

2. PROFONDITA' DI MESCOLAMENTO E VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RESIDENZA DELLA ACQUE DEL LAGO MAGGIORE

2.1. Profondità di mescolamento

Nel corso del 2012 è continuata, come di consueto, la verifica dell'effettiva profondità dello strato mescolato invernale nel Lago Maggiore attraverso una serie di sopralluoghi nel suo punto di maggior profondità con lo scopo di analizzare la distribuzione verticale, lungo l'intera colonna d'acqua, di alcuni parametri fisici e chimici (temperatura e concentrazioni di ossigeno disciolto, nitrati e silicati). Si è visto che anche quest'ultimo anno, come nei precedenti 42 (Ambrosetti et al., 2010), l'omogeneizzazione verticale delle acque del lago è avvenuta parzialmente, anche se si è raggiunta una profondità di circa 150 m, che è leggermente superiore a quella degli anni più recenti. Questo aspetto idrodinamico è ormai divenuto una regola nelle acque del Lago Maggiore e si tratta di un fatto ormai ampiamente confermato a livello mondiale, che trova la sua causa nella tendenza, manifestatasi negli ultimi decenni, al riscaldamento delle acque lacustri, che nei laghi profondi della zona temperata ha impedito la loro piena circolazione invernale.

Anche le indagini condotte nel 2012 hanno confermato, come già sottolineato nei rapporti annuali precedenti, la scarsa incidenza sulla profondità del mescolamento di alcuni parametri meteorologici come il vento e la temperatura dell'aria. Nonostante in gennaio e febbraio il percorso del vento sia stato leggermente al di sopra della media con 3854 km (rispetto a una media di 3604) e 3994 km (rispetto a una media di 3309 km) e la temperatura media dell'aria invernale sia risultata esattamente uguale a quella degli ultimi 60 anni (3.66°C), con una riduzione solo in febbraio (inferiore di 1.67°C a quella del periodo di confronto), l'energia necessaria a indurre la presenza di moti convettivi capaci di agire dalla superficie al fondo del lago non è stata sufficiente a innescare una piena circolazione delle acque del lago.

Nel 2012 il contenuto di energia totale entro la massa lacustre ha subito nel periodo invernale una leggera diminuzione, con contenuti calorici relativamente bassi in febbraio (4.887 MJ m⁻²), tra l'altro in continua diminuzione dal 2007 (4940 MJ m⁻²). Lo stesso dicasi per l'estate (6044 MJ m⁻² in agosto), con un valore uguale al corrispondente del 2011 (6050 MJ m⁻²) ma molto al di sotto di quello del 2010 (6344 MJ m⁻²) e del 1998 quando con 6.401 MJ m⁻² si è stabilito il massimo assoluto del cinquantennio (Fig. 2.1.1).

E' altrettanto importante rilevare come la quantità di calore contenuta nell'ipolimnio profondo del lago, sede della così detta "memoria climatica" (Ambrosetti & Barbanti, 1999), dopo un periodo in diminuzione dal 2005 al 2007 (di portata simile a quella riscontrata nel 1981) ha ripreso ad aumentare sino al 2010, per poi mantenersi su valori attorno a 1410 MJ m⁻² nei due anni successivi con una punta di 1421 MJ m⁻² a settembre del 2012 (Fig. 2.1.2.).

Per quanto riguarda la profondità di mescolamento per moti convettivi, nell'inverno 2011-2012 si sono raggiunti circa 150 metri. Questo è visibile anche in figura. 2.1.3. dove è rappresentata la distribuzione verticale della concentrazione di O₂ misurata dalla superficie al fondo del lago: l'isolinea di 8.0 mg l⁻¹ si mantiene per tutto l'anno tra 100 e 150 metri di profondità così come quella quotata a 7.5 mg l⁻¹ attorno a -150 m.

Nella zona profonda, sotto i 250 m, la concentrazione di O₂ sino ad ottobre si mantiene tra 6.5 e 7 mg l⁻¹ con una leggera diminuzione sino a 6.3 mg l⁻¹ in novembre, evidenziando così la mancanza di inserimenti nell'ipolimnio profondo di acqua fredda sia di origine litorale che per moti convettivi.

