

Fisica, idrochimica e idrologia del Lago di Lavarone (Trentino, Italia)

Flavio CORRADINI¹*, Adriano BOSCAINI¹, Giovanna FLAIM¹, Maria Letizia FILIPPI², Andrea BORSATO² & Michele ZANDONATI²

¹ Centro Sperimentale, Istituto Agrario di San Michele all'Adige, Via Mach 1, 38010 San Michele all'Adige (TN), Italia

² Sezione di Geologia, Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, 38100 Trento, Italia

*E-mail dell'Autore per la corrispondenza: flavio.corradini@simaail.it

RIASSUNTO - *Fisica, idrochimica e idrologia del Lago di Lavarone (Trentino, Italia)* - Lavarone è un piccolo lago ($S= 50.000 \text{ m}^2$; $V= 380.600 \text{ m}^3$; profondità max= 17 m) situato a 1114 m di altitudine nel Trentino sud orientale. Sito su substrato calcareo, occupa il fondo di una dolina carsica ed è privo di immissari superficiali. Nel lavoro sono esposti i risultati di un approfondimento delle caratteristiche fisiche e chimiche delle acque del lago, svolto negli anni 2005-2006. I dati sono valutati e discussi insieme a dati pregressi degli ultimi 10-15 anni, che qui trovano occasione di presentazione e che rafforzano ed estendono sul medio periodo la rappresentatività dei primi. Vengono confermati lo stato di mesotrofia del lago, la stabile stratificazione termica estiva delle sue acque, la loro generale bassa trasparenza, una certa difficoltà per le stesse nel raggiungere completi rivolgimenti autunnali e primaverili, l'estesa anossia nell'ipolimnio, la netta dominanza del sistema calcio-bicarbonato nel contenuto salino, e la limitazione di azoto e fosforo nella nutrizione algale. Il lavoro ha portato inoltre a un primo inquadramento del ricambio idrico del lago, che avverrebbe in larga misura per via sotterranea attraverso gli strati profondi.

SUMMARY - *Physics, hydrochemistry and hydrology of Lago di Lavarone (Trentino, Italy)* - Lavarone is a small lake ($A= 50,000 \text{ m}^2$; $V= 380,600 \text{ m}^3$; max depth= 17 m) located at an altitude of 1114 m in southeastern Trentino. The lake lies on carbonate substratum and fills a karst doline without any surface inflows. This paper provides an in-depth account of the physical and chemical characteristics of the lake water for the period 2005-2006. The dataset is compared and discussed with data from the last 10-15 years, permitting some longterm considerations. The lake can be characterised as mesotrophic, with a stable summer stratification, an extensive anoxic zone in the hypolimnion, a limited transparency, an incomplete spring and autumn overturn, a net dominance of calcium-bicarbonate in its ionic makeup, and phosphorous and nitrogen as limiting factors for algal growth. This study also gives a first description of water renewal in this interesting karst lake, renewal that occurs mainly through the deeper layers.

Parole chiave: idrochimica, idrologia, Lago di Lavarone, Trentino

Key words: hydrochemistry, hydrology, Lago di Lavarone, Trentino

1. INTRODUZIONE

Il Lago di Lavarone è un piccolo specchio d'acqua ($S= 50.000 \text{ m}^2$; $V= 380.600 \text{ m}^3$; profondità max= 17 m; $S \text{ bacino}= 0,6 \text{ km}^2$) situato a 1114 m di altitudine sull'Altopiano di Folgaria e Lavarone, nel Trentino sud orientale (Figg. 1-2). Posto su substrato calcareo, occupa il fondo di una vasta dolina carsica. È uno dei pochi laghi dell'altopiano e da tempo esercita un forte richiamo turistico, soprattutto estivo. Dal punto di vista limnologico, è stato oggetto di studi: una bibliografia essenziale è riportata da Tomasi (2004). Un primo inquadramento limnologico risale a circa 20 anni fa (Casellato & Zanfei 1988), ma è solo dalla metà del decennio scorso che il lago è stato indagato con più attenzione (ISMA 1996, 1997, 1998; IASMA 2000), allo scopo soprattutto di controllarne

l'evoluzione trofica connessa alla presenza turistica. Dal 1988 nel lago è attivo un sifone con innesco a sfioro per l'allontanamento delle acque di fondo, il quale però non sempre ha funzionato con regolarità.

Il progetto di ricerca OLOAMBIENT ha fornito l'occasione per un approfondimento delle principali caratteristiche fisiche e chimiche del lago e di alcuni aspetti idrologici. Il presente articolo si propone di presentare i risultati di tali lavori.

2. MATERIALI E METODI

I dati meteorologici sono stati attinti dal database della stazione meteorologica di Lavarone (Fig. 2), gestita dalla Provincia Autonoma di Trento.



Fig. 1 - Localizzazione geografica del Lago di Lavarone.
 Fig. 1 - Geographic localisation of Lake Lavarone.

Il rilievo batimetrico è stato effettuato nell'aprile 2003 dall'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) di Trieste, tramite eco-scandaglio *EchoSonder SIMRAD EQ-33*, abbinato per il posizionamento a un GPS differenziale *TRIMBLE AgGPS 125*, di accuratezza submetrica.

I livelli del lago fino a tutto il 2004 sono stati rilevati dall'Ufficio Previsione e Organizzazione della Provincia Autonoma di Trento tramite lettura diretta su asta idrometrica. Il livello nell'anno 2005 è stato invece monitorato attraverso un datalogger *DIVER-Van Essen* (intervallo 0-30 m, risoluzione 0,2 mm; precisione 0,4 mm), programmato con tempi di acquisizione di un'ora e collocato sul fondo del lago.

La campagna di rilievi limnologici in campo e di prelievamento per le analisi di laboratorio è stata svolta nel suo complesso fra novembre 2004 e novembre 2006 sulla colonna d'acqua in corrispondenza della zona di massima profondità del lago (Fig. 2). I dati relativi a periodi precedenti, salvo diversa specifica, provengono dal database limnologico dell'Istituto Agrario di San Michele all'Adige; quelli idrochimici, in particolare, sono stati tutti prodotti dagli autori.

I dati di temperatura riportati nei profili verticali lungo la colonna d'acqua, quelli dell'ossigeno disciolto e quelli del potenziale redox sono stati rilevati tramite sonda multiparametrica *Hydrolab DS4a*, con misure effettuate a ogni metro di profondità. Gli altri dati di temperatura sono stati rilevati con fre-



Fig. 2 - Ortofoto della zona del Lago di Lavarone con la localizzazione della colonna di campionamento (bollo rosso) e della stazione meteorologica (bollo lilla).

Fig. 2 - Ortophoto of Lago di Lavarone area with the localisation of sampling column (red mark) and of meteorological station (lilac mark).

quenza oraria ogni due metri di profondità tramite acquisitori *StowAway TidbiT* della ONSET Computer Corporation (USA), collocati stabilmente per l'intero periodo d'indagine. I campioni d'acqua del lago per le analisi chimiche sono stati prelevati alle profondità di 0, 2,5, 5, 10 e 15 m con un campionatore per acque da 5 litri della UWITEC (Austria) con sistema di chiusura a strappo.

La frequenza di rilevazione e di prelievo è stata almeno quindicinale nei periodi in cui la superficie del lago era libera dal ghiaccio; d'inverno quando la superficie era ghiacciata si è effettuato almeno un campionamento.

La trasparenza al Disco di Secchi è stata misurata con un disco di 30 cm di diametro.

Prelievi, trattamenti, trasporto, conservazione e analisi in laboratorio dei campioni d'acqua sono stati eseguiti facendo riferimento a indicazioni e metodi standard (APAT & IRSA-CNR 2004; APHA 1998; Tartari & Mosello 1997). In particolare, in laboratorio

sono state determinate le seguenti variabili: torbidità (NTU), pH a 20 °C, conducibilità elettrica specifica a 20 °C, alcalinità, fosforo reattivo solubile, fosforo totale, azoto nitrico, azoto ammonico, azoto totale, silice reattiva, anioni degli acidi forti (solfato e cloruro), cationi metallici di base (calcio, magnesio, sodio e potassio), composizione isotopica dell'ossigeno dell'acqua. La filtrazione dei campioni, quando richiesta, è stata effettuata con filtri Millipore 0,45 µm. I campioni per le analisi in cromatografia ionica sono stati invece prefiltrati con Millipore 0,2 µm. Le tecniche analitiche adottate e la strumentazione utilizzata sono descritte in dettaglio in Corradini & Boscaini (2006). Le isoplete della temperatura sono state elaborate con il programma *Surfer version 8.00* (Golden Software, Inc.).

