

5. IDROCHIMICA LACUSTRE E DEI TRIBUTARI, BILANCIO DEI NUTRIENTI

5.1. Chimica lacustre

5.1.1. Chimismo di base

I campionamenti nella zona di massima profondità del Lago Maggiore (bacino di Ghiffa) nel 2009 sono stati eseguiti mensilmente con le stesse modalità utilizzate negli anni precedenti. I prelievi hanno interessato le profondità 0, -30, -50, -100, -150, -200, -250, -300, -360 metri. In data 17 Marzo e 21 Settembre si sono effettuati inoltre dei prelievi (superficie, -5, -10, -20, -30, -50, -100 metri) nella stazione di Lesa, collocata nella parte meridionale del lago, allo scopo di evidenziare eventuali differenze rispetto alla stazione di centro lago.

I valori di pH, conducibilità ed il bilancio ionico delle due stazioni sono messi a confronto in tabella 5.1, considerando i dati del campionamento di Marzo, mese in cui è massima l'estensione verticale del mescolamento tardo invernale. I dati si riferiscono a valori medi ponderati sui volumi dalla superficie al fondo per il periodo 2005-2009.

Tab. 5.1. Bilancio ionico (meq l⁻¹), pH e conducibilità a 20 °C (Cond.; μS cm⁻¹) alla circolazione primaverile delle acque del Lago Maggiore (valori medi ponderati sui volumi) nelle stazioni di Ghiffa e Lesa nel quinquennio 2005-2009.

	GHIFFA					LESA				
	14.03.05	13.03.06	12.03.07	10.03.08	16.03.09	15.03.05	14.03.06	13.03.07	11.03.08	17.03.09
HCO ₃ ⁻	0,81	0,82	0,83	0,83	0,82	0,81	0,82	0,82	0,83	0,82
SO ₄ ⁼	0,61	0,63	0,61	0,61	0,61	0,60	0,63	0,61	0,64	0,61
Cl ⁻	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08
NO ₃ ⁻	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Σ anioni	1,55	1,58	1,58	1,57	1,57	1,54	1,58	1,58	1,61	1,57
Ca ⁺⁺	1,13	1,13	1,16	1,15	1,14	1,12	1,16	1,17	1,15	1,13
Mg ⁺⁺	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31	0,31	0,30
Na ⁺	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14
K ⁺	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Σ cationi	1,59	1,60	1,63	1,63	1,62	1,58	1,63	1,65	1,64	1,61
Σ ioni	3,14	3,18	3,21	3,20	3,19	3,11	3,21	3,23	3,25	3,19
pH	7,38	7,45	7,49	7,38	7,41	7,49	7,42	7,56	7,54	7,56
Cond.	147	148	150	153	152	146	150	150	154	151

I dati della tabella 5.1 confermano la sostanziale stabilità del chimismo di base in entrambe le stazioni. Sia le concentrazioni ioniche che i valori di pH e conducibilità non variano infatti in modo significativo da un anno all'altro. Gli ultimi anni sono stati caratterizzati da una lieve tendenza all'aumento del contenuto ionico totale, confermato anche dai valori di conducibilità. L'aumento, pur se limitato a 1-2 meq l⁻¹, sembra interessare principalmente le concentrazioni di calcio, bicarbonati, sodio e cloruri, come discusso in maggior dettaglio nella parte relativa ai trend di alcalinità e conducibilità.

Anche il contributo percentuale dei diversi ioni al contenuto ionico totale è rimasto pressoché invariato nel 2009 rispetto agli anni precedenti, con calcio e bicarbonati a rappresentare più del 60%, seguiti da solfati, magnesio e sodio (rispettivamente 19, 10 e 4%), mentre il contributo di nitrati, cloruri e potassio è attorno all'1-2% del totale.

I dati della tabella 5.1 evidenziano chiaramente come le due stazioni, quella di centro lago, a Ghiffa, e quella nella zona meridionale, a Lesa, presentino un chimismo del tutto simile al periodo della circolazione. Anche considerando i dati del campionamento di Settembre, in condizioni di stratificazione, si può osservare come i profili delle principali variabili chimiche nello strato da 0 a 100 m di profondità siano analoghi nelle due stazioni (Fig. 5.1).

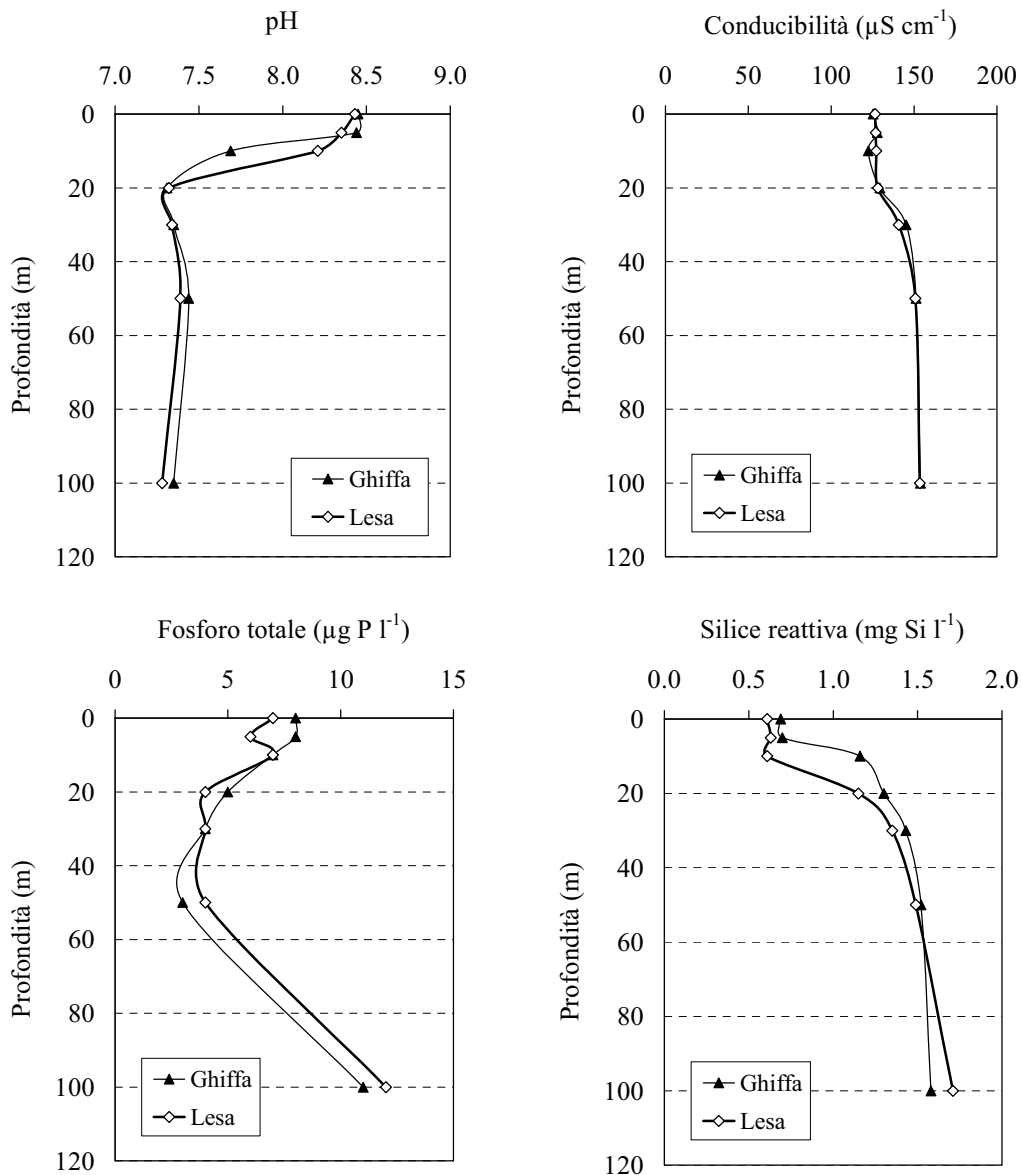


Fig. 5.1 Profili di pH, conducibilità, fosforo totale e silice reattiva nello strato da 0 a 100 m nelle stazioni di Ghiffa e Lesa rilevati nei campionamenti del 22 e 21 settembre 2009, rispettivamente.

Questi dati sembrano dimostrare una sostanziale stabilità spaziale nel chimismo delle acque lacustri. Il tema della differenza tra la stazione di centro lago ed altri punti di campionamento viene ripreso nel paragrafo sulla distribuzione orizzontale (5.1.4).

La figura 5.2 mostra i valori medi di pH ed ossigeno misurati nello strato epilimnico (0-25 m) della stazione pelagica di Ghiffa nell'ultimo decennio (2000-2009). Gli andamenti stagionali di entrambe le variabili risentono dei processi biologici che interessano le acque superficiali (fotosintesi e respirazione) e del rimescolamento della colonna, presentando massimi nei mesi estivi, a causa della produzione da parte del fitoplancton, e minimi nei mesi tardo invernali.

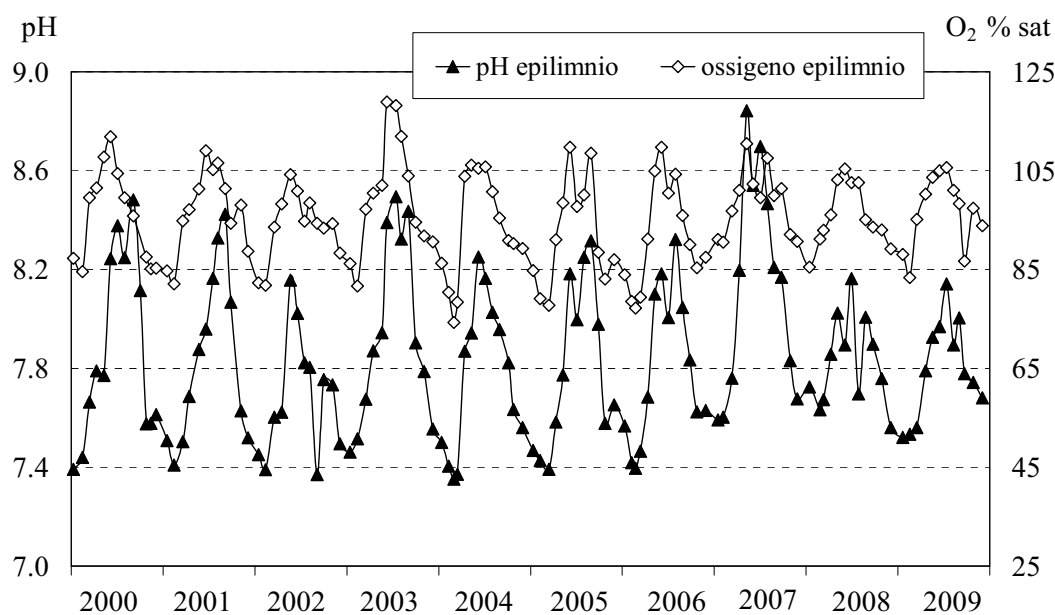


Fig. 5.2 Lago Maggiore nel periodo 2000-2009: pH e saturazione d'ossigeno nello strato epilimnico (0-25 m) (valori medi ponderati sui volumi nella stazione di massima profondità).

Per quanto riguarda l'andamento dei valori epilimnici di pH, la figura 5.2 evidenzia un andamento differente per il biennio 2008-2009 rispetto agli anni precedenti: i massimi estivi si sono infatti mantenuti al di sotto di 8,2, rispetto a valori compresi generalmente tra 8,3 e 8,5, ed i minimi invernali non sono scesi al di sotto di 7,5-7,6, risultando quindi più elevati rispetto ai valori degli inverni precedenti (7,4 unità di pH). Nel complesso quindi l'escursione stagionale dei valori di pH sembra essersi ridotta negli ultimi due anni (Fig. 5.2).

Un'analogia osservazione può essere fatta per l'ossigeno, espresso come percentuale di saturazione: anche se in modo meno evidente rispetto ai valori di pH, anche l'ossigeno infatti ha mostrato negli anni 2008-2009 variazioni stagionali leggermente meno accentuate rispetto agli anni precedenti, rimanendo compreso tra 83-85% nei mesi invernali e 105-106% in quelli estivi (Fig. 5.2).

La ridotta variabilità stagionale di pH e ossigeno nell'ultimo biennio potrebbe dipendere da un minor controllo da parte della produzione primaria, a causa di una riduzione nella presenza di alcuni gruppi di diatomee nel periodo primaverile e di cianobatteri nei mesi estivi. Questo potrebbe essere dovuto alla bassa temperatura

dell'aria nella primavera del 2008 e 2009, che ha rallentato lo sviluppo del fitoplancton, con un effetto che si è protratto fino ai mesi estivi. Un altro fattore importante può essere il livello del lago che si è mantenuto elevato anche nei mesi estivi negli anni 2008-2009, fattore questo che sembra ostacolare lo sviluppo di cianobatteri (Bertoni *et al.*, 2007).

Gli andamenti di alcalinità e conducibilità, in epilimnio e nell'intero lago, nel periodo 2000-2009, sono riportati rispettivamente nelle figure 5.3 e 5.4. Rispetto alle anomalie riscontrate in alcuni anni (es. 2003, 2005, 2006), nel 2009 l'andamento stagionale di queste due variabili è stato invece quello tipico che caratterizza le acque lacustri, con un picco nei mesi primaverili, seguito da un calo estivo dovuto al fenomeno della precipitazione del carbonato di calcio. Questo processo determina un brusco calo delle concentrazioni di diversi soluti, principalmente calcio, carbonati e bicarbonati; trattandosi degli ioni che maggiormente contribuiscono al contenuto ionico totale, si osserva anche una riduzione del valore di conducibilità (Fig. 5.3 e 5.4).

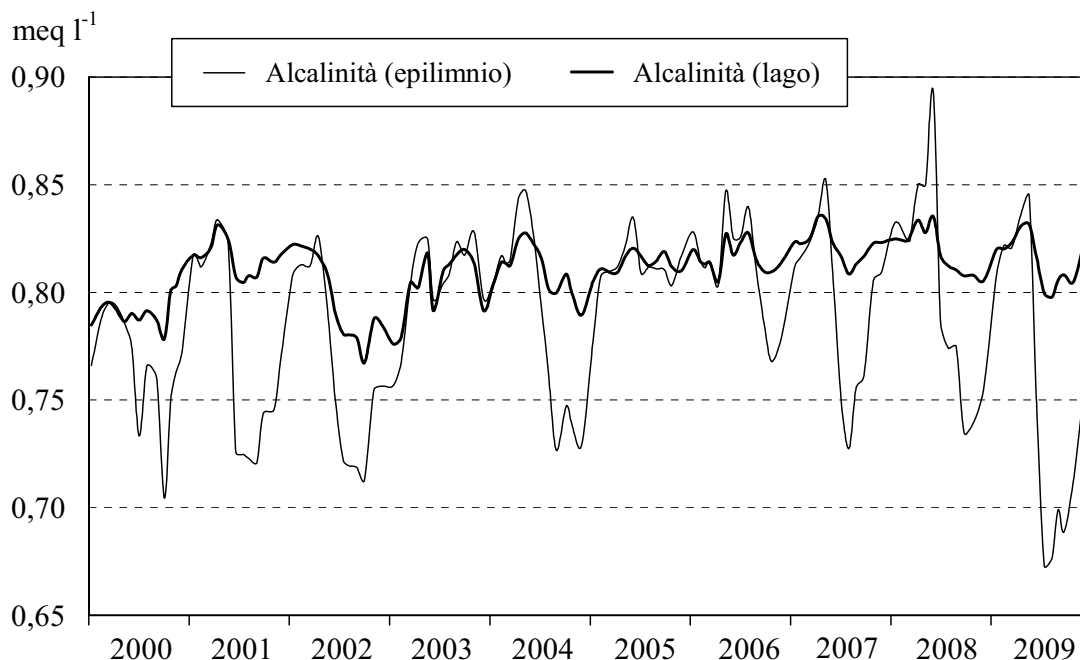


Fig. 5.3. Lago Maggiore (Ghiffa). Andamento nel decennio 2000-2009 dei valori medi ponderati sui volumi d'alcalinità totale nello strato epilimnico (0-25 m) e nell'intero lago (0-370 m).

