano dalle pratiche agricole delle aree di pianura. Concentrazioni elevate di azoto inorganico nel suolo possono favorire lo sviluppo della vegetazione in alta quota solo se il rilascio di nutrienti è sincronizzata con la richiesta da parte delle specie erbacee presenti, in caso contrario (soprattutto per i nitrati, di natura più mobili) possono esserci perdite dal sistema suolo-vegetazione con ricadute sulla qualità dei corpi idrici. Alla luce di tali considerazioni, è evidente quanto il giorno di fusione del manto nevoso ricopra un ruolo di fondamentale importanza in questi ecosistemi d'alta quota, influenzando le caratteristiche dei suoli (umidità, disponibilità dei nutrienti, ecc.) e l'inizio e la durata della stagione vegetativa (Freppaz et al., 2018).

Risposta fenologica

L'analisi dei dati fenologici evidenzia che le differenti specie, nonostante convivano all'interno dello stesso habitat di valletta nivale, possono avere comportamenti tra loro molto diversi. Vi sono alcune specie, come per esempio *Salix herbacea* e *Ranunculus glacialis*, che presentano un rapido susseguirsi di fenofasi fin dall'inizio della stagione vegetativa, con una conseguente fioritura che può avvenire in poche settimane. Altre specie, come *Agrostis rupestris*, dopo l'emergenza (o la comparsa dei cotiledoni nel caso di *Euphrasia minima*, unica specie annuale fra quelle analizzate) possono rimanere per diverse settimane prive di strutture riproduttive, per poi concentrare fioritura, fruttificazione e disseminazione in un breve lasso di tempo verso la fine della stagione vegetativa (Figura 4).

Nonostante la comparsa delle diverse fenofasi riveli grosse differenze tra le specie monitorate, evidenziando la presenza di specie precoci e tardive, tutte le specie presentano una risposta simile nei confronti dell'andamento stagionale. La somma termica e il numero di giorni trascorsi dalla data di completa fusione della neve, parametri strettamente collegati alla durata dell'innevamento, consentono di meglio predire rispetto ai giorni giuliani la comparsa di una determinata fenofase, spiegando ad es. in *Salix herbacea* più del 96% della variabilità dei dati (Figura 5; coefficienti di correlazione R calcolati utilizzando in modo congiun-

to i dati dei 5 anni). I giorni giuliani , al contrario, mostrano una grossa variabilità tra anni climaticamente differenti, evidenziando es. un netto anticipo delle fenofasi nell'anno 2017, caratterizzato da un precoce scioglimento della neve primaverile e da somme termiche più elevate, a parità di data, rispetto agli altri anni monitorati (Figura 6).

CONCLUSIONI

I suoli e le comunità vegetali di alta quota, a causa delle basse temperature che rallentano i processi di mineralizzazione, della importante presenza di specie perenni e dei processi "rallentati" di colonizzazione dovuti anche alle condizioni estreme, tendono ad essere relativamente stabili nel tempo. Tuttavia, non si può ignorare il fatto che questi ambienti stiano andando incontro a modificazioni climatiche dall'impatto sempre maggiore e che, essendo il ciclo degli elementi nutritivi del suolo e delle specie vegetali estremamente dipendente da fattori climatici e stagionali, le conseguenze su questi habitat potrebbero non tardare a manifestarsi. La fusione della neve anticipata, la minaccia di gelate primaverili e la possibilità di carenze idriche estive, possono determinare importanti cambiamenti sulle caratteristiche dei suoli e della vegetazione. Ad esempio un anticipo della fusione primaverile del manto nevoso può determinare una significativa riduzione dell'azoto inorganico del suolo, con possibili conseguenze sulla nutrizione vegetale.

Le differenze nella risposta alla temperature rilevate per le differenti specie vegetali potrebbero condizionare fortemente il loro successo riproduttivo. Una delle previsioni più condivise dalla letteratura scientifica è quella che vede nel corso degli anni una graduale frammentazione delle vallette nivali, a causa di una sempre maggiore colonizzazione di specie opportuniste dalle circostanti aree di prateria, mentre le specialiste di valletta nivale, meno plastiche, rischiano di andare incontro a un progressivo declino.