Il controllo di qualità dei risultati analitici è stato perseguito con l'inserimento di campioni di riferimento in ogni serie di determinazioni, l'adozione di relative carte di controllo, l'uso di materiali certificati (NIST), la partecipazione a test circolari di intercalibrazione su acque naturali e il controllo del bilancio ionico.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

In figura 3 è mostrata la batimetria del lago rilevata nell'ambito dell'attuale lavoro di ricerca nell'aprile 2003. Il rilievo non si discosta sostanzialmente da quello che venne eseguito il 1 ottobre 1971 dall'Ufficio Idrografico di Trento (in Casellato & Zanfei 1988). Le differenze, di dettaglio, possono essere attribuite alla diversa metodologia di lavoro e di calcolo. In tabella 1 sono riportati i volumi e le aree parziali calcolati per le diverse profondità a intervalli di due metri a partire dalla superficie. Il volume complessivo, al nuovo rilievo, è risultato di 380.600 m³ e la superficie di 49.927 m², a fronte rispettivamente di 383.430 m³ e 51.610 m² calcolati nel 1971.

Tab. 1 - Lago di Lavarone. Volumi e aree a diverse profondità.
Tab. 1 - Lago di Lavarone. Volumes and areas at different depths.

Livello m	Volume		Area	
	m ³	%	m ²	%
0	380.599	100,0	49.927	100,0
-2	290.001	76,2	43.394	86,9
-4	210.700	55,4	37.778	75,7
-6	143.318	37,7	30.938	62,0
-8	90.984	23,9	22.275	44,6
-10	53.172	14,0	16.265	32,6
-12	26.186	6,9	10.658	21,3
-14	9681	2,5	5984	12,0
-16	1464	0,4	2229	4,5

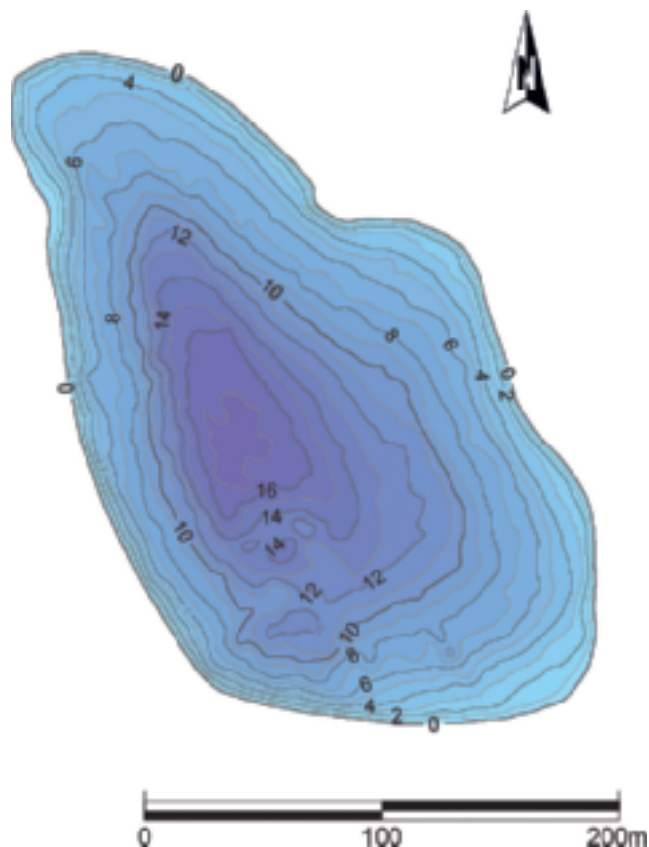


Fig. 3 - Batimetria del Lago di Lavarone (dati raccolti ed elaborati dall'OGS - Trieste).

Fig. 3 - Bathymetry of Lago di Lavarone (data collected and elaborated by OGS - Trieste).

Il livello del lago è stato monitorato in continuo per un anno fra novembre 2004 e ottobre 2005 e il suo andamento, insieme alle precipitazioni giornaliere, è presentato in figura 4. Nel periodo d'indagine il livello è oscillato nell'ambito di 40 cm, con un minimo in estate verso la fine di agosto dopo un periodo di sostanziale siccità e massimi relativi a seguito di piogge significative, soprattutto in autunno quando la capacità idrica dei suoli risulta saturata. Va tenuto presente che tramite un canale superficiale molto breve le acque emissarie defluiscono in un inghiottitoio carsico naturale avente una portata limitata, il che favorisce l'innalzamento del lago nei periodi di forte piovosità. In figura 5, per un confronto, sono riportati invece gli andamenti di livello dei quindici anni precedenti il 2005, limitatamente ai periodi in cui il lago risultava libero da copertura ghiacciata. Anche sul più lungo periodo si possono osservare oscillazioni di livello piuttosto contenute, ma in qualche anno più ampie, fino a circa un metro, a causa di picchi di massimo prevalentemente autunnali. Il lago gela tutti gli anni, con una data di disgelo collocata fra la fine di febbraio e la seconda metà di aprile (addirittura ai primi di maggio nel 1984:

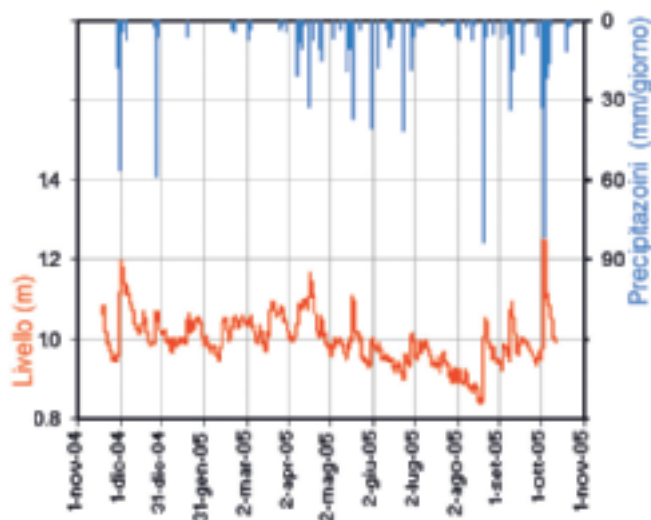


Fig. 4 - Lago di Lavarone. Livelli di superficie nel periodo novembre 2004 - ottobre 2005.

Fig. 4 - Lago di Lavarone. Surface level in the period November 2004 - October 2005.

Casellato & Zanfei 1988), un intervallo quasi doppio di quello in cui all'opposto si forma la copertura ghiacciata, compreso nel quindicennio fra il 20 novembre e il 19 dicembre.

La lettura dei dati di trasparenza al Disco di Secchi, rilevati fra i mesi di aprile 2005 e aprile 2006 (Fig. 6),

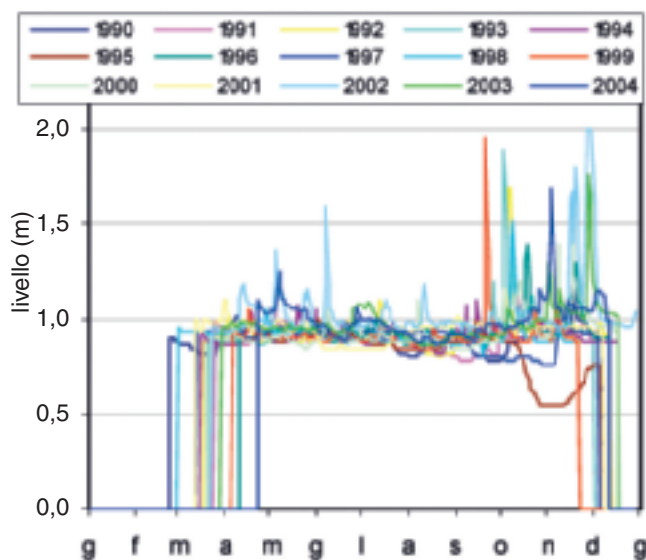


Fig. 5 - Lago di Lavarone. Livelli di superficie nei periodi liberi da copertura ghiacciata negli anni 1990-2004 (dati Ufficio Previsione e Organizzazione - PAT).

