

## ***Alcuni modelli matematici nella tutela della risorsa acqua***

**Nicoletta Sala<sup>1</sup> - Walter Ambrosetti<sup>2</sup>**

### ***Riassunto***

*Lo scopo di questo articolo è di descrivere in che modo la matematica possa essere d'aiuto nello studio di fenomeni strettamente connessi al controllo e alla tutela della risorsa acqua. Si farà riferimento a laghi situati nel territorio sud-alpino. In questo territorio vi è infatti la presenza di grandi laghi profondi che, con un volume d'acqua di 125 km<sup>3</sup>, costituiscono circa l'80% dell'acqua dolce invasata in Italia (di cui il 70% nei laghi Maggiore, Como e Garda). Ognuno di questi bacini lacustri è un ecosistema a se stante che può considerarsi composto da un numero di variabili derivanti dalle caratteristiche climatiche (idrogeologiche, pedologiche, biogeochimiche del suo bacino imbrifero), dall'uso del territorio nel quale esso è inserito, dalla sua morfometria, eccetera. La ricerca di opportuni modelli matematici che possano simulare in modo corretto i fenomeni fisici in atto nei laghi, può aiutare a gestire in modo corretto la risorsa acqua.*

**Keyword:** *Modelli matematici, Mescolamento, Tempo di Rinnovo.*

### ***Abstract***

*The aim of this paper is to describe how the mathematics can help the study of the phenomena connected to the control and the manage of the water resource (in particular located in the sub-alpine zone). In this territory there is the presence of the 80% of the water in Italy (the 70% is in the Lakes Maggiore, Como and Garda). These basins are ecosystems composed by a large number of variables (e.g., climatic, hydro-geological, the use of the territory where the basin is inserted, morphometric characteristics, etc.). To research the correct mathematical models that describe physics phenomena present in the lakes, it can help us to manage correctly the water resource.*

---

<sup>1</sup> Accademia di Architettura, Mendrisio, Università della Svizzera italiana, E-mail: [nsala@arch.unisi.ch](mailto:nsala@arch.unisi.ch).

<sup>2</sup> CNR-Istituto per lo Studio degli Ecosistemi (I.S.E), Verbania. E-mail: [w.ambrosetti@ise.cnr.it](mailto:w.ambrosetti@ise.cnr.it).

## **1. Introduzione**

Fino a non molti anni fa era impensabile pretendere di giungere a un qualsiasi tipo di generalizzazione nello studio dei fenomeni di idrodinamica lacustre, in quanto ogni lago è diverso dall'altro. Ora ciò è in parte ancora valido per quanto riguarda l'aspetto chimico e biologico, la limnologia fisica consente invece, dopo quanto visto in questo ultimo decennio, di affrontare comparativamente alcune problematiche che riguardano specifici meccanismi e che permettono di raggruppare le peculiarità dei singoli bacini entro schemi ripetibili o soggetti, in ogni caso, a variazioni ben misurabili. Le problematiche che possono essere inserite in tale schema per i laghi profondi sono quelle che riguardano l'ossigenazione delle acque, a sua volta dipendente dal mescolamento verticale tardo invernale e dall'inserimento di acqua di provenienza dai tributari, l'immagazzinamento, la cessione ed il trasporto di calore lungo la verticale del lago, soggetti a loro volta alle particolari condizioni meteorologiche che si instaurano sull'areale lacustre. Queste condizioni negli ultimi anni si sono ulteriormente modificate a causa dei mutamenti del clima in atto sulla Terra e hanno notevolmente influito sia sui fenomeni di piena, di accumulo di calore e nei tempi di ricambio del lago. Lo scopo di questo articolo è di illustrare alcuni modelli matematici elaborati per determinare il mescolamento dei laghi e il loro tempo di ricambio (detto anche tempo di residenza e tempo di rinnovo).

## **2. Mescolamento verticale**

La vita di un lago è sostenuta dalla presenza di ossigeno nelle sue acque soprattutto per quei processi di natura chimica e biologica che si svolgono all'interno di essi. Il meccanismo classico, comune a tutti i bacini profondi situati alle nostre latitudini, che dovrebbe provvedere al rifornimento di  $O_2$  entro la massa lacustre, è il mescolamento verticale. Esso inizia in autunno, quando la quantità di calore assorbita dalla massa d'acqua è inferiore a quella ceduta e il bilancio termico diventa negativo. Ha così inizio la fase di destratificazione, che prende avvio, per moti convettivi, dalla superficie del lago e che può portare al completo mescolamento delle sue acque al termine dell'inverno limnologico.