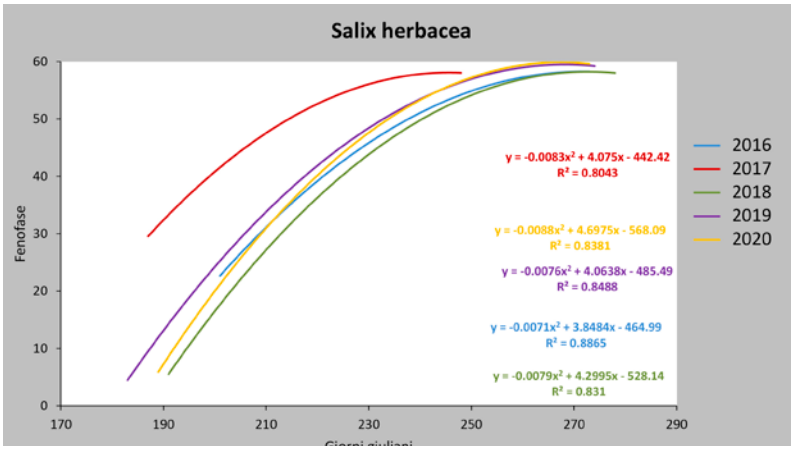


Fig. 6 - Regressione fra tutte le fenofasi di Salix herbacea durante l'intero quinquennio di monitoraggio con la variabile giorni giuliani. I cinque anni vengono identificati separatamente da polinomiali di secondo grado, corredate di rispettiva equazione e valore di R^2.

Bibliografia

- Björk, R.G., Molau, U. (2007) Ecology of Alpine Snowbeds and the Impact of Global Change. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 39:34–43
- Beniston, M. (2006) Mountain weather and climate: a general overview and a focus on climatic change in the Alps. Hydrobiologia 562:3–16
- Cooper, E.J., Dullinger, S., Semenchuk, P. (2011) Late snowmelt delays plant development and results in lower reproductive success in the High Arctic. Plant Science 180:157–167
- Danby, R.K., Hik, D.S. (2007) Responses of white spruce (Picea glauca) to experimental warming at a subarctic alpine treeline. Global Change Biology 13:437-451
- Freppaz M., Marchelli M., Viglietti D., Bruno E., Zanini E. (2006) Suoli più freddi in un mondo più caldo? Il ruolo della neve nel condizionare la temperatura e la vita del suolo. Neve e Valanghe 58:74-81.
- Freppaz, M., Pintaldi, E., Magnani, A., Viglietti, D., Williams, M.W. (2018) Topsoil and snow: a continuum system. Applied Soil Ecology 123:435–440.
- Freppaz, M., Viglietti, D., Balestrini, R., Lonati, M., Colombo, N. (2019) Climatic and pedoclimatic factors driving C and N dynamics in soil and surface water in the alpine tundra (NW-Italian Alps). Nature Conservation 34:67-90.
- Freppaz M., Morra di Cella U., Cremonese E., Filippa G., Pogliotti P., Galvagno M., Martin M., Zanini E. (2012) Ambienti d'alta quota, Alpi Nord Occidentali. In Bertoni R., La Rete Italiana per la ricerca ecologica a lungo termine (LTER-Italia): situazione e prospettive dopo un quinquennio di attività (2006-2011), ARACNE Editrice S.r.l., Roma, 47- 60.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Caceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner A.l., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., Steltzer, H. (2019) High Mountain Areas: In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
- Isabellon, M., di Cella, U. M., Gianluca, F., Paolo, P., Edoardo, C., Freppaz, M. (2015) Effetto del manto nevoso sulla temperatura superficiale del suolo. Neve e Valanghe 86: 16-23
- Legay, N., Grassein, F., Robson, T.M., Personeni, E., Bataillé, M.-P., Lavorel, S., Clément, J.-C. (2013). Comparison of inorganic nitrogen uptake dynamics following snowmelt and at peak biomass in subalpine grasslands. Biogeosciences 10:7631–7645.
- Magnani, A., Viglietti, D., Balestrini, R., Williams, M.W., Freppaz, M. (2017a) Contribution of deeper soil horizons to N and C cycling during the snow-free season in alpine tundra, NW Italy. Catena 155: 75-85.
- Magnani, A., Viglietti, D., Godone, D., Williams, M.W., Balestrini, R., Freppaz, M. (2017b) Interannual variability of soil n and c forms in response to snow -cover duration and Pedoclimatic conditions in alpine tundra, northwest Italy. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 49 (2):227-242.
- Quaglia, E., Ravetto Enri, S., Perotti, E., Probo, M., Lombardi, G., Lonati, M. (2020) Alpine tundra species phenology is mostly driven by climate-related variables rather than by photoperiod. Journal of Mountain Science 17:2081–2096.
- Rogora, M., Frate, L., Carranza, M.L., Freppaz, M., Stanisci, A., Bertani, I., Bottarin, R., Brambilla, A., Canullo, R., Carbognani, M., Cerrato, C., Chelli, S., Cremonese, E., Cutini, M., Di Musciano, M., Erschbamer, B., Godone, D., Iocchi, M., Isabellon, M., Magnani, A., Mazzola, L., Morra di Cella, U., Pauli, H., Petey, M., Petriccione, B., Porro, F., Psenner, R., Rossetti, G., Scotti, A., Sommaruga, R., Tappeiner, U., Theurillat, J.-P., Tomaselli, M., Viglietti, D., Viterbi, R., Vittoz, P., Winkler, M., Matteucci, G. (2018) Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines. Science of the Total Environment 624:1429-1442.