Fig. 5 - Lago di Lavarone. Surface levels during water free seasons in the years 1990-2004 (data from Uff. Prev. Org. - PAT).

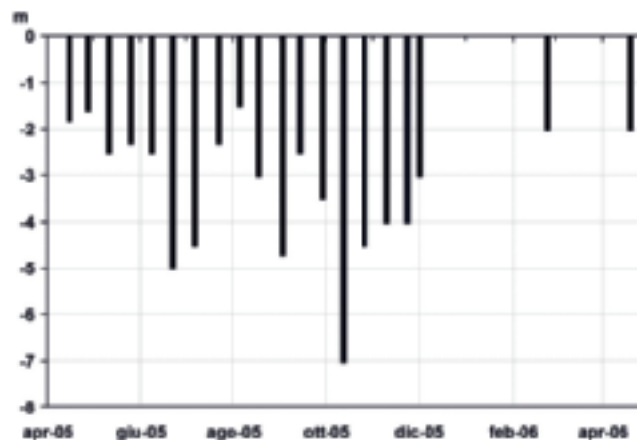


Fig. 6 - Lago di Lavarone. Trasparenza al Disco Secchi. Aprile 2005 - aprile 2006.

Fig. 6 - Lago di Lavarone. Secchi disk transparency. April 2005 - April 2006.

in particolare il loro valore medio e i loro valori estremi del 2005 (Tab. 2), porta a classificare il lago come mesotrofico (OECD 1982), in accordo con quanto rilevato nei decenni scorsi da Casellato & Zanfei (1988), da ISMA (1996, 1997, 1998) e da IASMA (2000). Il confronto con i dati di trasparenza di 41 rilievi effettuati dall'Istituto Agrario di San Michele nelle stagioni libere da copertura ghiacciata, in 17 anni compresi fra il 1980 e il 2003 (Tab. 2), non evidenzia differenze rilevanti fra i valori medi, minimi e massimi, indicando una sostanziale stabilità del livello trofico del lago negli ultimi 25 anni.

Particolare attenzione è stata rivolta alle caratteristiche termiche del lago: le temperature sono state monitorate pressoché in continuo a varie profondità per due annate, dal novembre 2004 all'ottobre 2006. Il quadro termico d'insieme, sotto forma di isoplete, è presentato in figura 7, mentre gli andamenti delle temperature medie giornaliere dell'acqua a diverse profondità, insieme a quelle dell'atmosfera e alle precipitazioni giornaliere, sono riportate in figura 8. Si osservano brevissimi periodi di isotermità lungo la colonna d'acqua, che si verificano ogni anno poco prima della formazione della copertura ghiacciata e all'inizio del disgelo, e proprio la loro breve durata lascia pensare che ad essi non sia sempre associato un rivolgimento completo delle acque: altre variabili, presentate più avanti, forniranno un quadro meglio definito.

Le figure 7 e 8, pur basate sostanzialmente sugli stessi dati, consentono di evidenziare e comunicare aspetti diversi del comportamento termico del lago. La figura 8, in particolare, permette di cogliere in modo più immediato e dettagliato i periodi di copertura ghiacciata, il veloce riscaldamento degli strati superficiali dopo il disgelo e l'evoluzione della stratificazione

Tab. 2 - Lago di Lavarone. Valori medi, minimi e massimi della trasparenza al Disco Secchi.

Tab. 2 - Lago di Lavarone. Minima, maxima and average values of Secchi Disk's transparency.

Periodo		2005 (apr-dic)	1980-2003
N. rilievi		18	41
Media	(m)	3,33	3,71
Min-max	(m)	1,5-7,0	1,6-5,5

termica con la formazione dell'epilimnio estivo. La stessa figura, riportando i dati della temperatura dell'aria e della piovosità, permette di cogliere la stretta relazione fra queste variabili e la temperatura dell'acqua nel livello superficiale. Giornate di pioggia e il conseguente calo della radiazione solare comportano in genere netti raffreddamenti sia dell'aria che dell'acqua superficiale; quest'ultima, tuttavia, conserva sempre una temperatura media giornaliera sempre al di sopra di quella atmosferica, con l'eccezione di brevi periodi durante il disgelo. Interessante osservare, sempre nella stessa figura, come dal disgelo in poi per i primi mesi le acque più vicine alla superficie vadano riscaldandosi pressoché omogeneamente per uno spessore di circa due metri, mantenendosi in un potenziale continuo mescolamento, coinvolgendo solo raramente nella loro isoterma le acque fino a tre metri di profondità e più

occasionalmente quelle fino a quattro metri. Solo da circa fine luglio, con l'avvio del progressivo raffreddamento delle acque epilimniche, il livello a -4 m viene inglobato stabilmente nell'isoterma di superficie: successivamente si aggiungono gli strati sottostanti.

In figura 9 sono rappresentati alcuni profili verticali della temperatura, dell'ossigeno disciolto e del potenziale Redox rilevati lungo la colonna d'acqua a centro lago fra aprile 2005 e febbraio 2006 (questi ultimi sotto la copertura ghiacciata). La figura 9a, con i dati di temperatura, presenta in una maniera ancora diversa quanto già riportato nelle due figure precedenti. Si nota con immediatezza quanto sia netta e ben definita la stratificazione termica estiva. Un confronto con profili analoghi rilevati in piena estate negli ultimi 20-25 anni (Vittori *et al.* 1984; Casellato & Zanfei 1988; ISMA 1996, 1997, 1998; IASMA 2000; database dell'Istituto Agrario di San Michele a/A – dati non pubblicati) non evidenzia cambiamenti, al di là di piccole oscillazioni interannuali: un epilimnio in luglio di 3-4 metri di spessore, con temperature comprese fra 20 e 25 °C, e un ipolimnio che si definisce a partire dai 10-11 metri di profondità, con temperature di 5-6, massimo 7 °C.

Per quanto riguarda l'ossigeno disciolto (Fig. 9b), il lago è caratterizzato da condizioni di marcata anossia nell'ipolimnio per buona parte dell'anno. Solo il profilo di dicembre evidenzia una buona ossigenazione delle acque di profondità a seguito dei fenomeni di rivolgimento che interessano le acque del lago in autunno. Le concentrazioni più elevate di ossigeno si osservano comunque in estate, nella zona fotica, con

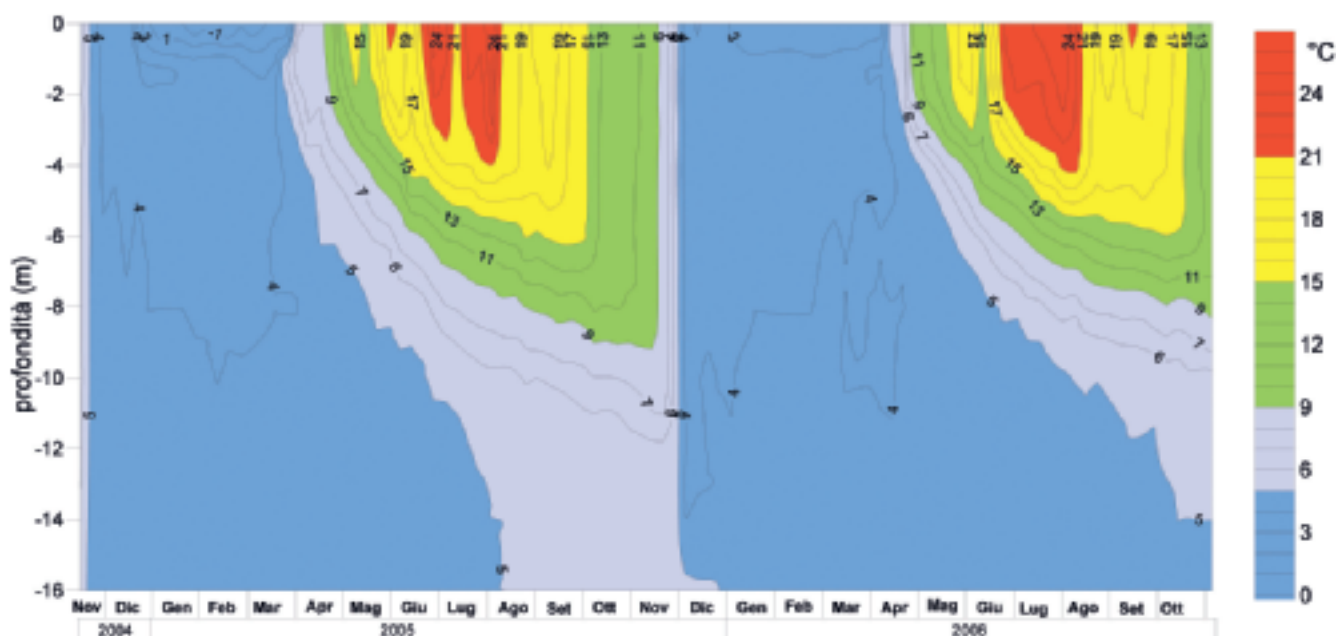


Fig. 7 - Lago di Lavarone. Isoplete della temperatura. Novembre 2004 - ottobre 2006.
 Fig. 7 - Lago di Lavarone. Isopletes of temperature. November 2004 - October 2006.