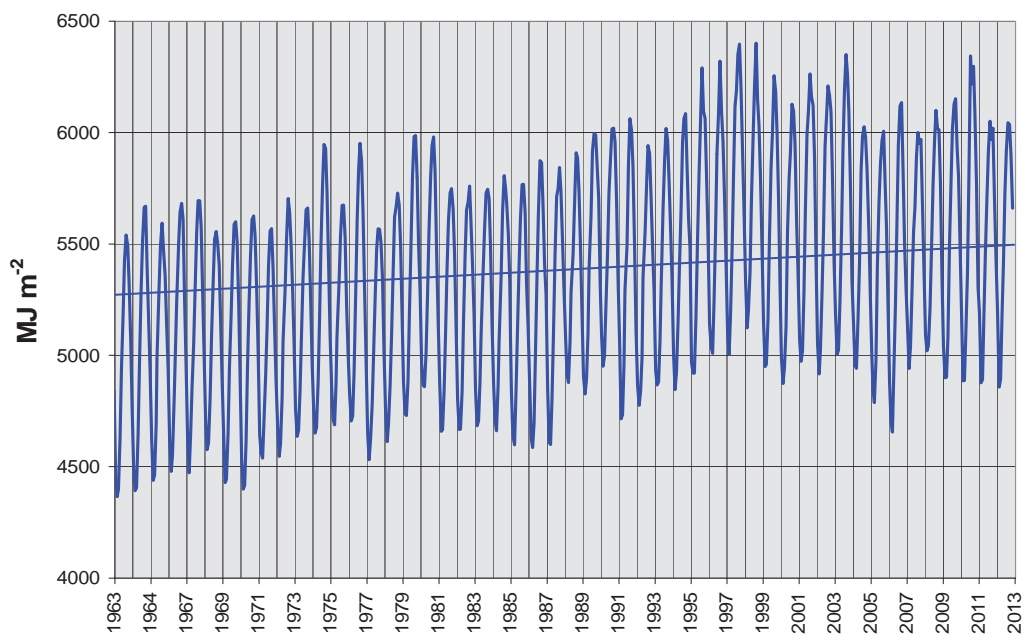


Fig. 2.1.1. Andamento mensile del contenuto di calore nella colonna d'acqua del Lago Maggiore nel periodo 1963-2012

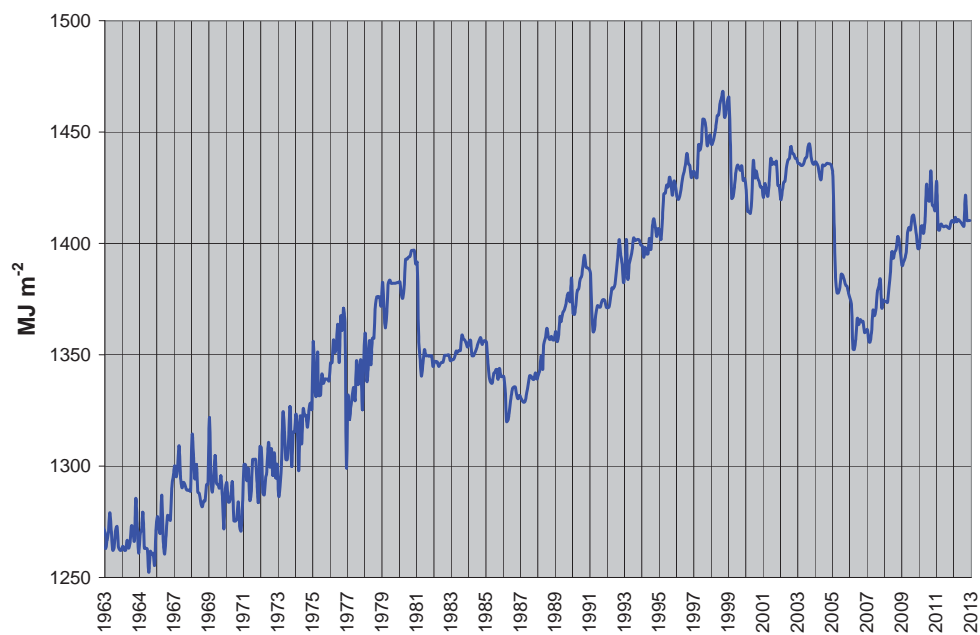


Fig. 2.1.2. Andamento della memoria climatica nel Lago Maggiore nel periodo 1963-2012.

