



LA VARIABILITÀ SPAZIALE E TEMPORALE DELLA QUALITÀ DELLE PRECIPITAZIONI

Sandra Steingruber

Ufficio dell'Aria, del Clima e delle Energie Rinnovabili

Giovanni Kappenberger

ex collaboratore MeteoSvizzera

Nell'aria gli inquinanti atmosferici sono diluiti, trasportati e in parte trasformati per ricadere poi sulle persone, gli animali, la vegetazione, il suolo, le acque e i materiali. Se eccessive, le deposizioni di inquinanti atmosferici possono avere effetti nocivi (es: acidificazione e sovralfertilizzazione del suolo o delle acque, accumulo di metalli, danni a materiali ecc.). La Sezione della protezione dell'aria, dell'acqua e del suolo del Dipartimento del territorio monitora le deposizioni umide dagli anni Ottanta su incarico dell'Ufficio federale dell'ambiente. In questo articolo presentiamo la variazione nel tempo e nello spazio della qualità delle deposizioni umide, in particolare delle concentrazioni di inquinanti acidificanti (solfato, nitrato, ammonio) e fertilizzanti (nitrato, ammonio).

Introduzione

Durante il secolo scorso, il progressivo aumento delle emissioni in atmosfera, soprattutto di sostanze derivanti dai processi di combustione (biossido di zolfo e ossidi di azoto) ma anche dall'attività agricola (ammoniaca), ha comportato una modifica della naturale composizione fisico-chimica delle deposizioni atmosferiche (umide come pioggia, neve ecc. e secche da polveri), causando tra l'altro un aumento della loro acidità. L'apice delle emissioni è stato raggiunto all'inizio degli anni Ottanta. In seguito, grazie alla riduzione del contenuto di zolfo nei combustibili liquidi e alla progressiva sostituzione del carbone come fonte energetica, le emissioni di biossido di zolfo sono drasticamente diminuite. Anche le emissioni degli ossidi di azoto sono diminuite, dopo l'introduzione dei catalizzatori nelle automobili e dei sistemi di abbattimento dell'azoto negli impianti stazionari (impianti che non servono alla locomozione: impianti per processi industriali, generatori ecc), anche se meno drasticamente. Una leggera diminuzione delle emissioni di ammoniaca è da ricondurre soprattutto ad una riduzione dei capi di bestiame. Di risposta, dopo il picco di inizio anni Ottanta sono diminuiti anche i composti acidificanti presenti nelle deposizioni, migliorandone la qualità (Rogora et al. 2016, Steingruber 2015a). In particolare, le ridotte emissioni di biossido di zolfo hanno portato ad una diminuzione importante

delle concentrazioni di solfato, mentre le diminuzioni degli ossidi d'azoto e in parte dell'ammoniaca hanno causato una leggera diminuzione del nitrato e dell'ammonio. Di conseguenza è diminuita anche l'acidità ed è aumentato il pH delle precipitazioni (ricordiamo che acidità e pH evolvono in senso inverso: un valore di pH basso equivale ad alta acidità, e viceversa).

Il cantone Ticino è caratterizzato da deposizioni di inquinanti atmosferici abbastanza elevate. Questo a causa delle abbondanti precipitazioni orografiche che provengono dai venti umidi da sudovest in alta quota. Contemporaneamente i venti a quote basse, sotto i 2.000 metri s.l.m. circa, provengono dal settore sudovest, sud, sudest ed est (Kappenberger e Kerkmann, 1997), vale a dire che le masse d'aria che si dilavano in Ticino passano dalla Pianura Padana, una delle zone più industrializzate in Europa, dove si arricchiscono di inquinanti. Il Nord del cantone è inoltre risultato essere la regione più sensibile all'acidificazione in Svizzera, a causa della sua geologia prevalentemente cristallina.

Per monitorare l'evoluzione temporale delle deposizioni atmosferiche, la Sezione della protezione dell'aria, dell'acqua e del suolo del Dipartimento del territorio analizza regolarmente la qualità delle precipitazioni. Le prime stazioni di campionamento sono state messe in funzione negli anni Ottanta (Locarno Monti, Lugano). Nel corso degli anni sono state aggiunte altre



foto: campionatore utilizzato per raccogliere le deposizioni atmosferiche umide (pioggia, neve).

