

# Influenza delle fluttuazioni climatiche sui grandi laghi a sud delle Alpi: implicazioni nel contesto del riscaldamento globale<sup>§</sup>

Nico Salmaso<sup>1\*</sup>, Fabio Buzzi<sup>2</sup>, Leonardo Cerasino<sup>1</sup>, Letizia Garibaldi<sup>3</sup>, Barbara Leoni<sup>3</sup>, Marina Manca<sup>4</sup>, Giuseppe Morabito<sup>4</sup>, Michela Rogora<sup>4</sup>, Marco Simona<sup>5</sup>

1 IASMA Research and Innovation Centre, Ist. Agr. S. Michele all'Adige - Fondaz. E. Mach, Via E. Mach 1, 38010 S. Michele a/A (Trento).

2 ARPA Lombardia, Dipartimento di Lecco, Via I Maggio, 21/b, 23848 Oggiono, Lecco, Italy.

3 Dip. Scienze dell'Ambiente e del Territorio e Scienze della Terra, Univ. Milano-Bicocca, Piazza della Scienza 1, 20126 Milano, Italy.

4 C.N.R. Istituto per lo Studio degli Ecosistemi, L.go Tonolli, 50, 28922 Verbania Pallanza, Italy.

5 Istituto Scienze della Terra, Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI), Blocco C - Ufficio 109, Via Trevano / Casella Postale 72, 6952 Canobbio, Switzerland.

\* Referente per la corrispondenza: nico.salmaso@fmach.it

Pervenuto il 25.1.2014; accettato il 19.3.2014

## Riassunto

Le ricerche condotte nei grandi laghi a sud delle Alpi hanno dimostrato una stretta dipendenza dei processi di mescolamento da modi di circolazione atmosferica rilevanti per l'area mediterranea (East Atlantic pattern, EA e Eastern Mediterranean Pattern, EMP). In inverno, EA e EMP sono associati a una situazione di alta pressione nell'Oceano Atlantico settentrionale, e a un forte afflusso di aria fredda dall'Europa settentrionale e centrale verso il Mediterraneo. Il raffreddamento dell'aria, causando una diminuzione delle temperature lacustri, favorisce una maggiore estensione della circolazione primaverile, e un maggiore rifornimento di nutrienti verso la superficie e di ossigeno verso l'ipolimnio. L'impatto sulle comunità biologiche è stato studiato nel Garda e, in parte, nel lago Maggiore e nel lago d'Iseo. Nel Garda, a seguito di inverni più freddi e all'aumentare della disponibilità primaverile di nutrienti, sono stati osservati significativi aumenti nella crescita delle diatomee in primavera e dei cianobatteri in estate e autunno. Nel Garda e nel lago Maggiore, mentre la temperatura ambientale è risultata influenzare la tempistica del picco primaverile in densità di *Daphnia*, l'entità dello stesso è apparsa mediata dal mescolamento e dalle disponibilità alimentari. Risultati simili sono stati verificati nel lago d'Iseo. Un aumento delle temperature invernali potrebbe determinare una diminuzione nella frequenza degli episodi di mescolamento completo. Nel breve periodo ciò porterebbe ad un miglioramento della qualità delle acque superficiali, diminuendo la fertilizzazione primaverile e, come finora dimostrato nel Garda, lo sviluppo di cianobatteri. Nel lungo periodo aumenterebbe invece il rischio di innesco di condizioni meromittiche.

PAROLE CHIAVE: laghi sudalpini / eutrofizzazione / cambiamenti climatici / East Atlantic pattern / Eastern Mediterranean Pattern

## Influence of climatic fluctuations on the large lakes south of the Alps: implications in the context of global warming

Synoptic analyses carried out in the largest lakes south of the Alps demonstrated a tight coupling between deep mixing dynamics and winter climatic fluctuations strictly controlled by atmospheric modes of variability relevant for the Mediterranean region, namely the East Atlantic pattern and the Eastern Mediterranean Pattern. In winter, the EA and EMP modes are associated with an intense north-easterly airflow bringing cold air from continental Europe over the Mediterranean basin. In turn, harsh winters had a strong impact on the lake water temperatures, deep lake circulation episodes, higher replenishment of epilimnetic phosphorus and hypolimnetic oxygen at spring overturn. Fertilisation was greatly enhanced in the meromictic and more eutrophic lakes. The effects of such a linked chain of events on phytoplankton were studied in Lake Garda where harsh winters and higher P-replenishment had a positive impact on the development of diatoms in spring and cyanobacteria in summer and autumn. Timing of *Daphnia* population density peak in lakes Garda, Maggiore and Iseo was directly correlated with water temperatures, while the level of peak density was mediated by the extent of spring mixing and food availability. It was hypothesized that an increase in the winter temperatures could cause a decrease in the occurrence of complete overturn episodes. In the short period, this should improve water quality, decreasing the replenishment of phosphorus and – as demonstrated in Lake Garda – the development of cyanobacteria. On the long-term, the lake warming could increase the risk of triggering meromictic conditions.

KEY WORDS: deep perialpine lakes / eutrophication / climatic change / East Atlantic pattern / Eastern Mediterranean Pattern

## INTRODUZIONE

Le più recenti analisi condotte a livello sinottico sui laghi profondi a sud delle Alpi hanno chiaramente individuato negli apporti di nutrienti algali e nell'evoluzione climatica a lungo termine i due principali fattori di stress ambientale in grado di controllare la qualità ecologica delle acque (Salmaso e Mosello, 2010). Storicamente, le modificazioni nel livello trofico hanno avuto un ruolo determinante nel controllo della composizione, struttura e sviluppo delle biocenosi acquatiche, con diversi casi-studio ben documentati a nord e a sud delle Alpi (Anneville *et al.*, 2005; Mosello *et al.*, 2010). D'altra parte, le ricerche hanno messo in evidenza un ruolo emergente svolto dal riscaldamento climatico sia nei suoi effetti diretti sia come elemento amplificatore degli effetti causati dall'eutrofizzazione.

Differenze nelle caratteristiche morfometriche e fisiologiche e nella localizzazione geografica (altitudine e latitudine) sono in grado di filtrare gli effetti dei cambiamenti climatici sulle differenti variabili ecosistemiche (Mooij *et al.*, 2005; Nöges, 2009). Nei bacini del centro e nord Europa e nei laghi d'alta quota i cicli vitali delle singole specie e le dinamiche stagionali delle comunità sono fortemente influenzati dalla formazione e dalla durata della copertura di ghiaccio (Weyhenmeyer, 2001). Relativamente alle dimensioni, i laghi più piccoli sono maggiormente sensibili ai cambiamenti indotti dalle fluttuazioni meteorologiche (Naselli-Flores e Barone, 2012).

Nei bacini di grandi dimensioni –inclusi i laghi profondi a sud delle Alpi– il riscaldamento è causato dal trasporto verticale di calore per diffusione turbolenta nell'ipolimnio durante i mesi più caldi. Nel corso dei mesi tardo-invernali e primaverili l'entità del raffreddamento della colonna d'acqua rappresenta un fattore chiave nel controllo della profondità interessata dai processi di mescolamento e omogeneizzazione delle caratteristiche chimiche e fisiche. Le acque profonde pertanto possono mantenere una "memoria climatica" che preserva le informazioni sulle fluttuazioni climatiche del passato (Ambrosetti e Barbanti, 1999). I cambiamenti a lungo termine del clima nei mesi più freddi rappresentano quindi un elemento chiave per interpretare gli effetti sui meccanismi che regolano il funzionamento di questi grandi ecosistemi.

Le più recenti indagini hanno messo in evidenza un significativo riscaldamento dei laghi a livello globale (~95% sul totale), con aumenti medi compresi tra 0,10 e 0,45 °C decade<sup>-1</sup> (Dokulil *et al.*, 2006; Lenters *et al.*, 2011). Questi trend sono stati confermati anche nei grandi laghi sudalpini italiani, dove sono stati rilevati aumenti nell'intera colonna d'acqua, e nel periodo di massima circolazione, compresi tra 0,11 e 0,21 °C decade<sup>-1</sup> (Salmaso e Mosello, 2010). Nei laghi profon-

di uno degli effetti più importanti del riscaldamento è costituito da un'intensificazione della stratificazione termica e da una diminuzione dell'estensione raggiunta dal mescolamento verticale primaverile, con importanti conseguenze sulle concentrazioni ipolimnetiche di ossigeno disciolto e con un effetto complessivo di fertilizzazione delle acque superficiali. Modellizzando gli effetti del riscaldamento climatico nel Lago di Zurigo, Peeters *et al.* (2002) hanno evidenziato un aumento della stabilità termica e una riduzione della frequenza degli episodi di mescolamento completo. In generale, nel medio e lungo periodo, gli effetti di una persistente stratificazione delle acque nei laghi profondi (meromissi) possono portare a conseguenze deleterie, determinando una progressiva ipossia e anossia degli strati ipolimnetici e un accumulo di nutrienti e composti ridotti, come nel caso dei laghi di Lugano, Iseo e Idro.

Nel corso degli ultimi 20 anni la relazione tra l'evoluzione climatica a differenti scale temporali e la variabilità delle caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche negli ecosistemi d'acqua dolce sono state studiate facendo ampio uso di indici climatici (Stenseth *et al.*, 2003). Tra questi, l'Oscillazione Nord Atlantica (North Atlantic Oscillation, NAO) è stata ampiamente utilizzata nello studio degli effetti del clima in Europa e America nord-orientale. Questo indice è stato largamente utilizzato per spiegare la durata delle coperture di ghiaccio, le temperature invernali dell'acqua, l'inizio dello sviluppo annuale delle comunità fitoplanctoniche e i cicli vitali nei cladoceri (George, 2010).

Obiettivo generale di questo contributo è di evidenziare gli effetti a larga scala della circolazione atmosferica e delle fluttuazioni climatiche sulle caratteristiche limnologiche dei grandi laghi a sud delle Alpi (laghi di Garda, Iseo, Como, Lugano e Maggiore). Numerosi studi hanno già ampiamente sottolineato l'importanza del clima invernale nel controllo dell'estensione verticale del mescolamento primaverile, dell'ossigenazione delle acque profonde e della frazione di nutrienti trasportata dall'ipolimnio verso gli strati più superficiali (es. Manca *et al.*, 2000a; Simona, 2003; Salmaso *et al.*, 2003).

Recenti indagini svolte sul lago di Garda hanno evidenziato l'importante ruolo assunto dai modi di circolazione atmosferica agenti tra l'Atlantico settentrionale e l'Europa nel controllo dei processi di mescolamento nei mesi invernali e primaverili, con numerosi effetti a cascata sulla distribuzione verticale di ossigeno e nutrienti e sullo sviluppo algale (Salmaso, 2012; Salmaso e Cerasino, 2012). A questo riguardo sono stati testati diversi indici di teleconnessione comprendenti, oltre la NAO, l'East Atlantic pattern (EA), lo Scandinavia pattern (SCAND), l'East Atlantic/West Russia Pattern (EA/WR) e l'Eastern Mediterranean

Pattern (EMP). Tra questi, solo gli indici EA e EMP hanno mostrato una stretta connessione con le temperature dell'aria e dell'acqua, l'estensione del mescolamento verticale lacustre, l'intensità del rifornimento di nutrienti verso gli strati epilimnetici e lo sviluppo di fitoplancton nel periodo primaverile-autunnale.