Rispetto agli anni precedenti, nel 2009 il calo estivo dei valori è stato particolarmente accentuato, raggiungendo a Luglio minimi di $0,67 \text{ meq l}^{-1}$ e $124 \mu\text{S cm}^{-1}$ per alcalinità e conducibilità, rispettivamente. I massimi primaverili ($0,85 \text{ meq l}^{-1}$ e $151-152 \mu\text{S cm}^{-1}$), pur non raggiungendo i valori elevati del 2008, sono risultati in linea con quelli degli anni 2006-2007. Per quanto riguarda l'andamento a lungo termine dei valori medi sulla colonna d'acqua, il 2009 ha fatto registrare una battuta d'arresto nell'aumento dei valori rilevato nell'ultimo decennio, in particolare dal 2003 in poi. Per interpretare correttamente il trend delle variabili è necessario comunque considerare tutti i dati disponibili, e non limitarsi ad un singolo anno che potrebbe aver risentito in misura maggiore di particolari condizioni meteorologiche. Questo potrebbe essere il caso del 2009, caratterizzato da precipitazioni abbondanti, soprattutto nei periodi primaverile ed

estivo (731 e 662 mm rispettivamente, nella stazione di Pallanza, rispetto a 464 e 458 mm come valori medi del periodo 1955-2008). Le precipitazioni potrebbero infatti aver determinato l'accentuato calo estivo dei valori di conducibilità e alcalinità nelle acque epilimniche (Fig. 5.3 e 5.4).

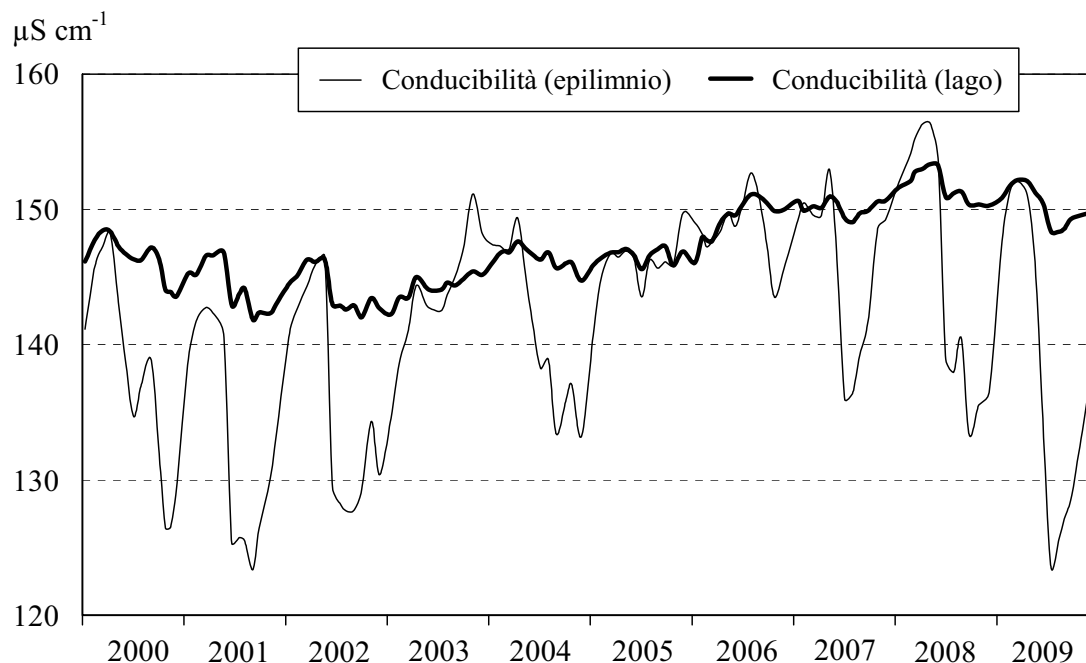


Fig. 5.4. Lago Maggiore (Ghiffa). Andamento nel decennio 2000-2009 dei valori medi ponderati sui volumi di conducibilità a 20 °C nello strato epilimnico (0-25 m) e nell'intero lago (0-370 m).

Considerando tutta la serie storica dei dati, come valori medi annui (Fig. 5.5), il trend in aumento di conducibilità e alcalinità è confermato, pur con una lieve flessione dei valori nel 2009. L'andamento delle due variabili appare molto simile fino al 2003, anno dopo il quale la conducibilità presenta un aumento più accentuato. Ciò potrebbe derivare dall'aumento nelle concentrazioni di altri soluti, quali sodio e cloruri (vedi Tab. 5.1).

Queste tendenze nel loro complesso potrebbero essere messe in relazione a fattori meteo-climatici che hanno dei riflessi sul chimismo delle acque, quali: una maggior concentrazione dei soluti, in particolare nei mesi estivi, per effetto del riscaldamento degli strati d'acqua superficiali; un maggior apporto di soluti dal bacino a causa di una maggior frequenza ed intensità di eventi di precipitazioni brevi e intense (Ambrosetti *et al.*, 2006); un dilavamento più accentuato di rocce e suoli nei bacini versanti, nelle parti in quota, a causa di una riduzione del periodo di copertura nevosa (Rogora *et al.*, 2003).

Per quanto riguarda sodio e cloruri in particolare, la tendenza all'aumento delle concentrazioni interessa anche le acque di alcuni dei maggiori torrenti tributari, e potrebbe quindi essere attribuita al dilavamento del sale utilizzato come antigelo nei mesi invernali. In tutti i casi si tratta di ipotesi che, per poter essere verificate, necessitano il mantenimento del monitoraggio e l'aggiornamento delle serie storiche esistenti.

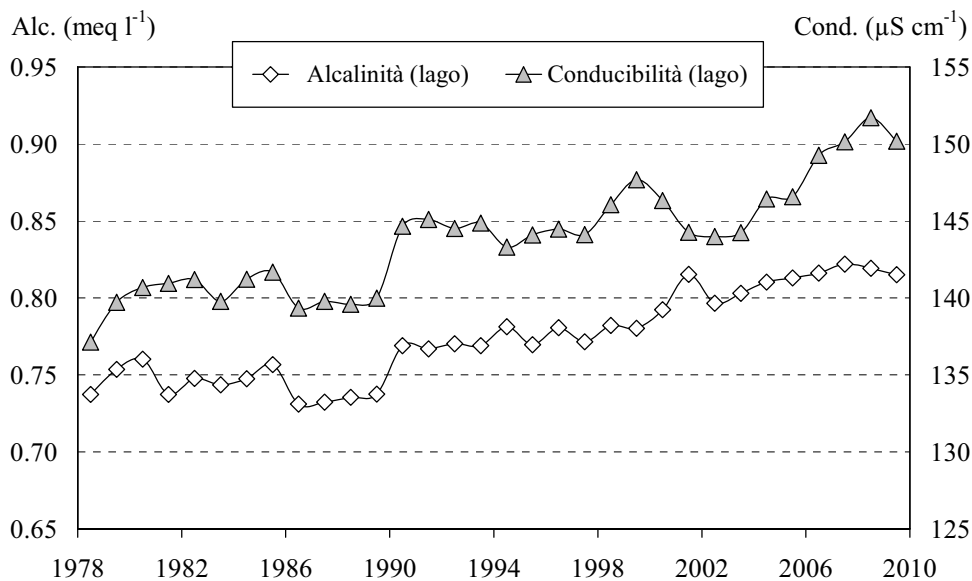


Fig. 5.5. Lago Maggiore: andamento dal 1978 al 2009 dei valori medi annui di conducibilità e alcalinità (valori medi ponderati dalla superficie al fondo nella stazione di massima profondità).

5.1.2. Composti dell'azoto, del fosforo e dei silicati

La figura 5.6 riporta i valori medi ponderati sulla colonna d'acqua di azoto nitrico e totale nella stazione di Ghiffa dal 2000 al 2009. Quasi il 90% del contenuto di azoto totale delle acque lacustri è rappresentato dall'azoto nitrico, mentre la parte restante è a carico dell'azoto organico, le cui concentrazioni in epilimnio sono riportate in figura 5.7, insieme a quelle di azoto nitrico e totale nello stesso strato (0-25 m).

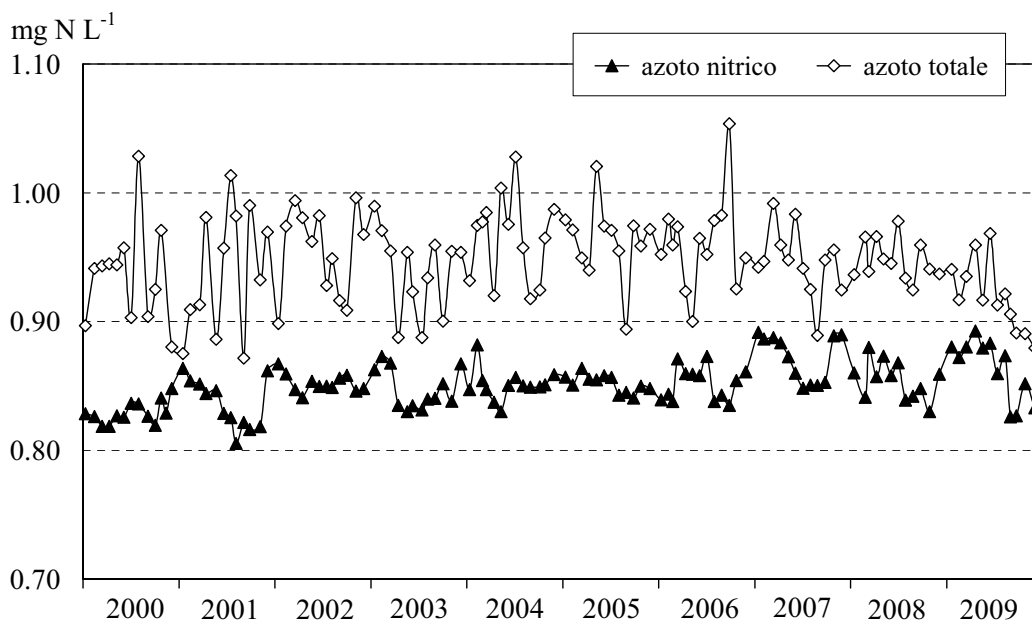


Fig. 5.6. Lago Maggiore: concentrazioni di azoto totale e nitrico nel decennio 2000-2009 (valori medi ponderati sui volumi dalla superficie al fondo nella stazione di massima profondità).

I nitrati nel 2009, come media sulla colonna d'acqua, sono risultati compresi tra 0,88-0,89 e 0,83 mg N l⁻¹. L'azoto totale ha raggiunto i massimi di 0,96-0,97 mg N l⁻¹ nei mesi estivi per poi scendere a valori inferiori a 0,90 mg N l⁻¹ a partire da Settembre (Fig. 5.6). Le concentrazioni di azoto nitrico nel 2009 sono state in linea con quelle rilevate negli ultimi anni, confermando una lieve tendenza all'aumento dei valori nel tempo (da 0,80-0,82 mg N l⁻¹ alla fine degli anni '90 a 0,86-0,88 mg N l⁻¹ negli anni più recenti). Questa tendenza può essere spiegata dall'aumento degli apporti di nitrati a lago dalle acque dei tributari, interessate nella maggior parte dei casi da un trend positivo delle concentrazioni di nitrati. Queste a loro volta sono un effetto degli apporti atmosferici di azoto, particolarmente elevati nell'areale del bacino imbrifero del Lago Maggiore, che determinano una progressiva saturazione di azoto dei suoli con rilascio di nitrati alle acque superficiali (Rogora *et al.*, 2006; Rogora, 2007). Per l'azoto totale il trend non appare altrettanto evidente, probabilmente a causa della maggior variabilità interannuale delle concentrazioni (Fig. 5.6).

Anche l'andamento in epilimnio dei composti dell'azoto, compreso l'azoto organico, nel 2009 non ha presentato scostamenti significativi rispetto agli anni precedenti (Fig. 5.7). Le concentrazioni di azoto nitrico e totale presentano un andamento stagionale caratterizzato da massimi invernali (0,89 e 1,00 mg N l⁻¹, rispettivamente) e minimi estivi (0,65 e 0,76 mg N l⁻¹), a causa del consumo di nitrati da parte delle alghe fitoplanctoniche. Questi valori nel 2009 sono risultati solo leggermente inferiori a quelli del 2008; lo stesso è avvenuto per livelli di azoto organico, compreso tra 0,05 e 0,16 mg N l⁻¹ (Fig. 5.7).

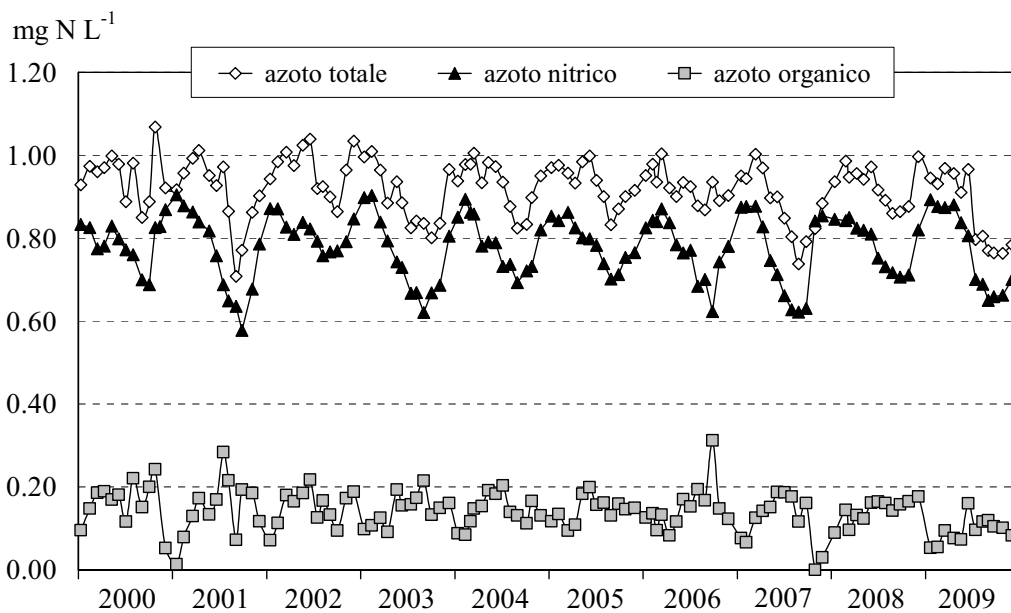


Fig. 5.7 Concentrazioni di azoto nitrico, organico e totale nello strato epilimnico (0-25 m) nel decennio 2000-2009.

