Zeitschrift: Bollettino della Società ticinese di scienze naturali

Herausgeber: Società ticinese di scienze naturali

Band: 106 (2018)

Artikel: Lago Nero : monitoraggio della risposta di un ecosistema all'inquinamento atmosferico e ai cambiamenti ambientali

Autor: Pozzoni, Maurizio / Bruder, Andreas / Bulgheroni, Monica

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1002977

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Lago Nero: monitoraggio della risposta di un ecosistema all'inquinamento atmosferico e ai cambiamenti ambientali

Maurizio Pozzoni[1,3], Andreas Bruder[2,3], Monica Bulgheroni[1,3], Sebastian Pera[1,3], Cristian Scapozza[1,3], Stefano Rioggi[1,3], Mattia Domenici[1,3] e Luca Colombo[3]

[1] **Istituto scienze della Terra (IST)**
[2] **Laboratorio microbiologia applicata (LMA)**
[3] **Dipartimento ambiente costruzioni e design (DACD)**
Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI), Campus Trevano, CH-6952 Canobbio

maurizio.pozzoni@supsi.ch

Riassunto: La deposizione di inquinanti atmosferici sugli ecosistemi è un problema ambientale rilevante, soprattutto nel versante meridionale delle Alpi svizzere, che ricevono apporti considerevoli di sostanze inquinanti dalla Pianura Padana, in Italia. I bacini di alta montagna sono particolarmente sensibili agli inquinanti atmosferici, ma anche ad altri cambiamenti ambientali, tra cui i cambiamenti climatici, principalmente a causa della loro limitata capacità tampone chimica e fisica e delle loro comunità biologiche sensibili. I differenti e complessi effetti degli inquinanti atmosferici e dei cambiamenti ambientali necessitano di un monitoraggio multidisciplinare degli ecosistemi sensibili. Queste problematiche ambientali sono affrontate dal *International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems* (ICP IM). E' stato selezionato il bacino del Lago Nero (Val Bavona, Cantone Ticino) come sito ideale per rispondere a queste domande e avviato un programma di monitoraggio interdisciplinare nel 2014. Qui si presentano una panoramica e i risultati dei parametri monitorati durante i primi tre anni idrologici, per poi concentrarsi sui bilanci di azoto e zolfo. I dati raccolti suggeriscono che, in confronto ad altri siti monitorati con la stessa metodologia, l'uscita dell'azoto che si deposita nel bacino è relativamente alta, probabilmente per la debole assimilazione a causa della bassa biomassa dei produttori primari. Inoltre lo zolfo, depositato principalmente nel passato, sta venendo rilasciato in misura maggiore dal bacino, mostrando segnali di depositi passati molto rilevanti. Le conseguenze di questi bilanci sui processi e comunità biologiche saranno approfondite nel futuro del programma di monitoraggio.

Parole chiave: deposizioni atmosferiche, cambiamenti ambientali, monitoraggio ambientale, bilancio di massa, azoto, zolfo, Alpi svizzere

Lago Nero: Monitoring of integrated ecosystem responses to air pollutants and environmental changes

Abstract: The deposition of atmospheric pollutants on ecosystems is a key environmental issue, especially in the southern slopes of the Swiss Alps, which receive substantial inputs of pollutants from the Po valley, Italy. High-alpine catchments are particularly sensitive to atmospheric pollutants but also to other current environmental issues including climate change, mainly because of their often low chemical and physical buffer capacity and their sensitive biological communities. The various and complex effects of atmospheric pollutants and environmental change in general warrants an integrative monitoring of sensitive ecosystems. These environmental issues are being addressed by the *International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems* (ICP IM). The catchment of Lago Nero (Val Bavona, Cantone Ticino) was selected as an ideal site to address these questions and an interdisciplinary monitoring program was thus initiated in 2014. Here, we present an overview and results of parameters monitored during the first three hydrological years, focusing on budgets of nitrogen and sulphur. The collected data suggests that, compared to a wide range of study sites monitored with the same methods, export of deposited nitrogen from the catchment is relatively high, probably due to low assimilation due to low biomass of primary producers. Also exports of sulphur, deposited mainly in the past, are relatively high, indicative of still substantial deposits in the catchment. The consequences of these budgets on processes and biological communities should be assessed in the future of our monitoring programme.

Key words: atmospheric deposition, environmental change, environmental monitoring, mass balance, nitrogen, sulphur, Swiss Alps

INTRODUZIONE

Presentazione generale del progetto

I bacini imbriferi dei laghi sono spesso influenzati dagli inquinanti atmosferici, come i composti dell'azoto e dello zolfo, anche quando collocati in luoghi distanti delle sorgenti di questi inquinanti (Lepori & Keck, 2012). I bacini alpini sono particolarmente sensibili a queste pressioni e, pertanto, possono servire come utili indicatori o sentinelle (Psenner, 2003; Williamson *et al.*, 2009). Di conseguenza, durante gli ultimi decenni, alcuni bacini montani ed alpini in Europa e in America settentrionale sono stati utilizzati per monitorare sul lungo periodo gli effetti dell'inquinamento atmosferico (Rogora *et al.*, 2014; Ormerod & Durance, 2018).

Le Alpi svizzere, e in particolare il versante meridionale delle Alpi Lepontine (Cantone Ticino), offrono condizioni uniche per valutare gli effetti dell'inquinamento atmosferico sugli ecosistemi sensibili. In Cantone Ticino, la deposizione atmosferica d'inquinanti e i suoi effetti sulla chimica dei laghi di montagna sono stati ampiamente monitorati dagli anni '80 (Steingruber & Colombo, 2006; Colombo & Steingruber, 2010). In seguito, dal 2000, venti laghi di montagna del Cantone Ticino sono stati inclusi nella rete di monitoraggio dell'*International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of the Effects of Air Pollution on Rivers and Lakes* (ICP Waters) della Convenzione UNECE sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero di lungo raggio (CLRTAP).

Accanto a questo programma, l'Ufficio Federale dell'Ambiente ha finanziato nel 2014 uno studio pilota per valutare l'idoneità del bacino imbrifero di uno dei laghi studiati nel programma di monitoraggio ICP Waters (Lago Nero) a diventare oggetto di un monitoraggio multidisciplinare più intensivo (Bruder, 2015; Bruder *et al.*, 2016). Lo studio pilota è andato a buon fine e il bacino imbrifero del Lago Nero è entrato a far parte della rete di monitoraggio dell'*International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems (ICP IM)*, anch'essa parte del CLRTAP (Bruder *et al.*, 2016). Gli obiettivi principali di questo programma sono (Kleemola & Forsius, 2017):

- studiare lo stato biologico, chimico e fisico di bacini imbriferi sul lungo periodo e fornire una spiegazione dei cambiamenti legati a fattori ambientali, quali inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici;
- sviluppare e validare modelli predittivi per riuscire a fornire le basi per valutazioni regionali.

Si tratta dell'unico bacino imbrifero svizzero incluso in questa rete europea che, attualmente, consta di 45 siti in 16 nazioni (Fig. 1).

Sito di studio

Il bacino imbrifero del Lago Nero è stato selezionato principalmente per i motivi seguenti:

- impatti antropici molto ridotti all'interno del bacino e nelle vicinanze;
- inclusione all'interno del programma di monitoraggio ICP Waters con dati disponibili a partire dal 2000 sulla chimica delle acque del lago (Steingruber & Colombo, 2006);

Figura 1: Localizzazione di tutti i siti della rete di monitoraggio ICP IM. In nero quelli con dati aggiornati a oggi, in grigio quelli con dati più vecchi (Kleemola & Forsius, 2017).

