

4.4. Considerazioni generali sull'evoluzione del chimismo delle acque lacustri e tributarie

I principali aspetti dell'idrochimica delle acque lacustri e tributarie riscontrati nell'ultimo anno di indagini (2007), unitamente ad alcune considerazioni relative al decennio 1978-2007, sono riportati nei precedenti capitoli 2.3 e 3.2. In questo capitolo vengono invece presentate e discusse le serie di dati a lungo termine dei principali nutrienti algali, alla luce del loro ruolo nell'evoluzione trofica lacustre, e di alcune variabili chimiche, in larga parte dipendenti dalle caratteristiche geochemiche del bacino imbrifero, che hanno presentato andamenti temporali o variazioni degne di nota.

Mentre fino alla fine degli anni '80 il contenuto ionico delle acque era rimasto pressoché costante, negli ultimi 20 anni ha mostrato una tendenza all'aumento, che trova riscontro anche nei valori di conducibilità. La figura 4.4a mostra il trend dei valori mensili di alcalinità e conducibilità a 20 °C, come medie su tutta la colonna d'acqua, misurati nella stazione di massima profondità dal 1978 al 2007. La tendenza all'aumento appare più regolare per l'alcalinità, passata dai valori di circa 0,75 meq l⁻¹ degli anni '80 agli attuali 0,82-0,83 meq l⁻¹. La conducibilità, rappresentativa del contenuto ionico totale delle acque, presenta invece un trend meno regolare, con aumenti più accentuati tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90, e poi nell'ultimo quinquennio; nel complesso i valori sono passati da circa 140 µS cm⁻¹ a 20 °C ai 150 µS cm⁻¹ rilevati negli anni 2006-2007.

Un trend positivo, con pendenza accentuata nel periodo 2003-2007, è stato riscontrato anche per altre specie ioniche quali calcio, sodio e cloruri. La mancanza di un trend nel caso dei solfati è giustificata dal fatto che l'aumento associato agli apporti dal bacino, comune a tutti i prodotti del weathering, è stato probabilmente bilanciato da una diminuzione delle deposizioni atmosferiche di solfati; queste ultime sono infatti diminuite, dagli anni '80 ad oggi, del 50 % circa nell'areale del bacino imbrifero del Lago Maggiore, grazie alla riduzione delle emissioni di SO₂ in atmosfera [28]. Considerando il contenuto ionico totale delle acque lacustri, misurato alla circolazione primaverile, l'aumento è stato da 2,95-3,05 meq l⁻¹ tra la fine degli anni '80 - inizio degli anni '90, a 3,10-3,15 meq l⁻¹ nell'ultimo quinquennio.

Come già osservato nel paragrafo 3.2.1, i valori di calcio, alcalinità e di conseguenza anche la conducibilità, hanno presentato un andamento stagionale anomalo nell'ultimo quinquennio: negli anni 2003, 2005 e parzialmente 2006, non si è infatti verificato il consueto fenomeno della precipitazione del carbonato di calcio, a seguito del quale i valori epilimnici delle variabili considerate diminuiscono nettamente nei mesi estivi (Figg 3.2.1c, d). La spiegazione potrebbe essere ricercata nelle condizioni meteorologiche, che hanno visto un'alternanza di anni particolarmente siccitosi (2003, 2005) ed anni con un volume di precipitazione leggermente più elevato (2004, 2006, 2007), pur se inferiore alla media di lungo periodo. In particolare, il periodo primavera estate, sia nel 2003 che nel 2005, è stato caratterizzato da temperature elevate e da una quasi totale assenza di precipitazioni.

Per quanto riguarda i nutrienti algali, le variazioni dei loro contenuti medi a lago e nelle acque tributarie sono risultati di lieve entità nel quinquennio 2003-2007, soprattutto se confrontate con quelle avvenute negli anni '80 e '90. Le variazioni recenti sono comunque importanti per verificare le tendenze evolutive dei composti dell'azoto e la risposta del livello trofico lacustre agli apporti di fosforo dal bacino, responsabile del controllo della produzione algale lacustre.