Le concentrazioni sia di azoto nitrico che totale rilevate nella stazione di Lesa sono risultate leggermente inferiori a quelle della stazione di massima profondità nel mese di Settembre (0,68-69 rispetto a 0,72-0,74 alle profondità 0 e 10 m per quanto riguarda l'azoto totale). A Marzo i valori di azoto totale sono stati invece leggermente più elevati

a Lesa al di sotto dei 10 m di profondità, ma le differenze, dell'ordine di 0,05-0,06 mg N l⁻¹, rientrano nella normale variabilità delle concentrazioni.

Le concentrazioni di azoto nitroso, determinato esclusivamente nei campionamenti di Marzo e Settembre, sono state pari rispettivamente a 1 e 4 µg N l⁻¹ nelle acque epilimniche, risultando pressoché assenti se si considera la media sull'intera colonna d'acqua. Le concentrazioni epilimniche e medie di azoto ammoniacale si sono mantenute al di sotto di 18 e 6 µg N l⁻¹, rispettivamente, nel corso del 2009. A Lesa le concentrazioni sono state pari a 1-2 µg N l⁻¹ a Marzo e comprese tra 1 e 13 µg N l⁻¹ a Settembre.

La figura 5.8 riporta le concentrazioni medie sulla colonna d'acqua di fosforo reattivo e totale misurate nella stazione di Ghiffa nel periodo 2000-2009. I dati del 2009 confermano un'ulteriore tendenza alla diminuzione dei valori osservata negli ultimi 3-4 anni, con concentrazioni di fosforo totale che, anche nei mesi estivi, si mantengono attorno a 10-11 µg P l⁻¹. Anche i valori di fosforo reattivo nel 2009 sono stati compresi tra 6 e 8 µg P l⁻¹, con massimi primaverili (8 µg P l⁻¹ ad Aprile) e minimi a fine estate (µg P l⁻¹ a fine Agosto).

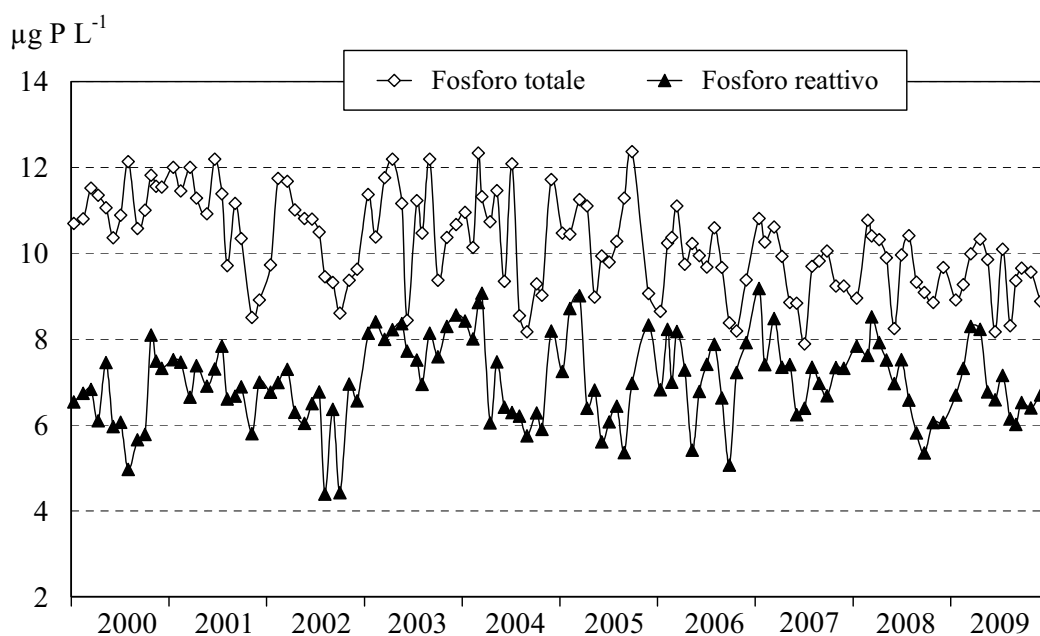


Fig. 5.8 Lago Maggiore: andamento delle concentrazioni di fosforo reattivo e totale nel decennio 2000-2009 (valori medi ponderati sui volumi dalla superficie al fondo nella stazione di massima profondità).

Nel 2009 le concentrazioni medie annue sono state pari a 7 e 10 µg P l⁻¹ rispettivamente sull'intera colonna d'acqua, 3 e 6 µg P l⁻¹ nelle acque epilimniche e 8 e 10 µg P l⁻¹ in ipolimnio, valori pressoché identici a quelli del 2007 e 2008.

Nella stazione di Lesa si sono misurate concentrazioni di fosforo reattivo e totale del tutto simili a quelle della stazione di massima profondità, sia a Marzo che a Settembre, come dimostrato anche dal profilo in figura 5.1.

I dati degli anni più recenti (2006-2009) sembrano indicare quindi un'ulteriore miglioramento qualitativo delle acque per quanto riguarda i livelli di fosforo, dopo il raggiungimento di una condizione di oligotrofia già a partire dagli anni '90. I dati

relativi ai carichi di fosforo veicolati dai tributari indicano in effetti per il 2009 una lieve riduzione rispetto al 2008, imputabile per lo più alle condizioni idrologiche (apporti atmosferici elevati e maggior diluizione dei carichi di nutrienti veicolati a lago). Come descritto nel paragrafo 5.2, alcuni dei tributari sono però caratterizzati da concentrazioni ancora troppo elevate di nutrienti, sia fosforo che azoto, che possono determinare effetti negativi sulle acque litorali interessate dai loro apporti.

Per quanto riguarda i silicati reattivi, le concentrazioni medie annue in epilimnio, ipolimnio e sull'intera colonna d'acqua nel 2009 sono state pari rispettivamente a 1,17, 1,67 e 1,60 mg Si l⁻¹, leggermente superiori a quelle degli anni precedenti. I valori epilimnici infatti, nei mesi estivi, si sono mantenuti attorno a 1 mg Si l⁻¹, a differenza di quanto accaduto negli altri anni, quando, a causa del consumo da parte delle diatomee, i valori scendevano a circa 0,4-0,5 mg Si l⁻¹. I massimi nei mesi invernali sono stati pari a 1,4-1,5 mg Si l⁻¹, di poco superiori a quelli degli anni 2007 e 2008 (Fig. 5.9).

Nel complesso i valori medi a lago di silicati nell'ultimo decennio risultano pressoché stabili, con un temporaneo aumento delle concentrazioni negli anni tra il 2000 ed il 2002, a causa probabilmente di una mobilizzazione della riserva lacustre di materiali silicei a seguito delle piene. In generale si può affermare che la variabilità interannuale dei silicati risente principalmente di fattori meteo-climatici, essendo questi ultimi il principale fattore di controllo dello sviluppo del fitoplancton. Il minimo del Maggio 2007, ad esempio, si è verificato in corrispondenza di un massiccio sviluppo di diatomee tra Aprile e Giugno, principalmente a carico della specie *Tabellaria flocculosa* (C.N.R.-I.S.E. Sede di Verbania, 2007).

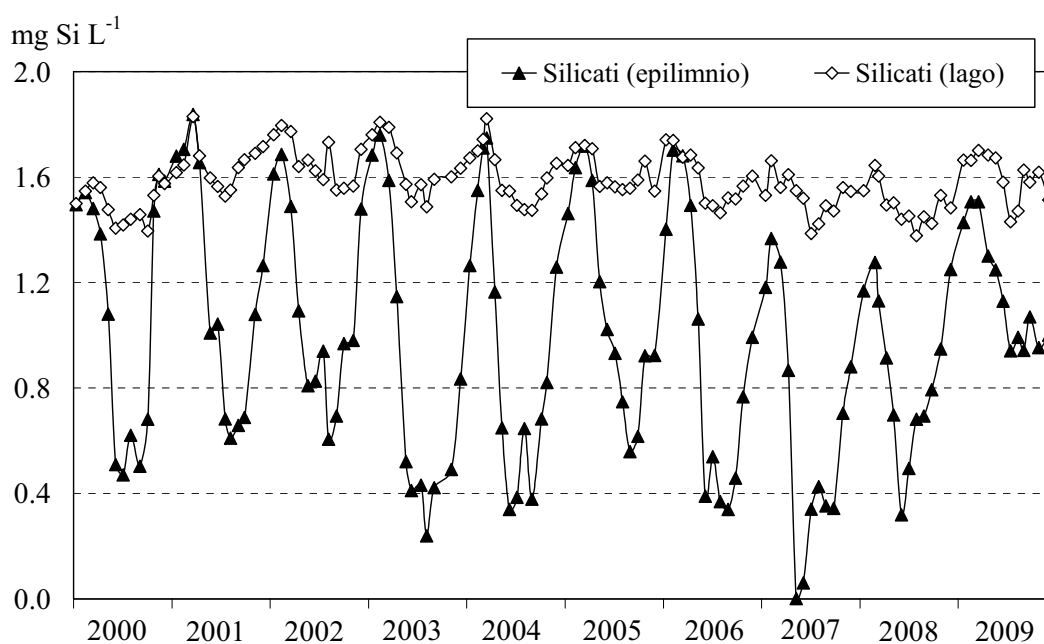


Fig. 5.9 Lago Maggiore (Ghiffa). Concentrazioni medie ponderate sui volumi di silicati reattivi nello strato epilimnico (0-25 m) e nell'intero lago (0-370 m) nel decennio 2000-2009.

Nella stazione di Lesa le concentrazioni medie sulla colonna di silicati reattivi nei campionamenti di Marzo e Settembre sono state pari rispettivamente a 1,59 e 1,38 mg Si l⁻¹, leggermente inferiori a quelle della stazione di massima profondità (Fig. 5.1). Per

una discussione più approfondita sulla variabilità spaziale dei valori di silice si rimanda al paragrafo 5.1.4.

5.1.3 Ossigeno disciolto

L'andamento del contenuto medio e della saturazione di ossigeno nel periodo 2000-2009 è riportato nelle figure 5.10 e 5.11, che si riferiscono rispettivamente allo strato al di sotto dei 200 m di profondità ed all'intero ipolimnio (25-370 m).

Entrambe le figure evidenziano un temporaneo aumento dei valori nel periodo tra il 2004 ed il 2007, dopodiché negli anni più recenti le concentrazioni di ossigeno si sono riportate su valori simili a quelli del 2002-2003. Nel 2009 il contenuto medio nelle acque al di sotto dei 200 m, che rimangono generalmente segregate dalla massa d'acqua sovrastante, è stato compreso tra 7,2 e 7,8 mg O₂ l⁻¹, con una percentuale di saturazione corrispondente del 60-65% (Fig. 5.10). Nell'intero ipolimnio si sono rilevati valori tra 8,8-8,9 mg O₂ l⁻¹ nei mesi estivi e 8,3 mg O₂ l⁻¹ in inverno (Fig. 5.11).

Il 2009 è stato caratterizzato da temperature superiori alla media pressoché in tutti i mesi dell'anno (13,9 °C come valore medio annuo rispetto a 12,5 °C del periodo 1955-2008), oltre che da ventosità poco accentuata nei mesi tardo-invernali e radiazione solare elevata, fattori questi sfavorevoli alla circolazione verticale. La massima profondità di mescolamento nel 2009 è stata infatti di circa 100 m. Nel 2007 e 2008 erano stati raggiunti valori di 50 m, mentre il mescolamento si era spinto più in profondità negli anni 2004-2005 (200-250 m), spiegando così l'andamento dei tenori di ossigeno (Fig. 5.10 e 5.11).

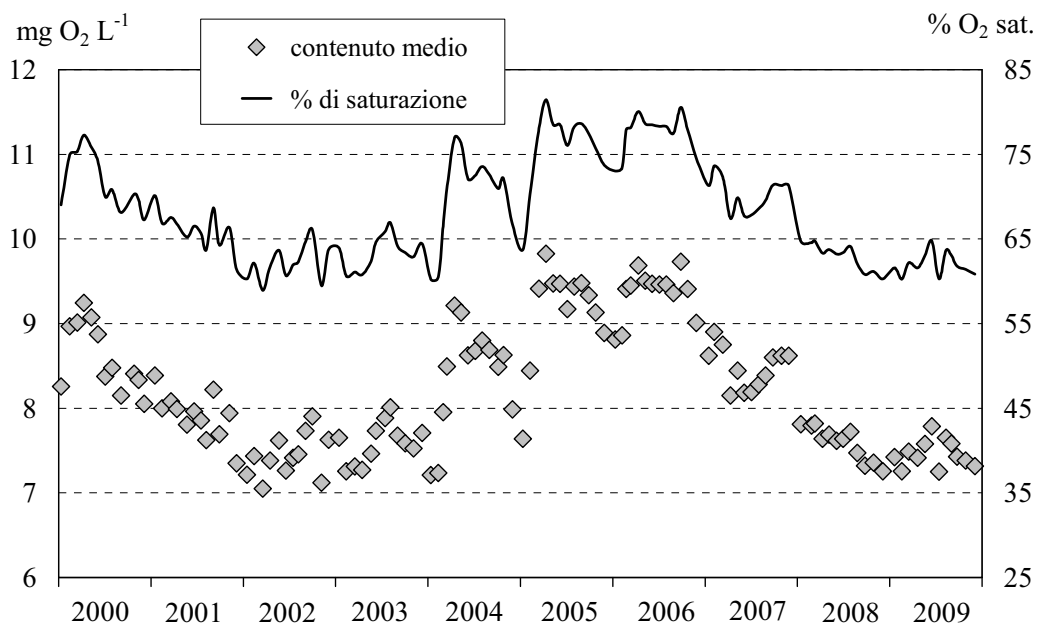


Fig. 5.10. Lago Maggiore, stazione di Ghiffa. Andamento nel decennio 2000-2009 delle concentrazioni medie di ossigeno (valori ponderati sui volumi) e dei corrispondenti tenori di saturazione al di sotto dei 200 metri di profondità.

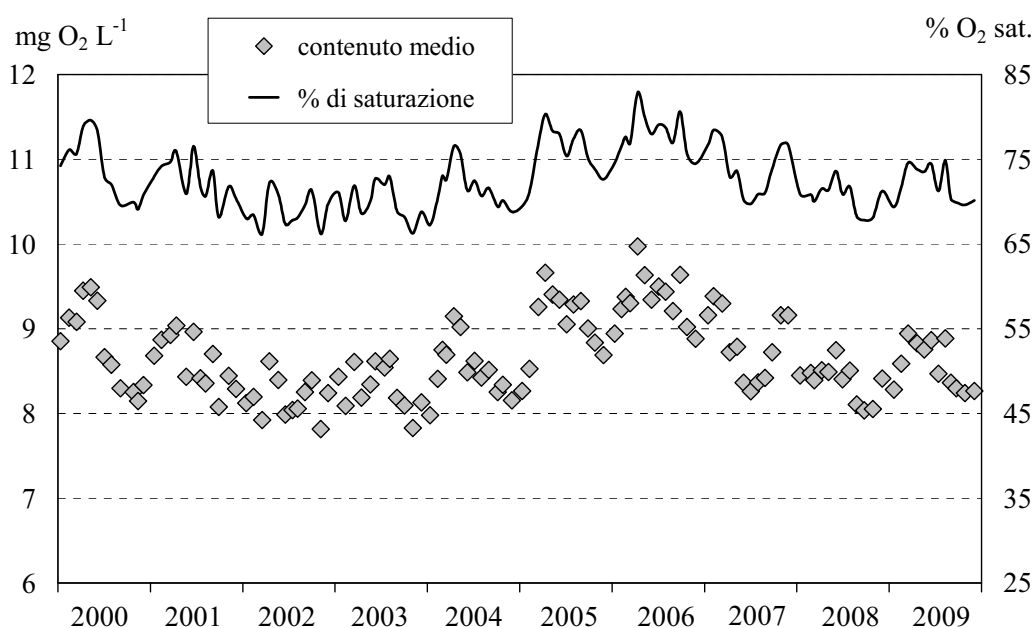


Fig. 5.11. Lago Maggiore, stazione di Ghiffa. Andamento nel decennio 2000-2009 delle concentrazioni medie di ossigeno (valori ponderati sui volumi) e dei corrispondenti tenori di saturazione in ipolimnio (25-370 m).