Analisi congiunte sullo zooplancton dei laghi di Garda e Maggiore (1998-2008), hanno messo in luce come il legame tra temperatura ambientale e dinamica stagionale del principale consumatore primario zooplanctonico, *Daphnia*, sia diretto, quanto alla tempistica della crescita numerica della popolazione, e indiretto, quanto al livello di densità raggiunto in primavera. L'entità del picco sarebbe infatti dipendente dalla temperatura per il tramite delle disponibilità alimentari controllate dal mescolamento primaverile (Manca e Salmaso, 2012). Analizzando le variazioni interannuali nel periodo 1998-2011, analoghi risultati sono stati osservati anche sulle popolazioni del lago d'Iseo (Leoni *et al.*, 2014).

In questo lavoro allargheremo la nostra attenzione all'intero distretto lacustre subalpino, valutando l'effetto dei due indici di teleconnessione EA ed EMP sulle caratteristiche limnologiche dei laghi di Garda, Iseo, Como, Lugano e Maggiore. Saranno discusse in particolare le implicazioni per la funzionalità ecologica e per la qualità delle acque derivanti dall'aumento delle temperature nei mesi invernali, che sono i più critici per quanto riguarda il controllo delle dinamiche di mescolamento delle acque profonde. Infine, saranno discusse le possibili misure di mitigazione degli effetti connessi con il cambiamento climatico in questa particolare tipologia lacustre.

## MATERIALI E METODI

### Siti di campionamento

I laghi considerati in questo studio comprendono i 5 maggiori bacini a sud delle Alpi ovvero, da est a ovest, i laghi di Garda, Iseo, Como, Lugano e Maggiore (Fig. 1). Questi bacini presentano profondità massime e volumi compresi rispettivamente tra 251 e 410 m, e tra 4,7 e 49 miliardi di m<sup>3</sup>. Considerata la loro collocazione geografica, questi bacini dovrebbero essere classificati come monomittici caldi, caratterizzati cioè da una completa circolazione invernale a temperature superiori a 4 °C, e stabile stratificazione termica nei mesi più caldi (Wetzel, 2001). A causa della loro elevata profondità, questi laghi presentano tuttavia lunghi periodi di mescolamento incompleto, interrotti da occasionali e irregolari episodi di completa circolazione innescati da inverni particolarmente rigidi e ventosi (Ambrosetti e Barbanti, 1999). A causa di queste particolarità, questi laghi possono essere pertanto classificati come mero-oligomittici.

Le concentrazioni di fosforo totale (TP) nell'intero gruppo di laghi hanno mostrato un consistente aumento a partire dagli anni '60 e '70 (Mosello *et al.*, 2010). Verso la fine degli anni '80 lo stato trofico era compreso tra l'oligo-mesotrofia del Garda e l'eutrofia-iper-eutrofia del lago di Lugano, mentre i laghi Maggiore, Como e Iseo erano rispettivamente meso-eutrofici e eutrofici. Dagli anni '80 il Lago Maggiore ha mostrato una significativa riduzione dei nutrienti, dovuta all'adozione di rigide misure di contenimento dei carichi di fosforo e azoto provenienti dal bacino; grazie a questi interventi le concentrazioni di TP sono scese agli attuali valori di circa 10 µg P l<sup>-1</sup>. Analoghe riduzioni sono state osservate nei laghi di Como e Lugano, che presentano concentrazioni attorno a 25 µg P l<sup>-1</sup> (mesotrofia) e 60-80 µg P l<sup>-1</sup> (meso-eutrofia). Al contrario, i laghi di Iseo e Garda hanno mostrato una stabilizzazione dei nutrienti solo in anni recenti, con concentrazioni rispettivamente attorno a 50-60 e 18 µg P l<sup>-1</sup> (Mosello *et al.*, 2010).

### Campionamenti e misure nei laghi

Nei laghi di Garda, Iseo e Maggiore, e nel bacino nord del lago di Lugano, i campionamenti sono stati eseguiti su base mensile o bimensile in corrispondenza dei punti di massima profondità. Nel lago di Como le operazioni di prelievo a frequenza mensile sono state eseguite al largo di Dervio ( $z_{\max}=270$  m), mentre le misure verticali per la stima dell'estensione del mescolamento primaverile sono sempre state eseguite nel punto di massima profondità. I campioni sono stati



**Fig. 1.** I grandi laghi a sud delle Alpi. Alt., altitudine dello specchio d'acqua (m s.l.m.);  $z_{\max}$ , profondità massima (m). Per ogni lago sono indicate le stazioni di campionamento e misura.

raccolti sia nello strato epilimnetico sia a profondità discrete, lungo tutta la colonna d'acqua. I dati utilizzati nelle analisi sono stati determinati nei periodi compresi tra il 1991-1996 (a seconda della disponibilità dei dati) e il 2011 (Garda), 1994-2011 (Iseo), 2004-2011 (Como), e 1991-2011 (Lugano e Maggiore).

Oltre alle misure chimiche e fisiche effettuate sui campioni raccolti a profondità discrete, nei laghi di Garda, Lugano e Como ulteriori misurazioni di temperatura,  $O_2$ , pH e conducibilità lungo la colonna d'acqua sono state effettuate mediante l'utilizzo di sonde multiparametriche (Idronaut e Seacat-Seabird). Nei laghi d'Iseo e Maggiore l'utilizzo delle sonde è stato meno frequente o è iniziato in un periodo successivo. In questi due laghi le misure di temperatura si riferiscono a rilevazioni effettuate con termometri a mercurio a rovesciamento. L'ossigeno disciolto nei laghi di Garda, Lugano e Maggiore è stato determinato utilizzando il metodo di Winkler (APHA *et al.*, 1995), mentre nei laghi d'Iseo e Como le misure si riferiscono a rilevazioni effettuate con le sonde multiparametriche (regolarmente validate, nel caso dell'Iseo, grazie al confronto con misure Winkler eseguite in laboratorio).

L'estensione della profondità di mescolamento alla fine dei mesi invernali è stata stimata a partire dai profili verticali delle variabili ambientali rilevate con le sonde multiparametriche o misurate nei campioni raccolti a profondità discrete. Nel Lago Maggiore la presenza di deboli gradienti verticali fisici e chimici ha reso difficoltosa la determinazione di questa variabile. L'estensione del mescolamento nel Lago Maggiore è stata infatti stimata utilizzando un modello che tiene conto delle velocità del vento, delle temperature dell'aria e dell'acqua, e della radiazione solare (Ambrosetti *et al.*, 2010). A causa del differente approccio, le profondità di mescolamento rilevate in questo lago non sono state considerate nei calcoli.

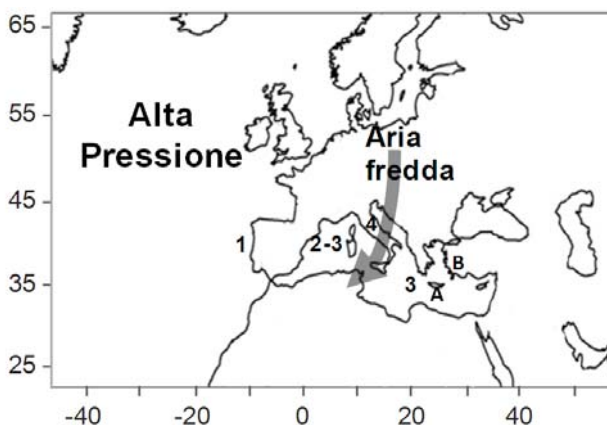
### Dati meteorologici

Le temperature medie dell'aria sono state rilevate in prossimità dei 5 laghi. Nel Lago di Garda la stazione meteorologica (FEM-IASMA) era localizzata a Arco (91 m s.l.m.), ca. 5 km a nord del bordo settentrionale della cuvetta lacustre. Nel lago d'Iseo le rilevazioni sono state eseguite da ARPA Lombardia presso la stazione di Costa Volpino (186 m s.l.m.), a ca. 1 km dalla costa settentrionale. Nel lago di Como i dati meteorologici sono stati misurati a Colico, a ca. 2 km dalle rive nord-orientali. Nel lago di Lugano sono stati utilizzati i dati dell'Ufficio Federale di Meteorologia e Climatologia rilevati presso la stazione della Biblioteca Cantonale di Lugano, in prossimità della costa. Nel Lago Maggiore i dati meteo sono stati raccolti dalla stazione del CNR-ISE a Pallanza, sulle rive del lago.

### Indici di teleconnessione

L'effetto delle fluttuazioni invernali (dicembre-febbraio) dell'East Atlantic pattern ( $EA_{DJF}$ ) e dell'Eastern Mediterranean Pattern ( $EMP_{DJF}$ ) nei 5 laghi oggetto di studio è stato valutato su una serie di variabili fisiche (temperatura invernale dell'aria, temperatura primaverile dell'acqua e profondità di mescolamento) e chimiche (concentrazioni epilimnetiche di fosforo durante la massima circolazione primaverile e ipolimnetiche di ossigeno disciolto in estate e autunno). Le variazioni interannuali di queste stesse variabili limnologiche sono state valutate comunque anche in relazione alle fluttuazioni della NAO invernale ( $NAO_{DJF}$ ).

I valori medi invernali degli indici EA e NAO sono stati calcolati utilizzando i dati pubblicati dal Centro Previsioni Climatiche NOAA-CPC ([www.cpc.ncep.noaa.gov](http://www.cpc.ncep.noaa.gov)). Il calcolo dell'indice EMP ([www.limno.eu/archives/](http://www.limno.eu/archives/)) è stato effettuato calcolando le differenze dei valori di altezza geopotenziale tra due centri fissi localizzati a  $52,5^\circ N, 25^\circ W$ , e  $32,5^\circ N, 22,5^\circ E$  (Hatzaki *et al.*, 2007). EA e EMP presentano, a causa dei differenti approcci utilizzati per il calcolo, segni opposti. Entrambi descrivono un dipolo di anomalie localizzate nell'Atlantico settentrionale e in Nord Africa. Valori negativi (positivi) di  $EA_{DJF}$  ( $EMP_{DJF}$ ) coincidono con la presenza di inverni freddi nell'intera area mediterranea, condizione ribaltata con un progressivo cambiamento di  $EA_{DJF}$  ( $EMP_{DJF}$ ) verso valori positivi (negativi) (Salmaso, 2012; Fig. 2).



**Fig. 2.** Anomalie di pressione e afflusso di aria fredda che caratterizza la fase negativa dell'East Atlantic pattern in inverno (Modificato, da Josey *et al.*, 2011). Afflussi simili di aria fredda caratterizzano l'Eastern Mediterranean Pattern nelle sue fasi positive. I numeri e le lettere indicano rispettivamente le aree geografiche dove l'impatto dell'EA e EMP è stato verificato: 1, deCastro *et al.* (2008); 2, Schroeder *et al.* (2010); 3, Josey *et al.* (2011); 4, Toreti *et al.* (2010); A, Hatzaki *et al.*, 2008; B, Hatzaki *et al.* (2009).