La profondità raggiunta dalla circolazione verticale assume un ruolo molto importante per molti processi che avvengono in lago; ad esempio nel riciclo dei nutrienti, il quale a sua volta controlla sia la produzione primaria che quella secondaria che stanno alla base della dinamica dell'eutrofizzazione, nel trasporto di ossigeno in profondità utile nella demolizione della produzione organica e di altri meccanismi più prettamente fisici. Quando si ha il raffreddamento superficiale (durante la notte) o in autunno si forma

uno strato superficiale (freddo) che diventa instabile dal punto di vista del galleggiamento e rilascia delle plume fredde turbolente che penetrano nell'epilimnio<sup>3</sup> e che giunte a livello del salto termico incontrano la resistenza della stratificazione. Questo processo provoca un mescolamento del solo epilimnio e un suo sprofondamento può procedere solo per inglobamento dell'acqua alla base dell'epilimnio entro lo strato mescolato turbolento. Ciò richiede un certo lavoro che viene compiuto da una parte dell'energia cinetica turbolenta che si sviluppa in lago la quale può chiudersi in moti convettivi così da approfondire lo strato mescolato. Il motore di questo meccanismo è fornito dall'energia potenziale presente nel lago che diminuisce in modo direttamente proporzionale alla perdita di calore in superficie. Quando l'acqua superficiale si raffredda si instaura un circuito con trasferimento di energia in superficie che entra nel bilancio di energia cinetica turbolenta, che diventa a sua volta disponibile per l'erosione del termoclinio come energia di convezione turbolenta penetrativa. E' interessante notare che in questo processo l'effetto meccanico viene prodotto durante il raffreddamento e non durante il riscaldamento.

Si deve però tenere presente che raramente il processo di raffreddamento si verifica senza lo stress a livello del salto termico provocato dal vento la cui azione si esplica in rapporto alla sua intensità.

Ora, senza addentrarci nei movimenti che produce il vento nell'erosione dell'ipolimnio<sup>4</sup> superficiale, a seconda se è debole o intenso, si sottolinea soltanto che di tutto il lavoro fatto dal vento, in parte viene dissipato internamente e *in* parte usato per approfondire l'epilimnio che procede per inglobamento dell'acqua dell'ipolimnio sino a giungere sul fondo del lago.

Quando questo processo raggiunge il fondo del lago si ha la completa ossigenazione della massa lacustre e la formazione di "acqua nuova" che può durare sino al successivo inverno limnologico. Il fatto è che nei laghi profondi (che superano i 150 metri) questo processo il più delle volte non giunge sul fondo, per questo vengono definiti olo-oligomittici. In figura 1 sono illustrate le profondità del mescolamento verticale tardo-invernale nel Lago Maggiore (1951-2002).

---

<sup>3</sup> L'epilimnio è lo strato d'acqua superficiale, di profondità variabile da lago a lago, che durante la fase di stratificazione estiva presenta una temperatura uniforme.

<sup>4</sup> L'ipolimnio è lo strato d'acqua più profondo e freddo di un lago con variazione termiche contenute, sottostante il salto termico (termoclinio)

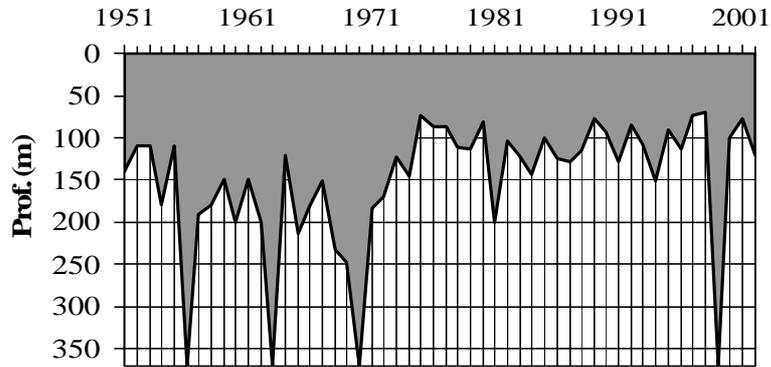


Fig. 1 - Profondità del mescolamento verticale tardo-invernale nel Lago Maggiore (1951-2002)

## 2. Altri meccanismi di ossigenazione

Altri meccanismi sono in grado di ossigenare le acque profonde dei laghi e sopperire al protrarsi di più anni consecutivi di circolazioni verticali solo parziali impedendo così il degenerare delle loro acque verso stati meromittici. Uno di questi è quello provocato dalla forza del vento, che in particolari condizioni di intensità e direzione, determina una spinta delle acque superficiali fino all'estremità sottovento del lago, costringendole ad infossarsi e per continuità a scorrere sul fondo in direzione opposta fino all'estremità sopravvento dove avviene il richiamo in superficie (figura 2). Un altro meccanismo di ossigenazione delle acque profonde è conseguente al fatto che i grandi laghi sud-alpini, posti al margine di catene montuose molto elevate, possono ricevere acque fluviali fredde, ricche di  $O_2$ , derivanti dallo scioglimento primaverile delle nevi e dei ghiacciai le quali nel loro transito dal punto di immissione all'emissario, subiscono uno sprofondamento sino a raggiungere le massime profondità. Vi sono inoltre in occasioni di grandi piene, cospicue immissioni di acque dal bacino che possono inserirsi a diversi livelli a seconda della loro densità che però possono provocare anche diminuzione di ossigeno entro la colonna in quanto ricchi di sostanza organica che deve essere demolita. Un esempio è quello della piena del Fiume Toce del 1978, che ha interessato il Lago Maggiore, le cui acque si sono inserite entro due livelli preferenziali, uno superficiale ed uno profondo.

