

# Riscaldamento globale: exergia, trofodinamica e zooplancton

Marina Manca, Anna Visconti, Riccardo de Bernardi

CNR Istituto per lo Studio degli Ecosistemi, Verbania Pallanza

Referente per la corrispondenza: m.manca@ise.cnr.it

Pervenuto il 16.5.2007; accettato il 22.12.2007

## Riassunto

Vengono brevemente esposti i risultati di due ricerche condotte in un ambiente lacustre (Lago Maggiore) oggetto di monitoraggio durante la fase di eutrofizzazione e di quella, più recente, di oligotrofizzazione, nel quale l'impatto dei cambiamenti climatici, ed in particolare del riscaldamento globale, è stato documentato. Ricerche di questo tipo forniscono le informazioni necessarie per discutere la validità dell'ipotesi secondo la quale gli effetti del riscaldamento sulle comunità planctoniche sarebbero pienamente sovrapponibili a quelli che si osservano con l'eutrofizzazione, e per verificare se la risposta al riscaldamento non sia maggiore, e non solo maggiormente leggibile, in sistemi a bassa trofia e, più in generale se, ed in che misura, essa possa dipendere dalle condizioni trofiche del sistema. Lo studio dell'impatto del clima su ambienti oggetto di ricerche intensive consente, tra le altre cose, di distinguere l'eccezione dalla regola e di utilizzare i dati relativi ad anni eccezionali dal punto di vista meteo-climatico come veri e propri esperimenti *in situ*. Le ricerche sul Lago Maggiore hanno evidenziato, da un lato, come la dipendenza dell'efficienza della catena trofica pelagica dalla temperatura ambientale sia mediata per il tramite delle relazioni trofiche, e governata, quanto a tempi di risposta, dalla fauna ittica. Dall'altro, hanno consentito di mettere in luce come la sovrapposizione tra riscaldamento ed eutrofizzazione sia in realtà solo apparente, essendo la fenologia delle popolazioni zooplanctoniche sostanzialmente mutata, anche in questo caso per il tramite di meccanismi trofodinamici.

PAROLE CHIAVE: zooplancton / eutrofizzazione / riscaldamento / trofodinamica / exergia / quasi-esperimenti

## Global warming, exergy, trophodynamics and the zooplankton

We report here the results of two studies on the impact of climate change, particularly of warming, carried out in a lake (Lake Maggiore) where eutrophication and re-oligotrophication were previously analyzed. These studies allow validation of the hypothesis that global warming would produce eutrophication-like effects on plankton communities. They also provide an opportunity to assess the relationship between climate warming and trophic status, and to verify that the climatic signal is more evident in remote sites because it is not overwhelmed by the nutrient enrichment signal, that predominates in eutrophic systems. In systems for which longterm data allow for the definition of a baseline situation, the impact of exceptional meteorological conditions can be assessed, using a "quasi-experimental" approach, comparable, as for results, to *in situ* experiments. The following annual response to ambient temperature was mediated by trophic dynamics, but was generally an increase in the efficiency of the food chain one year following warming events. During an exceptionally warm year, however, only the eutrophication-like effect on zooplankton, was apparent, as the population phenology was substantially different from that detected in more productive years.

KEY WORDS: zooplankton / eutrophication / climate warming / trophodynamics / exergy / quasi-experiments

## IL PROBLEMA SCIENTIFICO

Uno degli aspetti più interessanti nel panorama delle ricerche relative ai cambiamenti climatici è quello della risposta delle comunità biotiche di ambienti acquatici all'impatto del riscaldamento globale. Di particolare interesse è l'ipotesi secondo la quale il riscaldamento determinerebbe effetti nel complesso simili a quelli

dell'eutrofizzazione (SCHINDLER, 2001).

L'idea espressa da questa teoria non è poi così nuova: la letteratura scientifica ha evidenziato come le grandi modificazioni a carico delle comunità planctoniche nel corso della transizione dall'Ultimo Glaciale all'Olocene siano sostanzialmente sovrapponibili a quelle

che si osservano oggi giorno con l'aumento di trofia (RYVES *et al.*, 1996; MANCA *et al.*, 1996). Tale apparente sovrapposizione, comunemente accettata, è ancora poco supportata da dati sperimentali e offre un'occasione importante per l'avvio di studi miranti a mettere a fuoco non solamente il quadro generale delle modificazioni osservabili in rapporto ai due processi, ma anche le vie attraverso le quali essi operano a livello di comunità e di ecosistema.