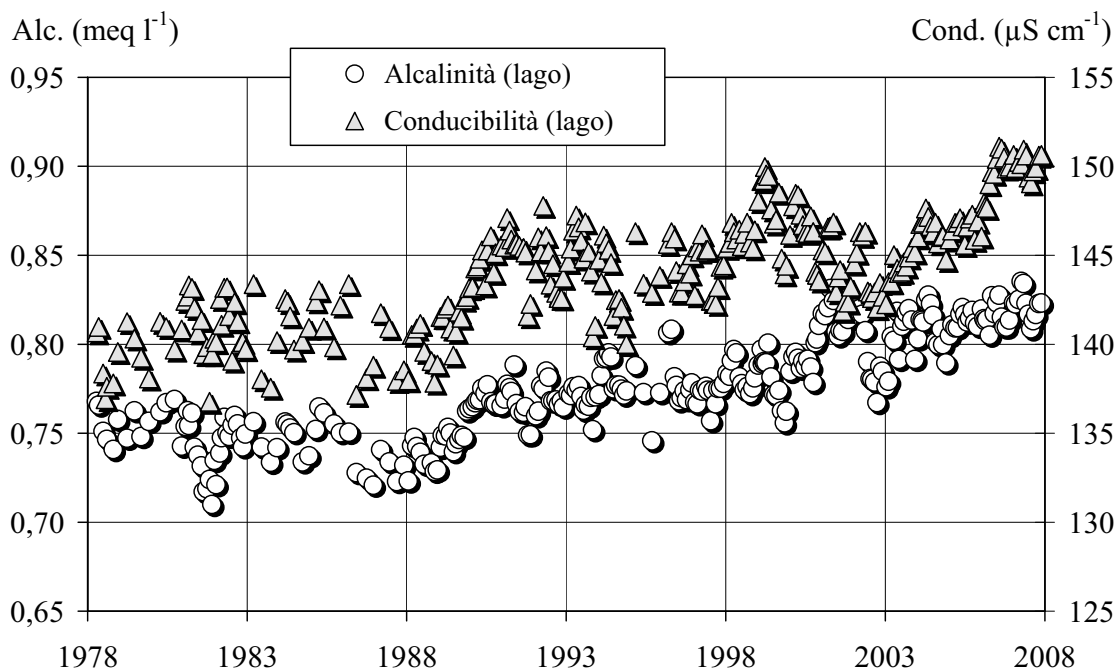


Fig. 4.4a. Lago Maggiore: evoluzione delle concentrazioni mensili di alcalinità e conducibilità a 20 °C (valori medi ponderati sui volumi dalla superficie al fondo nella stazione di massima profondità a Ghiffa).

La crescita delle concentrazioni a lago di nitrati ed azoto totale è continuata anche negli anni recenti, con un tasso di circa $0,004 \text{ mg N l}^{-1} \text{ a}^{-1}$, fino a raggiungere massimi di concentrazione media annuale nel 2007 pari a $0,87 \text{ mg N l}^{-1}$ di azoto nitrico e di $0,95 \text{ mg N l}^{-1}$ di azoto totale, mentre i contenuti di azoto organico sono rimasti stabili attorno a $0,10 \text{ mg N l}^{-1}$ (Fig. 4.4b). La causa dell'incremento di azoto nitrico e totale nelle acque lacustre è da ricercare negli afflussi meteorici sull'intero bacino drenante. Le indagini sui carichi veicolati dai tributari hanno infatti dimostrato il ruolo determinante delle deposizioni atmosferiche per i carichi di azoto a lago [1]. Il contributo da scarichi puntiformi, il trattenimento e/o rilascio operati dalla copertura vegetale, le fluttuazioni stagionali in acque emissarie di laghi tributari, la produzione o il consumo in alveo nonché nei suoli dei bacini possano svolgere un ruolo significativo, ma limitatamente ad alcuni periodi stagionali o in condizioni di siccità prolungata. Al contrario, nei periodi con precipitazioni particolarmente intense, quando è massimo il dilavamento superficiale dei bacini drenanti e si riduce il tempo di contatto con le superfici ed il trattenimento da parte del suolo, gli apporti meteorici trasferiscono ai corsi d'acqua un carico aggiuntivo di azoto invece di svolgere un'azione di diluizione, come avviene per altre variabili chimiche. La correlazione tra apporti meteorici e carichi di azoto appare ben evidente dalla figura 4.4c, che riporta la regressione tra gli afflussi totali sul bacino e gli apporti annuali di azoto dal 1978 al 2007, comprensivi delle frazioni dovute alle precipitazioni atmosferiche sullo specchio lacustre.

