



IL LIVELLO TROFICO DEL LAGO DI BOLSENA

AGGIORNAMENTO PRIMAVERA 2025



A cura di Georg Wallner, Enrico Calvario, Piero Bruni.

**Con la collaborazione operativa della rete di volontari
dell'Associazione Lago di Bolsena.**



INDICE

1. PREMESSA.....	4
2. EVOLUZIONE DELLA CONCENTRAZIONE MEDIA DEL FOSFORO TOTALE NEL LAGO DI BOLSENA	5
2.1. I MONITORAGGI DELL'ASSOCIAZIONE LAGO DI BOLSENA.....	6
2.2. I MONITORAGGI DELL'ARPA LAZIO.....	6
2.3. DISCUSSIONE DEI DATI	9
2.3.1. Dati dell'Associazione Lago di Bolsena.....	9
2.3.2. Dati dell'ARPA Lazio.....	11
3. EVOLUZIONE DI CONCENTRAZIONE E DISTRIBUZIONE DELL'OSSIGENO IPOLIMINICO	13
3.1. DATI DELL'ASSOCIAZIONE LAGO DI BOLSENA	13
3.2. DATI DELL'ARPA LAZIO	16
4. IL CAMBIAMENTO CLIMATICO	17
5. IL LIVELLO TROFICO ATTUALE	20
5.1. DETERMINAZIONE DEL LIVELLO TROFICO DAI DATI DELL'ASSOCIAZIONE LAGO DI BOLSENA PER L'ANNO 2024.....	20
5.2. DETERMINAZIONE DEL LIVELLO TROFICO DAI DATI DELL'ARPA LAZIO	22
6. EVOLUZIONE FUTURA	23
7. NOTE E BIBLIOGRAFIA	42

Allegati

Allegato 1. Lo stato del lago

Allegato 2. Posizione delle stazioni di monitoraggio di ALB e ARPA

Allegato 3. Riflessione sugli errori di misura delle concentrazioni di fosforo

Allegato 4. I venti

Allegato 5. La trasparenza

Allegato 6. Curva ipsografica e calcolo dei volumi



Questa relazione è frutto di oltre 20 anni di lavoro e di collaborazione tra molte persone ed Enti, di seguito indicati, che ringraziamo vivamente: l'Istituto di Ricerca sulle Acque, CNR-IRSA di Verbania che da anni ci supporta tecnicamente realizzando le analisi chimiche dei campioni d'acqua del lago e con il quale ci confrontiamo per una corretta interpretazione scientifica dei risultati; l'ARPA Lazio i cui dirigenti e tecnici si sono dimostrati disponibili ad un proficuo confronto; i tanti volontari e le tante volontarie della nostra associazione per l'impegno costante nella raccolta dei campioni, nell'analisi dei risultati e nella loro divulgazione.

1. PREMESSA

Nel corso degli ultimi anni sono avvenuti importanti miglioramenti nella gestione ambientale del Lago di Bolsena. I cospicui finanziamenti della Regione Lazio hanno consentito di porre fine agli sversamenti di liquami fognari nel lago causati dalla disastrosa situazione del collettore circumlacuale la cui gestione è passata dal COBALB alla TALETE.ⁱ

Inoltre è stato istituito il Biodistretto Lago di Bolsena che, se pure in tempi lunghi, ridurrà l'arrivo di fertilizzanti e prodotti fitosanitari agricoli nel lago. Rimane ancora da completare la raccolta corretta delle acque reflue lungo il litorale ovest dove manca un tratto di 7 km del collettore e altri interventi per eliminare le fonti di inquinamento abusive presenti lungo tutto il perimetro lacustre.

Tutti questi miglioramenti sono tesi a ridurre l'apporto di nutrienti al lago e in particolare l'apporto di fosforo (P), che è il nutriente che determina l'intensità della produzione di biomassa in laghi come il nostro. La concentrazione del fosforo totale nel lago (TPⁱⁱ), di tutto il fosforo presente in qualsiasi forma e associazione, è quindi uno dei parametri più indicativi per il suo livello trofico, ed anche uno dei più delicati da misurare perché occorre rilevare concentrazioni esigue, dell'ordine di microgrammi per litro (µg/l), a volte prossime al limite di rilevabilità (LOD) del metodo utilizzato.ⁱⁱⁱ

Secondo la normativa italiana in materia di controllo delle acque superficiali (D.M. 260/2010), la classificazione dello stato o del potenziale ecologico dei corpi idrici lacustri può essere definito dall'indice LTL_{eco} (Livello trofico dei laghi per lo stato ecologico), determinato a partire da tre parametri: la concentrazione totale di fosforo nel lago, la concentrazione di ossigeno negli strati profondi del lago e la trasparenza delle acque (vedi Allegato 1).

La finalità della presente relazione rivolta ai cittadini interessati e alle istituzioni (a tutti i livelli) è di esporre il progressivo cambiamento del livello trofico del Lago di Bolsena negli ultimi 20 anni, discutere il suo stato attuale e la sua eventuale evoluzione, alla luce dei monitoraggi condotti dalla nostra associazione (Associazione Lago di Bolsena - ALB) e dall'ARPA Lazio (Agenzia Regionale Protezione Ambientale Lazio). Conoscere e monitorare correttamente il livello trofico del lago (che a sua volta concorre a determinare il suo stato ecologico e il suo stato globale di salute) è un aspetto di primaria importanza: è la base indispensabile per poter assumere consapevoli decisioni politico-gestionali relative ai provvedimenti necessari e indispensabile per la conservazione e il ripristino dell'ecosistema lacustre, previsti dalla normativa europea, e costituisce il riferimento tecnico necessario per poter richiedere, a ragion veduta, lo stanziamento dei fondi necessari per sostenere e realizzare tali provvedimenti.

ⁱ COBALB: Comunità Bacino del Lago di Bolsena - fino al suo fallimento nel 2019 gestore del sistema fognario dei comuni del Lago di Bolsena. TALETE: attuale gestore unico del servizio idrico integrato dell'ATO 1 Viterbo Nord.

ⁱⁱ Total Phosphorus, denominato anche P_{tot} (fosforo totale).

ⁱⁱⁱ "L'attenzione sempre prestata a questa determinazione analitica [del fosforo totale] è giustificata dalla fondamentale importanza delle concentrazioni di fosforo totale nella problematica dell'eutrofizzazione e dai valori di concentrazioni, spesso molto prossimi al limite di quantificazione." (Gabriele A. TARTARI e Rosario MOSELLO: METODOLOGIE ANALITICHE E CONTROLLI DI QUALITÀ NEL LABORATORIO CHIMICO DELL'ISTITUTO ITALIANO DI IDROBIOLOGIA. CNR Istituto Italiano di Idrobiologia - 28048 Verbania Pallanza (1997), p. 23).

2. EVOLUZIONE DELLA CONCENTRAZIONE MEDIA DEL FOSFORO TOTALE NEL LAGO DI BOLSENA

In questo capitolo concentriamo l'attenzione sul contenuto del fosforo totale nel lago, il primo dei tre parametri che determinano il livello trofico di un lago. L'evoluzione negli ultimi 20 anni della concentrazione e della distribuzione di ossigeno nell'ipolimnio è illustrata nel paragrafo successivo, quella della trasparenza nell'Allegato 5.

Per cause naturali, le acque di ogni lago contengono una certa quantità di fosforo, normalmente bassa per i laghi delle nostre zone, il che determina per la maggiore parte di loro lo stato trofico naturale come "oligotrofo".¹ Però, da quasi cento anni, lo stato trofico dei laghi sta cambiando a causa dell'azione umana sull'ambiente: globalmente, la concentrazione di fosforo nelle acque superficiali aumenta e determina un processo di degrado, chiamato eutrofizzazione, che compromette il loro stato di salute e minaccia i servizi ecosistemici da loro forniti.

L'apporto di fosforo di origine antropica (un "carico esterno" antropico che si aggiunge a quello naturale) proviene dalle acque reflue civili o industriali e dall'agricoltura. Il fosforo può uscire dal lago con le acque dell'emissario e con prelievi di organismi acquatici. Un altro meccanismo – oggi il più importante per il nostro lago - che riduce la concentrazione del fosforo nelle acque è rappresentato dalla sua fissazione chimica nei sedimenti presenti sui fondali del lago, processo possibile a condizione che l'acqua in contatto con i fondali sia sufficientemente ossigenata. È possibile anche il processo inverso: quando manca l'ossigeno nello strato di acqua a contatto con i fondali, una parte del fosforo fissato precedentemente nei sedimenti, può essere liberato costituendo una fonte addizionale di apporto di fosforo (il "carico interno"). Un secondo meccanismo altrettanto importante per assicurare l'equilibrio in un lago naturale è la fissazione di fosforo nella vegetazione ripariale e nei suoi sedimenti.

La normativa prescrive che le concentrazioni di TP utili per il calcolo dell'indice trofico devono essere misurate *"nel periodo di piena circolazione alla fine della stagione invernale"*, cioè nei mesi da gennaio a marzo. Tale periodo è contraddistinto da un massimo rimescolamento di tutto il corpo d'acqua, reso possibile grazie all'abbassamento invernale delle temperature e ai forti venti freddi provenienti dal quadrante nord (vedi Allegato 3).

Il rimescolamento può essere completo solo quando l'energia fornita dai forti e freddi venti invernali è abbastanza grande per annullare la stratificazione termica stabile delle acque del lago, instauratasi durante l'anno limnologico. In tal caso, tutti i parametri fisico-chimici delle acque (le concentrazioni di elementi chimici, la temperatura, il pH, la conducibilità, la concentrazione dell'ossigeno disciolto e della clorofilla ecc.) sono uguali in tutto il lago, e in particolare lungo la colonna d'acqua nella quale si prelevano i campioni - dalla superficie fino al fondo.

Negli anni in cui il rimescolamento rimane incompleto si osserva, anche nel periodo di massima circolazione, una variazione della concentrazione del fosforo con la profondità: un depauperamento negli strati superficiali e un progressivo accumulo negli strati profondi (nell'ipolimnio).

2.1. I MONITORAGGI DELL'ASSOCIAZIONE LAGO DI BOLSENA

Per determinare la concentrazione di TP, vengono prelevati campioni di acqua a varie profondità in una posizione centrale del lago (vedi Allegato 2). Nel nostro caso, questi campioni vengono analizzati presso il laboratorio di idrochimica dell'Istituto di Ricerca sulle Acque, CNR IRSA sede di Verbania (in precedenza Istituto per lo Studio degli Ecosistemi CNR ISE) secondo la metodologia descritta sul sito web dell'Istituto e in vari documenti citati in questa relazione. La collaborazione dell'Istituto con le associazioni ambientaliste del lago è iniziata negli anni Sessanta del secolo scorso. Più recentemente, tale sinergia ha permesso di stabilire una serie ininterrotta di dati sullo stato trofico, dal 2004 fino ad oggi, ed è culminata nella redazione di un'autorevole relazione su una rivista scientifica internazionale.²

Il grafico 2-1 mostra, per gli anni dal 2017 al 2025, le concentrazioni del fosforo totale (TP) determinate per i campioni prelevati nel periodo di massimo rimescolamento, a varie profondità e quindi parziali (cioè rappresentativi per una data profondità), in funzione della profondità di prelievo.

Il grafico 2-2 mostra i dati (simboli rossi) per TP_{mp} , ovvero rappresenta i valori delle medie ponderate (*weighted mean*) della concentrazione di fosforo totale nelle acque del lago, e la loro evoluzione durante gli anni, dal 2004 ad oggi.

2.2. I MONITORAGGI DELL'ARPA LAZIO

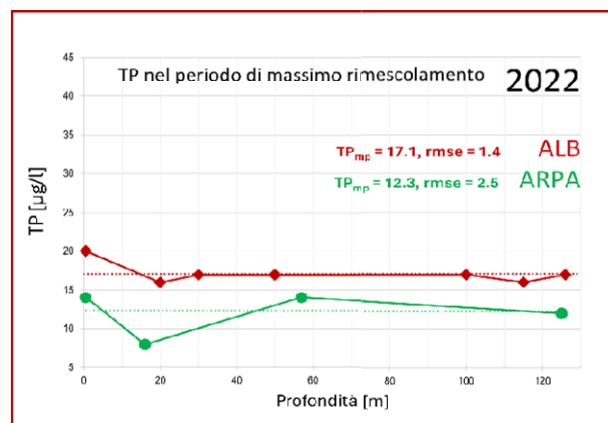
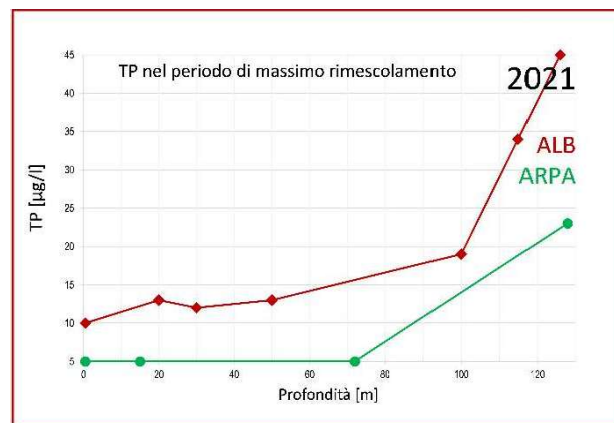
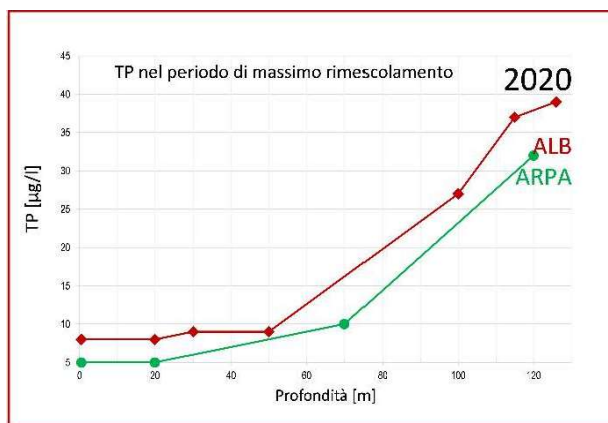
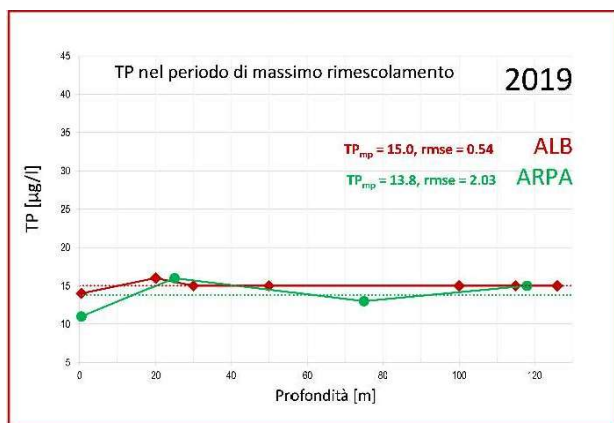
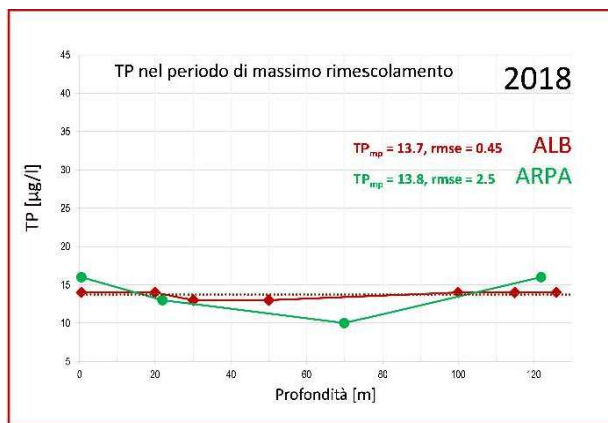
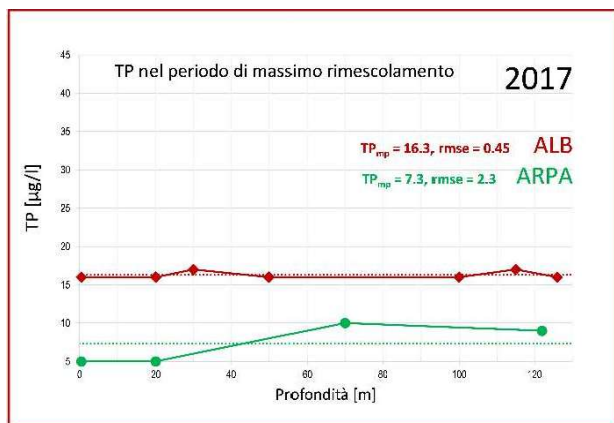
L'ARPA Lazio è l'ente regionale preposto ai monitoraggi ambientali. Dal 2012 esegue le misurazioni ufficiali per la determinazione del livello trofico dei laghi laziali. Dal 2014, i dati parziali sono accessibili sul Sistema Informativo Regionale Ambientale (SIRA) del Lazio.³

Per determinare la concentrazione di TP, l'ARPA preleva campioni di acqua a varie profondità al centro del lago in una posizione non lontana da quella scelta da ALB (vedi Allegato 2). I campioni vengono analizzati nel laboratorio dell'ARPA a Viterbo, attualmente secondo il metodo UNI 11757:2019.⁴

Nel grafico 2-1 sono rappresentati i dati dell'ARPA per le concentrazioni parziali del fosforo totale per gli anni dal 2017 al 2024 (simboli e linee verdi), messi a confronto con quelli derivanti dai monitoraggi effettuati dalla nostra associazione.