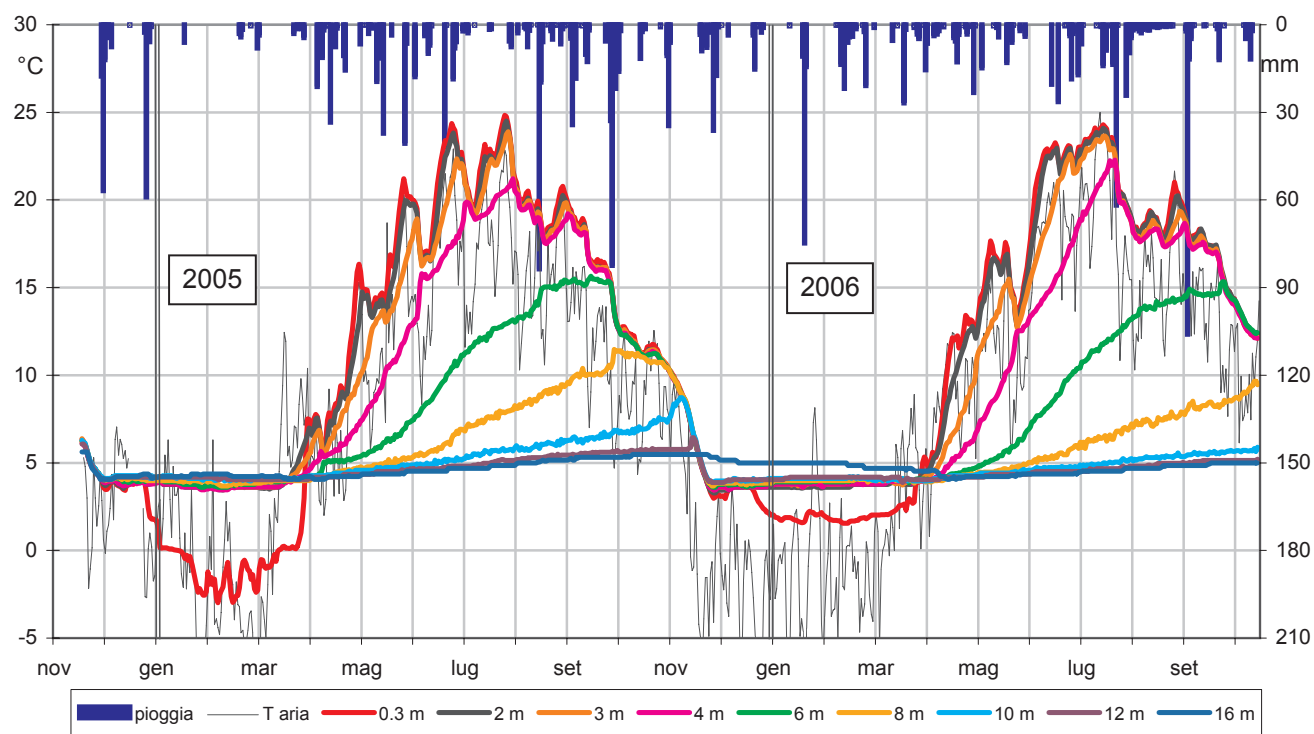


Fig. 8 - Lago di Lavarone. Temperature medie giornaliere dell'aria e dell'acqua a varie profondità. Novembre 2004 - ottobre 2006.

Fig. 8 - Lago di Lavarone. Mean daily temperatures of air and water at different depths. November 2004 - October 2006.

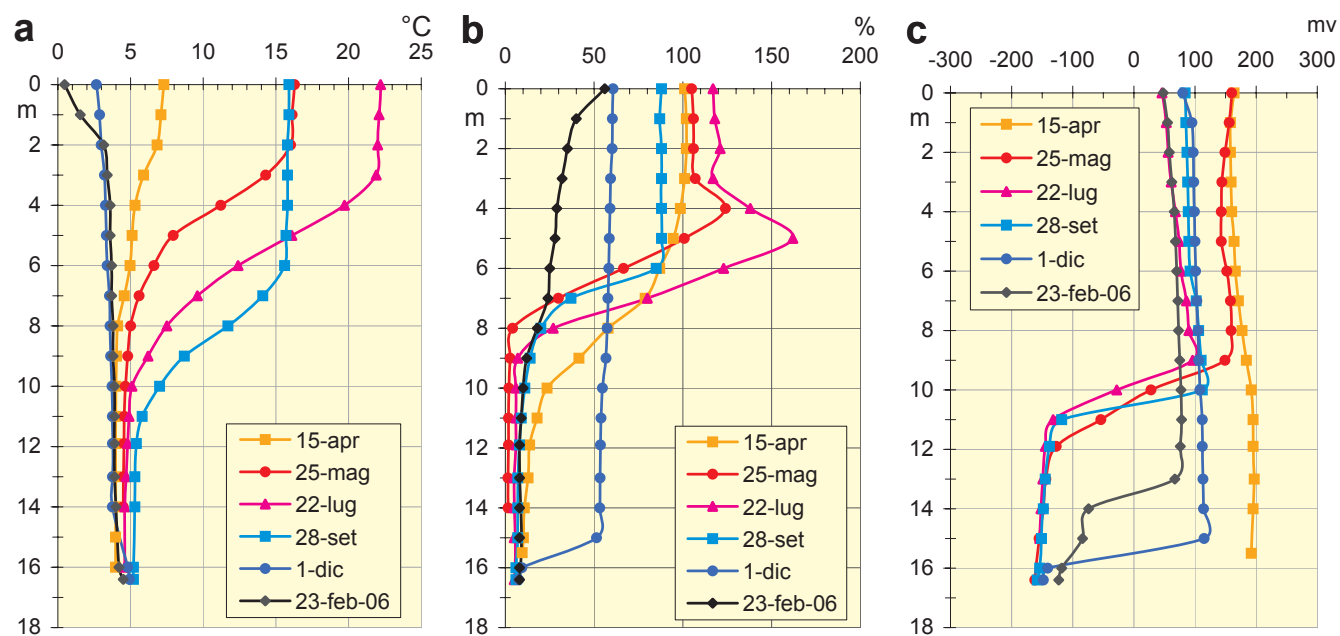


Fig. 9 - Lago di Lavarone. Profili verticali di temperatura (a), ossigeno disciolto (b) e potenziale Redox (c) nella zona di massima profondità. Anno 2005.

Fig. 9 - Lago di Lavarone. Vertical profiles of temperature (a), dissolved oxygen (b) and Redox potential (c) in the zone of highest depth. Year 2005.

Tab. 3 - Lago di Lavarone. Scheda riassuntiva dei dati chimici (valori medi).
 Tab. 3 - Lago di Lavarone. Chemical data (average values).