- corso d'acqua a carattere permanente nel punto di chiusura del bacino;
- presenza di una stazione di monitoraggio climatico e di una delle deposizioni in un punto molto vicino al bacino imbrifero (Fig. 2; Meteosvizzera, 2016a).

Il bacino del Lago Nero si trova in alta Val Bavona (Cantone Ticino), presenta un'esposizione a sud-ovest, con un'altezza che va dai 2'385 m slm. ai 2'842 m slm. del Pizzo del Ghiacciaio di Sasso Nero, e una superficie di circa 0.77 km^2. Il bacino è costituito in prevalenza da rocce gneissiche, alternate a lenti di metacarbonato ed anfibolite, con macchie di vegetazione erbosa e suoli poco profondi, che sono coperti dalla neve approssimativamente da novembre a giugno. Per un periodo simile, il lago è coperto di ghiaccio. La pendenza media del bacino è estremamente elevata (84%). Il Lago Nero è oligotrofo, ha una superficie di 0.13 km^2 (17% dell'area totale) e una profondità massima di circa 73 m. Nella porzione più elevata del bacino sono presenti alcuni piccoli glacionevati semipermanenti e un ghiacciaio roccioso intatto (Scapozza *et al.*, 2017).

MATERIALI E METODI

Il programma di monitoraggio

Il programma dello studio si compone di numerose tipologie di monitoraggio (chiamate sotto-programmi), con frequenze e modalità differenti, che cercano di coprire tutte le componenti del ciclo dell'acqua e delle sostanze inquinanti trasportate, in modo da tentare di comprendere la risposta dell'ecosistema acquatico e terrestre a queste sollecitazioni. Alcuni parametri sono obbligatori, altri opzionali, altri ancora non sono richiesti dagli standard di monitoraggio dell'ICP IM (Finnish Environment Institute, 1998) ma sono stati

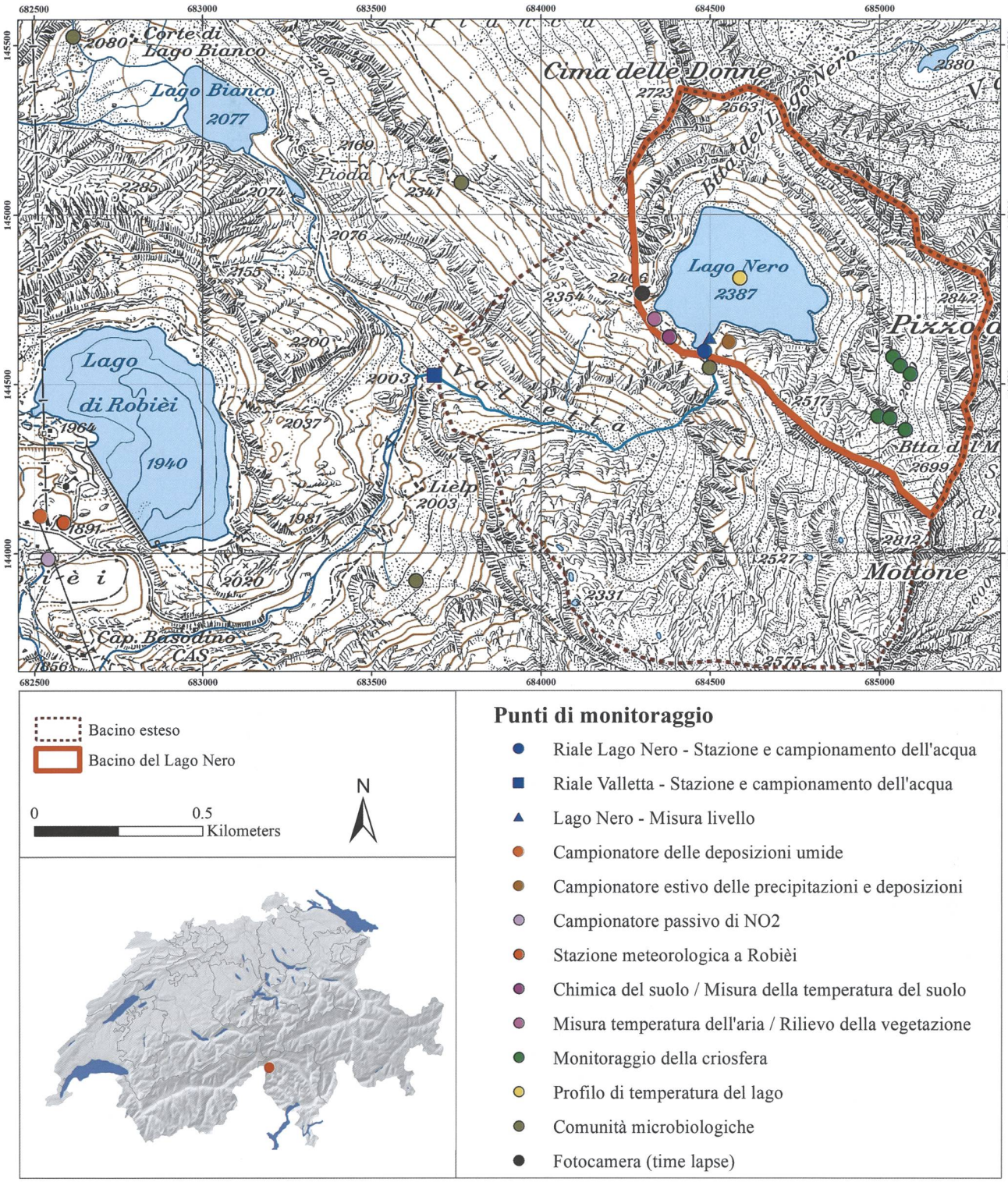

Figura 2: Il bacino imbrifero del Lago Nero e quello esteso, con i punti di monitoraggio attivi attualmente nella zona.

implementati per comprendere meglio le caratteristiche del particolare ecosistema di alta montagna che si è scelto di monitorare (Tab. 1).

Poiché si tratta di un bacino situato sopra al limite del bosco, tutti i parametri legati all'ecosistema forestale, richiesti dall'ICP IM, non sono rilevanti. Inoltre, la ridotta accessibilità dell'area, se da un lato è un vantaggio per l'assenza di impatti antropici di rilievo, dall'altro limita la possibilità di raccolta di alcuni parametri al solo periodo libero dalla neve, che negli ultimi anni è stato da giugno a ottobre/novembre.

Le stazioni di misura non sono sempre ubicate all'interno del bacino imbrifero oggetto dello studio (Fig. 2): per alcuni parametri si sfruttano i seguenti strumenti già esistenti a Robièi (Meteosvizzera, 2012):

- stazione automatica SwissMetNet di Meteosvizzera (Meteosvizzera, 2016), con dati a partire dal 1991;
- campionatore passivo di diossido di azoto (NO_2), con dati a partire dal 2014, gestito dall'Ufficio dell'aria, del clima e delle energie rinnovabili (UACER) del Cantone Ticino;
- campionatore settimanale delle deposizioni umide con dati a partire dal 1996, gestito da UACER (Steingruber, 2015).