Il grafico 2-2 mostra (simboli verdi e linea punteggiata) le concentrazioni medie di fosforo totale nelle acque del lago, determinate dall'ARPA Lazio, messi a confronto con quelli derivanti dai monitoraggi effettuati dalla nostra associazione (periodo analizzato: 2004-2025).

Grafico 2-1: Concentrazione del fosforo totale (TP) in funzione della profondità, nel periodo di massima circolazione, dal 2017 al 2025. Risultati di ALB e ARPA. Per gli anni con rimescolamento completo, le linee punteggiate rappresentano il linear best fit per l'ipotesi di un'equa distribuzione del fosforo per tutte le profondità



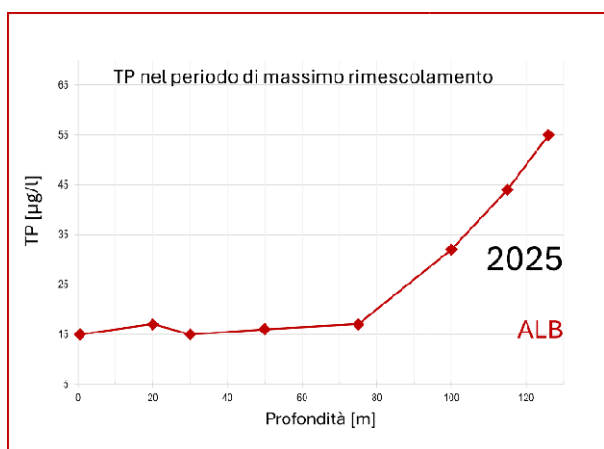
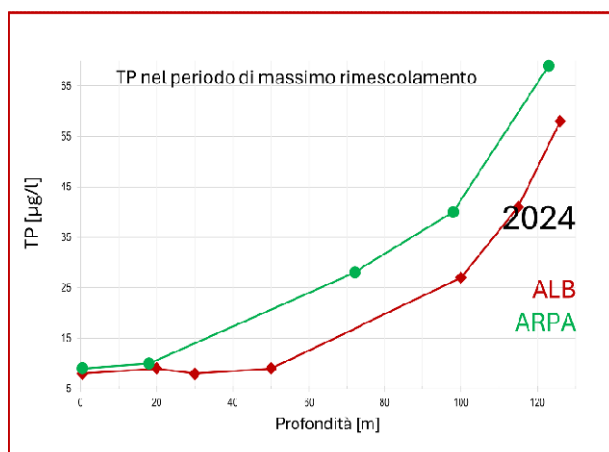
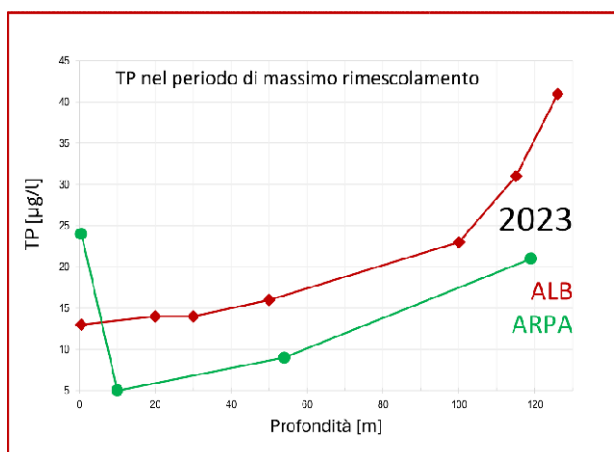
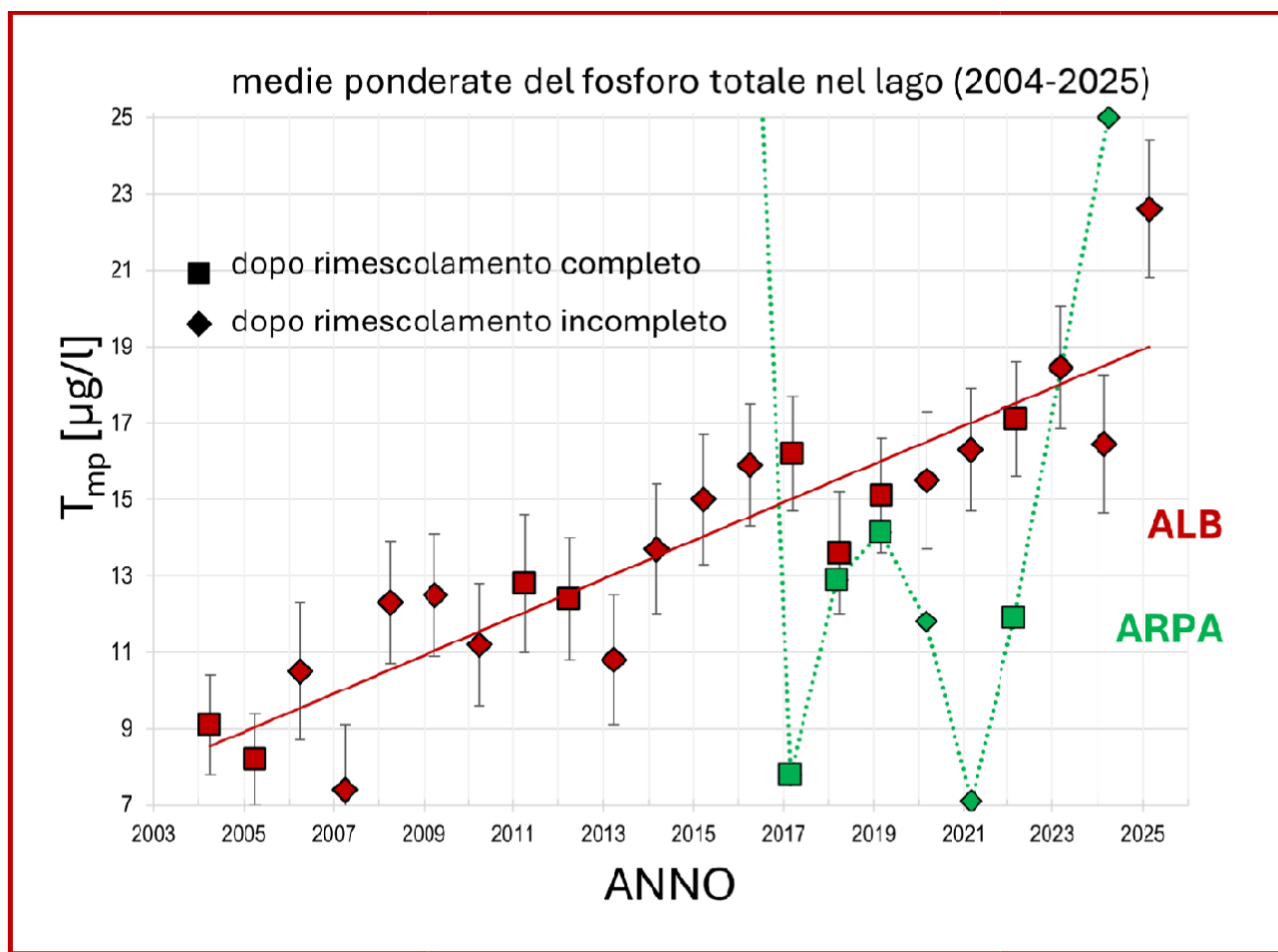


Grafico 2-2: Evoluzione della concentrazione media ponderata (weighted mean) TP_{mp} di fosforo totale nelle acque del lago. Quadrati rossi: ALB negli anni di completo rimescolamento. Rombi rossi: ALB negli anni di rimescolamento incompleto. Simboli verdi e linea verde punteggiata (che collega i dati per una migliore visualizzazione): dati ARPA corrispondenti. La linea solida rossa rappresenta il linear least squares fit ai valori per TP_{mp} nel periodo di massimo rimescolamento.



2.3. DISCUSSIONE DEI DATI

2.3.1. Dati dell'Associazione Lago di Bolsena

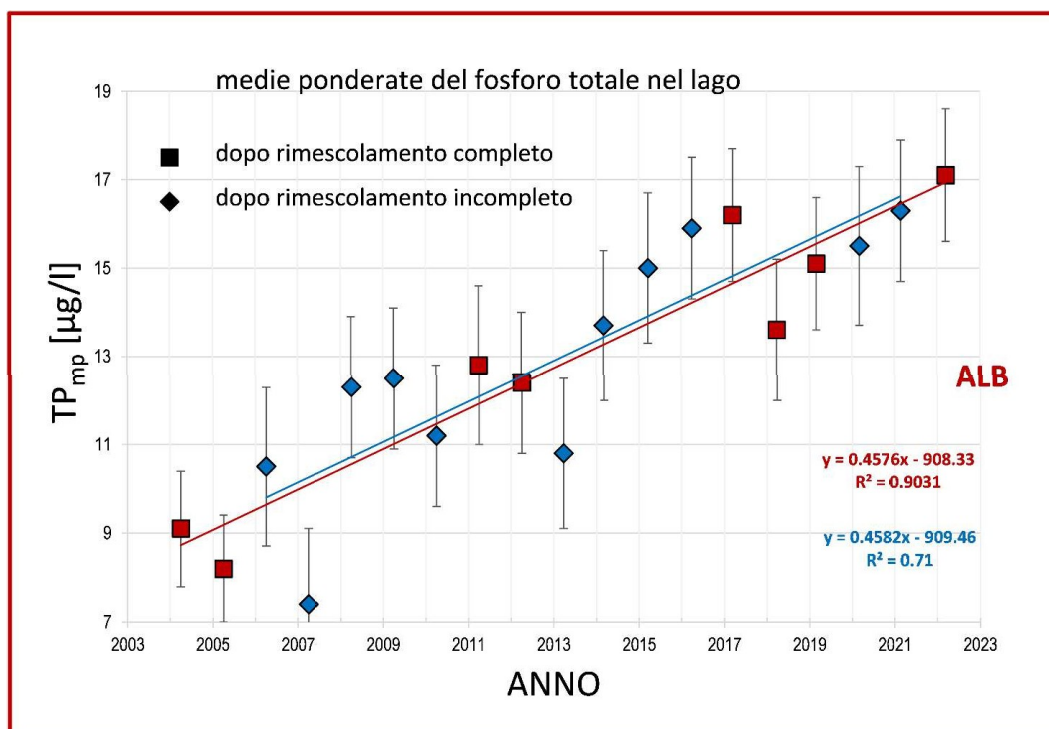
Il grafico 2-1 mostra la dipendenza delle concentrazioni TP parziali dalla profondità del prelievo. Com'è da attendersi, per gli anni con rimescolamento completo (2017, 2018, 2019, 2022) le concentrazioni sono, nei limiti degli errori accidentali, uguali per tutte le profondità - un andamento confermato dalle misure concomitanti di molti altri parametri fisico-chimici. La variabilità dei dati per un certo anno (espressa con il RMSE indicato nei grafici) ci dà un'informazione sulla variabilità dei singoli valori TP, che in questo caso è dovuta solo agli errori accidentali dell'analisi, la cui grandezza risulta di circa 0.5 µg/l.

I valori medi delle concentrazioni TP parziali nel caso della equidistribuzione dopo rimescolamento completo corrispondono banalmente alle medie ponderate TP_{mp} . Gli errori di TP_{mp} contenuti nel grafico 2-2 corrispondono alla somma di errori accidentali e sistematici.

Per gli anni con rimescolamento incompleto, nel periodo di massima circolazione si osserva una variazione delle concentrazioni TP parziali con la profondità: negli strati superficiali si nota impoverimento e equidistribuzione di fosforo, e, nell'ipolimnio, un aumento dovuto all'accumulo del fosforo negli strati profondi per varie cause: in parte perché durante i periodi precedenti il fosforo associato a particelle e organismi morti è stato trascinato in basso per gravità, in parte perché il fosforo liberato dai fondali (che costituisce il "carico interno") rimane accumulato nelle vicinanze del fondo. Questo caratteristico profilo si sviluppa a partire dalla distribuzione primaverile fino al periodo di massima stratificazione di inizio inverno; nel caso di un rimescolamento invernale incompleto, solo una parte del fosforo viene ridistribuita nel volume del lago dai movimenti turbolenti troppo deboli per cancellare del tutto il profilo di variazione di TP con la profondità.

Per quanto riguarda i campionamenti dell'ALB, i valori delle medie ponderate TP_{mp} , rappresentati nel grafico 2-2 in funzione degli anni dal 2004 al 2025 (simboli rossi), mostrano una tendenza a un leggero e continuo aumento. Tale aumento si osserva, nello stesso modo, per anni con e senza rimescolamento completo: un *linear least squares fit* condotto separatamente per i due gruppi di anni produce linee quasi identiche (vedi grafico 2-3). Questo fatto indica che gli inevitabili errori sistematici (addizionali a quelli relativi alle procedure di analisi) che affliggono i valori di TP_{mp} per anni con rimescolamento incompleto non sono stati importanti. Da rilevare, che in nessun caso i valori di TP si avvicinano al LOD (= 3 $\mu\text{g/l}$ per i campioni ALB).

Grafico 2-3: TP_{mp} rilevati nel periodo di massimo rimescolamento. Linea rossa: least squares fit ai dati dopo rimescolamento completo. Linea blu: linear least squares fit ai dati dopo rimescolamento incompleto.



Il valore della media ponderata TP_{mp} , rilevato dall'ALB nel periodo di massimo rimescolamento nell'anno 2025, è con 22.6 $\mu\text{g/l}$ nettamente più alto di quanto si poteva aspettare dall'andamento continuo pluriennale (vedi grafico 2-2), fatto dovuto molto

probabilmente alla ossigenazione molto ridotta durante l'inverno 2023/2024. Di conseguenza, durante tutto l'anno 2024 abbiamo osservato livelli molto bassi dell'ossigeno disciolto ipolimnico e una duratura ed estesa anossia sul fondo del lago, con uno spessore massimo dello strato anossico di quasi 14 metri, mai osservato prima (vedi capitolo 3), e di conseguenza una notevole liberazione di fosforo dai sedimenti.

Sottolineiamo che l'aumento della concentrazione di fosforo totale negli anni dipende, da un lato, dal carico esterno che probabilmente è variabile, e, dall'altro lato, da vari fattori e meccanismi (fisici, chimici, biologici) i cui effetti non possono essere riassunti in una dipendenza lineare. Approssimare tale andamento con una dipendenza lineare ha il solo valore di rendere evidente la tendenza dell'andamento pluriennale: un aumento continuo che corrisponde a un apporto di fosforo che mediamente supera di circa di 10 kg al giorno la capacità dell'ecosistema del lago di smaltirlo naturalmente (e anche questa capacità è variabile nel tempo).

Notiamo che anche i dati per TP_{mp} rilevati nel periodo di massima stratificazione evidenziano una tendenza identica.