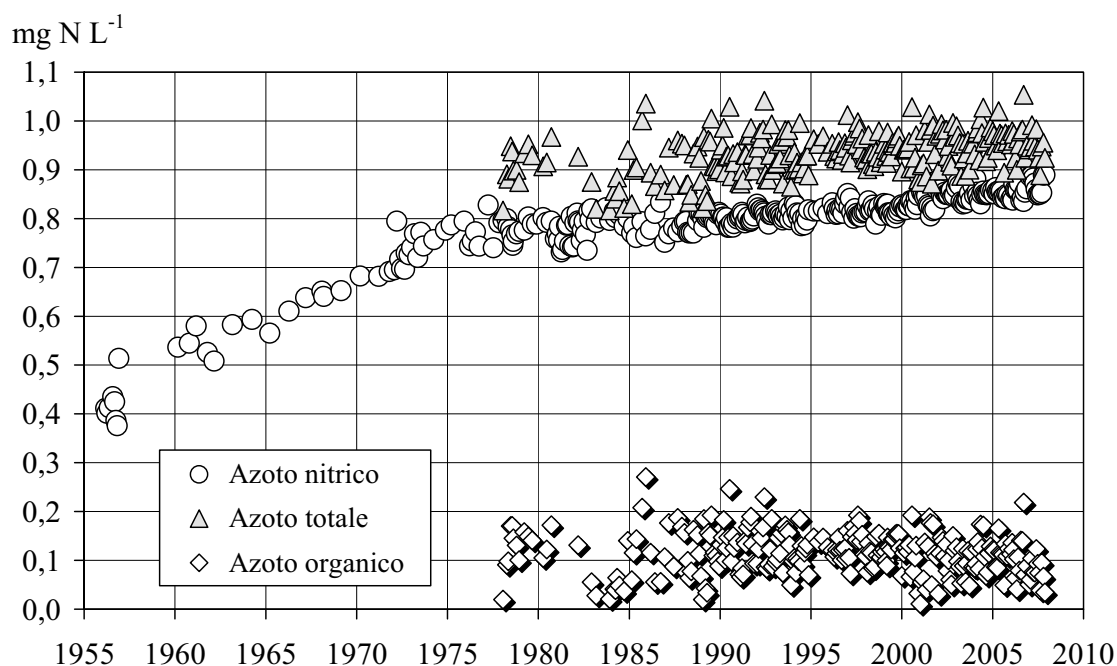


Fig. 4.4b. Lago Maggiore: evoluzione delle concentrazioni di azoto totale, nitrico e organico (valori medi ponderati sui volumi dalla superficie al fondo nella stazione di massima profondità a Ghiffa).

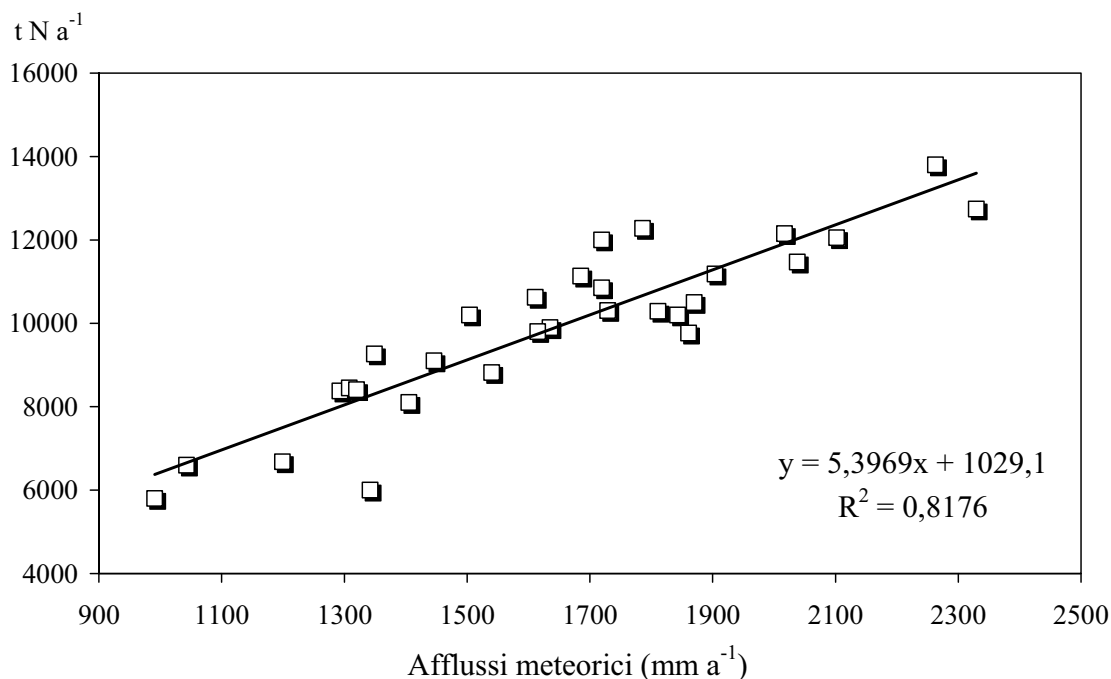


Fig. 4.4c. Lago Maggiore. Regressione tra gli apporti annuali di azoto totale a lago (somma dei carichi dall'areale emerso, dalle precipitazioni atmosferiche sullo specchio lacustre e dalla fascia litorale non campionata) e gli afflussi meteorici sul bacino imbrifero.

La regressione altamente significativa ($R^2 = 0,8176$, $p < 0,001$) conferma lo stretto legame esistente tra le due variabili: i carichi minori infatti corrispondono agli anni meno piovosi ed i massimi a quelli caratterizzati da un elevato volume di precipitazione

(Fig. 4.4c). Nel caso del Lago Maggiore si può quindi affermare che gli apporti di azoto derivano per la massima parte da sorgenti diffuse e, nello specifico, dalle deposizioni atmosferiche sull'intero bacino imbrifero, piuttosto che da sorgenti puntuali.