Nel complesso comunque i valori dell'ossigeno nell'ultimo decennio si sono mantenuti sempre su valori abbastanza elevati, al di sopra di $7,0 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ (60% di saturazione) nello strato 200-370 m (Fig. 5.10) e di $8,0 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ (65% di saturazione) nell'intero ipolimnio (Fig. 5.11), confermando il buon livello di ossigenazione delle acque profonde. Alla stessa conclusione portano anche i dati della stazione di Lesa, dove, nello strato compreso tra 25 e 100 m di profondità, il contenuto di ossigeno è risultato pari a $10,8$ e $8,5 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ (90 e 73% come percentuale di saturazione), rispettivamente a Marzo e Settembre 2009.

5.1.4. Variazioni spaziali delle variabili chimiche

La variabilità nella distribuzione spaziale delle principali variabili chimiche è stata valutata eseguendo dei campionamenti in 27 stazioni, 12 pelagiche e 15 litorali, queste ultime disposte in corrispondenza dell'isobata dei 25 metri. I prelievi hanno avuto luogo il 22 Luglio 2009, e le variabili chimiche principali (pH, conducibilità, alcalinità, fosforo reattivo e totale, azoto totale e silicati reattivi) sono state determinate su un campione integrato rappresentativo dello strato 0-20 m (Fig. 5.12).

In generale si può osservare come le variabili chimiche considerate non mostrino una variabilità particolarmente accentuata nei diversi punti del lago. pH, conducibilità e alcalinità presentano un andamento spaziale abbastanza simile, con i valori più elevati nella parte centrale e meridionale del lago; la variabilità è comunque contenuta, essendo inferiore ad 1 unità per i valori di pH e attorno a $7 \mu\text{S cm}^{-1}$ e $0,10 \text{ meq l}^{-1}$ per conducibilità e alcalinità, rispettivamente (Fig. 5.12).

Per quanto riguarda i nutrienti, il fosforo totale mostra una distribuzione spaziale pressoché opposta rispetto a quella della silice: i valori massimi di fosforo, pari a $11-12 \mu\text{g P l}^{-1}$, caratterizzano infatti la parte meridionale del lago, scendendo a $6-7 \mu\text{g P l}^{-1}$

nelle stazioni, sia pelagiche che litorali, della zona centro-settentrionale; la silice mostra invece le concentrazioni più alte a nord (1,3-1,5 mg Si l⁻¹) ed i minimi (0,50-0,70 mg Si l⁻¹) nelle stazioni meridionali. L'azoto totale infine presenta una distribuzione più disomogenea, senza differenze marcate tra nord e sud del lago: i minimi (0,72-0,73 mg N l⁻¹) sono stati rilevati nelle stazioni del Golfo Borromeo, mentre i valori più elevati caratterizzano la sponda occidentale e la punta meridionale del lago (Fig. 5.12).

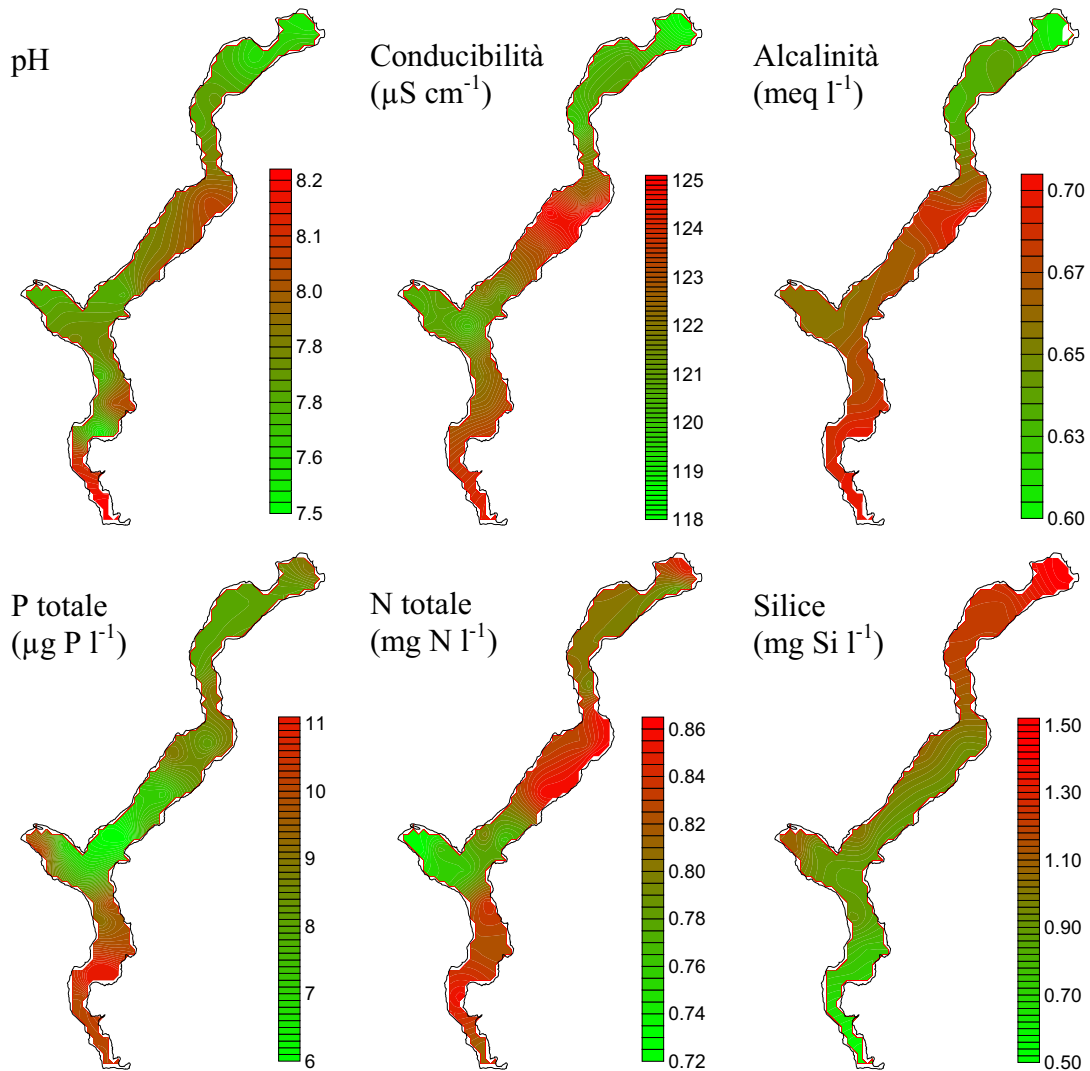


Fig. 5.12. Lago Maggiore, distribuzione orizzontale di alcune variabili chimiche in base ai rilievi eseguiti in 12 stazioni pelagiche e 15 stazioni litorali il 22 Luglio 2009 (campioni integrati relativi allo strato 0-20 m).

Nell'interpretazione di questi dati bisogna tener conto del fatto che essi si riferiscono ad un momento stagionale preciso, quello della stratificazione estiva. La variabilità spaziale dei nutrienti può essere fortemente influenzata dalla collocazione spaziale dei popolamenti fitoplanctonici, in particolare da fenomeni di fioriture algali a livello locale, oltre che, soprattutto nel caso delle stazioni litorali, dagli apporti a lago dai tributari.

Le zone antistanti la foce di immissari quali Boesio e Bardello, in territorio lombardo, risentono inevitabilmente di effetti, anche se localizzati, sul chimismo delle acque, in particolare sulle concentrazioni di nutrienti. Questi due corsi d'acqua, così come il Vevera, anch'esso caratterizzato da concentrazioni abbastanza elevate di nutrienti, sfociano nella parte meridionale del lago; le maggiori concentrazioni di fosforo in questa zona potrebbero quindi dipendere dagli apporti di questi tributari.

Analogamente l'accumulo di silice nella parte settentrionale del lago potrebbe derivare dagli apporti elevati di materiali silicei da tributari come Ticino immissario e Maggia, che, insieme al Toce, presentano i carichi più elevati di silice al lago (4800 e 1900 t a⁻¹ rispettivamente nel 2009, pari al 43% del carico totale).

BIBLIOGRAFIA

- Ambrosetti, W., L. Barbanti & A. Rolla. 2006. Il clima dell'areale del Lago Maggiore durante gli ultimi cinquant'anni. The climate of Lago Maggiore area during the last fifty years. *J. Limnol.*, 65(Suppl. 1): 62 pp.
- Bertoni, R., C. Callieri, E. Caravati, G. Corno, M. Contesini, G. Morabito, P. Panzani & C. Giardino. 2007. Cambiamenti climatici e fioriture di cianobatteri potenzialmente tossici nel Lago Maggiore. In: B. Carli, G. Cavarretta, M. Colacino & S. Fuzzi (Eds), *Clima e cambiamenti climatici: le attività di ricerca del CNR*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma: 613-616.
- C.N.R.-I.S.E. Sede di Verbania. 2007. Ricerche sull'evoluzione del Lago Maggiore. *Aspetti limnologici. Programma quinquennale 2003-2007. Campagna 2007 e Rapporto quinquennale 2003-2007*. Commissione Internazionale per la protezione delle acque italo svizzere (Ed.): 132 pp.
- Rogora, M. 2007. Synchronous trends in N-NO₃ export from N-saturated river catchments in relation to climate. *Biogeochemistry*, 86: 251-268.
- Rogora, M., R. Mosello & S. Arisci. 2003. The effect of climate warming on the hydrochemistry of alpine lakes. *Water Air Soil Poll.*, 148: 347-361.
- Rogora, M., R. Mosello, A. Calderoni, & A. Barbieri. 2006. Nitrogen budget of a subalpine lake in North-Western Italy: the role of atmospheric input in the upward trend of nitrogen concentrations. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 29: 2027-2030.

5.2. Apporti chimici dai tributari

5.2.1. Caratteristiche chimiche e chimico-fisiche

Nel 2009 sono proseguite le indagini sulle caratteristiche chimiche dei 14 principali tributari del Lago Maggiore e del Ticino emissario, con cadenza mensile e con le stesse modalità utilizzate nelle precedenti campagne di campionamento. I risultati, come valori medi annui delle variabili principali, sono riportati in tabella 5.2.

Tab. 5.2. Valori medi annuali delle principali variabili chimiche e chimico-fisiche sui tributari e sull'emissario del Lago Maggiore campionati nel 2009.

	sigla	pH	T.A. meq l ⁻¹	Cond. μS cm ⁻¹	N-NH ₄ mg N l ⁻¹	N-NO ₃ mg N l ⁻¹	N _{org} mg N l ⁻¹	TN mg N l ⁻¹	TP μg P l ⁻¹	RSi mg Si l ⁻¹
Tributari lombardi										
Boesio	(BOE)	8,11	5,25	679	0,25	3,44	0,53	4,22	290	3,2
Bardello	(BAR)	8,10	2,90	336	0,20	1,56	0,29	2,05	235	1,6
Tresa ^(a)	(TRE)	8,08	1,80	210	0,09	1,09	0,14	1,31	32	1,0
Giona	(GIO)	7,56	0,34	77	0,01	1,16	0,05	1,22	27	3,9
Tributari piemontesi										
Veveva	(VEV)	7,82	1,55	222	0,07	2,81	0,12	3,00	41	5,2
Strona	(STR)	7,50	0,40	96	0,04	1,29	0,09	1,43	14	2,7
Toce Ossola	(TOC)	7,46	0,77	163	0,06	0,64	0,07	0,78	17	2,4
San Giovanni	(SGI)	7,39	0,28	63	0,04	1,32	0,09	1,45	24	4,3
Erno	(ERN)	7,44	0,38	134	0,01	1,55	0,07	1,62	20	4,2
San Bernardino	(SBE)	7,49	0,30	57	0,06	1,06	0,08	1,20	17	2,9
Cannobino	(CAN)	7,26	0,22	41	0,01	0,63	0,06	0,70	6	3,3
Tributari svizzeri										
Maggia	(MAG)	7,53	0,41	65	0,01	0,79	0,05	0,85	5	2,8
Ticino immissario	(TIM)	7,76	1,00	246	0,02	0,78	0,06	0,86	6	2,3
Verzasca	(VER)	6,94	0,31	52	0,02	0,79	0,07	0,88	8	2,7
Emissario										
Ticino emissario	(TEM)	7,98	0,82	138	0,02	0,74	0,11	0,87	10	0,9

^(a)Comprensivo delle acque emissarie del Lago di Lugano e del T. Margorabbia

I valori di pH, conducibilità e alcalinità sono indicativi del chimismo di base dei corsi d'acqua che, dipendendo principalmente dalle caratteristiche litologiche dei bacini, non presenta variazioni significative da un anno all'altro. I corsi d'acqua collocati in un bacino prevalentemente a base di rocce ignee (Cannobino, Verzasca, Maggia, S. Giovanni, S. Bernardino, Strona, Erno e Giona) si caratterizzano per bassi valori medi di pH, alcalinità e conducibilità, che nel 2009 sono risultati compresi tra 6,9 e 7,6 unità di pH, 0,2 e 0,4 meq l⁻¹ e 40 e 135 μS cm⁻¹ a 20 °C rispettivamente. I tributari con bacino comprendente anche rocce sedimentarie più solubili (Veveva, Tresa), presentano valori più elevati delle stesse variabili (7,8-8,1 unità di pH, 1,6-1,8 meq l⁻¹ e 210-220 μS cm⁻¹). Il Toce (bacino Ossola) ed il Ticino immissario si collocano in una situazione intermedia, con pH rispettivamente di 7,5 e 7,8 unità ed alcalinità tra 0,8 e 1,0 meq l⁻¹. Infine i valori massimi più alti di alcalinità e conducibilità sono quelli riscontrati nelle acque dei Torrenti Boesio e Bardello (5,2 e 2,9 meq l⁻¹ e 679 e 336 μS cm⁻¹ rispettivamente), a causa di una probabile contaminazione da scarichi ad elevato contenuto di bicarbonati e altri sali, particolarmente evidente nel caso del Boesio (Tab. 5.2).