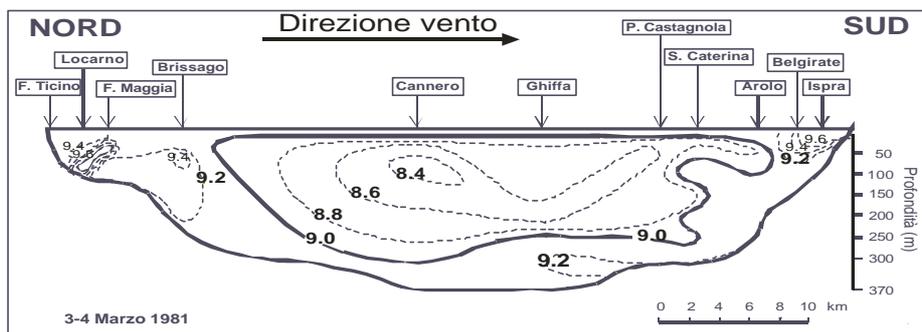


Fig.2. Distribuzione della concentrazione di ossigeno nell'intero bacino del Lago Maggiore (rilevamenti effettuati dei giorni 3 e 4 Marzo 1981)

Il cambiamento climatico che in atto sulla Terra ancora da definire nella sua completa dinamica, sta però determinando un aumento della temperatura atmosferica. Le grandi masse d'acqua lacustri di conseguenza vedono anch'esse alterati i rapporti tra le varie forme di energia di scambio sia all'interfaccia acqua-atmosfera sia attraverso gli afflussi dai tributari con ripercussioni su tutta la colonna d'acqua e variazioni in alcuni degli aspetti dell'idrodinamica interna e fino a provocare alterazioni della qualità dell'acqua. Dai dati pluriennali (1963-2003) di temperatura dell'acqua del Lago Maggiore è stata calcolata, con cadenza mensile, la distribuzione verticale metro per metro del contenuto di calore; il suo andamento mensile entro la colonna, il cui trend è diretto verso un aumento generale è rappresentato in figura 3.

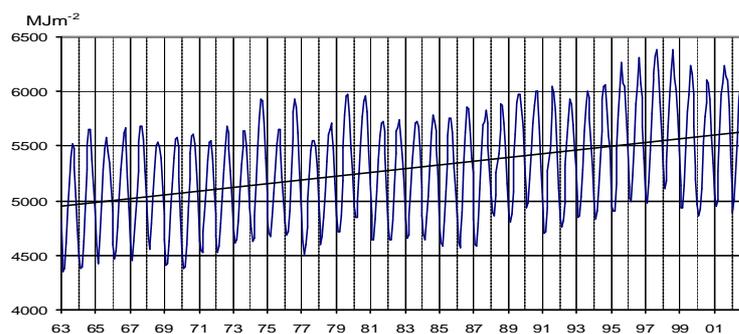


Fig. 3. Andamento del contenuto mensile di calore totale entro la colonna d'acqua del Lago Maggiore dal 1963 al febbraio 2003

E' proprio il cambiamento climatico attualmente in atto ad assumere il ruolo di “nuovo nemico” nella gestione del territorio (Ambrosetti, Barbanti e Sala, 2003).

Ciò era stato sottolineato anche da ricerche condotte dall'Università del Colorado (1998), le quali hanno evidenziato che i cambiamenti climatici sarebbero stati particolarmente evidenti alle latitudini da  $45^{\circ}\text{N}$  a  $70^{\circ}\text{N}$ , che comprendono quindi anche la fascia Alpina. Le conseguenze sull'ambiente dovrebbero consistere in un aumento delle temperature atmosferiche e quindi un prevedibile anticipo ed incremento dello scioglimento primaverile delle

nevi, aumento delle valanghe, delle frane e delle erosioni, maggior frequenza delle inondazioni, indebolimento delle aree boschive, ecc.

Più in generale ci sarà maggiore energia che, a livello climatico, favorirà un'esasperazione dei fenomeni estremi: siccità da una parte e forti precipitazioni, con alluvioni, dall'altra.