Tabella 1: Nome e frequenza dei sotto-programmi di monitoraggio attualmente operativi nel bacino del Lago Nero e a Robièi. Per la localizzazione, si veda la Fig. 2.

Sotto-programmi obbligatori	**Frequenza di campionamento**	**Sorgente dei dati**
Meteorologia	Continua	MeteoSvizzera
Chimica dell'aria	Mensile	Cantone Ticino
Chimica delle precipitazioni	Settimanale	Cantone Ticino
Proprietà chimico-fisiche delle acque superficiali (Riale Lago Nero)	Continua/Mensile	SUPSI
Chimica del suolo	Quinquennale	SUPSI
Chimica delle acque del suolo	Mensile (durante il periodo senza neve)	SUPSI
Rilievo della vegetazione	Quinquennale	SUPSI
Sotto-programmi opzionali		
Proprietà fisico-chimiche del lago	3 volte all'anno (durante il periodo senza ghiaccio)	Cantone Ticino
Comunità di invertebrati nel Riale Lago Nero	Triennale	SUPSI
Altri sotto-programmi		
Criosfera (ghiaccio e permafrost)	Continua / Campionamenti estivi	SUPSI
Comunità microbiologiche	Triennale	SUPSI
Altezza e profilo di temperatura del lago	Continua	SUPSI
Fotocamera time lapse	Continua	SUPSI
Proprietà fisico-chimiche del Bacino esteso	Continua/3 volte all'anno (durante il periodo senza neve)	SUPSI

Tabella 2: Riepilogo dei parametri monitorati nel Riale Lago Nero, con frequenza e periodo di disponibilità dei dati.

Parametro	**Frequenza di campionamento**	**Disponibilità dati**
Portata	10 min	2014-2017
Temperatura dell'acqua	10 min	2014-2017
Conducibilità elettrica	10 min / mensile	2014-2017
pH	Mensile	2014-2017
Fosfati and fosforo totale	Mensile	2014-2017
Alcalinità	Mensile	2014-2017
Nitrati, Nitriti, Ammonio, Azoto totale	Mensile	2014-2017
Solfati	Mensile	2014-2017
Altri cationi e anioni maggiori	Mensile	2016-2017

Tabella 3: Riepilogo dei principali dati climatici misurati a Robièi (dati Meteosvizzera).

	Norma	**Anno idrologico**		
Valori annuali a Robièi	**1981-2010**	**2014-2015**	**2015-2016**	**2016-2017**
Precipitazioni [mm]	2'420	3'082	2'031	2'313
Differenza dalla norma [%]		127%	84%	96%
Temperatura aria a 2 m [°C]	3.1	4.6	4.5	4.4
Differenza dalla norma [°C]		1.5	1.4	1.3
Velocità del vento [m/s]	1.7	2.2	2.0	2.1
Differenza dalla norma [%]		130%	120%	123%
Ore di sole [h]	1'478	1'477	1'500	1'584
Differenza dalla norma [%]		100%	102%	107%
Giorni con neve al suolo	-	202	141	194
Periodo		5.11.2014/26.5.2015	4.1.2016/24.5.2016	7.11.2016/2.5.2017

Questi punti di misura si trovano a una quota di circa 500 metri inferiore rispetto a quella del bacino del Lago Nero. Per verificare l'estendibilità di alcuni dei parametri misurati a Robièi (Bruder *et al.*, 2016), sono stati installati sensori, nelle vicinanze del Lago Nero, per misurare la temperatura dell'aria e del suolo a differenti profondità e un campionatore delle precipitazioni nel periodo estivo (Fig. 2). I sensori di temperatura hanno fornito buone corrispondenze rispetto ai dati di Robièi e consentiranno di stimare un gradiente altimetrico di temperatura specifico per la zona in esame.

L'unico deflusso conosciuto nel bacino del Lago Nero è il Riale Lago Nero. La stazione di monitoraggio e campionamento è di fondamentale importanza per la valutazione dei carichi di inquinanti in uscita ed è stata installata 10 m a valle del lago: è dotata di due sonde automatiche che registrano in continuo temperatura, conducibilità elettrica e pressione dalla fine dell'estate 2014 in avanti. Nel medesimo punto sono raccolti campioni di acqua per analisi chimiche a intervalli regolari, con frequenza inferiore al mese durante il periodo senza neve e circa ogni due mesi nel resto dell'anno.

Nella stazione di monitoraggio è stato possibile calibrare una scala delle portate, grazie ad alcune misure periodiche con un profilatore magnetico delle velocità. Di conseguenza è possibile stimare il coefficiente di deflusso, ottenuto come il rapporto tra il deflusso totale all'emissario e la precipitazione annua a Robièi, moltiplicata per l'area del bacino imbrifero del Lago Nero.

Utilizzando i dati di deflusso, i risultati delle analisi chimiche di laboratorio sui campioni prelevati, i dati delle precipitazioni e delle deposizioni, è quindi possibile effettuare un bilancio idrico e delle principali sostanze inquinanti. Le due sostanze su cui ci si focalizza in questo contributo sono l'azoto inorganico totale (TIN; presente nelle deposizioni totali e nel Riale Lago Nero principalmente sotto forma di NO_3^- + NH_4^+) e zolfo (presente come SO_4). Per i bilanci di queste due sostanze (Tab. 5) sono state utilizzate le misure della quantità di precipitazioni (MeteoSvizzera, 2016) e della loro chimica (UACER) a Robièi, mentre le stime delle portate in uscita e della loro chimica sono state ottenute dal deflusso del Riale Lago Nero. Il contributo delle deposizioni secche è trascurabile, pari a circa il 5% del totale per l'azoto e inferiore all'1% per lo zolfo (Bruder *et al.*, 2015).

La quantità di deposizione di azoto (TIN) e zolfo è stata calcolata moltiplicando la quantità di precipitazione giornaliera con la corrispondente concentrazione, stimata con misure settimanali ed estrapolata all'area del bacino imbrifero del Lago Nero. Per confermare la validità dell'estrapolazione dei dati di deposizione da Robièi al bacino del Lago Nero, è stato installato un campionatore delle precipitazioni (Fig. 2), usato solo nel periodo estivo con frequenza di campionamento mensile.

L'uscita dal bacino (calcolata sempre come TIN) è stata stimata moltiplicando la portata media giornaliera misurata per le concentrazioni giornaliere, calcolate dalle concentrazioni mensili tramite un'interpolazione spline cubica. Le stime dei bilanci dell'azoto si limitano a NO_3^- e NH_4^+, non includendo l'azoto totale perché queste analisi hanno una migliore qualità rispetto a quella dell'azoto totale. Quest'approccio è giustificabile per la ridotta biomassa degli organismi planctonici, che, invece, in laghi più produttivi può contribuire a valori dell'azoto totale relativamente alti.

In aggiunta alla stazione principale, si è deciso di monitorare il bacino esteso (chiamato Riale Valletta) che comprende tutto il bacino imbrifero fino alla confluenza con il Fiume Bavona a un'altitudine di circa 2'010 m slm. (Fig. 2). Il bacino esteso ha una superficie totale di circa 1.9 km^2 ed è più esposto a nord rispetto al bacino del Lago Nero. Il monitoraggio fisico-chimico del Riale Valletta può fornire informazioni integrative poiché la porzione inferiore del bacino imbrifero è influenzata dal lago in misura molto minore, il che può comportare sostanziali differenze nei parametri chimici. L'accesso alla stazione di campionamento del Riale Valletta in inverno è però impossibile; di conseguenza, si realizza il monitoraggio continuo con una sonda di temperatura, conducibilità elettrica e pressione, mentre i campionamenti sono limitati ai periodi di accessibilità in sicurezza dell'area. Il secondo limite delle misurazioni sul Riale Valletta riguarda la scarsa affidabilità della scala delle portate, problema difficilmente risolvibile a causa dell'alveo torrentizio molto irregolare.