Le variazioni stagionali dell'idrochimica nei corsi d'acqua considerati sono principalmente legate all'idrologia, ma nel caso di Ticino, Tresa e Bardello, trattandosi di acque emissarie rispettivamente dei laghi Maggiore, Lugano e Varese, i valori di pH risentono fortemente anche dei processi a lago. L'andamento dei valori mensili di pH in questi tre corsi d'acqua nell'ultimo quinquennio è riportato in figura 5.13, dove si può osservare come le variazioni siano più accentuate nel caso del Ticino emissario, con massimi estivi e minimi invernali simili a quelli rilevati nelle acque epilimniche del Lago Maggiore. Nel 2009 la stagionalità è risultata poco evidente nel caso del Tresa, a differenza di quanto osservato negli anni immediatamente precedenti. Infine nel Bardello l'andamento dei valori di pH non presenta una stagionalità evidente a causa della presenza di scarichi non sufficientemente depurati che mantengono i valori di pH sempre piuttosto elevati e costanti (Fig. 5.13).

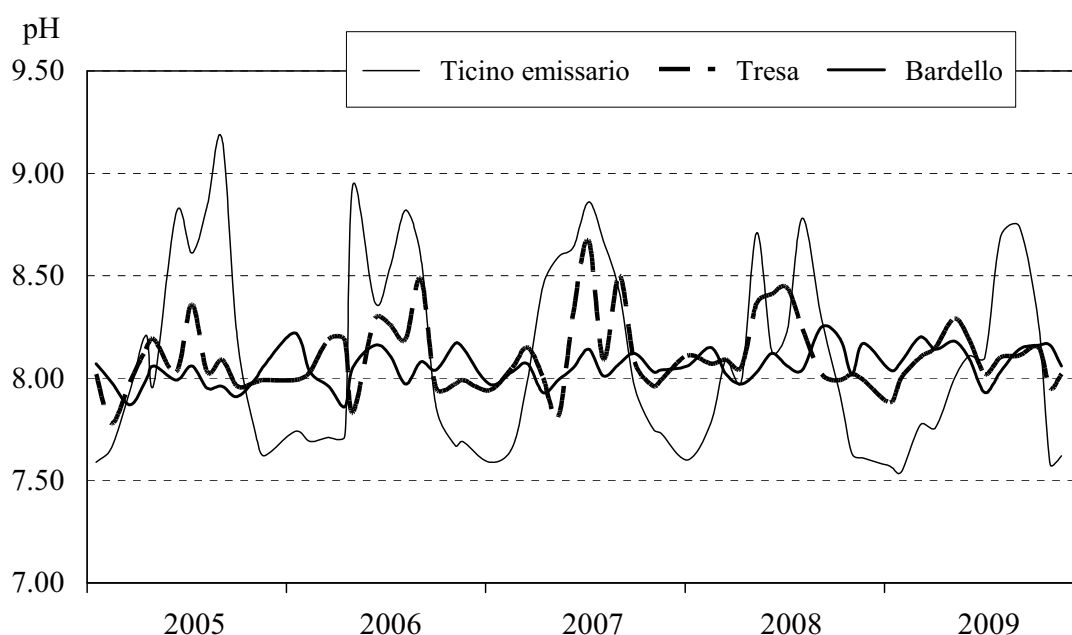


Fig. 5.13. Valori di pH riscontrati nel quinquennio 2005-2009 nelle acque emissarie dei laghi di Lugano (Tresa), Varese (Bardello) e Maggiore (Ticino emissario).

Sempre relativamente al chimismo di base dei corsi d'acqua, un confronto tra il 2009 ed il quinquennio 2004-2008 è riportato in figura 5.14. I valori sia di pH che alcalinità nel 2009 sono stati molto simili o leggermente inferiori a quelli degli anni precedenti, a causa probabilmente delle maggiori precipitazioni che hanno caratterizzato il 2009 determinando una diluizione dei soluti nelle acque. La differenza più accentuata ha riguardato i tributari svizzeri Maggia e Verzasca, con un pH medio nel 2009 di 7,53 e 6,94, rispetto ai valori del quinquennio di 7,67 e 7,08 rispettivamente (Fig. 5.14).

Le concentrazioni medie sia di fosforo totale che dei composti dell'azoto dimostrano chiaramente il pessimo livello qualitativo dei Torrenti Boesio e Bardello rispetto agli altri tributari (Tab. 5.2). I livelli di fosforo totale ad esempio si mantengono tra 5 e 40 $\mu\text{g P l}^{-1}$ in tutti i corsi d'acqua, mentre raggiungono valori di 235 e 290 $\mu\text{g P l}^{-1}$ nel Bardello e nel Boesio rispettivamente. Lo stato di compromissione delle loro acque è

confermato anche dai livelli di azoto ammoniacale (0,20 e 0,25 mg N l⁻¹), organico (0,29 e 0,53 mg N l⁻¹) e totale (2,05 e 4,22 mg N l⁻¹; Tab. 5.2 e Fig. 5.15 e 5.16).

Considerando l'andamento temporale delle concentrazioni di fosforo totale ed azoto ammoniacale ed organico nell'ultimo decennio, si evidenzia per entrambi i corsi d'acqua un'elevata variabilità, con una tendenza al miglioramento negli anni più recenti per quanto riguarda il Bardello (Fig. 5.15).

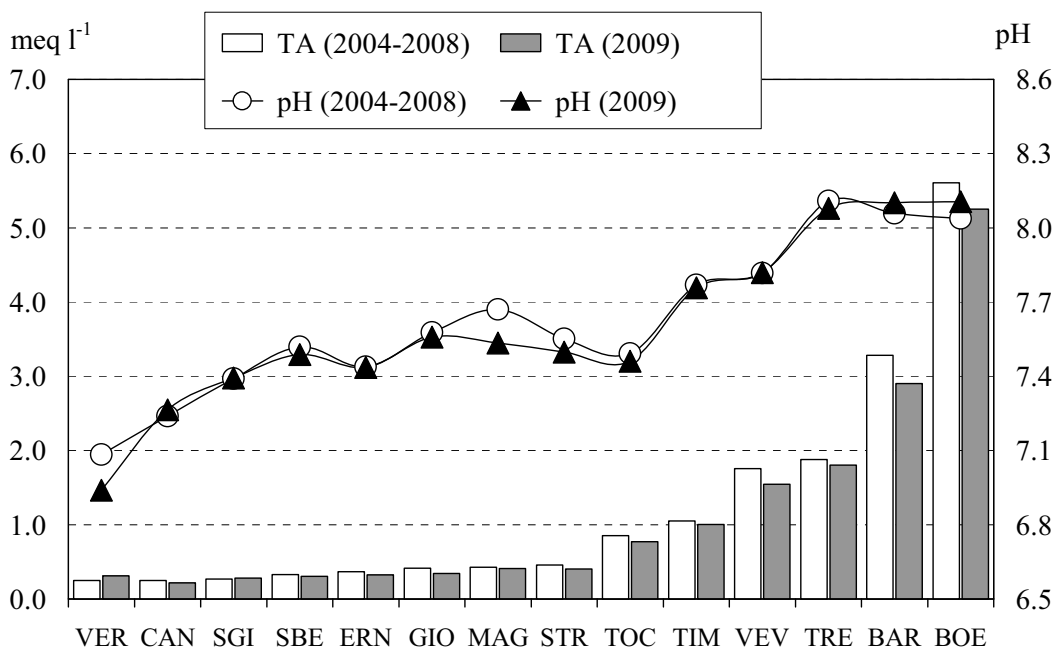


Fig. 5.14. Tributari del Lago Maggiore: valori medi annuali di pH e alcalinità totale relativi al 2009 a confronto con le medie del quinquennio precedente (2004-2008).

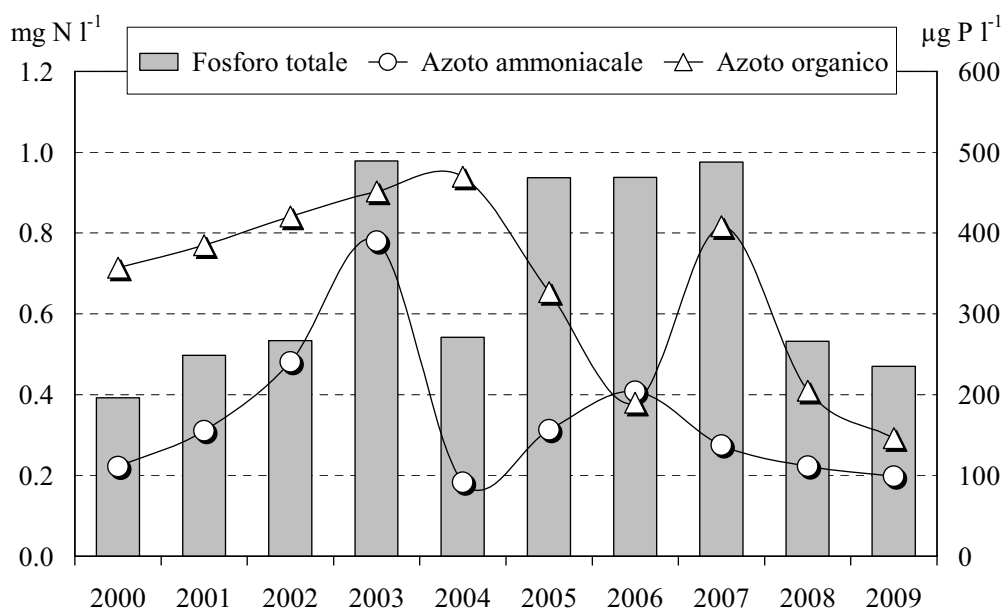


Fig. 5.15. Concentrazioni medie annuali di fosforo totale e di azoto ammoniacale ed organico misurate dal 2000 al 2009 alla foce del Torrente Bardello.

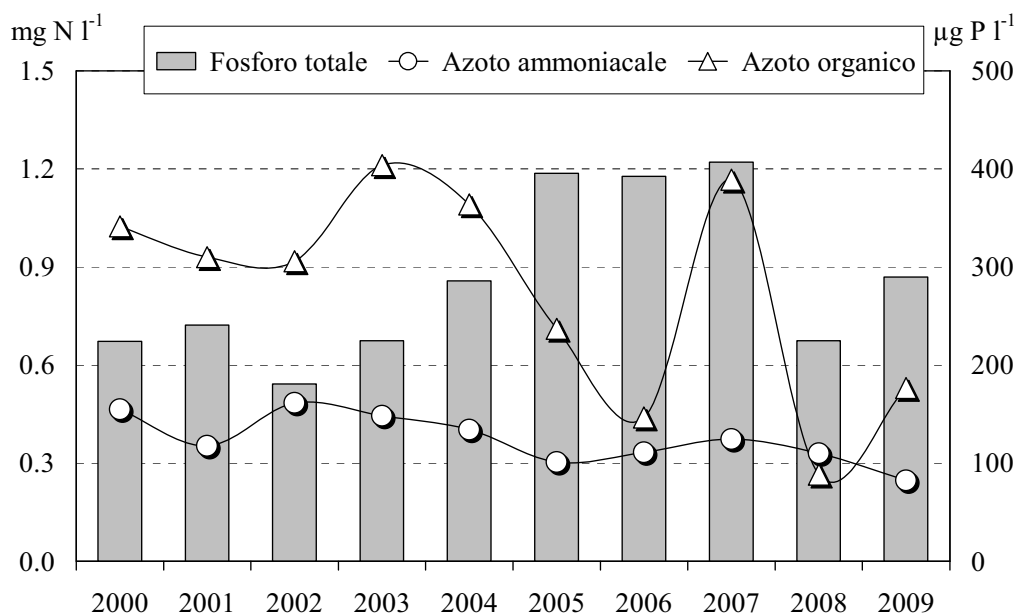


Fig. 5.16. Concentrazioni medie annuali di fosforo totale e di azoto ammoniacale ed organico misurate dal 2000 al 2009 alla foce del Torrente Boesio.

Nel 2009 in particolare le concentrazioni sia di fosforo che di azoto in questo torrente sono risultate inferiori a quelle del 2008 e tra le più basse dell'ultimo decennio. Il miglioramento ha riguardato soprattutto l'azoto organico, passato da 0,7-0,9 mg N l⁻¹ negli anni 2000-2004 agli attuali 0,3 mg N l⁻¹ (Fig. 5.15). Nel caso del Boesio le concentrazioni medie di fosforo totale sono risultate invece più alte nel 2009 (290 µg P l⁻¹) rispetto al 2008 (225 µg P l⁻¹), pur non raggiungendo i massimi di circa 400 µg P l⁻¹ degli anni 2005-2007. Una lieve tendenza al miglioramento si osserva solo per l'azoto ammoniacale, mentre anche l'azoto organico ha fatto registrare valori in crescita nel 2009 (0,53 mg N l⁻¹ rispetto a 0,26 mg N l⁻¹ nel 2008; Fig. 5.16).

È necessario evidenziare come le variazioni interannuali siano per lo più imputabili alle condizioni idrologiche: lievi diminuzioni delle concentrazioni medie di fosforo e azoto da un anno all'altro non sono necessariamente indicative di un miglioramento dello stato qualitativo delle acque. I livelli di questi composti, sia nel caso del Bardello che del Boesio, rimangono troppo elevati e la situazione dei due corsi d'acqua deve essere quindi oggetto di continuo monitoraggio e sorveglianza, soprattutto in merito alle possibili ripercussioni sullo stato delle acque litorali interessate dai loro apporti.

Negli altri tributari le concentrazioni medie di fosforo totale nel 2009 sono risultate inferiori a 10 µg P l⁻¹ in 4 corsi d'acqua (Ticino Immissario, Cannobino, Verzasca, Maggia), comprese tra 20 e 25 µg P l⁻¹ in 5 corsi d'acqua (Erno, Toce, Strona, S. Giovanni e S. Bernardino), e tra 27 e 41 µg P l⁻¹ in 3 corsi d'acqua (Giona, Vevera, Tresa). I valori rispetto al 2008 sono diminuiti o rimasti invariati nella maggior parte dei corsi d'acqua, con l'eccezione di S. Bernardino e Vevera in cui si è avuto un incremento dei valori medi da 7 a 17 µg P l⁻¹ e da 33 a 41 µg P l⁻¹ rispettivamente. Nel complesso i livelli di fosforo riscontrati nella maggior parte dei tributari sono comunque compatibili con il mantenimento dello stato oligotrofo delle acque lacustri. Anche per quanto riguarda i livelli di azoto ammoniacale ed organico, solo Vevera e Tresa presentano un moderato stato di compromissione, con concentrazioni medie pari rispettivamente a

0,07 e 0,09 mg N l⁻¹ per l'azoto ammoniacale e 0,12 e 0,14 mg N l⁻¹ per l'azoto organico. In tutti gli altri corsi d'acqua le concentrazioni delle due forme di azoto nel 2009 si sono mantenute rispettivamente al di sotto di 0,07 e 0,08 mg N l⁻¹, a conferma del buon livello qualitativo delle acque (Tab. 5.2).

5.2.2. Contributi areali

Per analizzare il livello qualitativo delle acque tributarie degli areali ticinese, lombardo e piemontese, sono state considerate le concentrazioni medie areali annuali di azoto ammoniacale, azoto organico e fosforo totale, riportate rispettivamente nelle figure 5.17, 5.18 e 5.19. Gli apporti di questi nutrienti nel 2009 sono stati molto simili a quelli dell'anno precedente, con un lieve aumento solo nel caso dell'azoto organico (0,08 mg N l⁻¹ come valore totale rispetto a 0,05 mg N l⁻¹ del 2008). Nonostante questa variazione recente, nel complesso tutte le tre aree sono state caratterizzate da un miglioramento in termini di contributi di azoto organico nel decennio 2000-2009, con una diminuzione delle concentrazioni medie negli apporti totali da 0,18-0,20 a 0,05-0,10 mg N l⁻¹ (Fig. 5.18).

