

# Effetti del cambiamento del regime delle precipitazioni nevose sulla temperatura del suolo e sul ciclo dei nutrienti in pedoambienti alpini

Ermanno Zanini, Michele Freppaz\*

*Dipartimento di Valorizzazione e Protezione delle Risorse Agroforestali,  
Chimica Agraria – Laboratorio Neve e Suoli Alpini  
Via Leonardo da Vinci 44, 10095 Grugliasco (To)*

Società Italiana di Pedologia

---

## Riassunto

Negli ambienti agro-forestali alpini la neve permane al suolo dai sei agli otto mesi all'anno in relazione alla quota ed alla esposizione. L'acqua è quindi immobilizzata allo stato solido per la maggior parte del periodo invernale e rilasciata al suolo in un breve periodo di tempo nel corso del disgelo primaverile. In questi ambienti il regime delle precipitazioni nevose esercita un ruolo fondamentale nel condizionare la temperatura e la dinamica degli elementi nutritivi del suolo, ed in particolare dell'azoto, con significative conseguenze sulla nutrizione vegetale. Il riposo vegetativo, le basse temperature e la diffusa copertura nevosa suggeriscono infatti che l'attività biologica del suolo sia concentrata soltanto durante la stagione estiva. In realtà i suoli ricoperti da un consistente manto nevoso sono isolati dalla temperatura dell'aria e possono non gelare nel corso dell'inverno. Un manto nevoso di sufficiente spessore, infatti, accumulatosi presto nella stagione invernale, è in grado di isolare il suolo dall'ambiente circostante mantenendo la temperatura prossima agli 0 °C nel corso della stagione invernale. L'innalzamento del limite delle nevicate e la riduzione della permanenza della neve al suolo in seguito al riscaldamento globale (IPCC, 1996, 2001) può però determinare una riduzione dell'effetto isolante del manto nevoso, esponendo i suoli del piano montano superiore a temperature più basse e ad una maggiore frequenza di cicli gelo/disgelo che possono alterare la dinamica della sostanza organica e la disponibilità di nutrienti nel suolo. Tali stress termici possono determinare la lisi delle cellule microbiche ed il conseguente incremento della mineralizzazione dell'azoto e del carbonio ad opera dei microrganismi sopravvissuti. È inoltre emerso come l'azione dei cicli gelo/disgelo possa determinare l'esposizione di superfici di scambio prima non disponibili, con il rilascio ad esempio di forme di azoto organico di origine non microbica, successivamente mineralizzate. La ridotta o assente attività di immobilizzazione microbica può concorrere a determinare l'accumulo di notevoli quantità di azoto inorganico nel suolo, potenzialmente lisciviabile nel corso del disgelo primaverile, quando le piante non hanno ancora ripreso l'attività vegetativa. La riduzione delle precipitazioni nevose negli ambienti agro-forestali alpini può quindi avere un significativo effetto sul regime termico dei suoli e conseguentemente sul ciclo degli elementi nutritivi. Le ricadute ambientali non possono che essere valutate nel tempo, attraverso studi mirati, in grado di evidenziare gli effetti indiretti del cambiamento climatico in atto sulle caratteristiche dei pedoambienti alpini.

*Parole chiave:* suolo, azoto, temperatura, neve.

## Summary

### INFLUENCE OF SNOW COVER DISTRIBUTION ON SOIL TEMPERATURE AND NUTRIENT DYNAMICS IN ALPINE PEDOENVIRONMENTS

In Alpine sites snow is present on the ground from six to eight months per year in relation to elevation and exposure. Water is therefore immobilized into the solid state for the greater part of the winter season and released to the ground in a short period during spring snowmelt. In these areas, snow distribution exercises a fundamental role in influencing soil temperature and nutrient dynamics, in particular of nitrogen, with great consequences on plant nutrition. The dormant vegetation period, the low temperatures and the persistent snow cover suggest that soil biological activity is only concentrated during summer. As a matter of fact, soils covered with a consistent snow

\* Autore corrispondente: tel.: +39 011 6708514; fax: +39 011 6708692. Indirizzo e-mail: michele.freppaz@unito.it.

cover are isolated from the air temperature and can not freeze during winter. A snowpack of sufficient thickness, accumulated early in winter, insulates the ground from the surrounding atmosphere maintaining soil temperature closed to 0 °C during the whole winter season. The elevation of the snow line and the shorter permanence of snow on the ground, as a result of global warming (IPCC, 1996, 2001), might reduce the insulation effect of the snowpack, exposing soils of the mountain belt to lower temperatures and to a greater frequency of freeze/thaw cycles, which might alter organic matter dynamics and soil nutrient availability. Such thermal stresses may determine the lysis of microbial cells and the consequent increase of nitrogen and carbon mineralization by the survived microorganisms. Moreover, the freeze/thaw cycles can determine the exposure of exchange surfaces not available before, with release of organic matter of non-microbial origin, which may become available to surviving microorganisms for respiration. The reduced or absent microbial immobilization may cause the accumulation of remarkable amounts of inorganic nitrogen in soil, potentially leachable during spring snowmelt, when plants have not still started the growing season. Changes of snow distribution in alpine sites can consequently have a great impact on the thermal regime and nutrient cycle of soils. The environmental implications have to be estimated for a long time, through specific studies that aim to evidence the indirect effects of climatic change on characteristics of alpine pedoenvironments.