Gli altri sotto-programmi obbligatori del monitoraggio integrato prevedono una frequenza di campionamento inferiore rispetto ai precedenti e sono stati implementati nel 2017: riguardano il campionamento e le analisi chimiche delle soluzioni acquose circolanti nello strato superiore di suolo, il rilievo della vegetazione e il censimento delle comunità di invertebrati nel Riale Lago Nero.

Oltre ai sottoprogrammi ICP IM, sono stati raccolti dati di parametri che migliorano la comprensione delle conseguenze dei cambiamenti ambientali sull'ecosistema in esame. Questi parametri supportano l'interpretazione dei risultati da sottoprogrammi obbligatori e la loro estrapolazione all'intero ecosistema.

Ad esempio le immagini di una fotocamera time-lapse, installata nell'autunno del 2015, sono state utilizzate per stimare i giorni con superficie del lago ghiacciata e una visione generale delle condizioni della zona nei vari periodi dell'anno.

Trattandosi di un bacino a quote elevate, la criosfera ha un ruolo molto rilevante (Scapozza *et al.*, 2018). Il bacino del Lago Nero contiene un ghiacciaio roccioso intatto e alcuni piccoli glacionevati semi-permanenti (*ice patches*) sui pendii più elevati. A partire da ottobre 2015, sono stati quindi installati tre sensori per il monitoraggio della temperatura della superficie del suolo nel ghiacciaio roccioso (GSTM, Fig. 2), a cui si è aggiunto il campionamento manuale e la misura della temperatura dell'acqua di una sorgente nei suoi pressi. Tre nuovi sensori GSTM sono stati installati tra i glacionevati a valle della Bocchetta del Mottone ad agosto e ottobre 2017.

RISULTATI E INTERPRETAZIONE

Si presentano in Tab. 3 i principali parametri climatici misurati a Robièi, confrontati con la norma climatica 1981-2010.

I primi tre anni idrologici di monitoraggio nel bacino del Lago Nero hanno mostrato una forte variabilità delle precipitazioni (e di conseguenza della coltre nevosa) da un anno all'altro. Mentre il 2014-2015 ha avuto una pluviometria molto superiore alla media (3'082 mm, secondo valore più alto dall'inizio delle misurazioni a Robièi nel 1991), i due anni successivi sono stati caratterizzati da una pluviometria di poco inferiore alla media, con valori pari a 2'031 e 2'313 mm rispettivamente (Meteosvizzera, 2016b; Meteosvizzera, 2017; Meteosvizzera, 2018). In ogni anno la temperatura media dell'aria è stata ben superiore al valore di riferimento (+1.3/1.5°C), pur non rappresentando gli anni più caldi dall'inizio delle misurazioni a Robièi. La temperatura media nella parte più bassa del bacino del Lago Nero è stata inferiore di poco più di 2°C rispetto a quella di Robièi, che porta a stimare (anche se sulla base di soli due anni di misurazioni concomitanti) un gradiente altimetrico di temperatura specifico per l'area di 0.4°C/100 m, leggermente inferiore rispetto al gradiente di 0.5°C/100 m stimato per le stazioni meteo ticinesi (Scapozza *et al.*, 2016).

I parametri misurati al Lago Nero (Tab. 4) riguardano le temperature dell'aria, mentre i giorni con neve al suolo sono stati stimati allo stesso modo utilizzando i dati di GSTM misurati in prossimità del Lago e sul ghiacciaio roccioso (Fig. 2). La parte centrale della Tab. 4 illustra i dati rilevati nel Riale Lago Nero durante i tre anni di monitoraggio continuo, mentre la parte inferiore presenta i principali parametri chimici derivati dai campionamenti periodici. Le portate medie giornaliere del Riale Lago Nero per tutto il periodo di misurazione sono invece presentate in Fig. 3A. Anche per i principali parametri chimici campionati si presentano i dati medi mensili per i tre anni idrologici (Fig. 3D-G).

La portata media annua nel Riale Lago Nero è strettamente correlata alla pluviometria dell'anno. In realtà, il calcolo del coefficiente di deflusso ha mostrato un valore anomalo per l'anno idrologico 2016-2017. Al momento non si hanno sufficienti informazioni sul comportamento idrologico del lago e del Riale per capire i motivi di questo valore molto basso, anche se è probabile che sia legato a una leggera modifica della sezione trasversale dove si registrano i dati che ha portato ad un cambiamento nella scala delle portate. Ulteriori verifiche nel corso dell'estate 2018 cercheranno di approfondire questo aspetto critico, che può influenzare fortemente anche la valutazione dei bilanci di azoto e zolfo.

A livello mensile il deflusso avviene soprattutto nei periodi di fusione nella neve: da maggio a inizio luglio si ha più del 50% del deflusso totale annuo (Fig. 3C). Per questo motivo, un incremento della frequenza dei campionamenti in questo trimestre è pienamente giustificato e può consentire una migliore comprensione dei meccanismi di rilascio degli inquinanti accumulati nella coltre nevosa. Questo aspetto è stato affrontato con l'installazione di un campionatore automatico nel Riale Lago Nero nella fase di fusione nivale (dati non mostrati). Tale concentrazione del deflusso è percentualmente maggiore in anni con precipitazioni inferiori alla media (2015-2016, 2016-2017).

La temperatura media annua del Riale Lago Nero (Tab. 4) non è in correlazione diretta con la temperatura dell'aria, ma dipende probabilmente dalla temperatura dell'aria nel periodo libero dalla neve (da giugno a ottobre o novembre) e dalla data di fusione della coper-

Tabella 4: Riepilogo dei valori annuali di alcuni parametri per il bacino del Lago Nero (parte superiore), delle variabili misurate dalla sonda in continuo nel Riale Lago Nero (parte centrale) e dei campionamenti manuali effettuati nel medesimo punto (parte inferiore).

	Anno idrologico		
Valori annuali nel bacino del Lago Nero	**2014-2015**	**2015-2016**	**2016-2017**
Temperatura aria a 2 m [°C]	-	2.4	2.2
Giorni con neve al suolo (quota 2'400 m slm)	-	174	223
Periodo	-	2.1.2016/24.6.2016	3.11.2016/14.6.2017
Giorni con neve al suolo (ghiacciaio roccioso)	-	198	232
Periodo	-	4.1.2016/20.7.2016	12.11.16/2.7.2017
Giorni con superficie del lago ghiacciata	-	231	219
Periodo	-	23.11.2015/11.7.2016	14.11.16/21.6.2017
Portata Riale Lago nero [l/s]	57.5	41.5	32.0
Coefficiente di deflusso [%]	76%	84%	57%
Temperatura Riale Lago Nero [°C]	3.1	3.3	3.6
Conducibilità Riale Lago Nero [µS/cm]	-	18.7	17.7
Conducibilità Riale Lago Nero [µS/cm]	15.1	17.8	16.3
pH [-]	6.7	6.9	6.8
Alcalinità [mmol/l]	0.15	0.15	0.15
Azoto (TIN) [mg N/l]	0.17	0.16	0.15
Zolfo [mg S/l]	0.70	0.86	0.82