Bilanci di dettaglio eseguiti considerando gli effettivi apporti di azoto dalle deposizioni atmosferiche, misurati mediante una rete di stazioni collocate nel bacino imbrifero del Lago Maggiore, hanno dimostrato come le deposizioni contribuiscano in misura variabile tra il 65 ed il 75 % al carico totale di azoto a lago [1]. Inoltre, i bilanci eseguiti per i singoli bacini tributari dimostrano una tendenza alla riduzione nel tempo della capacità di trattenere azoto, con un conseguente aumento della quantità rilasciata alle acque, e quindi veicolata a lago. La ragione è da ricercarsi nella progressiva saturazione della capacità di trattenimento dei suoli, dovuta ad apporti atmosferici di azoto estremamente elevati e costanti, variabili tra 15 e 25 kg N ha⁻¹ a⁻¹ nel bacino imbrifero del Lago Maggiore, con un gradiente ben definito da nord a sud [28]. L'evidenza della condizione di saturazione dei suoli per la maggior parte dei bacini versanti appare anche dal trend positivo delle concentrazioni di nitrati nei corsi d'acqua campionati, e dall'assenza di una stagionalità di tali concentrazioni, a conferma della ridotta o assente capacità di trattenimento anche nel periodo di massimo sviluppo della vegetazione [29].

L'andamento delle concentrazioni di fosforo reattivo e totale misurate nella stazione di massima profondità dal 1956 ad oggi, espresse come valori medi ponderati sui volumi dalla superficie al fondo, sono riportate in figura 4.4d. Il periodo fino all'inizio degli anni '90 è stato caratterizzato da una marcata riduzione dei contenuti medi a lago, che hanno raggiunto livelli simili a quelli degli anni '70.

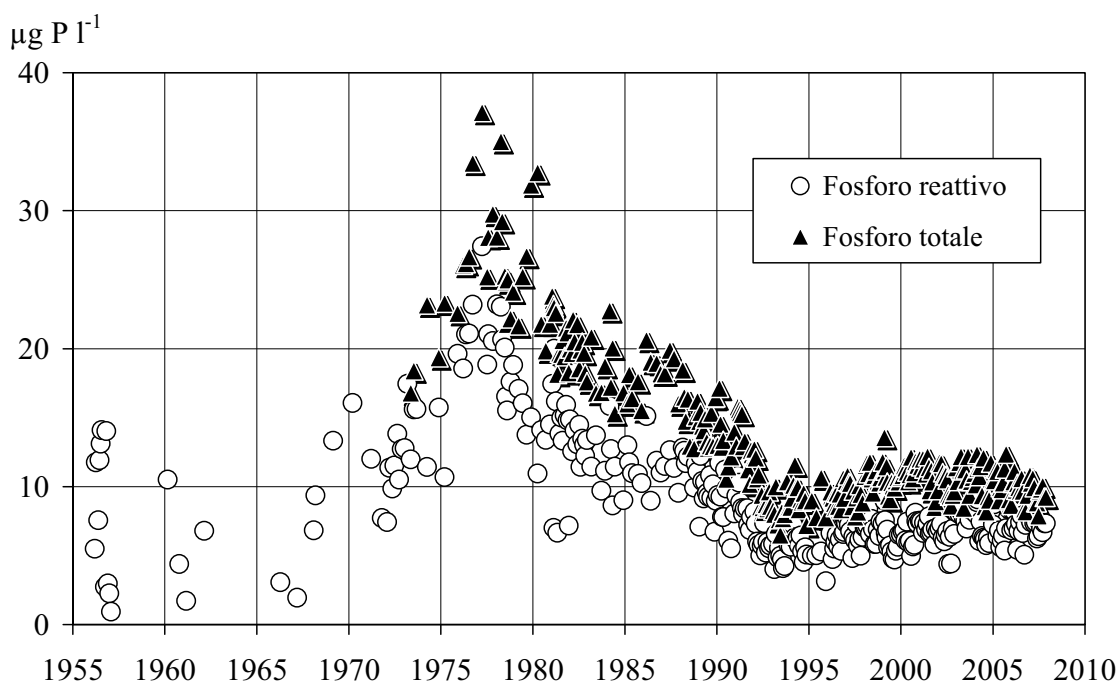


Fig. 4.4d. Lago Maggiore: evoluzione delle concentrazioni di fosforo reattivo e totale (valori medi ponderati sui volumi dalla superficie al fondo nella stazione di massima profondità a Ghiffa).