7 stazioni (Acquarossa, Bignasco, Monte Bré, Piotta, Robiei, Sonogno, Stabio). I risultati di questo monitoraggio sono pubblicati in rapporti annuali che possono essere scaricati al sito <http://www4.ti.ch/dt/da/spaas/uacer/temi/aria/per-saperne-di-piu/rapporti-e-studi/>.

Dal 2000 questo lavoro viene svolto per conto dell'Ufficio federale per l'ambiente, che utilizza questi dati per modellizzare il superamento dei carichi critici di acidità e di azoto in ecosistemi sensibili in Ticino. I carichi critici sono quelle deposizioni al di sopra delle quali, allo stato attuale della conoscenza, si possono avere effetti nocivi (Rihm and Achermann 2017).

Accanto al campionamento settimanale delle deposizioni umide presso le stazioni menzionate sopra, le cui altitudini variano da 353 metri s.l.m. (Stabio) a 1.890 metri s.l.m. (Robiei), dall'inizio degli anni Novanta sono stati regolarmente analizzati anche campioni del manto nevoso, che danno informazioni sulla qualità delle precipitazioni cadute durante la precedente stagione invernale sui ghiacciai del Basodino e del Clariden. Questi campioni sono estremamente interessanti, in quanto permettono di stimare le concentrazioni di sostanze inquinanti nelle deposizioni umide ad altitudini molto elevate (fino a 2.900-3.000 metri s.l.m.), fatto molto utile considerando che le zone sensibili all'acidificazione si trovano spesso in alta quota. I laghetti alpini sensibili all'acidificazione, per esempio, sono situati tra 1.700 e 2.850 metri s.l.m.

In questo articolo verrà presentata e discussa la relazione fra la qualità delle precipitazioni umide (concentrazioni dei principali composti acidificanti e pH) e (1) la latitudine e (2) l'altitudine; i dati saranno esaminati anche in un'ottica temporale.

Inoltre i risultati del Basodino saranno messi a confronto con quelli di altri ghiacciai delle Alpi centrali.

Area di studio e metodi

Nella figura [F. 1] sono indicati i punti di campionamento e nella tabella [T. 1] le relative informazioni geografiche e di monitoraggio. Le deposizioni umide sono state raccolte e analizzate settimanalmente. Le loro concentrazioni medie annue e invernali sono state ponderate sui volumi delle precipitazioni.

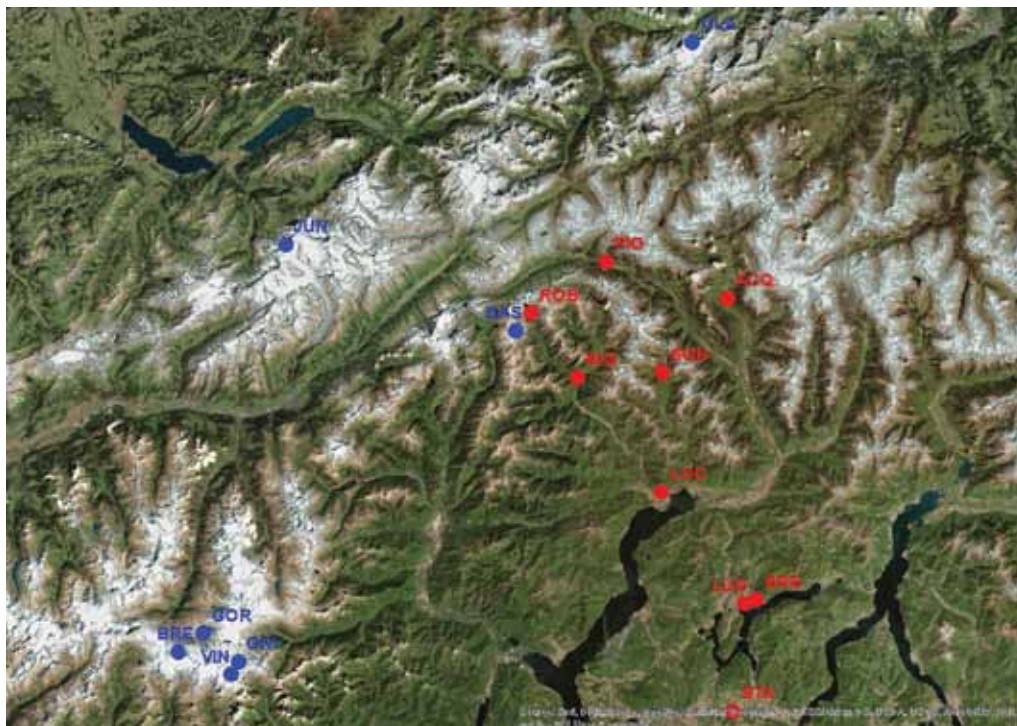
I campioni di neve sui ghiacciai del Basodino e del Clariden, invece, sono stati raccolti in genere una sola volta all'anno, in primavera, all'inizio della fusione del manto nevoso, in punti non soggetti a valanghe e influenzati poco dal vento, in modo da rappresentare bene la quantità e la qualità delle precipitazioni durante il periodo invernale (ottobre-maggio). Mentre i campioni del Clariden rappresentano sempre tutto lo strato nevoso invernale, quelli del Basodino comprendono la neve primaverile e di inizio anno, ma non sempre gli strati autunnali, perché a volte situati a grande profondità. Inoltre, i campioni del ghiacciaio del Basodino sono stati spesso divisi in più parti, corrispondenti a diversi strati. Le concentrazioni medie invernali sono quindi state calcolate ponderando le concentrazioni dei singoli strati con il relativo volume dello strato di neve (liquido).

