

Scelta del tracciante ideale per indagini idrogeologiche: risultati preliminari da test in laboratorio

Best tracer selection for hydrogeological investigations: preliminary results from laboratory test

Alberto Tazioli, Stefano Palpacelli

Riassunto: L'utilizzo di tecniche di tracciamento è un ottimo strumento per studiare la dinamica delle acque sotterranee e per determinare correttamente i parametri idrogeologici degli acquiferi. Il presente studio è rivolto principalmente alla caratterizzazione dell'adsorbimento, alla determinazione della porosità efficace e della velocità effettiva di flusso mediante test eseguiti in laboratorio in terreni prelevati all'interno di un bacino idrografico marchigiano rappresentativo, per caratteristiche geologiche e idrogeologiche, di molte situazioni dell'Italia Centrale. Lo scopo è quindi di individuare i fattori principali della scelta del tracciante più efficace da usare a scopi idrogeologici (misure con traccianti in acque sotterranee e determinazione dei parametri degli acquiferi). L'adsorbimento è stato studiato mediante l'esecuzione di prove batch in laboratorio, usando differenti traccianti e testando

diversi terreni. Le prove in colonna sono state eseguite per valutare l'efficacia di differenti attrezzature utilizzate in laboratorio, e per studiare l'influenza di alcuni parametri di prova sul calcolo della porosità efficace e della velocità effettiva. Tali considerazioni sono molto utili per guidare la scelta del tracciante ideale da utilizzare nelle future prove in campagna.

Abstract: *Tracers techniques are a good tool to investigate groundwater dynamics; they are essential to perform measurement of hydrogeological parameters of aquifers. This study was aimed at characterizing adsorption, effective porosity and pore water velocity in soil samples collected in a hydrographic basin of Marche Region (Italy). This basin has the typical geologic and hydrogeological features of many basins in Central Italy. Therefore, the principal aim is to evaluate the best tracer to be used for hydrogeological purpose (i.e. groundwater tracer test and aquifer parameter estimation). Adsorption has been investigated by means of laboratory batch tests using different tracers and involving different soils. In literature some application of tracers both to laboratory scale and to field scale can be found. Column tests have been performed also to test the effectiveness of different test equipment and to investigate the influence of some test parameters on the calculation of effective porosity and pore water velocity. These considerations and test results are very useful to advise the choice of the best tracer to be used in tracer field tests.*

Parole chiave: Adsorbimento, prove batch, prove in colonna, test con traccianti

Keywords: *Adsorption, batch test, column test, tracer test*

Alberto TAZIOLI ✉

Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica - Università Politecnica delle Marche
via Brece Bianche, 12. 60131 Ancona, Italy.
Tel. 071 2204719
email: a.tazioli@univpm.it

Stefano PALPACELLI

Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica - Università Politecnica delle Marche
via Brece Bianche, 12. 60131 Ancona, Italy.
Tel. 071 2204719
email: s.palpacelli@univpm.it

Ricevuto: 26 luglio 2012 / Accettato: 22 aprile 2013
Pubblicato online: 30 giugno 2013

© Associazione Acque Sotterranee 2013

Introduzione

L'utilizzo di prove con traccianti interessa sia il campo dell'idrologia, sia quello dell'idrogeologia. In particolare, esse sono spesso utilizzate per la determinazione della portata dei corsi d'acqua, per caratterizzare gli acquiferi, per individuare e delimitare le aree di salvaguardia delle opere di captazione, per problemi di inquinamento, per individuare i limiti delle strutture idrogeologiche e comprendere il funzionamento di un sistema idrogeologico (Civita 2005; Leibundgut et al. 2009; Davis et al. 1985; Tazioli et al. 2005; Tazioli 2011; Vigna 2001). Un tracciante è una sostanza (liquida o solida) che viene immessa nell'acqua, si miscela con essa in modo pressoché perfetto e può essere rilevata con una certa facilità. L'andamento della sua concentrazione nel tempo, in una sezione di misura posta sufficientemente a valle del punto di immissione, permette di ricostruire le principali caratteristi-