Successivamente, le concentrazioni di fosforo totale si sono stabilizzate su livelli compresi tra 8 e 10 $\mu\text{g P l}^{-1}$, anche se il quinquennio 1998-2002 appare caratterizzato da

valori medi leggermente più alti (11-12 $\mu\text{g P l}^{-1}$ nel biennio 1999-2000). Nell'ultimo quinquennio (2003-2007) le concentrazioni medie di fosforo totale sembrano presentare una lieve tendenza ad un'ulteriore diminuzione, e nel 2007 non hanno superato i 10 $\mu\text{g P l}^{-1}$ in nessun mese dell'anno. L'andamento del fosforo reattivo è risultato più stabile nel tempo, con contenuti medi che, dopo aver raggiunto i minimi nel 1993, si sono mantenuti stabilmente tra 4 e 8 $\mu\text{g P l}^{-1}$.

Indipendentemente da limitate oscillazioni dei valori medi, che sono da imputare alla normale variabilità interannuale, il contenuto di fosforo delle acque può essere ritenuto rassicurante per quanto riguarda l'aspetto trofico. In base ai valori riportati in letteratura ed ai diagrammi statistici dell'OECD, per un lago con le caratteristiche morfometriche ed idrologiche del Maggiore, l'attuale ambito di variazione delle concentrazioni di fosforo è tale da mantenere le acque in condizioni di oligotrofia.

L'attuale stato trofico delle acque del Lago Maggiore è stato raggiunto grazie alla progressiva riduzione degli apporti di fosforo dal bacino. I carichi annuali misurati nell'ultimo quinquennio (2003-2007) sono risultati i più bassi dell'intero periodo di osservazione (1978-2007), compresi tra il minimo di 169 t P a^{-1} del 2006 ed il massimo di 218 t P a^{-1} del 2003 (paragrafo 2.3.2, Fig. 2.3.2c). Le caratteristiche delle acque tributarie hanno subito un miglioramento costante nei 30 anni di indagini, anche se per alcuni corsi d'acqua, quali Boesio, Bardello, e in misura minore Tresa e Vevera, permane uno stato di alterazione. L'andamento delle concentrazioni medie areali di fosforo dal 1978 al 2007, come medie quinquennali, mostra come i valori nell'areale piemontese siano diminuiti del 45 % tra il primo e il terzo quinquennio, per poi mantenersi su valori compresi tra 22 e 26 $\mu\text{g P l}^{-1}$ nei quinquenni successivi (Fig. 4.4e).

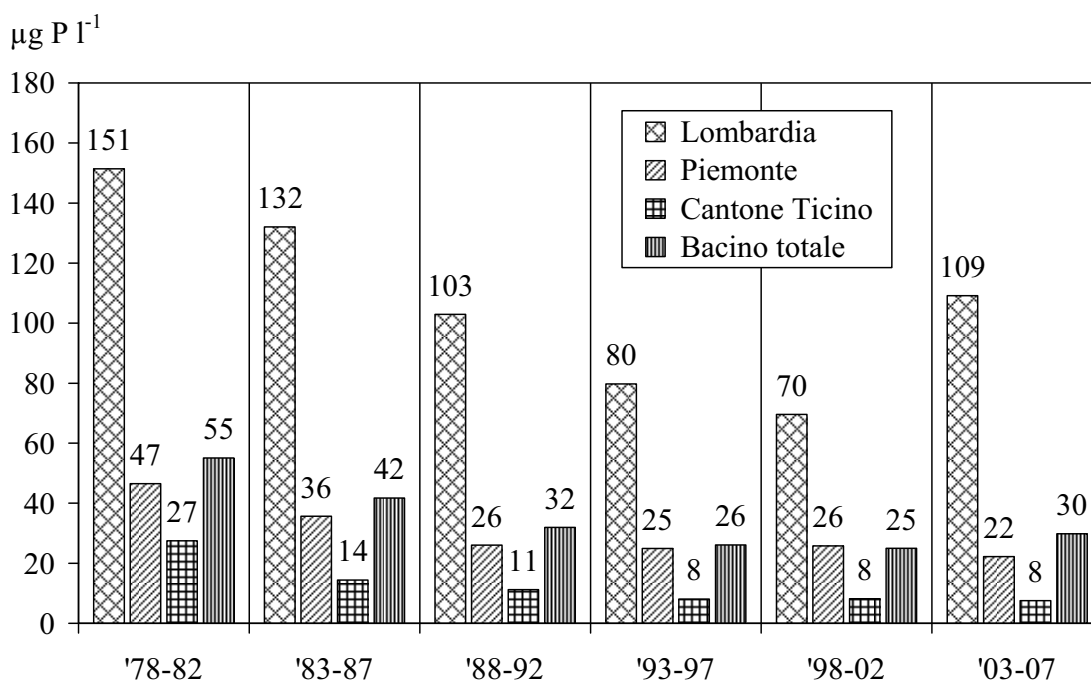


Fig. 4.4e. Concentrazioni medie areali nei quinquenni dal 1978 al 2007 di fosforo totale nelle acque tributarie campionate in Lombardia (compresi gli apporti derivanti dal Lago di Lugano attraverso il Fiume Tresa), Piemonte, Cantone Ticino e nell'intero bacino.