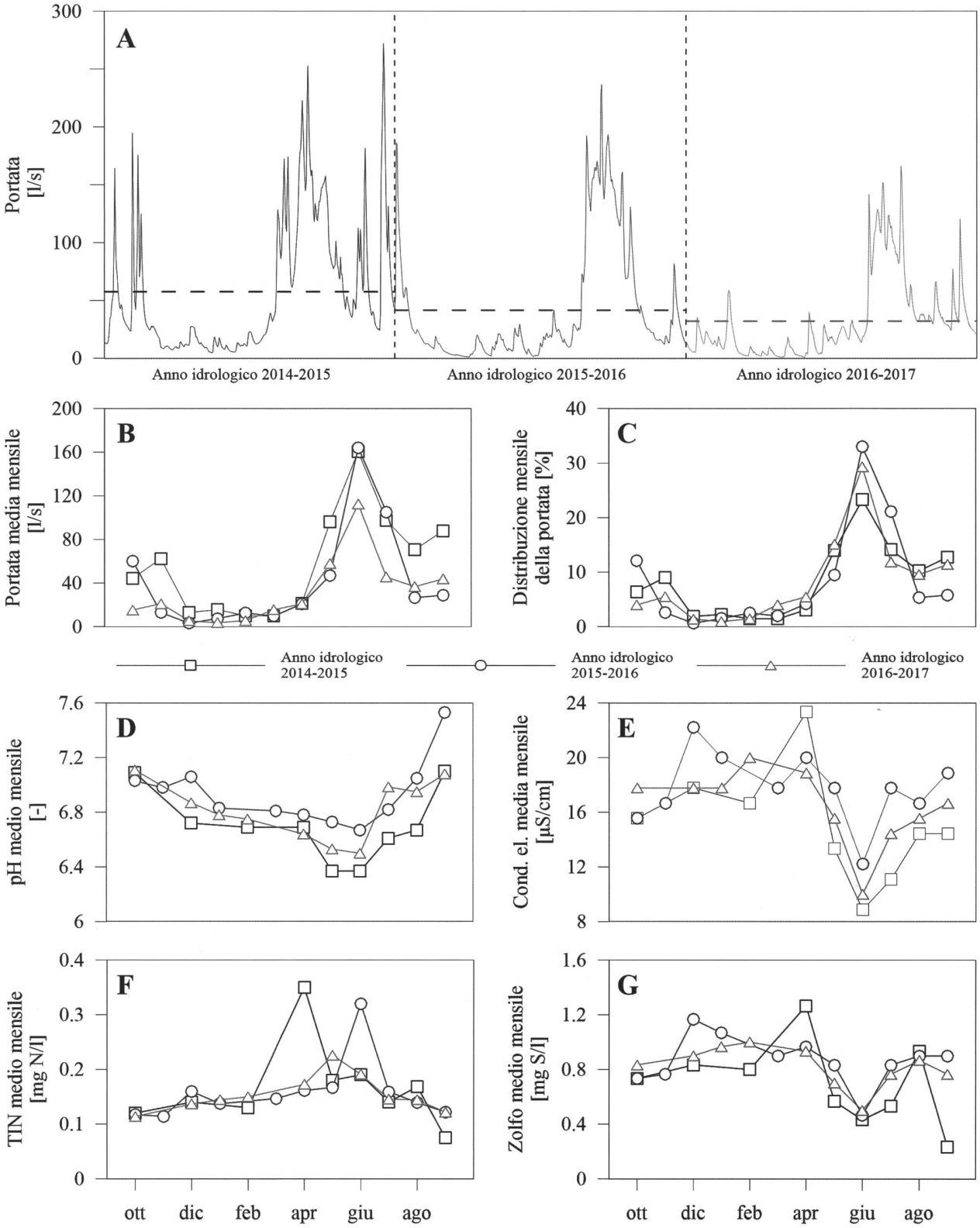

Figura 3: Valori misurati per i tre anni idrologici all'emissario del Lago Nero. A) Portate medie giornaliere (linee continue) e annuali (linee tratteggiate). B) Portate medie mensili. C) Distribuzione percentuale delle portate medie mensili. D) pH medio mensile. E) Conducibilità elettrica media mensile. F) Azoto (TIN) medio mensile. G) Zolfo medio mensile.

tura di ghiaccio sulla superficie del lago. Attualmente si hanno troppi pochi dati a disposizione per tentare di stimare una correlazione.

La conducibilità elettrica ha mostrato un andamento caratteristico sui tre anni di misura: rimane costante tra 15 e 20 µS/cm per quasi tutto l'anno, mentre diminuisce durante la fase di fusione nivale, con una decremento più marcato quando la coltre nevosa è maggiore (Fig. 3E), in accordo con quanto mostrato da Rogora *et al.* (2014). Il valore minimo sembra corrispondere al momento di fusione più intenso della neve e precede di circa 7-10 giorni la scomparsa completa del ghiaccio dal lago. Anche il pH ha lo stesso comportamento (Fig. 3D), con valori costanti durante l'anno e tanto più inferiori nella fase di disgelo quanta più neve è presente nel bacino.

La percentuale di output (percent net export; PNE) dal bacino imbrifero è stata calcolata come (Tab. 5):

$$PNE = (Uscita - Deposizioni) / Deposizioni \times 100$$

Valori positivi di PNE indicano quindi una fuoriuscita di inquinanti dal bacino superiore alle deposizioni, viceversa per valori negativi si ha un immagazzinamento all'interno del bacino.

La deposizione totale di TIN nel bacino del Riale Lago Nero (dedotta unicamente dal campionatore di deposizione di Robièi) è indicata nella Tab. 5 e varia tra 1'122 kg all'anno (14.6 kg/ha · anno) e 1'516 kg all'anno (19.7 kg/ha · anno) il che è notevolmente superiore all'output (compreso tra 169 e 301 kg). La deposizione totale di zolfo nell'intero bacino varia tra 307 kg (4.0 kg/ha · anno) e 466 kg (6.1 kg/ha · anno). Contrariamente al TIN, l'output di zolfo è molto più elevato dell'input e varia tra 740 e 1'298 kg all'anno.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

L'effetto della fusione nivale sul deflusso è ugualmente rilevante per i flussi di TIN (Fig. 4A) e di zolfo (Fig. 4B) del bacino del Lago Nero. Il periodo di fusione nivale (compresi i principali eventi piovosi di questo periodo) è responsabile di ca. 50% dell'output annuale di entrambe le sostanze chimiche. Per l'azoto, questo effetto è amplificato dalle elevate concentrazioni all'inizio del periodo di fusione nivale, che indicano una mobilizzazione dell'azoto immagazzinato nella neve (Fig. 3F). Nel periodo 2014-2015, anche i dati dello zolfo indicano un aumento delle concentrazioni all'inizio del periodo di fusione nivale (Fig. 3G), tuttavia tale fenomeno non si è riproposto nei prelievi degli anni successivi. Con i soli tre anni di dati a disposizione non è possibile comprendere a fondo quest'aspetto legato all'incremento di concentrazione durante la fusione nivale. L'intensificazione dei campionamenti in questo periodo dell'anno e il proseguimento del monitoraggio consentiranno un'interpretazione più approfondita. È interessante notare che, in tutti gli anni monitorati, dopo il primissimo periodo di fusione nivale, le concentrazioni di zolfo si dimezzano nella fase più intensa di fusione rispetto alle medie annuali (Fig. 3G) probabilmente a causa di effetti di diluzione con i deflussi alti durante la fusione nivale più intensiva (Fig. 3C e 3G). Al contrario, i flussi di input di entrambe le sostanze chimiche sono distribuiti in modo uniforme durante gli anni idrologici e sono dominati da importanti eventi di precipitazione.