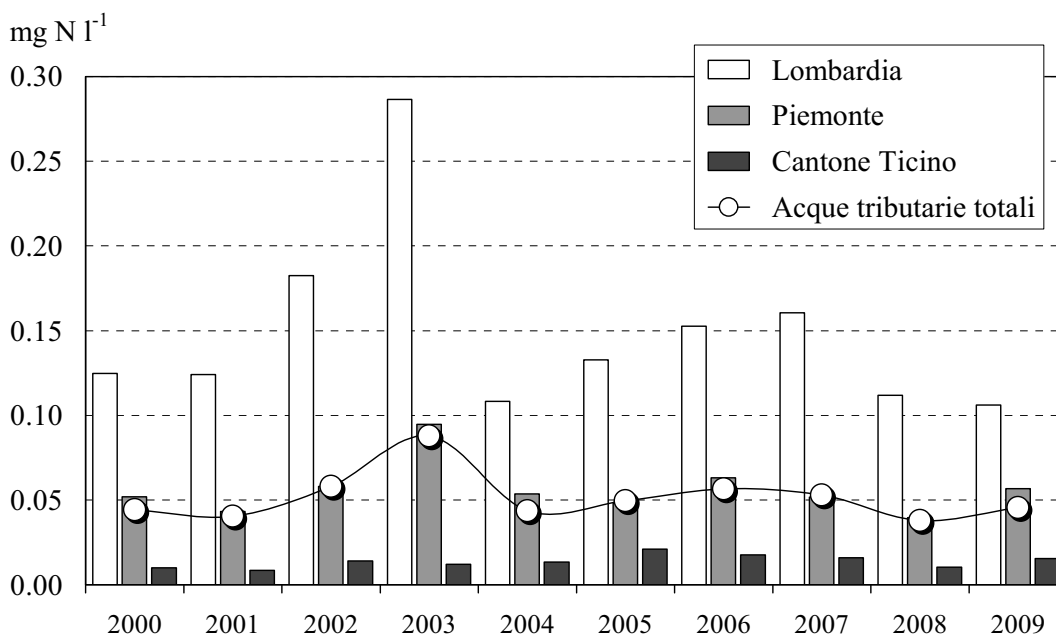


Fig. 5.17. Lago Maggiore. Concentrazioni medie areali annuali di azoto ammoniacale nel decennio 2000-2009 nelle acque tributarie totali e in quelle campionate in Lombardia (compresi gli apporti derivanti dal Lago di Lugano attraverso il Tresa), Piemonte, Cantone Ticino.

Nel complesso il livello qualitativo delle acque tributarie dell'areale ticinese può essere definito ottimo, grazie ai bassi livelli di azoto ammoniacale (0,01-0,02 mg N l⁻¹) e concentrazioni areali di fosforo totale che si sono mantenute al di sotto di 10 µg P l⁻¹ per tutto il decennio 2000-2009 (Fig. 5.17 e 5.19). Una buona qualità delle acque caratterizza anche l'areale piemontese, con valori medi di fosforo totale tra 15 e 20 µg P l⁻¹ ed azoto ammoniacale ed organico attorno a 0,05 mg N l⁻¹. Infine la situazione appare ancora inaccettabile per quanto riguarda le acque tributarie lombarde, per le quali le concentrazioni medie areali di fosforo superano i 70 µg P l⁻¹ e si rilevano valori

abbastanza elevati anche per azoto ammoniacale ($0,11 \text{ mg N l}^{-1}$) ed organico ($0,15 \text{ mg N l}^{-1}$).

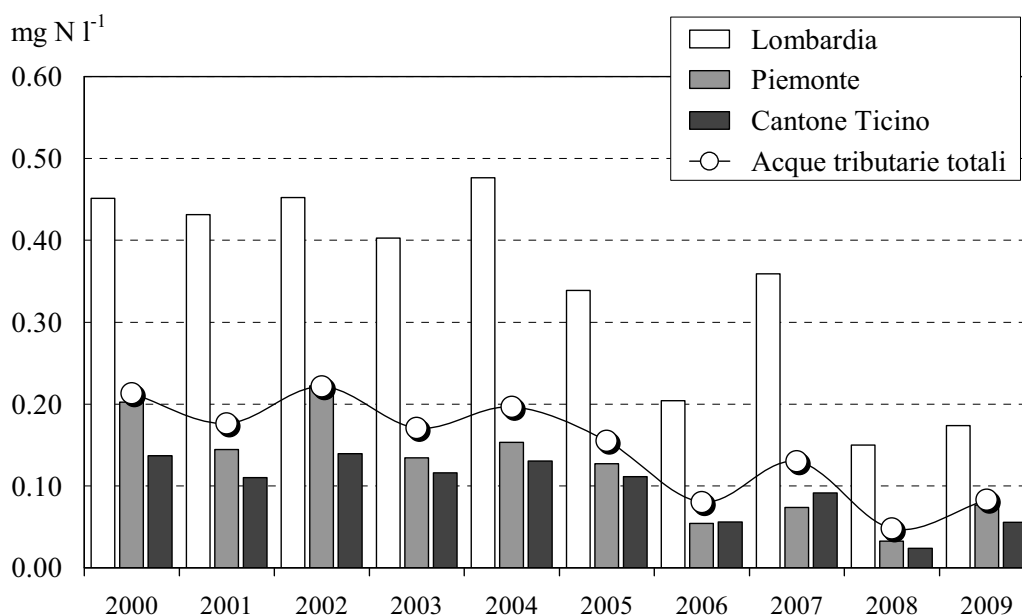


Fig. 5.18. Lago Maggiore. Concentrazioni medie areali annuali di azoto organico nel decennio 2000-2009 nelle acque tributarie totali e in quelle campionate in Lombardia (compresi gli apporti derivanti dal Lago di Lugano attraverso il Tresa), Piemonte e Cantone Ticino.

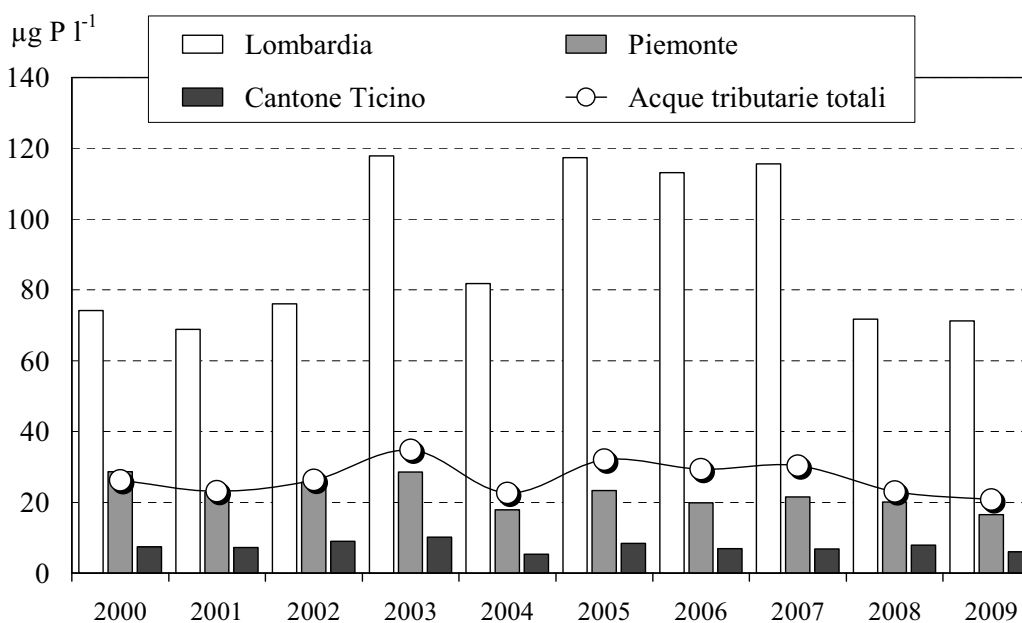


Fig. 5.19. Lago Maggiore. Concentrazioni medie areali annuali di fosforo totale nel decennio 2000-2009 nelle acque tributarie totali e in quelle campionate in Lombardia (compresi gli apporti derivanti dal Lago di Lugano attraverso il Tresa), Piemonte e Cantone Ticino.

La differenza tra le tre aree si mantiene pressoché costante nei diversi anni, con rapporti tra Canton Ticino, Piemonte e Lombardia pari, nel decennio 2000-2009, a 1,0:4,1:10,8 per l'azoto ammoniacale; 1,0:1,3:3,5 per l'azoto organico; 1,0:3,0:12,0 per il fosforo totale.

Prendendo in considerazione anche i dati antecedenti al 2000, e più precisamente tutto il periodo 1978-2009 (Fig. 5.20), si può osservare come nel tempo si sia verificata una netta riduzione delle concentrazioni medie, sia di fosforo totale che di azoto ammoniacale, negli afflussi totali a lago. Gli ultimi anni in particolare (2008-2009), sono stati caratterizzati da valori di entrambe le variabili tra i più bassi di tutto il periodo, a conferma di un progressivo miglioramento della qualità delle acque tributarie nel loro complesso (Fig. 5.20).

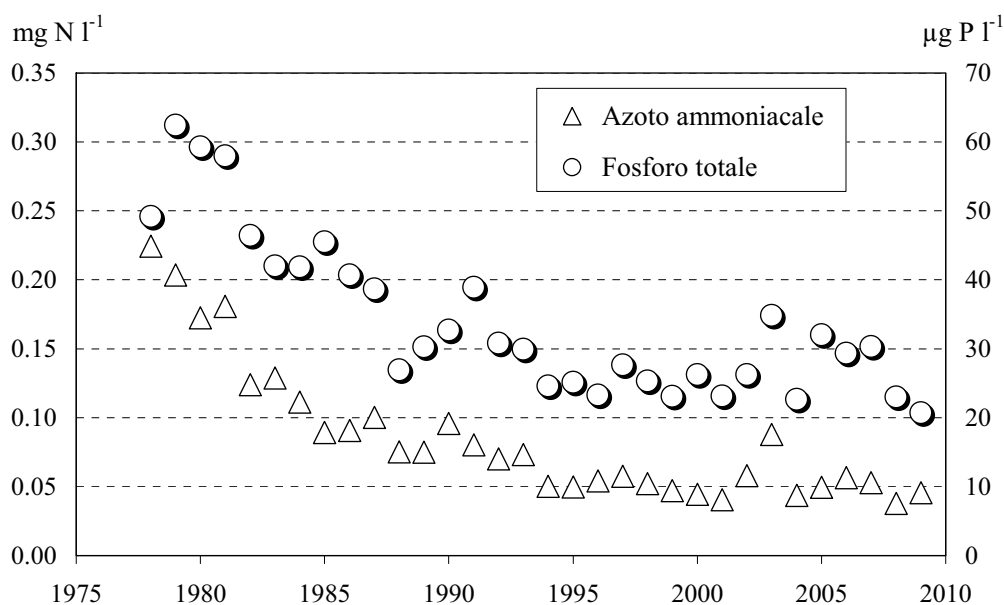


Fig. 5.20. Lago Maggiore. Evoluzione a lungo termine delle concentrazioni medie annuali di fosforo totale e azoto ammoniacale negli afflussi totali al lago (valori ponderati dalle concentrazioni areali dei singoli tributari).

5.2.3. Carichi chimici e bilanci di azoto e fosforo

I carichi chimici dei principali nutrienti algali veicolati al Lago Maggiore dai tributari e in uscita attraverso il Ticino emissario sono stati calcolati per l'anno 2009 con le stesse metodologie utilizzate negli anni precedenti. Per il Ticino emissario e 9 corsi d'acqua drenanti complessivamente circa il 70% del bacino imbrifero (Ticino immissario, Cannobino, San Bernardino, Toce alla chiusura del bacino della Val d'Ossola, Strona, Vevera, Bardello, Boesio e Tresa) i carichi sono stati calcolati dai valori di concentrazione e dai deflussi giornalieri. Per i Torrenti Erno e Boesio, non essendo disponibili dati per il 2009 a causa del mancato funzionamento degli strumenti di misura, le portate sono state ricostruite sulla base della serie storica dei dati disponibili per altri corsi d'acqua con caratteristiche del bacino e andamento stagionale simile. Infine, per i tributari Maggia, Verzasca e Giona, che coprono una porzione di

bacino imbrifero pari al 18% circa, gli apporti sono stati stimati dalla regressione lineare tra i contributi areali e le concentrazioni medie annuali calcolate per gli altri tributari.

I carichi di azoto ammoniacale, nitrico, organico e totale e di fosforo totale veicolati dai tributari al lago ed in uscita dall'emissario per il 2009 sono riportati in tabella 5.3. Il confronto con i dati dell'anno precedente, anch'essi riportati in tabella, mostra una riduzione dei carichi di fosforo totale del 21%, mentre gli apporti di azoto totale sono rimasti pressoché invariati. A fronte di una riduzione dei carichi di azoto nitrico (-6%), sono aumentati significativamente gli apporti sia di azoto ammoniacale che organico, del 35% e 56% rispettivamente (Tab. 5.3).

Tab. 5.3. Lago Maggiore. Apporti annuali (t a⁻¹) di azoto e fosforo dai tributari campionati ed uscite attraverso l'emissario nel biennio 2008-2009.

	N-NH ₄		N-NO ₃		N _{org}		TN		TP	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Ticino Immissario ^(a)	37	41	2103	1697	87	169	2227	1907	21	14
Maggia ^(b)	23,6	24,4	1272	1322	95	142	1390	1489	17,5	11,9
Verzasca ^(b)	5,1	6,7	322	312	25	34	352	353	4,1	3,3
Cannobino ^(a)	2,8	3,8	191	259	17	22	210	285	2,7	2,3
San Giovanni ^(a)	3,2	3,3	88	91	7,0	8,5	98	103	2,2	1,7
San Bernardino ^(a)	5,2	5,2	199	231	12	16	216	252	2,2	2,0
Toce Ossola ^(a)	46	126	1327	1304	105	252	1478	1683	37	24
Strona ^(a)	7,9	15,3	416	431	24	45	448	491	7,2	4,9
Erno ^(a)	0,1	0,2	34	43	0,8	2,1	35	45	0,5	0,6
Vevera ^(a)	0,6	0,9	42	42	2,1	1,0	45	44	0,5	0,6
Bardello ^(a)	23,8	20,9	190	169	44	31	258	221	27	23
Boesio ^(a)	10,8	8,3	111	107	9	17	131	133	8,0	8,5
Tresa ^(a)	71,4	67,1	1163	957	123	113	1357	1138	30	28
Giona ^(b)	1,6	1,3	74	72	5	7	80	81	1,6	1,3
Totale campionati	239	325	7532	7068	555	866	8326	8259	161	127
Ticino emissario ^(a)	250	194	7338	7930	588	1184	8175	9309	116	103

(a) Valori calcolati dai dati di concentrazione e dai deflussi;

(b) Valori calcolati dalla regressione fra concentrazione e contributi areali. Non essendo disponibili le portate in uscita dalle centrali idroelettriche, anche per Maggia e Verzasca i carichi vengono stimati mediante regressione fra concentrazioni e contributi areali.