Uno degli aspetti forse più importanti legati a tale ipotesi è che essa sposta l'attenzione delle ricerche sull'impatto del riscaldamento climatico dagli ecosistemi acquatici di siti remoti, verso i quali essa si era inizialmente indirizzata, a quelli di siti per i quali sia possibile operare un raffronto tra eutrofizzazione e riscaldamento globale.

Tra le motivazioni che portarono a focalizzare inizialmente l'attenzione degli studiosi dei cambiamenti climatici sui siti remoti, e sugli ambienti d'alta quota in particolare, vi fu quella del loro essere "naturalmente oligotrofi o ultraoligotrofi", e dunque idonei ad evidenziare l'impatto di un riscaldamento, non mascherato dagli effetti, dominanti, dell'eutrofizzazione.

Tuttavia, tale presupposto fu basato più su una sorta di comune buon senso, che non sul risultato di evidenze sperimentali: ed è dalla sostanziale mancanza di dati in merito che è nata l'esigenza di avviare progetti aventi per obiettivo primario lo studio dell'impatto del riscaldamento in rapporto allo stato di trofia. Ricerche di questo tipo possono essere affrontate, previa verifica della suscettibilità a modificazioni climatiche, in indagini estensive su ambienti rappresentativi, allo stato attuale, di diverse situazioni trofiche, ovvero in studi di tipo intensivo su ambienti nei quali siano state documentate l'eutrofizzazione e, più di recente, l'oligotrofizzazione (MANCA e RUGGIU 1998; MANCA *et al.*, 2000).

Le ricerche basate su studi intensivi consentono, fra le altre cose, l'individuazione di anni eccezionali dal punto di vista meteo-climatico, e il loro utilizzo per analisi che potremmo definire, con EDMONDSON (1993) "quasi-experiments", esperimenti *in situ*, nei quali la risposta delle comunità biotiche a specifiche situazioni ambientali può essere verificata a partire da conoscenze pregresse e approfondite sulla "linea di base" del sistema. Questo approccio metodologico consente la valorizzazione delle ricerche avviate negli anni settanta in risposta all'esigenza di ridurre i pesanti costi sociali derivanti dall'eutrofizzazione.

Vale la pena qui ricordare che tali attività non furono solamente la massima espressione di un monitoraggio a forte valenza socio-economica, ma furono anche l'occasione per analisi e sintesi di ampio respiro scientifico.

## ATTIVITÀ DI RICERCA

Ambienti sensibili alle modificazioni climatiche nei quali l'eutrofizzazione e l'oligotrofizzazione siano state documentate sono divenuti l'oggetto di ricerche volte a comprendere l'impatto del riscaldamento sullo zooplancton e sull'efficienza della rete trofica pelagica.

Per ragioni di brevità e a titolo esemplificativo verranno qui presentati i risultati ottenuti in uno degli ambienti oggetto delle ricerche, il Lago Maggiore. In questo lago l'impatto di eventi meteo-climatici può essere analizzato in situazioni di diversa trofia: per sua natura oligotrofo, il Lago Maggiore è andato incontro, negli anni settanta, ad una rapida accelerazione dell'eutrofizzazione, seguita da una più lenta ri-oligotrofizzazione, determinata dalla sostanziale riduzione del carico di nutrienti algali nel lago, e principalmente del fosforo.

Oggetto di ricerche di limnologia fisica, in un areale a monitoraggio meteo-climatico da oltre 50 anni (AMBROSETTI *et al.*, 2006), il Lago Maggiore è l'ambiente nel quale, per primo, l'impatto del riscaldamento globale è stato documentato e discusso anche relativamente agli aspetti idrodinamici, di primaria importanza per le comunità planctoniche e la loro dinamica stagionale (AMBROSETTI e BARBANTI, 1999).

Oltre a tracciare il quadro dell'evoluzione a lungo termine, le ricerche hanno fornito la base conoscitiva per l'identificazione e la caratterizzazione di anni eccezionali dal punto di vista meteo-climatico, consentendo l'applicazione di quell'approccio *quasi-sperimentale* allo studio della risposta delle comunità planctoniche ai mutamenti climatici, cui sopra si è fatto cenno.

In questo breve testo presenteremo i risultati di due ricerche, la prima delle quali relativa all'evoluzione a lungo termine, la seconda, ad un anno eccezionale, in quanto essi consentono di mettere in luce due diversi aspetti degli effetti del riscaldamento globale.