che del flusso dell'acqua (direzione, velocità e portata). Un numero sufficiente di dati acquisiti permette inoltre di calcolare la porosità, la dispersività, la conducibilità idraulica ed altri parametri idrogeologici (Davis et al., 1985). Uno dei punti più importanti nell'impostazione di una prova di tracciamento è senza dubbio la scelta del tracciante ideale. Un tracciante si dice "ideale" quando non è tossico (per tutte le componenti presenti nell'ambiente studiato), si miscela perfettamente con l'acqua, è di facile rilevabilità, chimicamente stabile, non presente (o presente solo in tracce) nel fondo ambientale, non ha reazioni con lo scheletro solido ed è economico (Moser, 1995). Per sottolineare l'importanza di questa selezione si ricorda che spesso la riuscita o il fallimento di alcune prove di tracciamento (specialmente quelle condotte nelle acque sotterranee) dipende fortemente da una scelta più o meno corretta del tracciante.

Il presente lavoro ha quindi l'obiettivo di illustrare e schematizzare una metodologia di preparazione alle prove di tracciamento vere e proprie (da eseguirsi sul campo), tramite un preventivo studio in laboratorio dei terreni costituenti acquiferi e acquitardi presenti in un'area costiera dell'Italia centrale, mediante la misura dell'adsorbimento, della porosità efficace e della velocità effettiva in campioni di terreno prelevati in sito. Tale studio prevede da una parte la riproduzione di caratteristiche di filtrazione simili a quelle che si possono trovare in sito, dall'altra la possibilità di scegliere in anticipo il tracciante più adatto a seconda del terreno investigato. Più in dettaglio, nel corso dello studio sono stati testati alcuni traccianti (tra i più comunemente usati in idrogeologia), selezionando il parametro adsorbimento come parametro guida per la scelta del tracciante "ideale".

Naturalmente le prove di tracciamento in colonna sono state eseguite solamente sui due terreni rappresentanti i diversi acquiferi dell'area, mentre l'adsorbimento è stato ricavato per tutti i terreni investigati, in particolare i due acquitardi. L'adsorbimento è stato ottenuto per mezzo di prove "batch", usando diversi traccianti elettrolitici e fluorescenti; i parametri di flusso sono stati ricavati da prove in colonna (column test) eseguite imponendo un gradiente idraulico senza ausilio di apparecchiature, utilizzando cioè la sola differenza di carico tra il serbatoio di alimentazione e la colonna stessa. È stato indagato anche il comportamento delle diverse attrezzature di prova e il loro effetto sul calcolo dei suddetti parametri. In letteratura sono riportate diverse tipologie di prove in colonna, variabili a seconda del tipo di analisi che si vuole effettuare, ma sinteticamente individuabili come segue: prove ad immissione continua di tracciante a concentrazione costante, prove ad immissione istantanea di una massa precisa di tracciante (Shackelford, 1995; Leibundgut, 2009). Le prime hanno lo scopo di determinare il coefficiente di ritardo R_d (correlabile al coefficiente di distribuzione K_d), mentre le seconde sono utili per determinare i parametri di flusso. Nel presente lavoro si è scelto di applicare la seconda tipologia di prova per indagare il comportamento dei traccianti in condizioni molto simili a quelle che si troveranno in sito, e di determinare l'adsorbimento mediante l'esecuzione di prove *batch*.

Materiali e Metodi

Materiali

Per la determinazione dell'adsorbimento, sono stati selezionati 4 diversi terreni prelevati in sito (tra il 2011 e la prima metà del 2012) all'interno del bacino idrografico del Fiume Aspio (Regione Marche). Il prelievo è stato effettuato in corrispondenza di alcuni importanti sbancamenti (che mettono allo scoperto alcuni tipi litologici). In Tab. 1 sono riportate le caratteristiche principali dei materiali usati nei test. In Fig. 1 sono illustrate le curve granulometriche dei diversi terreni. I terreni denominati Z e W sono i principali acquiferi del bacino idrografico del F. Aspio, X e Y costituiscono gli acquitardi principali, confinanti con i due acquiferi. Il contenuto mineralogico dei vari terreni è stato definito qualitativamente mediante diffrazione a raggi X; nel terreno W c'è una netta prevalenza di calcite e quarzite, nel terreno Z quarzite e calcite con tracce di feldspati; i minerali prevalenti nei terreni X e Y sono calcite, quarzite, feldspati, mica e illite. La permeabilità dei terreni è stata determinata mediante prove di permeabilità in laboratorio, eseguite con carico idraulico costante, ripetute più volte all'inizio di ogni prova in colonna. I traccianti utilizzati nei test sono KCl, KBr, NaCl, Fluoresceina e Rodamina WT.