Questi andamenti riflettono quelli delle concentrazioni medie (paragrafo 5.2.2), che hanno visto nel 2009 un leggero aumento per azoto ammoniacale ed organico, ed una riduzione invece per il fosforo totale rispetto al 2008 (Figg 5.17-5.19). Le portate hanno presentato variazioni disomogenee dal 2008 al 2009, mostrando un aumento per alcuni corsi d'acqua (ad esempio Toce e Strona), ed una diminuzione per altri (S. Bernardino, S. Giovanni, Tresa, Ticino immissario, Boesio e Bardello), in conseguenza della distribuzione irregolare degli afflussi meteorici sul bacino imbrifero del Lago Maggiore.

I carichi di fosforo totale nel 2009 sono risultati per tutti i corsi d'acqua inferiori a quelli dell'anno precedente, con l'eccezione del Torrente Boesio, mentre più disomogenea appare la situazione per i composti dell'azoto. I carichi di azoto ammoniacale ed organico, ad esempio, sono aumentati in modo sostanziale per Toce e Strona, che, come già ricordato, sono stati caratterizzati nel 2009 da portate più elevate, ma hanno visto anche un aumento delle concentrazioni di questi composti (rispettivamente da 46 a 64 µg N l⁻¹ e da 33 a 38 µg N l⁻¹ per l'azoto ammoniacale e da 0,03 a 0,07 µg N l⁻¹ e da 0,05 a 0,09 µg N l⁻¹ per l'azoto organico). Un contributo

significativo all'aumento degli apporti totali di azoto organico a lago è anche quello del Ticino immissario, per il quale i carichi sono raddoppiati rispetto al 2008, a seguito di un aumento delle concentrazioni medie da 0,02 a 0,06 mg N l⁻¹.

In contrasto alla tendenza generale, il Torrente Bardello ha presentato una riduzione nel 2009 di tutti i carichi, anche di azoto ammoniacale ed organico, rispetto al 2008. Si evidenzia quindi una tendenza recente al miglioramento del livello qualitativo delle acque di questo tributario, che necessita però di una verifica attraverso la prosecuzione delle indagini.

I carichi in uscita dal Lago Maggiore attraverso il Ticino emissario, il cui deflusso medio annuo nel 2009 è stato pari a 331,3 m³ s⁻¹, rispetto a 328,6 m³ s⁻¹ del 2008, sono diminuiti per quanto riguarda azoto ammoniacale e fosforo totale (del 22% e 11% rispettivamente), e pressoché raddoppiati invece per l'azoto organico (Tab. 5.3).

Anche per l'anno 2009 sono stati calcolati i bilanci per azoto e fosforo totale, riportati rispettivamente nelle tabelle 5.4 e 5.5, a confronto con i bilanci degli anni dal 2000 al 2008.

Tab. 5.4. Lago Maggiore. Bilanci annuali nel decennio 2000-2009 di azoto totale (t N a⁻¹). I totali parziali e complessivi sono approssimati alle centinaia

	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09
Ticino Immissario	2704	2216	2359	1356	2205	1160	1263	1658	2227	1907
Maggia	1568	1143	1704	953	1429	878	855	976	1390	1489
Verzasca	435	291	449	230	362	223	224	250	352	353
Cannobino	138	117	137	229	202	229	206	211	210	285
San Giovanni	100	82	179	31	91	38	33	52	98	103
San Bernardino	416	278	359	186	405	123	188	128	216	252
Toce (Ossola + Strona)	3692	1718	3070	1492	2621	1383	1288	1377	1926	2174
Erno	86	45	80	48	56	27	34	31	35	45
Vevera	107	50	61	75	43	15	16	11	45	44
Bardello	281	240	322	332	256	222	117	263	258	221
Boesio	233	134	196	110	238	99	158	93	131	133
Tresa	2141	1308	1904	697	920	479	721	667	1357	1138
Giona	112	75	111	64	100	54	57	57	80	81
Tributari campionati	12000	7700	10900	5800	8900	4900	5200	5800	8300	8200
Areale non campionato	1028	660	934	500	760	420	446	497	711	703
Totale bacino emerso	13000	8400	11800	6300	9700	5300	5600	6300	9000	8900
Fascia rivierasca	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Precipitazioni sul lago	800	700	840	400	500	500	400	380	540	569
Totale apporti	14500	9800	13300	7400	10900	6500	6700	7400	10200	10200
Uscite da emissario	12900	8600	11800	4600	8000	4500	4200	5500	8200	9300
Ritenzione in lago	11%	12%	11%	38%	27%	31%	37%	26%	20%	9%

La somma degli apporti di azoto totale dai tributari campionati (8200 t N a⁻¹), dall'areale non campionato (703 t N a⁻¹), dalla popolazione rivierasca (700 t N a⁻¹) e dalle precipitazioni atmosferiche sullo specchio lacustre (569 t N a⁻¹) nel 2009 è stata pari a 10200 t N a⁻¹, valore pressoché identico a quello del 2008 e superiore a quelli della maggior parte degli anni dal 2000 in poi. La ritenzione a lago, calcolata considerando il totale degli apporti e le uscite attraverso il Ticino emissario, è stata pari all'8% delle entrate, valore che risulta essere il più basso dell'ultimo decennio (Tab. 5.4). In generale gli apporti totali di azoto a lago mostrano un andamento corrispondente

a quello degli afflussi meteorici (Fig. 5.21), essendo le deposizioni atmosferiche e il dilavamento il veicolo principale di azoto per il bacino imbrifero del Lago Maggiore (Rogora *et al.*, 2006).

Tab. 5.5. Lago Maggiore. Bilanci annuali nel decennio 2000-2009 del fosforo totale ($t P a^{-1}$).

<i>Tributari campionati</i>	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09
Ticino Immissario	22	27	22	19	12	10	10	12	21	14
Maggia	11	12	20	8	5	7	7	4	18	12
Verzasca	4	2,6	5,8	2,5	1,4	1,6	2	1,2	4,1	3,5
Cannobino	1	1,0	1,7	1,6	1,6	2,3	2	1,8	2,7	2,3
San Giovanni	1	0,9	3,1	0,6	0,6	0,4	0	0,4	2,2	1,7
San Bernardino	2	1,4	3,4	2,0	1,2	2,5	1	0,4	2,2	2,0
Toce (Ossola + Strona)	99	51	57	42	43	27	26	31	44	29
Erno	1	0,5	0,8	0,4	0,5	0,6	0	0,6	0,5	0,6
Vevera	1	0,7	0,8	1,4	0,4	0,2	0	0,2	0,5	0,6
Bardello	20	23	27	42	27	34	19	40	27	23
Boesio	9	6,3	7,8	6,0	14,9	9	15	8	8	9
Tresa	59	26	40	20	22	12	19	16	30	28
Giona	2	1,3	2,0	1,3	2,4	1,5	2	1,5	1,6	1,3
<i>Tributari campionati</i>	231	153	191	148	132	108	102	117	161	127
Areale non campionato	20	13	16	13	11	9	9	10	14	11
<i>Totale bacino emerso</i>	251	166	207	160	143	118	111	127	175	138
Fascia rivierasca	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
Totale apporti	309	224	265	218	201	176	169	185	233	196
Uscite da emissario	171	114	115	84	116	65	62	66	116	103
Ritenzione in lago	45%	49%	57%	61%	42%	63%	63%	64%	50%	47%

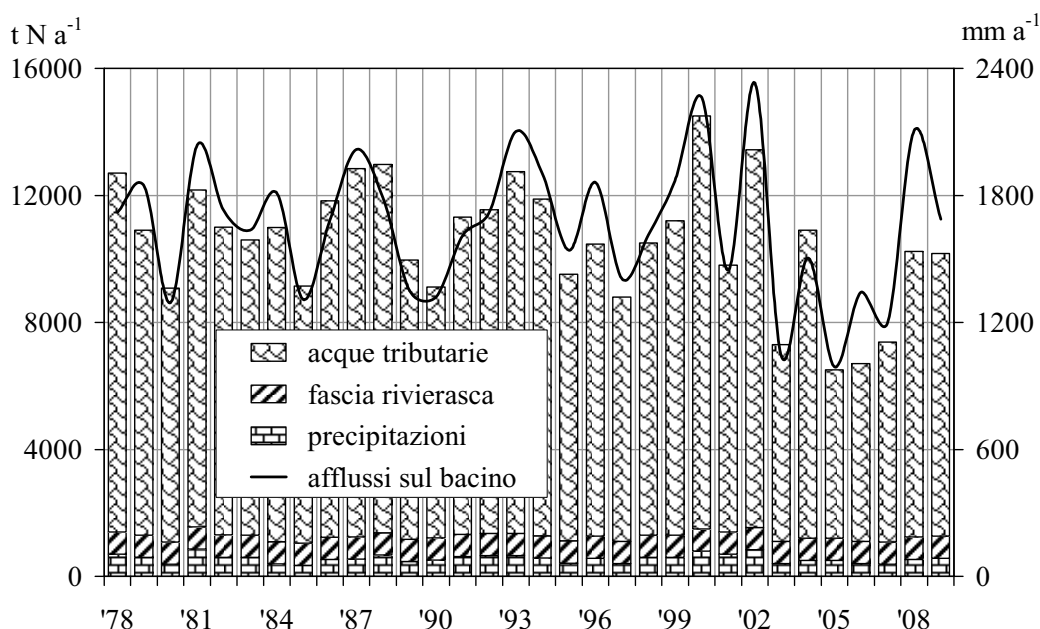


Fig. 5.21. Lago Maggiore. Apporti annuali di azoto totale al lago dall'areale emerso, dalla zona rivierasca e dalle precipitazioni atmosferiche sullo specchio lacustre, in relazione con gli afflussi meteorici annuali sul bacino imbrifero.

La ritenzione a lago rispecchia anch'essa la variabilità degli afflussi, risultando in genere minore negli anni più piovosi (es. 2000 e 2002) e viceversa, ma risente probabilmente anche del regime e della tipologia delle precipitazioni. Eventi brevi ed intensi, ad esempio, possono comportare un deflusso superficiale elevato ed una rapida saturazione dei suoli; questo si traduce in un ridotto contatto tra acque di ruscellamento e superfici, e quindi in una minor possibilità di ritenzione dell'azoto da parte di suoli e vegetazione. Questo effetto può risultare particolarmente accentuato in una situazione prossima alla saturazione di azoto, come è quella della maggior parte dei bacini versanti nell'areale del Lago Maggiore (Rogora *et al.*, 2007). Di conseguenza, anni con afflusso meteorico totale simile (es. 2008 e 2009), possono comunque dar luogo a situazioni diverse in termini di ritenzione/rilascio di azoto in funzione della distribuzione temporale e delle caratteristiche delle precipitazioni.

Il ruolo degli apporti meteorici e della variabilità idrologica negli apporti di azoto a lago è particolarmente evidente per l'ultimo decennio, caratterizzato da un'alternanza di anni con precipitazioni abbondanti (es. 2000, 2002, 2008 e 2009) ed apporti di azoto superiori a 10000 t a^{-1} , ed anni meno piovosi (es. 2003, 2005, 2007) con apporti di azoto tra 6500 e 7500 t a^{-1} (Tab. 5.4 e Fig. 5.21).

Per quanto riguarda il contributo dei singoli tributari al carico complessivo di azoto totale, gli apporti più consistenti, anche nel 2009, sono stati quelli derivanti dal Toce, comprensivo dello Strona (26,4%) e dal Ticino immissario (23,2%), seguiti da Maggia (18,1%) e Tresa (13,8%). I rimanenti corsi d'acqua contribuiscono per il 18% circa.

Relativamente agli apporti di fosforo totale a lago, riportati in tabella 5.5, il 2009 ha visto una diminuzione rispetto al 2008 (da 161 a 127 t P a^{-1}), in quanto tutti i tributari sono stati caratterizzati da un riduzione dei carichi, con l'eccezione del Bardello per il quale l'incremento è stato comunque modesto (da 8 a 9 t P a^{-1}). Le riduzioni più consistenti, superiori al 30%, hanno riguardato Ticino immissario, Maggia e Toce (Tab. 5.5).

Gli apporti totali di fosforo del 2009 sono stati tra i più bassi dell'ultimo decennio; valori inferiori erano stati rilevati negli anni 2005-2007, caratterizzati però da afflussi meteorici, e quindi anche da portate dei tributari, sensibilmente inferiori a quelli del 2009. Nel complesso la serie storica dei dati, disponibili dal 1978, conferma una tendenza alla diminuzione degli apporti totali di fosforo dal bacino a partire dalla seconda metà degli anni '80, pur con una notevole variabilità interannuale (Fig. 5.22).

In termini di contributi percentuali, i valori del 2009 sono aumentati rispetto all'anno precedente per quanto riguarda Boesio (da 5,0 a 6,7%), Bardello (da 16,5 a 18,3%) e Tresa (da 18,5 a 22,4%), mentre sono diminuiti per Ticino immissario (da 13,3 a 10,7%) e Toce (da 27,2 a 23,1%). Il contributo di quest'ultimo corso d'acqua rimane comunque il più importante, seguito nell'ordine da Tresa, Bardello, Ticino immissario e Maggia.

In tabella 5.6 sono riportati i contributi areali annuali dei composti dell'azoto e del fosforo totale per i tributari campionati e per il Ticino emissario, mettendo a confronto l'anno di studio con quello precedente. I dati confermano quanto già descritto per i carichi: per la maggior parte dei corsi d'acqua si osserva infatti una riduzione dei contributi areali di fosforo totale, con l'eccezione di Boesio, Erno e Vevera. La diminuzione complessiva per tutto l'areale campionato è stata del 21% (da $0,027$ a $0,022 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$); in termini percentuali le variazioni più consistenti tra 2008 e 2009, superiori al 30%, hanno riguardato Ticino immissario, Maggia, Toce e Strona.

I contributi per quanto riguarda l'azoto totale sono rimasti pressoché invariati rispetto al 2008. Per la maggior parte dei corsi d'acqua si sono verificati invece aumenti nei

contributi areali di azoto ammoniacale e organico. Per quest'ultimo l'aumento da tutto l'areale campionato è stato dell'ordine del 50%, da 0,094 a 0,147 g N m⁻² a⁻¹, con valori più che raddoppiati nel caso di Ticino immissario, Toce ed Erno.