## RISULTATI RILEVANTI

Il primo contributo deriva dalle ricerche relative alla stima dell'efficienza delle reti trofiche pelagiche, condotte, fin dagli anni novanta, da de Bernardi e collaboratori (DE BERNARDI e JØRGENSEN, 1998).

Tali ricerche si basano sull'applicazione del concetto di *exergia*, intesa come una misura energetica della distanza di un sistema ecologico dall'equilibrio termodinamico, all'analisi delle reti trofiche lacustri e dei fattori che influenzano i meccanismi di base del loro funzionamento, soprattutto in termini di efficienza di utilizzo delle risorse alimentari disponibili (DE BERNARDI e JØRGENSEN, 1998). Un esempio dei risultati ottenibili mediante questo approccio metodologico è riportato in figura 1. Il calcolo è basato sull'elaborazione di dati tra loro omogenei raccolti in campagne di ricerche a lungo termine e rielaborati in maniera omogenea. I dati quan-

titativi relativi ai popolamenti batterici, fitoplanctonici, zooplanctonici ed ittici sono stati espressi in termini di biomassa media annuale e quindi trasformati in  $\text{kJ/m}^3$  attraverso coefficienti *exergetici* opportunamente calcolati (DE BERNARDI e CANALE, 1995).

Da tali dati sono state ottenute delle piramidi di *exergia* per la catena alimentare pelagica del Lago Maggiore dal 1979 al 1991, a partire dalle quali sono stati calcolati i contenuti *exergetici* medi annuali dei produttori, degli erbivori e dei carnivori nel loro complesso. In questo tipo di analisi, la misura dell'efficienza media annuale del trasferimento di energia da un anello della catena alimentare al successivo è data dal valore del coefficiente angolare ottenuto per ogni anno.

L'analisi della figura permette di evidenziare come i valori dei coefficienti angolari per ogni singolo anno (e quindi di efficienza della catena alimentare in quell'anno) siano in stretta relazione con i valori di temperatura media registrati nello strato mescolato nell'anno precedente. L'interpretazione di questa relazione, ed in particolare dei tempi di risposta alle variazioni di temperatura osservate, è in chiave trofo-dinamica: temperature più elevate nelle acque lacustri più superficiali in un determinato anno possono garantire per la fauna ittica un maggior successo riproduttivo e, al tempo stesso, un metabolismo ed un accrescimento somatico più elevati (VOLTA, 2000), che si possono tradurre, nell'anno successivo, in maggiori contenuti *exergetici* del popolamento nel suo complesso.

Se da una parte è certo che i popolamenti batterici, fitoplanctonici e zooplanctonici, in virtù del loro breve "turnover time", difficilmente possono mantenere una memoria dei processi fisici che abbiano interessato l'anno precedente, dall'altra, il popolamento ittico certamente mantiene una "memoria" degli eventi pregressi anche a distanza di alcuni anni, il che conferma il loro ruolo fondamentale nel determinare l'efficienza della catena alimentare (DE BERNARDI *et al.*, 1990).

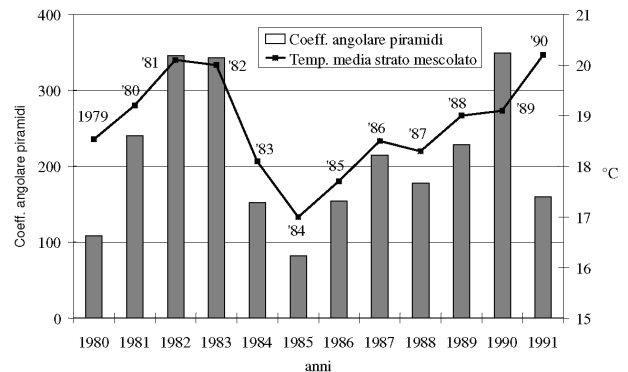
Il secondo contributo è relativo ad uno studio condotto nel 2003, risultato l'anno più caldo dell'ultimo secolo, con un più precoce e pronunciato riscaldamento dello strato d'acqua importante per la vita dello zooplancton, quello compreso nei primi 50 metri di profondità. In esso, la massima di Giugno risultava di  $5^\circ\text{C}$  più elevata di quella solitamente registrata in questo periodo dell'anno (VICONTI *et al.*, 2007).

