

Importanza delle indagini per la caratterizzazione geologica ed idrogeologica di un sito inquinato nel comune di Rho (Milano)

Giovanni Pietro Beretta¹, Francesca Bozzano^{2 3 *}, Andrea Del Bon³, Mauro Majone^{3 4},
Fabrizio Nardoni⁵, Eva Pacioni⁶, Marco Petitta^{3 7}

¹Dipartimento di Scienze della Terra “Ardito Desio”, Università di Milano, giovanni.beretta@unimi.it

²Dipartimento di Scienze della Terra, Università “La Sapienza” di Roma, francesca.bozzano@uniroma1.it P.le Aldo Moro, 5, 00185
Roma – fax 064454729

³CERI, Centro di Ricerca per la Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici, Università “La Sapienza” di Roma,
andrea.delbon@libero.it

⁴Dipartimento di Scienze della Terra, Università “La Sapienza” di Roma, mauro.majone@uniroma1.it

⁵Dipartimento di Scienze della Terra, Università “La Sapienza” di Roma, fabrizio.nardoni@uniroma1.it

⁶Dipartimento di Scienze della Terra, Università “La Sapienza” di Roma, eva.pacioni@uniroma1.it

⁷Dipartimento di Scienze della Terra, Università “La Sapienza” di Roma, marco.petitta@uniroma1.it

*Autore corrispondente

Importance of surveys for the geological and hydrogeological characterization of a polluted site in the municipality of Rho (MI).

ABSTRACT: This paper describes the approach followed for a geological and hydrogeological characterization of a shallow aquifer contaminated by organochlorinated compounds, in a multidisciplinary project aimed to the experimentation of methodologies of enhanced pump and treat or natural attenuation, for the reclamation of polluted sites. The test-site interested an area of 200 m², where it has been realized appropriate boreholes for a field test. The test-site area is isolated respect to the groundwater flow by an impermeable barrier 9 m deep, where a low permeability fine-grained layer (one meter thick) is located. This level discriminates the shallow circulation from the deeper one. The impermeable diaphragm has been realized twenty years ago in correspondence to the source of the contaminated plume, in order to limit its transport in groundwater. In a multi-scale approach, it has become necessary to find and to analyze the hydrogeological setting of one more wide area, which extends until Milan. The schematization of the groundwater circulation has been obtained realizing a hydrogeological conceptual model at various scales having decreasing denominator (regional, local and test-site scales), opportunely evidencing heterogeneities that at bigger scale could be neglected. Results show that the role of the low permeability layer is scale dependent and taking into account time factor: the fine-grained layer can be considered as an aquiclude at regional and local scale and for a short-time interval (<1 year), but it allows vertical groundwater seepage (aquitard) from shallow to deeper aquifer at the test-site scale and for long-time period (>10 years). The hydraulic charge difference between the two named aquifers, increased by the impermeable diaphragm in the test-site area, allows a potential exchange rate of several cubic meters per year, which can explain the observed pollution migration from the shallow to the deeper aquifer.

Key terms: Geological hydrogeological characterization, Multilayer aquifer, Polluted sites, Conceptual hydrogeological model.

Termini chiave: Caratterizzazione geologica e idrogeologica, Acquifero multifalda, Siti inquinati, Modello idrogeologico concettuale

Riassunto

Viene descritto l'approccio seguito per la caratterizzazione geologica ed idrogeologica di una falda superficiale interessata da contaminazione di solventi clorurati, nell'ambito di un progetto multidisciplinare teso alla sperimentazione di metodologie di *enhanced pump and treat* ed *enhanced natural attenuation* per la bonifica dei siti inquinati.

La sperimentazione riguarda un'area di 200 m² sita nel territorio comunale di Rho (Mi), dove sono state realizzate apposite perforazioni per un test di campo. L'area del sito test è isolata rispetto alla circolazione idrica sotterranea per la presenza di un diaframma impermeabile intestato in corrispondenza di un livello limoso-argilloso, che separa una circolazione superficiale da una più profonda. La struttura di contenimento è stata realizzata nei primi anni '80 nel focolaio di contaminazione per limitarne la

diffusione.

