



L'inquinamento transfrontaliero e i laghi alpini

foto Ti-Press / Francesca Agosta

Introduzione

In virtù delle loro caratteristiche morfometriche ed idrologiche, i laghi delle regioni alpine sono considerati tra gli ecosistemi acquatici più sensibili all'inquinamento atmosferico e alle variazioni climatiche. Da diversi anni vengono quindi utilizzati come indicatori per studiare la risposta a questi fattori, attraverso indagini realizzate sia sulle caratteristiche chimiche delle acque che sui loro popolamenti biologici.

Negli ultimi anni i laghi alpini di alcune aree del Piemonte e del canton Ticino, interessati dal fenomeno dell'acidificazione negli anni '70 ed '80, hanno iniziato a mostrare segni di ripresa o *recovery*. Da un punto di vista chimico, il *recovery* si presenta come un aumento dei valori di pH e alcalinità, che tendono a tornare ai valori preesistenti al processo di acidificazione (Rogora et al., 2003; Steingruber e Colombo, 2006). Un processo, quello di acidificazione, conseguente all'elevata deposizione di composti acidi ed acidificanti (H^+ , SO_4 , NO_3 , NH_4) che interessa queste aree, dovuta ad una combinazione di

importanti volumi di precipitazioni (per effetto orografico) ed alte concentrazioni di inquinanti atmosferici nelle masse d'aria provenienti dalla Pianura Padana, una delle aree europee maggiormente urbanizzate ed a maggior densità di attività industriali, agricole e zootecniche (Rogora et al., 2006). A seguito della diminuzione degli apporti acidi dall'atmosfera, in particolare delle deposizioni di solfati, che nell'area alpina si sono pressoché dimezzate negli ultimi 20 anni (Rogora et al., 2006), si verifica il fenomeno del *recovery*.

Le deposizioni dei composti dell'azoto risultano invece tra le più elevate d'Europa, e si sono mantenute pressoché costanti nel tempo. Come conseguenza, le acque dei laghi alpini risultano caratterizzate da concentrazioni elevate di nitrati, soprattutto se confrontate con quelle di ambienti acquatici di altre aree remote (Rogora et al., in stampa).

Il *recovery* chimico rappresenta il presupposto indispensabile per un recupero di tipo biologico, cioè una ricolonizzazione delle acque lacustri da parte degli organismi più sensibili all'acidificazione. Studi effettuati su



Michela Rogora, CNR-ISE*
Sandra Steingruber, Ufficio della protezione dell'aria

laghi e fiumi europei e nord-americani sensibili all'acidificazione hanno evidenziato negli ultimi anni un *recovery* biologico, che presenta però un ritardo rispetto a quello chimico che può variare da pochi anni fino a 20, a seconda delle specie/comunità considerate (Raddum et al., 2004).

La disponibilità di serie lunghe di dati su ambienti remoti delle Alpi, quali i laghi d'alta quota, è estremamente utile per ricostruire l'andamento di alcuni processi antropici, come l'emissione di inquinanti atmosferici ed i mutamenti del clima, attraverso gli effetti su questi ecosistemi. Per poter effettuare un'analisi dei *trend*, cioè delle variazioni a lungo termine, ad esempio nella chimica delle acque, è necessario che i dati raccolti siano confrontabili nel tempo, quindi prodotti attraverso metodologie di campionamento ed analisi opportunamente controllate e validate.

Grazie alle ricerche effettuate sui laghi alpini in Piemonte e canton Ticino sin dagli inizi degli anni '80, è oggi disponibile un ampio *dataset* sull'idrochimica di questi ambienti. Le variazioni temporali delle principali variabili chimiche nelle acque lacustri di 55 laghi situati in queste aree vengono discusse in questo lavoro in relazione agli apporti di inquinanti dall'atmosfera ed a fattori meteo-climatici (temperatura, precipitazioni, copertura di neve al suolo).

* Centro Nazionale delle Ricerche - Istituto per lo Studio degli Ecosistemi, Verbania Pallanza.

«Negli ultimi anni i laghi alpini di alcune aree del Piemonte e del Ticino, interessati dal fenomeno dell'acidificazione negli anni '70 ed '80, hanno iniziato a mostrare segni di ripresa.»