Livello di prelievo		Superficiale (1-2,5 m)		Profondo (15-16 m)	
Periodo di prelievo		Disgelo (mar-apr)		Tutto l'anno	
Anno/i di prelievo		2005	1995-2004	2005	1996-2004
n. campioni		1	11	21	31
Conduttività	$\mu\text{S cm}^{-1}$	269	271	323	325
pH		7,9	8,0	7,5	7,4
Ioni principali					
Ca	mg L^{-1}	53,8	55,9	63,8	64,4
Mg	mg L^{-1}	4,0	3,6	4,4	4,4
Na	mg L^{-1}	3,1	2,6	3,9	3,1
K	mg L^{-1}	0,5	0,6	0,7	0,7
HCO ₃	mg L^{-1}	172	175	210	213
SO ₄	mg L^{-1}	7,6	8,3	5,8	6,7
Cl	mg L^{-1}	7,0	5,5	8,2	6,1
Nutrienti					
N-NO ₃	$\mu\text{g L}^{-1}$	155	155	< 30	< 30
N-NH ₃	$\mu\text{g L}^{-1}$	60	50	1160	1250
Ntot	$\mu\text{g L}^{-1}$	670	580	1670	1770
P-PO ₄	$\mu\text{g L}^{-1}$	12	5	10	21
Ptot	$\mu\text{g L}^{-1}$	22	17	53	62
SiO ₂	mg L^{-1}	2,5	1,3	4,9	4,7

un picco massimo a fine luglio, a 5 m di profondità, con valori di quasi il 150% rispetto a quelli di saturazione. L'eccesso di ossigeno è riconducibile alla elevata attività fotosintetica delle alghe, che presentano complessivamente il loro massimo sviluppo nella stagione più calda e nei livelli superiori ben irradiati dalla luce. I dati sono in linea con quanto rilevato nei periodi estivi degli ultimi 25 anni (Vittori *et al.* 1984; Casellato & Zanfei 1988; ISMA 1996, 1997, 1998; IASMA 2000; database dell'Istituto Agrario di San Michele a/A – dati non pubblicati): è quasi sempre presente un picco di massima concentrazione nel metalimnio 1-2 metri sotto l'epilimnio, con valori compresi in genere fra il 150 e 200% di quelli alla saturazione.

I profili del potenziale Redox (Fig. 9c) confermano quanto evidenziato dai dati dell'ossigeno disciolto riguardo all'anossia degli strati profondi e al rivolgimento autunnale delle acque. Per buona parte dell'anno essi mettono in evidenza condizioni fortemente riducenti in profondità, che giustificano, come si vedrà più avanti in figura 10, l'assenza di nitrati e il calo di solfati nel periodo estivo autunnale. L'analisi di alcuni profili Redox rilevati in precedenza, a partire dal 1995, mostra solo qualche rivolgimento completo delle acque in tardo autunno, e talvolta anche in primavera al disgelo, e nell'insie-

me sembra indicare una certa difficoltà delle acque del lago a rimescolarsi pienamente tutti gli anni nei periodi di omeotermia.

La tabella 3 presenta una selezione dei principali dati chimici e chimico fisici riscontrati nel 2005 durante lo studio e li pone a confronto con le medie dei corrispondenti valori ottenuti nel decennio precedente. È stato assunto il disgelo primaverile, in concomitanza con il parziale rinnovo e rivolgimento delle acque, come periodo rappresentativo delle caratteristiche idrochimiche del lago, prima dunque che l'evoluzione della stagione vegetativa estiva vada a modificarle e differenziarle più o meno marcatamente nei vari strati di profondità. Sono state prese invece le caratteristiche delle acque di fondo per fornire un'indicazione sull'entità media annuale di alcuni processi di cambiamento in gioco. I dati della recente annata d'indagine (2005) risultano sostanzialmente simili a quelli medi corrispondenti rilevati nel decennio precedente, fatta eccezione per quelli degli ioni sodio e cloruro – tipici elementi conservativi, non soggetti negli ambienti lacustri ad alterazioni di tipo biologico o chimico –, le cui concentrazioni sono invece aumentate. Per gli altri parametri, le piccole differenze che talvolta si osservano possono essere considerate, sulla base dell'esperienza degli autori, rientranti nella normale variabilità interannuale.