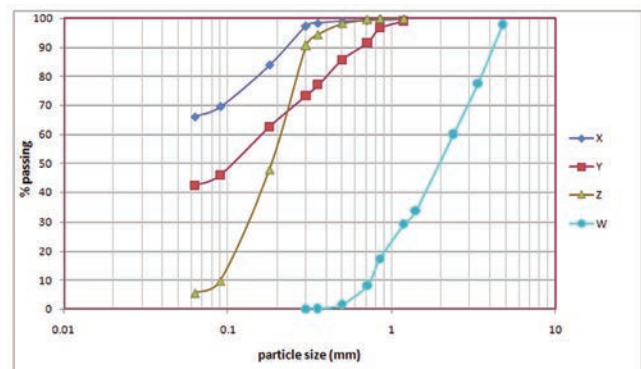


Fig. 1 - Curve granulometriche relative ai materiali usati nelle prove.

Fig. 1 - Granulometric curves of the tested materials.

Tab. 1 - Caratteristiche dei materiali usati nei test. G_s peso specifico dei granuli, d_{60} diametro caratteristico corrispondente al 60% del passante, K permeabilità.

Tab. 1 - Properties of the soils used in the tests. G_s specific weight of solid, d_{60} particle size, K permeability.

Soil	Type of soil	G_s	d_{60}	K (cm/s)
X	Clayey silt	2.59	0.06	3.5×10^{-6}
Y	Silty and clayey sand	2.35	0.16	2.9×10^{-5}
Z	Poorly graded sand	2.50	0.21	3.3×10^{-3}
W	Sand with Gravel	2.56	2.35	5.4×10^{-2}

Determinazione concentrazioni dei traccianti

La determinazione analitica dei traccianti nell'acqua in uscita dalle prove in colonna e al termine delle prove batch è stata eseguita per mezzo di cromatografia ionica (per anioni e cationi dei traccianti elettrolitici) e mediante analisi fluorimetrica con filtro (per i traccianti di tipo fluorescente). Per i traccianti elettrolitici si è anche misurata in continuo la conducibilità elettrica sul liquido in uscita dalle prove *column*.

Batch test

Le prove *batch* consistono nel mettere un campione di terreno a contatto con la soluzione tracciante a una nota concentrazione e assicurare il contatto per un tempo minimo di 24 ore. Le prove sono state eseguite ponendo 25 g di campione all'interno di una bottiglia di vetro, aggiungendo 100 ml di soluzione tracciante, agitando per 24 ore mediante un'apparecchiatura rotativa (ad una velocità di 12 rotazioni al minuto). Il confronto tra i vari traccianti e terreni è stato fatto sulla base dei valori del coefficiente di distribuzione K_d , ottenuto eseguendo prove batch a concentrazione crescente di traccianti. Le concentrazioni selezionate (0, 0.1, 1, 2, 5 g/L) sono simili a quelle che si utilizzano in sito per le prove con traccianti. Il coefficiente di distribuzione è un'indicazione dell'adsorbimento massimo che un determinato tracciante subisce ad opera di un particolare substrato. Ha le unità di un volume su una massa (cm^3/g), ed è definito come (Hadi, 1997):

$$K_d = (C_0 - C_e) \cdot \frac{V}{m} \cdot \frac{1}{C_e}$$

dove C_0 è la concentrazione iniziale del tracciante. C_e la concentrazione all'equilibrio al termine del test. V il volume del liquido. m la massa di terreno. Quanto più tale coefficiente si avvicina a zero, tanto più il tracciante si può considerare ideale.

Tab. 2 - Caratteristiche delle diverse colonne utilizzate per la ricerca.

Tab. 2 - Features of columns utilized for the research.