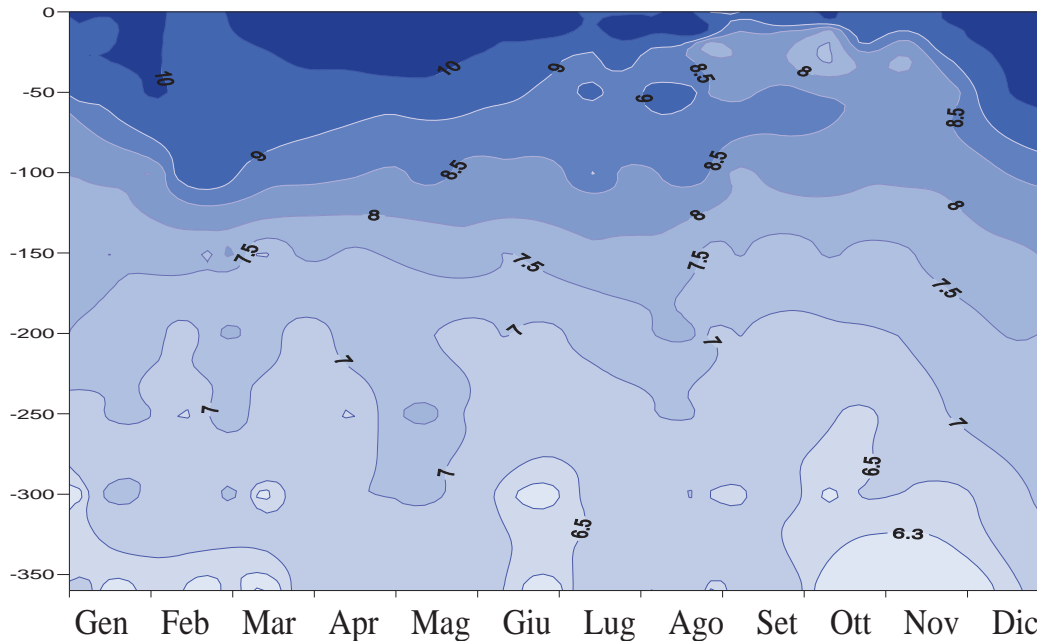


Fig. 2.1.3. Distribuzione verticale della concentrazione di O_2 ($mg\ l^{-1}$) nell'anno 2012

Un'ulteriore conferma della limitata profondità raggiunta dal mescolamento nel 2012 viene fornita dalla distribuzione verticale della temperatura dell'acqua lacustre, che rileva nei mesi invernali la presenza, tra 140 e 160 m, di modesti salti termici (pochi decimi di grado) sufficienti però a individuare una parziale circolazione.

Anche i valori della stabilità termica invernale, misurata lungo la colonna d'acqua sulla base dei dati medi mensili, confermano un mescolamento limitato a circa 150 m di profondità. I relativi profili verticali (Fig. 2.1.4.) mostrano una decisa resistenza ai moti convettivi che a gennaio 2012 si presenta attorno a -70 m e a febbraio a circa -150 m. L'andamento delle curve di marzo e, in misura anche più marcata, di aprile mostrano come il mescolamento convettivo si sia ormai interrotto e sia già iniziata la fase di riscaldamento primaverile del lago.

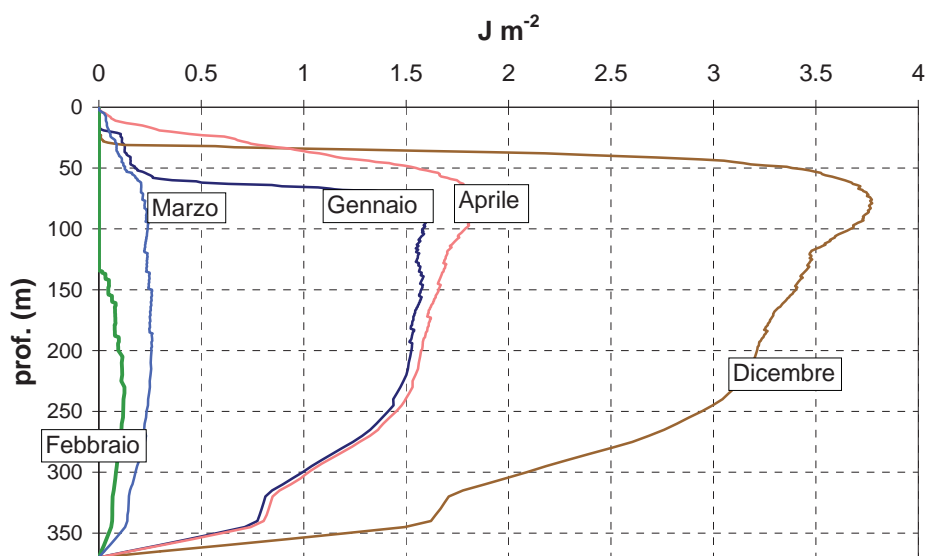


Fig. 2.1.4. Sequenza temporale della distribuzione verticale della stabilità termica del Lago Maggiore da Dicembre 2011 ad Aprile 2012.