L'aumento lento e graduale della quantità di fosforo nel lago di Bolsena è coerente non solo all'interno dell'insieme dei dati raccolti dall'ALB, ma anche con dati indipendenti relativi all'inquinamento del lago provocato da sversamenti fognari, che infatti evidenziano uno stato buono e oligotrofo fino al 2006 grazie alla costruzione e il buon funzionamento iniziale del sistema fognario circumlacuale.⁵ Dall'anno 2007 questo sistema ha subito un degrado progressivo con un inquinamento da acque reflue del lago sempre più grave. Solo nell'anno 2021 sono iniziati in modo efficace i lavori di ripristino del collettore circumlacuale, terminati nel corso dell'anno 2022.

2.3.2. Dati dell'ARPA Lazio

Da notare che, mentre l'ALB effettua 7 campionamenti sulla colonna due volte all'anno^{iv}, il primo nel periodo di massimo rimescolamento, il secondo in quello di massima stratificazione, l'ARPA effettua un numero variabile con un minimo di 4 campionamenti per colonna, ma più volte, fino a 6 all'anno.

È interessante rilevare dai grafici 2-1 e 2-2 che, secondo i rilevamenti dell'ARPA, per gli anni 2018 e 2019 le concentrazioni parziali del TP (e quindi anche le medie ponderate TP_{mp}) sono uguali, entro i limiti dei rispettivi errori, a quelli dell'ALB. Se questo non è un caso, significa che l'effetto di eventuali differenze nella calibrazione dei valori assoluti delle concentrazioni tra i due laboratori (almeno per queste due misure) è minore dell'effetto combinato dei relativi errori accidentali.

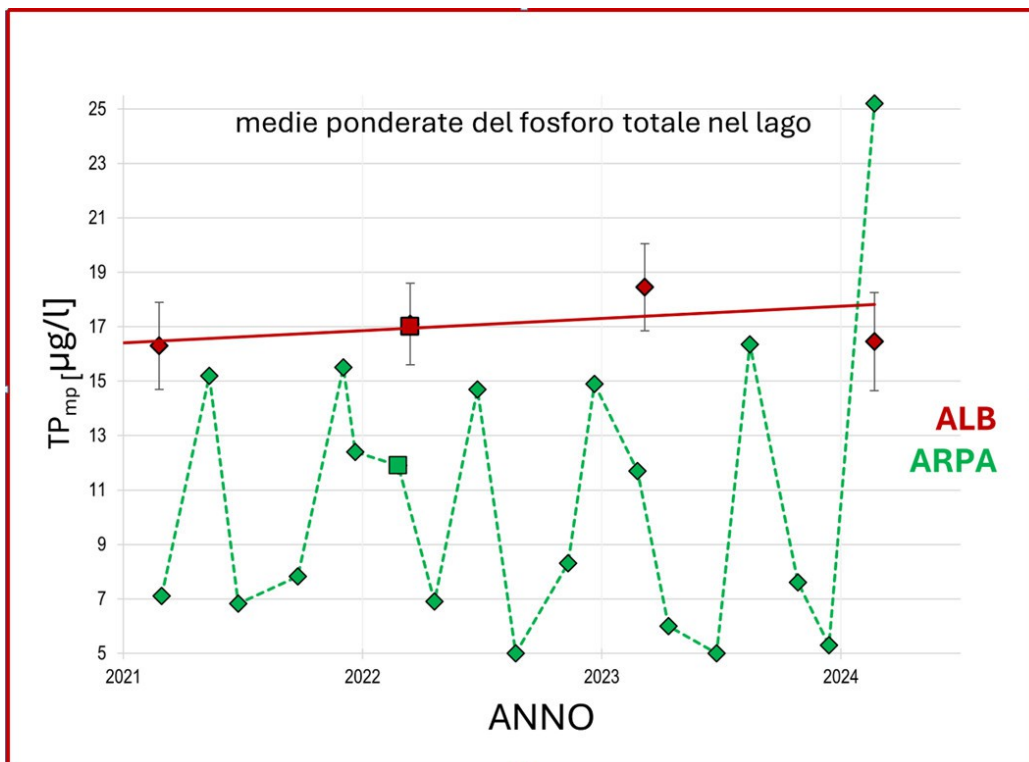
Negli altri anni invece, le medie ponderate TP_{mp} rilevate dall'ARPA nel periodo di massima circolazione mostrano una grande variabilità (grafico 2.2, simboli verdi), sia per anni "con" che per anni "senza" completo rimescolamento, oscillando tra valori molto bassi (di circa 5 $\mu\text{g/l}$) e valori attorno a 15 $\mu\text{g/l}$, con un inaspettato valore massimo di 25.2 $\mu\text{g/l}$ nel 2024, molto più alto di tutti i valori determinati dall'ALB.

^{iv} Dal 2024 solo una volta all'anno (il primo), dal 2025 8 campionamenti sulla colonna.

Relativamente ai campioni dell'ARPA, i più bassi valori di TP risultano spesso uguali o inferiori al LOD (= 5 µg/l), e la definizione di tale limite potrebbe creare problemi.

Questa pronunciata variabilità delle medie ponderate per i dati dell'ARPA si osserva anche nell'andamento nel corso di uno stesso anno (illustrato nel grafico 2-4), variabilità che è difficile da spiegare considerando la notevole amplitudine e il carattere non sistematico delle oscillazioni. Quale meccanismo fisico-chimico conosciuto potrebbe far sparire e riapparire nel corso di pochi mesi tali quantità di fosforo - parliamo di decine di tonnellate⁶ - in un lago normale con un lunghissimo tempo (circa 300 anni attualmente) di ricambio? Colpisce ugualmente l'aumento drastico di TP_{mp} dal 2023 al 2024.

Grafico 2-4: Concentrazioni parziali di TP in funzione della profondità nel periodo di massima circolazione, rilevate dall'ARPA dall'anno 2021 al 2024 (simboli e linee verdi), assieme ai dati ALB.



3. EVOLUZIONE DI CONCENTRAZIONE E DISTRIBUZIONE DELL'OSSIGENO IPOLIMINICO

La concentrazione dell'ossigeno disciolto nelle acque di un lago è un indicatore trofico importante la cui interpretazione è delicata, perché determinato da molti fattori - tra cui le caratteristiche morfometriche del lago, la stratificazione del lago, la temperatura nei vari strati, le caratteristiche di circolazione annuale dell'acqua e di rinnovo del lago, la presenza di sostanza organica disciolta ecc.

La normativa prescrive che le concentrazioni dell'ossigeno disciolto nell'ipolimnio utili per il calcolo dell'indice trofico LTL_{eco} devono essere misurate *“nel periodo di massima stratificazione”*, cioè nei mesi di dicembre o gennaio, prima che il rimescolamento invernale possa rifornire gli strati profondi di ossigeno - sono quindi i valori minimi durante l'anno limnologico delle concentrazioni dell'ossigeno disciolto nell'ipolimnio $O_{disc}(ipo)$.

$O_{disc}(ipo)$ diminuisce a partire dall'inizio della stratificazione (che segna la fine del periodo in cui l'ossigeno nell'atmosfera può raggiungere gli strati profondi) nell'anno poiché l'ossigeno viene consumato dai batteri aerobi durante il lavoro di decomposizione dei detriti organici. Il tasso della sua diminuzione e il valore minimo di $O_{disc}(ipo)$ dipendono quindi dalla produzione primaria di biomassa nel lago.

Inoltre, valori bassi della concentrazione $O_{disc}(ipo)$ allertano sul rischio di un'anossia sul fondolago (che non è ritenuta come indicatore trofico indipendente), che a sua volta determina l'importanza di un eventuale carico interno dovuto alla liberazione di fosforo dai sedimenti profondi.

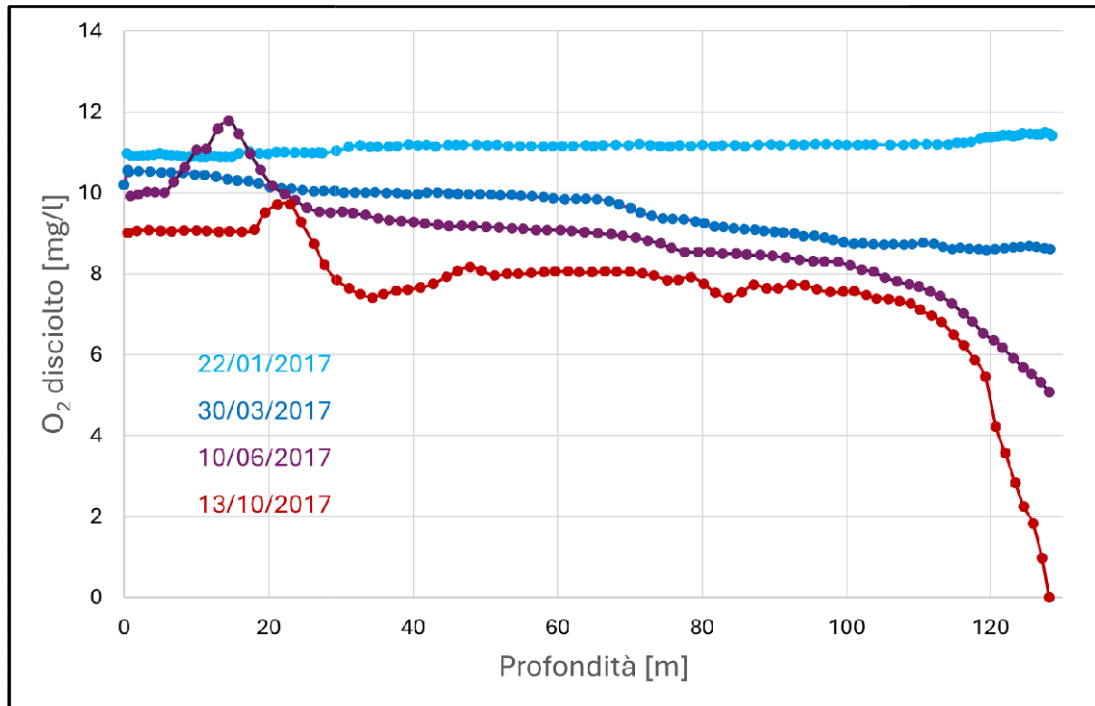
3.1. DATI DELL'ASSOCIAZIONE LAGO DI BOLSENA

Misuriamo la concentrazione dell'ossigeno disciolto nelle acque in funzione della profondità (“profilo verticale di O_{disc} ”) con una sonda “multiparametrica”⁷.

Il grafico 3-1 illustra l'evoluzione della dipendenza della concentrazione O_{disc} dalla profondità per un anno (2017) con rimescolamento completo, che è avvenuto già nel mese di gennaio come si può dedurre dal fatto che nel profilo del 22 gennaio l'ossigeno è presente con concentrazione uguale a tutte le profondità.

Nel corso dell'anno, la concentrazione dell'ossigeno nell'ipolimnio diminuisce lentamente, in maniera pronunciata solo a profondità più grandi di cento metri. Negli ultimi mesi dell'anno sul fondo del lago si forma uno strato anossico spesso solo pochi metri.

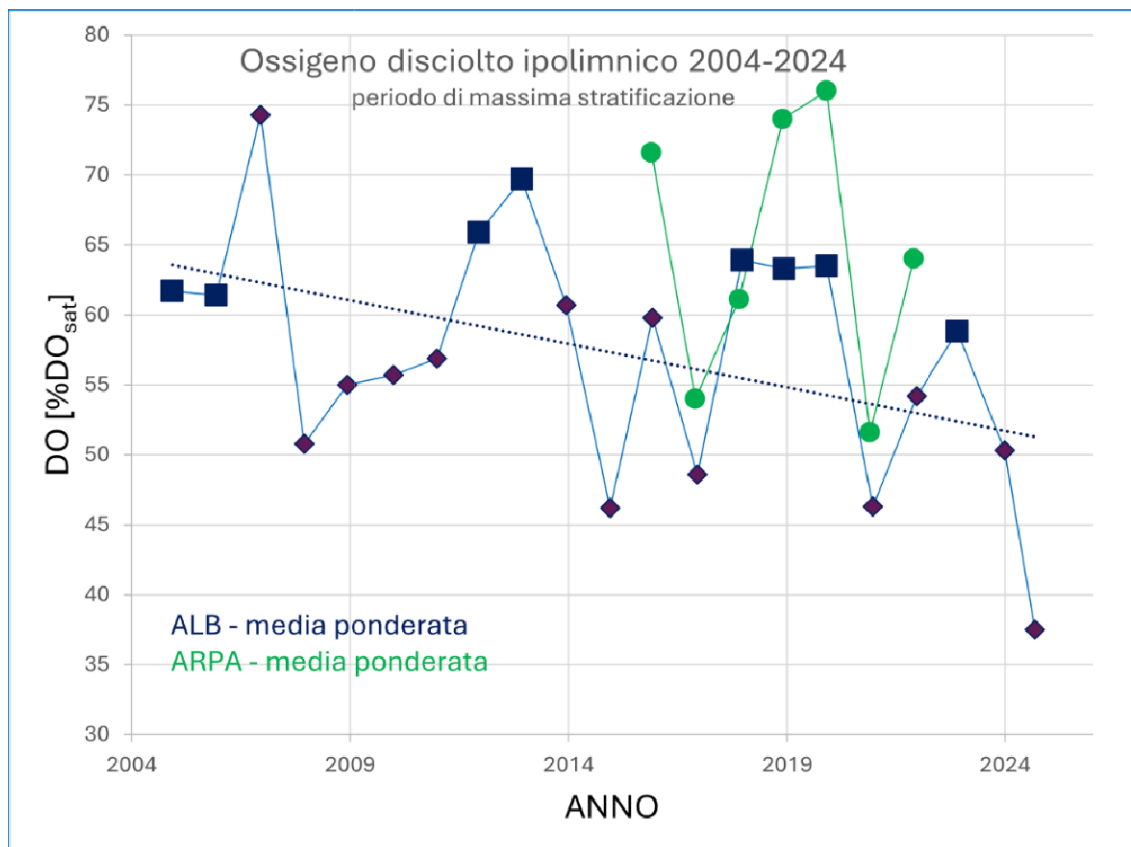
Grafico 3-1: Evoluzione della distribuzione dell'ossigeno disciolto durante l'anno limnologico dopo un rimescolamento completo invernale (anno 2017)



Il grafico 3-2 mostra l'andamento annuale della media ponderata della concentrazione dell'ossigeno ipolimnico (da 40 m alla profondità massima). È evidente l'importanza del rimescolamento sulla concentrazione di ossigeno negli strati profondi: negli anni con rimescolamento primaverile, nel periodo di massima stratificazione la concentrazione dell'ossigeno nell'ipolimnio è sistematicamente più alta di quella negli anni senza rimescolamento (con l'eccezione dell'anno 2006).

Nell'insieme, osserviamo una netta tendenza alla diminuzione dei valori minimi di $O_{disc}(ipo)$ durante il periodo di studio, la quale concorre alla tendenza al peggioramento del livello trofico nel corso degli anni.