Column name	Column length (cm)	Column diameter (cm)	Soil	Hydraulic gradients applied in different tests
B	42.7	5.2	Poorly graded Sand (Z)	0.46
10200A	184.5	9	Sand with gravel (W)	0.02 – 0.09 – 0.18
B2	18.4	1.8	Sand with gravel (W)	1.81
D1	27.2	5.2	Sand with gravel (W)	0.64
A1	39.4	1.8	Sand with gravel (W)	0.60
B1new	19.7	1.8	Sand with gravel (W)	1.21 – 1.01 – 0.78
B2 new	20	1.8	Sand with gravel (W)	1.2
B2new	20	1.8	Sand with gravel (W)	1.2
B2new	20	1.8	Sand with gravel (W)	1.67
B	42.7	5.2	Poorly graded Sand (Z)	0.46
PVC16	180	16	Sand with gravel (W)	0.008 – 0.05
ST1	44.6	5.2	Sand with gravel (W)	0.71

Column test

Le prove in colonna consistono nel sottoporre a permeazione una colonna di terreno costipato e posto all'interno di un tubo (di PVC o di Plexiglas) fino alla completa saturazione del terreno stesso. A questo punto incomincia la prova di tracciamento mediante l'iniezione istantanea di un tracciante nel tratto iniziale della colonna, e la rivelazione della concentrazione di tracciante nel liquido in uscita (Fig. 2). La metodologia di immissione del tracciante è praticamente identica a quella che usualmente si applica in campagna. Sono state utilizzate colonne di diverse dimensioni per indagare l'effetto dimensionale sui risultati ottenuti (Tab. 2). La permeazione nelle colonne è stata imposta mediante l'applicazione di un gradiente idraulico tramite un serbatoio contenente acqua, posto ad altezza fissa (ma regolabile per le diverse prove) ri-

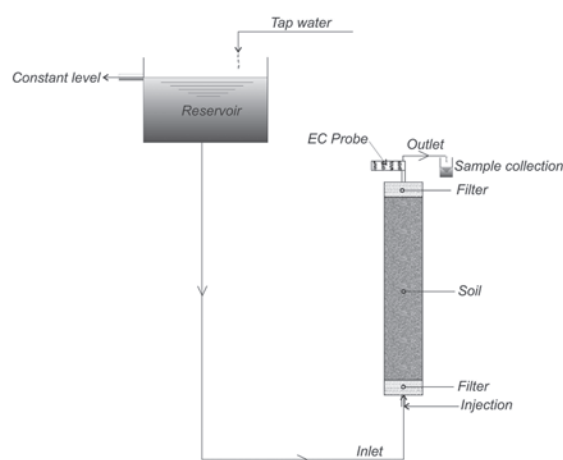


Fig. 2 - Schema dell'apparecchiatura di prova.

Fig. 2 - Schematic layout of column test.

spetto alla colonna. Questa configurazione è stata preferita rispetto all'utilizzo di una pompa peristaltica perché simula più efficacemente il movimento dell'acqua e dei soluti in condizioni naturali. Il flusso avviene dal basso verso l'altro per minimizzare la formazione di bolle d'aria. Il confronto tra le varie prove è stato eseguito sulla base dei valori di porosità efficace calcolati dalle prove stesse.

Calcolo dei parametri di flusso

I parametri di flusso presi in considerazione nel corso del presente studio sono la velocità effettiva (u , cm/s), la porosità efficace (n_e) e la dispersività (α , cm). Il calcolo dei parametri di flusso idrico al termine delle prove in colonna è stato eseguito applicando il metodo di integrazione proposto da Sauty (1977). Esso consiste nel risolvere la seguente serie di integrali:

$$\int_0^{\infty} C(t) dt$$

$$\int_0^{\infty} \frac{X}{t} \cdot C(t) dt$$

$$M = \int_0^{\infty} n_e \cdot u \cdot C(X, t) dt$$

$C(t)$ rappresenta l'andamento della concentrazione di tracciante nel tempo (t), misurata nel liquido in uscita dalla colonna, X è la lunghezza della colonna, M la massa di tracciante rinvenuto nel liquido effluente per tutta la durata della prova. I primi due integrali servono per ricavare la velocità effettiva di flusso. La porosità efficace viene poi ricavata dal rapporto tra la velocità di Darcy misurata sul liquido effluente e la velocità effettiva così ottenuta. Questi parametri permettono di estrapolare anche a prove eseguite in condizioni idrauliche differenti (con diverso gradiente idraulico e diversa velocità di Darcy) i risultati ottenuti in termini di porosità efficace e dispersività. Inoltre, il confronto tra gli stessi parametri è indispensabile per selezionare correttamente il tracciante adeguato per il terreno oggetto di studio.