2.2. Valutazione numerica dei tempi di residenza di traccianti idrosolubili nel Lago Maggiore

Nel corso del 2012 la ricerca è proseguita con simulazioni CFD 3D riguardanti la propagazione nel Lago Maggiore di un inquinante idrosolubile non-reattivo. Lo scopo delle simulazioni era di confrontare i tempi di residenza del tracciante idrosolubile con quelle di particelle (markers) prive di massa così come quantificati in precedenti studi (Ambrosetti et al. 2012).

Sono state considerate due diverse configurazioni: la prima con immissione continua del tracciante alla sezione di ingresso del Ticino immissario e la seconda con inserimento a macchia (spot) nelle adiacenze della sezione di ingresso in lago del Toce.

Nel primo caso è stato assunto che il tracciante entrasse in continuo in lago unitamente all'acqua del fiume alla concentrazione di 10 mg l^{-1} . Nel secondo caso il tracciante è stato assunto essere inizialmente presente in forma di "macchia" con concentrazione di 100 mg l^{-1} , collocata a 0,5 m sotto la superficie libera, ed con una estensione di 250.000 m^2 . La scelta di una così elevata estensione della macchia è stata imposta dalla necessità di evitare la presenza di una concentrazione di tracciante numericamente non rilevabile all'arrivo del tracciante all'uscita del Fiume Ticino.

Entrambe le simulazioni sono state condotte sul reticolo di integrazione di 58 strati, già utilizzato per le simulazioni dei markers privi di massa (Ambrosetti et al. 2012; Castellano et al. 2010; Castellano et al. 2008) e assumendo le condizioni di portata dei vari affluenti, dell'effluente e della meteorologia dell'anno 2002, inteso come anno campione. Le caratteristiche generali del codice di calcolo utilizzato per questo studio sono state espone in dettaglio in precedenti lavori riguardanti i tempi di residenza privi di massa e quindi in movimento con la stessa velocità puntuale e istantanea dell'acqua di lago (Rapporti CIP AIS 2009, 2010 e 2011)

L'inizio di entrambe le simulazioni numeriche sono state fissate al primo gennaio del suddetto anno. Il tempo di residenza è stato calcolato tra il giorno di arrivo del tracciante alla sezione di chiusura del lago sul Ticino emissario (con una concentrazione almeno pari allo $0,1 \text{ mg l}^{-1}$) e la suddetta data di avvio della simulazione.

Va considerato che la valutazione numerica della stima dei tempi di residenza di traccianti idrosolubili risente sensibilmente dell'effetto della diffusività apparente dovuta al regime idrodinamico turbolento del Lago Maggiore, che è il maggior responsabile dei reali meccanismi di diffusione/dispersione; esso esercita un controllo decisivo sulla stratificazione termica, sulla diluizione degli inquinanti e soprattutto sui processi biogeochimici. Per questo motivo è stato necessario considerare la struttura della turbolenza lacustre, quanto meno in forma grossolana.

2.3. Propagazione del tracciante nel Fiume Ticino

Si è seguito e analizzato il percorso in lago del tracciante idrosolubile immesso nel Fiume Ticino in ogni mese, da gennaio ad agosto, alle seguenti profondità: in superficie, - 1,5 m, - 6,0 m, - 12,6 m, - 21,0 m, - 32,4 m, - 45,5 m, - 61,5 m, - 77,5 m, - 95,2 m, - 116,0 m, - 144,2 m, -185,5 m e -228,8 m. In particolare vengono qui presentate le mappe del percorso del tracciante in superficie e a 12.6 m di profondità del lago alla fine di agosto (Fig. 2.3.1.). Sono comunque disponibili i tracciati relativi a ciascun mese.

Per quanto riguarda la porzione più superficiale della massa d'acqua lacustre si pongono due annotazioni:

- nella zona prossima all'ingresso del Ticino in lago nello strato d'acqua compreso fra la superficie libera e 6 m di profondità si forma una spaccatura della macchia, dovuta ad una differente idrodinamica alle diverse quote;
- il tracciante, almeno fino a circa 12 m di profondità, comincia a uscire dal lago.

Da Gennaio, nella zona di immissione del tracciante e sino alla profondità di circa 150 m, si accumula fin dall'inizio una macchia la cui concentrazione cresce progressivamente fino a Marzo raggiungendo circa 1 mg l^{-1} per poi mantenersi definitivamente attorno a questo valore anche in Agosto interessando una porzione di lago sempre maggiore ma espandendosi con velocità molto bassa.

Nella porzione centrale del lago il tracciante idrosolubile è ancora presente all'altezza di Pallanza alla profondità di 21 m, con una concentrazione di 0.12 mg l^{-1} per poi diminuire gradualmente sino a 0.01 mg l^{-1} a -150 m. Nella zona più profonda la sua presenza non è rilevabile (compresa tra 0 e 0.001 mg l^{-1}) confermando così una scarsa penetrazione ed una lunga permanenza in lago.