### Analisi dei dati

L'impatto degli indici  $EA_{DJF}$ ,  $EMP_{DJF}$  e  $NAO_{DJF}$  è stato testato sulle seguenti variabili:  $T_{airDJF}$ , le temperature medie invernali (dicembre-febbraio) dell'aria;  $T_{0-50S}$ , le temperature medie minime primaverili dell'acqua nei primi 50 metri;  $Mix_{DS}$ , la massima profondità di mescolamento rilevata nei mesi primaverili;  $SRP_{epis}$ , le massime concentrazioni di fosforo solubile reattivo durante il massimo rifornimento di nutrienti determinato dalla circolazione primaverile delle acque;  $Oxy_{hypo}$ , le concentrazioni medie di ossigeno ipolimnetico nel periodo compreso tra due cicli di mescolamento (maggio-dicembre). Quest'ultima variabile è stata calcolata negli strati compresi tra il fondo e 200 m (Como, Maggiore e Garda), e tra il fondo e 150 m (Iseo) e 100 m (Lugano). Le relazioni sono state analizzate utilizzando tecniche di regressione lineare (Figg. 5-9). Il confronto dei coefficienti angolari e delle intercette nei modelli di regressione è stato valutato utilizzando l'analisi della covarianza (ANCOVA). Nel caso di relazioni caratterizzate da bruschi cambiamenti di pendenza, l'analisi è stata effettuata con tecniche di regressione *piecewise*. La selezione dei diversi modelli è stata valutata sulla base dei valori di AIC (Akaike Information Criterion: a valori più bassi corrispondono modelli migliori) e con test ANOVA. Le relazioni tra le altre variabili ambientali (Fig. 10) sono state valutate mediante correlazioni non-parametriche (Spearman), tenendo cioè conto di possibili relazioni non lineari o caratterizzate da diverse pendenze nell'ambito di una stessa relazione. Le analisi statistiche sono state effettuate con il software R 3.0.0 (R Core Team, 2013).

A causa del minore numero di osservazioni disponibi-

li per il lago di Como, le analisi prenderanno in considerazione –se non specificato diversamente– i dati raccolti nei laghi di Garda, Iseo, Lugano e Maggiore.

### RISULTATI

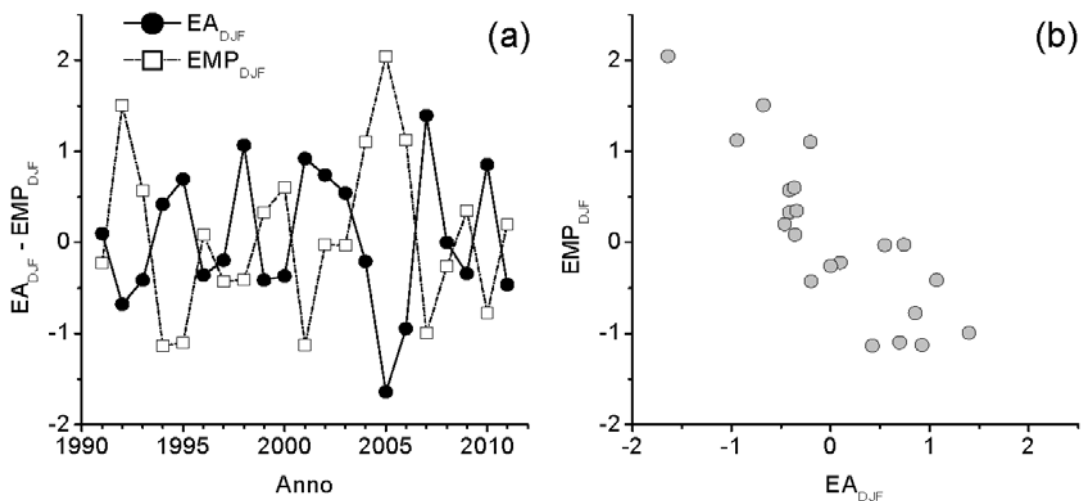
#### Variazioni interannuali nelle variabili climatiche e limnologiche

Nell'intero periodo analizzato i valori invernali dell'East Atlantic pattern e dell'Eastern Mediterranean Pattern hanno presentato ampie fluttuazioni stagionali di segno opposto (Fig. 3;  $\rho = -0,84$ ,  $p < 0,01$ ). L'evoluzione temporale dei due indici nel lungo termine è stata discussa in Salmaso (2012).

Nei laghi di Garda, Iseo, Lugano e Maggiore, le temperature medie dell'aria tra dicembre e febbraio sono rimaste comprese tra 2 e 8 °C. Valori inferiori (ca. 0,5-5 °C) sono stati rilevati nel Lago di Como, a causa della localizzazione della stazione di misura e delle condizioni climatiche locali. Nel complesso, le temperature dell'aria hanno presentato una forte correlazione in tutte le stazioni analizzate ( $0,76 < \rho < 0,96$ ,  $p < 0,01$ ; correlazioni *pairwise*).

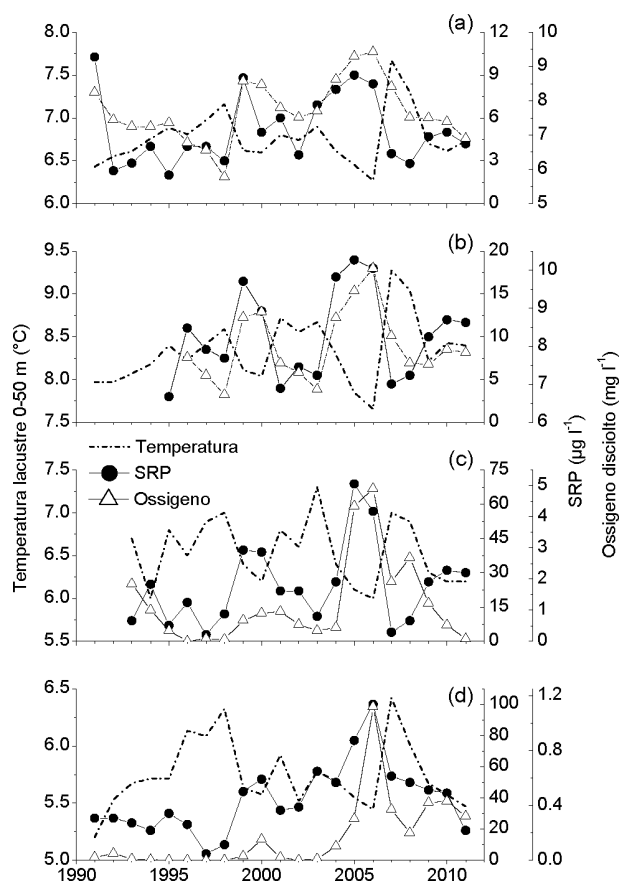
I valori minimi di temperatura dell'acqua tra 0 e 50 m nei mesi tardo-invernali e primaverili hanno presentato valori inversamente correlati con l'altitudine dei bacini: 5,7 °C (Lugano), 6,5-6,8 °C (Iseo, Como e Maggiore), e 8,3 °C (Garda). Nel complesso, le temperature minime lacustri hanno mostrato un'elevata coerenza temporale ( $0,65 < \rho < 0,88$ ,  $p < 0,01$ ) (Fig. 4). In particolare, evidenti episodi di raffreddamento delle acque sono stati osservati nel 1999 e 2000, 2004-2006, e dopo il 2008.

Gli effetti derivanti da episodi di pronunciato raf-



**Fig. 3.** (a) Valori medi invernali (dicembre-febbraio) dell'East Atlantic pattern ( $EA_{DJF}$ ) e dell'Eastern Mediterranean Pattern ( $EMP_{DJF}$ ) dal 1991 al 2011. (b) Relazione tra  $EA_{DJF}$  e  $EMP_{DJF}$ .

freddamento della colonna d'acqua nei laghi profondi sono stati studiati recentemente in dettaglio nei laghi di Garda e Lugano. Nel corso degli episodi di pronunciato raffreddamento il lago di Garda ha mostrato una completa circolazione della colonna d'acqua, testimoniata da una omogeneizzazione totale nella distribuzione verticale (tra 0 e 350 m) delle caratteristiche fisiche e chimiche nel 1991, 1999-2000 e 2004-2006. Negli intervalli tra questi episodi di raffreddamento le profondità di mescolamento sono variate tra 80 e 200 m (Salmaso *et al.*, 1999; Salmaso, 2012). Il Lago di Lugano ha presentato condizioni meromittiche per oltre 40 anni, mostrando, negli inverni 2004-2005 e 2005-2006, una completa isoterma e valori di stabilità (Schmidt) praticamente pari a zero. Contestualmente, l'utilizzo di traccianti chimici (isotopi di elio, trizio, CFC, SF<sub>6</sub>) ha permesso di dimostrare un considerevole ricambio delle acque più profonde e uno scambio di gas con l'atmosfera (Holzner *et al.*, 2009). Mediante



**Fig. 4.** Evoluzione temporale delle temperature medie lacustri primaverili nello strato 0-50 m ( $T_{0-50S}$ ), delle concentrazioni medie epilimnetiche primaverili di fosforo solubile reattivo ( $SRP_{epiS}$ ) e dei valori medi dell'ossigeno disciolto ipolimnetico misurati in estate e autunno nei laghi (a) Maggiore, (b) Garda, (c) Iseo e (d) Lugano.

l'analisi dei profili verticali delle variabili ambientali, la completa circolazione delle acque nel 2004 e 2005 è stata documentata anche nei laghi d'Iseo e Como. In generale, le variazioni interannuali nelle stime di  $Mix_{DS}$  nei laghi di Garda, Iseo e Lugano hanno presentato una stretta correlazione temporale ( $0,69 < \rho < 0,85$ ,  $p < 0,01$ ). Sebbene limitati ad un periodo più corto, risultati simili sono stati ottenuti includendo nelle analisi anche il Lago di Como ( $p$  almeno  $\leq 0,1$ ).

Le concentrazioni epilimnetiche primaverili di fosforo reattivo hanno presentato significative fluttuazioni interannuali. L'ampiezza delle variazioni è rimasta molto contenuta nei laghi oligotrofi (Maggiore), mostrando una progressiva accentuazione nei laghi più eutrofici (Iseo e Lugano) (Fig. 4). Le fluttuazioni osservate hanno mostrato una spiccata coerenza temporale, soprattutto nei laghi di Garda, Iseo e Maggiore ( $0,70 < \rho < 0,83$ ,  $p < 0,01$ ), mentre nel Lago di Lugano le correlazioni con le corrispondenti serie degli altri laghi hanno presentato valori minori ( $0,33 < \rho < 0,44$ ,  $0,05 < p < 0,2$ ). Nei 4 laghi in Fig. 4 risalta in particolare l'aumento simultaneo di  $SRP_{DJF}$  nel 1999-2000 e tra il 2004 e 2006, in coincidenza con periodi caratterizzati da brusche diminuzioni delle temperature lacustri, e da ampie oscillazioni dei due indici di teleconnessione  $EA_{DJF}$  e  $EMP_{DJF}$ .