L'influenza dei fattori meteo-climatici sulla chimica delle acque

A causa dei bacini imbriferi di piccole dimensioni e spesso costituiti da rocce poco solubili di natura silicica, come gneiss e graniti, il pH delle acque di questi laghi è regolato principalmente dalla solubilità delle rocce e dai processi di riduzione che possono, per mancanza di ossigeno durante il periodo di copertura di ghiacci, determinare un aumento di pH (Koinig et al. 1997). Il *weathering*, cioè il dilavamento delle rocce e dei suoli nel bacino ed il conseguente apporto di soluti a lago, non ha effetti solo sul pH, ma su tutta la composizione chimica delle acque. Temperature più elevate possono incrementare i processi di dissoluzione fisico-chimica dei minerali costituenti rocce e suoli, e quindi aumentare l'apporto dei prodotti del *weathering* alle acque (Zobrist & Drever, 1990). Anche la copertura di neve al suolo, sia come estensione che come durata, è un fattore importante, in quanto una sua riduzione in un clima più caldo comporta una maggior esposizione delle superfici ai processi di dilavamento. Periodi prolungati senza neve al suolo, a causa delle ridotte precipitazioni o del disgelo anticipato, possono quindi portare ad un aumento del contenuto di soluti nei laghi (Wögrath & Psenner, 1995). I fattori meteo-climatici possono quindi interagire con gli apporti atmosferici nel determinare la chimica delle acque, svolgendo il ruolo di *confounding factors* nella risposta dei laghi alpini alle variazioni nella deposizione di inquinanti dall'atmosfera.



Area di studio e metodi

Nel biennio 2000-01 e nel 2007, nell'ambito di alcuni progetti di ricerca finanziati dall'UE (RECOVER 2010, EMERGE, EUROLIMPACS) 35 laghi d'alta quota (1900-2700 m s.l.m.) situati nelle Valli Ossola e Sesia, nelle Alpi Centrali (v. tab. 1 e cartina A) sono stati

campionati ed analizzati per le principali variabili chimiche. I laghi sono stati selezionati in base alla disponibilità di dati pregressi, ed in modo tale da rappresentare un ampio range di caratteristiche chimiche, da laghi con basso contenuto in soluti e ridotta alcalinità, e quindi sensibili all'acidificazione, a laghi con acque ben tamponate (v. tab. 1). I risultati ottenuti da

questa *survey* sono stati confrontati con quelli pregressi disponibili per gli stessi laghi e rappresentativi della metà degli anni '80, al fine di evidenziare le principali variazioni intervenute nella chimica delle acque. Nel confronto sono stati inclusi anche i dati di 20 laghi alpini collocati nel Ticino nord-occidentale, in un'area a composizione litologica prevalentemente granitica, e per i quali esistono dati pregressi a partire dagli anni '80. La localizzazione

1 Principali caratteristiche dei laghi alpini campionati nelle Valli Ossola e Sesia, in Piemonte¹

		Percentili					Media	Dev. St.
		0%	25%	50%	75%	100%		
Altitudine	m	1.910	2.052	2.190	2.339	2.672	2.209	184
Rocce	%	29	72	89	93	98	80	19
Vegetazione	%	0	3	7	20	69	15	19
pH		5,90	6,98	7,30	7,99	8,88	6,80	0,78
Conducibilità	$\mu\text{S cm}^{-1} 20\text{ }^\circ\text{C}$	7,9	13,9	28,8	54,4	111,3	37,5	28,1
NH ₄ ⁺	$\mu\text{eq l}^{-1}$	0	0	0	1	5	1	1
Ca ⁺⁺	$\mu\text{eq l}^{-1}$	45	104	227	459	1.023	310	262
Mg ⁺⁺	$\mu\text{eq l}^{-1}$	7	13	24	48	174	40	41
Na ⁺	$\mu\text{eq l}^{-1}$	8	14	18	20	33	18	6
K ⁺	$\mu\text{eq l}^{-1}$	2	5	8	14	59	11	11
Alcalinità	$\mu\text{eq l}^{-1}$	16	76	116	460	883	251	235
Cl ⁻	$\mu\text{eq l}^{-1}$	2	3	3	3	5	3	1
SO ₄ ⁼	$\mu\text{eq l}^{-1}$	26	46	76	141	506	118	110
NO ₃ ⁻	$\mu\text{eq l}^{-1}$	0	5	11	17	26	11	8
Silicati	mg Si l ⁻¹	0,06	0,62	0,89	1,00	1,80	0,84	0,38

¹ I valori delle variabili chimiche si riferiscono al campionamento dell'autunno 2007.



foto Ti-Press / Gabriele Putzu

A Localizzazione dei laghi campionati



e le principali caratteristiche di questi laghi sono descritte in dettaglio in Steingruber e Colombo (2006). Questi laghi sono inseriti nella rete di monitoraggio del Programma UN-ECE ICPWaters, che si occupa della valutazione dell'acidificazione di laghi e fiumi sotto l'egida della Convenzione sull'Inquinamento Atmosferico Transfrontaliero (CLRTAP).