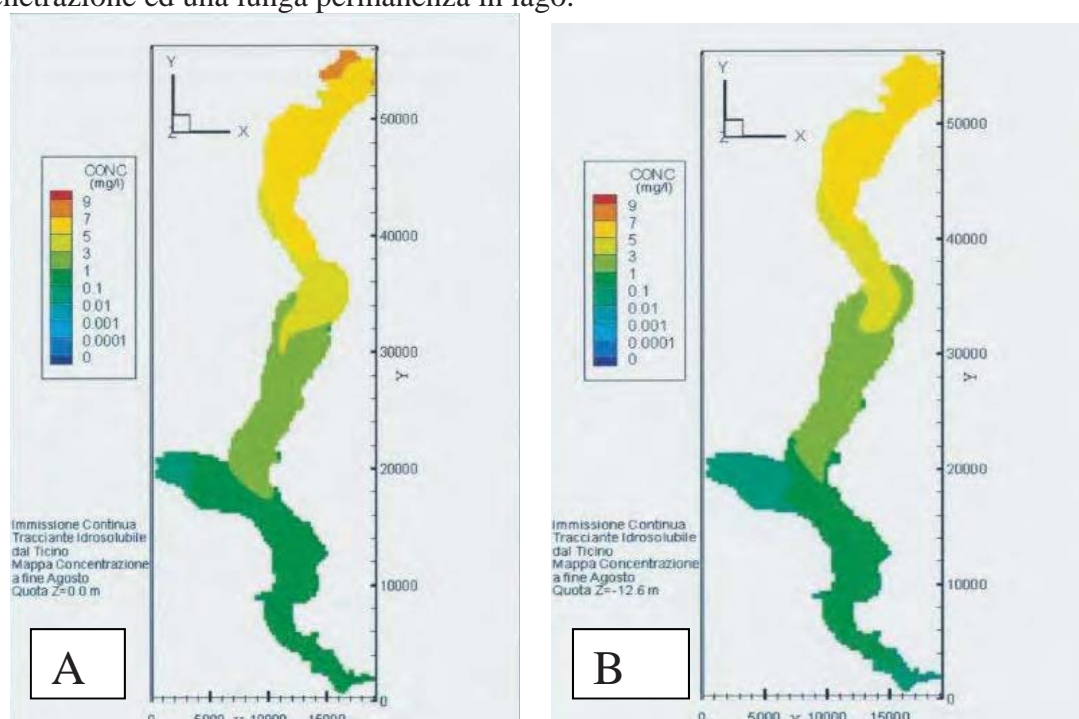


Fig. 2.3.1. Mappe delle concentrazioni del tracciante idrosolubile in superficie (A) e a 12,6 m (B) di profondità

Nel seguire il percorso del tracciante da Nord a Sud sono state individuate tre diverse zone del lago nelle quali misurare i profili verticali della sua concentrazione che sono state così definite:

- zona di "ingresso del Ticino";
- zona del "circondario dell'ingresso del Ticino", corrispondente all'incirca al punto centrale del bacino di Locarno;
- zona della "punta avanzata", cioè la parte della nuvola del tracciante più lontana (prossima) dall'uscita del Ticino: ovviamente non si tratta di un punto fisso, ma la sua posizione cambia in continuazione.

Le figure 2.3.2. e 2.3.3. mostrano i profili temporali verticali da 0 a circa 150 m di profondità delle concentrazioni di tracciante rilevati nelle zone 2 e 3 alla fine di ciascun mese da gennaio ad agosto.

Le figure riportate hanno prevalentemente lo scopo di fornire una chiave di interpretazione ulteriore delle mappe di concentrazione lungo sezioni orizzontali diverse dell'intero lago, a loro volta ripetute mese per mese. Le stesse servono anche a rafforzare la percezione delle conseguenze che le dinamiche complesse del lago hanno sul destino di un tracciante idrosolubile e diffusivo. Viene così confermata dall'analisi dei valori dei profili verticali la modesta penetrazione sia orizzontale che verticale del tracciante sotto i 21 m.