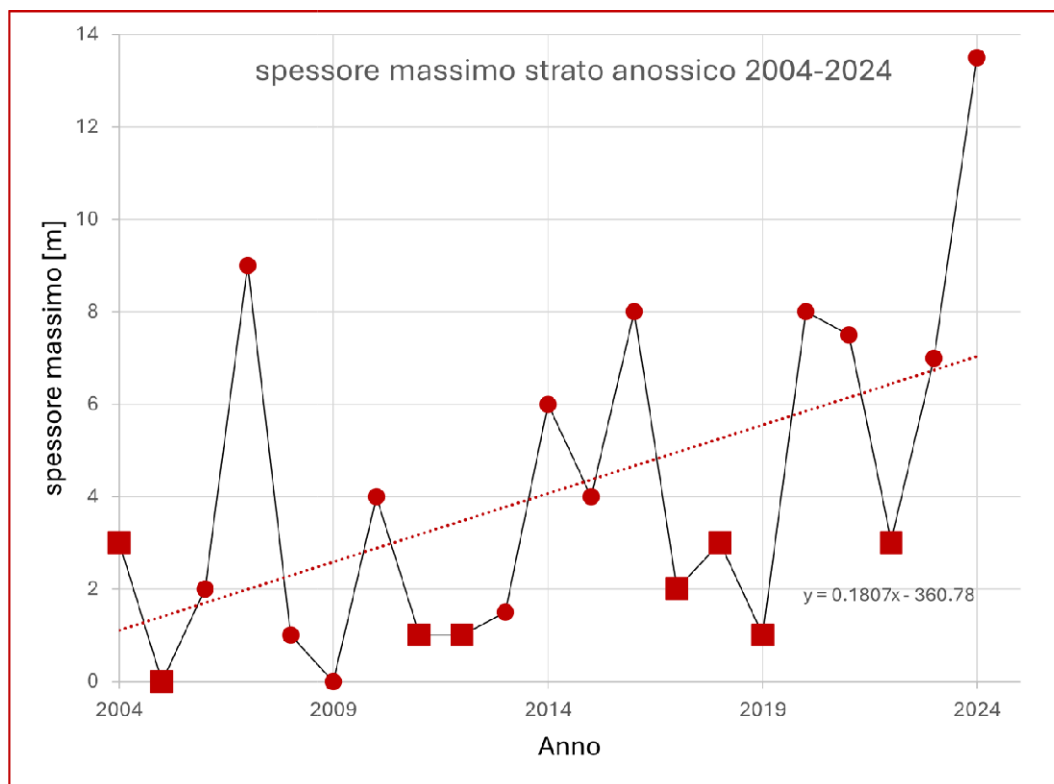
Grafico 3-2: *Evoluzione delle medie ponderate della concentrazione dell'ossigeno disciolto nell'ipolimnio, misurata nel periodo di massima stratificazione, per i dati rilevati da ALB e dall'ARPA. Linea tratteggiata: linear least squares fit per i dati ALB. Per i dati ALB, i quadrati indicano valori rilevati dopo un completo rimescolamento primaverile*



Vediamo che per la prima volta nel periodo dei nostri monitoraggi, nell'anno 2024 la concentrazione dell'ossigeno disciolto ipolimnico rilevata nel periodo di massima stratificazione è scesa sotto la soglia del 40% della concentrazione di saturazione, che rappresenta un limite di classe.

Data l'importanza dell'anossia sul fondolago, illustriamo nel grafico 3-3 l'andamento negli anni dello spessore dello strato anossico: è da rilevare la tendenza all'aumento dello spessore massimo e la presenza continua, nel periodo di massima stratificazione, dell'anossia a partire dal 2009.

Grafico 3-3: *Evoluzione dello spessore massimo dello strato anossico nel corso degli anni, per i dati ALB. Quadrati grandi: valori per anni con rimescolamento completo in primavera, cerchi piccoli: rimescolamento primaverile incompleto.*



3.2. DATI DELL'ARPA LAZIO

Il grafico 3-2 mostra l'andamento annuale della media ponderata della concentrazione dell'ossigeno ipolimnico nel periodo di massima stratificazione per i dati rilevati dall'ARPA e accessibili pubblicamente (simboli verdi).

Anche se sembra che i valori siano leggermente e sistematicamente più alti dei valori rilevati dall'ALB, la differenza si potrebbe spiegare (a parte differenze nella calibrazione e nel calcolo delle medie ponderate) con l'impossibilità di accedere ai profili multiparametrici rilevati dall'ARPA.^v Comunque, i valori rilevati dai due gruppi sono compatibili nei margini delle incertezze dei rilevamenti.

I valori delle medie ponderate di O_{disc} nell'ipolimnio e rilevate nel periodo di massima stratificazione sono, per tutti gli anni, entro i limiti di classe dell'intervallo L2, tra 40 % e 80% del valore di saturazione, sia per l'ARPA che anche per l'ALB all'eccezione della misura del 2024.

Probabilmente perché l'anossia non ha valore normativo, l'ARPA non l'esplora sistematicamente.

^v L'ARPA rileva profili multiparametrici assieme ai prelievi per l'analisi chimica, che gentilmente ci sono stati resi accessibili recentemente. Includeremo i risultati nelle prossime relazioni.

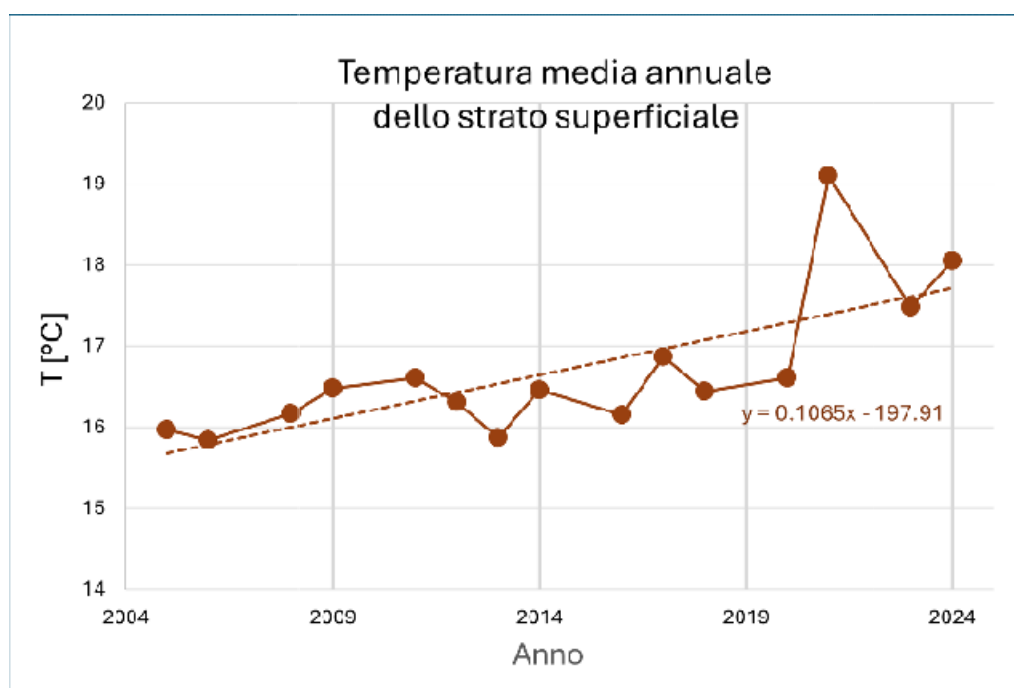
4. IL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Il Cambiamento Climatico sconvolge gli equilibri degli ecosistemi e li indebolisce globalmente. Altera in primo luogo l'ambiente fisico (le temperature, le precipitazioni, i venti, il microclima locale ...) e di conseguenza le risorse naturali, il metabolismo e i cicli vitali annuali degli organismi. Gli ecosistemi sono costretti a adattare tutto il loro funzionamento, e tutti i loro meccanismi e scambi, alle nuove condizioni - questo mentre gli ecosistemi oggi già sono fragilizzati poiché si trovano esposti ad altre potenti pressioni antropiche. Il Lago di Bolsena dimostra chiaramente gli effetti del cambiamento climatico (*"I laghi sono sentinelle del Cambiamento Climatico"*). Nei nostri monitoraggi dei parametri fisico-chimici del Lago di Bolsena, osserviamo tendenze nette e indicative, rilevate anche da meta-studi mondiali, tra cui

- l'aumento della temperatura negli strati d'acqua superficiali e profondi (vedi i grafici 4-1 e 4-2) e
- l'aumento della durata della stratificazione del lago (vedi il grafico 4-3).

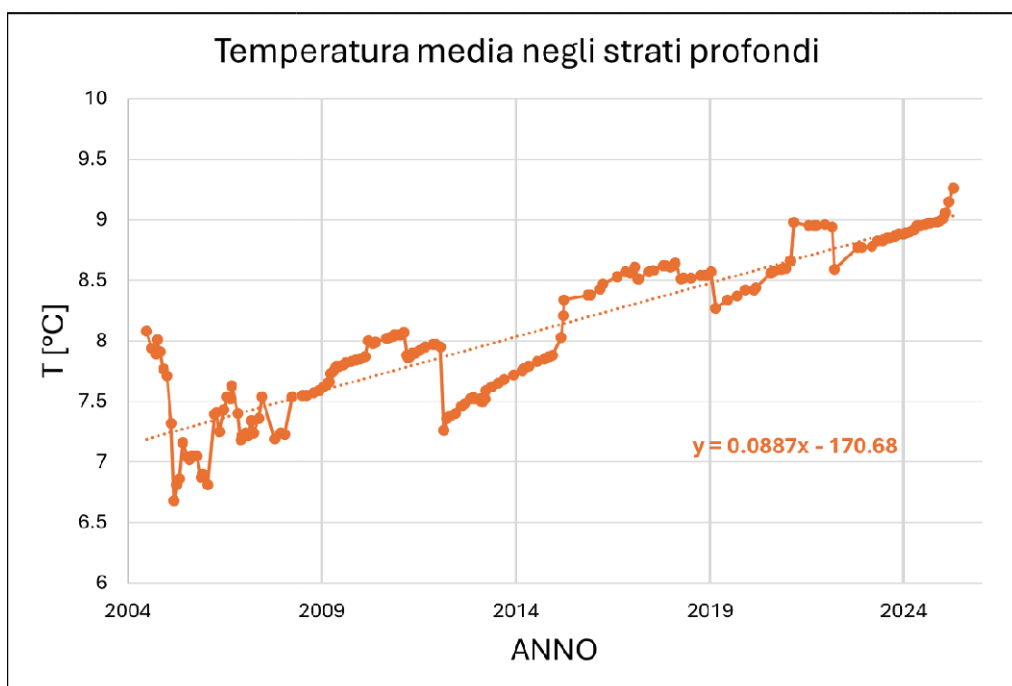
Queste osservazioni corrispondono al risultato dei meta-studi, che nella media mondiale il cambiamento climatico rende **più stabile** la stratificazione e **allunga la sua durata**.

Grafico 4-1: Temperatura media annuale dello strato superficiale (spessore 5m). Linea punteggiata: linear least-squares fit.



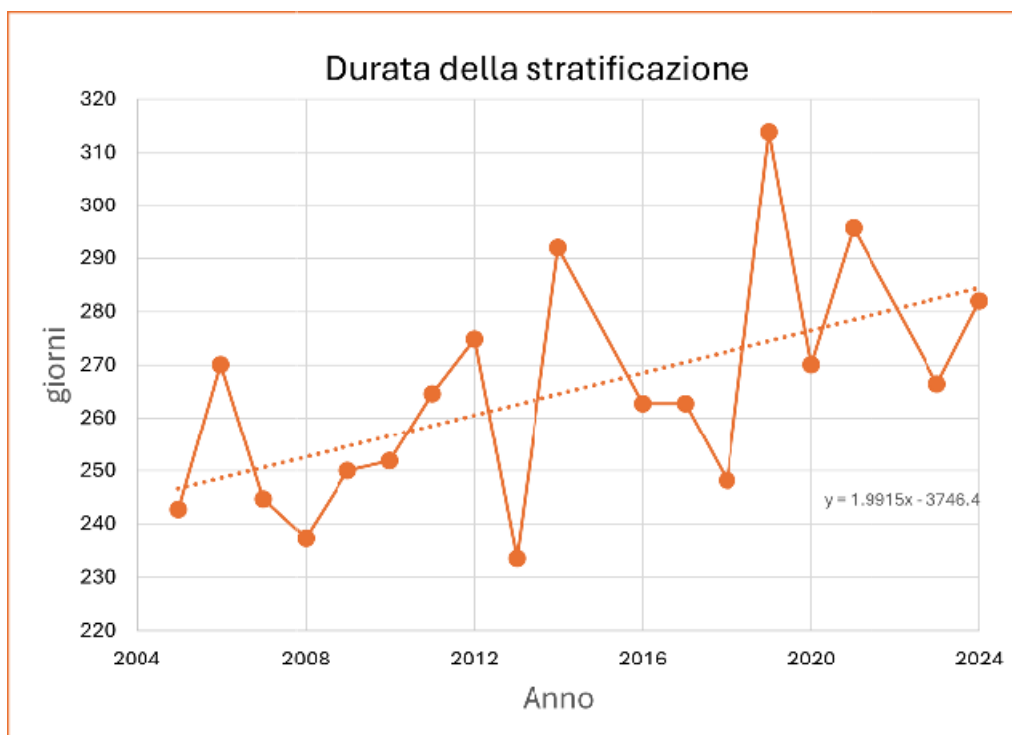
La temperatura media annuale di uno strato di spessore di 5 metri in superficie aumenta di circa 1 grado in 10 anni.

Grafico 4-2: *Temperatura media annuale dello strato sul fondo lago (spessore 10m). Linea punteggiata: linear least-squares fit.*



Anche la temperatura media in profondità aumenta, di circa 0.9 gradi in 10 anni.

Grafico 4-3: *Durata della stratificazione annuale. Linea punteggiata: linear least-squares fit.*



Nel Lago di Bolsena, la durata della stratificazione – la lunghezza del periodo in cui il lago dimostra una disposizione stabile in strati distinti dalla loro temperatura – aumenta mediamente di 2 giorni all'anno. Se consideriamo che soltanto in assenza della stratificazione l'ossigeno dell'atmosfera può disciogliersi e distribuirsi liberamente nelle acque fino agli strati profondi, questo significa che il cambiamento climatico riduce la possibilità delle acque di ossigenarsi durante i mesi invernali.

Agendo in sinergia negativa con l'eutrofizzazione, il cambiamento climatico contribuisce quindi ulteriormente alla riduzione della concentrazione dell'ossigeno disciolto negli strati profondi del lago, e accentua l'anossia delle acque in contatto con i sedimenti (vedi capitolo 3), indebolendo così uno dei principali meccanismi naturali del lago di autoguarigione – la fissazione chimica del fosforo nei sedimenti di fondolago.⁸

5. IL LIVELLO TROFICO ATTUALE

Secondo la normativa (vedi Allegato 1), la classificazione del livello trofico LTL_{eco} deriva dagli “elementi fisico-chimici a sostegno”, costituiti dai seguenti tre indicatori fisico-chimici:

- la concentrazione totale di fosforo P_{tot} (nella media ponderata annuale, misurata nel periodo di piena circolazione alla fine della stagione invernale, $P_{tot} = TP_{mp}$),
- la trasparenza T delle acque (nella media annuale, determinata con il Disco di Secchi e misurata in metri),
- la concentrazione dell’ossigeno disciolto O_{disc} (misurata nell’ipolimnio alla fine del periodo di stratificazione).

A ciascuno di questi parametri viene assegnato un punteggio secondo la Tabella A1-1 (vedi Allegato 1).

5.1. DETERMINAZIONE DEL LIVELLO TROFICO DAI DATI DELL’ASSOCIAZIONE LAGO DI BOLSENA PER L’ANNO 2024

Di seguito il commento ai dati chimico-fisici rilevati nel corso delle analisi condotte.

- La concentrazione P_{tot} risulta, sia nel suo attuale valore puntuale che nei valori indicati dalla sua tendenza pluriennale, al di sopra 15 $\mu g/l$, quindi nell’intervallo L3 con un punteggio di 3 (vedi paragrafo 2.1 e grafico 2.2 della presente relazione).
- La trasparenza T nella sua media annuale risulta nell’intervallo tra 5,5 m e 10 m, quindi nell’intervallo L2 con un punteggio di 4 (vedi Allegato 5).
- La concentrazione dell’ossigeno ipolimnico disciolto O_{disc} risulta, per la prima volta nel periodo dei nostri monitoraggi, nell’intervallo L3, al di sotto di 40% del valore di saturazione (capitolo 3), con un punteggio di 3.

Il punteggio attuale assegnato all’indice trofico LTL_{eco} risulta di 11 punti, il che significa una classificazione derivante dagli elementi fisico-chimici di “**sufficiente**” (classe 3).

Nella tabella che segue, riassumiamo i valori di questi 3 indicatori fisico-chimici, il risultante punteggio e la classe dell’indice trofico per gli anni dal 2015 al 2024.

Annotiamo anche, che durante il primo periodo di rilevamenti scientifici nel Lago di Bolsena dal 1967 al 1970,⁹ i valori medi degli indicatori erano $O_{disc} = 84\%$ e $P_{inorganico} = 5 \mu g/l^{vi}$; la trasparenza T risultava tra 6 m e 13 m - valori che si riferiscono a uno stato (quasi) indisturbato, vicini allo stato naturale del “lago da bere”.

^{vi} Il fosforo “inorganico” corrisponde all’incirca al fosforo “reattivo” o “disciolto”.