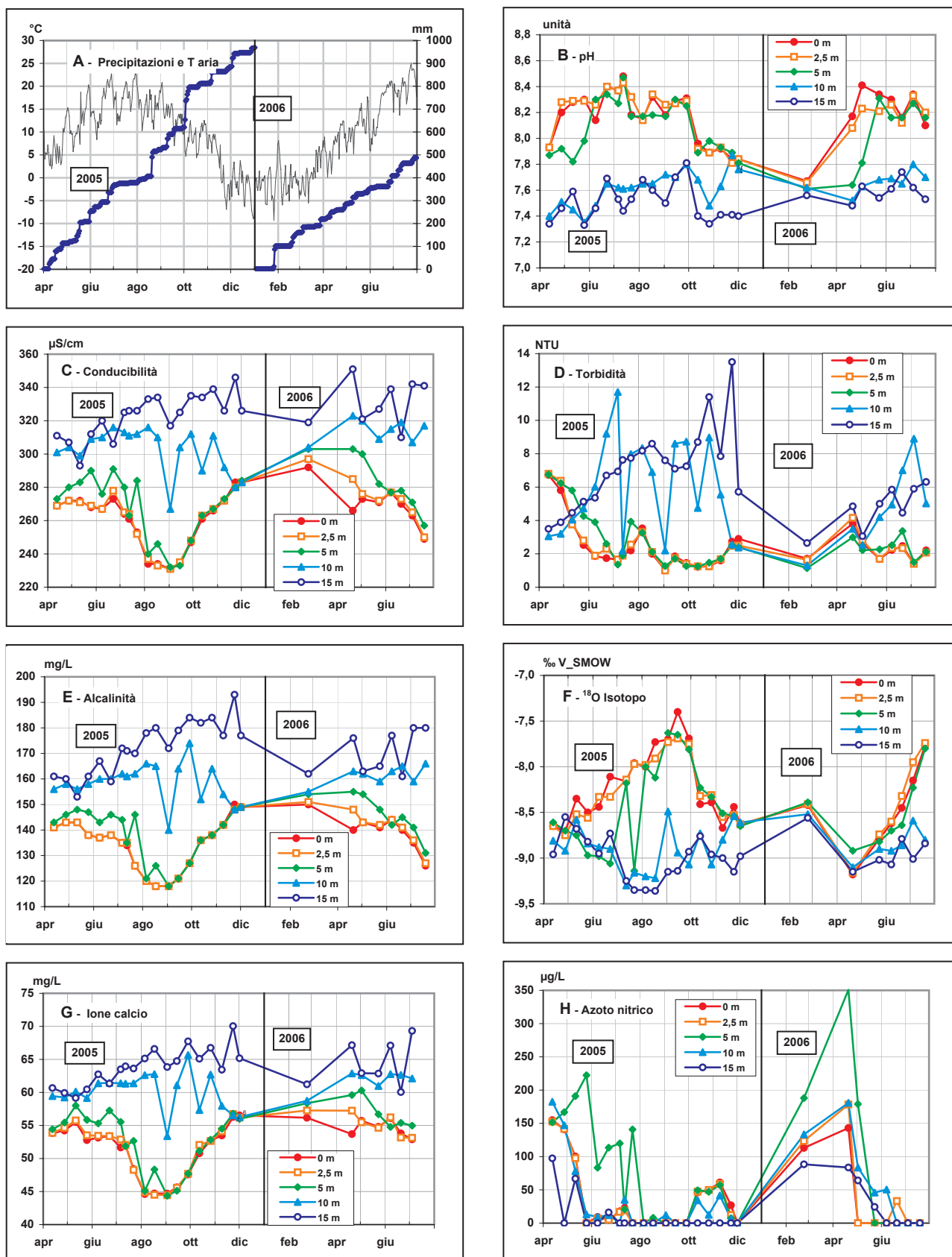
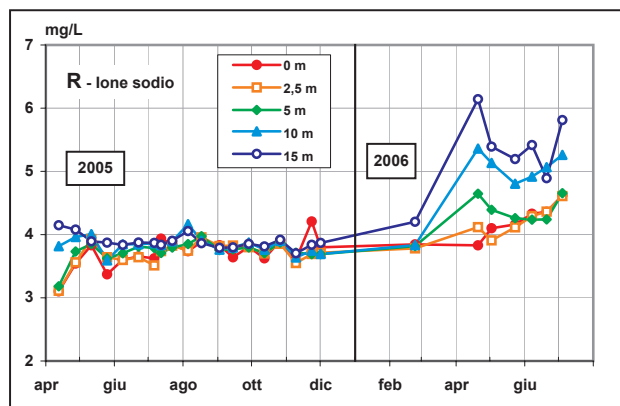
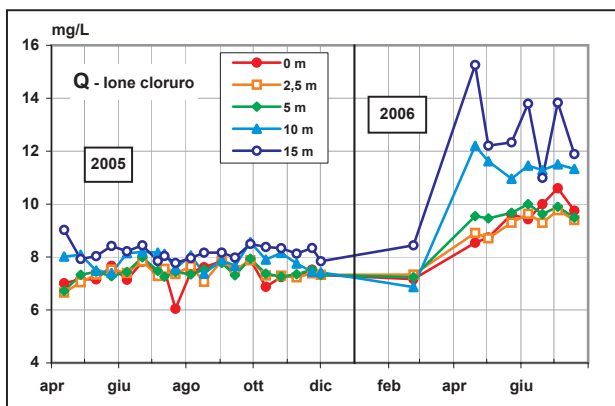
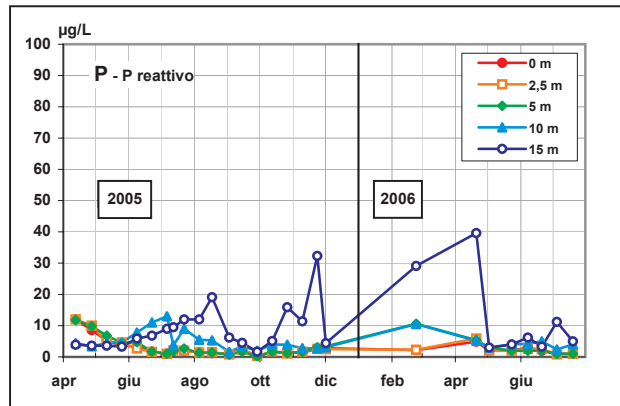
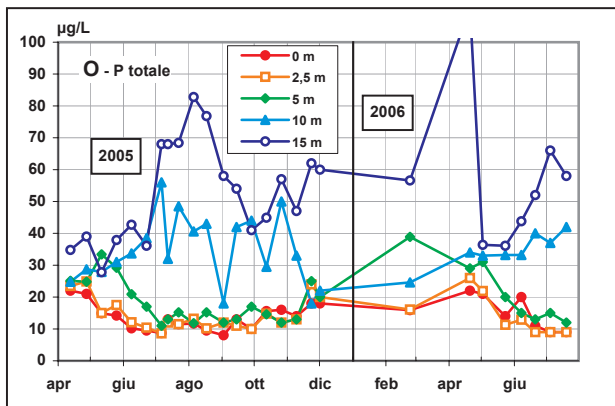
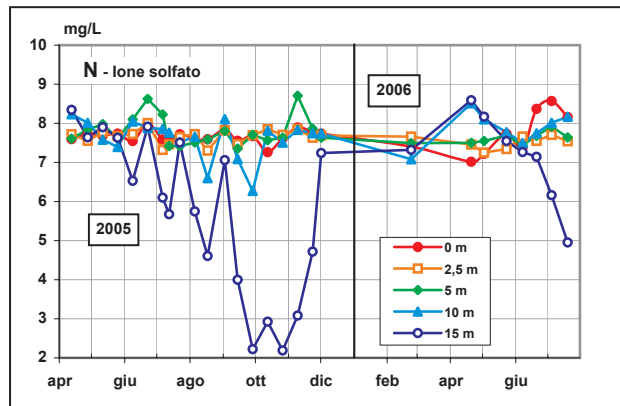
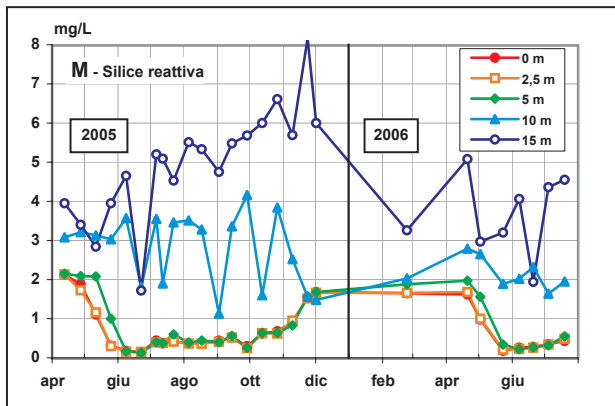
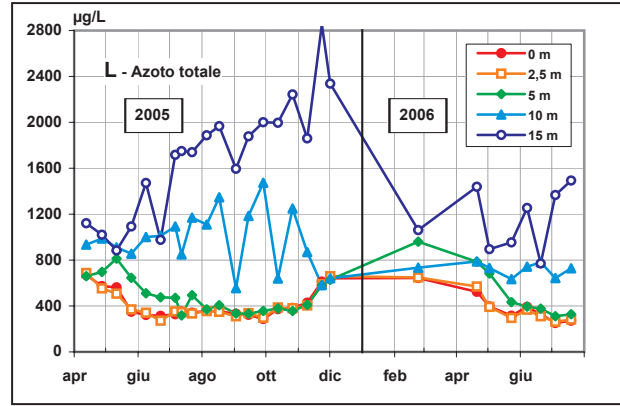
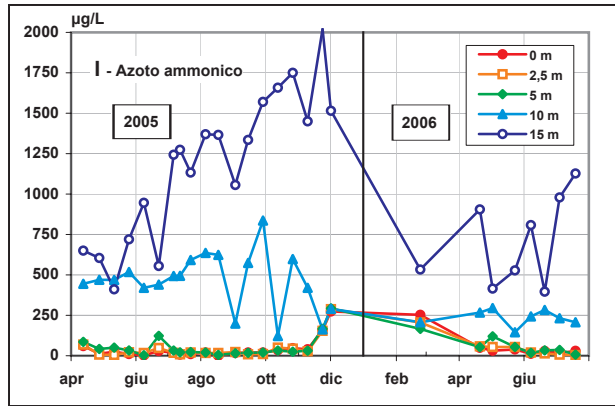


Fig. 10 - Lago di Lavarone. Precipitazioni cumulate e temperatura media giornaliera dell'aria (A) e variabili chimiche e chimico-fisiche a 5 diversi livelli di profondità. Aprile 2005 - luglio 2006.

Fig. 10 - Lake Lavarone. Cumulative precipitation and mean daily temperature of air (A) and chemical and chemical-physical variables at 5 different level of depth. April 2005 - July 2006.



(Fig. 10 - continua)
(Fig. 10 - continued)

In tabella 4 sono presentate più in dettaglio per alcuni ioni le concentrazioni medie annuali (non ponderate) nel periodo 1996-2006, calcolate sulla base di vari prelievi effettuati da aprile a dicembre a profondità fisse. A fronte di valori costanti mostrati da altri ioni – quali magnesio, potassio e anche solfato –, sodio e cloruro mostrano, ancora più chiaramente di quanto visto sopra in tabella 3, un aumento di concentrazione, che si è manifestato soprattutto negli ultimi anni e che complessivamente ha raggiunto il 100% dei valori iniziali. Un fenomeno questo di sicura origine antropica, che merita attenzione, conferma e approfondimento. Sodio e cloruri a parte, nell'insieme si osserva una sostanziale stabilità idrochimica del lago nel medio periodo e una buona rappresentatività quindi dei dati ottenuti nell'anno d'indagine 2005. Le acque del lago risultano caratterizzate da un contenuto salino medio, dominato e ben tamponato dal sistema calcio-bicarbonato, in pieno accordo con il substrato geologico di natura calcarea. I contenuti di nutrienti algali indicano uno stato di mesotrofia, con un ruolo limitante sia del fosforo che dell'azoto. Le concentrazioni in prossimità del fondo di alcune variabili, quali soprattutto le forme inorganiche dell'azoto ed i solfati, e le loro differenze rispetto agli strati superficiali confermano le condizioni di prevalente anossia descritte in precedenza per l'ipolimnio.

La concentrazione delle principali variabili idrochimiche è stata monitorata a cinque diverse profondità, scelte anche in modo che rappresentassero i livelli diversi della stratificazione termica delle acque, quando presente. In figura 10 sono riportati gli andamenti di ciascuna variabile. Nella stessa figura, in testa (a),

Tab. 4 - Lago di Lavarone. Concentrazioni medie annuali degli ioni Cl, Na, SO₄, Mg e K (periodo 1996-2006).