Le quantità di precipitazioni (Tab. 3) spiegano la maggior parte delle differenze nelle deposizioni da un anno all'altro, con input di TIN e zolfo sostanzialmente più elevati durante gli anni piovosi in confronto agli anni più asciutti (Tab. 5). Tuttavia, questo comportamento è differente per le variazioni degli output da un anno all'altro: nonostante le maggiori precipitazioni, gli output di entrambe le sostanze chimiche sono inferiori nel 2016/2017 rispetto al 2015/2016 (Fig. 4), diretta conseguenza delle portate più basse rilevate durante l'anno idrologico 2016/2017. Le differenze tra input e output possono avere diverse cause: si possono spiegare dalla differenza nella distribuzione delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione nel corso degli anni idrologici, influenzando quindi anche i processi di lisciviazione di queste sostanze nei suoli, ma anche dalla differenza nelle precipitazioni tra Robièi e il Lago Nero. Le misure della quantità di precipitazioni e della chimica delle acque eseguite nel bacino del Lago Nero durante l'estate indicano che alcuni eventi meteorologici possono portare a differenze tra le stime calcolate in base alle misurazioni al Lago Nero e quelle in base alla stazione meteo e delle deposizioni di Robièi (Bruder *et al.*, 2017). Queste disuguaglianze sono probabilmente una conseguenza delle differenze meteorologiche ma anche metodologiche (frequenza di campionamento settimanale a Robièi e mensile al Lago Nero e trattamento dei campioni). Si tratta di un ulteriore aspetto che sarà rivalutato criticamente non appena si avranno a disposizione più dati.

La percentuale netta di export (PNE) è molto diversa tra TIN e zolfo, mentre per ciascuna sostanza non va-

Tabella. 5: Bilanci chimici per il bacino del lago Nero

		Anno idrologico 2014-2015	2015-2016	2016-2017
Azoto (TIN)	Input (kg)	1'516	1'122	1'340
	Output (kg)	301	266	169
	PNE (%)	-80.1	-76.4	-87.4
Zolfo	Input (kg)	466	307	339
	Output (kg)	1'298	936	740.0
	PNE (%)	178.6	204.3	118.0

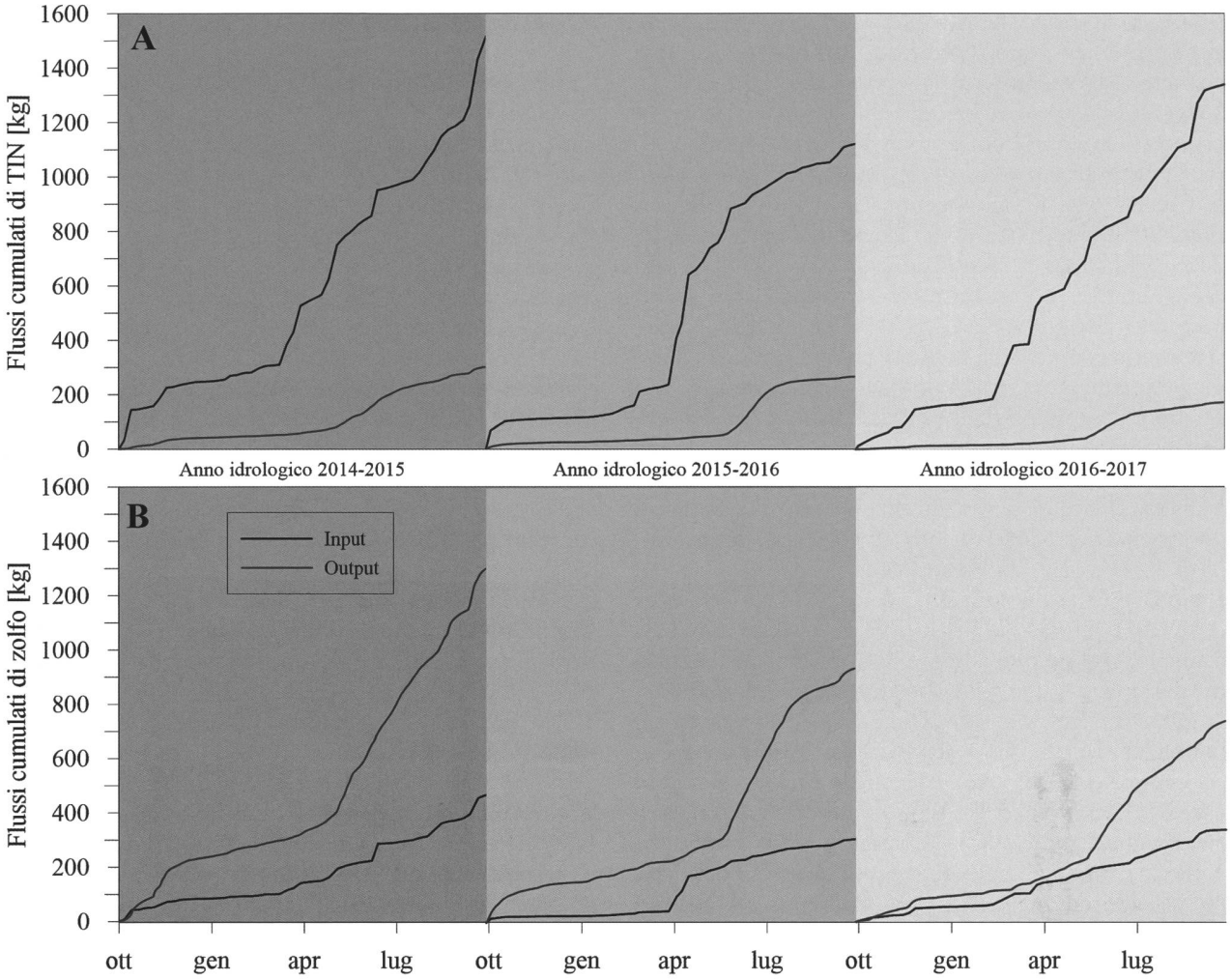

Figura 4: Bilanci cumulativi di TIN (A) e zolfo (B) per i tre anni idrologici.

ria sostanzialmente da un anno all'altro. La PNE per il TIN varia da -87.4 a -76.4 (Tab. 5), il che indica che la maggior parte dell'azoto depositato è trattenuto nel bacino. Le stime della PNE annuale di zolfo risultano tra 118.0 e 204.3 %. Un recente studio a larga scala, basato sui bilanci di TIN e zolfo di 17 siti in tutta Europa, monitorati secondo i metodi standardizzarti dell'ICP IM (Vuorenmaa *et al.*, 2017), conferma le nostre stime, sebbene la maggior parte dei siti considerati nel lavoro siano situati in bacini con elevata percentuale di copertura forestale e non tutti includano laghi.