In queste modifiche vengono anche coinvolti due parametri molto importanti per la “salute” delle risorse acqua che sono il mescolamento e il tempo di rinnovo delle acque dei laghi. I limnologi si rendono conto che i modelli elaborati in precedenza non sono più adatti per potere descrivere delle grandezze che sono influenzate da sistemi dinamici e da modifiche in atto negli ecosistemi. Per questi motivi gli studi sono orientati all'elaborazione di nuovi modelli matematici che, per potere essere corretti, devono tenere conto delle modifiche in atto.

#### **4. Un modello matematico per il mescolamento dei laghi**

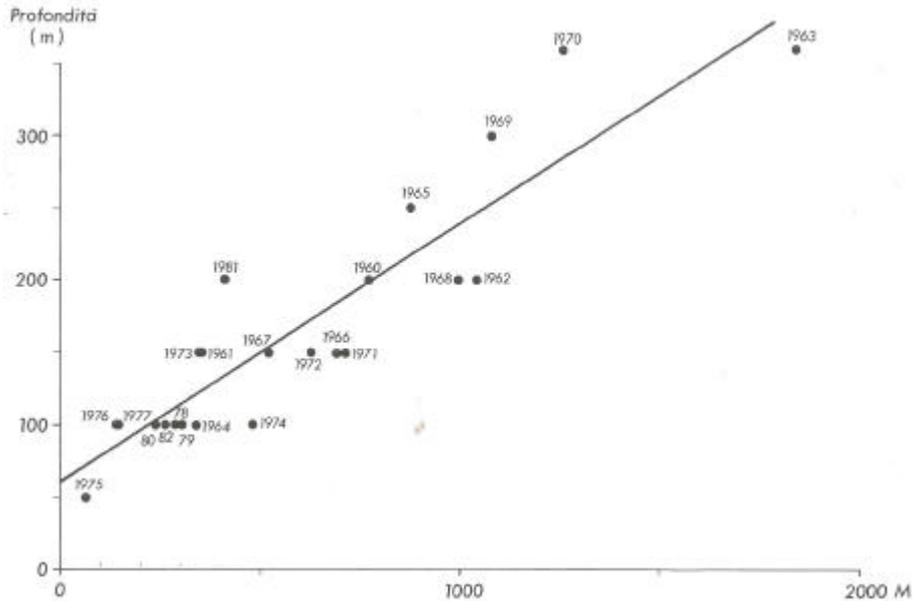
I limnologi, attraverso l'osservazione di dati meteorologici, hanno cercato di stabilire dei modelli matematici che permettessero di determinare la profondità raggiunta dal mescolamento invernale.

Ambrosetti e Barbanti (1979) hanno proposto un modello che prende in considerazione il vento, la radiazione solare e la differenza tra la temperatura dell'acqua e dell'aria, che esprime un parametro  $M$  e che è sintetizzato, per il Lago Maggiore, nell'equazione (2).

Il modello è stato elaborato eseguendo una regressione lineare tra i dati effettivi di profondità di mescolamento, valutati sulla base dei dati termici e chimici e il parametro  $M$  (figura 4). L'equazione (1) sintetizza la legge che esprime la regressione lineare tra la profondità di mescolamento effettiva e il parametro  $M$ .

Questa legge è stata verificata con le serie storiche dei dati meteorologici dal 1951 al 1997 e i risultati ottenuti coincidono con quelli rilevati in situ, mettendo quindi in evidenza l'affidabilità del modello matematico.

Fig. 4. Retta di regressione tra il parametro  $M$  e la profondità di mescolamento determinata sperimentalmente



La profondità di mescolamento (PM) è determinata dalla seguente equazione:

$$PM = 0,17 M + 63,06 \quad (1)$$

Il parametro M di mescolamento è calcolato applicando la relazione:

$$M = \frac{(\sum V)^{1,5} \cdot (\sum \Delta T)^2}{\sum R} \quad (2)$$

Dove:

- ? V è la sommatoria giornaliera delle quantità di vento filato maggiore di 50 km giorno
- ? ? T è la sommatoria delle differenze tra le temperature medie giornaliere dell'acqua e dell'aria (°C)
- ? R è la sommatoria dei valori giornalieri di radiazione solare ( cal·cm<sup>-2</sup>)

I quattro parametri sono stati valutati per i soli tre mesi invernali e ad ognuno di essi è stato attribuito un diverso coefficiente: 0,5 in Dicembre, 0,7 in Gennaio e 1 in Febbraio.