*Key-words:* soil, nitrogen, temperature, snow.

## 1. Introduzione

Uno dei più importanti sviluppi nelle ricerche sui cambiamenti globali è stato il riconoscimento dell'importanza di effetti indiretti del cambiamento climatico sulla struttura ed il funzionamento degli ecosistemi. Numerosi studi hanno infatti evidenziato che i cambiamenti nella frequenza degli incendi, di precipitazioni estreme e di annate prive di neve possono avere effetti sugli ecosistemi più significativi rispetto a quelli determinati dalle semplici variazioni di temperatura e precipitazioni (Johnson, 1992; Vitousek, 1994; Watson et al., 1998; Walker et al., 1999). Si tratta di effetti complessi, difficili da studiare in quanto estremamente variabili nel tempo e nello spazio.

In particolare emerge come la distribuzione della copertura nevosa sia estremamente sensibile ai cambiamenti climatici in atto (Cooley, 1990; Williams et al., 1996; Baron et al., 2000) ed una riduzione della copertura nevosa, in seguito al riscaldamento globale, può essere uno degli effetti più importanti nelle aree forestali dell'Emisfero Nord.

I dati da satellite hanno evidenziato una riduzione della superficie innevata di circa il 10% a partire dagli anni sessanta, mentre la temperatura media nel corso del ventesimo secolo è aumentata di  $0,6 \pm 0,2$  °C (IPCC, 2001). In particolare i modelli prevedono una ulteriore diminuzione della copertura nevosa nei prossimi anni, con un incremento delle temperature medie stimato fra 1,4 e 5,8 °C entro il 2100, con

un valore più probabile di 2,5 °C (IPCC, 2001).

Nelle regioni di montagna, un incremento della temperatura media di 1 °C è accompagnato da un innalzamento di circa 150 m del limite delle nevicate (Haeberli e Beniston, 1998). Di conseguenza le aree montane a quote più basse saranno interessate con sempre maggiore frequenza da precipitazioni in forma liquida anche nel corso dell'inverno (Beniston, 2003), con una riduzione complessiva della superficie innevata nella stagione invernale che per le Alpi Svizzere è stata stimata del 25%, se si ipotizza un incremento della temperatura di 3 °C (Beniston et al., 2003). Altri studi hanno previsto per le Alpi Francesi una significativa riduzione dello spessore e della permanenza della neve al suolo a quote inferiori ai 1.500 m slm, in particolare nei settori più meridionali (Martin e Durand, 1998). Tali scenari potranno avere importanti implicazioni sulle località turistiche invernali, come evidenziato da numerosi studi condotti in Australia (Galloway, 1988), Est del Canada (Lamothe e Périard, 1988), Austria (Breiling e Charamza, 1999) e Svizzera (Abegg et al., 1997) dove, un incremento della temperatura di 2-3 °C nei prossimi cinquant'anni potrebbe avere un impatto critico sulle stazioni sciistiche localizzate al di sotto dei 1.200-1.500 m slm (Abegg e Froesch, 1994).

Non meno importanti possono essere le conseguenze sugli ecosistemi forestali. La neve, infatti, esercita una notevole azione isolante ed una riduzione della sua permanenza al suolo nel corso dell'inverno può determinare il congela-

mento del suolo (e.g. Bleak, 1970; Anderson, 1991), con possibili effetti sulla vitalità degli apparati radicali (e.g. Tierney et al., 2001) e della biomassa microbica del suolo, con importanti conseguenze sulla dinamica degli elementi nutritivi (e.g. Groffman et al., 2001). Sul lungo periodo la resistenza a questi stress potrebbe essere un fattore chiave nel regolare la composizione specifica dei popolamenti forestali in relazione al cambiamento climatico in atto.

In questo lavoro si intendono evidenziare gli effetti che una ridotta copertura nevosa può determinare a) sulla temperatura del suolo e di conseguenza b) sulla dinamica degli elementi nutritivi in pedoambienti alpini.