Le concentrazioni di ossigeno disciolto ipolimnetico misurato nei mesi estivi e autunnali nei laghi di Garda e Maggiore hanno presentato un andamento coincidente ( $\rho = 0,76$ ,  $p < 0,01$ ) (Fig. 4). Nonostante le concentrazioni di  $Oxy_{hypo}$  più basse, questa caratteristica è stata confermata includendo nel confronto anche i laghi di Iseo e Lugano ( $0,53 < \rho < 0,76$ ,  $p$  almeno  $< 0,05$ ). Escludendo infatti gli aumenti osservati in coincidenza con l'aumento dei valori di  $SRP_{DJF}$  nel 1999-2000 e tra il 2004 e 2006, le concentrazioni ipolimnetiche di  $Oxy_{hypo}$  nei laghi d'Iseo e Lugano hanno sempre presentato valori vicini all'anossia (attorno o al di sotto di 1-1,5 mg L<sup>-1</sup>). Nei tre bacini più grandi e profondi le concentrazioni ipolimnetiche di ossigeno hanno sempre presentato valori più elevati (5,5-10 mg L<sup>-1</sup>).

Escludendo alcune minori discrepanze (specialmente con il lago di Lugano), e nonostante il minor numero di dati ( $n=8$ ), la stretta coerenza nello sviluppo temporale delle variabili sin qui considerate ( $T_{airDJF}$ ,  $T_{0-50S}$ ,  $Mix_{DS}$ ,  $SRP_{epiS}$ ,  $Oxy_{hypo}$ ) è stata confermata includendo nelle analisi anche il lago di Como.

La marcata coerenza temporale osservata nello sviluppo di alcune tra le principali variabili climatiche e limnologiche non può essere originata da eventi casuali e non connessi, e richiede pertanto di essere spiegata da fattori e meccanismi comuni agenti simultaneamente nell'intera regione sudalpina. Questi aspetti saranno considerati nella prossima sezione.

### Impatto delle fluttuazioni climatiche sulle caratteristiche limnologiche

Le analisi di regressione riportate nelle figure 5-9 hanno considerato solo gli anni per i quali, nei singoli laghi, i dati erano completi per ogni variabile, e cioè 1996-2011 (Garda), 1994-2011 (Iseo), 2004-2011 (Como), e 1991-2011 (Lugano e Maggiore). Considerata la stretta equivalenza dei due indici di teleconnessione (Fig. 3), le analisi riportate di seguito prenderanno in considerazione solo le relazioni con  $EA_{DJF}$ .

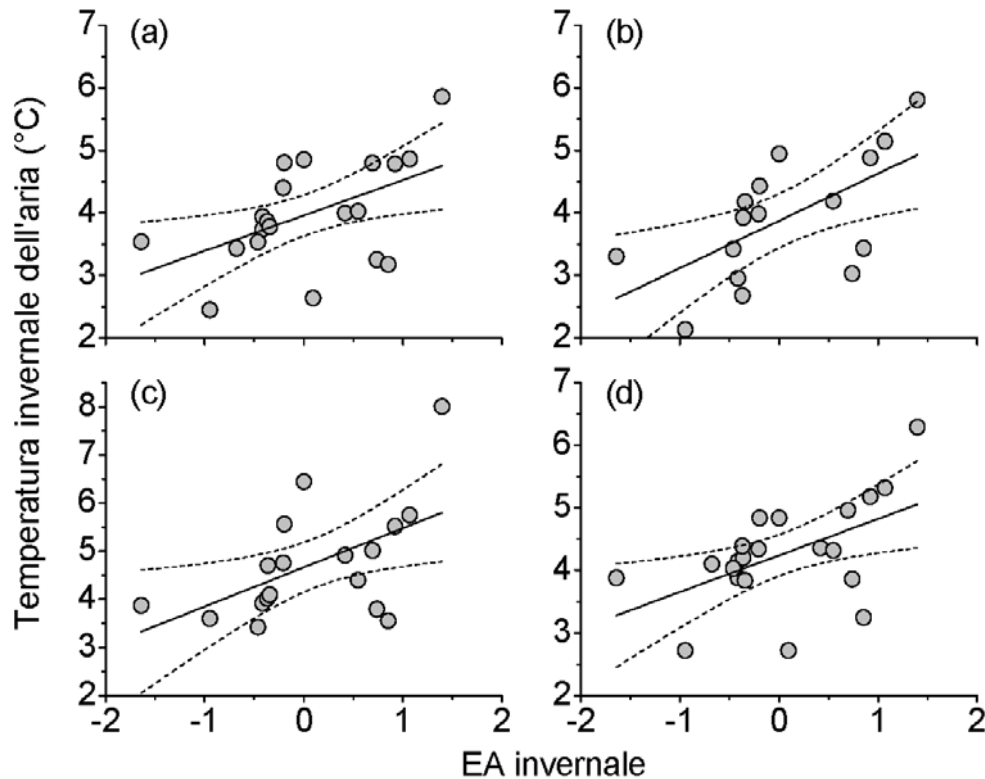
$EA_{DJF}$  ha mostrato una stretta relazione con tutte le variabili climatiche e limnologiche considerate in questo studio. In particolare, questo indice ha influenzato in modo evidente il clima invernale della regione sudalpina, con un significativo impatto positivo su  $T_{airDJF}$  (Fig. 5), e con coefficienti angolari paragonabili (ANCOVA,  $p > 0,10$ ) e variabili tra 0,6 e 0,8. In modo del tutto analogo,  $EA_{DJF}$  ha avuto un effetto positivo sulle temperature minime lacustri rilevate nel periodo di massima circolazione ( $T_{0-50s}$ , Fig. 6). Nei 4 laghi i coefficienti angolari hanno presentato, come nel caso precedente, valori molto vicini, tra 0,2 e 0,4 (ANCOVA,  $p > 0,10$ ).

Le fluttuazioni interannuali dell'East Atlantic pattern hanno avuto una significativa influenza anche nel con-

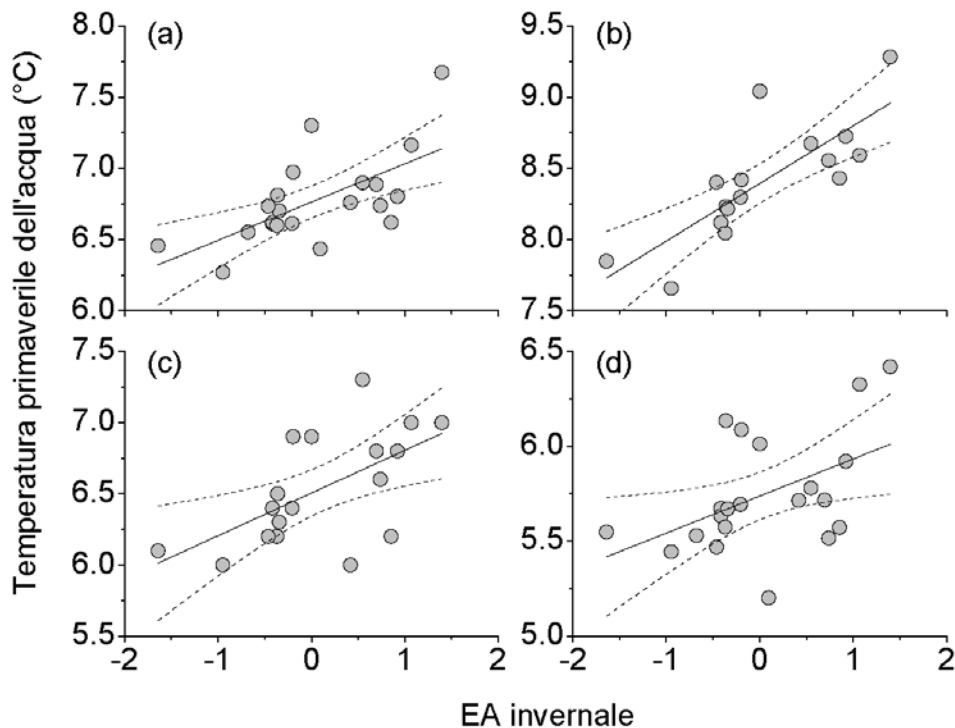
trollo della profondità raggiunta dal mescolamento verticale primaverile ( $Mix_{DS}$ , Fig. 7). Nell'analisi, come anticipato, non è stato incluso il lago Maggiore, a causa di difficoltà intervenute nell'analisi dei profili verticali delle variabili ambientali. Nel lago di Lugano (Fig. 7c) la relazione lineare (non indicata), sebbene significativa ( $p < 0,01$ ), non presentava un adeguato adattamento ai dati, e per questo motivo è stata sostituita da una regressione *piecewise*, con un limite soglia del modello attorno a -0,5. La qualità del secondo modello è stata verificata anche sulla base del criterio AIC, con valori rispettivamente di -11 e -19.

L'indice  $EA_{DJF}$  ha mostrato un forte impatto anche sulle fluttuazioni interannuali delle concentrazioni epilimnetiche di  $SRP_{epis}$  (Fig. 8). Nel caso del lago Maggiore, tuttavia, il modello lineare è risultato solo marginalmente significativo ( $p < 0,1$ ; Fig. 8a). Come nel caso riguardante la profondità di mescolamento, nel lago di Lugano la relazione tra  $EA_{DJF}$  e  $SRP_{epis}$  è apparsa meglio descritta (pur se al margine della significatività,  $p = 0,09$ ) da una regressione *piecewise*; in questo caso, comunque, il modello lineare non era significativo (Fig. 8d).

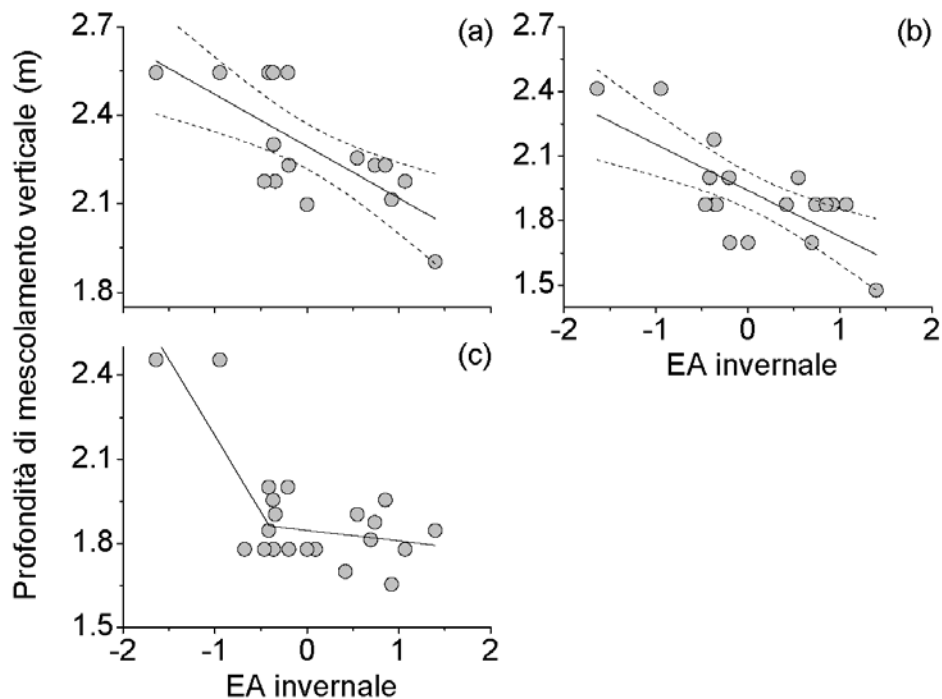
L'impatto di  $EA_{DJF}$  è stato verificato prendendo in considerazione anche le fluttuazioni interannuali delle



**Fig. 5.** Relazioni tra la temperatura media invernale (dicembre-febbraio) dell'aria ( $T_{airDJF}$ ) e i valori medi invernali dell'East Atlantic pattern ( $EA_{DJF}$ ) nei laghi (a) Maggiore, (b) Garda, (c) Iseo e (d) Lugano. Le regressioni sono tutte significative per  $p < 0,05$ . Le linee tratteggiate indicano le bande di confidenza al 95% delle rette di regressione.