Le medie dei PNE stimati per il TIN riportati da questo studio variano tra -98 e -80%; i valori stimati nel bacino del Lago Nero (Tab. 5) si situano quindi nella parte più elevata del loro range. Questo può essere la conseguenza di due principali fenomeni: in primo luogo è stato dimostrato che la PNE è correlata alla quantità di deposizione, cioè i bacini che ricevono più input di azoto sono anche più vicini alla saturazione e quindi più inclini a osservare output elevati. In secondo luogo, data la mancanza di foreste e l'altitudine elevata del bacino del Lago Nero (periodo molto esteso di copertura nevosa e di congelamento del suolo), l'attività biologica e quindi i tassi di assimilazione sono probabilmente inferiori rispetto a gran parte di quelli trattati dallo studio citato. L'attività biologica può influenzare la PNE attraverso l'assimilazione di NO_3^- nella biomassa dei produttori primari terrestri e acquatici (Fig. 5). In base

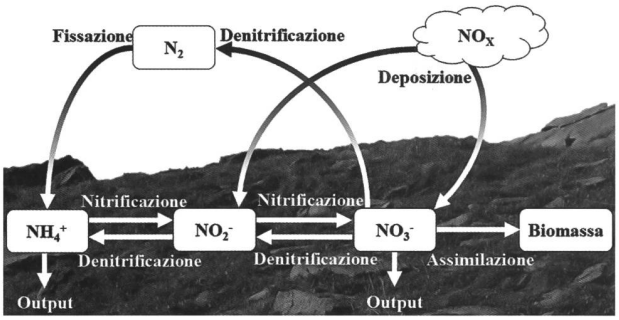

Figura 5: Ciclo dell'azoto nelle sue forme diverse nei suoli del bacino imbrifero del Lago Nero con i principali processi. Lo stesso ciclo esiste egualmente nelle zone acquatiche del bacino.

a questa argomentazione, alti valori di PNE possono indicare una debole attività o biomassa di questi organismi, aspetto che sarebbe comunque da approfondire con misure ed analisi specifiche.

Anche le stime di PNE per lo zolfo (Tab. 5) sono relativamente elevate rispetto a quelle riportate da Vuorenmaa *et al.* (2017), che variano tra -20 e 190%. Ci si aspetta che le PNE di zolfo siano relativamente elevate e sostanzialmente superiori al 100% a causa degli effetti di rilascio di questa sostanza depositata in passato nelle regioni vicine a importanti fonti antropogeniche di zolfo (traffico automobilistico e industria). Durante i picchi di deposizione di zolfo avvenuti tra il 1965 e il 1980, Vuorenmaa *et al.* (2017) stimano che le de-

posizioni atmosferiche di zolfo nelle zone vicine a regioni fortemente industrializzate dell'Europa centrale e orientale possano aver raggiunto valori superiori a 30 kg/ha·anno, valori paragonabili a quelli riscontrati nelle valli inferiori del Cantone Ticino nello stesso periodo (Steingruber *et al.*, 2015), diminuendo poi sostanzialmente negli ultimi decenni sia in Europa (Schulz *et al.*, 2013) che in Cantone Ticino (Steingruber *et al.*, 2015). Tuttavia, la deposizione nel bacino del Lago Nero fu molto probabilmente più bassa durante questo periodo (Steingruber *et al.*, 2015). Le indagini future si concentreranno sulla migliore comprensione dell'immagazzinamento e rilascio di queste due sostanze.

Durante l'accumulo di ghiaccio, i glacionevati e il permafrost possono incorporare e immagazzinare notevoli quantità di inquinanti atmosferici. Nella fase di fusione, le analisi effettuate finora hanno mostrato che da questi corpi gelati si possono liberare acque con concentrazioni di azoto e zolfo molto superiori rispetto a quelle del Riale Lago Nero e della superficie del Lago (Scapozza *et al.*, 2017, Thies *et al.*, 2013). Di conseguenza, la loro acqua di fusione può alterare la composizione chimica dei corpi idrici superficiali riceventi, con una potenziale influenza rilevante sui bilanci di queste sostanze (in particolare lo zolfo). La deposizione, la ritenzione e la concentrazione dello zolfo, dell'azoto e di altre sostanze chimiche nei suoli e nelle acque controllano – fra gli altri parametri ambientali – la biomassa e la composizione delle comunità degli organismi nel bacino del Lago Nero. Per esempio, questi parametri ambientali possono influenzare le comunità di piante terresti sui terreni poco profondi situati a sud-ovest del lago che sono monitorate come parte del programma in corso (Fig. 2). Un rilevamento condotto durante il periodo di massima fioritura dell'ultimo anno (cioè luglio 2017) indica un'elevata abbondanza relativa di piante erbacee *Carex curvula* (Cyperaceae) e *Homogyne alpine* (Asteraceae) che sono idonee a suoli relativamente acidi e poveri in nutrienti (Landolt *et al.*, 2010). Questi risultati indicano una risposta lenta della comunità delle piante erbacee o dei suoli ai bilanci di zolfo e azoto attuali.

In futuro, il programma di monitoraggio avviato nel 2014 cercherà di fornire informazioni sui trend degli impatti antropogenici e dei cambiamenti ambientali sui processi chimico-fisici dei principali comparti del bacino del Lago Nero (ad esempio nei bilanci chimici; Vuorenmaa *et al.*, 2017) e come questi influenzano i vari ecosistemi e gli organismi. Tali informazioni dipendono da programmi di monitoraggio a lungo termine per quantificare i trend oltre alla variabilità inter-annuale stocastica (Vuorenmaa *et al.*, 2017), esemplificata della quantità di precipitazione nel periodo coperto dallo studio (Tab. 3). Le conseguenze dei cambiamenti ambientali aiuteranno quindi a valutare e adattare le misure di mitigazione per gli ecosistemi alpini. Il Lago Nero in particolare è un punto di osservazione cruciale poiché gli ecosistemi dei laghi alpini e i loro bacini sono raramente monitorati in modo intensivo e multidisciplinare.

RINGRAZIAMENTI

I primi tre anni di monitoraggio del bacino del Lago Nero sono stati possibili grazie al finanziamento da parte della Sezione qualità dell'aria dell'Ufficio Federale dell'Ambiente, con la collaborazione di Gaston Theis-Goldener, Reto Meier e Beat Achermann di questa sezione. Un ringraziamento particolare a Sandra Steingruber per le interessanti discussioni e la fornitura dei dati pregressi nella zona, a Meteosvizzera per la fornitura dei dati della stazione meteorologica di Robièi, al Laboratorio cantonale ed EAWAG per le analisi chimiche dei campioni e a Maddalena & associati sagl. per il rilevamento della vegetazione. Si ringrazia, inoltre, OFIMA SA, Heli Rezia AG ed Eliticino Tarmac SA per il supporto logistico, e i colleghi ed ex-colleghi dell'Istituto scienze della Terra che hanno fornito un contributo alla buona riuscita del monitoraggio: Simona Bronzini, Gabriele Consoli, Fabio Lepori, Vasco Lepori, Filippo Schenker, Alessio Spataro e Valentina Togni. Infine un ringraziamento particolare a Michela Rogora per la rilettura del documento.

BIBLIOGRAFIA

Bruder A., Lepori F., Pozzoni M., Pera S., Rioggi S., Scapozza C., Domenici M. & Colombo L. 2015. Monitoring of integrated ecosystem responses to air pollutants in the Swiss Alps, Swiss contribution to ICP Integrated Monitoring (UNECE/CLRTAP). Final report of the pilot study.