## 2. La neve e la temperatura del suolo

Numerosi studi hanno evidenziato che il manto nevoso stagionale limita il congelamento del suolo in relazione alla sua azione isolante. In particolare un manto nevoso di sufficiente spessore (30-60 cm), accumulatosi presto nella stagione invernale è in grado di impedire il congelamento del suolo, indipendentemente dalla temperatura dell'aria (Taylor e Jones, 1990; Brooks et al., 1995; Stadler et al., 1996; Brooks e Williams, 1999; Shanley e Chalmers, 1999). L'azione di riscaldamento deriva dall'elevato potere isolante del manto nevoso, in grado di rallentare il flusso geotermico (Cline, 1995). Il controllo della variabilità spaziale e temporale della relazione fra profondità del manto nevoso e temperatura del suolo è però molto complesso e dipende da diversi fattori quali la copertura vegetale, la posizione topografica e le caratteristiche del suolo. Ad esempio Shanley e Chalmers (1999) hanno evidenziato che il congelamento del suolo nel corso dell'inverno è molto più evidente nelle aree prive di copertura forestale rispetto alle aree boscate a causa del forte raffreddamento notturno che si verifica nel tardo autunno, prima dell'accumulo del manto nevoso. Gli stessi Autori hanno inoltre evidenziato che il maggiore accumulo di neve al suolo nelle foreste di specie caducifoglie contribuisce ad un minore raffreddamento del suolo rispetto alle foreste costituite da specie sempreverdi, dove l'accumulo di neve al suolo è maggiormente variabile.

La presenza di suoli non congelati al di sot-



Figura 1. Visione di una parcella sperimentale mantenuta priva di neve nel corso della stagione invernale 2003-2004 in un lariceto localizzato a 1450 m slm (Riserva naturale Mont Mars – Fontainemore, Aosta). I data loggers (UTL-1) collocati negli orizzonti superficiali del suolo permettono la misura della temperatura con frequenza oraria.

Figure 1. Experimental plot where the snow cover has been periodically shovelled during the winter season 2003-2004 under a Larch forest (*Larix decidua*) located at an elevation of 1450 m asl (Natural Reserve Mont Mars – Fontainemore, Aosta Valley, NW Italy). Data loggers (UTL-1) located in the soils at 10 cm depth recorded hourly soil temperature data.

to di manti nevosi stagionali è stata messa in evidenza da numerosi ricercatori (e.g. Salisbury, 1985; Sommerfeld et al., 1993; Brooks et al., 1993, 1996). Freppaz et al., 2001c hanno evidenziato che la temperatura del suolo è fortemente condizionata non solo dallo spessore del manto nevoso e dal suo periodo di accumulo, ma anche dalla densità. La conducibilità termica del manto nevoso, pari a  $0.05 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  per neve fresca a bassa densità, aumenta infatti al crescere della densità, fino a raggiungere valori di  $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , con una conseguente significativa riduzione della sua azione isolante (Sturm et al., 1997).

L'effetto della mancanza di neve sulla temperatura del suolo è stato valutato mediante numerose prove sperimentali, basate generalmente sul confronto delle temperature registrate all'interno di parcelle indisturbate e di parcelle in cui la neve è invece stata rimossa, sia mediante spalatura (e.g. Pilon et al., 1994; Groffman et al., 1999, 2001; Decker et al., 2003; Freppaz et al., 2005) (figura 1), sia mediante la costruzione di apposite tettoie in grado di intercettare la precipitazione nevosa (e.g. Sulkava e Huhta, 2003).

Le ricerche hanno in genere evidenziato temperature del suolo significativamente inferiori nelle parcelle a ridotta copertura nevosa, con un incremento del numero dei cicli gelo/disgelo ed un incremento della porzione superficiale di suolo interessata dal congelamento (Robitaille, 1995; Moore e McKendry, 1996; Williams et al., 1998; Boutin e Groffman et al., 1999, 2001; Hardy et al., 2001).

Freppaz et al. (2005) hanno evidenziato in un lariceto localizzato a 1.450 m slm nelle Alpi Italiane Nord-Occidentali che la temperatura degli orizzonti superficiali del suolo sotto un manto nevoso di circa 60 cm è rimasta prossima agli 0 °C nell'intero corso della stagione invernale, indipendentemente dalla temperatura dell'aria (figura 2). La mancanza di copertura nevosa, asportata in alcune parcelle sperimentali, ha invece causato una significativa riduzione della temperatura del suolo, con valori prossimi ai -5 °C (figura 3). Nel corso della primavera gli orizzonti superficiali del suolo privo di copertura nevosa si sono però riscaldati più velocemente rispetto alla parcella indisturbata, in relazione all'azione della radiazione solare incidente.

Indipendentemente dalle tecniche adottate, tutti gli studi riportati evidenziano come l'assenza di manto nevoso determini un significativo raffreddamento dei suoli nel corso dell'inverno, con valori di temperatura che possono raggiungere i -5 - -10 °C e la notevole frequenza di cicli gelo/disgelo, con potenziali effetti sulla dinamica degli elementi nutritivi.