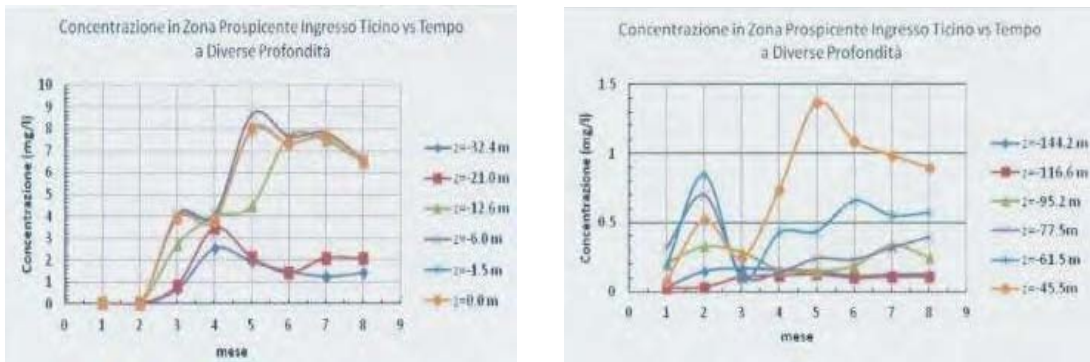


Fig. 2.3.2. Profilo temporale di concentrazione del tracciante a diversa profondità nella zona circondario del Fiume Ticino

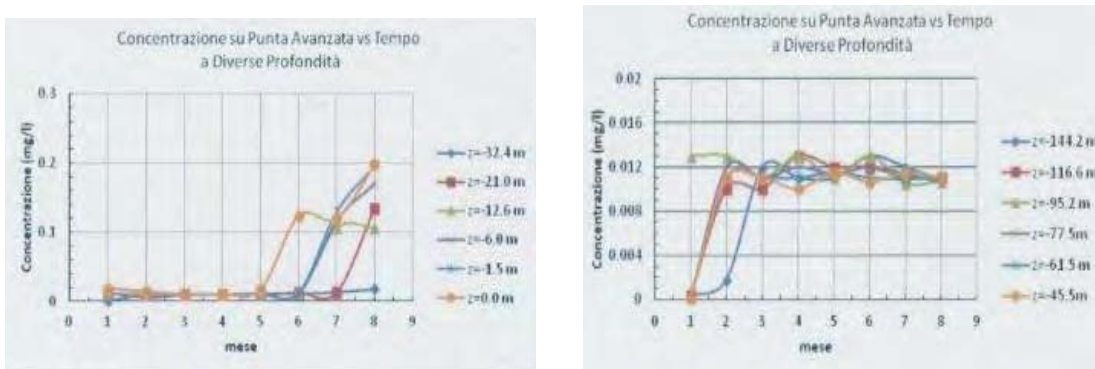


Fig. 2.3.3. Profilo temporale di concentrazione del tracciante a diversa profondità nella punta avanzata del Fiume Ticino

Per profondità maggiori a fine agosto -185,5 e -228,8 m. (Fig. 2.3.4.) si stimano valori di concentrazione del tracciante dell'ordine di $0,1 \text{ mg l}^{-1}$ nella zona del "circondario di ingresso del Ticino" e di $0,01 \text{ mg l}^{-1}$ sulla "Punta avanzata"; si tratta quindi di valori allineati all'andamento temporale di quelli delle profondità maggiori (-150 m) considerate in precedenza.

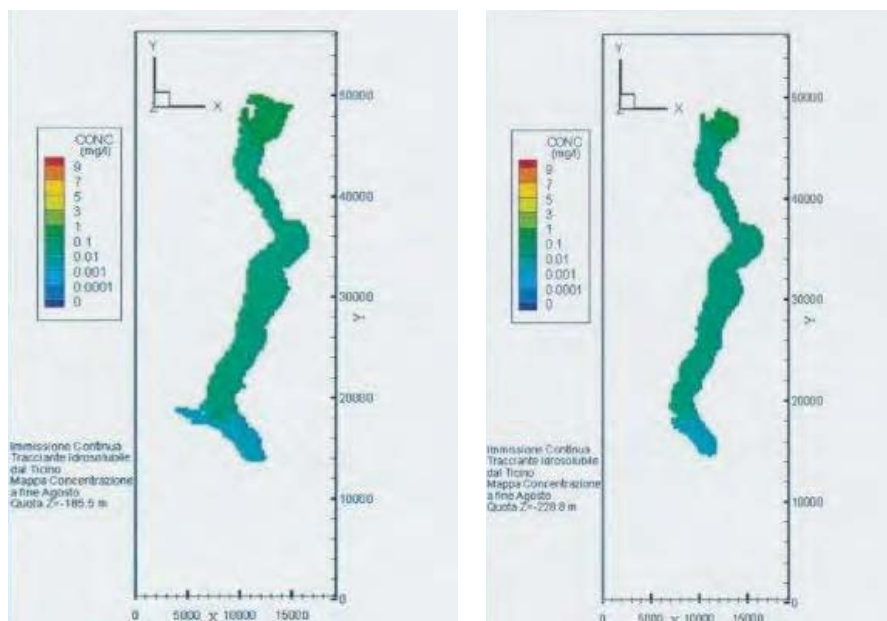


Fig. 2.3.4. Mappe della concentrazione in lago del tracciante a -185 e -228 m inserito nel Fiume Ticino