### **5. Un modello matematico per il tempo di rinnovo**

La valutazione del tempo medio di rinnovo dell'acqua entro una cuvetta lacustre rappresenta un problema di grande importanza per la limnologia teorica ed applicata: è evidente infatti che soltanto sulla base di una sua valutazione in termini reali si sarà in grado di conoscere, per esempio, le proporzioni e la dinamica delle sostanze chimiche disciolte nell'acqua, nonché le velocità dei processi di concentrazione, diluizione e di permanenza di sostanze entro il lago e, conseguentemente, le implicazioni sulla qualità dell'acqua. Nel passato si è fatto per lo più ricorso al cosiddetto “tempo teorico di rinnovo” delle acque lacustri, definito dal rapporto fra il volume di un lago e la portata del suo emissario, da considerare, comunque, come il primo approccio verso una reale valutazione di questo parametro. Un'ipotesi di questo tipo presuppone però che il lago sia configurato alla stregua di un tratto fluviale, a sezione ampia, e con una morfologia molto regolare, entro il quale si sviluppi un trasporto liquido più o meno uniforme (flusso laminare) e senza che in esso si riconosca quel complesso di fenomeni fisici, che tanta parte hanno nel ciclo annuale dei bacini lacustri, quale, per esempio, la stratificazione termica. Si tratta però di un approccio molto approssimato, ma pur sempre utile per una prima indicazione sulla vivacità idrologica di un bacino lacustre. Basti pensare all'utilizzo che ne fa Vollenweider (1975) nei suoi modelli di classificazione trofica dei laghi.

In Tab.1 sono riportati, per i principali bacini lacustri italiani, i tempi teorici di rinnovo delle acque: essi dipendono, in massima parte, dalle caratteristiche morfometriche delle singole cuvette e dei rispettivi bacini imbriferi, nonché dall'entità delle precipitazioni sull'intero areale.

Pur nella sua semplicità di formulazione, il tempo teorico mostra una variabilità assai accentuata fra i valori riscontrati nei singoli laghi dovuta proprio alle diversità delle caratteristiche morfologiche proprie e dei rispettivi areali imbriferi nonché al loro inserimento in zone con differenti situazioni idro-meteorologiche, con particolare riferimento alle precipitazioni.

I laghi presentano, nel corso del ciclo annuale, strutture termiche verticali differenziate che esitano, a seconda delle condizioni geografiche, climatiche e morfologiche in cui sono collocati, in uno o più periodi di stratificazione termica verticale durante i quali lo spessore dello strato d'acqua interessato al ricambio idrologico, cioè quello mescolato in superficie, rappresenta soltanto una porzione, percentualmente più o meno importante, dell'intera massa d'acqua lacustre.

Tab.1 Caratteristiche morfometriche e idrologiche dei maggiori laghi italiani.

<i>Lago</i>	<i>Area del lago</i>	<i>Z<sub>max</sub></i>	<i>Z<sub>media</sub></i>	<i>Volume</i>	<i>Area bacino</i>	<i>Portata media in emissario</i>	<i>Afflusso meteo</i>	<i>Deflusso</i>	<i>Coefficiente di deflusso</i>
	<i>km<sup>2</sup></i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>10<sup>9</sup>m<sup>3</sup></i>	<i>km<sup>2</sup></i>	<i>m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup></i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	
<b><i>Garda</i></b>	367.9	350	133.3	49.03	2350	59.5	1199	795	0.66
<b><i>Maggiore</i></b>	212.2	370	177	37.1	6599	297	1703	1422	0.83
<b><i>Como</i></b>	145.9	410	154	22.5	4572	158	1295	1094	0.84
<b><i>Trasimeno</i></b>	124.3	6	4	0.59	376	86	837	218	0.26
<b><i>Bolsena</i></b>	113.6	151	81	9.2	273	242	980	672	0.68
<b><i>Iseo</i></b>	60.9	258	124	7.55	1842	59.4	1220	1018	0.83
<b><i>Bracciano</i></b>	57	165	88.6	5.05	147	1.17	1122	647	0.58
<b><i>Lugano</i></b>	48.9	288	134	5.86	615	25	1676	1280	0.76
<b><i>Orta</i></b>	18.1	143	69.4	1.25	116	4.64	1825	1265	0.69
<b><i>Varese</i></b>	14.9	26	11	0.16	110	2.87	1454	808	0.56
<b><i>Vico</i></b>	12.1	49	21.5	0.26	41	0.49	1316	1271	0.96

Altri fattori ancora condizionano l'insieme idraulico fiume-lago-fiume e sono il sistema di correnti e gli altri movimenti che si instaurano nel lago, la topografia di fondo e la morfologia della cuvetta caratterizzata, assai spesso, da una pronunciata irregolarità per la presenza di baie o di bracci laterali che vengono interessati solo parzialmente dalla dinamica lacustre generale del bacino. Tutte queste considerazioni hanno stimolato la ricerca verso la formulazione di tempi di rinnovo più realistici.