### 3. La neve e il ciclo degli elementi nutritivi del suolo

La diffusa copertura nevosa e le basse temperature suggeriscono che l'attività biologica del suolo sia bloccata nel corso della stagione invernale. In realtà la presenza di un consistente manto nevoso accumulatosi presto nella stagione invernale isola il suolo dall'ambiente esterno (figura 2), impedendone il congelamento, e determinando condizioni favorevoli all'attività dei microrganismi del suolo (Massman et al., 1995; Brooks et al., 1996; Hénault et al., 1998; Saarnio et al., 1999; Teepe et al., 2001). In generale l'attività dei microrganismi del suolo può continuare fino a quando vi è acqua disponibili,

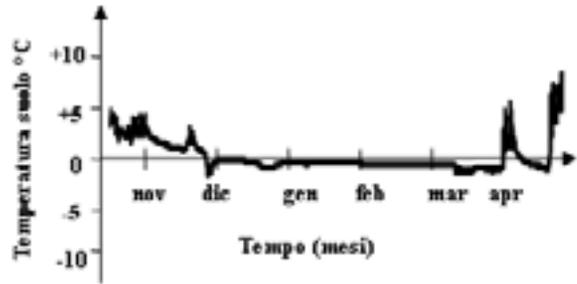


Figura 2. Andamento della temperatura del suolo (*topsoil*) con copertura nevosa registrato nel corso della stagione invernale 2003-2004 in un lariceto localizzato a 1450 m slm (Riserva naturale Mont Mars – Fontainemore, Aosta).

Figure 2. Soil temperature at 10 cm depth under a consistent snow cover recorded during the winter season 2003-2004 in a Larch forest located at an elevation of 1450 m asl (Natural Reserve Mont Mars – Fontainemore, Aosta Valley, NW Italy).

le, generalmente fino a -5 °C (Clein e Schimel, 1995; Schimel et al., 1995), benché attività microbica sia stata osservata fino ad una temperatura di -6.5 °C (Coxson e Parkinson, 1987).

I microrganismi del suolo producono emissioni gassose attraverso una grande varietà di processi, quali la respirazione e la denitrificazione (Granli e Bockman, 1994, Brooks et al., 1997). Le emissioni gassose al di sotto del manto nevoso rappresentano una significativa percentuale delle emissioni annuali, pari a più del 20% nel caso della CO<sub>2</sub> (Winston et al., 1995) e circa il 50% nel caso dell'N<sub>2</sub>O (Brooks et al., 1996). Alcuni Autori hanno registrato significativi rilasci di N<sub>2</sub>O nel corso dell'inverno sia in ambienti alpini (Sommerfeld et al., 1993), sia in ambienti subalpini (Mosier et al., 1993), paragonabili a quelli che si registrano nel corso dell'estate.

La respirazione microbica nel suolo al di sotto del manto nevoso ed il conseguente rilascio di CO<sub>2</sub> è stato osservato in aree umide del Nord Europa, in ecosistemi della fascia subalpina e nella tundra artica (Oechel et al., 1997; Mast et al., 1998; Bubier et al., 2002). Kelley et al. (1968) hanno misurato elevate concentrazioni di CO<sub>2</sub> al di sotto di un manto nevoso in Alaska, così come Zimov et al. (1993) che hanno evidenziato come le emissioni di CO<sub>2</sub> al di sotto del manto nevoso nella taiga siberiana corrispondano al 20% della produzione annuale di C. Ne deriva che tali rilasci di CO<sub>2</sub> debbono essere inclusi nei

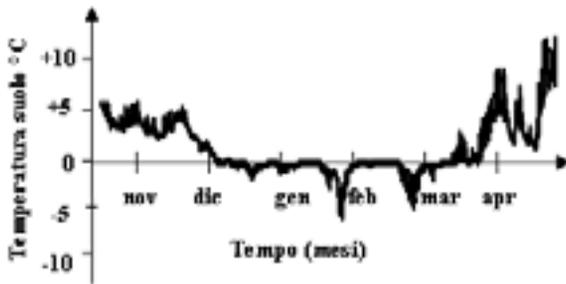


Figura 3. Andamento della temperatura del suolo (topsoil) in assenza di copertura nevosa registrato nel corso della stagione invernale 2003-2004 in un lariceto localizzato a 1450 m s.l.m. (Riserva naturale Mont Mars – Fontainemore, Aosta).

Figure 3. Soil temperature at 10 cm depth under a shallow snow cover recorded during the winter season 2003-2004 in a Larch forest located at an elevation of 1450 m asl (Natural Reserve Mont Mars – Fontainemore, Aosta Valley, NW Italy).

modelli di calcolo dei flussi annuali globali di carbonio, al fine di ottenere una stima più attendibile dei flussi di carbonio negli ecosistemi alle latitudini boreali (Jones 1999; Schürmann et al., 2002).

La mineralizzazione della sostanza organica nel corso dell'inverno al di sotto di un cospicuo manto nevoso determina la produzione di un pool di azoto e fosforo inorganico prima del disgelo primaverile (Brooks et al., 1996, Freppaz et al., 2001a, b), potenzialmente lisciviabile se non sincronizzato con i processi di immobilizzazione microbica e di assorbimento radicale (Jaeger et al., 1999), meccanismo alla base della conservazione degli elementi nutritivi negli ecosistemi forestali (Bormann e Likens, 1979; Mullen et al., 1998). La produzione invernale di N nel suolo è generalmente superiore a quello che deriva dalla fusione del manto nevoso, anche di quattro (Williams et al., 1995) – venti volte (Schimel et al., 1994), rispettivamente in suoli poco evoluti di un bacino alpino ed in suoli artici.