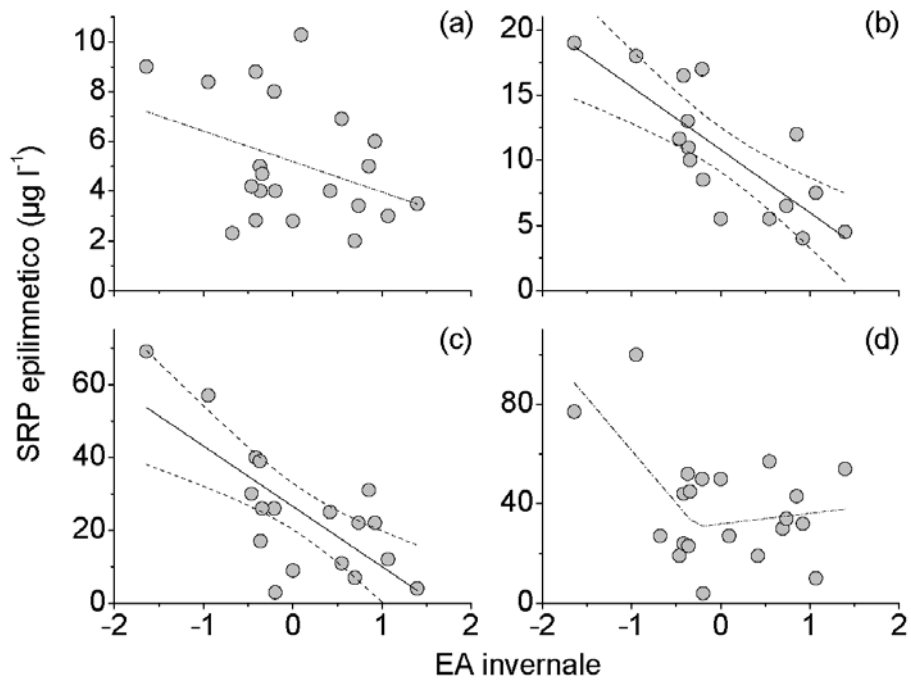


**Fig. 6.** Relazioni tra la temperatura media primaverile (ca. marzo) dell'acqua ( $T_{0-50S}$ ) e i valori medi invernali dell'East Atlantic pattern ( $EA_{DJF}$ ) nei laghi (a) Maggiore, (b) Garda, (c) Iseo e (d) Lugano. Le regressioni sono tutte significative almeno per  $p < 0,05$ . Le linee tratteggiate indicano le bande di confidenza al 95% delle rette di regressione.

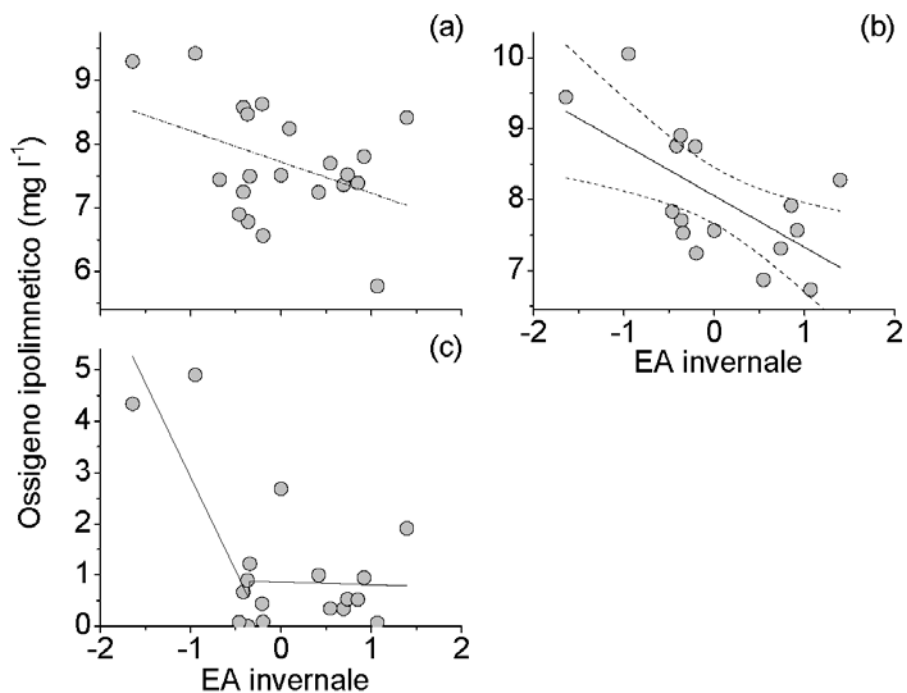


**Fig. 7.** Relazioni tra la profondità massima di mescolamento verticale primaverile ( $Mix_{DS}$ ) e i valori medi invernali dell'East Atlantic pattern ( $EA_{DJF}$ ) nei laghi (a) Garda, (b) Iseo e (c) Lugano. Le regressioni sono tutte significative almeno per  $p < 0,05$ . Le linee tratteggiate indicano le bande di confidenza al 95% delle rette di regressione.





**Fig. 8.** Relazioni tra le concentrazioni epilimnetiche di fosforo reattivo disciolto rilevate durante la massima circolazione primaverile ( $SRP_{epiS}$ ) e i valori medi invernali dell'East Atlantic pattern ( $EA_{DJF}$ ) nei laghi (a) Maggiore, (b) Garda, (c) Iseo e (d) Lugano. Le regressioni sono significative almeno per  $p < 0,05$ , con l'esclusione dei laghi Maggiore e Lugano ( $p < 0,10$ ). Le linee tratteggiate indicano le bande di confidenza al 95% delle rette di regressione.



**Fig. 9.** Relazioni tra le concentrazioni ipolimnetiche di ossigeno disciolto rilevate durante la stratificazione estiva e autunnale ( $Oxy_{hypo}$ ) e i valori medi invernali dell'East Atlantic pattern ( $EA_{DJF}$ ) nei laghi (a) Maggiore, (b) Garda e (c) Iseo. Le regressioni sono significative almeno per  $p < 0,05$ , con l'esclusione del Lago Maggiore ( $p < 0,10$ ). Le linee tratteggiate indicano le bande di confidenza al 95% della retta di regressione.

concentrazioni di ossigeno disciolto ipolimnetico ( $Oxy_{hypo}$ , Fig. 9). Il lago di Lugano non è stato incluso in questa parte di analisi a causa delle basse concentrazioni di ossigeno, che per gran parte del periodo di osservazione hanno presentato valori prossimi allo zero analitico e comunque mai superiori a  $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ . Come nel caso del fosforo ( $SRP_{epiS}$ ), la relazione nel lago Maggiore è apparsa solo marginalmente significativa (Fig. 9a). Nel lago d’Iseo la relazione tra  $EA_{DJF}$  e  $Oxy_{hypo}$  è stata meglio descritta –rispetto a un modello lineare– utilizzando una regressione *piecewise* (ANOVA,  $p = 0,01$ ; AIC, 64 vs. 56).

Con alcune eccezioni, sostituendo  $EMP_{DJF}$  a  $EA_{DJF}$ , le analisi di regressione hanno fornito risultati praticamente equivalenti. Le differenze rispetto a  $EA_{DJF}$  includono le seguenti relazioni: lago d’Iseo,  $EMP_{DJF}$  vs.  $T_{0-50S}$  ( $p < 0,10$ ; cfr. Fig. 6c); lago di Lugano,  $EMP_{DJF}$  vs.  $MixD_s$  e  $SRP_{epiS}$  (relazioni adeguatamente descritte da modelli lineari,  $p < 0,05$ ; cfr. Fig. 7c e 8d); lago Maggiore,  $EMP_{DJF}$  vs.  $Oxy_{hypo}$  ( $p < 0,05$ ; cfr. Fig. 9a).

Nel lago di Como il calcolo delle regressioni tra  $EA_{DJF}$  e  $EMP_{DJF}$  e le variabili limnologiche considerate

nelle figure 5-9 ha permesso di ottenere risultati del tutto equivalenti a quelli ottenuti nei laghi oligomittici e meso-oligotrofici (Maggiore e Garda). Tuttavia, a causa del minore numero di dati disponibili, le relazioni erano significative o marginalmente significative (almeno  $p \leq 0,10$ ) nei seguenti casi:  $EA_{DJF}$  vs.  $T_{0-50S}$  e  $SRP_{epiS}$ ;  $EMP_{DJF}$  vs.  $T_{0-50S}$ ,  $SRP_{epiS}$  e  $Oxy_{hypo}$ .

I valori invernali dell’indice NAO non hanno mostrato alcuna relazione con le variabili climatiche e limnologiche, con l’eccezione di una regressione tra  $NAO_{DJF}$  e  $Oxy_{hypo}$  nel Lago d’Iseo ( $p < 0,05$ ).

**Impatto a cascata dei modi di circolazione atmosferica sulle caratteristiche limnologiche**

Studi precedenti hanno evidenziato l’esistenza di una serie di eventi a cascata da EA e EMP sul lago di Garda (Salmaso, 2012; Salmaso e Cerasino, 2012). Nei modelli veniva evidenziato un impatto significativo di  $EA_{DJF}$  e  $EMP_{DJF}$  sulle temperature invernali dell’aria che, a loro volta, mostravano uno stretto controllo sulle temperature lacustri primaverili e, a seguire, in una serie di eventi causa-effetto, sulla profondità di

	Maggiore	Garda	Iseo	Lugano
$EA_{DJF}$				
+	↓	↓	↓	↓
$T_{airDJF}$				
+	↓	↓	↓	↓
$T_{0-50S}$				
-	n.d.	↓	↓	⋮
$MixD_s$				
+	n.d.	↓	↓	↓
$SRP_{epiS}$		↓	↓	↓
$Oxy_{hypo}$		↓	↓	↓

**Fig. 10.** Impatto a cascata dell’East Atlantic pattern invernale sulle caratteristiche limnologiche dei laghi sudalpini. La prima colonna riporta il flusso di eventi innescato da  $EA_{DJF}$ , e il segno delle relazioni (positive o negative) tra le diverse coppie di variabili. Le frecce indicano l’intensità delle relazioni, basate sul calcolo delle correlazioni non parametriche di Spearman. Le frecce spesse, intermedie e tratteggiate si riferiscono a livelli di significatività rispettivamente pari a  $p < 0,01$ ,  $p < 0,05$  e  $p < 0,10$  (modificato, da Salmaso *et al.*, 2013).

mescolamento, sulla fertilizzazione delle acque nei mesi primaverili e sullo sviluppo di diatomee e cianobatteri. Escludendo l'impatto sul fitoplancton, queste relazioni sono state testate anche nei laghi d'Iseo, Como, Lugano e Maggiore (Fig. 10). Le correlazioni sono sempre risultate significative, almeno a livello  $p < 0,05$ , con l'esclusione di alcuni casi nel lago di Como (dovuti al basso numero di osservazioni) e 2 correlazioni nei laghi d'Iseo e Lugano (Fig. 10).