In Canton Ticino le concentrazioni medie areali si sono dimezzate già nel secondo quinquennio, per poi diminuire ulteriormente e stabilizzarsi attorno a $11 \mu\text{g P l}^{-1}$ dal quinquennio 1988-1992 in poi, con un decremento complessivo del 73 % dall'inizio delle misure. Nelle acque lombarde infine, dopo una riduzione del 54 % circa tra il primo ed il quarto quinquennio, le concentrazioni medie hanno mostrato un'inversione di tendenza, risalendo a $109 \mu\text{g P l}^{-1}$ nell'ultimo quinquennio, a causa principalmente del peggioramento che ha interessato il Torrente Bardello (vedi paragrafo 2.3.1, Fig. 2.3.1d).

La riduzione complessiva dei contenuti medi di fosforo negli afflussi a lago da tutto il bacino è stata del 46 %. Nonostante l'incremento da 25 a $30 \mu\text{g P l}^{-1}$ verificatosi nell'ultimo quinquennio, e le consistenti differenze di qualità tra le diverse acque tributarie campionate, le attuali concentrazioni possono essere ritenute compatibili con il mantenimento di un soddisfacente stato trofico delle acque lacustri.

Il miglioramento della qualità delle acque tributarie nell'ultimo trentennio trova conferma negli andamenti dei contenuti medi di azoto ammoniacale ed organico, passati rispettivamente da 0,18 e $0,31 \text{ mg N l}^{-1}$ nel quinquennio 1978-1982 agli attuali valori di 0,06 e $0,15 \text{ mg N l}^{-1}$. Nel complesso quindi, la diminuzione più accentuata nei contenuti medi di fosforo, così come di azoto ammoniacale, nelle acque tributarie ha interessato il periodo fino alla metà degli anni '90. Successivamente le concentrazioni medie si sono stabilizzate, mostrando però un lieve incremento negli ultimi anni di osservazione (paragrafo 2.3.1, Fig. 2.3.1i).

I contributi di fosforo derivanti dagli areali lombardo, piemontese e del Canton Ticino confermano quanto già osservato relativamente alle concentrazioni medie (Fig. 4.4f): nonostante la diminuzione nei 30 anni di indagini, pari a circa il 60 %, gli apporti lombardi - comprendenti, attraverso il Tresa, anche la porzione svizzera del bacino del Lago di Lugano - permangono su livelli troppo elevati ($0,06 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ nell'ultimo quinquennio). I contributi dall'areale piemontese hanno raggiunto valori più che accettabili ($0,018 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), con una riduzione complessiva del 68 %; quelli ticinesi infine, che già nel terzo quinquennio avevano raggiunto condizioni di ottima qualità, hanno mostrato un ulteriore miglioramento nell'ultimo quinquennio, raggiungendo valori di $0,008 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. È necessario sottolineare come il miglioramento a livello di carichi di fosforo totale dalle acque tributarie verificatosi nell'ultimo quinquennio sia però in larga parte attribuibile alle portate ridotte che hanno caratterizzato questo periodo, a seguito dei limitati apporti meteorici sul bacino (vedi paragrafo 2.3.2). Le concentrazioni medie di fosforo totale infatti non hanno mostrato variazioni significative (Fig. 4.4e), o sono addirittura aumentate nel caso dell'areale lombardo.

I dati dell'ultimo quinquennio confermano le marcate differenze esistenti a livello dei singoli tributari, con i conseguenti riflessi sulla qualità delle acque rivierasche. Si può affermare comunque che il contributo medio di fosforo dalle acque tributarie, compreso tra $0,02$ e $0,03 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ nell'ultimo decennio, è compatibile con il mantenimento di condizioni oligotrofe delle acque lacustri.

I dati relativi all'ultimo quinquennio sono stati utilizzati per aggiornare la collocazione del Lago Maggiore nel diagramma statistico dell'OECD, che mette in relazione la trofia lacustre con il tempo teorico di rinnovo e gli apporti annuali di fosforo espressi come concentrazione calcolata dal rapporto tra il carico in entrata e i deflussi attraverso l'emissario (Fig. 4.4g). Il percorso nei quinquenni dal 1978 al 2002 mostra come il lago sia passato gradualmente da condizioni di mesotrofia avanzata ($53 \mu\text{g P l}^{-1}$ come fosforo totale in ingresso nel quinquennio 1978-1982), ad una situazione

(22 $\mu\text{g P l}^{-1}$ nel periodo 1998-2002) praticamente corrispondente all'obiettivo del carico ammissibile per mantenere condizioni oligotrofe.