Nei campioni di pioggia e neve raccolti sono stati analizzati i seguenti parametri: conducibilità, pH, alcalinità, calcio, magnesio, sodio, potassio, solfato, nitrato e cloruro. I metodi di analisi sono descritti nei rapporti annuali visionabili al seguente link: <http://www4.ti.ch/dt/da/spaas/uacer/temi/aria/per-saperne-di-piu/rapporti-e-studi/>.

Per verificare la rappresentatività delle concentrazioni misurate nei campioni di neve prelevati sui ghiacciai del Basodino e del Clariden e avere un'idea della loro variazione temporale prima dell'inizio del campionamento (1993), i valori sono stati confrontati con una serie temporale (1985-2007) proveniente da un carotaggio effet-

F.1

Punti di campionamento delle deposizioni atmosferiche umide attualmente attivi (punti rossi) e del manto nevoso o del carotaggio di un ghiacciaio (punti blu)



Avvertenza: le abbreviazioni sono specificate nella tabella [T. 1].

Fonte: UACER; Nickus et al. 1997, Sigl 2009

T.1

Informazioni geografiche e di monitoraggio dei punti di campionamento

Stazione	Codice	Altitudine	Prelievo	Periodo	Fonte
Acquarossa	ACQ	575	settimanale	1990-2016	UACER
Bignasco	BIG	443	settimanale	2001-2016	UACER
Monte Brè	BRE	925	settimanale	1995-2016	UACER
Locarno Monti	LOC	366	settimanale	1982-2016	UACER
Lugano	LUG	273	settimanale	1982-2016	UACER
Piotta	PIO	1.007	settimanale	1990-2016	UACER
Robiei	ROB	1.890	settimanale	1996-2016	UACER
Sonogno	SON	918	settimanale	2001-2016	UACER
Stabio	STA	353	settimanale	1990-2016	UACER
Basodino	BAS	2.700-3.050	stagionale	1993-2016	UACER
Clariden	CLA	2.900	stagionale	1993-2016	UACER
Colle Gnifetti	GNI	4.550	carotaggio	1985-2007	PSI
Breithorn	BRE	3.840	stagionale	1991-1993	Nickus et al. 1997
Colle Vincent	VIN	4.086	stagionale	1992-1993	Nickus et al. 1997
Gornergrat	GOR	3.055	stagionale	1991-1993	Nickus et al. 1997
Jungfrauoch	JUN	3.450	stagionale	1991-1993	Nickus et al. 1997

Fonte: UACER; Nickus et al. 1997, Sigl 2009

tuato presso il Colle Gnifetti (Grenzgletscher, 4.450 metri s.l.m., Massiccio del Monte Rosa) dall'Istituto Paul Scherrer. Questi dati sono stati messi gentilmente a disposizione dalla Dott.ssa Margit Schwikowski dell'Istituto Paul Scherrer di Villigen. La tecnica di carotaggio, come pure il metodo di datazione, sono descritti in Sigl (2009). Un altro confronto è stato fatto con le concentrazioni di solfato, nitrato e ammonio misurate nel manto nevoso di altri 4 ghiacciai delle Alpi Centrali negli anni 1991-1993 (Breithorn, Colle Vincent, Gornergrat, Jungfrauoch) e pubblicati in Nickus et al. (2004).