I ritmi di decomposizione e mineralizzazione della sostanza organica possono accelerare in seguito al congelamento del suolo a causa del maggiore apporto di sostanza organica labile in seguito a: 1) incremento della mortalità delle radici fini e della biomassa microbica (Biederbeck e Campbell, 1971; Meyer et al., 1975; Morley et al., 1983; Sakai e Larcher, 1987; Skogland et al., 1988; Tierney et al., 2001; Freppaz et al., 2006);

2) distruzione meccanica degli aggregati di suolo (Soulides e Allison, 1961; Hinman e Frederick, 1968; Bullock et al., 1988); 3) frammentazione della lettiera.

L'incremento della mineralizzazione dell'azoto, unitamente al ridotto sviluppo di un'attiva biomassa microbica nel corso dell'inverno, sono i meccanismi alla base dell'aumento delle perdite di azoto da suoli di tundra alpina registrati da Brooks et al. (1996, 1998) in annate con scarso accumulo di manto nevoso. Le temperature raggiunte nelle parcelle prive di neve sono dell'ordine di -6, -10 °C e tali da limitare lo sviluppo di un'attiva comunità microbica nel suolo, comportando un incremento delle perdite di azoto nitrico dal suolo durante il disgelo primaverile (Brooks e Williams, 1999), con importanti conseguenze sulla qualità dei corpi idrici (Rascher et al., 1987; Boutin e Robitaille, 1995).

L'effetto sulla biomassa microbica è invece più ridotto rispetto agli altri fattori quando l'azione dei cicli gelo/disgelo è meno intensa, con temperature minime dell'ordine di -5 °C, come osservato in suoli forestali mantenuti privi di manto nevoso nel New Hampshire e nell'Italia nord-occidentale (Groffman et al., 2001; Freppaz et al., 2005) (figura 3). In questi casi l'incremento della concentrazione di azoto inorganico nel suolo è spiegato da una riduzione dell'assorbimento radicale, danneggiato comunque dall'azione del gelo (Tierney et al., 2001) e dall'esposizione di superfici di scambio prima non disponibili, con il rilascio di forme di azoto organico di origine non microbica, successivamente mineralizzate (Hermann e Witter, 2002).

Ne deriva che l'assenza di manto nevoso influenza significativamente il ciclo degli elementi nutritivi del suolo nel corso dell'inverno e del disgelo primaverile. Gli effetti, variabili in funzione delle temperature minime raggiunte, consistono generalmente in un incremento dei processi di lisciviazione ed un conseguente depauperamento del pool di elementi nutritivi del suolo ed un effetto sulla qualità dei corpi idrici.

#### 4. Conclusioni

Un manto nevoso di sufficiente spessore accumulatosi presto nella stagione invernale è in grado di isolare il suolo dall'ambiente circostante, originando un ambiente favorevole al-

l'attività microbica. La ridotta permanenza del manto nevoso al suolo, come si potrà verificare con sempre maggiore frequenza alle quote comprese fra i 1.200 e 1.500 m slm nell'arco alpino, determina invece il congelamento del suolo, con un incremento dei cicli gelo/disgelo e conseguenti effetti sulla vitalità delle radici, della biomassa microbica e sulla stabilità degli aggregati. Tutto ciò si traduce in un incremento della mineralizzazione della sostanza organica, con la possibile perdita dal suolo di forme di azoto inorganico durante il periodo primaverile. Il congelamento del suolo e l'incremento dei cicli gelo/disgelo compromettono infatti il bilancio fra i processi di mineralizzazione, immobilizzazione microbica e assorbimento radicale, meccanismo alla base della conservazione degli elementi nutritivi nei pedoambienti alpini.

Il cambiamento di regime delle precipitazioni nevose nelle Alpi può quindi avere un significativo effetto sul regime termico dei suoli e conseguentemente sul ciclo degli elementi nutritivi. Le ricadute ambientali non possono che essere valutate nel tempo, attraverso studi mirati, in grado di evidenziare gli effetti indiretti del cambiamento climatico in atto sulle caratteristiche dei pedoambienti alpini.

### Ringraziamenti

Riserva naturale Mont Mars, Fontainemore (AO). Regione Autonoma Valle d'Aosta, Assessorato Agricoltura e risorse naturali, Servizio Aree protette; Assessorato Territorio, ambiente e opere pubbliche, Direzione Tutela del territorio – Ufficio Neve e valanghe. Marco Marchelli, Davide Viglietti ed Enrico Bruno, tesisti entusiasti e infaticabili “spalatori”.

### Bibliografia

Abegg B., Froesch R. 1994. Climate change and winter tourism: impact on transport companies in the Swiss Canton of Graubunden. In: Beniston M. (ed.): Mountain Environments in changing climates, 328-340. Routledge Publishing Company, London - New York.