I primi approcci sono stati condotti tanto con metodi sperimentali quanto da un punto di vista puramente teorico. Fra le soluzioni sperimentali il tentativo italiano più noto è quello proposto per il Lago Maggiore da Tonolli (Piontelli & Tonolli, 1964) che ammette come ipotesi semplificatrice, che "l'emunzione" da parte dell'emissario si attui indifferentemente entro tutto lo spessore degli strati che acquisiscono, durante il ciclo stagionale, la stessa temperatura delle acque superficiali". Le conclusioni cui Tonolli pervenne, dopo aver analizzato i cicli termici annuali e pluriennali delle acque del lago, furono che il tempo di permanenza medio dell'acqua nel Lago Maggiore è

di circa 14,5 anni rispetto ai 4 anni teorici. In questo caso il modello elaborato era corretto.

### **5.1 I modelli matematici elaborati**

Tra i modelli matematici elaborati per alcuni bacini italiani si ricordano quello di Biffi (1963), di Piontelli (Piontelli & Tonolli, 1964) e quello di Vollenweider (1964); tutti hanno in comune l'ipotesi che la quantità di sostanze presente nell'acqua di un lago sia funzione dell'apporto, del consumo e della perdita della sostanza stessa. Interessanti anche le conclusioni di Rainey (1967) che ha applicato ai Grandi Laghi americano-canadesi del sistema del S. Lorenzo un modello matematico basato esclusivamente su considerazioni di carattere idrologico.

Vollenweider (1969), riprendendo in considerazione quanto già esposto da Tonolli sulle caratteristiche termiche dell'acqua del Lago Maggiore, al fine di introdurre anche le loro variazioni nel tempo in una formulazione matematica più perfezionata, propone, accanto al concetto di “*emunzione teorica*”, anche quello di “*emunzione effettiva*” che viene espressa da un coefficiente, dimensionalmente uguale all'inverso del tempo, per il calcolo del quale è necessaria la conoscenza del volume dell’“*epilimnio medio*”, vale a dire di quel volume d'acqua che nel corso dell'anno può essere ricambiato in virtù della sua omogeneità termica.

Il quadro generale emerso dai primi approcci è quindi già complesso, con fenomeni di natura assai diversi e con sinergie diffuse, ognuno dei quali da valutare sulla base delle quantità energetiche in grado di attivarli e, successivamente, di dissiparli: un complesso di problematiche, riguardanti quindi l'interconnessione tra lago e gli ambienti circostanti e, in particolare, gli scambi di energia calorica, meccanica e di massa con l'atmosfera sovrastante e con l'areale versante.

Passi successivi prevedono una linea che porti verso un modello descrittivo attraverso un'analisi di quelli già applicati e che tenga conto di altri parametri oltre a quelli citati, anche se una schematizzazione per i laghi non è fattibile in quanto le differenti condizioni geologiche, morfologiche e climatiche non permettono la costruzione di un modello che si adatti a tutti i bacini. Ad esempio, notevoli sono le differenze esistenti tra due laghi, uno di origine vulcanica (ad esempio il Bolsena) e uno di origine alpina (come ad esempio il Maggiore). Queste differenze si possono identificare nel rapporto tra le rispettive superfici del lago e del bacino imbrifero, nell'inserimento in situazioni climatiche diverse (precipitazioni, radiazione solare, vento ecc.), nella morfologia della conca lacustre (circolare nel Bolsena, allungata nel Maggiore), nell'esposizione al vento per cui si

verifica un diverso sprofondamento del termoclinio durante il periodo estivo, nell'influenza dei tributari, nei flussi attraversanti e nei sistemi di correnti e sesse che nel lago laziale sono più pronunciate. In base a queste considerazioni risulta infatti che nel Bolsena il ruolo più importanti è assunto dalla termica in senso lato mentre nel Maggiore è preponderante la situazione idrologica.

Carmack et al. (1986) hanno analizzato la stagionalità di un lago profondo e temperato (il Lago Kootenay, British Columbia, Canada), cercando di evidenziare i meccanismi che influenzano la circolazione e la distribuzione della massa d'acqua e suddividendo l'osservazione in sei periodi. La conoscenza di questi meccanismi ha aiutato a comprendere la variabilità spazio-tempo che permette di valutare il rinnovo delle acque e aiuta inoltre a comprendere il comportamento di quel lago e dell'ecosistema ad esso associato. In altri studi, soprattutto nei laghi con un elevato tempo di rinnovo, si è tenuto conto di variabili quali il vento e lo scambio termico locale (Sundaram & Rehm, 1973; Mortimer, 1974; Holland & Simmons, 1978). Altri lavori hanno invece preso in considerazione dei modelli numerici per laghi e bacini (Tucker & Green, 1977; Imberger et al., 1984).