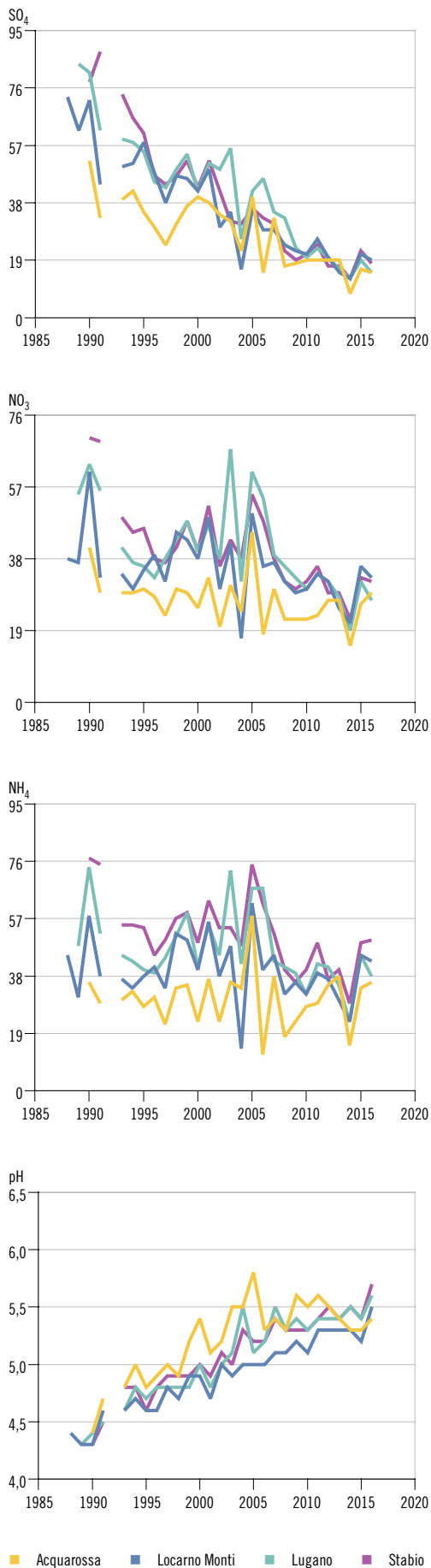
Risultati e discussione

Relazione fra qualità delle precipitazioni e la latitudine

La figura [F. 2] mostra l'evoluzione temporale delle concentrazioni medie annue dei principali parametri acidificanti e del pH nelle deposizioni umide campionate a Stabio, Lugano, Locarno Monti e Acquarossa. Come già accennato nell'introduzione, le concentrazioni dei composti acidificanti sono diminuite nel tempo a causa della riduzione delle emissioni nell'aria (biossido di zolfo, ossidi di azoto e ammoniacca). La riduzione è stata maggiore per il solfato,

F. 2

Concentrazioni medie annue di solfato (SO_4), nitrato (NO_3) e ammonio (NH_4) (in meq/m^3) e pH, nelle piogge ad Acquarossa, Locarno Monti, Lugano e a Stabio, dal 1985