Per quattro laghi piemontesi, i Laghi Boden Inferiore e Superiore (Val Formazza, 2.234 e 2.243 m s.l.m.), ed i Laghi Paione Inferiore e Superiore (Val Bognanco, 2.002 e 2.269 m s.l.m.) è disponibile inoltre una serie pressoché continua di dati a partire dal 1978. I laghi Boden sono collocati in bacini formati in parte da rocce solubili ed alcaline e sono caratterizzati da acque ben tamponate (pH 7,8-8,1, alcalinità 450-550 $\mu\text{eq l}^{-1}$). L'idrochimica di questi laghi dipende fortemente dai processi di *weathering*, ed è quindi particolarmente influenzata dalle variazioni meteo-climatiche che regolano tali processi. I Laghi Paione, collocati in bacini formati da rocce acide e poco solubili, sono invece caratterizzati da acque diluite e con basso potere tampone. A partire dalla fine degli anni '70 questi laghi sono andati incontro ad acidificazione causa degli apporti acidi dall'atmosfera, raggiungendo, nel caso del Lago Paione Superiore, valori negativi di alcalinità e pH inferiore a 5,4. Anche i Laghi Paione sono tra i siti considerati nel Programma ICPWaters.

Per tutti i laghi sono stati considerati solo i dati raccolti nel periodo tardo autunnale, quando è massima la stabilità delle caratteristiche chimiche, al fine di disporre di dati confrontabili nel tempo. Le analisi chimiche sono state effettuate, per i laghi piemontesi e ticinesi, rispettivamente dal Laboratorio di Chimica del CNR ISE di Verbania Pallanza e dal Laboratorio SPAAS di Bellinzona. Entrambi i laboratori eseguono regolarmente controlli interni della qualità del dato analitico, oltre a partecipare periodicamente ad esercizi di intercalibrazione, quali quelli organizzati dal Centro di Coordinamento del Programma ICPWaters (Hovind, 2006).



foto Ti-Press / Francesca Agosta

B Principali variabili chimiche nei laghi alpini piemontesi e ticinesi, 1980, 2000-'01 e 2007¹

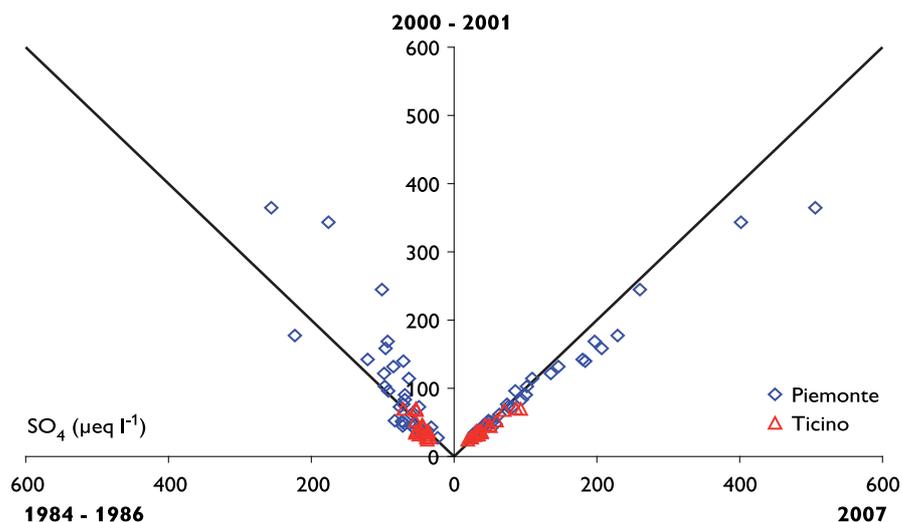
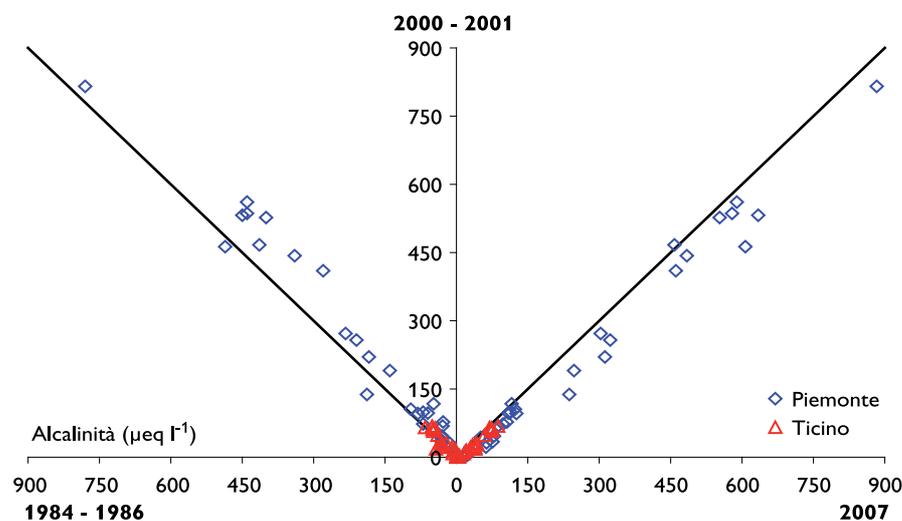
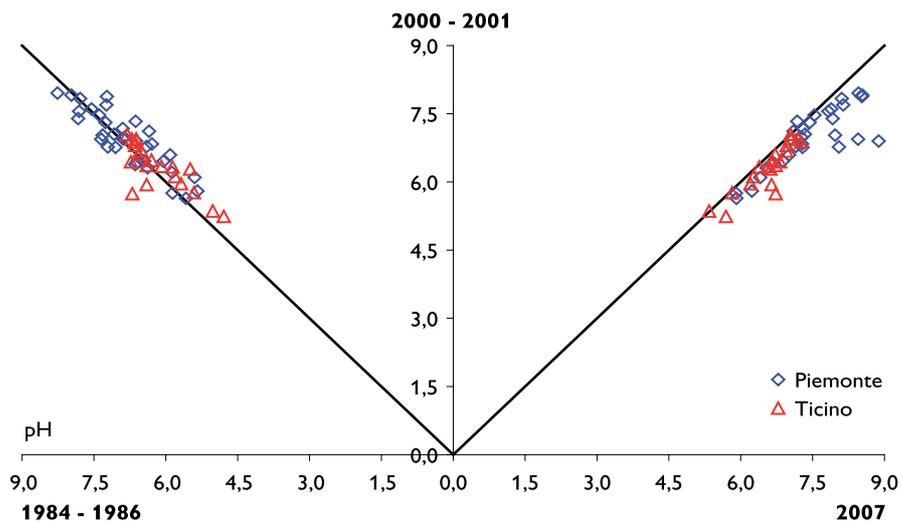
Risultati