### **5.2 I modelli recenti del tempo di rinnovo**

Studi ancora più recenti riguardano la determinazione del tempo di rinnovo attraverso delle modellazioni numeriche 3D (Rueda, 2001). Rueda fa riferimento a esperimenti e rilevazioni condotte su Little Sodus Bay (Lago Ontario, Stati Uniti), una delle sette baie proposte nel suo studio. Gli esperimenti numerici consistevano nella rilevazione di un tracciatore (di massa  $m$ , espressa in Kg) in una data posizione e simulando l'evoluzione nel tempo del tracciatore. Il tempo di rinnovo medio è stato calcolato con l'equazione (3):

$$t_g = - \frac{1}{m_0} \int_0^{\infty} \frac{dm}{dt} t dt = \frac{1}{m_0} \int_0^{\infty} m(t) dt \quad (3)$$

Le simulazioni sono state estese per cinque mesi e sono state realizzate con un accurato sistema per fenomeni idrodinamici lacustri che tiene conto dei moti caotici e turbolenti e, in particolare, permette di utilizzare equazioni di Navier-Stokes e incorpora una forma di schema di Mellor-Yamada per sistemi turbolenti (Smith, 1997; Rueda 2001; Rueda et al., 2002).

### **5.3 Verso un modello più realistico del tempo di rinnovo**

Per giungere a definizioni più realistiche dei tempi di rinnovo delle acque lacustri si deve tenere conto di un quadro sufficientemente preciso e completo dell'insieme delle condizioni meteorologiche e dei processi idrodinamici interni al lago, a loro volta condizionati dalla morfologia della cuvetta lacustre e del territorio.

Con riferimento particolare ai laghi temperati, Ambrosetti & Barbanti (1988) li hanno così schematizzati:

- a) l'insieme delle componenti caloriche del lago alle quali si deve, con il riscaldamento estivo, l'effetto stabilizzante degli strati superficiali (stratificazione termica) nonché, con la destratificazione, quello destabilizzante invernale;
- b) la forza del vento che trasferisce parte del suo momento alla massa d'acqua dando vita, sia in superficie che in profondità, ad un complesso di movimenti con produzione di energia cinetica;
- c) l'afflusso di acqua convogliata al lago dai tributari, nonché il deflusso attraverso l'emissario, considerati non solo dal punto di vista idrologico, ma anche per i loro effetti cinetici.

In realtà i singoli processi interagiscono tra di loro, spesso in contrapposizione l'un l'altro: la formazione dello strato mescolato superficiale, per esempio, altro non è che l'effetto combinato della forza di galleggiamento conseguente al riscaldamento degli strati più superficiali (epilimnio) con i moti d'acqua innescati dal vento che tendono a portare il calore in profondità. Vi è un'azione contemporanea e sinergica delle varie forze esterne che però non ci deve esimere dall'analizzare separatamente queste stesse forze che, nel loro insieme, sono le maggiori responsabili dell'idrodinamica lacustre.

### **6. Conclusioni**

Tutti i risultati ottenuti dalle ricerche intraprese nel campo delle modellazioni matematiche applicate al calcolo del mescolamento e del tempo di rinnovo mostrano che il cambiamento climatico in atto assume il ruolo di primaria importanza nella gestione dei corpi d'acqua, modificando gli equilibri atmosfera-lago e fiumi-lago. In questo modo risultano alterati anche i rapporti interni al lago stesso con effetti non solo sull'ecosistema lago ma anche sull'intera area circostante, soprattutto con un'esasperazione dei fenomeni estremi (ad esempio le esondazioni). I segnali sono già presenti e ben documentati anche se la loro frequenza è ancora tale che potrebbero rientrare in una naturale variabilità climatica: resta il fatto che se le spinte al

disequilibrio atmosferico prevarranno allora i risultati che ne deriveranno potrebbero essere catastrofici. Per quanto riguarda più precisamente l'argomento di questo nostro lavoro, si sottolinea che i tempi di rinnovo delle acque nei laghi dovrebbero essere utilizzati con maggiore precisione, in rapporto soprattutto alla loro indiscussa incidenza su molti dei processi chimici e biologici riguardanti l'ecosistema. E' tuttavia difficile dare indicazioni circa le modalità generali da seguire in tale determinazione, e ciò per l'estrema complessità del comparto fisico, con variabili assai numerose e sinergismi non sempre facili da decifrare (Ambrosetti, Barbanti & Sala, 2003). Nel prossimo futuro, nonostante tutte le difficoltà che incontreremo, sarà necessario approfondire le dinamiche che investono un ecosistema complesso come è un lago alpino profondo, elaborando un modello matematico del tempo di rinnovo che sarà prima applicato al lago Maggiore (di cui disponiamo di tutte le serie storiche necessarie) e poi generalizzato ai grandi laghi alpini (ad esempio, i laghi di Como e di Garda). Il nostro è solo un piccolo passo, ma che contribuirà a salvaguardare un bene prezioso come l'acqua.

### **Bibliografia**

Ambrosetti, W., Barbanti, L. e Sala, N. (2003). Residence time and physical processes in lakes. *Journal of Limnology*, 62 (Suppl. 1), pp. 1-15.