## DISCUSSIONE

### Impatto dell'East Atlantic pattern e dell'Eastern Mediterranean pattern a scala regionale

Questo lavoro ha confermato ampiamente il forte impatto dell'East Atlantic pattern (EA) e dell'Eastern Mediterranean Pattern (EMP) sul clima invernale della regione sudalpina e sulla limnologia dei grandi laghi, confermando quanto era stato ipotizzato precedentemente sulla scorta delle indagini svolte sul lago di Garda (Salmaso, 2012). Per converso, i risultati hanno altresì confermato lo scarso impatto della NAO invernale sullo stesso set di variabili climatiche e limnologiche.

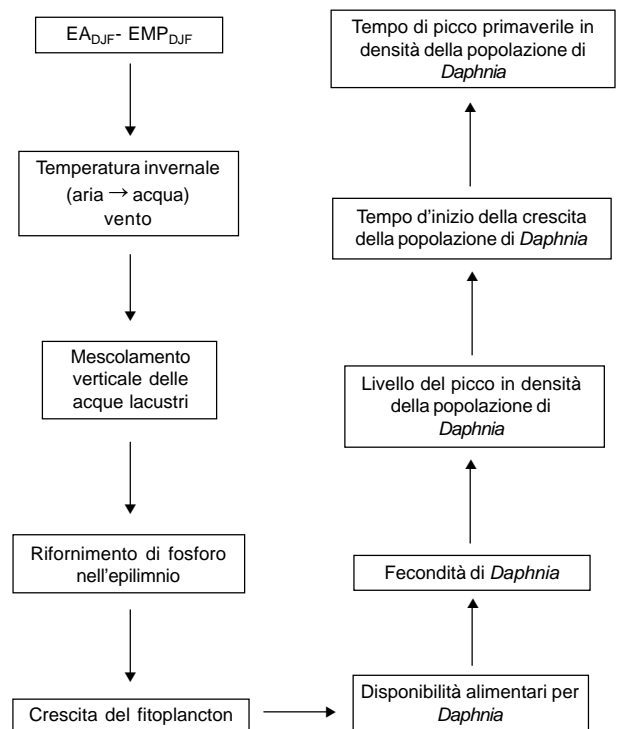
In inverno, nel loro stato rispettivamente negativo e positivo, EA ed EMP descrivono una situazione di alta pressione nell'Oceano Atlantico settentrionale, associata ad un forte afflusso di aria fredda dall'Europa settentrionale e centrale verso l'area mediterranea. Il maggiore raffreddamento dell'aria provoca una maggiore diminuzione delle temperature lacustri, favorendo una maggiore estensione del mescolamento verticale primaverile, ed un maggiore rifornimento di nutrienti verso la superficie e di ossigeno nell'ipolimnio profondo. Questi processi sono proporzionalmente più accentuati, anche se con risposte non lineari e la presenza di limiti-soglia, nei laghi meromittici e maggiormente eutrofici.

Sulla base dei risultati ottenuti in questo lavoro, e considerando il forte impatto di EA e EMP in altre aree della regione mediterranea (es. Toreti *et al.*, 2010; Josey *et al.*, 2011; Hatzaki *et al.*, 2009; altri riferimenti in Fig. 2), è lecito ipotizzare una forte connessione tra questi due indici e le fluttuazioni interannuali delle variabili limnologiche anche in altri bacini della penisola italiana.

Le fluttuazioni stagionali del clima e delle caratteristiche limnologiche analizzate nei laghi di Garda, Iseo, Como, Lugano e Maggiore hanno mostrato un elevato livello di coerenza temporale. Per quanto riguarda le temperature dell'aria e dell'acqua questi risultati erano ampiamente attesi. Per esempio, l'elevata coerenza temporale nelle fluttuazioni delle temperature ipolimnetiche è stata verificata in un gruppo di 12 laghi profon-

di localizzati tra le Alpi centro-settentrionali e il Nord Europa (Dokulil *et al.*, 2006). Il forte sincronismo temporale in questo caso poteva essere spiegato invocando l'azione della NAO nei mesi invernali e primaverili. Analogamente, i comuni andamenti temporali delle temperature medie superficiali giornaliere in laghi svizzeri e ungheresi sono stati interpretati come un effetto causato da eventi meteorologici (espressi come temperature dell'aria) agenti su scala continentale (Livingstone e Padisák, 2007).

La forte coerenza temporale osservata nelle concentrazioni epilimnetiche di SRP e nel contenuto ipolimnetico di ossigeno nell'areale subalpino potrebbe apparire molto meno scontata. Anche in questo caso, però, il comune andamento temporale trae origine dai comuni effetti causati dal clima invernale nella regione a sud delle Alpi, e da corrispondenti sincronismi innescati dalle dinamiche di mescolamento delle acque profonde. Questi meccanismi controllano, su un'am-



**Fig. 11.** Interpretazione schematica delle interazioni tra forzanti meteo-climatiche e crescita delle popolazioni di *Daphnia* nei due laghi Garda e Maggiore, basate sull'analisi dei dati relativi agli anni 1998-2008, nei quali i due laghi presentavano concentrazioni stabili di fosforo totale. Le temperature invernali controllano direttamente la tempistica dello sviluppo della popolazione, mentre i livelli di picco sono influenzati dalle temperature per il tramite delle disponibilità alimentari, nel periodo precedente lo sviluppo numerico di *Daphnia* (modificato, da Manca e Salmaso, 2012).

pia scala regionale, le variazioni interannuali dello stato trofico attorno ad un livello di base strettamente dipendente dal contenuto complessivo di nutrienti (e ossigeno) presenti nelle acque epi- e ipolimnetiche. Nei laghi oligotrofici, dove i gradienti chimici (compresi i nutrienti e l'ossigeno) sono molto deboli, gli effetti del rifornimento primaverile di fosforo verso gli strati trofogenici sono molto limitati e difficili da documentare (Maggiore) oppure di minore importanza (Garda, Como) rispetto a laghi maggiormente eutrofici (Iseo, Lugano). Relativamente a questo ultimo punto è da sottolineare che le variazioni nel contenuto epilimnetico di P potrebbero essere influenzate da un rifornimento diretto di nutrienti dal reticolo idrografico. Questo aspetto non dovrebbe essere sottovalutato nei laghi caratterizzati da tempi teorici di ricambio delle acque brevi, quali i laghi Maggiore, Como e Iseo. Al contrario, fonti aggiuntive e significative di nutrienti nel periodo primaverile assumono una minore importanza nei laghi con tempi di ricambio più lunghi e caratterizzati da un reticolo idrografico più semplificato, quali il Garda. Ad ogni modo il ruolo svolto dal clima invernale e dal mescolamento primaverile delle acque nel rifornimento epilimnetico di P appare ampiamente provato. Nei mesi estivi e autunnali, con la formazione di uno stabile epilimnio, la frazione di nutrienti epilimnetici provenienti dall'ipolimnio profondo diventa invece progressivamente meno importante.

### **Impatto delle fluttuazioni climatiche invernali e riscaldamento globale**

Il legame tra inverni freddi ed eutrofizzazione potrebbe apparire contraddittorio rispetto alla visione corrente che vede negli effetti del riscaldamento globale sui corpi d'acqua un elemento che rafforza gli effetti dell'eutrofizzazione (Winder, 2012). Questa apparente discrepanza è facilmente risolta se si considerano i complessi meccanismi a cascata attraverso i quali le fluttuazioni climatiche invernali esplicano il loro effetto sui laghi profondi in un limitato lasso di tempo.

I diversi effetti del clima possono essere compresi attraverso un'interpretazione meccanicistica, che tenga conto dell'impatto sui diversi livelli di complessità degli ecosistemi lacustri, dagli organismi acquatici ai processi fisici (es. il mescolamento primaverile delle acque). La temperatura ha effetti diretti molto importanti sulla crescita algale. In laghi più caldi i cianobatteri traggono vantaggio dalla loro abilità di crescere più velocemente ad alte temperature, regolando la loro posizione verticale e sviluppando popolazioni massive in ambienti stratificati e stabili. Molti studi hanno evidenziato come l'aumento nella frequenza delle fioriture cianobatteriche possa essere messo in relazione non solo con l'eutrofizzazione, ma anche con il riscalda-

mento climatico (Paerl e Huisman, 2008; Wagner e Adrian, 2009). Nei laghi profondi sudalpini questi risultati sembrano confermati dai dati sperimentali. Analizzando l'effetto della disponibilità di nutrienti e temperatura sui principali gruppi fitoplanctonici, Salmaso *et al.* (2012) hanno dimostrato l'esistenza di una relazione significativa tra lo sviluppo dei gruppi più sensibili all'eutrofizzazione (tra i quali cianobatteri e clorofite) e l'interazione tra stato trofico e temperatura, suggerendo un effetto sinergico di rafforzamento degli effetti negativi dell'eutrofizzazione all'aumentare della temperatura.

In sintesi, mentre inverni più freddi garantiscono un adeguato rifornimento di nutrienti primaverili, l'utilizzo di questi ultimi da parte delle comunità algali appare significativamente influenzato dalle condizioni climatiche dei mesi estivi. Posto in altri termini, nei laghi profondi delle zone temperate il riscaldamento globale può avere effetti contrastanti, riducendo la fertilizzazione primaverile delle acque superficiali, ma favorendo lo sviluppo di popolazioni adattate a climi estivi più caldi, in particolare i cianobatteri.

### **Conseguenze del blocco dei cicli di stratificazione e completo mescolamento verticale: la comparsa della meromissi**

Nei laghi meromittici o tendenzialmente meromittici, quali il Lugano e l'Iseo, la forte resistenza al mescolamento è causa di effetti negativi sulle acque di fondo, determinando la scomparsa dell'ossigeno e la formazione di composti ridotti. Periodi lunghi di costante stratificazione, se da una parte portano a una mitigazione del grado di fertilizzazione delle acque superficiali, dall'altro aumentano la probabilità –nel corso di occasionali eventi di mescolamento anche solo più accentuati o completi– di osservare elevati picchi epilimnetici di nutrienti algali; questo a causa del progressivo aumento delle riserve negli strati ipolimnetici, a loro volta arricchiti dalla mineralizzazione del particolato organico proveniente dagli strati trofogenici. Questi aspetti sono sottolineati dall'esistenza di limiti-soglia nelle relazioni tra indici climatici e variabili ambientali nei laghi meromittici (figure 7-9).