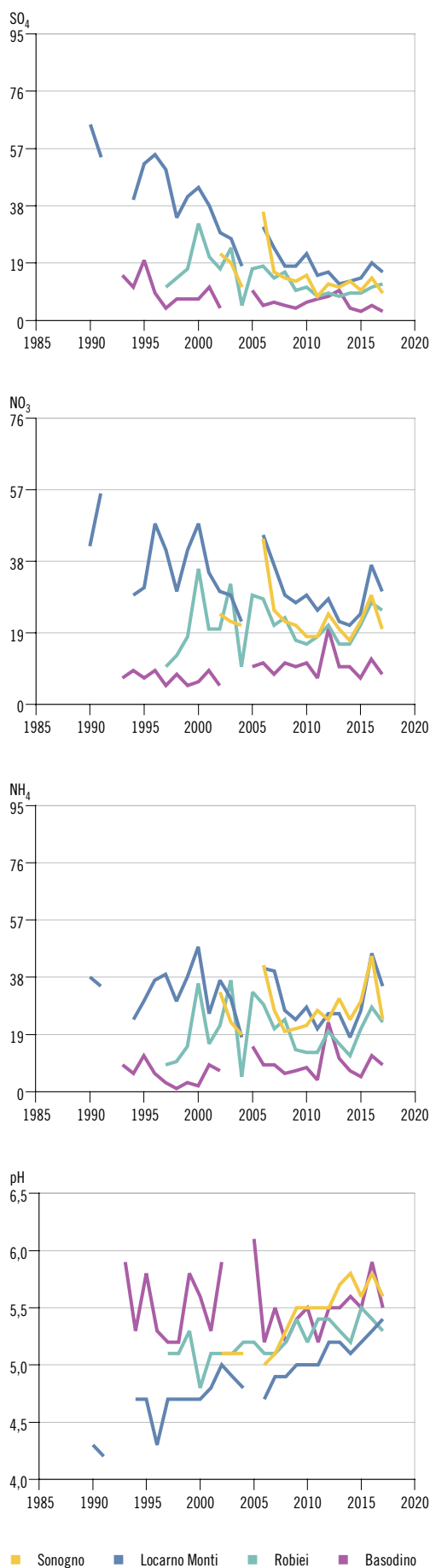
Fonte: UACER

seguito dal nitrato e dall'ammonio. Avendo latitudini diverse, ma longitudini e altitudini simili (sono tutte stazioni situate a basse quote), la variazione di concentrazione tra queste stazioni riflette la loro dipendenza dalla latitudine, e quindi il loro cambiamento lungo l'asse sud-nord del Ticino. All'inizio degli anni Novanta le concentrazioni di solfato, nitrato e ammonio erano infatti massime a Stabio, e diminuivano progressivamente lungo l'asse sud-nord fino ad arrivare a valori minimi ad Acquarossa, rispecchiando così la distanza dalle principali sorgenti di emissione. Siccome la riduzione nel tempo delle concentrazioni dei composti acidificanti è stata più importante nelle zone maggiormente inquinate, questo gradiente (lungo l'asse sud-nord) è però diminuito progressivamente con gli anni, al punto che attualmente le differenze tra le diverse stazioni a basse quote sono diventate minime, soprattutto per quanto riguarda le concentrazioni di solfato e nitrato.

Relazione fra qualità delle precipitazioni e l'altitudine

Per mostrare la dipendenza delle concentrazioni degli inquinanti acidificanti dall'altitudine, sono stati messi a confronto i valori misurati in stazioni con latitudine e longitudine simili ma altitudine variabile. In particolare, la figura [F. 3] mostra l'andamento nel tempo delle concentrazioni medie invernali di solfato, nitrato, ammonio e pH a Locarno Monti (366 metri s.l.m), Sonogno (918 metri s.l.m), Robiei (1.890 metri s.l.m) e Basodino (circa 2.900 metri s.l.m). È evidente una riduzione delle concentrazioni con l'altitudine. Questo è dovuto alla diminuzione, con l'altitudine, degli inquinanti provenienti da sorgenti locali e quindi più concentrati rispetto a quelli provenienti da sorgenti più distanti e perciò meno concentrati. Similmente a quanto osservato nel precedente paragrafo, la diminuzione delle concentrazioni dei composti acidificanti nel tempo è stata maggiore nelle stazioni con deposizioni più inquinate, in questo caso ad altitudini inferiori. Ad altitudini molto elevate, in questo caso sui 2.900 metri s.l.m (ghiacciaio

F.3
Concentrazioni medie invernali di solfato (SO_4), nitrato (NO_3) e ammonio (NH_4) (in mg/m^3) e pH, nelle piogge a Sonogno, Locarno Monti, Robiei e nel manto nevoso del ghiacciaio del Basodino, dal 1985