Tabella 5-1: Determinazione dell'indice trofico LTL_{eco} dai risultati ALB

ANNO	O _{disc} [%]	P _{tot} [µg/l]	T [m]	punteggio	LTL_{eco}	classe
2015	59.8	15	7.3	12	2	(buono)
2016	48.6	15.9	8.4	11	3	(sufficiente)
2017	63.9	16.2	8.2	11	3	(sufficiente)
2018	63.3	13.6	7.7	12	2	(buono)
2019	63.5	15.1	7.9	11-12	2-3	(sufficiente)
2020	46.3	15.5	7.6	11-12	2-3	(sufficiente)
2021	54.2	16.3	8	11	3	(sufficiente)
2022	58.8	17.1	8.1	11	3	sufficiente
2023	50.3	18.5	8.6	11	3	sufficiente
2024	36.7	16.5	9.1	10	3	sufficiente
2025		22.6				

5.2. DETERMINAZIONE DEL LIVELLO TROFICO DAI DATI DELL'ARPA LAZIO

Per gli anni dal 2015 al 2022, l'ARPA Lazio ci ha gentilmente comunicato i valori dei 3 indicatori fisico-chimici, il risultante punteggio e la classe dell'indice trofico. Sono rappresentati nella tabella 5-2 che segue:

Tabella 5-2: Determinazione dell'indice trofico LTL_{eco} dai risultati ARPA

ANNO	O _{disc} [%]	P _{tot} [µg/l]	T [m]	punteggio	LTL_{eco}	classe
2015	71.6	48.5	8.2	11	3	sufficiente
2016	54	35.5	9.3	11	3	sufficiente
2017	61.1	7.8	8.9	13	2	buono
2018	74	12	8	12	2	buono
2019	76	14	9	12	2	buono
2020	51.6	12	9	12	2	buono
2021	64	7.1	8.3	13	2	buono
2022		11.9				buono
2023		11.7				buono
2024		25.2				(sufficiente)

Il punteggio assegnato all'indice trofico LTL_{eco} risulta attualmente (alla fine del triennio 2021-2023) di 13 punti, il che significa una classificazione derivante dagli elementi fisico-chimici di **"buono"** (classe 2). Di conseguenza, lo stato ecologico è determinato come **"buono"**.^{vii}

^{vii} Vedi la tabella accessibile dalla pagina <https://www.arpalazio.it/web/guest/ambiente/acqua/dati-acqua>

6. EVOLUZIONE FUTURA

I monitoraggi dei parametri fisico-chimici condotti dall'Associazione Lago di Bolsena negli ultimi 20 anni mostrano una tendenza continua al degrado del livello trofico del Lago di Bolsena, con un'accelerazione nell'anno limnologico 2024. Questa tendenza potrebbe indicare il rischio di futuri profondi cambiamenti nelle comunità biologiche e nella rete trofica.

Il futuro del lago, esposto a molteplici pressioni e anche a nuove minacce a causa del cambiamento climatico, è incerto e dipende in larga misura dalla gestione del bacino dove sono necessari interventi urgenti e concertati.

Gli avvenuti lavori di ripristino del sistema fognario circumlacuale dovrebbero ridurre sensibilmente l'apporto di fosforo al lago, ma saranno necessari altri interventi sulle reti fognarie comunali e sugli scarichi abusivi diffusi. A medio termine, l'istituzione del Biodistretto potrebbe permettere, se sostenuto dalla volontà politica, di ridurre l'apporto al lago di sostanze nutrienti e biocidi dall'agricoltura.

Oggi però, il trend verso il degrado dell'ecosistema lacustre e degli ambienti presenti nel comprensorio, dovuto all'impatto delle azioni umane, rimane ancora ininterrotto - citiamo solo l'antropizzazione delle zone ripariali, la quasi totale eliminazione dei canneti a Cannuccia di palude *Phragmites australis*, l'urbanizzazione e l'industrializzazione del territorio a seguito di una non programmata sua occupazione con impianti eolici e fotovoltaici, l'introduzione di nuove estese monoculture, l'impiego diffuso di sostanze fitosanitari estremamente dannose per la vita acquatica e la riduzione insostenibile della risorsa di acqua dolce.

La distruzione della vegetazione ripariale ha eliminato uno dei più importanti meccanismi naturali che permettono a un lago sano di mantenere il suo equilibrio, fissando nutrienti, carbonio e altre sostanze inquinanti nella vegetazione e nei sedimenti sulle rive, e sta compromettendo la capacità del lago di far fronte alle molteplici minacce.

Si aggiungono gli effetti del cambiamento climatico, che mette in pericolo ulteriormente la salute degli ecosistemi e la preziosa risorsa di acqua dolce nell'acquifero vulcanico. Il cambiamento climatico incide in molti modi sul lago (vedi capitolo 4), per esempio con la diminuzione della piovosità e l'aumento di evaporazione ed evapotraspirazione, e con l'aumento della stabilità e della durata della stratificazione, riducendo così l'ossigenazione invernale delle acque e amplificando la deossigenazione dell'ipolimnio causata dall'eutrofizzazione in atto (vedi capitolo 3).

La riduzione della risorsa d'acqua del lago negli ultimi 20 anni a causa dei prelievi incontrollati e non monitorati¹⁰ ha aumentato a tal punto il suo tempo di rinnovo, che le uscite d'acqua dall'emissario non contribuiscono più alla riduzione del fosforo nel lago.¹¹ L'unico meccanismo utile rimasto a tale scopo è l'effettiva fissazione di fosforo nei fondali, che dipende dalla ossigenazione delle acque in contatto con i sedimenti. Anche questo meccanismo si sta indebolendo a causa del cambiamento climatico.

Poiché la base per l'adozione dei provvedimenti necessari è una corretta determinazione del livello trofico del lago, e considerando che esistono due divergenti pareri, sarebbe opportuna una costruttiva collaborazione fra ARPA e ALB per tentare di migliorare la qualità dei monitoraggi e delle relative interpretazioni.

Il futuro del lago dipende fondamentalmente dalla presa di coscienza delle forti criticità che incombono su di esso, dal coraggio e dalla responsabilità dei rappresentanti politici locali e regionali di prendere velocemente decisioni coraggiose e adeguate, volte a adottare le misure necessarie per arrestarne il degrado, e dall'iniziativa della popolazione, consapevole ed informata, di chiedere e sostenere con forza la necessità di attuazione di tali misure. Le misure da adottare per affrontare questa complessa situazione sono essenzialmente di due categorie – ridurre ed eliminare tutte le azioni che contribuiscono al deterioramento del lago, e risanare e recuperare i suoi meccanismi naturali.

Per garantire un futuro sostenibile per il lago, si suggeriscono le azioni concrete e integrate, di seguito indicate, che riteniamo indispensabili per affrontare le criticità in atto tra le quali è opportuno ricordare 1) il riscaldamento delle acque del lago a causa del cambiamento climatico e degli effetti che questo comporta (minor rimescolamento e minor ossigenazione degli strati profondi; 2) il limitato ricambio idrologico.

- **Completamento degli interventi sulle reti fognarie:** è urgente completare la raccolta delle acque reflue lungo il litorale ovest, integrando il tratto mancante del collettore. Parallelamente, occorre intensificare le operazioni di controllo per eliminare gli scarichi abusivi.
- **Sostegno alla politica del Biodistretto:** l'istituzione del Biodistretto Lago di Bolsena rappresenta un'opportunità per ridurre l'apporto di nutrienti dall'agricoltura. Tuttavia, il successo di questa iniziativa dipende anche dalla volontà politica di sostenerla (dalla Regione ai Comuni) e dalla capacità della "governance" del Biodistretto stesso di supportare le aziende affinché implementino pratiche agricole sostenibili, che prevedano la transizione al biologico con un ridotto utilizzo di fertilizzanti.
- **Rafforzamento del coordinamento tra enti comunali, regionali e nazionali (Autorità di Bacino) ed Associazioni che agiscono sul lago:** garantire azioni efficaci ed efficienti in relazione al suo stato ecologico ed alla gestione idraulica del bacino, anche in riferimento a quanto previsto dalle Misure di Conservazione della Zona Speciale di Conservazione (ZSC) Lago di Bolsena (DGR Regione Lazio 162/2016).
- **Realizzazione di interventi mirati al ripristino della fascia ripariale:** il pessimo stato di conservazione in cui si trovano il canneto a Cannuccia di palude e la fascia ripariale arborea ed arbustiva che svolgevano un ruolo essenziale quale "fascia tampone" per evitare che finissero direttamente nel lago sedimenti, nutrienti e inquinanti, rende necessario prevedere interventi urgenti mirati al suo ripristino, a partire dalla elaborazione di un Piano di Utilizzo degli Arenili unico, non frammentato tra le diverse amministrazioni comunali, che non preveda altre occupazioni di suolo e si ponga l'obiettivo del ripristino.
- **Realizzazione entro il 2026 della prima conferenza operativa sugli "Stati generali del Lago":** coinvolgimento dei principali portatori di interesse (comunità politico/istituzionale, università, enti tecnici, associazioni, cittadinanza) affinché venga svolta questa "conferenza operativa" durante la quale si faccia il punto sulla situazione ecologica del lago, si assumano impegni concreti per la sua salvaguardia e si attuino politiche ambientali coraggiose e tempestive, volte alla salvaguardia dell'ecosistema lacustre, nel nome di un senso di responsabilità condivisa e facendo anche affidamento ai fondi che deriveranno dall'attuazione del Piano previsto dal regolamento europeo sul ripristino della Natura "Nature Restoration Law (2024/1991)".



Appare essenziale, per una prospettiva ecologica accettabile, la capacità di coniugare interventi tecnici e impegno politico, con il supporto essenziale della partecipazione attiva della cittadinanza. Solo attraverso una visione integrata e tempestiva sarà possibile invertire il trend attuale e garantire il ripristino ed il mantenimento di un ambiente lacustre sano e resiliente, in grado di offrire servizi ecosistemici preziosi non solo per la natura, ma anche per la possibilità di supportare un turismo consapevole ed attento, per garantire una buona qualità della vita delle comunità e delle imprese locali, tra cui quelle dei pescatori professionali. L'Associazione Lago di Bolsena è a disposizione ed al fianco di coloro che amano il Lago e che vorranno sostenere, con convinzione e facendosi parte attiva, le iniziative sopra indicate.

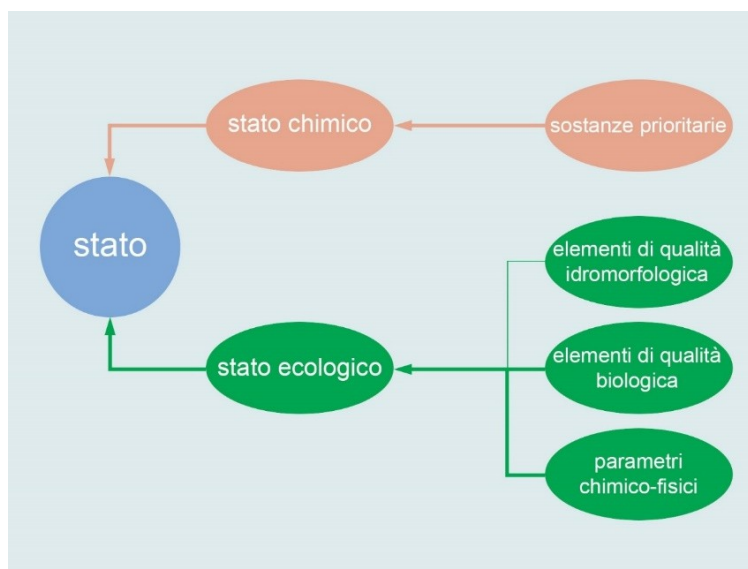
Allegato 1: Lo stato del lago

Lo **Stato** (stato globale di salute) di un corpo idrico è determinato dal valore più basso tra quelli assunti, relativi allo Stato Ecologico e allo Stato Chimico che vengono affiancati nel giudizio (cfr. figura in basso).

Seguendo la normativa attuale (Direttiva 2000/60/CE, recepita dal D. Lgs 152/2006 e completata dai successivi regolamenti ([DM 131/08](#) e [DM 56/09](#), e soprattutto per i criteri tecnici per la classificazione [DM 260/10](#) e disposizioni successive), gli elementi per la classificazione dello Stato Ecologico del Lago sono gli Elementi di Qualità Biologica (EQB), gli elementi fisico-chimici, chimici (inquinanti specifici) e idromorfologici ^{viii}.

Questi elementi sono quantificati in indici – di qualità biologica, di livello trofico, di stato chimico e di parametri idromorfologici. Questi indici, a loro volta, sono determinati a partire da vari indicatori specifici.

Ai fini della classificazione, i tipi lacustri sono aggregati in macrotipi che tengono conto della loro natura (lago o invaso), delle caratteristiche del rimescolamento e della profondità massima. Il Lago di Bolsena appartiene al macrotipo L1: Laghi con profondità massima maggiore di 125 m.



α) Stato Ecologico

Lo Stato Ecologico esprime la qualità della struttura e del funzionamento dell’ecosistema acquatico. La biologia ne è il criterio dominante; gli altri elementi monitorati sono considerati “a sostegno” degli elementi biologici, e comprendono elementi idromorfologici, elementi chimico-fisici e, solo per i fiumi, gli inquinanti specifici (principali inquinanti non inclusi nell’elenco di priorità, elencati in tabella 1/B, allegato 1 del Dm 260/2010).

^{viii} Dm 260/2010: Regolamento recante i criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici superficiali, per la modifica delle norme tecniche del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell’articolo 75, comma 3, del medesimo decreto legislativo., p.70 - p.83

Lo Stato Chimico invece è definito sulla base degli standard di qualità dei microinquinanti appartenenti alla tab. 1/A del Dm 260/2010 (in continuo aggiornamento). Si tratta di sostanze potenzialmente pericolose, che presentano un rischio significativo per l'ambiente acquatico.

$\alpha 1$) Elementi di Qualità Biologica (EQB)

Elementi di Qualità Biologica (EQB) per i laghi sono: il fitoplancton, le macrofite, i macroinvertebrati e la fauna ittica (definiti dall'allegato V della Direttiva).

Gli Elementi di Qualità Biologica (EQB) non sono inquadrati in tabelle di classificazione predefinite. Vanno invece riportati a condizioni di riferimento espresse attraverso comunità attese tipo-specifiche, vale a dire specifiche per categorie (corsi d'acqua, laghi, acque di transizione, acque costiere) e, nell'ambito di ciascuna categoria, per tipologie. Le comunità attese, su cui vengono elaborate le metriche di calcolo degli indici, sono cercate in siti di riferimento idonei, individuati su corpi idrici non impattati dall'attività antropica e sottoposte al processo di intercalibrazione tra gli Stati membri della Comunità Europea. Il giudizio di qualità per ciascun elemento biologico viene espresso attraverso il rapporto tra il valore osservato e quello rilevato nei siti di riferimento (Ecological Quality Ratio, EQR).

La determinazione e valutazione degli EQB effettuata dall'ARPA indica uno stato ecologico "buono"¹².

Per la determinazione dello Stato Ecologico, si stabilisce dapprima la classificazione degli EQB in 5 classi (elevato, buono, sufficiente, scadente, cattivo) secondo il criterio del "One out – All out": la classe peggiore tra gli EQB determina la classe dello stato ecologico. Se la classificazione derivante dagli elementi a sostegno risulta peggiore di quella degli EQB, lo Stato Ecologico viene declassato ma non oltre il livello "sufficiente". Gli elementi idromorfologici (che conoscono solo due stati, "elevato" e "buono") sono decisivi nel confermare lo stato ecologico elevato ma, in caso di valutazioni inferiori degli altri EQ, sono usati 'solo' come strumento di analisi delle eventuali alterazioni biologiche.

La classificazione viene definita calcolando il valore medio per ciascun parametro analizzato in ciascun anno di monitoraggio e utilizzando il risultato peggiore ottenuto nel periodo di riferimento (triennio o sessennio).

Infine, solo per i fiumi, lo Stato Ecologico è stabilito dopo l'integrazione con il giudizio di conformità (conforme o non conforme) degli inquinanti specifici appartenenti alla tab. 1/B del Dm 260/2010.