Dal confronto tra i tre periodi di studio (metà anni '80, 2000-2001 e 2007) emerge come i valori di pH siano aumentati nella maggior parte dei laghi oggetto della ricerca (v. graf. B), principalmente a causa della riduzione negli apporti acidi dall'atmosfera.

Il numero di laghi con valori di pH inferiori a 6,0 è passato da 13 negli anni '80 a 5 nel 2007. Anche per quanto riguarda l'alcalinità l'aumento delle concentrazioni è evidente in tutti i laghi, in particolare se si considerano quelli caratterizzati da valori al di sotto dei 150 $\mu\text{eq l}^{-1}$ (v. graf. B). Adottando come soglie critiche per l'alcalinità i valori di 50 (laghi sensibili) e 20 (laghi altamente sensibili) $\mu\text{eq l}^{-1}$, dagli anni '80 ad oggi il numero di laghi con valori inferiori a tali limiti è passato da 32 a 18 e da 14 a 8 (v. graf. B). Il *recovery* chimico appare più evidente per i laghetti ticinesi, maggiormente rappresentativi della categoria dei laghi sensibili all'acidificazione rispetto a quelli situati nella valli piemontesi.

Il pH è aumentato anche nei laghi caratterizzati da valori medio alti ($> 6,5$) e quindi non suscettibili all'acidificazione (alcalinità $> 50 \mu\text{eq l}^{-1}$). I laghi impostati in bacini contenenti rocce solubili, e caratterizzati quindi da valori elevati del contenuto ionico e della conducibilità ($> 500 \mu\text{eq l}^{-1}$ e $> 25 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 20°C , rispettivamente), hanno mostrato un aumento di entrambe queste variabili rispetto agli anni '80. Gli stessi laghi hanno visto un aumento nelle concentrazioni di alcalinità e cationi basici (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+).

Per quanto riguarda infine i nitrati, la maggior parte dei laghi ha presentato una diminuzione delle concentrazioni nel periodo più recente, dal 2000-01 al 2007 (v. graf. B).



¹ Per l'alcalinità è riportato sia il dato con tutti i laghi (n = 55) che quello con i soli laghi con valori inferiori a 150 $\mu\text{eq l}^{-1}$ (n = 42).