Abegg B., Koenig U., Burki R., Elsasser H. 1997. Climate impact assessment in tourism. *Die Erde*, 128:105-116.

Anderson J.M. 1991. The effects of climate change on decomposition processes in grassland and coniferous

forests. *Ecol. Appl.*, 1:326-347.

Baron J.S., Hartman M.D., Band L.E., Lammers R.B. 2000. Sensitivity of a high elevation Rocky Mountain watershed to altered climate and CO<sub>2</sub>. *Water Resour. Res.*, 36:89-99.

Beniston M. 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*, 59:5-31.

Beniston M., Keller F., Goyette S. 2003. Snow pack in the Swiss Alps under changing climatic conditions: an empirical approach for climate impact studies. *Theor. Appl. Climatol.*, 74:19-31.

Biederbeck V.O., Campbell C.A. 1971. Influence of simulated fall and spring conditions on the soil system: I Effect on soil microflora. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 474-479.

Bleak A.T. 1970. Disappearance of plant material under a winter snow cover. *Ecology*, 51:915-917.

Bormann F.H., Likens G.E. 1979. Pattern and process in a forested ecosystem. Springer-Verlag, New York.

Boutin R., Robitaille G. 1995. Increased soil nitrate losses under mature sugar maple trees affected by experimentally induced deep frost. *Can. J. For. Res.*, 25:588-602.

Breiling M., Charamza P. 1999. The impact of global warming on winter tourism and skiing: a regionalised model for Austrian snow conditions. *Reg. Env. Change*, 1:4-14.

Brooks P.D., Schmidt S.K., Sommerfeld D., Musselman R. 1993. Distribution and abundance of microbial biomass in waning Rocky Mountain Snowpacks. *Proc. Eastern Snow Conference*, 301-306.

Brooks P.D., Williams M.W., Schmidt S.K. 1995. Snowpack controls on nitrogen dynamics in the Colorado alpine. In: Tonnessen K., Williams M., Tranter M. (eds.): Biogeochemistry of snow-covered catchments, 283-292. International Association of Hydrological Sciences Publication 228, Wallingford, UK.

Brooks P.D., Williams M.W., Schmidt S.K. 1996. Microbial activity under alpine snowpack, Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochem.*, 32:93-113.

Brooks P.D., Schmidt S.K., Williams M.W. 1997. Winter production of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from alpine tundra: environmental controls and relationship to inter-system C and N fluxes. *Oecologia*, 110:403-413.

Brooks P.D., Williams M.W. 1999. Snowpack controls on nitrogen cycling and export in seasonally snow-covered catchments. *Hydr. Proc.*, 13:2177-2190.

Bubier J., Crill P., Mosedale A. 2002. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange measured by autochambers during the snow-covered season at a temperate peatland. *Hydro. Processes*, 16:3667-3682.

Bullock M.S., Kemper W.D., Nelson S.D. 1988. Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 52:770-776.