$\alpha 2$) Elementi di sostegno fisico chimici: l'indice trofico LTL_{eco}

Il livello trofico del lago è definito dall'indice LTL_{eco} (Livello Trofico Laghi per lo stato ecologico). Questo indice si calcola sulla base di tre indicatori fisico-chimici:

- la trasparenza **T** delle acque (nella media annuale, determinata con il Disco di Secchi e misurata in metri),
- la concentrazione totale di fosforo **P_{tot}** (nella media ponderata annuale, misurata nel periodo di piena circolazione alla fine della stagione invernale),

- la concentrazione dell'ossigeno disciolto O_{disc} (misurata nell'ipolimnio alla fine del periodo di stratificazione), espressa come percentuale della concentrazione di saturazione.

Questi indicatori colgono tre aspetti diversi della produzione primaria nel lago: la causa determinante (fosforo), lo stato (trasparenza) e l'effetto (ossigeno ipolimnico) della produzione primaria.

Tabella A1-1: Limiti di classe per i tre indicatori fisico-chimici dell'indice trofico LTL_{eco}

parametro	intervallo L1	intervallo L2	intervallo L3
punteggio	5	4	3
P_{tot} [$\mu g/l$]	≤ 8	≤ 15	> 15
T [m]	≥ 10	$\geq 5,5$	$< 5,5$
O_{disc} [%sat]	> 80	$80 > O_{disc} > 40$	≤ 40

Il punteggio assegnato al livello trofico LTL_{eco} è la somma dei punteggi parziali per la trasparenza T , la concentrazione di fosforo totale P_{tot} e la concentrazione di ossigeno ipolimnico O_{disc} . (Secondo DM 260/10 e disposizioni successive, dalle tabelle Tab. 4.2.2.a (fosforo), Tab. 4.2.2.b (trasparenza), e Tab 4.2.2.c (ossigeno)).

Tabella A1-2: Limiti di classe per la determinazione dello stato trofico LTL_{eco} (DM260/10, tabella 4.2.2/d)

Classificazione stato	Limiti di classi	Limiti di classe in caso di trasparenza ridotta per cause naturali
Elevato	15	10
Buono	12 - 14	8 - 9
Sufficiente	< 12	< 8

Nel caso di monitoraggio operativo, per la classificazione si utilizzano le medie dei valori misurati nei tre anni per ogni singolo parametro. Nel caso di monitoraggio di sorveglianza si fa riferimento ai valori o di un singolo anno o alla media dei valori misurati negli anni di monitoraggio.

I valori per i tre indicatori fisico-chimici qui sopra riportati possono essere derogati qualora coesistano le seguenti condizioni:

- gli elementi di qualità biologica del corpo idrico sono risultati in stato buono o elevato;
- il superamento dei valori tabellari è dovuto alle caratteristiche peculiari del corpo idrico;
- non sono presenti pressioni che comportino l'aumento di nutrienti ovvero siano state messe in atto tutte le necessarie misure per ridurre adeguatamente l'impatto delle pressioni presenti.

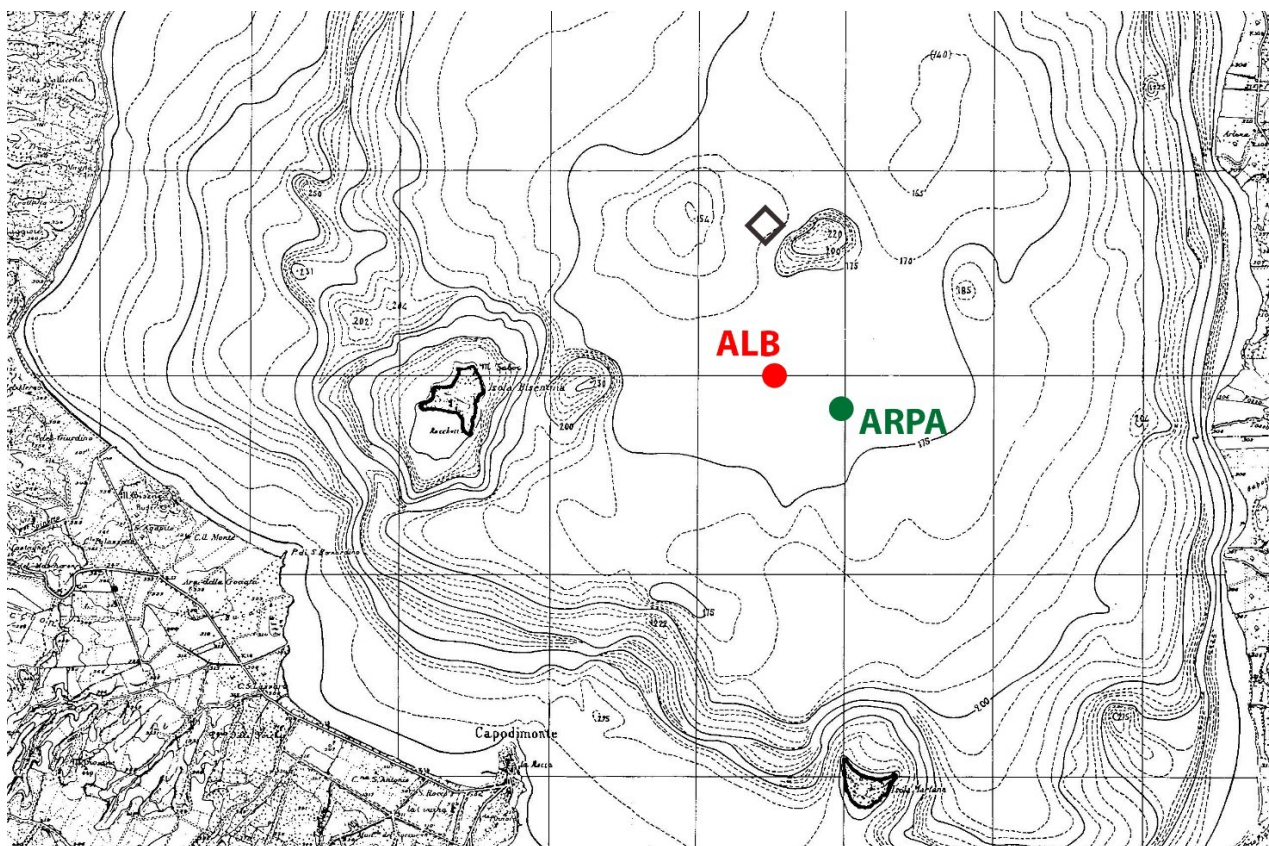
Mentre per il nostro lago la prima condizione potrebbe essere soddisfatta¹³ con uno stato “buono” secondo gli EQB, le altre due e in particolare la terza condizione non lo sono.

Di conseguenza, il degrado del livello trofico osservato da ALB dovrebbe significare (la classificazione derivante dagli elementi a sostegno risultante peggiore di quella degli EQB) che lo Stato Ecologico venga declassato al livello “sufficiente”.

Allegato 2: Posizione delle stazioni di monitoraggio di ALB e ARPA

Le stazioni di monitoraggio scelte dall'ALB e dall'ARPA distano di circa 600 metri l'una dall'altra. Soddisfanno ambedue le condizioni essenziali – di essere vicino al centro del lago per minimizzare eventuali influenze disturbanti provenienti dalla terraferma, e di garantire che piccoli spostamenti casuali dal punto di monitoraggio (dovuti al vento o alle correnti) non alterino in modo significativo i risultati. Le due stazioni sono posizionate in una estesa area con un fondale pianeggiante a circa 130 metri di profondità, ma distante più di 1 km dal centro del lago che si trova tra una piccola collina sulla pianura del fondale e una depressione che contiene il punto più profondo del lago a 151 metri (vedi grafico A2-1).

Grafico A2-1: Dettaglio della Carta Batimetrica del Lago di Bolsena (L. Barbanti, A. Carollo e A. Calderoli, Istituto Italiano di Idrobiologia di Pallanza (1965)). Sono indicate le posizioni di monitoraggio dell'ALB (punto rosso, $42^{\circ}35'00''N - 11^{\circ}56'30''E$), dell'ARPA (punto verde, $42^{\circ}34'50.2''N - 11^{\circ}56'53.2''E$) e del centro del lago (rombo nero, $42^{\circ}35'44.1''N - 11^{\circ}56'26.0''E$).



Allegato 3: Riflessione sugli errori di misura delle concentrazioni del fosforo

Qualsiasi dato sperimentale acquisisce significatività solo se considerato insieme agli errori di misura che l'accompagnano. Tali errori si dividono in due gruppi, errori accidentali ed errori sistematici, che nella pratica sperimentale di solito si manifestano congiuntamente.

Gli errori accidentali non si possono evitare, poiché dipendono da imperfezioni della strumentazione, da incertezze inevitabili nelle modalità di misura, o da un'inerente impossibilità di descrivere con certezza il fenomeno osservato: per esempio la profondità del campionamento è conosciuta solo con un certo margine di errore, e la concentrazione di fosforo in un campione non può essere determinata con precisione assoluta a causa di fattori incontrollabili nella preparazione dei campioni e nella misurazione stessa. Gli errori accidentali possono essere ridotti ma non completamente eliminati. Ripetendo più volte una data misura afflitta da errori accidentali, si riesce a stabilire il valore più probabile di misura assieme alla probabilità che tale valore devii dal valore di misura ideale.

Errori sistematici hanno la loro causa in difetti strumentali come una calibrazione sbagliata, in un'inadeguata condotta degli esperimenti oppure in una modalità erranea di elaborazione dei dati. Si rivelano quando si paragonano i risultati di misurazioni e analisi ravvicinate nel tempo ma fatte in condizioni o con metodologie diverse, per esempio rilevando i valori delle medie di TP nel lago poco prima e poco dopo un rimescolamento, oppure quando campioni identici sono analizzati da diversi gruppi di lavoro ("intercalibrazione").

Il laboratorio di idrochimica della CNR IRSA sede di Verbania sul lago Maggiore specifica gli errori tipici (accidentali e sistematici) delle analisi del fosforo totale TP. La deviazione standard relativa RSD dipende dal valore di TP e si può riassumere come indicato nella seguente tabella:¹⁴

Tabella A3-1: RSD di fosforo reattivo RP e fosforo totale TP a diversi intervalli di concentrazione ($\mu\text{g P/l}$ - microgrammi di P per litro) prossimi alle concentrazioni rilevate nel Lago di Bolsena.

$\mu\text{g P/l}$	RSD RP [%]	RSD TP [%]
3 - 10	7 - 9	12 - 18
10 - 20	5 - 7	8 - 12
20 - 40	3 - 6	3 - 8
40 - 60	2 - 5	3 - 6

A - Rimescolamento completo

Dai grafici 2-1 possiamo vedere, che negli anni di rimescolamento invernale completo (2017, 2018, 2019, 2022) le concentrazioni parziali TP sono (entro i limiti degli errori accidentali) uguali per tutte le profondità. La concentrazione media del fosforo totale nel lago corrisponde quindi alla media dei valori rilevati lungo la colonna d'acqua al centro del lago. Se supponiamo a priori che TP è costante in funzione della profondità, le deviazioni dei valori parziali rispetto alla media sono dovute ad un errore accidentale attribuibile alla precisione dell'analisi chimica. Nei grafici è indicato, nelle linee punteggiate, il *linear best fit* in tale ipotesi, e, nella legenda, i risultati numerici

del *fit* - il valore medio e l'errore quadratico medio (RMSE - *root-mean-square error*) che rappresenta l'errore accidentale della media ponderata TP_{mp} (TP media ponderata).

B - Rimescolamento incompleto

Nel caso di un rimescolamento incompleto, dalle concentrazioni del fosforo totale TP, determinate per i campioni prelevati a specifiche profondità e quindi parziali (cioè con validità locale), si può calcolare la concentrazione media del fosforo totale in tutto il lago, associando a ognuna di queste concentrazioni parziali dei volumi d'acqua definiti secondo un modello batimetrico del lago - si calcola quindi una media ponderata TP_{mp} di tutte le concentrazioni parziali TP (vedi Allegato 6). In questo caso, oltre all'errore accidentale associato all'analisi, entrano in gioco altri errori: l'errore accidentale nella misura della profondità e gli eventuali errori sistematici relativi al modello batimetrico e all'attribuzione dei volumi ai valori parziali di TP.

In questo caso, dove il rimescolamento incompleto invernale porta a una dipendenza funzionale di TP dalla profondità, per ridurre gli errori sistematici diventa anche importante poter approssimare tale dipendenza il più fedelmente possibile, misurando dunque TP a un numero sufficiente di profondità differenti a distanze scelte con cura.

Un altro problema è causato dalla notevole riduzione della concentrazione di fosforo negli strati superficiali del lago nel periodo di massima stratificazione, quando si raggiungono concentrazioni molto basse, vicine al limite di rilevabilità (*limit of detection* LOD, che è di circa 3 µg/l per le analisi dell'ALB e indicativamente di 5 µg/l per l'ARPA). In questi casi un'inadeguata definizione di tale limite potrebbe dare origine a un addizionale errore sistematico di misura.

La lunghezza delle barre di errore nel grafico 2-2 per i dati dell'ALB è calcolata tenendo conto dell'azione congiunta di errori accidentali e sistematici.

Non disponiamo di informazioni sulla grandezza degli errori che accompagnano i dati rilevati dall'ARPA.

Allegato 4: I venti

Il fenomeno di rimescolamento delle acque di un lago è di estrema importanza per il suo stato ecologico, e il vento è il grande protagonista. Per il nostro lago il massimo rimescolamento avviene una volta all'anno, in inverno, quando la stratificazione termica che si forma durante l'anno viene annullata grazie all'azione combinata delle basse temperature dell'aria e di forti venti, in particolare della tramontana.

La stratificazione inizia con la primavera a causa del riscaldamento delle acque superficiali. Progressivamente si definisce uno strato superficiale più caldo, chiamato epilimnio, che "galleggia" sul corpo d'acqua sottostante. L'epilimnio si estende sempre di più fino a raggiungere uno spessore di poco meno di 40 metri a fine anno, ed è rimescolato dai venti in continuazione, assumendo una temperatura costante. È massima con più di 25 °C in estate e diminuisce successivamente con la diminuzione della temperatura dell'aria e della radiazione solare. Sotto l'epilimnio si trova il metalimnio, uno strato di circa 10 m dove la temperatura scende rapidamente per raggiungere, all'inizio dello strato sottostante chiamato ipolimnio, un valore poco superiore a un valore minimo sul fondo del lago che negli ultimi 20 anni è aumentato da 7°C a circa 9°C.

Quando la temperatura dell'epilimnio si avvicina a quella dell'ipolimnio, un forte vento può indurre un rimescolamento di tutto il corpo d'acqua che raggiunge il fondale.

Un rimescolamento completo avviene quando l'energia cinetica fornita dai venti permette di superare la stabilità residua della configurazione termica stratificata, determinata dalla differenza tra la sua energia potenziale (gravitazionale) e l'energia potenziale della configurazione isoterma. Porta alla piena e libera circolazione di correnti d'acqua in tutto il lago e di conseguenza all'equidistribuzione dell'ossigeno disciolto, di fosfati e nitrati come anche di tutte le altre sostanze inorganiche e organiche.

Purtroppo, il rimescolamento completo avviene saltuariamente negli anni - il nostro lago è "oligomittico" (dal greco *oligos* (poco, raro) e *miktos* (mescolato)), il che significa appunto che il rimescolamento completo e la piena circolazione non avvengono tutti gli anni.