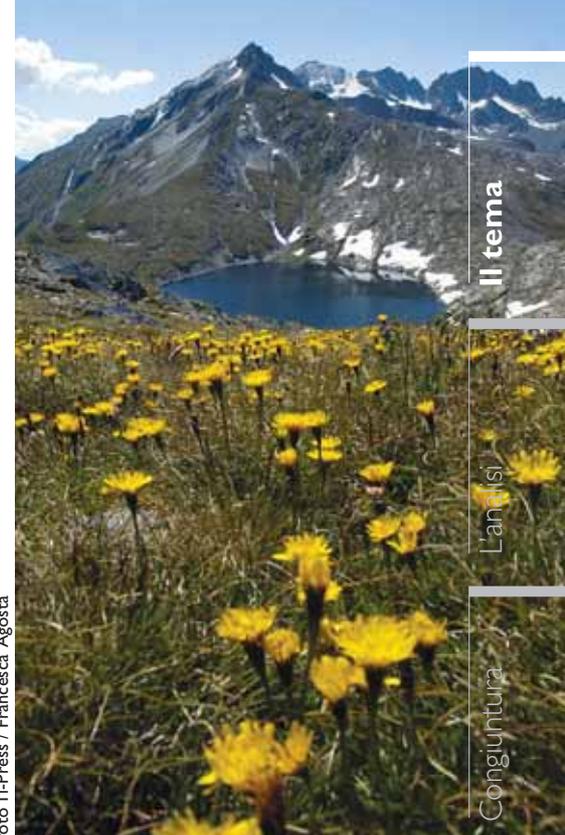
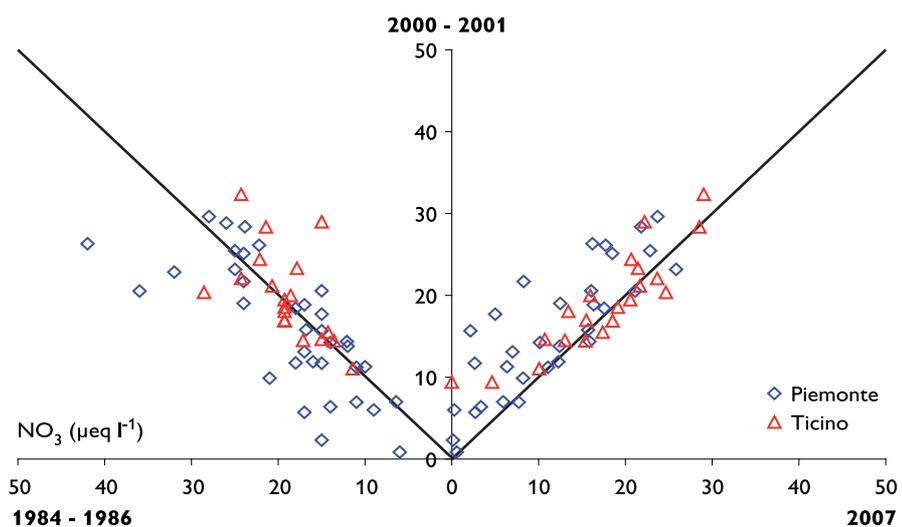
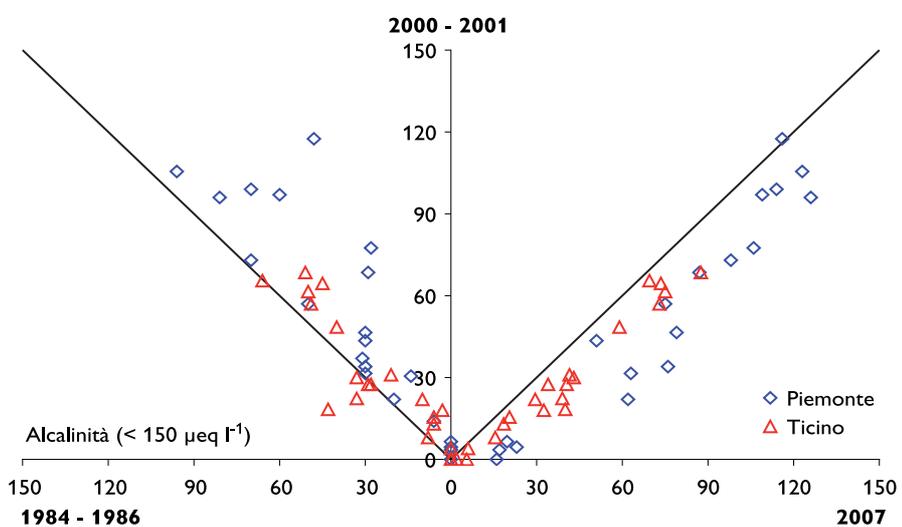
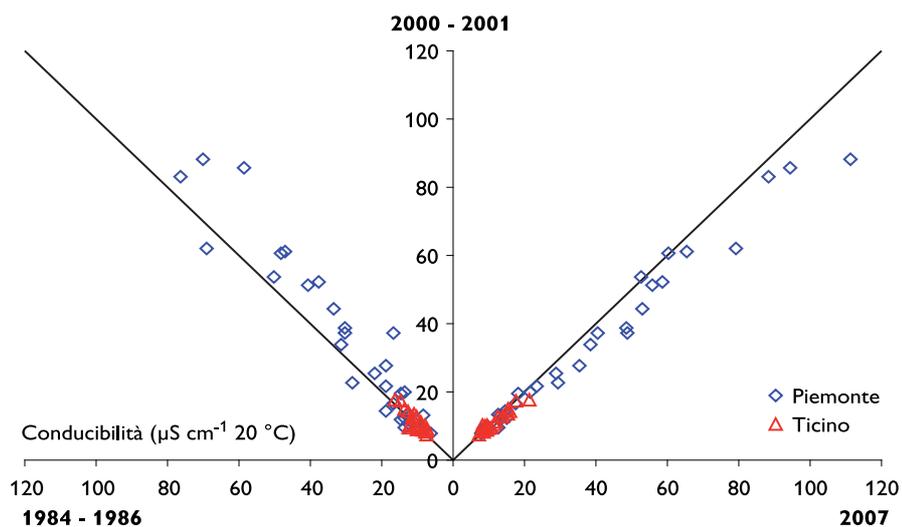