Risultati e Discussione

Batch test

I risultati delle prove batch sono riportati in Tab. 3, espressi in termini di coefficiente di distribuzione (K_d). Come si può osservare, il tracciante che sembra dare migliori risultati in termini di adsorbimento è in assoluto il Br^- ; anche il Cl^- presenta un adsorbimento molto basso; fluoresceina, Na^+ e K^+ mostrano assorbimenti abbastanza contenuti, eccezion fatta per i terreni a maggior contenuto argilloso. Da notare un adsorbimento molto basso per tutti i traccianti nei confronti del materiale carbonatico costituente uno degli acquiferi presi in esame. Queste considerazioni hanno due principali implicazioni: la prima è che, nel caso di acquifero carbonatico (come la sabbia con ghiaia usata nelle prove, materiale W), tutti i traccianti testati hanno mostrato assorbimenti molto bassi; la seconda è che, se l'acquifero in questione è più eterogeneo, formato ad esempio da lenti di materiale meno grossolano o a permeabilità più bassa, il tracciante che fornisce una risposta migliore è senz'altro il Br^- .

Tab. 3 - Risultati delle prove batch

Tab. 3 - Results of the batch tests.

Soil	Type of soil	Tracer	K_d (cm ³ /g)		
X	clayey silt	K^+	12.41		
		Br^-	0.04		
		Rhodamine WT	8.95		
		Cl^-	0.26		
		Na^+	6.18		
		Y	silty and clayey sand	K^+	4.72
				Fluorescein	7.2
Cl^-	0.14				
		Na^+	4.01		
		Z	poorly graded sand	Br^-	0.01
				Fluorescein	0.69
Cl^-	0.03				
Na^+	0.89				
W	sand with gravel	K^+	0.69		
		Br^-	0.001		
		Fluorescein	0.91		
		Rhodamine WT	0.45		
		Cl^-	0.01		
		Na^+	0.18		

Column test

I risultati delle prove in colonna e le caratteristiche geometriche delle colonne sono riportati in Tab. 4. Nella tabella sono indicati sia i valori della porosità efficace calcolati con il metodo di integrazione di Sauty (1977) sia i valori della porosità efficace ricavati pesando l'acqua gravifica contenuta all'interno della colonna al termine della prova. Si evidenzia che i valori della porosità totale risultano praticamente uguali a quelli della porosità efficace in quanto i terreni utilizzati per le prove hanno una granulometria grossolana e quindi l'acqua di ritenzione è solo una minima parte di tutta l'acqua contenuta all'interno della colonna. La colonna viene isolata mediante la chiusura di rubinetti posti all'inizio e alla fine della colonna, staccata dai tubi di collegamento e posta su una bilancia di precisione per la pesata; essendo noti il peso della colonna vuota e il peso del terreno secco, si ricava il peso dell'acqua gravifica per differenza. Tali valori di porosità si possono ritenere come valori "di riferimento" e di confronto, in quanto rappresentano l'effettiva quantità di acqua contenuta all'interno del terreno. A titolo di esempio, in Fig. 3 sono indicate due curve di restituzione dello stesso tracciante (KBr) all'uscita della colonna più piccola (B2, diametro 1.8 cm); in ordinate si indica la concentrazione relativa (il rapporto tra concentrazione misurata punto per punto e la concentrazione massima misurata nel corso della prova) in modo da "normalizzare" l'andamento delle diverse curve e poter confrontare

Tab. 4 - Caratteristiche delle colonne e risultati delle prove.

Tab. 4 - Properties and results of column test.