Bruder A., Lepori F., Pozzoni M., Pera S., Rioggi S., Scapozza C., Domenici M. & Colombo L. 2016. Lago Nero – a new site to assess the effects of environmental change on high-alpine lakes and their catchments. ICP IM 25th Annual Report 2016. Reports of the Finnish Environment Institute, 29: 52-56. [http://repository.supsi.ch/7706]

Bruder A., Pozzoni M., Pera S., Rioggi S., Scapozza C., Domenici M. & Colombo L.2017. Monitoring of integrated ecosystem responses to air pollutants in the Swiss Alps. Swiss contribution to ICP Integrated Monitoring (UNECE/CLRTAP). Interim report 2017.

Colombo L. & Steingruber S. 2010. Acidifying Deposition in Southern Switzerland. Assessment of the trend 1988-2007. Technical Report. Federal Office for the Environnment, FOEN, Bern. Disponibile in https://www4.ti.ch/fileadmin/DT/temi/aria/monitoraggio/UW_1015_E.pdf (ultima consultazione 23.2.2018).

Finnish Environment Institute 1998. Manual for Integrated Monitoring. ICP IM Programme Centre, Helsinki, Finland. Disponibile in http://www.syke.fi/en-US/Research__Development/Ecosystem_services/Monitoring/Integrated_Monitoring/Manual_for_Integrated_Monitoring (ultima consultazione 23.2.2018).

Kleemola S. & Forsius M. 2017. ICP IM 26th Annual Report 2017. Reports of the Finnish Environment Institute, 24: 43-49. Disponibile in http://hdl.handle.net/10138/212199 (ultima consultazione 23.2.2018).

Landolt E., Bäumler, B., Erhardt, A., Hegg, O., Klötzli, F., Lämmler, F., Nobis, M., Rudmann-Maurer, K., Schweingruber, F. H., Theurillat, J.-P., Urmi, E., Vust, M., Wolgemuth, T. 2010. Flora indicativa. Haupt Verlag, Bern.

Lepori F & Keck F. 2012. Effects of atmospheric nitrogen deposition on remote freshwater ecosystems. Ambio, 41, 235-246.

MeteoSvizzera 2012. Rapporto sul clima – Cantone Ticino, rapporto di lavoro di Meteosvizzera, p. 63. Disponibile in: http://www4.ti.ch/fileadmin/DT/temi/aria/clima/01_Rapporto_clima_Ticino.pdf (ultima consultazione 21.2.2018).

MeteoSvizzera 2016a. Rete di rilevamento automatica. http://www.meteosvizzera.admin.ch/home/sistemi-di-rilevamento-e-previsione/stazioni-al-suolo/rete-di-rilevamento-automatica.html (ultima consultazione 21.2.2018).

MeteoSvizzera 2016b. Rapporto sul clima 2015. Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera, Zurigo. 80 pagine. Disponibile in http://www.meteosvizzera.admin.ch/content/dam/meteoswiss/it/Publikationen/doc/mch_klimareport2015_IT_web_light.pdf (ultima consultazione 23.2.2018).

MeteoSvizzera 2017. Rapporto sul clima 2016. Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera, Zurigo. 80 pagine. Disponibile in http://www.meteosvizzera.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/Publikationen/doc/mch_klimareport2016_IT_web.pdf (ultima consultazione 23.2.2018).

MeteoSvizzera 2018: Bollettino del clima dell'anno 2017. Locarno-Monti. Disponibile in http://www.meteosvizzera.admin.ch/content/dam/meteoswiss/it/Publikationen/doc/Resoconto-anno2017.pdf (ultima consultazione 23.2.2018).

Ormerod S. & Durance I. 2018. The Llyn Brianne Stream Observatory. http://llynbrianne-lter.org (ultima consultazione 23.2.2018).

Psenner R. 2003. Alpine Lakes: Extreme Ecosystems under the pressures of global change. EAWAG News, 55e, 12-14.

Rogora M., Boggero A., Marchetto A., Mosello R., Tartari G., Zaupa S. 2014. Laghi alpini: un mondo che cambia. Nimbus, 72 (2), 152-157.

Scapozza C., Colombo L., Domenici M., Lepori F., Pera S., Pozzoni M., Rioggi S. & Bruder A. 2017. Lago Nero – an example of mountain lake monitoring in a changing Alpine cryosphere. ICP IM 26th Annual Report 2017. Reports of the Finnish Environment Institute, 24: 43-49. [http://repository.supsi.ch/8618]

Scapozza C., Bruder A., Lepori F., Pozzoni M., Pera S., Rioggi S., Domenici M. & Colombo L. 2018. Alpine cryosphere monitoring for mountain lake studies: the example of Lago Nero (Ticino Alps). Geographica Helvetica, in press.

Scapozza C., Giaccone E., Mari S., Antognini M., Fratianni S. & Ambrosi C. 2016. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2013/2014 e 2014/2015). Bollettino della Società ticinese di scienze naturali 104, 37-44. [http://repository.supsi.ch/7891]

Schulz M., Gauss M., Benedictow A., Jonson J.E., Tsyro S., Nyiri A., Simpson D., Steensen B.M., Klein H., Valdebenito A., Wind P., Kirkevag A., Griesfeller J., Bartnicki J., Olivie D., Grini A., Iversen T., Seland Ø., Semeena V.S., Fagerli H., Aas W., Hjellbrekke A.-G., Mareckova K., Wankmuller R., Schneider P., Solberg S., Svendby T. Liu L., Posch M., Vieno M., Reis S., Kryza M., Werner M., Walaszek K., 2013. Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe in 2011. EMEP Report 1/2013. Norwegian Meteorological Institute, Oslo. Disponibile in https://www.ceh.ac.uk/publications/transboundary-acidification-eutrophication-and-ground-level-ozone-europe-2011 (ultima consultazione 23.2.2018).

Steingruber S. & Colombo L. 2006. Impacts of Air Pollution on Alpine Lakes and Rivers. Chemistry and biology in Alpine lakes and rivers in Southern Switzerland related to acidification from long-range transboundary air pollution: Monitoring results from 1980-2004; Environmental studies no. UW–0619. Technical Report. Federal Office for the Environnment, FOEN, Bern. Disponibile in https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/en/dokumente/luft/uw-umwelt-wissen/impacts_of_air_pollutiononalpinelakesandrivers.pdf.download.pdf/impacts_of_air_pollutiononalpinelakesandrivers.pdf (ultima consultazione 23.2.2018).

Steingruber S. 2015. Deposition of acidifying and eutrophying pollutants in southern Switzerland from 1988 to 2013. Bollettino della Società ticinese di scienze naturali, 103, 37-45.

Thies H., Nickus U., Tolotti M., Tessadry R. & Krainer K. 2013. Evidence of rock glacier melt impacts on water chemistry and diatoms in high mountain streams. Cold Regions Science and Technology, 96, 77-85.

Vuorenmaa J., Augustaitis A., Beudert B., Clarke N., de Wit H., Dirnböck T., Frey J., Forsius M., Indriksone I., Kleemola S., Kobler J., Krám P., Lindroos A.-J., Lundin L., Ruoho-Airola T., Ukonmaanaho L. & Váňa M. 2017. Long-term sulphate and inorganic nitrogen mass balance budgets in European ICP Integrated Monitoring catchments (1990-2012). Ecological Indicators, 76, 15-29.

Williamson C. E., Saros J. E., Vinvent W. F. & Smol J. P. 2009. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. Limnology and Oceanography, 54, 2273-2282.