Il mescolamento delle acque nel lago di Lugano nel 2005-2006 può essere considerato un evento eccezionale. I primi decisivi sintomi della meromissi furono osservati dopo gli anni '60 quando nel lago fu documentata la completa scomparsa dell'ossigeno nelle acque di fondo, associata ad un significativo aumento di nutrienti e composti chimici tossici per gli animali (Barbieri e Simona, 1997). Nel 2005, a seguito di un primo episodio di rinnovamento delle acque ipolimnetiche, per la prima volta dopo 40 anni, fu possibile osservare tracce di O<sub>2</sub> in prossimità del fondo. Nel

2006, con il secondo episodio di mescolamento, l'ossigeno presentava concentrazioni omogenee su tutta la colonna d'acqua, con valori tra 1,5–2,0 mg L<sup>-1</sup> anche in prossimità della superficie (Aeschbach-Hertig *et al.*, 2007; Holzner *et al.*, 2009). Questi valori sono nocivi e letali per diverse specie ittiche: si verificarono infatti morie di pesci subito dopo il massimo mescolamento del lago (CIPAIS, 2006).

L'innesco della meromissi nei laghi di Lugano e Iseo (meso-eutrofici o eutrofici) sembra essere stato favorito da una stretta interazione tra eutrofizzazione e fluttuazioni climatiche nei mesi invernali. Negli anni di circolazione incompleta il tempo di rinnovo negli strati ipolimnetici è ridotto. Di conseguenza, si osserva un aumento delle concentrazioni di nutrienti algali, e una maggiore dissoluzione di CaCO<sub>3</sub> e aumento di salinità e densità nelle acque ipolimnetiche. La formazione di particelle di calcite nell'epilimnio è funzione dell'attività algale (attraverso il controllo degli equilibri carbonati-bicarbonati) e dello stato trofico del lago. Un aumento dell'eutrofizzazione e della produttività algale aumenta la formazione di particelle di CaCO<sub>3</sub> in superficie, e la loro dissoluzione negli strati più profondi. Se le condizioni che favoriscono l'incompleto mescolamento prevalgono (inverni caldi e eccessivo contenuto di nutrienti), tali processi si intensificano fino a determinare –come osservato– una marcata divisione del lago in due strati separati da gradienti fisici controllati non solo dalla temperatura, ma anche dal contenuto salino.

### **EA<sub>DJF</sub> e EMP<sub>DJF</sub>, e meccanismi di mescolamento nei laghi profondi**

La circolazione nei grandi laghi a sud delle Alpi non è strettamente e unicamente determinata da processi di mescolamento convettivo. Nel Lago Maggiore Ambrosetti *et al.* (2010) hanno documentato e descritto l'intervento di almeno altri tre processi che comprendono il mescolamento a “nastro trasportatore”, l'intrusione di acque fluviali fredde negli strati ipolimnetici, e lo sprofondamento di acque litorali più fredde lungo le scarpate lacustri. Questi tre meccanismi, che sono controllati non solo dalla temperatura dell'aria, ma anche dal vento e dalle precipitazioni atmosferiche, contribuiscono al rafforzamento degli eventi di circolazione profonda, come dimostrato in dettaglio nei laghi Maggiore (Ambrosetti e Barbanti, 1992) e Garda (Salmaso *et al.*, 1999). La conseguenza è la formazione di masse di acqua profonde caratterizzate da temperature più basse e concentrazioni di ossigeno più elevate rispetto alle masse d'acqua sovrastanti, caratteristica che rende non banale la determinazione delle profondità di mescolamento basate sulla semplice ispezione di dati ambientali rilevati a profondità discrete,

senza cioè l'ausilio di una sonda. L'impatto delle fluttuazioni climatiche, agendo sugli ecosistemi attraverso un insieme di variabili meteorologiche, può pertanto essere meglio valutato quantitativamente utilizzando opportuni indici di teleconnessione, che sono in grado di veicolare maggiori informazioni nell'analisi delle dinamiche di mescolamento delle acque profonde.

### **Prospettive di ricerca: effetti a cascata di EA<sub>DJF</sub> e EMP<sub>DJF</sub> sulle comunità biologiche**

Le implicazioni sulle comunità algali conseguenti ad una maggiore disponibilità di fosforo causata da valori negativi di EA<sub>DJF</sub> (e positivi di EMP<sub>DJF</sub>) sono state analizzate in dettaglio nel Lago di Garda. Con inverni più freddi e all'aumentare della disponibilità primaverile di nutrienti, sono stati osservati significativi aumenti nella crescita delle diatomee in primavera e dei cianobatteri in estate e autunno (Salmaso e Cerasino, 2012). In particolare, le conseguenze dovute allo sviluppo dei cianobatteri richiedono di essere valutate con attenzione data la presenza, in tutti i bacini esaminati, di concentrazioni misurabili di tossine prodotte da questo gruppo algale (microcistine e anatosine) (Cerasino e Salmaso, 2012).

Analisi congiunte sulla dinamica stagionale dello zooplankton nei laghi Garda e Maggiore nel periodo 1998–2008 hanno consentito di mettere in luce come le temperature invernali, la cui coerenza temporale nei due laghi è risultata riconducibile agli indici di teleconnessione sopra elencati, siano il motore del ciclo di sviluppo di *Daphnia*, il principale consumatore secondario del plancton (Fig. 11; Manca e Salmaso, 2012). Alle temperature invernali, infatti, è risultato direttamente correlato, in modo perfettamente sovrapponibile nei due laghi, il tempo d'inizio della crescita numerica delle popolazioni di *Daphnia*; da quest'ultimo dipende inoltre, ancora una volta in modo coerente nei due laghi, il tempo di picco primaverile di *Daphnia*. Un risultato analogo è stato dimostrato per il predatore *Bythotrephes* nel lago Maggiore (Manca e De Mott, 2009). Al contrario, il meccanismo attraverso il quale le variazioni interannuali nelle temperature ambientali dei due laghi si traducono in diverse entità di picchi in densità primaverile delle popolazioni di *Daphnia* ivi presenti, è risultato più complesso, sostanzialmente riconducibile ad una mediazione delle disponibilità alimentari. Condizioni fisiche che favoriscano lo sviluppo in densità e biomassa del fitoplancton e dunque anche di quella parte maggiormente utilizzabile dai cladoceri erbivori, favorirebbero un aumento nella fecondità di *Daphnia*, che si tradurrebbe, successivamente, in un incremento nella densità numerica della sua popolazione. Il meccanismo attraverso il quale si spiega quanto osservato

per il periodo 1998-2008 è sostanzialmente lo stesso emerso in occasione, ad esempio, del completo mescolamento delle acque del lago Maggiore nel 2000 (Manca *et al.*, 2000a; Morabito e Manca, 2013). Il fattore chiave è stato individuato nel rifornimento di fosforo dall'ipolimnio del lago. Tale meccanismo indiretto trova giustificazione nel fatto che le dimensioni medie delle covate di *Daphnia* sono massime nel periodo che precede il suo sviluppo in densità numerica e successive al picco in densità del fitoplancton. Non a caso, i dati a lungo termine del lago Maggiore dimostrano come sussista una significativa correlazione negativa tra dimensioni medie delle covate di *Daphnia* e la trasparenza delle acque, quest'ultima a sua volta correlata in modo significativo con la biomassa algale (es. Manca e Ruggiu, 1998; Manca *et al.*, 2000b, 2008).

Il medesimo approccio, applicato alle popolazioni di cladoceri rilevate tra il 1998 e il 2011 nel lago d'Iseo, ha evidenziato una buona correlazione tra le fluttuazioni climatiche annuali e lo sviluppo di *Daphnia* (Beluzzi *et al.*, 2013, Leoni *et al.*, 2014). Le massime densità raggiunte da *Daphnia* coincidono con situazioni di massima fecondità registrate negli anni caratterizzati dalla piena circolazione delle acque lacustri (2005 e 2006). Le osservazioni sono consistenti con quanto osservato nei laghi di Garda e Maggiore, confermando l'utilità di questi indici nell'individuazione e previsione degli effetti causati dai cambiamenti climatici sugli ecosistemi lacustri.

Sulla base dei meccanismi descritti, e in accordo con gli scenari di riscaldamento globale dell'IPCC (2007) e dei modelli disponibili, un ulteriore aumento delle temperature invernali potrebbe determinare una diminuzione della frequenza degli episodi di mescolamento completo. Nel breve periodo, ciò porterebbe ad un miglioramento della qualità delle acque superficiali, specialmente nei laghi compresi tra l'oligo-mesotrofia e l'eutrofia, diminuendo l'intensità della fertilizzazione epilimnetica primaverile e, come finora dimostrato nel Garda, lo sviluppo di cianobatteri. Ulteriori modifiche a livello di reti trofiche riguarderebbero la diminuzione dell'intensità del grazing primaverile e tardo-primaverile. Nel lungo periodo, l'aumento delle temperature

invernali accrescerebbe invece il rischio di innesco di condizioni meromittiche.

### Strategie di controllo e mitigazione

Considerata la forte interdipendenza dei fattori trofici e climatici nel controllo delle dinamiche di mescolamento profondo nei grandi laghi sudalpini, l'unico efficace sistema di prevenzione dell'innesco o peggioramento della meromissi è costituito dalla riduzione e controllo dei carichi di nutrienti. In particolare, l'unico metodo sicuro per contrastare l'eutrofizzazione è rappresentato dalla riduzione degli apporti di fosforo (Schindler, 2012). Queste misure di base, oltre a ridurre il rischio derivante da eccessive proliferazioni cianobatteriche, contrastano il rafforzamento degli effetti negativi dell'eutrofizzazione innescati dall'aumento delle temperature. Tali interventi divengono strategici anche alla luce delle future e ulteriori potenzialità di utilizzo di questi grandi laghi come risorsa di acqua potabile di buona qualità per le popolazioni dell'Italia settentrionale. Tali considerazioni sono giustificate da una parte dalla diminuzione delle disponibilità idriche nell'areale alpino (causate dalla riduzione delle precipitazioni e dall'arretramento dei ghiacciai), e dall'altra dal progressivo decadimento della qualità delle acque sotterranee e del reticolo idrografico.

### CONCLUSIONI

Recenti ricerche su base sinottica hanno evidenziato un forte effetto dei sistemi di circolazione atmosferica attivi tra l'Atlantico settentrionale e il nord Africa sul clima dell'ampia regione a sud delle Alpi. Tali sistemi sono adeguatamente rappresentati da EA e EMP, due indici di teleconnessione rilevanti per l'area mediterranea che permettono di chiarire le relazioni tra il clima e le fluttuazioni interannuali delle temperature dell'acqua, delle profondità di mescolamento e del rifornimento di nutrienti negli strati trofogenici e di ossigeno nell'ipolimnio. Gli effetti di EA e EMP sulle fluttuazioni di precipitazioni atmosferiche, temperatura e radiazione solare sono già stati verificati in altre regioni del Mediterraneo, ragion per cui se ne sottolinea l'utilità per lo studio degli effetti del cambiamento climatico in altri ambienti lacustri in Italia e nell'intera area mediterranea.

### BIBLIOGRAFIA

Aeschbach-Hertig W., Holzner C.P., Hofer M., Simona M., Barbieri A., Kipfer R., 2007. A time series of environmental tracer data from deep, meromictic Lake Lugano, Switzerland. *Limnology and Oceanography*, **52**: 257-273.

Ambrosetti W., Barbanti L., 1992. Physical limnology in Italy: an historical overview. *Memorie dell'Istituto italiano di Idriobiologia*, **50**: 37-59.