Column name	Column length (cm)	Column diameter (cm)	Soil	Tracer	Calculated effective porosity	Weighted effective porosity	Effective velocity (cm/s)
B	42.7	5.2	Poorly graded Sand (Z)	KCl	0.203	0.252	9.1×10^{-3}
ST1	44.6	5.2	Sand with gravel (W)	KCl	0.232	0.226	1.1×10^{-2}
10200A	184.5	9	Sand with gravel (W)	R wt	0.262	0.251	1.6×10^{-3}
B2	18.4	1.8	Sand with gravel (W)	R wt	0.213		7.6×10^{-2}
B2new	20	1.8	Sand with gravel (W)	Fluorescein	0.051		1.9×10^{-3}
D1	27.2	5.2	Sand with gravel (W)	NaCl	0.296		4.6×10^{-3}
B2new	20	1.8	Sand with gravel (W)	NaCl	0.814		4.1×10^{-3}
PVC16	180	16	Sand with gravel (W)	NaCl	0.233	0.221	4.6×10^{-3}
A1	39.4	1.8	Sand with gravel (W)	KBr	0.199		1.2×10^{-3}
B1new	19.7	1.8	Sand with gravel (W)	KBr	0.132	0.213	9.7×10^{-3}
B2 new	20	1.8	Sand with gravel (W)	KBr	0.001		6.1×10^{-4}
B	42.7	5.2	Poorly graded Sand (Z)	KBr	0.192	0.259	8.7×10^{-3}

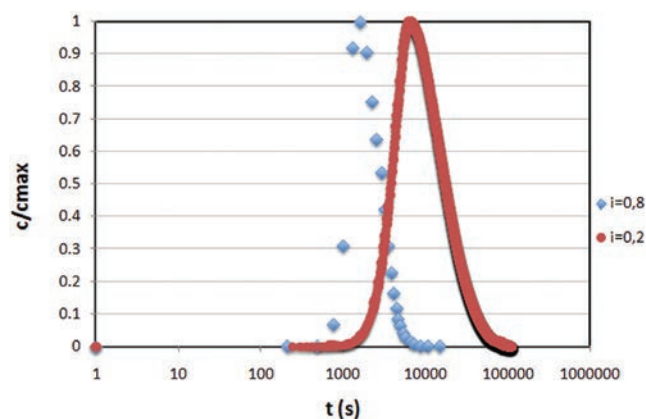


Fig. 3 - Prove in colonna corta eseguite in corrispondenza di due diversi gradienti.

Fig. 3 - Column test in a short column (hydraulic gradient being different).

tra di loro prove eseguite usando una quantità di tracciante differente. Le prove sono state eseguite imponendo gradienti diversi (0.2 e 0.8) per verificare la risposta della colonna a velocità differenti. Si può osservare una forma identica per le due curve, l'unica differenza è nel tempo di arrivo del picco che risulta molto ritardato per la prova a gradiente più basso. In Fig. 4 sono riportate le curve di restituzione dei traccianti per quattro colonne aventi diametro 5 cm; le linee tratteggiate sono relative a due colonne aventi lunghezza attorno a 40 cm, le linee continue rappresentano le curve di colonne lunghe circa 20 cm. I diversi traccianti hanno un comportamento molto simile come evidenziato dal grafico. Ulteriori prove di confronto sono in corso di esecuzione su colonne più lunghe (colonna 10200A, colonna PVC16) con diversi traccianti, per indagare l'effetto della dispersione (soprattutto longitudinale, ma anche trasversale) dei traccianti durante il flusso all'interno di un mezzo poroso.

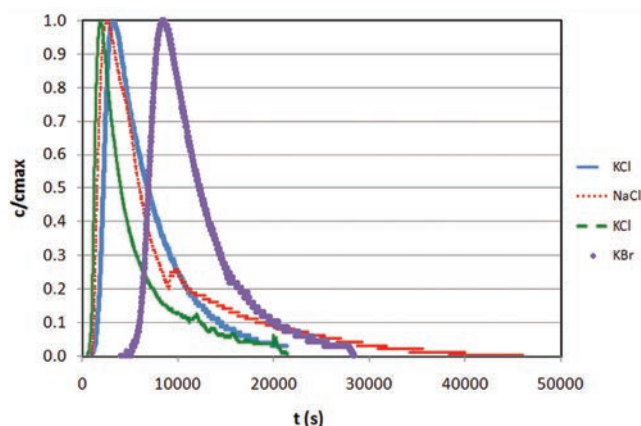


Fig. 4 - Prove in colonna da 5 cm di diametro (colonna B e colonna ST1) eseguite con diversi traccianti.