foto Tl-Press / Francesca Agosta

Il tema

L'analisi

Congiuntura

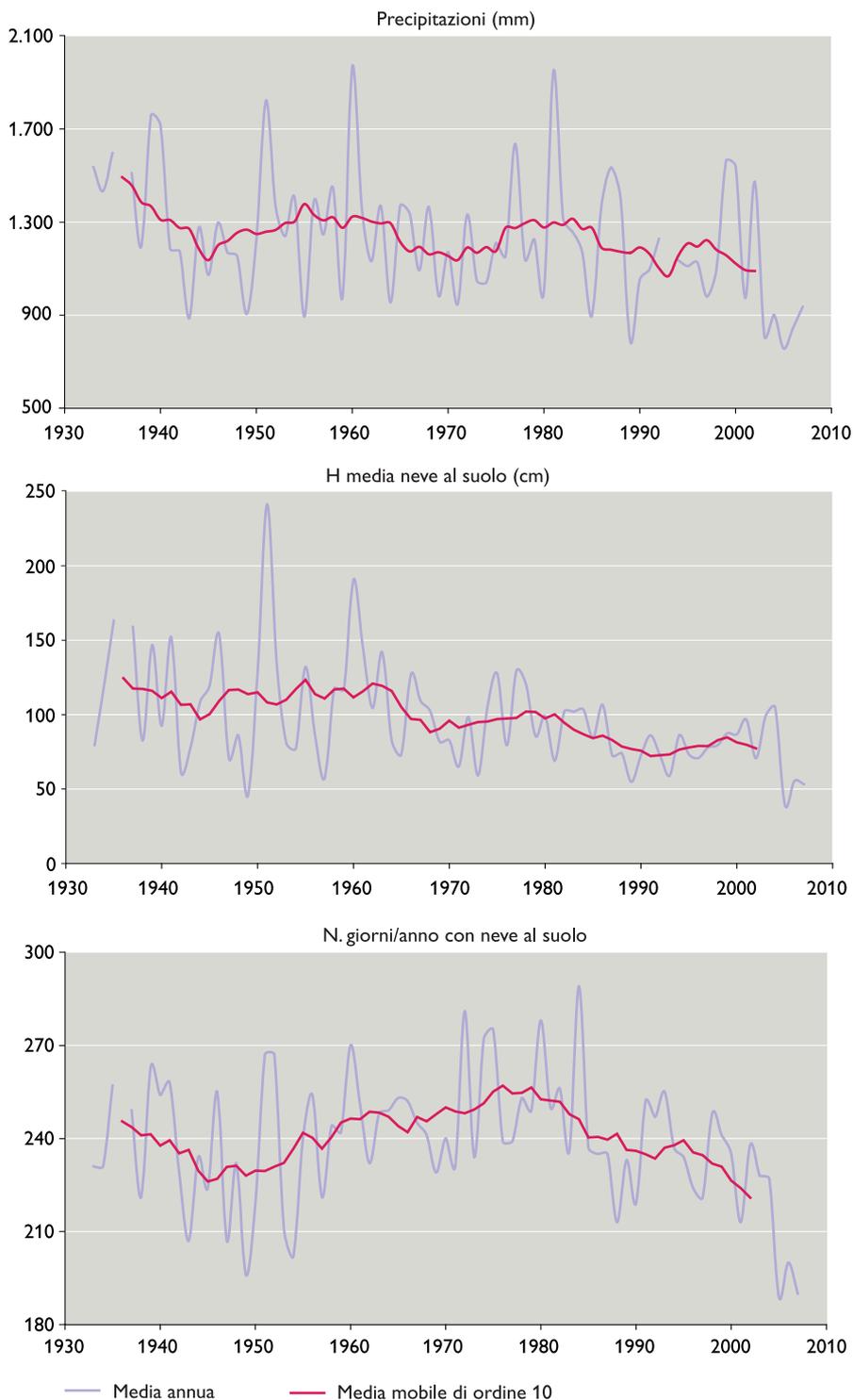
La ricerca

Libri e riviste

Come risultato della riduzione negli apporti atmosferici, un numero consistente di laghi ha mostrato una diminuzione del contenuto di solfati nelle acque; in un numero limitato di ambienti, con acque già ricche di solfati a causa della presenza nel bacino di rocce quali gessi e anidriti, si rileva invece un aumento delle concentrazioni (v.graf. B). Per questi laghi la sorgente principale di solfati non è rappresentata dalle deposizioni atmosferiche, bensì dal *weathering* di minerali ricchi di zolfo (Rogora et al. 2003).