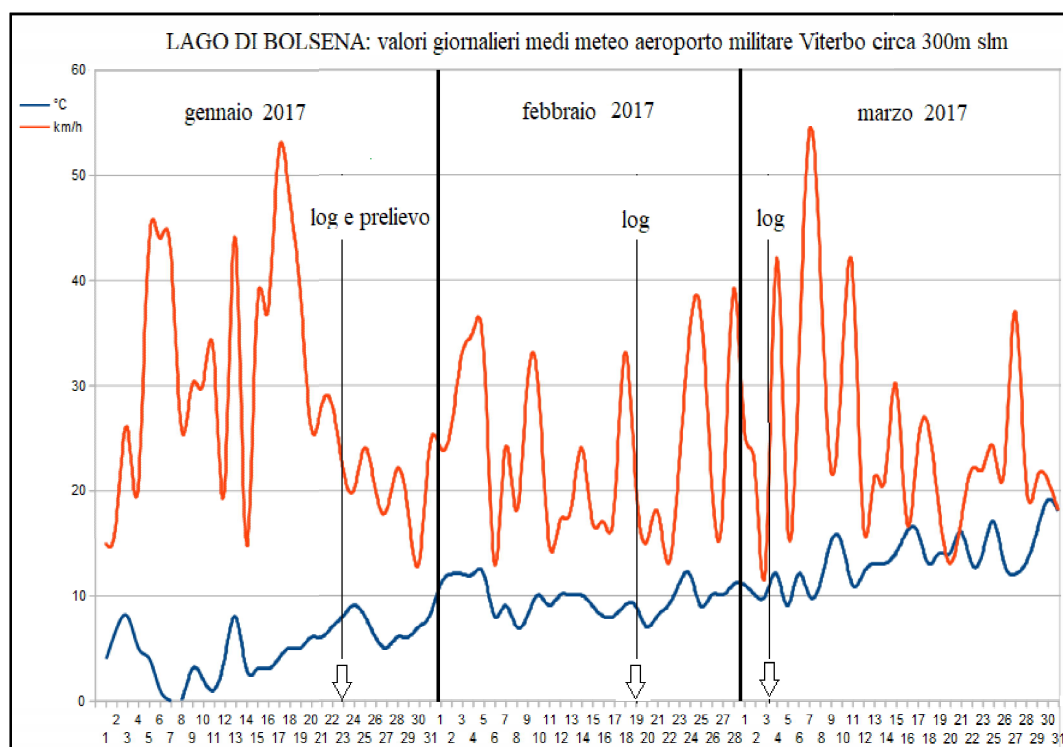
Il rimescolamento completo permette la completa ossigenazione dei fondali e la equa ridistribuzione del fosforo nelle sue varie associazioni e configurazioni chimiche nel corpo d'acqua. Con ciò arresta la liberazione di fosforo dai sedimenti di fondolago in caso di anossia sul fondo ("carico interno") e riattiva la loro capacità di fissare il fosforo che perdura tanto più a lungo nei mesi quanto più completa è la ridistribuzione del fosforo accumulato sul fondo.

Sembra possibile che la riduzione di TP_{mp} negli anni seguenti (nel 2005, 2012, 2018) a un primo rimescolamento completo (nel 2004, 2011, 2017) avvenuto dopo una serie di anni di rimescolamenti incompleti, osservata sia nei rilievi dello stesso anno nel periodo di massima stratificazione che al rimescolamento consecutivo, riflette l'azione di un'efficace fissazione di fosforo nei fondali e ci dà un indizio circa la sua potenziale entità. In particolare, dopo l'anno 2017 la riduzione della concentrazione del TP_{mp} è stata eccezionale: oltre 2 µg/l.

Nel 2017 è iniziato un vento eccezionalmente forte e persistente proveniente dal quadrante nord-est (nominato *burian* o *sciabolata artica*) a partire dai primi giorni di gennaio raggiungendo la velocità di 55 km/h. Nel grafico che segue è indicata la velocità del vento e la temperatura

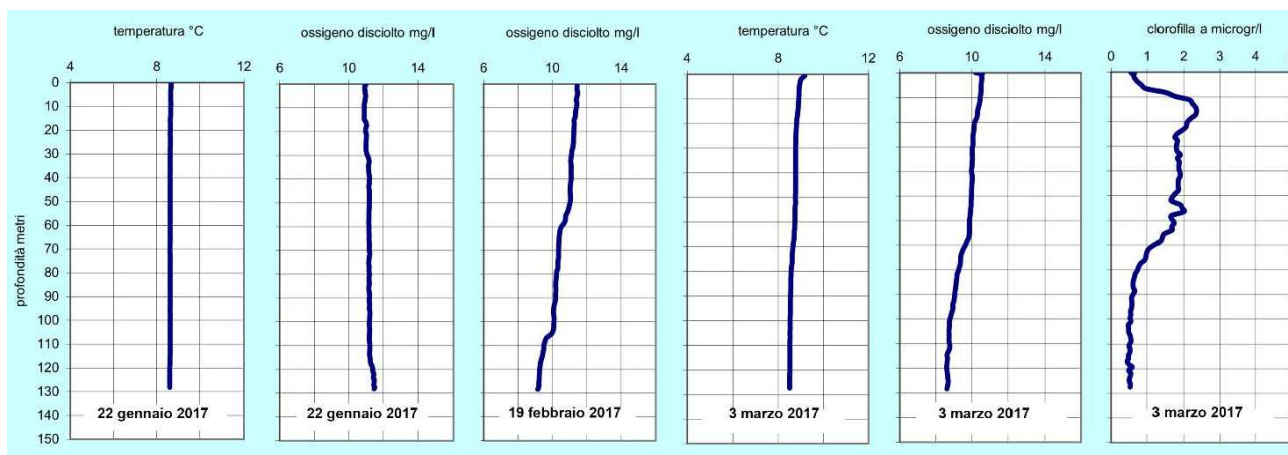
dell'aria. È anche indicata la data in cui ALB ha effettuato delle misure multiparametriche e il prelievo dei campioni d'acqua lungo la colonna della stazione pelagica di monitoraggio.

Grafico A4-1: *Primi mesi dell'anno 2017: Velocità del vento e temperatura dell'aria (valori giornalieri medi) rilevati all'aeroporto militare di Viterbo. Le frecce indicano le date dei rilevamenti multiparametrici e dei prelievi di campioni per le analisi chimiche.*



Nel grafico i venti dal quadrante nord si riconoscono dal fatto che sono associati a una temperatura dell'aria bassa. Dalle registrazioni multiparametriche sottostanti (Grafico A3-2) si vede, che il 22 gennaio il lago è perfettamente rimescolato - temperatura, contenuto di ossigeno e concentrazione di TP (vedi Grafico 2-1) sono uguali a tutte le profondità. Le condizioni di piena circolazione perdurano almeno fino a inizio marzo, anche se la distribuzione dell'ossigeno disciolto e soprattutto della clorofilla iniziano a strutturarsi. Il 2017 è stato un anno molto favorevole per ridurre la concentrazione del TP, fatto confermato dalle analisi durante il successivo rimescolamento completo avvenuto nel 2018.

Grafico A4-2: Registrazioni multiparametriche dei primi tre mesi del 2017. Eccezionale la perfetta equidistribuzione dell'ossigeno disciolto il 22 gennaio.

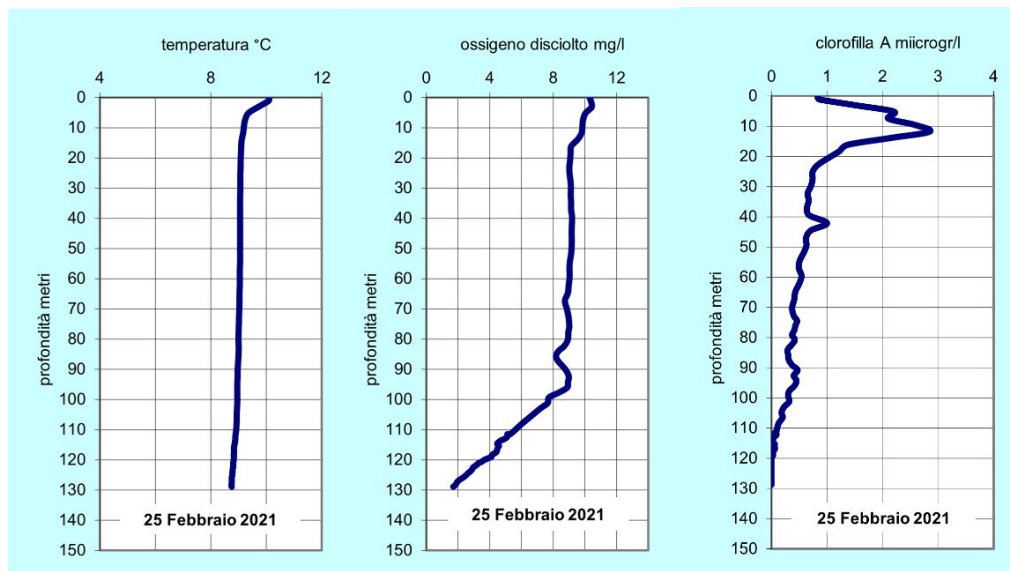


Nell'anno 2021, l'ALB ha effettuato alcuni rilevamenti multiparametrici alle date indicate nel grafico al fine di seguire il procedere del rimescolamento ed individuare il momento più conveniente per i prelievi. Il log multiparametrico del 25 febbraio, riportato nel grafico che segue, mostra che il rimescolamento è incompleto avendo raggiunto solo 100 metri.

Grafico A4-3: Primi mesi dell'anno 2021: Velocità del vento e temperatura dell'aria (valori giornalieri medi) rilevati all'aeroporto militare di Viterbo. Le frecce indicano le date dei rilevamenti multiparametrici e dei prelievi di campioni per le analisi chimiche.



Grafico A4-4: *Registrazioni multiparametriche del 25 febbraio 2021 che mostrano l'assenza di un rimescolamento completo.*



Fu tuttavia deciso di procedere con i prelievi perché la temperatura dell'acqua in superficie iniziava ad innalzarsi interrompendo lo stato di omeotermia indispensabile per il progredire del rimescolamento.

Il rimescolamento è stato parziale perché, come indica il grafico del vento, le giornate favorevoli sono state poche, dall'11 al 17 febbraio, e la velocità media del vento non ha raggiunto 50 km/h.

Anno 2022 - è caratterizzato da un rimescolamento completo dovuto a due periodi di vento del nord per un totale di almeno 20 giorni durante i quali la velocità del vento ha raggiunto 60 km/h.

Grafico A4-5: *Primi mesi dell'anno 2022: Velocità del vento e temperatura dell'aria (valori giornalieri medi) rilevati all'aeroporto militare di Viterbo. Le frecce indicano le date dei rilevamenti multiparametrici e dei prelievi di campioni per le analisi chimiche.*

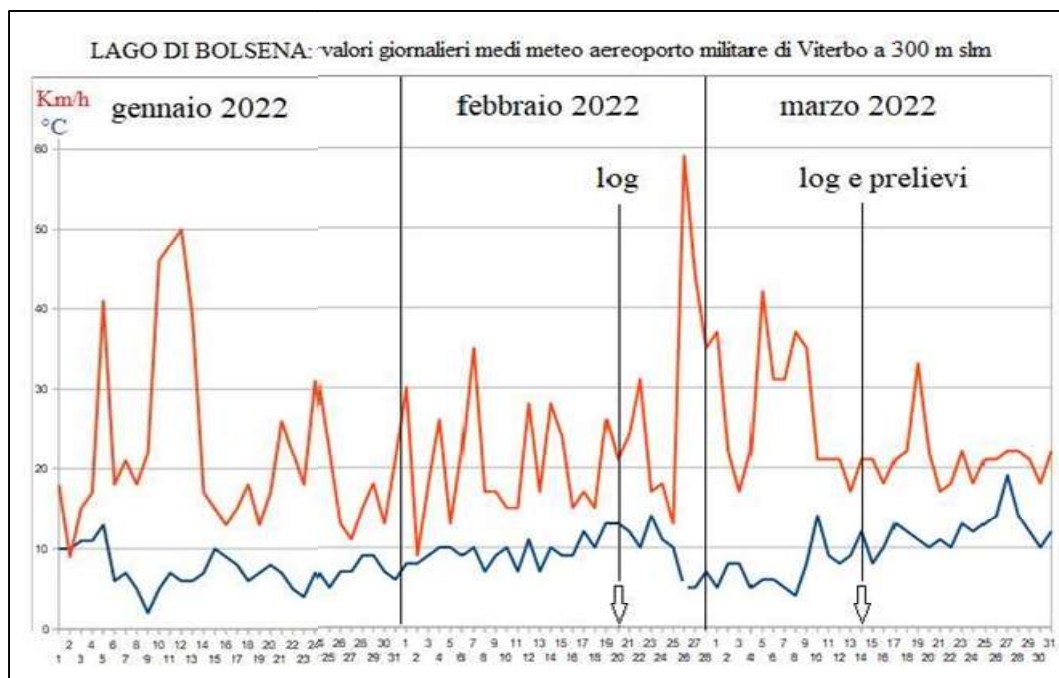
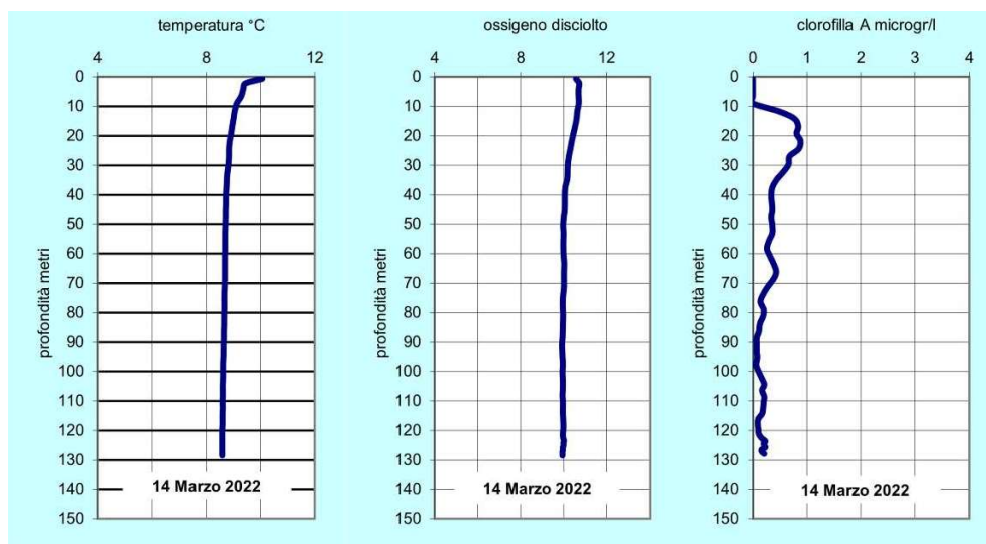


Grafico A4-6: *Registrazioni multiparametriche del 14 marzo 2022 che mostrano un rimescolamento completo.*



Allegato 5: La trasparenza

La **trasparenza** superficiale dell'acqua è l'indicatore trofico "classico", facile da misurare e in buona approssimazione proporzionale alla biomassa algale vicino alla superficie. Viene determinata con il "disco di Secchi", inventato da Angelo Secchi nel 1865: un disco bianco (diametro da 20 a 30 cm) e pesante, che, legato a una fune, viene immerso nell'acqua finché non si riesce più a vedere. "Trasparenza" del lago (o "trasparenza Secchi") viene definita la profondità di scomparsa visiva del disco. In assenza di altre fonti di torbidità, la profondità di Secchi è una misura della concentrazione del fitoplancton, la maggiore causa di assorbimento della luce negli strati superficiali del lago.

$$\frac{I_z}{I_0} = e^{-kz}$$

z : profondità di scomparsa,

I_0 : intensità della luce incidente,

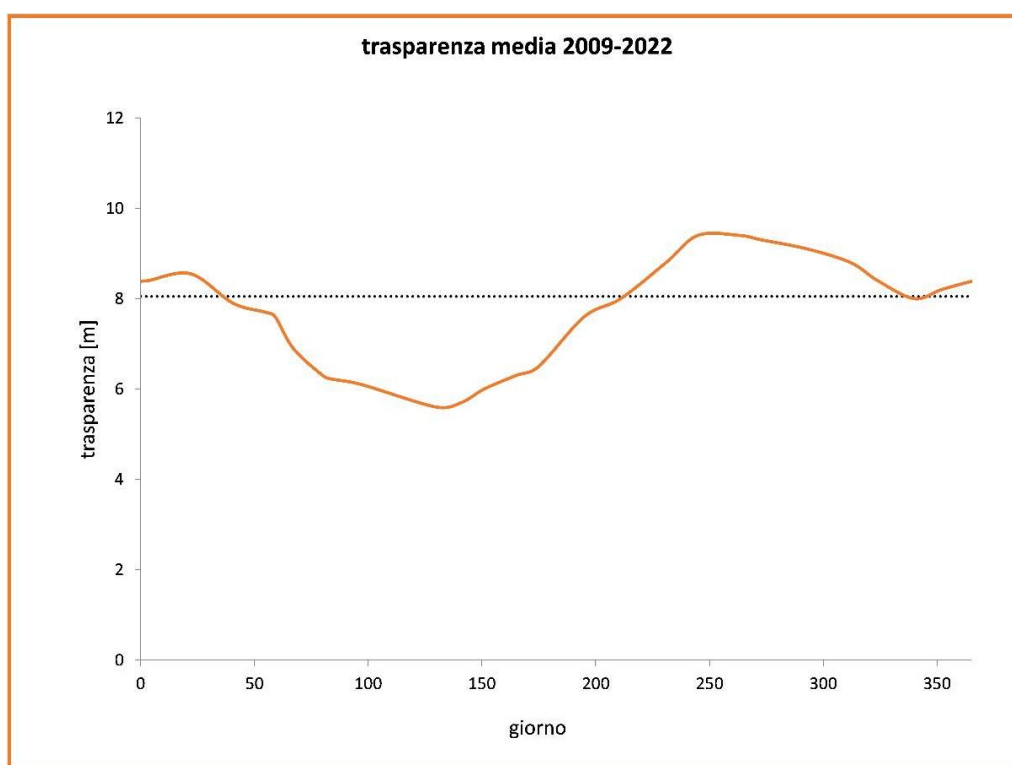
I_z : intensità alla profondità di scomparsa (circa 10% di I_0),

k : coefficiente di attenuazione della luce nell'acqua,

a) ALB:

Sono a disposizione dati della trasparenza Secchi dal 1994 ad oggi. La media nel corso dell'anno di dei valori rilevati dal 2009 al 2022 è rappresentata nel grafico A5-1.