Fig. 4 - Column tests performed in a 5 cm-diameter column (column B, ST1), with different tracers.

Discussione

Analizzando i risultati si può osservare come le colonne più piccole (diametro 1.8 cm, lunghezza 20 cm) sottostimino pesantemente la porosità efficace ed in alcuni casi forniscano risultati senza alcun significato fisico; l'utilizzo di tali colonne è da escludersi o da limitarsi al caso di terreni a grana molto fine. Le colonne con diametro superiore a 5 cm evidenziano risultati migliori. La velocità effettiva calcolata è quasi sempre dell'ordine di 10^{-3} cm/s, nonostante il gradiente idraulico imposto nelle diverse prove sia molto diverso (da un minimo di 0.2 ad un massimo di 1.8). La cosa più interessante è evidenziata nel grafico di confronto della Fig. 5. In tale grafico sono rappresentate le curve di restituzione di tracciante relative a diverse colonne: una avente diametro 1.8 cm e lunghezza 20 cm (colonna B2), una avente lo stesso diametro, ma lunghezza doppia (colonna A1), una avente diametro più grande (5 cm) ma lunghezza minima (colonna D1, lunghezza 20 cm) ed

infine una avente diametro e lunghezza più grandi (colonna ST1, diametro 5 cm, lunghezza 42 cm). Nella colonna più piccola (B2) l'arrivo del picco principale è molto repentino ed è anticipato rispetto alle altre colonne, come si evince osservando la ripida pendenza del tratto iniziale della curva di restituzione e il tempo di arrivo del tracciante. Inoltre si nota la presenza di un picco secondario, dovuto principalmente ad un differenziamento nei percorsi di filtrazione all'interno della colonna stessa e, secondariamente, ad un disequilibrio e successivo riequilibrio delle condizioni idrodinamiche in seguito all'operazione di iniezione del tracciante, che genera un disturbo nel flusso all'interno della colonna (Aquilanti et al., 2013; Field et al., 2012; Leij et al., 2012). Tale picco secondario non si osserva nelle colonne più lunghe, anche se con diametro diverso tra loro (A1, ST1). La presenza di un picco secondario marcato sembra quindi essere legata anche al diametro e alla lunghezza della colonna. L'insieme di queste considerazioni

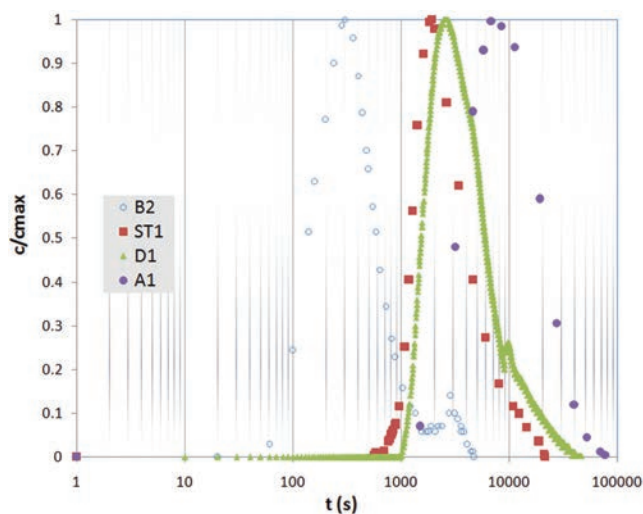


Fig. 5 - Confronto tra diverse prove in colonna: curve di restituzione dei traccianti. B2: diametro 1.8 cm lunghezza 20 cm; ST1: diametro 5.2 cm lunghezza 44 cm; D1: diametro 5.2 cm lunghezza 27 cm; A1: diametro 1.8 cm lunghezza 39 cm.