- Clein J.S., Schimel J.P. 1995. Microbial activity of tundra and taiga soils at sub-zero temperatures. *Soil Biol. Biochem.*, 27:1231-1234.
- Cline D. 1995. Snow surface energy exchanges and snow-melt at a continental alpine site. In: Tonnessen K., Williams M., Tranter M. (eds.): *Biogeochemistry of snow-covered catchments*, 175-166. International Association of Hydrological Sciences Publication 228, Wallingford, UK.
- Cooley K.R. 1990. Effects of CO<sub>2</sub>-induced climatic changes on snowpack and streamflow. *Hydrol. Sci.*, 35:511-522.
- Coxson D.S., Parkinson D. 1987. Winter respiratory activity in aspen woodland forest floor litter and soils. *Soil Biol. Biochem.*, 19:49-59.
- Decker K.L.M., Wang D., Waite C., Scherbatskoy T. 2003. Snow removal and ambient air temperature effects on forest soil temperatures in northern Vermont. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:1234-1243.
- Freppaz M., Edwards A.C., Williams B., Scalenghe R., Zanini E. 2001a. Influenza del manto nevoso sulla dinamica dell'azoto in suoli alpini. *Convegno Annuale SISS, 12-16 giugno 2000, Venezia*, 165-171. Edifir-Edizioni, Firenze.
- Freppaz M., Edwards A.C., Williams B., Scalenghe R., Zanini E. 2001b. Influenza del manto nevoso sulla dinamica del fosforo in suoli alpini. *Atti XVIII Convegno Società Italiana di Chimica Agraria, 20-22 Settembre 2000, Catania*, 37-44. Editrice Bibliografica, Milano.
- Freppaz M., Scalenghe R., Zanini E. 2001c. Cambiamenti climatici e manto nevoso: influenza sulla dinamica di nutrienti in suoli forestali dell'Italia Nord Occidentale. *Economia Montana, Linea Ecologica, XXXIII*, 4:39-43.
- Freppaz M., Marchelli M., Celi L., Zanini E. 2005. Effetto dell'innalzamento del limite delle nevicate sulla dinamica della SOM in un pedoambiente alpino. *Convegno Società Italiana di Chimica Agraria, 20-23 Settembre 2005, Torino*, 61.
- Freppaz M., Williams B.L., Edwards A.C., Scalenghe R., Zanini E. 2006. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of early and late winter alpine conditions: implications for N and P availability. *Applied Soil Ecology*, 35:247-255.
- Galloway R.W. 1988. The potential impact of climate changes on Australian ski fields, greenhouse planning for climate change. Pearman G.I. (ed.), *CSIRO, Aspendale, Australia*, 428-437.
- Granli T., Bockman O.C.H. 1994. Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian J. Agri. Sci. Suppl.*, 12.
- Groffman P.M., Hardy J.P., Nolan C.T., Driscoll C.T., Fitzhugh R.D., Fahey T.J. 1999. Snow depth, soil frost and nutrient loss in a northern hardwood forest. *Hydrol. Proc.*, 13:2275-2286.
- Groffman P.M., Driscoll C.T., Fahey T.J., Hardy J.P., Fitzhugh R.D., Tierney G.L. 2001. Colder soils in a warmer world: a snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem. *Biogeochem.*, 56:135-150.
- Haeberli W., Beniston M. 1998. Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 27:258-265.
- Hardy J.P., Groffman P.M., Fitzhugh R.D., Henry K.S., Welman A.T., Demers J.D., Fahey T.J., Driscoll C.T., Tierney G.L., Nolan S. 2001. Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochem.*, 56:151-174.
- Hénault C., Devis X., Lucas J.L., Germon J.C. 1998. Influence of different agricultural practices (type of crop, form of N-fertilizer) on soil nitrous oxide emissions. *Biol. Fertil. Soils*, 27:299-306.
- Hermann A., Witter E. 2002. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 34:1495-1505.
- Hinman W.C., Frederick B. 1968. Alterations of soil structure upon freezing and thawing and subsequent drying. *Can. J. Soil Sci.*, 50:179-182.
- Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguier M., van der Linden P.J., Xiaosu D. 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press. Cambridge.
- IPCC 1996. Climate change. The IPCC Second Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge - New York. Vols. I (Science), II (Impacts) and III (Socio-economic implications).
- IPCC 2001. Climate Change. The IPCC Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge e New York. Vols. I (The scientific basis), II (Impacts) and III (Socio-economic implications).
- Jaeger C.H., Monson R.K., Fisk M.C., Schmidt S.K. 1999. Seasonal partitioning of N by plants and soil microorganisms in an alpine ecosystems. *Ecology*, 80:1883-1891.
- Johnson E.A. 1992. Fire and vegetation dynamics. Studies from the North American boreal forest. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones H.G. 1999. The ecology of snow-covered systems: a brief overview of nutrient cycling and life in the cold. *Hydr. Proc.*, 13:2135-2147.
- Kelley J. Jr., Weaver D.F., Smith B.P. 1968. The variation of carbon dioxide under the snow in the Arctic. *Ecology*, 49:358-361.
- Lamothe M., Périard D. 1988. Implications of climate change for downhill skiing in Quebec. *Climate Change Digest, Atmospheric Environment Service, Downsview*, 88-103.
- Martin E., Durand Y. 1998. Precipitation and snow cover