Grafico A5-1: *Andamento annuale della trasparenza T nella media pluriennale dal 2009 al 2022. La linea tratteggiata indica il valore medio annuale di T*



L'andamento annuale della trasparenza superficiale delle acque riflette l'attività trofica, con un aumento della torbidità che inizia attorno al primo marzo (e può essere anticipato o ritardato al massimo di due settimane) con la produzione primaria di biomassa dovuta all'aumento delle temperature e dell'insolazione, dove si susseguono varie fasi di "fioritura" sovrapposte. La produzione primaria superficiale declina ad agosto per raggiungere un minimo a novembre, e rimane bassa fino all'inizio della fioritura alla successiva primavera.

Si può determinare una media annuale affidabile della trasparenza con rilevamenti regolari mensili. In assenza di tali misure mensili (come è stato il caso per ALB nel 2024, a causa di guasti nell'attrezzatura), si può ricorrere a un *least squares fit* della media pluriennale ai dati rilevati - è questo il metodo con cui abbiamo ottenuto i risultati riportati nella Tabella 2.

La media annuale della trasparenza è di circa 8 m ed è rimasta essenzialmente invariata durante tutto il periodo di osservazione fino al 2023. Per il 2023 e il 2024 osserviamo valori eccezionalmente alti nel periodo autunnale, per esempio il 30 ottobre 2024 con 13 metri di trasparenza.

b) ARPA

L'ARPA effettua 5-6 misure della trasparenza durante l'anno. Non sappiamo quale metodo applichi per determinare la trasparenza media. Per gli anni dal 2015 al 2021, i valori medi di T ricadono nella finestra tra 5.5 m e 10 m.

Allegato 6: Curva ipsografica e calcolo dei volumi

La **curva ipsografica** descrive la distribuzione delle superfici del lago in funzione della profondità, dalla più grande superficie che normalmente corrisponde alla profondità di zero metri, fino alla più piccola superficie che corrisponde nel nostro lago al punto più profondo a 151 metri.

Ricaviamo questa distribuzione dalla carta batimetrica¹⁵ dell'Istituto Italiano di Idrobiologia di Pallanza, attualmente Istituto di Ricerca per lo Studio delle Acque (IRSA) del CNR.

Se dividiamo il lago in fasce di profondità di una certa altezza, la curva ipsografica attribuisce a ogni profondità **p** un volume **V** del lago, permettendoci in tal modo di attribuire ad ogni profondità un "peso" – di stabilire quanto una certa fascia di profondità con le sue caratteristiche contribuisce al comportamento globale dell'intero lago.

Una buona conoscenza della curva ipsografica è importante quindi per poter calcolare le medie ponderate nell'intero lago dei vari parametri limnologici, a partire da dati sperimentali discreti di questi parametri rilevati a varie profondità.

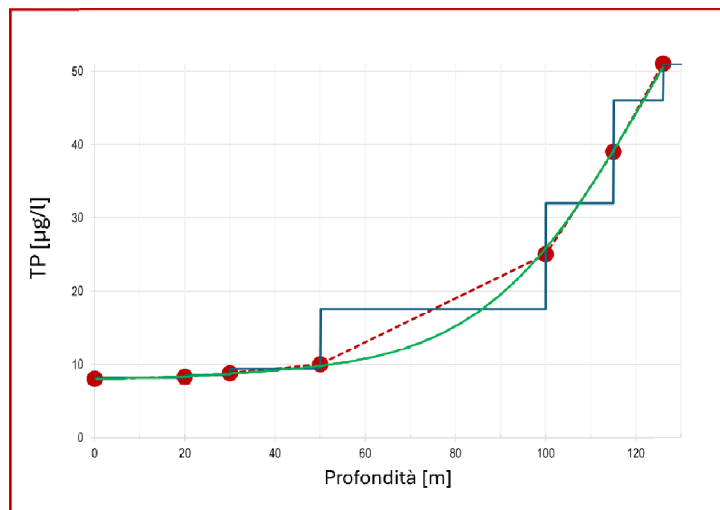
Nella pratica, utilizziamo una curva elaborata dal nostro socio G. Spinucci, che divide il lago in tronchi di cono alti ognuno 5 m. La curva è disponibile in forma di tabella e viene utilizzata come tale.

Tradizionalmente, la loro applicazione viene effettuata in due modi: (1) dividere il lago in strati i cui estremi superiore ed inferiore coincidono con la profondità di due prelievi consecutivi. In questo caso si attribuisce a ogni strato la media aritmetica del parametro misurato, p. es. delle concentrazioni del fosforo totale TP rilevate ai bordi dello strato; (2) dividere il lago in strati i cui limiti sono a metà della profondità di ogni prelievo e il successivo. La scelta della carta ipsografica e della modalità di applicazione può comportare piccole differenze nel calcolo della media ponderata TP_{mp} della concentrazione del fosforo totale, ma trascurabili paragonate agli errori accidentali e sistematici della misura.

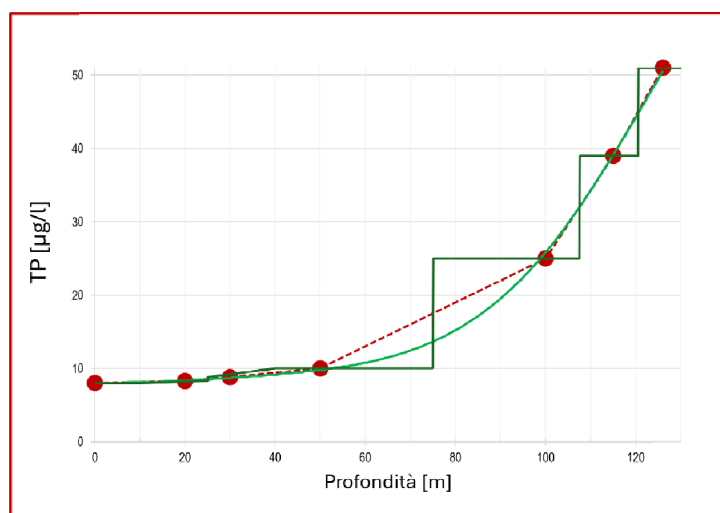
Per un caso modello come nel grafico A6-1, il calcolo delle medie ponderate TP_{mp} non genera differenze rilevanti per i due modi di approssimazione (1) e (2). Deviazioni dai valori corretti delle medie ponderate derivano soprattutto da una distanza troppo grande dei punti di misura (come per ALB nell'intervallo tra 50 m e 100 m).

Grafico A6-1: *Illustrazione dei due modi per calcolare la media ponderata di una curva sperimentale. Curva verde: least squares fit ai dati sperimentali. Le frecce indicano valori tipici di profondità per i prelievi dell'ALB.*

Modo 1



Modo 2



a) ALB

Annotiamo che il protocollo ALB dovrebbe prevedere almeno un punto di prelievo in più tra 50 m e 100 m di profondità, arrivando a 8 punti di prelievo in tutto (adottato per la prima volta nel 2025).¹⁶ Oggi usiamo un'altra procedura: digitalizziamo la curva ipsografica originale in intervalli infinitesimali tramite un'interpolazione "spline" (cubic spline-fit), e otteniamo le medie ponderate tramite l'integrazione numerica dei dati sperimentali, attribuendo a ogni intervallo infinitesimale il suo peso ricavato dalla curva ipsografica. Anche i dati sperimentali vengono approssimati da un'interpolazione numerica adatta.

b) ARPA

Nel periodo di massimo rimescolamento, l'ARPA prende campioni (come da protocollo) solo a quattro profondità diverse: sarebbe opportuno aggiungere altri 4 punti almeno per il monitoraggio nel periodo di massimo rimescolamento.

7. NOTE E BIBLIOGRAFIA

¹ Per esempio M. Marchetti: *L'eutrofizzazione. Un processo degenerativo delle acque*. Franco Angeli, Milano (1987).

² Mosello R., Bruni P., Rogora M., Tartari G., Dresti C. (2018). *Long-term change in the trophic status and mixing regime of a deep volcanic lake (Lake Bolsena, Central Italy)*. *Limnologica*, 72, 1-9.

I dati che il laboratorio del CNR IRSA ha prodotto analizzando i campioni del Lago di Bolsena, vengono forniti all'ALB nell'ambito di una collaborazione informale finalizzata a documentare l'evoluzione a lungo termine delle caratteristiche termiche e chimiche delle acque lacustri.

³ <https://sira.arpalazio.it/web/guest/banche-dati/visualizzazione/acqua#/>.

⁴ Comunicazione della Dott.ssa Vera Sangiorgi, ARPA Lazio, del 19/06/2024: "per la determinazione del Ptot dal 2017 al 2019 è stato utilizzato il metodo interno MI DPL VT 02. Dal 2019 è entrata in vigore la norma UNI 11757:2019, che non ha modificato le modalità di esecuzione delle analisi. Nell'applicazione del metodo UNI è stato esteso e validato il campo di applicazione a livelli più bassi".

⁵ Esistono alcuni studi precedenti sullo stato ecologico del lago, a partire dal 1966. Lasciano supporre uno stato buono iniziale, che probabilmente è peggiorato negli anni '80/'90 a causa dell'assenza di un sistema fognario e torna a essere buono all'inizio del secolo. Misure dell'IRSA CNR nel 2002 e 2003 mostrano una concentrazione di fosforo attorno a 10 µg/l.

Studi precedenti sono:

- Gerletti, M. 1967. *Lago di Bolsena: caratteristiche chimiche delle acque pelagiche*. Mem. Ist. ital. Idrobiol., 21: 145-164. Istituto di Ricerca Sulle Acque. 1974. Indagini limnologiche sui laghi di Bolsena, Bracciano, Vico e Trasimeno. Quaderni IRSA, 17: 179 pp.
- Istituto Italiano di Idrobiologia (Ed.). 1971. *Limnologia ed ecologia dei laghi di Bolsena, Bracciano, Trasimeno e Vico: situazione attuale e prevedibili conseguenze derivanti da una loro utilizzazione multipla*. Istituto Italiano di Idrobiologia, Verbania Pallanza: 236 pp.
- Margaritora, F.G. 1992. *Limnology in Latium: the volcanic lakes*. Mem. Ist. ital. Idrobiol., 50: 319-336.
- Ambrosetti W., Barbanti L., Sala N. 2003. *Residence time and physical processes in lakes*. J. Limnol., 62(Suppl. 1): 1-15.
- Margaritora F., Bazzanti M., Ferrara O., Mastrantuono L., Seminara M., Vagaggini D. 2003. *Classification of the ecological status of volcanic lakes in Central Italy*. J. Limnol., 62(Suppl. 1): 49-59.
- Rosario Mosello R., Arisci S., Bruni P. 2004. *Lake Bolsena (Central Italy): an updating study on its water chemistry*. J. Limnol., 63(1): 1-12.

⁶ Un aumento della concentrazione di TP di 1 µg/l corrisponde a un aumento della massa di fosforo nel lago di 9.2 tonnellate. Vogliamo solo citare i due esempi più eclatanti:

- dal 22/02/2016 al 20/02/2017, la concentrazione TP_{mp} diminuisce da 33 µg/l a 7.8 µg/l, quindi di 240 tonnellate di fosforo (0.7 tonnellate al giorno);
- dal 10/05/2021 al 23/06/2021, la concentrazione TP_{mp} diminuisce da 15.2 µg/l a 6.8 µg/l, quindi di 77 tonnellate di fosforo (1.8 tonnellate al giorno);
- dal 11/12/2023 al 19/02/2024, la concentrazione TP_{mp} aumenta da 5.3 µg/l a 25.9 µg/l, quindi di 190 tonnellate di fosforo (2.7 tonnellate al giorno);

⁷ Sonda multiparametrica Hydrolab MS5.

⁸ Moss et al. parlano di un "attacco congiunto - Allied Attack": Brian Moss, Sarian Kosten, Mariana Meerhoff, Richard W. Battarbee, Erik Jeppesen, Néstor Mazzeo, Karl Havens, Gissell Lacerot, Zhengwen Liu, Luc De Meester, Hans Paerl & Marten Scheffer (2011): *Allied attack: climate change and eutrophication*, *Inland Waters*, 1:2, 101-105, DOI: 10.5268/IW-1.2.359.

⁹ Istituto Italiano di Idrobiologia Pallanza. *Limnologia ed ecologia dei laghi di Bolsena, Bracciano, Trasimeno e Vico: Situazione attuale e prevedibili conseguenze derivanti da una loro utilizzazione multipla*. Rapporto Finale Giugno 1971, pp. 115-121.

¹⁰ L'ultimo bilancio idrico risale al 2003.

¹¹ Il tempo di ricambio del lago è aumentato da 120 anni nel 1967 a più di 300 anni attualmente. Con il deflusso minimo autorizzato dal lago di $= 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, il fiume Marta porta via con sé 15.7 milioni di m^3 all'anno, e quindi circa 240 kg di fosforo, il che causa una diminuzione della concentrazione di TP di $0,03 \text{ }\mu\text{g/l}$.

¹² La tabella accessibile dalla pagina <https://www.arpalazio.it/web/guest/ambiente/acqua/dati-acqua>,

¹³ Da una comunicazione del dirigente dell'ARPA M. de Foche (mail del 24 ottobre 2024) sappiamo che “[...] *gli EQB non si discostano significativamente dallo stato di qualità [cioè buono ?] suggerito dagli indicatori chimico-fisici.*”

Nella tabella accessibile dalla pagina <https://www.arpalazio.it/web/guest/ambiente/acqua/dati-acqua>, appaiono soltanto gli EQB “Fitoplancton” e “Macrophyte laghi vulcanici”, per i quali sembra sia ancora in corso la calibrazione:

“In questo triennio è stato applicato per la prima volta l'indice VL-MMI (Volcanic Lakes Multimetric Macrophyte Index) basato sullo studio delle macrofite dei laghi vulcanici ed è stato affinato l'aspetto tassonomico per curare l'applicazione dell'indice IPAM “Metodo italiano di valutazione del fitoplancton” per cui è in corso la calibrazione per i laghi vulcanici dell'Italia centrale. Al termine di questi sei anni verrà effettuata la valutazione definitiva dello stato ecologico e dello stato chimico. Si ricorda, infine, che la frequenza e la scelta dei parametri da rilevare, sia biologici che chimici, è stratificata su base triennale per la rete di monitoraggio operativo e su base sessennale per la rete di monitoraggio sorveglianza.” Quali valori degli indicatori chimico-fisici saranno usati per la calibrazione?

¹⁴ Gabriele Tartari, Michela Rogora, Rosario Mosello: *Controlli di qualità analitica e analisi di fosforo reattivo e totale presso il laboratorio di idrochimica della sezione di Verbania dell'Istituto di ricerca sulle acque (CNR IRSA)*, 2023.

¹⁵ L. Barbanti, A. Carollo e A. Calderoli: *Batimetria Lago Bolsena*. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 20 (1966), e L. Barbanti, A. Carollo e A. Calderoli: *Carta Batimetrica del Lago di Bolsena*, Istituto Italiano di Idrobiologia di Pallanza (1965).

¹⁶ Protocollo applicato per la prima volta a primavera 2025.