Anche la serie storica di dati disponibile per i Laghi Boden mostra una significativa tendenza all'aumento delle concentrazioni di alcalinità, cationi basici e solfati e dei valori di conducibilità, indicativa del contenuto ionico delle acque. Questi trend positivi possono essere giustificati da un'intensificazione del processo di *weathering* a causa dal riscaldamento climatico (Rogora et al., 2003). I dati meteorologici disponibili per alcune stazioni nell'area di studio a partire dalla fine del 1800 o dai primi decenni del 1900 mostrano un significativo aumento delle temperature, particolarmente marcato negli ultimi 30 anni (Rogora et al. 2004). I dati sulla copertura di neve al suolo, rilevati nella stazione di Toggia, in Val Formazza, dal 1933, evidenziano una marcata riduzione sia dello spessore medio del manto nevoso che del periodo di coper-

C Precipitazioni, neve al suolo e durata nella stazione meteorologica di Toggia¹, 1930-2010 (medie annue)



¹ Val Formazza, Piemonte (2.200 m s.l.m.).

tura del suolo, in particolar modo negli ultimi 15-20 anni (v. graf. C).

Questi due fattori, aumento di temperatura e riduzione del manto nevoso, possono quindi concorrere a spiegare l'aumentato

apporto dei soluti dai bacini alle acque dei laghi. Il riscaldamento climatico potrebbe avere un ruolo anche nella recente diminuzione delle concentrazioni di nitrati: un'intensificazione dell'attività biologica, sia nella porzione

terrestre del bacino che nelle acque, a causa dell'aumento di temperatura, può infatti comportare un maggior consumo di azoto e quindi una riduzione dei nitrati in soluzione nelle acque.

Un contributo alla riduzione del contenuto di nitrati potrebbe venire anche dalla lieve diminuzione dei carichi di azoto attraverso le deposizioni che ha interessato l'area di studio negli anni più recenti (2003-2007). Tale riduzione non è però imputabile ad un calo delle concentrazioni dei composti dell'azoto, e quindi delle emissioni in atmosfera, ma solo ai ridotti apporti meteorici che hanno caratterizzato gli ultimi anni. Nella stazione di Toggia ad esempio, la media delle precipitazioni nel periodo 2003-2007 è stata di 1.420 mm, contro una media storica di lungo periodo di circa 2.000 mm.

Conclusioni

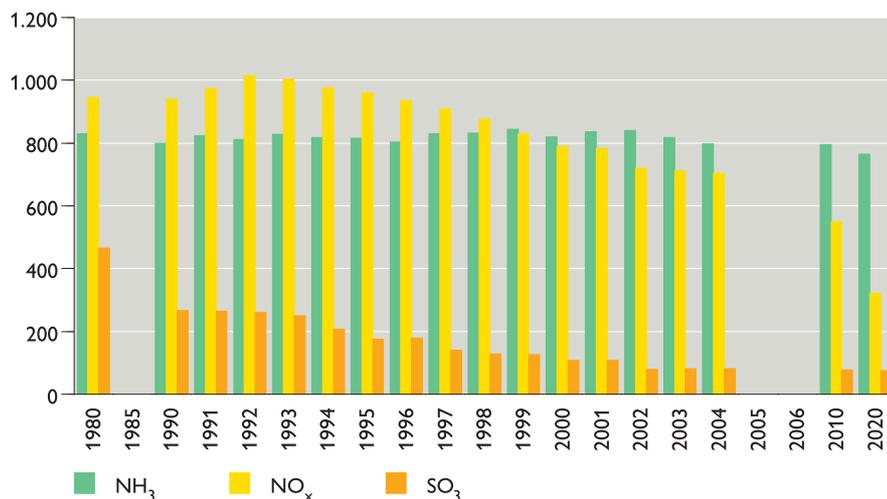
Le ricerche effettuate hanno dimostrato come la chimica delle acque in ambiente alpino risponda non solo alle variazioni negli apporti atmosferici, ad esempio alla riduzione nell'acidità delle piogge, ma anche attraverso l'interazione con altri fattori quali quelli meteo-climatici.

Nel complesso il *recovery*, sotto forma di un aumento di pH e alcalinità, risulta particolarmente evidente per i laghetti ticinesi, e per quelli piemontesi più sensibili all'acidificazione. I laghi meno sensibili sono invece interessati da una tendenza all'aumento delle concentrazioni di soluti che può essere attribuita alle variazioni climatiche.

Molti laghi alpini sono attualmente in una fase di recupero dall'acidificazione, ma continuano ad essere interessati dalla deposizione di inquinanti dall'atmosfera, quali composti dell'azoto, metalli pesanti e composti organici di sintesi. Il contenuto di azoto nitrico nelle acque dei laghi in particolare, nonostante una recente tendenza alla diminuzione, continua a rimanere elevato.

«Nonostante il recupero dall'acidificazione, molti laghi alpini continuano ad essere interessati dalla deposizione di inquinanti dall'atmosfera, quali composti dell'azoto, metalli pesanti e composti organici di sintesi.»