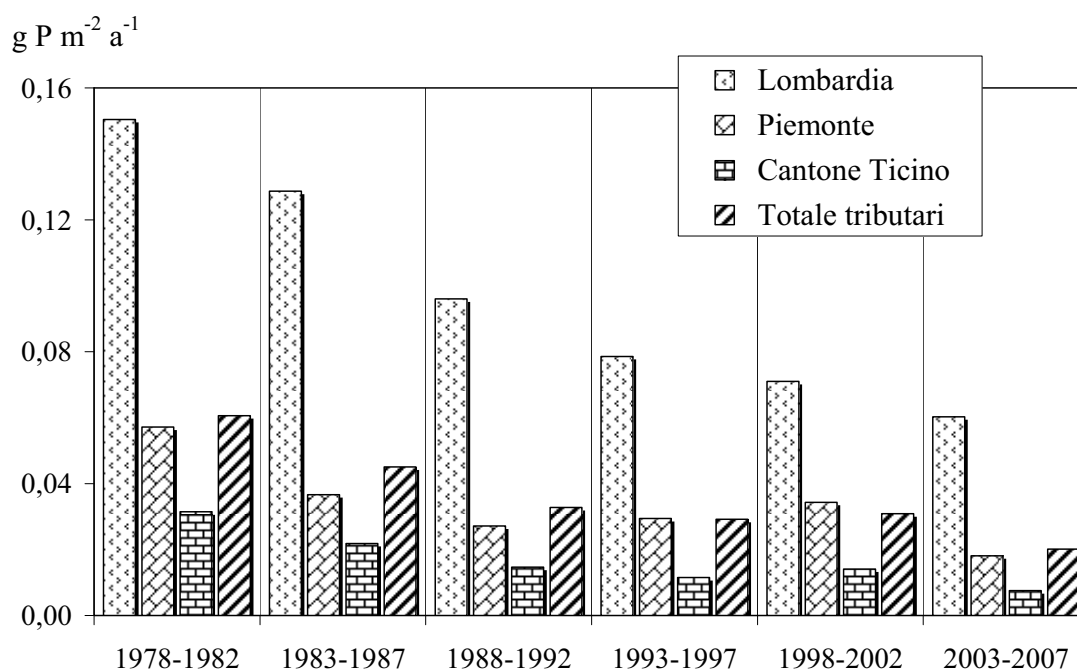


Fig. 4.4f. Contributi areali medi quinquennali dal 1978 al 2002 di fosforo totale dalle acque tributarie piemontesi, lombarde e del Cantone Ticino, nonché dall'insieme dei tributari campionati.

I dati del periodo più recente (28 $\mu\text{g P l}^{-1}$ nel quinquennio 2003-2007) mostrano invece una lieve inversione di tendenza, dovuta principalmente ad una diminuzione dei deflussi attraverso l'emissario: gli ultimi anni sono stati infatti caratterizzati da precipitazioni scarse (da un minimo di 991 mm nel 2005 ad un massimo di 1504 mm nel 2004 come afflussi totali sul bacino imbrifero), con riflessi sulle portate medie annue del Ticino emissario, che, ad eccezione del 2004, sono risultate sempre nettamente inferiori alla media storica, e sul tempo teorico di ricambio delle acque lacustri. (Fig. 4.4g).

L'andamento delle concentrazioni degli apporti, calcolate come rapporto tra carichi e deflussi attraverso l'emissario, a confronto con le concentrazioni medie areali misurate nelle acque tributarie, è riportato anche in figura 4.4h, dove si evidenziano chiaramente i valori più elevati registrati negli anni più siccitosi, cioè 2003, 2005, 2006 e 2007.

Il valore di fosforo in ingresso (P_i) calcolato in base all'approccio OECD per l'ultimo quinquennio rimane comunque indicativo di bassa produttività delle acque. Tale condizione è coerentemente documentata dall'andamento delle concentrazioni medie annuali di fosforo totale misurate a lago, che si sono mantenute stabilmente attorno a 10 $\mu\text{g l}^{-1}$ nell'ultimo decennio (Fig. 4.4h).

Nel complesso i dati relativi al quinquennio 2003-2007 confermano il miglioramento complessivo delle caratteristiche trofiche del lago, conseguente alla diminuzione degli apporti di nutrienti dal bacino imbrifero. I risultati dimostrano anche come la variabilità idrologica interannuale svolga un ruolo importante, sia per quanto riguarda la chimica delle acque lacustri che quella dei tributari. I volumi di precipitazione ridotti che hanno caratterizzato gli anni più recenti, in particolare il 2003 ed il 2005 che sono risultati

essere gli anni più siccitosi dell'ultimo trentennio, hanno avuto dei riflessi sulla variabilità stagionale di alcune variabili chimiche nelle acque lacustri, così come sui carichi di nutrienti veicolati a lago. Alla luce di queste considerazioni, nel valutare l'evoluzione futura del livello trofico delle acque ed in generale del loro chimismo, si dovrà inevitabilmente tener conto della variabilità climatica, in particolare della intensificazione di eventi estremi quali precipitazioni intense e periodi di siccità.