Le conoscenze relative alle modificazioni nel popolamento zooplanctonico del Lago Maggiore durante l'eutrofizzazione hanno permesso di ipotizzare un quadro realistico dell'impatto del riscaldamento nell'ipotesi che esso produca effetti simili a quelli di un aumento della produttività (VICONTI *et al.*, 2007). Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata in figura 2.

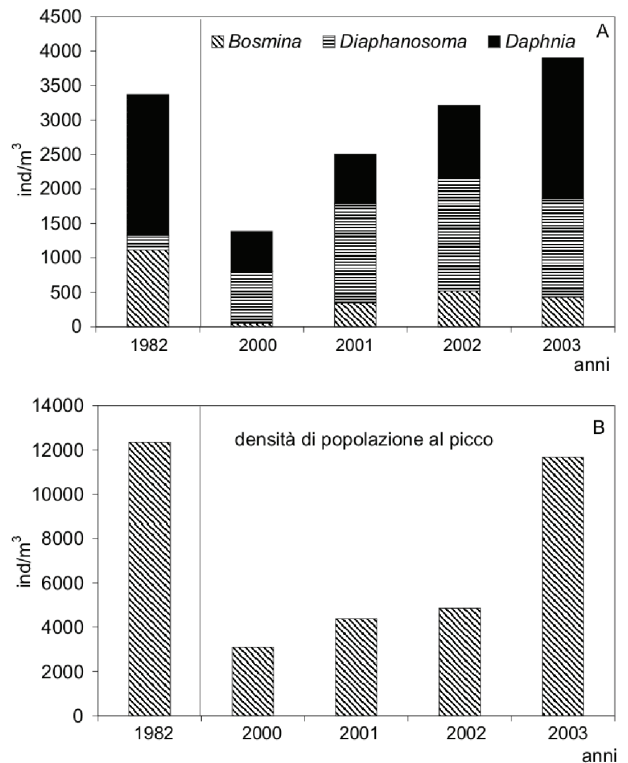
La biomassa zooplanctonica totale è risultata netta-

mente più elevata nel 2003 rispetto agli anni pregressi. Alla base di tale incremento è stato l'aumento numerico di *Daphnia*, il più efficiente e il più grosso tra i cladoceri filtratori, la cui base alimentare nel pelago del Lago Maggiore è principalmente costituita dal fitoplancton.

La sua presenza media è risultata più che doppia rispetto a quella degli anni precedenti e del tutto para-



**Fig. 1.** Stima dell'efficienza della catena alimentare pelagica e temperatura media dello strato di mescolamento estivo delle acque del Lago Maggiore nel periodo in studio (DE BERNARDI e JØRGENSEN, 1998).



**Fig. 2. A)** Densità medie annuali dei principali taxa di Cladoceri; **B)** densità di popolazione massima annuale di *Daphnia* registrate in anni del periodo 2000-2003 e confronto con il valore del 1982, anno del periodo mesotrofo in quale *Daphnia* raggiunse il massimo storico del picco in densità di popolazione.

gonabile a quella che venne registrata nel 1982, anno del periodo di piena mesotrofia del lago, nel quale *Daphnia* raggiunse il massimo storico del picco in densità numerica (DE BERNARDI *et al.*, 1990). A determinare il valore osservato nel Maggio 2003 è stata sostanzialmente la componente giovane della popolazione, favorita da accresciute disponibilità alimentari (VISCANTI *et al.*, 2007). L'incremento nei valori di densità e biomassa dello zooplancton osservato è in accordo con quanto previsto dalla letteratura sugli effetti dell'aumento di temperatura sul tasso di crescita delle popolazioni (HALL e BURNS, 2002): ciclo vitale, tempi di sviluppo, velocità di crescita, ed efficienza di utilizzo del cibo degli organismi componenti le popolazioni zooplanctoniche dipendono dalla temperatura. È in virtù di tale influenza che si spiega il verificarsi, con il riscaldamento, di densità di popolazione tipicamente registrate in situazioni di aumentata trofia, in accordo con quanto ipotizzato da SCHINDLER (2001).