2.4. Propagazione del tracciante nel Fiume Toce

Mappe analoghe relative alla immissione di tracciante nella macchia posta nelle adiacenze della foce del Toce sono riportate nella figura 2.4.1. limitatamente ai mesi di Marzo e Aprile; in questo caso la rappresentazione della propagazione del tracciante riguarda un livello di profondità di 4 m. Una precisazione è in questo caso necessaria in quanto in gennaio non è rilevabile la presenza del tracciante: si tratta di un problema di rappresentazione in quanto in questo periodo la “macchia” iniziale viene “schiacciata” dal moto dell’acqua sulle rive del lago. Si veda a questo proposito la figura 2.4.2. che mostra come il detto campo di moto, nei mesi successivi, sia cambiato in modo tale da spingere il tracciante verso il largo.

2.5 Conclusioni

Dall’analisi svolta sinora risulta che i tempi di residenza di un tracciante idrosolubile sono, sino a circa 12 metri di profondità, tendenzialmente meno di un quarto di quelli relativi ai markers lagrangiani privi di massa partiti da posizioni analoghe (Castellano et al., 2010). Per profondità maggiori a fine Agosto si trovano valori allineati all’andamento temporale di quelli delle profondità maggiori valutate con i markers lagrangiani. Si evidenzia così l’effetto, molto sensibile della diffusività effettiva, (essenzialmente orizzontale, mentre quella verticale risulta di molto inferiore) dovuta al regime di turbolenza del lago. La modesta penetrazione del tracciante, di principio, meriterebbe certamente uno studio più accurato che però esula dall’obiettivo di questa serie di simulazioni, che è in effetti quello di valutare la differenza fra i tempi di residenza puramente idraulici, stimati mediante l’uso di markers lagrangiani privi di massa, e un tempo di residenza ragionevolmente rappresentativo di un tracciante idrosolubile e soggetto alla diffusività molecolare e alla diffusività turbolenta.

Un terzo livello di interesse riguarderebbe i tempi di residenza di traccianti biodegradabili o comunque reagenti, che è un problema decisamente più complesso e certamente non univoco in quanto dipendente dalle cinetiche di reazione, diverse per ogni specie e in funzione delle condizioni chimiche, fisiche e biologiche del corpo idrico.

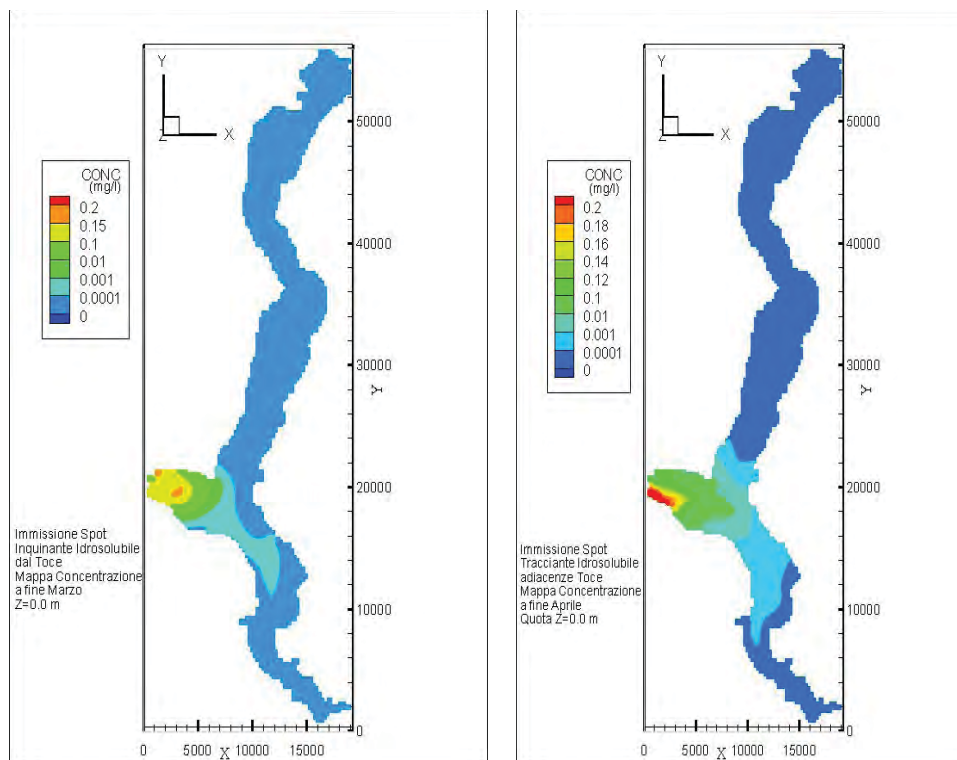


Fig. 2.4.1. Propagazione del tracciante idrosolubile in Marzo e Aprile a 4 m di profondità nel Bacino di Pallanza.