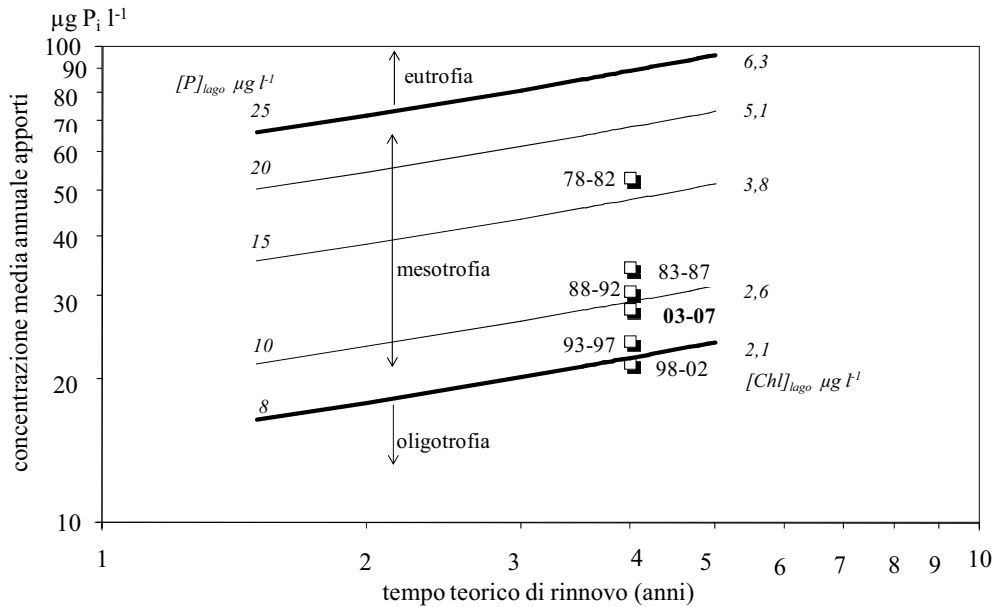


Fig. 4.4g. Lago Maggiore: diagramma di sintesi dell'OECD nei quinquenni dal 1978 al 2007.

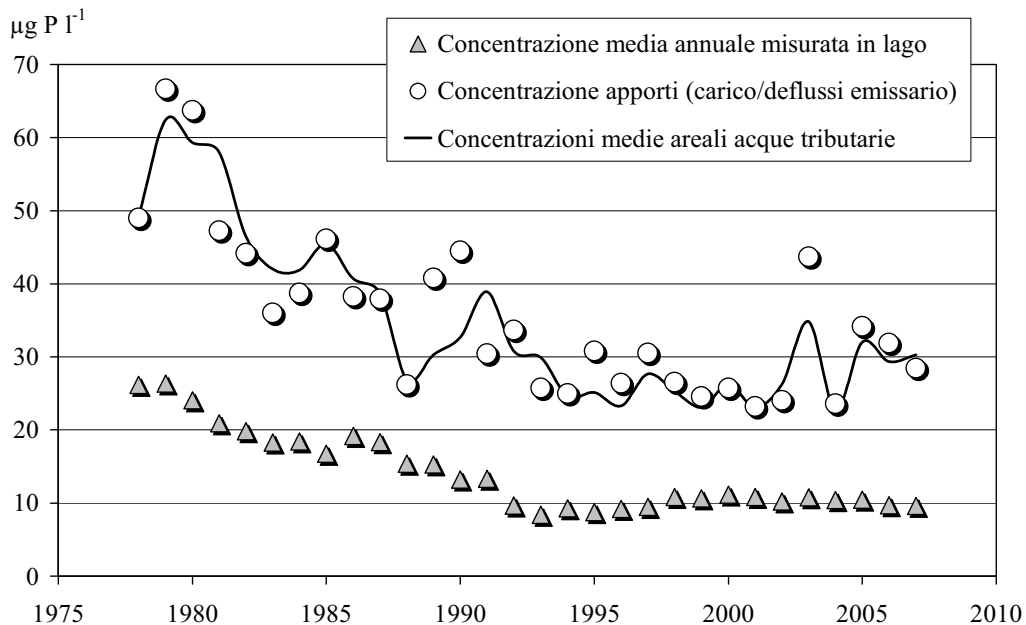


Fig. 4.4h. Lago Maggiore. Evoluzione delle concentrazioni medie annuali di fosforo totale nel lago, negli afflussi totali (rapporto tra carico e deflusso) e nelle acque tributarie (valori ponderati dalle concentrazioni areali dei singoli tributari).