Fonte: UACER



foto: IT Press / Davide Agosta

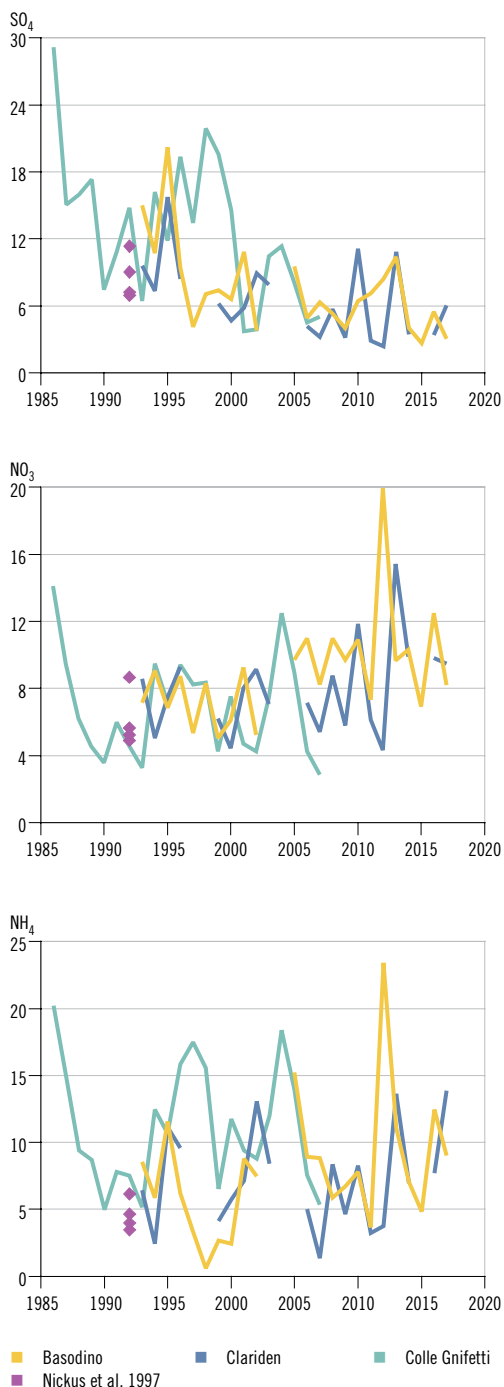
del Basodino) si osserva solo una leggera diminuzione delle concentrazioni di solfato, mentre non sono diminuite le concentrazioni di azoto. Analogamente, il pH è aumentato (ovvero, l'acidità è diminuita) in modo più marcato a basse altitudini (Locarno Monti) ed è rimasto invariato ad altitudini molto elevate (Basodino). A causa di questa differente evoluzione temporale, similmente a quanto osservato per la dipendenza dalla latitudine, anche la dipendenza delle concentrazioni di inquinanti acidificanti (soprattutto solfato) dall'altitudine è diminuita nel tempo, seppur meno drasticamente.

Confronto delle concentrazioni di composti acidificanti nelle deposizioni di sette ghiacciai

La figura [F. 4] mostra le serie temporali delle concentrazioni di solfato, nitrato e ammonio nel manto nevoso dei ghiacciai del Basodino e del Clariden e nella carota di ghiaccio prelevata presso il Colle Gnifetti. Inoltre sono rappresen-

F. 4

Concentrazioni di solfato (SO_4), nitrato (NO_3) e ammonio (NH_4) (in meq/m^3), nel manto nevoso dei ghiacciai Basodino e Clariden e nella carota di ghiaccio estratta dal Colle Gnifetti, dal 1985



Fonte: UACER

tate le concentrazioni misurate nel manto nevoso di altri 4 ghiacciai (Breithorn, Colle Vincent, Gornergrat, Jungfrauoch) negli anni 1991-1993 (Nickus et al. 1997). Seppur abbastanza distanti geograficamente e in parte campionati con metodi diversi, le concentrazioni di solfato, nitrato e ammonio sono nello stesso ordine di grandezza. Questo risultato sembra quindi da un lato confermare la plausibilità dei valori misurati sul Basodino, ma sembra anche suggerire che oltre i 3.000 metri s.l.m. le concentrazioni di solfato, nitrato e ammonio nelle deposizioni umide rimangono più o meno costanti e quindi non più

dipendenti dall'altitudine e dalla latitudine. L'ultima constatazione è particolarmente interessante perché le deposizioni umide sul versante nord delle Alpi (Clariden, Jungfrauoch) sono il risultato di situazioni meteorologiche diverse rispetto a quelle presenti sul versante sud (Basodino e ghiacciai della regione del Monte Rosa).

Conclusioni

Riassumendo, abbiamo osservato che all'inizio del periodo di monitoraggio (fine anni Ottanta e inizio anni Novanta) la qualità delle precipitazioni nel canton Ticino dipendeva marcatamente dalla latitudine e dall'altitudine, mentre attualmente si riscontra ancora solo una lieve dipendenza dall'altitudine. Per poter modellizzare la qualità e la quantità delle deposizioni su tutta l'area cantonale è quindi estremamente importante disporre di stazioni di campionamento che siano rappresentative, non solo della latitudine ma anche delle diverse altitudini del cantone. In particolare, siccome il rischio di acidificazione è elevato soprattutto nel nord del cantone ad altitudini elevate, la presenza di siti di campionamento in questa zona è fondamentale. In questo contesto, anche i campioni del manto nevoso sul ghiacciaio del Basodino, seppur prelevati con minore frequenza, sono importantissimi per stimare la diminuzione delle concentrazioni con l'altitudine.