## BIBLIOGRAFIA

- AMBROSETTI W., BARBANTI L., 1999. Deep water warming in lakes: An indicator of climatic change. *Journal of Limnology*, **58**(1): 1-9.
- AMBROSETTI W., BARBANTI L., ROLLA, A. 2006. The climate of Lago Maggiore area during the last fifty years. *Journal of Limnology*, **65**, Suppl. 1: 1-62.
- DE BERNARDI R., GIUSSANI G., MANCA M., RUGGIU D., 1990. Trophic status and the pelagic system in Lago Maggiore. *Hydrobiologia*, **191**: 1-8.
- DE BERNARDI R., JØRGENSEN S., 1998. Exergy content in the pelagic food chain of Lago Maggiore. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, **3**: 135-138.
- DE BERNARDI R., CANALE C. 1995. Ricerche pluriennali (1948-1992) sull'ecologia dello zooplankton del Lago Maggiore. *Documenta Istituto Italiano di Idrobiologia*, **55**: 68 pp.
- EDMONDSON W.T., 1993. Experiments and quasi-experiments in limnology. *Bulletin of Marine Science*, **53**(1): 65-83.
- HALL C. J., BURNS C.W., 2002. Mortality and growth responses of *Daphnia carinata* to increases in temperature and salinity. *Freshwater Biology*, **47**: 451-458.
- MANCA M., NOCENTINI A.M., BELIS, C.A., COMOLI P., CORBELLA L., 1996. Invertebrate fossil remains as indicators of late Quaternary environmental changes in Latium crater lakes (L. Albano and L. Nemi). In: Guilizzoni P., Oldfield F. (Eds), 1996, Paleoenvironmental Analysis of Italian Crater Lake and Adriatic Sediments (PALICLAS). *Mem. Ist. ital. Idrobiol.*, **55**: 149-176.
- MANCA M., RUGGIU D., 1998. Consequences of pelagic food web changes during a long-term lake oligotrophication process. *Limnology & Oceanography*, **43**: 1368-1373.
- MANCA M., RAMONI C., COMOLI P., 2000. The decline of *Daphnia hyaline galeata* in Lago Maggiore: a comparison of the population dynamics before and after oligotrophication. *Aquatic Sciences*, **62**: 142-153.
- MANCA M., TORRETTA B., COMOLI P., AMSINCK S.L., JEPPESEN E., 2007a. Major changes in trophic dynamics in large, deep sub-alpine Lake Maggiore from 1943 to 2002: A high resolution comparative palaeo-neolimnological study. *Freshwater Biology*, **52** (11): 2256-2269.
- MANCA M., PORTOGALLO M., BROWN M.E., 2007b. Shifts in phenology of *Bythotrephes longimanus* and its modern success in Lake Maggiore as a result of changes in climate and trophy. *Journal of Plankton Research*, **29**(6): 515-525.
- SCHINDLER D.W., 2001. The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium. *Canadian Journal Fisheries and Aquatic Sciences*, **58**: 18-29.
- RYVES D.B., JONES V.J., GUILIZZONI P., LAMI A., MARCHETTO A., BATTARBEE R.W., BETTINETTI R., DEVOY E.C., 1996. Late Pleistocene and Holocene environmental changes at Lake Albano and Lake Nemi (central Italy) as indicated by algal remains. In: Guilizzoni P., Oldfield F. (Eds), 1996. Paleoenvironmental Analysis of Italian Crater Lake and Adriatic Sediments (PALICLAS). *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, **55**: 119-148.
- VISCANTI A., MARCHITELLI A., DE BERNARDI R., MANCA M., 2007. 2003, the warmest year of the last hundred years: implication for Lake Maggiore's zooplanktonic cladoceran community. *Atti del XVII congresso A.I.O.L.*, **19**: 245-248.
- VOLTA P., 2000. *Il regime alimentare delle diverse forme di coregone (Coregonus spp.) del Lago Maggiore alla luce della recente evoluzione trofica ambientale*. Tesi di laurea, facoltà di Scienze Biologiche, Università dell'Insubria, Varese, Master Thesis: 60 pp.

## PROSPETTIVE FUTURE

Da quanto espresso risulta chiaro come lo zooplancton lacustre rappresenti una componente estremamente utile per la verifica degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi acquatici. La piena sovrapposizione tra la densità di popolazione osservata in fase di mesotrofia e quella di un anno eccezionalmente caldo può essere interpretata come una conferma del fatto che il riscaldamento mimerebbe, quanto ad effetti, l'eutrofizzazione.

Tuttavia, tale analogia è, con tutta probabilità, solamente apparente: ad un'analisi più accurata emergono sostanziali differenze di carattere fenologico, riconducibili ad effetti sia diretti che indiretti del riscaldamento (MANCA *et al.*, 2007a e b): su questi, ed in particolare sui meccanismi trofodinamici attraverso i quali essi agiscono sulle comunità planctoniche e sull'ecosistema pelagico, sono rivolti gli studi attualmente in corso.