Fig. 5 - Comparison among different column tests; Breakthrough curves of columns: B2 (diameter 1.8 cm length 20 cm). ST1 (diameter 5.2 cm length 44 cm). D1 (diameter 5.2 cm length 27 cm). A1 (diameter 1.8 cm length 39 cm).

evidenzia anche la necessità di scegliere opportunamente lunghezza e diametro della colonna in base alla granulometria media del terreno da investigare; colonne più piccole sono utili per testare terreni meno permeabili a granulometria più fine. Per terreni molto permeabili, aventi granulometria maggiore, è necessario ricorrere a colonne con diametro e lunghezza superiori.

Conclusioni

La scelta del tracciante ideale per un terreno da investigare è pertanto strettamente connessa ad una preventiva sperimentazione sulla capacità di adsorbimento nei confronti dei terreni da indagare in sito. Per i terreni analizzati nel corso della presente ricerca, le risposte migliori per ogni tipo di terreno

sono date da traccianti elettrolitici (Br^- e Cl^-), con valori di adsorbimento leggermente più bassi per i bromuri. Le prove in colonna (eseguite nelle stesse condizioni e utilizzando unicamente i terreni costituenti gli acquiferi da investigare) sono uno strumento indispensabile per una programmazione corretta delle prove di tracciamento in campagna, e per una valutazione realistica delle problematiche connesse alla procedura di immissione. Le prove eseguite hanno evidenziato l'influenza dell'attrezzatura di prova sul calcolo della porosità efficace; la lunghezza della colonna deve essere poi proporzionata al tipo di acquifero in studio, al diametro medio dei suoi grani e allo spessore dell'acquifero stesso. In generale, i risultati ottenuti in termini di porosità efficace sono molto vicini ai valori effettivamente ricavati misurando la quantità di acqua gravifica contenuta nella colonna al termine della prova; questa ultima osservazione costituisce una verifica indiretta della validità dei valori della velocità effettiva di flusso ottenuti. Ulteriori prove sono in corso di svolgimento (sia in laboratorio che in campagna) per esaminare la possibilità di utilizzare traccianti di diverso tipo e verificarne il diverso impatto sull'ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- Aquilanti L., Clementi F., Landolfo S., Nanni T., Palpacelli S., Tazioli A. (2013). A DNA tracer used in column tests for hydrogeology applications. *Environmental Earth Sciences*. DOI: 10.1007/s12665-013-2379-y.
- Civita M. (2005). *Idrogeologia applicata e ambientale "Environmental and applied Hydrogeology"*. Casa editrice Ambrosiana. Milano.
- Davis S.N., Campbell D.J., Bentley W.W., Flynn T.J. (1985). *Ground water tracers*. National Water Well Association.
- Field M.S., Leij F.J. (2012) Solute transport in solution conduits exhibiting multi-peaked breakthrough curves. *J. of Hydrol.* 440-441:26-35
- Hadi S. (1997). *New hydrogeological tracers – synthesis and investigation*. Druckerei & Verlag Gaggstatter. Freiburg.
- Leibundgut C., Maloszewski P., Kulls C. (2009). *Tracers in Hydrology*. WILEY-BLACKWELL
- Leij F.J., Toride N., Field M.S., Sciortino A. (2012) Solute Transport in Dual Permeability Porous Media. *Water Resour Res* 48:1-13.
- Moser H. (1995). *Groundwater tracing. Tracer Technologies for Hydrological Systems (Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995)*. IAHS Publ.no. 229. 1995
- Sauty J.P. (1976). Contribution a l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interpretation des expériences de traçage. Thèse de doctorat. Université de Grenoble 1. 301831. 1977
- Shackelford C.D. (1995). Cumulative mass approach for column testing. *Journal of Geotechnical Engineering* 121(10):696-703
- Tazioli A., Boschi G., Carlini A. (2005). Monitoraggio dell'inquinamento da discariche: metodi isotopici per individuare la presenza di contaminazione delle acque sotterranee "Monitoring landfill pollution: isotopic methods to detect groundwater contamination" *Giornale di Geologia Applicata* 2(2005): 130-136.
- Tazioli A. (2011). Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter. *Hydrological Sciences Journal* 56:7 1314-1324.
- Vigna B. (2001). Gli acquiferi carsici "Karst aquifers". *Quad. Did. Soc. Speleol. Ital.*, 12. Genova.