D Emissioni in atmosfera di NH_3 , NO_x e SO_2 nei laghi alpini del campione piemontese, 1980-2020¹



¹ Le emissioni sono calcolate per la cella EMEP in cui sono collocati i laghi alpini oggetto della ricerca. I dati previsti per il 2010 e 2020 sono stati calcolati sulla base dello scenario CLE (Current Legislation Projections) che tiene conto dei principali protocolli internazionali per l'abbattimento delle emissioni. Dati EMEP Centre on Emission Inventories and Projections (CEIP), <http://www.emep-emissions.at>

Il confronto con laghi remoti di altre aree europee od extraeuropee quali Himalaya, Antartide, Patagonia (Rogora et al., in stampa) dimostra la criticità dell'area alpina dal punto di vista degli apporti atmosferici di azoto. Inoltre, i modelli di previsione delle emissioni in atmosfera dei composti dell'azoto, quali quelli messi a punto dall'EMEP (Co-operative programme for monitoring and evaluation of the transmission of air pollutants in Europe), stimano, per l'area di studio, una riduzione significativa delle emissioni di NO_x nei prossimi due decenni, ma non prevedono pressoché alcuna variazione per le emissioni di NH_3 , principalmente imputabili alle attività agricole e zootecniche (v. graf. D).

Le deposizioni di ammonio svolgono un ruolo importante nel processo di acidificazione, in quanto l' NH_4 nelle acque si ossida rapidamente a NO_3 producendo acidità (2 moli di H^+ per mole di NH_4^+ ossidato). In futuro quindi, le emissioni di NH_3 , precursore dell' NH_4^+ nelle deposizioni, sono destinate ad assumere un ruolo sempre più rilevante nei processi di acidificazione e recovery delle acque, così come nel carico totale di azoto agli ecosistemi.

I dati presentati in questo lavoro dimostrano come la risposta dei laghi alpini ai futuri scenari di deposizione sarà forte-

mente condizionata dall'evoluzione climatica. Si rendono quindi necessarie, oltre ad una prosecuzione del monitoraggio di questi ambienti, ricerche di approfondimento sull'interazione tra fattori meteo-climatici e processi che avvengono nei suoli del bacino e nelle acque. ■

Ringraziamenti

Le ricerche sui laghi alpini nelle valli Osso-la e Sesia sono state realizzate nell'ambito dei progetti UE EMERGE (EVK1-1999-00159), RECOVER: 2010 (EVK1-99-00018), EURO-LIMPACS (GOCE-CT-2003-505540) e del Programma ONU-ECE ICPWaters, nell'ambito di una Convenzione tra CNR e Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Si ringraziano Gabriele Tartari, Alfredo Pranzo, Paola Giacomotti, Ombretta Tornimbeni e Arianna Orrù del CNR ISE di Verbania Pallanza per aver preso parte ai campionamenti ed eseguito le analisi in laboratorio.

Le ricerche sui laghetti alpini ticinesi sono parzialmente finanziate dall'Ufficio Federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio.

Bibliografia

Steingruber, S., Colombo, L. (2006), *Results from monitoring of the effects of long-range transboundary air pollution in Swiss Alpine lakes and rivers 1980-2004*, in "Environmental studies", 1906, Federal Office for the Environment, Bern.

Hovind, H. (2006), *Intercomparison 0620: pH, Cond, HCO_3 , NO_3 + NO_2 , Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn*, NIVA-report SNO 5285-2006, ICPWaters report 86/2006.

Koing, K.A. et al. (1998), *Climate change as the primary cause for pH shifts in a high alpine lake*, in "Water Air Soil Pollution", 104, 167-180.

Rogora, M.; Mosello, R.; Arisci, S. (2003), *The effect of climate warming on the hydrochemistry of alpine lakes*, in "Water Air Soil Pollution", 148, 347-361.

Rogora, M.; Arisci, S.; Mosello, R. (2004), *Recent trends of temperature and precipitation in alpine and subalpine areas in North Western Italy*, in "Geografia Fisica e Dinamica del Quaternario", 27, 151-158.

Rogora, M. et al. (2006), *An overview of atmospheric deposition chemistry over the Alps: present status and long-term trends*, in "Hydrobiologia", 562, 17-40.

Rogora, M. et al. *The water chemistry of Northern Patagonian lakes and their nitrogen status in comparison with remote lakes in different regions of the globe*, in "Journal of Limnology" (in stampa).

Raddum, G.G. et al. (2004), *Recovery from acidification of invertebrate fauna in ICP Water sites in Europe and North America*, NIVA-report SNO 4864-2004, ICPWaters report 75/2004.

Wögrath, S.; Psenner, R. (1995), *Seasonal, annual and long-term variability in the water chemistry of a remote high mountain lake: acid rain versus natural change*, in "Water Air Soil Pollution", 85, 359-364.

Zobrist, J.; Drever, J.J. (1990), *Weathering processes in Alpine watersheds sensitive to acidification*, in "Proceedings of the EEC Workshop "Acidification processes in remote mountain lakes", Pallanza, 20-22 June 1989. Air Pollution Re-search Report", 20, 179-161.