I risultati hanno anche mostrato un generale aumento del pH delle deposizioni umide (dunque acidità inferiore). È infatti notevolmente diminuita (da 67% a 47%, Steingruber 2015b) la quota di siti appartenenti all'inventario forestale caratterizzati da deposizioni di acidità superiori ai carichi critici. La stessa tendenza si riscontra per i laghi alpini monitorati, dove la percentuale dei laghi a rischio di acidificazione è diminuita da 65% a 30% (Steingruber 2015b). Accanto all'acidità, anche la deposizione di azoto (nitrato e ammonio) può essere critica, perché rischia di sovralfertilizzare il suolo e le acque superficiali. Essa è sì diminuita nel tempo, ma non ancora sufficientemente. Infatti, nel canton Ticino più



foto TF Press / Paolo Giannazzi

del 90% dei siti sensibili alla sovralfertilizzazione (foreste e altri ecosistemi terrestri) ha ancora un carico di azoto superiore a quello critico (Steingruber, 2015b). Inoltre, anche per quanto riguarda i laghi alpini, le attuali deposizioni di azoto superano di un fattore 2-3 i carichi critici proposti da de Wit e Lindholm (2010) (3-5 kg N ha⁻¹ yr⁻¹). Affinché le deposizioni di acidità e di azoto non superino più i carichi critici, le emissioni di azoto globali dovranno quindi essere ridotte ulteriormente.

Ringraziamenti

Ringraziamo la Prof. Dr. Margit Schwikowski dell'Istituto Paul Scherrer (PSI) per averci messo a disposizione i dati del carotaggio sul Colle Gnifetti, i/le signori/e Bonetti, Bolgè, Genucchi, Gnesa, Tison come pure FFS, MeteoSvizzera e Ofima per i prelievi settimanali delle deposizioni umide, il Laboratorio della Sezione della protezione dell'aria, dell'acqua e del suolo per le analisi chimiche ed infine per il supporto finanziario nell'ambito del progetto ICP waters l'Ufficio federale dell'ambiente per i prelievi sui ghiacciai del Clariden e del Basodino e la società svizzera per la neve, il ghiaccio e il permafrost.

Bibliografia

De Wit H.A e Lindholm M. 2010. Nutrient enrichment effects of atmospheric N deposition on biology in oligotrophic surface waters – a review. NIVA Report No. 6007-2010. Norwegian Institute for Water Research (NIVA), Oslo, 39 p.

Kappenberger G. e Kerkmann J. 1997. Il tempo in montagna – Manuale di meteorologia alpina. Zanichelli, Bologna, 255 p.

Nicku U., Kuhn M., Baltensperger U., Delmas R., Gäggerler H., Kasper A., Kromp-Kolb H., Maupetit F., Novo A., Pilchmayer F., Preunkert S., Puxbaum H., Rossi G., Schöner W., Schwikowski M., Seibert P., Staudinger M., Tockner V. e Wagenbach D. 1997. SNOSP: Ion deposition and concentration in high alpine snow packs. *Tellus* 49B: 56-71.

Rihm B. e Achermann B. 2016. Critical loads of nitrogen and their exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). *Environmental studies* no. 1642, Federal Office for the Environment, 78 p.

Rogora M., Colombo L., Marchetto A., Mosello R. and Steingruber S. 2016. Temporal and spatial patterns in the chemistry of wet deposition in Southern Alps. *Atmos. Environ.* 146: 44-54.

Sigl M. 2009. Ice core based reconstruction of past climate conditions from Colle Gnifetti, Swiss Alps. *Dissertazione, Università di Berna.*

Steingruber S. 2015a. Acidifying deposition in southern Switzerland – Monitoring, maps and trends 1988-2013.). Ufficio dell'aria, del clima e delle energie rinnovabili, Dipartimento del territorio del Cantone Ticino, Bellinzona, 60 p.

Steingruber S. 2015b. Deposition of acidifying and eutrophying pollutants in Southern Switzerland from 1988 to 2013. *Boll. Soc.*