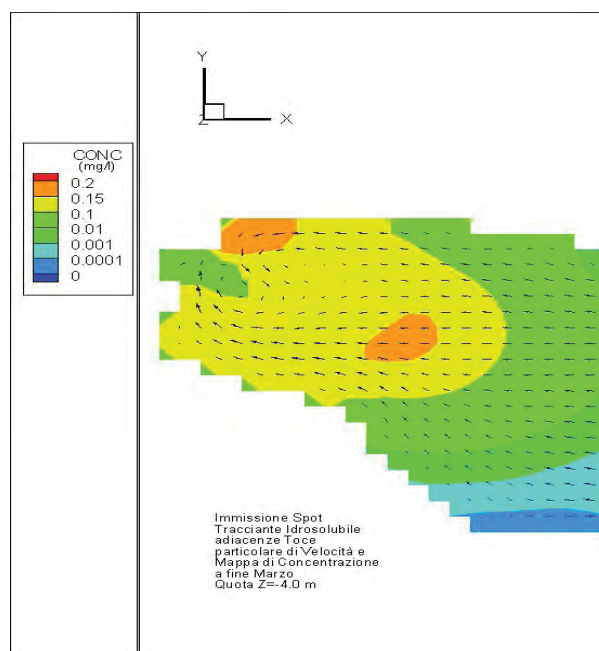


Fig. 2.4.2. Propagazione del tracciante idrosolubile nel bacino di Pallanza in seguito all'immissione spot del tracciante idrosolubile nelle adiacenze del Fiume Toce.

Bibliografia

Ambrosetti, W. & L. Barbanti. 1999. Deep water warming in lakes; an indicator of climatic change. *J. Limnol.*, 58 (1): 1-9.

- Ambrosetti, W., L. Barbanti, & A. Rolla. 2011. Profondità di mescolamento e valutazione del tempo di residenza delle acque lacustri. Ricerche sull'evoluzione del Lago Maggiore. Aspetti limnologici. Programma quinquennale 2008-2012. Campagna 2010. Commissione Internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere (Ed.): 12-25
- Ambrosetti, W., L. Barbanti & E. A. Carrara. 2010. Mechanism of hypolimnion erosion in a deep lake (Lago Maggiore, N.Italy). *J. Limnol.* 69 (1): 3-14.
- Ambrosetti, W., L. Barbanti, & A. Rolla. 2010. Profondità di mescolamento e valutazione del tempo di residenza delle acque lacustri. Ricerche sull'evoluzione del Lago Maggiore. Aspetti limnologici. Programma quinquennale 2008-2012. Campagna 2009. Commissione Internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere (Ed.): 12-25
- Ambrosetti, W., L. Barbanti, A. Rolla, L. Castellano & N. Sala. 2012. Hydraulic paths and estimation of the real residence time of the water in Lago Maggiore (N. Italy): application of massless markers transported in 3D motion fields. *J. Limnol.*, 71 (1): 11 pp.
- Ambrosetti, W., L. Barbanti, A. Rolla, L. Castellano & N. Sala. 2012. Hydraulic paths and estimation of the real residence time of the water in Lago Maggiore (N. Italy): application of massless markers transported in 3D motion fields. *J. Limnol.*, 71 (1): 11 pp.
- Ambrosetti, W., L. Barbanti, E.A. Carrara, A. Ferrari & A. Rolla. 2009. Valutazione del tempo di residenza delle acque lacustri. Ricerche sull'evoluzione del Lago Maggiore. Aspetti limnologici. Programma quinquennale 2008-2012. Campagna 2008 e Rapporto quinquennale 2003-2007. Commissione Internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere (Ed.): 77-88.
- Castellano L., W. Ambrosetti & N. Sala. 2008. About the use of computational fluid dynamic (CFD) in the frameworck of physical limnological studies on a Great Lake. In: *Reflexing interfaces*. Information Science Reference, Hershey, New York, London: 257-277.
- Castellano L., W. Ambrosetti, L. Barbanti & A. Rolla. 2010. The residence time of the water in Lago Maggiore (N.Italy): first result from an Eulerian-Lagrangian approach. *J. Limnol.* 69 (1): 15-28.