Tab. 4 - Lago di Lavarone. Yearly mean concentrations of Cl, Na, SO₄, Mg and K ions (years 1996-2006).

anno	n. campioni	Cl mg L ⁻¹	Na mg L ⁻¹	SO ₄ mg L ⁻¹	Mg mg L ⁻¹	K mg L ⁻¹
1996	16	4,8	2,2	-	3,8	0,6
1997	22	4,5	2,3	8,4	4,0	0,7
1998	22	4,8	2,6	9,0	4,0	0,8
1999	20	4,7	2,8	9,2	3,9	0,7
2000	20	5,6	3,0	8,5	3,8	0,7
2001	20	5,2	2,8	7,5	3,4	0,6
2002	-	-	-	-	-	-
2003	15	5,0	2,7	7,5	3,6	0,7
2004	15	7,1	3,3	7,4	3,9	0,7
2005	95	7,6	3,8	7,3	3,9	0,6
2006	35	10,6	4,7	7,6	4,0	0,6

sono presentate con la stessa scala temporale anche le precipitazioni in forma accumulata e la temperatura media giornaliera dell'aria, in modo da favorire un immediato e diretto confronto con tali parametri meteorologici e poterne cogliere le possibili relazioni. Non sono state invece riportate nel grafico quelle variabili, come magnesio e potassio, per le quali non si sono rilevate differenze di concentrazione nel tempo e con la profondità.

Una prima osservazione comune a tutte le variabili idrochimiche riguarda la buona sovrapposibilità degli andamenti in superficie e a 2,5 m di profondità (con i marcatori bollino rosso pieno e quadratino arancio), in accordo con la sovrapposibilità evidenziata dalle rispettive temperature (Fig. 8). Tranne che in inverno, lo strato di 2-2,5 m di spessore in prossimità della superficie può quindi essere considerato sempre sostanzialmente omogeneo e ben miscelato. A 5 m di profondità, invece, le concentrazioni di alcune variabili si discostano in certi periodi da quelle degli strati superiori, soprattutto a cavallo fra primavera ed estate in concomitanza con l'instaurarsi della stratificazione termica. Più marcate infine risultano, per gran parte dell'anno se non per tutto, le differenziazioni a 10 m di profondità (inizio ipolimnio) e soprattutto a 15 m, in prossimità del fondo.

Nell'insieme gli andamenti dei vari parametri ai diversi livelli possono considerarsi tipici di laghi situati in clima temperato, sostanzialmente dimittici, a chimismo bicarbonato-calcico, mesotrofici e con le acque di profondità anossiche per gran parte dell'anno (Wetzel 2002).

Ad esempio, l'evidente calo estivo della conducibilità, dell'alcalinità e dello ione calcio negli strati superiori sono conseguenza dell'attività fotosintetica delle alghe, con consumo di CO₂ e aumento di ph, e precipitazione di carbonato di calcio. I tre parametri, al di là delle diverse scale di misura, hanno fra il resto andamenti pressoché sovrapposibili: nel Lago di Lavarone gli ioni calcio e bicarbonato sono infatti i componenti dominanti della composizione salina da cui dipende la conducibilità elettrica.

La torbidità nei primi 2-3 m dalla superficie riflette abbastanza fedelmente, sebbene con andamento opposto, la trasparenza delle acque al Disco di Secchi (Fig. 6), ed è legata all'attività e alla densità algale. In profondità, invece, la torbidità va gradatamente aumentando fino al rivolgimento autunnale, a seguito della via via maggiore sedimentazione di materiale organico biologico proveniente dall'epilimnio.

La composizione isotopica dell'ossigeno dell'acqua del lago va incontro in superficie, da aprile a settembre, a una progressiva concentrazione relativa dell'isotopo 18, in linea con l'elevata evaporazione stagionale in cui esso è percentualmente meno coinvolto rispetto all'isotopo 16 dominante. Meno scontato e più interessante invece è il suo variare di concentrazione nell'ipolim-

nio, soprattutto nei periodi primaverile e tardo estivo-autunnale del 2005. Per le caratteristiche conservative del parametro in assenza di fenomeni di evaporazione, la sua variazione è indice di ricambio delle acque, che in tali periodi tuttavia non può essere alimentato dagli strati superiori, sia per la concentrazione del parametro che in esse evolve in senso contrario, almeno fino a settembre, sia per la ben definita e stabile stratificazione termica delle acque del lago, che ne impedisce scambi in senso verticale. Tale lettura, in assenza di rilevanti immissari superficiali che con acque più fredde potrebbero raggiungere e influenzare direttamente gli strati profondi, implica un significativo ricambio delle acque attraverso apporti direttamente in profondità.

L'azoto nitrico (i nitrati) in entrambe le stagioni estive sembra sparire dalle acque del lago. Nell'epilimnio viene metabolizzato dalla biomassa algale in forte sviluppo e ne diviene ben presto, a fine primavera, fattore limitante; l'azoto corrispondente si ritrova per contro sotto forma organica nel parametro "azoto totale". Nelle condizioni prive di ossigeno e fortemente riducenti dell'ipolimnio, invece, lo ione nitrato viene utilizzato da microrganismi anaerobici come donatore di ossigeno e l'azoto corrispondente viene ridotto e liberato come azoto elementare (N_2).

L'azoto ammonico (ione ammonio) è praticamente assente durante la stagione vegetativa nella zona fotica, dove, se e quando prodotto, viene rapidamente ossidato. Esso è invece marcatamente presente negli strati profondi, soprattutto in quelli anossici, dove viene prodotto e liberato nei processi di degradazione biologica del materiale organico in sedimentazione, e aumenta gradatamente di concentrazione fino al rivolgimento tardo autunnale delle acque, non trovando le condizioni per essere ossidato.

La silice reattiva evidenzia un forte abbattimento di concentrazione nell'epilimnio in primavera, per il suo consumo da parte delle diatomee, le quali fioriscono in genere in questa stagione. In seguito, la sua presenza rimane piuttosto bassa e sostanzialmente costante fino al rivolgimento autunnale, così mantenuta probabilmente da un costante equilibrio fra limitati apporti e corrispondenti consumi. Negli strati più profondi la sua concentrazione evidenzia forti incrementi nelle zone anossiche, soprattutto in presenza di condizioni fortemente riducenti, seguendo fedelmente l'andamento dello ione ammonio.

I solfati sono interessanti per il loro andamento nello strato di fondo, dove il marcato calo di concentrazione, che si manifesta nelle stagioni estiva e autunnale, riflette un ambiente di basso potenziale Redox. Qui trova spazio infatti l'attività di microrganismi solforiduttori che utilizzano i solfati come accettori di elettroni e contemporanea fonte di ossigeno.

I contenuti del fosforo totale nella zona fotica sono indice di mesotrofia, mentre in profondità, per il loro rapporto con il basso contenuto della forma reattiva

solubile, sono riconducibili prevalentemente alla presenza di biomassa in sedimentazione, piuttosto che a liberazione in forma solubile di fosforo inorganico dalla stessa biomassa e dai fanghi di fondo. Di una cessione di fosforo solubile, sebbene piuttosto limitata, sono comunque riprova i picchi di massimo relativo di tale variabile presenti in agosto e autunno 2005.

Gli ioni cloruro e sodio presentano andamenti simili, in un rapporto fra loro non stechiometrico ma sostanzialmente costante. I loro livelli medi di concentrazione si mantengono costanti durante tutto il 2005 e subiscono un incremento con il disgelo del 2006, più evidente all'inizio negli strati più profondi. Sono andamenti analoghi a quelli osservati negli anni precedenti (dati non pubblicati – database IASMA) la cui sintesi è già stata presentata in tabella 4. Cloruro e sodio sono ioni conservativi e le loro concentrazioni negli ambienti lacustri non sono soggette a cambiamenti di origine biologica o chimica, ma dipendono da quelle delle acque di entrata. Per entrambi, la spiegazione più logica dell'aumento di concentrazione potrebbe essere individuata nel veloce dilavamento nel lago, anche per via sotterranea, del cloruro di sodio sparso come antighiaccio durante l'inverno sulle strade del bacino sotteso. Il mancato rapporto stechiometrico, ben maggiore di 1 in favore del cloro, potrebbe essere dovuto all'uso come antighiaccio, soprattutto negli ultimi anni, di cloruro di calcio in abbinamento a quello di sodio. Il maggiore incremento di concentrazione che si osserva inizialmente negli strati profondi potrebbe invece essere spiegato dall'apporto degli ioni direttamente in profondità, dove sarebbe più incisivo per il minore volume relativo delle acque interessate. Ciò in accordo con l'ipotesi di alimentazione idrica per via sotterranea sopra discussa in relazione alle variazioni del $\delta^{18}O$ dell'acqua.