Ambrosetti W., Barbanti L., 1999. Deep water warming in

- lakes: an indicator of climatic change. *Journal of Limnology*, **58**: 1-9.
- Ambrosetti W., Barbanti L., Carrara E.A., 2010. Mechanisms of hypolimnion erosion in a deep lake (Lago Maggiore, N. Italy). *Journal of Limnology*, **69**: 3-14.
- Anneville O., Gammeter S., Straile D., 2005. Phosphorus decrease and climate variability: mediators of synchrony in phytoplankton changes among European peri-alpine lakes. *Freshwater Biology*, **50**: 1731-1746.
- APHA, AWWA, WEF, 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19 th edn. American Public Health Association, Washington.
- Barbieri A., Simona M., 1997. Evoluzione trofica recente del Lago di Lugano in relazione agli interventi di risanamento. *Documenta Istituto italiano di Idrobiologia*, **61**: 73-91.
- Beluzzi S., Leoni B., Garibaldi L., Salmaso N., Manca M., 2013. Can teleconnection indices explain inter - annual variability of *Daphnia* population phenology ? The case of Lake Iseo (I). *Geophysical Research Abstracts* Vol. 15, EGU2013-12608, EGU General Assembly 2013.
- Cerasino L., Salmaso, N., 2012. Diversity and distribution of cyanobacterial toxins in the Italian subalpine lacustrine district. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, **41**: 54-63.
- CIPAIS - Commissione Internazionale per la Protezione delle Acque Italo-Svizzere, 2006. Stato limnologico del Lago di Lugano: Circolazione invernale 2005-2006. *Bollettino dei Laghi Maggiore e Lugano*, **7**.
- deCastro M., Gomez-Gesteira M., Lorenzo M.N., Alvarez I., Crespo A.J.C., 2008. Influence of atmospheric modes on coastal upwelling along the western coast of the Iberian Peninsula, 1985 to 2005. *Climate Research*, **36**: 169-179.
- Dokulil M.T., Jagsch A., George G.D., Anneville O., Jankowsky T., Wahl B., Lenhart B., Blenkner T., Teubner K., 2006. Twenty years of spatially coherent deepwater warming in lakes across Europe related to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, **51**: 2787-2793.
- George G. (ed.), 2010. *The impact of climate change on European lakes*. Springer, Dordrecht, 507 pp.
- Hatzaki M., Flocas H.A., Asimakopoulou D.N., Maheras P., 2007. The eastern Mediterranean teleconnection pattern: identification and definition. *International Journal of Climatology*, **27**: 727-737.
- Hatzaki M., Lingis P., Flocas H.A., Michaelides S., Oikonomou C., 2008. The impact of an upper tropospheric teleconnection pattern on precipitation extremes over Cyprus. *Advances in Geosciences*, **16**: 131-136.
- Hatzaki M., Flocas H.A., Giannakopoulos C. Maheras P., 2009. The impact of the Eastern Mediterranean Teleconnection Pattern on the Mediterranean climate. *Journal of Climate*, **22**: 977-992.
- Holzner C.P., Aeschbach-Hertig W., Simona M., Veronesi M., Imboden D.M., Kipfer R., 2009. Exceptional mixing events in meromictic Lake Lugano (Switzerland/Italy), studied using environmental tracers. *Limnology and Oceanography*, **54**: 1113-1124.
- Josey S.A., Somot S., Tsimplis M., 2011. Impacts of atmospheric modes of variability on Mediterranean Sea surface heat exchange. *Journal of Geophysical Research*, **116**: C02032.
- Lenters J.D., Adrian R., Allan M., de Eyto E., Hamilton D.P., Hook S., Izvestyeva L., Kraemer B., Kratz T., Livingstone D., McIntyre P., Montz P., Noges P., Noges T., O'Reilly C., Read J., Sandilands K., Schindler D., Schneider P., Silow E., Straile D., Van Cleave C., Zhdanov F., 2011. Rapid warming of the world's lakes: A global assessment of recent lake temperature trends using in situ and satellite based records. *AGU Fall meeting 2011*. San Francisco, CA, 5-9 December.
- Leoni B., Garibaldi L., Gulati R.D., 2014. How does interannual trophic variability caused by vertical water mixing affect reproduction and population density of the *Daphnia longispina* group in Lake Iseo, a deep stratified lake in Italy? *Inland waters*, **4**. DOI: 10.5268/IW-4.2.663, 10 pp.
- Livingstone D., Padišák J., 2007. Large-scale coherence in the response of lake surface-water temperatures to synoptic-scale climate forcing during summer. *Limnology and Oceanography*, **52**: 896-902.
- Manca M., Ruggiu D., 1998. Consequences of pelagic food web changes during a long-term lake oligotrophication process. *Limnology and Oceanography* **43**: 1368-1373.
- Manca M., Cavicchioni N., Morabito G., 2000a. First observations on the effect of complete overturn of Lake Maggiore on plankton and primary production. *International Review of Hydrobiology*, **85**: 209-222.
- Manca M., Ramoni C., Comoli P., 2000b. The decline of *Daphnia hyalina galeata* in Lago Maggiore: a comparison of the population dynamics before and after oligotrophication. *Aquatic Sciences*, **62**: 142-153.
- Manca M., Visconti A., de Bernardi R., 2008. Lo zooplankton del Lago Maggiore nel quinquennio 2003-2007: tendenze evolutive ed eccezioni alla luce dei cambiamenti globali. *Biologia Ambientale* **22**(2): 64-72.
- Manca M., DeMott W.R., 2009. Response of the invertebrate predator *Bythotrephes* to a climate-linked increase in the duration of a refuge from fish predation. *Limnology and Oceanography*, **54**: 2506-2512.
- Manca M., Salmaso N., 2012. Inter-annual climate variability and zooplankton: applying teleconnection indices to two deep subalpine lakes (Lake Maggiore and Lake Garda). *3rd European Large Lakes Symposium*. University of Konstanz, 8-12 October 2012. Abstract Book: 18.
- Morabito G., Manca M., 2014. Eutrophication and Recovery of the Large and Deep Subalpine Lake Maggiore: Patterns, Trends and Interactions of Planktonic Organisms between Trophic and Climatic Forcings. In: Lambert A. and Rou, C. Eds), *Eutrophication: Causes, Economic Implications and Future Challenges*. Environmental Science, Engineering and Technology Series, NOVA Publisher: 183-214.
- Mooij W.M., Hülsmann S., De Senerpont Domis L.N., Nolet B.A., Bodelier P.L.E., Boers P.C.M., Dionisio Pires M.L., Gons H.J., Ibelings B.W., Noordhuis R., Portielje R., Wolfstein K., Lammens E.H.R.R., 2005. The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. *Aquatic Ecology*, **39**: 381-400.
- Mosello R., Ambrosetti W., Arisci S., Bettinetti R., Buzzi F.,

- Calderoni A., Carrara E., De Bernardi R., Galassi S., Garibaldi L., Leoni B., Manca M., Marchetto A., Morabito G., Oggioni A., Pagnotta R., Ricci D., Rogora M., Salmaso N., Simona M., Tartari G., Veronesi M., Volta P., 2010. Evoluzione recente della qualità delle acque dei laghi profondi sudalpini (Maggiore, Lugano, Como, Iseo e Garda) in risposta alle pressioni antropiche e alle variazioni climatiche. *Biologia Ambientale*, **24**: 167-177.
- Naselli-Flores L., Barone R., 2012. Phytoplankton dynamics in permanent and temporary Mediterranean waters: is the game hard to play because of hydrological disturbance? *Hydrobiologia*, **698**: 147-159.
- Nõges T., 2009. Relationships between morphometry, geographic location and water quality parameters of European lakes. *Hydrobiologia*, **633**: 33-43.
- Paerl H.W., Huisman J., 2008. Blooms like it hot. *Science*, **320**: 57-58
- Peeters F., Livingstone D.M., Goudsmit G.-H., Kipfer R., Forster R., 2002. Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. *Limnology and Oceanography*, **47**: 186-197.
- R Core Team, 2013. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Salmaso N., 2012. Influence of atmospheric modes of variability on the limnological characteristics of a deep lake south of the Alps. *Climate Research*, **51**: 125-133.
- Salmaso N., Cerasino L., 2012. Long-term trends and fine year-to-year tuning of phytoplankton in large lakes are ruled by eutrophication and atmospheric modes of variability. *Hydrobiologia*, **698**: 17-28.
- Salmaso N., Decet F., Consolaro S., Cordella P., 1999. Caratteristiche chimiche e situazione trofica del Lago di Garda nel corso dell'episodio di mescolamento delle acque della primavera del 1999. *Acqua Aria*, **9**: 83-89.
- Salmaso N., Mosello R., Garibaldi L., Decet F., Brizzio M.C., Cordella P., 2003. Vertical mixing as a determinant of trophic status in deep lakes: a case study from two lakes south of the Alps (Lake Garda and Lake Iseo). *Journal of Limnology*, **62**(1): 33-41.
- Salmaso N., Mosello R., 2010. Limnological research in the deep southern subalpine lakes: synthesis, directions and perspectives. *Advances in Oceanography and Limnology*, **1**: 29-66.
- Salmaso N., Buzzi F., Garibaldi L., Morabito G., Simona M., 2012. Effects of nutrient availability and temperature on phytoplankton development: A case study from large lakes south of the Alps. *Aquatic Sciences*, **74**: 555-570.
- Salmaso N., Buzzi F., Cerasino L., Garibaldi L., Leoni B., Morabito G., Rogora M., Simona M., 2013. Influence of atmospheric modes of variability on the limnological characteristics of large lakes south of the Alps: a new emerging paradigm. *Hydrobiologia*, 1-18, In press. DOI: 10.1007/s10750-013-1659-6
- Schindler D.W., 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **279**: 4322-4333.
- Schroeder K., Josey S.A., Herrmann M., Grignon L., Gasparini G.P., Bryden H.L., 2010. Abrupt warming and salting of the Western Mediterranean deep water after 2005: atmospheric forcings and lateral advection. *Journal of Geophysical Research*, **115**: C08029.
- Simona M., 2003. Winter and spring mixing depths affect the trophic status and composition of phytoplankton in the northern meromictic basin of Lake Lugano. *Journal of Limnology*, **62**: 190-206.
- Stenseth N.C., Ottersen G., Hurrell G.W., Mysterud A., Lima M., Chan K.-S., Yoccoz N.G., Ådlandsvik B., 2003. Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: the North Atlantic Oscillation, El Niño Southern Oscillation and beyond. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **270**: 2087-2096.
- Toreti A., Desiato F., Fioravanti G., Perconti W., 2010. Seasonal temperatures over Italy and their relationship with low-frequency atmospheric circulation patterns. *Climatic Change*, **99**: 211-227.
- Wagner C., Adrian R., 2009. Cyanobacteria dominance: Quantifying the effects of climate change. *Limnology and Oceanography*, **54**: 2460-2468.
- Wetzel R., 2001. *Limnology. Lake and river ecosystems*. 3rd edn, Academic Press, San Diego, 1006 pp.
- Weyhenmeyer G.A., 2001. Warmer winters: are planktonic algal populations in Sweden's largest lakes affected? *Ambio*, **30**: 565-571.
- Winder M., Sommer U., 2012. Phytoplankton response to a changing climate. *Hydrobiologia*, **698**: 5-16.