Ambrosetti, W. e Barbanti, L. (2000). Riscaldamento delle acque profonde nei laghi italiani : un indicatore di cambiamenti climatici. *Acqua & Aria*, n. 4, pp. 65-72.

Ambrosetti, W. e Barbanti, L. (1988). Recenti indagini di limnologia fisica sul Lago Maggiore. *Acqua Aria*. n° 1, pp. 27-38

Ambrosetti, W., L. Barbanti e Rolla, A. (1979). Mescolamento parziale o totale nel Lago Maggiore nell'ultimo trentennio. *Mem. Ist. ital. Idrobiol.*, 37: 197-208.

Biffi, F. (1963). Determinazione del fattore tempo come caratteristica del potere di autodepurazione del Lago d'Orta in relazione ad un inquinamento costante. *Atti Ist. Ven. Sci. Let. Arti*. 121, pp. 131-136.

Carmack, E.C., Wiegand R. C., Daley R. J., Gray C. B. J., Jasper S., e H.Pharo, C. (1986). Mechanisms influencing the circulation and distribution

of water mass in a medium residence – time lake. *Limnol. Oceanogr.*, 31(2), pp. 249 – 265.

Holland, E. e Simmons, T. J. (1978). Wind-induced changes of temperature and currents in lake Costance. *Arch. Meteorol. Geophys. Biol Ser. A* 27: pp. 333-373.

Imberger, J., Hebbert B. e Loh. I. (1978). Dynamics of reservoir of of medium size, *J. of Hydraul. Div. AM. Soc. Civ. Eng.*, 104, 725 – 743.

Mortimer, C.H. (1974). Lake hydrodynamics. *Mitt. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.* 20, pp. 124-197.

Piontelli, R. e Tonolli, V. (1964). Il tempo di residenza delle acque lacustri in relazione ai fenomeni di arricchimento in sostanze immesse, con particolare riguardo al lago Maggiore. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, 17, pp. 247-266

Rainey, R.H. (1967). Estimation of detention period of a lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 155, pp. 1242-1243

Rueda, F.J. (2001). A three-dimensional hydrodynamic and transport model for lake environments. Ph.D. Dissertation, University of California, Davis.

Rueda, F. J., Schladow, S. G. e Palmansson, S.O. (2002). Basin-scale internal wave dynamics during a winter cooling period in a large lake. *Journal of Geophysical Research* (in stampa).

Smith, P. E. (1997). A three-dimensional, finite-difference model for estuarine circulation. Ph.D. Dissertation, University of California, Davis.

Sundaram, T. R. e Rehm, R. G. (1973). The seasonal thermal structure of deep temperature lakes. *Tellus*, 25, pp. 157 – 167.

Tucker, W.A. e Green, A.W. (1977). A time dependent model of the lake-averaged vertical temperature distribution in lakes, *Limnol. Oceanogr.*, 22, pp. 687 – 699.

Vollenweider, R.A. (1969). Möglichkeiten und Grenzen elementare Modellre der stoffbilanz von Seen. *Arch. Hydrobiol.* 66(1), pp. 1-36

Vollenweider, R.A. (1964). Die Beziehung zwischen Einzugsgebiet und Seenhaushalt. *Unpubl. Vortrag an der Deutschen Limnologentagung, Lunz*

### **Biografia autori**

**Walter Ambrosetti** svolge la sua attività come Primo Ricercatore presso l'Istituto per lo Studio degli Ecosistemi (ex Istituto Italiano di Idrobiologia) del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Pallanza (VB), articolandola in diversi settori della limnologia fisica. E' stato responsabile delle ricerche di limnologia fisica nell'Unità di Biologia impegnate nel programma nazionale di ricerche italiane in Antartide. Ha partecipato come responsabile dell'I.S.E. al progetto INTERREG II-Italia-Svizzera 1994-1999 approvato dall'Unione Europea. E' stato segretario dell'Associazione Italiana di Oceanologia e Limnologia (A.I.O.L) e successivamente eletto membro nel Consiglio di Presidenza dell'Associazione. E' autore/coautore di circa 120 lavori scientifici la maggior parte dei quali pubblicati su riviste internazionali.

**Nicoletta Sala** svolge la sua attività didattica e di ricerca presso l'accademia di Architettura di Mendrisio (Università della Svizzera italiana) dove insegna Pensiero matematico e Matematica e Territorio. Si occupa di modellazioni matematiche e di applicazioni della geometria frattale nell'architettura e nel territorio. E' autrice/coautrice di oltre 200 lavori scientifici e di 15 libri (nel campo della matematica, informatica e architettura). E' Co-Editor della rivista scientifica *Chaos and Complexity Letters International* (Nova Science, New York) e Associated Editor della rivista scientifica *International Journal of Distance Education Technologies* (IRMA Group, Philadelphia).