Gli andamenti delle variabili nei livelli intermedi di profondità, a 5 e 10 m dalla superficie, sono influenzati pure dalle caratteristiche degli strati contigui, superiore e inferiore, e la loro interpretazione va fatta, di conseguenza, anche in relazione al verificarsi o meno di fenomeni di rivolgimento verticale oltreché di ricambio diretto delle acque. Molte situazioni presentate nei grafici di figura 10, in cui le curve di concentrazione con il progredire delle stagioni prima si separano, quindi si sovrappongono per poi talvolta separarsi di nuovo più o meno velocemente, vanno dunque lette incrociandole con il quadro termico del lago (Fig. 8) e collegandole con l'andamento meteorologico (Fig. 10A).

Qualche difficoltà d'interpretazione e qualche dubbio sono sorti nell'osservare le marcate oscillazioni che spesso caratterizzano l'andamento di alcune variabili negli strati profondi, a -15 e soprattutto a -10 m, anche in stagioni in cui ci si aspetterebbe una certa stabilità. Un controllo della qualità dei dati e un riesame della filiera di prelievo e di trasporto ci ha portato a escludere errori analitici e, pur non

escludendo qualche possibile eccezione, sono stati esclusi anche errori di prelievo, perché è improbabile che essi riguardino sistematicamente o prevalentemente solo alcune profondità. Ad esempio, i forti sbalzi oscillatori a 10 m di profondità manifestati dalla concentrazione di molte variabili (conducibilità, torbidità, $\delta^{18}\text{O}$, azoto ammonico, silice reattiva, ione ammonio, solfati e fosforo totale) nel periodo compreso fra fine agosto e fine ottobre 2005 non sembrano avere una stretta relazione con gli strati vicini né trovare spiegazione nelle dinamiche biologiche e chimiche tipiche di quello strato lacustre. Un confronto con la figura 10A, che riporta la piovosità in forma accumulata, evidenzia nel periodo un susseguirsi di rilevanti eventi piovosi che precedono con regolarità i salti unidirezionali di concentrazione, con uno sfasamento temporale di circa una decina di giorni. Lo stesso comportamento, sebbene più attenuato, si osserva nello strato in prossimità del fondo. Sembra così di poter cogliere una relazione fra eventi piovosi e più in generale fra l'andamento delle precipitazioni e il comportamento di alcune caratteristiche idrochimiche negli strati profondi del lago, che non ha riscontro in corrispondenti cambiamenti nei livelli più vicini alla superficie. Il ricambio delle acque tramite apporti sotterranei, con il coinvolgimento degli strati in profondità già ipotizzato in precedenza nella discussione di altre variabili, trova qui ulteriore conferma. In mancanza di rilevanti apporti superficiali, salvo quelli di ruscellamento in corrispondenza di intense piogge, tale ricambio potrebbe rappresentare la modalità dominante di alimentazione idrica del lago. Un quadro simile fornirebbe anche una plausibile spiegazione alla discontinuità negli strati profondi di certe variabili idrochimiche osservata nel decennio passato dagli autori (Corradini, dati non pubblicati) e che non era di facile interpretazione.

4. CONCLUSIONI

Il lavoro nel suo insieme ha approfondito le caratteristiche fisiche e chimiche delle acque del Lago di Lavarone, un piccolo bacino lacustre finora studiato poco e solo in modo occasionale, ma ben conosciuto in Trentino per la sua rilevanza turistico-ricreativa. Si è presentata inoltre l'occasione di raccogliere dati di anni recenti, che altrimenti rischiavano di rimanere non pubblicati e andare dispersi.

Hanno trovato conferma caratteristiche del lago in parte già note, quali lo stato di mesotrofia, la stabile stratificazione termica estiva delle sue acque con condizioni di anossia nell'ipolimnio, la trasparenza costantemente bassa delle acque, una certa difficoltà per le stesse nel raggiungere completi rivolgimenti autunnali e primaverili, e la limitazione dell'azoto e del fosforo nella nutrizione algale.

Il lago è interessante per la sua origine carsica: esso infatti occupa un'ampia e profonda dolina, cosa che lo distingue dalla gran parte dei laghi del territorio trentino. Ne conseguono peculiari modalità di alimentazione idrica che, in assenza di immissari superficiali di rilievo, sembrano coinvolgere soprattutto gli strati profondi del lago e che il presente studio ha contribuito a mettere in luce.

Negli ultimi anni è stato evidenziato un aumento di concentrazione degli ioni cloruro e sodio, sicuramente di origine antropica, che merita attenzione e conferma. Non si sono riscontrati invece rilevanti riflessi della significativa presenza turistica che gravita sul lago nella stagione estiva, forse a dimostrazione di una buona attività di salvaguardia ambientale. In tale ambito, per tenerne sotto controllo l'evoluzione trofica, sarebbe auspicabile che venisse eseguito un monitoraggio costante delle acque lacustri, quale quello condotto per anni dall'Istituto Agrario di San Michele all'Adige.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è parte del progetto di ricerca OLOAMBIENT finanziato dal Fondo Unico per la Ricerca della Provincia Autonoma di Trento.

Si ringraziano Renza Miorandi, Nicola Angeli, Massimiliano Tardio, Vigilio Pinamonti e Gino Leonardi per la collaborazione nell'attività di rilievo in campo e di campionamento, Simone Degasperi, Claudio Sansoni, Milva Tarter e Agostino Tonon per lo svolgimento delle analisi chimiche di laboratorio.

Si ringraziano altresì le famiglie Bertoldi e Marzari, proprietarie dei due lidi sul lago, per la disponibilità e il supporto logistico.

BIBLIOGRAFIA

- APAT & IRSA-CNR, 2004 - Metodi analitici per le acque. *Manuali e linee guida IRSA 29/2003*, Voll. I-II: 844 pp.
- APHA, 1998 - *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th ed. APHA, AWWA, WEF. Washington D.C.
- Casellato S. & Zanfei M., 1988 - Primo quadro limnologico generale del Lago di Lavarone (Trento, Italia). *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Biol.*; 64 (1987): 135-136.
- Corradini F. & Boscaini A., 2006 - Fisica e chimica delle acque del Lago di Tovel. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Biol.*, 81 (2004), Suppl. 2: 307-326.
- IASMA, 2000 - *Caratteristiche limnologiche dei laghi del Trentino. Rapporto 1998*. Istituto Agrario di S. Michele a/Adige: 94 pp.
- ISMA, 1996 - *Caratteristiche limnologiche dei laghi del Trentino. Rapporto 1995*. Istituto Agrario di S. Michele a/Adige: 112 pp.

- ISMA, 1997 - *Caratteristiche limnologiche dei laghi del Trentino. Rapporto 1996*. Istituto Agrario di S. Michele a/Adige: 176 pp.
- ISMA, 1998 - *Caratteristiche limnologiche dei laghi del Trentino. Rapporto 1997*. Istituto Agrario di S. Michele a/Adige: 144 pp.
- OECD, 1982 - *Eutrophication of water: monitoring, assessment and control*. OECD, Paris: 150 pp.
- Tartari A. & Mosello R., 1997 - Metodologie analitiche e controlli di qualità nel laboratorio chimico dell'Istituto Italiano di Idrobiologia. *Documenta Ist. Ital. Idrobiol.*, 60: 160 pp.
- Tomasi G., 2004 - *I trecento laghi del Trentino*. Temi Editrice, Trento: 536 pp.
- Vittori A., Leonardi G., Pinamonti V. & Siligardi M., 1984 - Osservazioni limnologiche e dello stato trofico di otto laghi del Trentino. Istituto Agrario di San Michele all'Adige (TN), *Esperienze e Ricerche*, 14: 139-236.
- Wetzel R.G., 2001 - *Limnology*. Academic Press, San Diego, California: 1006 pp.