- variability in the French Alps. In: Beniston M., Innes J.L. (eds.): The Impacts of climate change on forests, 81-92. Springer-Verlag, Heidelberg - New York.
- Massman W., Sommerfeld R., Zeller K., Hehn T., Hudnell L., Rochelle S. 1995. In: Tonnessen K., Williams M., Tranter M. (eds.): Biogeochemistry of snow-covered catchments, 71-80. International Association of Hydrological Sciences Publication 228, Wallingford, UK.
- Mast M.A., Wickland K.P., Striegl R.T., Clow D.W. 1998. Winter fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from subalpine soils in Rocky Mountain National Park, Colorado. *Global Biogeochemical Cycles*, 12:607-620.
- Meyer E.D., Sinclair N.A., Nagy B. 1975. Comparison of the survival and metabolic activity of psychrophilic and mesophilic yeasts subjected to freeze-thaw stress. *Appl. Microbiol.*, 29:739-744.
- Moore R.D., McKendry I.G. 1996. Spring snowpack anomaly patterns and winter climatic variability, British Columbia, Canada. *Water Resources Res.*, 32:623-632.
- Morley C.R., Trofymov J.A., Coleman D.C., Cambardella C. 1983. Effects of freeze-thaw stress on bacterial populations in soil microcosms. *Microb. Ecol.*, 9:329-340.
- Mosier A.R., Klemedtsson L.K., Sommerfeld R.A., Musselman R.C. 1993. Methane and nitrous oxide flux in a Wyoming subalpine meadow. *Global Biochem. Cycles*, 7:771-784.
- Mullen R.B., Schmidt S.K., Jaeger C.H. 1998. Nitrogen uptake during snowmelt by the snow buttercup, *Ranunculus adoneus*. *Arctic and Alpine Res.*, 30:121-125.
- Oechel W.C., Vourlitis G., Hastings S.J. 1997. Cold season CO<sub>2</sub> emission from arctic soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 11:163-172.
- Pilon C.E., Coté B., Fyles J.W. 1994. Effect of snow removal on leaf water potential, soil moisture, leaf and soil nutrient status and leaf peroxidase activity of sugar maple. *Plant Soil*, 162:81-88.
- Rascher C.M., Driscoll C.T., Peters N.E. 1987. Concentration and flux of solutes from snow and forest floor during snowmelt in the West-Central Adirondak region of New York. *Biogeochem.*, 3:209-224.
- Saarnio A.J., Nykaren H., Silvola J., Martikainen P.J. 1999. Winter CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeochem.*, 44:163-186.
- Sakai A., Larcher W. 1987. Frost survival of plants: responses and adaptations to freezing stress. Springer-Verlag, New York.
- Salisbury F.S. 1985. Plant growth under snow. *Aquilo series botanica*, 23:1-7.
- Schimel J.P., Kielland K., Chapin F.S. 1995. Nutrient availability and uptake by tundra plants. In: Reynolds J.F. & Tenhunen J.D. (eds.): Landscape function: implications for ecosystem response to disturbance; a case study in arctic tundra. Springer Verlag.
- Schürmann A., Mohn J., Bachofen R. 2002. N<sub>2</sub>O emissions from snow-covered soils in the Swiss Alps. *Tellus*, 54B:134-142.
- Shanley J.B., Chalmers A. 1999. The effect of frozen soil on snowmelt runoff at Sleepers River, Vermont. *Hydro. Proc.*, 13:1843-1858.
- Skoogland T., Lomeland S., Goksoyr J. 1988. Respiratory burst after freezing and thawing of soil: experiments with soil bacteria. *Soil Biol. Biochem.*, 20: 851-856.
- Sommerfeld R.A., Mosier A.R., Musselman R.C. 1993. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O flux through a Wyoming snowpack. *Nature*, 361:140-143.
- Soulides D.A., Allison F.E. 1961. Effect of drying and freezing soils on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation and bacterial population. *Soil Sci.*, 91:291-298.
- Stadler D., Wunderli H., Auckenthaler A., Fluhler H. 1996. Measurement of frost-induced snowmelt runoff in a forest soil. *Hydro. Proc.*, 10:1293-1304.
- Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. 1997. The thermal conductivity of seasonal snow. *J. Glaciol.*, 43:26-41.
- Sulkava P., Huhta V. 2003. Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralization in boreal forest soil. *Appl. Soil Ecol.*, 22:225-239.
- Taylor B.R., Jones H.G. 1990. Litter decomposition under snow cover in a balsam fir forest. *Can. J. Bot.*, 68:112-120.
- Teepe R., Brumme R., Beese F. 2001. Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods. *Soil Biol. Biochem.*, 33:1269-1275.
- Tierney G.L., Fahey T.J., Groffman P.M., Hardy J.P., Fitzhugh R.D., Driscoll C.T. 2001. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochem.*, 56:175-190.
- Vitousek P.M. 1994. Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecol.*, 75:1861-1876.
- Walker B.H., Steffen W.L., Canadell J., Ingram J.S.I. 1999. The terrestrial biosphere and global change: implications for natural and managed ecosystems. Synthesis Volume. Cambridge University Press, Cambridge.
- Watson R.T., Zinyowera M.C., Moss R.H. 1998. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge.
- Williams M.W., Bales R.C., Brown A.D., Melack J.M. 1995. Fluxes and transformations of nitrogen in a high-elevation catchment, Sierra Nevada. *Biogeochem.*, 28:1-31.
- Williams M.W., Losleben M., Caine N., Greenland D. 1996. Changes in climate and hydrochemical responses in a high elevation catchment in the Rocky Mountains, USA. *Limnol. Oceanogr.*, 41:939-946.
- Williams M.W., Brooks P.D., Seastedt T. 1998. Nitrogen and carbon soil dynamics in response to climate change in a high elevation ecosystem in the Rocky Mountains, USA. *Arctic Alpine Res.*, 30:26-30.
- Winston G.C., Stephens B.B., Sundquist E.T., Hardy J.P., Davis R.E. 1995. Seasonal variability of CO<sub>2</sub> transport through snow in a boreal forest. In: Tonnessen K.,

- Williams M., Tranter M. (eds.): Biogeochemistry of snow-covered catchments, 61-70. International Association of Hydrological Sciences Publication 228, Wallingford, UK.
- Zimov S.A., Zimova G.M., Daviodov S.P., Daviodova A.I., Voropaev Y.V., Voropaeva Z.V., Prosiannikov S.F., Prosiannikova O.V., Semiletova I.V., Semiletov I.P. 1993. Winter biotic activity and production of CO<sub>2</sub> in Siberian soils: a factor in the greenhouse effect. *J. Geophysical Res.*, 98:5017-5023.