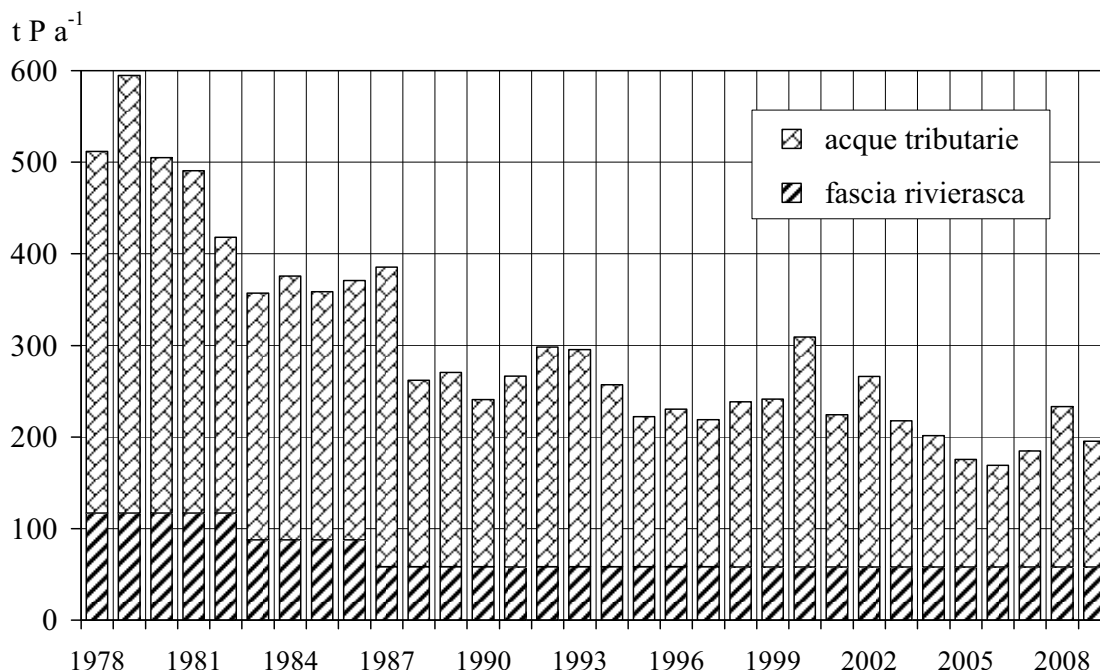


Fig. 5.22. Lago Maggiore. Apporti annuali di fosforo totale al lago dall'areale emerso e dalla zona rivierasca nel periodo 1978-2009.

Tab. 5.6. Lago Maggiore. Contributi areali annuali (g m⁻² a⁻¹) di azoto ammoniacale, nitrico, organico, totale e fosforo totale nel biennio 2008-2009 dai tributari campionati e dall'emissario.

		N-NH ₄		N-NO ₃		N _{org}		TN		TP	
		2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Ticino Immissario	TIM	0,023	0,025	1,301	1,050	0,054	0,105	1,378	1,180	0,013	0,008
Maggia	MAG	0,026	0,026	1,374	1,428	0,102	0,154	1,501	1,608	0,019	0,013
Verzasca	VER	0,021	0,031	1,360	1,428	0,106	0,158	1,487	1,616	0,017	0,015
Cannobino	CAN	0,026	0,034	1,730	2,343	0,150	0,201	1,906	2,579	0,025	0,021
San Giovanni	SGI	0,052	0,054	1,455	1,500	0,115	0,140	1,621	1,695	0,036	0,029
San Bernardino	SBE	0,040	0,040	1,521	1,762	0,091	0,125	1,651	1,927	0,017	0,015
Toce Ossola	TOC	0,030	0,081	0,858	0,843	0,068	0,163	0,955	1,088	0,024	0,016
Strona	STR	0,036	0,069	1,865	1,929	0,108	0,202	2,008	2,199	0,032	0,022
Erno	ERN	0,003	0,007	1,328	1,660	0,030	0,084	1,362	1,751	0,018	0,022
Vevera	VEV	0,027	0,042	1,982	1,974	0,100	0,049	2,109	2,065	0,024	0,026
Bardello	BAR	0,177	0,156	1,414	1,258	0,327	0,233	1,918	1,647	0,199	0,173
Boesio	BOE	0,238	0,182	2,449	2,369	0,201	0,373	2,888	2,925	0,177	0,187
Tresa	TRE	0,095	0,089	1,542	1,269	0,163	0,150	1,799	1,508	0,040	0,038
Giona	GIO	0,031	0,028	1,484	1,539	0,095	0,156	1,610	1,722	0,033	0,027
Totale campionati		0,041	0,055	1,281	1,202	0,094	0,147	1,416	1,404	0,027	0,022
Ticino emissario	TEM	0,038	0,029	1,112	1,202	0,089	0,179	1,239	1,411	0,018	0,018

Come già rilevato per i carichi, anche nel caso dei contributi areali l'aumento per azoto ammoniacale ed organico è imputabile ad un generalizzato aumento delle

concentrazioni di questi composti nei corsi d'acqua (Fig. 5.17 e 5.18), più che ad una variazione significativa delle portate. Anche in questo caso fa eccezione il Torrente Bardello, che ha visto nel 2009 una riduzione dei contributi areali per tutti i nutrienti considerati (Tab. 5.6). Questa tendenza al miglioramento era già stata evidenziata lo scorso anno e necessita di ulteriori approfondimenti. Resta però da sottolineare come, sia per il Bardello che per il Boesio, i valori dei carichi areali, e quindi gli apporti di nutrienti alle acque lacustri, si collocano su un livello decisamente superiore rispetto a quello di tutti gli altri tributari e rimangono a tutt'oggi troppo elevati.

Escludendo Boesio e Bardello, ed assumendo come obiettivo un contributo areale massimo di fosforo pari a $0,02 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, dai dati dell'ultimo triennio per i restanti 12 tributari (Fig 5.23) emerge come solo le condizioni di Maggia, Verzasca, Ticino immissario e S. Bernardino possano essere considerate accettabili. Anche il Toce, grazie alla diminuzione da $0,024$ a $0,016 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ nell'ultimo anno, rientra tra i corsi d'acqua con caratteristiche compatibili con l'obiettivo prefissato, al quale si avvicinano anche Erno e Cannobino. Questo trova conferma anche nei dati relativi ai composti dell'azoto: i livelli di azoto ammoniacale in particolare, evidenziano uno stato di alterazione per Toce, Tresa, Strona e S. Giovanni (Fig. 5.24). Quest'ultimo corso d'acqua, negli ultimi due anni è stato interessato da un sensibile peggioramento dello stato qualitativo delle acque, che appare evidente dal confronto con i valori del 2007, sia per il fosforo totale (Fig. 5.23), che per l'azoto ammoniacale (Fig. 5.24), e necessita quindi di essere monitorato con particolare attenzione.

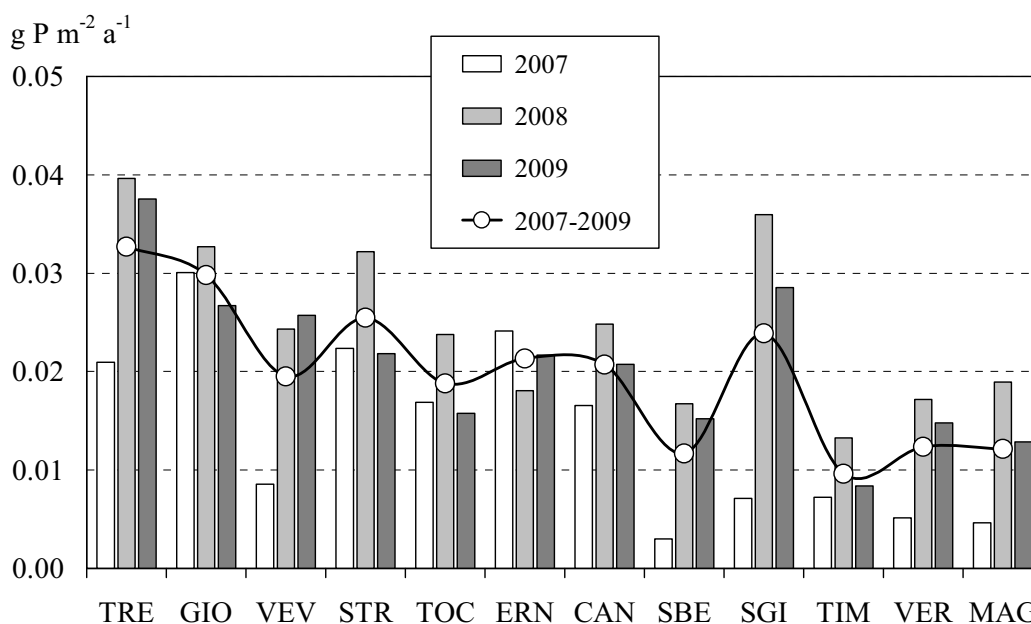


Fig. 5.23. Lago Maggiore. Contributi areali di fosforo totale, annuali e medi, dai singoli tributari (esclusi Bardello e Boesio) nel triennio 2007-2009.

Infine, per quanto riguarda l'azoto organico, il 2009 ha visto un aumento dei contributi areali rispetto a 2007 e 2008 per quasi tutti i corsi d'acqua (Fig. 5.25). Questa variazione, già evidenziata in termini di concentrazioni medie e di carichi, essendo al momento limitata ai dati di un solo anno, necessita di ulteriori verifiche prima che si possano formulare delle ipotesi sulle possibili cause.

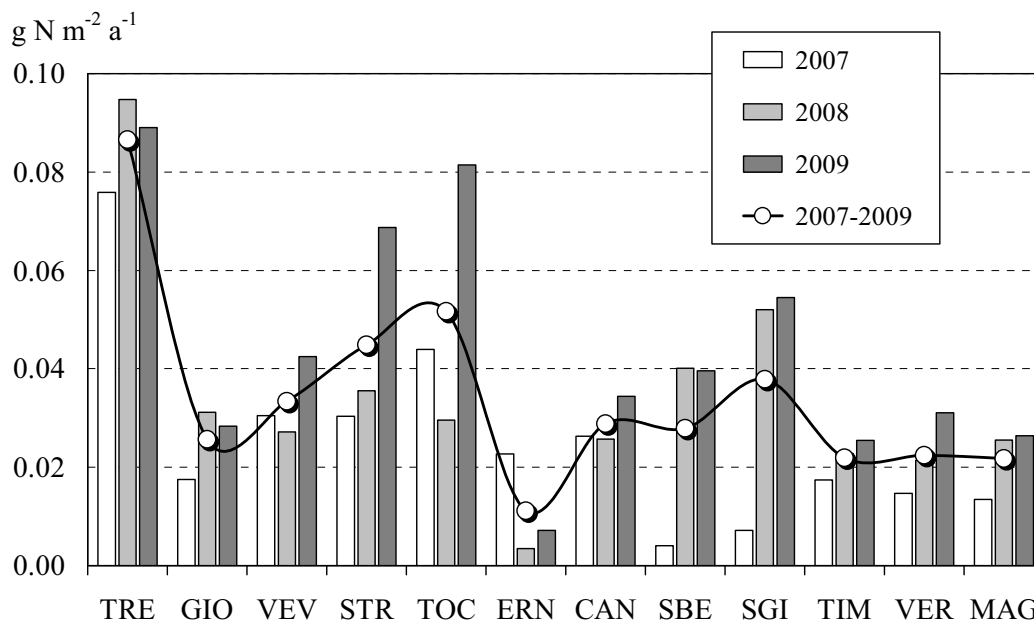


Fig. 5.24. Lago Maggiore. Contributi areali di azoto ammoniacale, annuali e medi, dai singoli tributari (esclusi Bardello e Boesio) nel triennio 2007–2009.

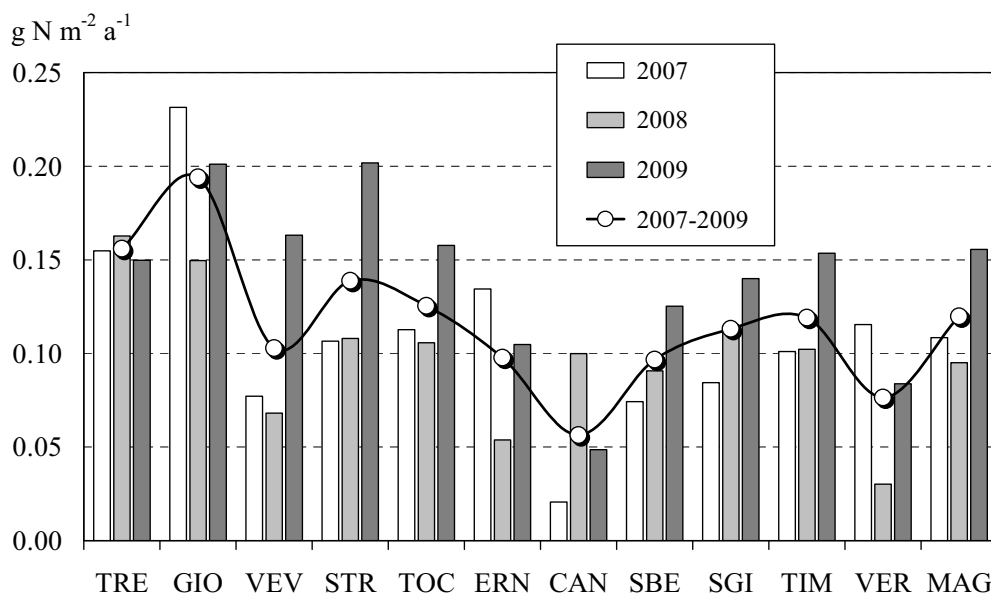


Fig. 5.25. Lago Maggiore. Contributi areali di azoto organico, annuali e medi, dai singoli tributari (esclusi Tresa e Boesio) nel triennio 2007–2009.

Ancora una volta infatti, confrontando i dati relativi ad un triennio, si osserva un'elevata variabilità interannuale, in parte attribuibile all'idrologia, che giustifica e rende necessaria la raccolta di serie lunghe di dati per evidenziare le effettive variazioni nella qualità delle acque tributarie.

In tabella 5.7 sono riportati i contributi areali totali calcolati per il 2009, e la loro suddivisione tra Ticino, Piemonte e Lombardia, a confronto con i dati del 2007 e 2008. Ancora una volta appare evidente la differenza tra le tre aree in termini di contributi: le acque tributarie ticinesi sono caratterizzate infatti da un livello qualitativo ottimale, sia per quanto riguarda i contributi areali di fosforo totale (circa $0,01 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) che di azoto ammoniacale ed organico (attorno a $0,02$ e $0,10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$); i contributi dall'areale piemontese appaiono più elevati, soprattutto per i composti dell'azoto ($0,04$ - $0,07 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ come valori medi per l'azoto ammoniacale, ed un aumento dei contributi di azoto organico da $0,08$ a $0,16 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), ma lo stato complessivo può comunque essere definito accettabile; infine, lo stato di alterazione delle acque tributarie lombarde appare ancora evidente, con contributi areali di fosforo totale sempre superiori a $0,06 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ e valori elevati anche per l'azoto (circa $0,10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ per l'ammonio e $0,17$ - $0,20 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ per l'azoto organico; Tab. 5.7).

In considerazione dell'elevata variabilità interannuale degli apporti di nutrienti, un controllo regolare dei singoli tributari si rende quindi necessario per seguirne l'evoluzione temporale, anche ai fini degli effetti sulla qualità delle acque litorali.

Tab. 5.7. Contributi areali di fosforo totale ($\text{g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) ed azoto ammoniacale e organico ($\text{g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) derivanti dalle acque tributarie ticinesi, piemontesi, lombarde e totali nel triennio 2007-2009.

	2007			2008			2009		
	<i>TP</i>	<i>NH₄</i>	<i>Norg</i>	<i>TP</i>	<i>NH₄</i>	<i>Norg</i>	<i>TP</i>	<i>NH₄</i>	<i>Norg</i>
Cantone Ticino	0,006	0,016	0,121	0,015	0,024	0,074	0,010	0,026	0,126
Piemonte	0,016	0,038	0,088	0,025	0,031	0,079	0,017	0,073	0,164
Lombardia	0,066	0,091	0,221	0,067	0,109	0,184	0,062	0,099	0,172
Acque tributarie	0,020	0,036	0,126	0,027	0,041	0,094	0,022	0,055	0,147