La schematizzazione della circolazione idrica sotterranea è stata ottenuta realizzando il modello geologico-tecnico e idrogeologico concettuale a diverse scale a denominatore decrescente (scala comunale, locale e di sito), evidenziando opportunamente eterogeneità che a scala minore potevano essere trascurate. I risultati ottenuti evidenziano il particolare ruolo del livello a bassa permeabilità, che a scala di dettaglio e su lungo periodo non garantisce l'isolamento della falda profonda da quella superficiale, anche in virtù dell'aumento della differenza di carico idraulico tra le due falde, causato dalla realizzazione del diaframma impermeabile.

1. Introduzione

Il lavoro illustra le attività di indagine geologica e idrogeologica condotte nell'ambito di un progetto di ricerca finalizzato alla sperimentazione di nuove tecnologie di biorisanamento in situ delle falde contaminate da solventi clorurati (Aulenta *et al.* 2004a; Aulenta *et al.* 2005). Tale progetto nasce dall'esigenza di favorire lo sviluppo di tecnologie di bonifica alternative al classico approccio "Pump and treat", che abbiano modalità di gestione tecnico-finanziarie più favorevoli.

Il sito di studio è ubicato nel comune di Rho (Mi), sito a circa dieci chilometri a NW di Milano, in corrispondenza di un'area industriale dismessa, che ha subito nel corso degli anni numerosi episodi di contaminazione da solventi clorurati. In questo contesto è stato realizzato un campo prove dove testare le metodologie di bonifica sperimentate in laboratorio, ubicato nella zona maggiormente contaminata (Aulenta *et al.* 2004b). Il campo-prova è caratterizzato dalla presenza di un diaframma impermeabile anulare che si attesta alla profondità di circa 9 metri dal piano campagna in corrispondenza di un livello a granulometria fine, avente bassa permeabilità. Questa struttura è stata realizzata al fine di limitare la diffusione nel sottosuolo delle sostanze inquinanti sversate, nel tentativo di isolare la porzione di falda superficiale sulla quale si sta sperimentando la bonifica.

Le diverse indagini, condotte a differente scala, hanno riguardato ricostruzioni stratigrafiche, analisi granulometriche, sezioni geologiche e idrogeologiche, prove di pompaggio, campagne piezometriche, monitoraggio in continuo della falda.

La finalità dello studio è stata quella di evidenziare l'importanza dell'esecuzione di un'accurata campagna di indagini geologiche ed idrogeologiche nella fase preliminare di un progetto di bonifica. Tale fase risulta propedeutica e fondamentale rispetto a quelle successive, al fine di evitare l'insorgere di difficoltà in corso d'opera che possano diminuire o compromettere l'efficacia degli interventi di disinquinamento progettati.

2. Caratterizzazione a scala comunale

2.1 Caratterizzazione geologica

Il comune di Rho, collocato nella pianura lombarda, è caratterizzato geologicamente dalla presenza di sedimenti alluvionali e fluvioglaciali quaternari. In affioramento e nel sottosuolo, nell'area si possono distinguere le unità (Provincia di Milano 1995):

- *Fluvioglaciale Mindel Auct.* ("Diluvium Antico Auct."); depositi costituiti da ciottoli arrotondati immersi in una matrice sabbioso-limosa di colore ocra-rossiccio. Tale unità è facilmente riconoscibile per la presenza al tetto del caratteristico vetusol ("ferretto") di colore rossastro con spessore circa di 3 m e poco permeabile alle acque di infiltrazione;

- *Fluvioglaciale Riss Auct.* ("Diluvium medio" Auct.); è costituito da ciottoli arrotondati e ghiaie in matrice sabbiosa giallo ocra e locale presenza di lenti conglomeratiche; in superficie forma un terrazzo che borda verso W quello del "Diluvium Antico Auct."; nell'area in esame viene rinvenuto nel sottosuolo alla profondità media di circa 40-50 m;

- *Fluvioglaciale Würm Auct.*: depositi costituiti da ghiaie e sabbie in matrice limosa e rare lenti limoso-argillose; sono caratterizzati dalla presenza, nella parte sommitale, di un livello di natura sabbioso-argillosa; tale unità costituisce il "livello fondamentale della pianura" e i terrazzi ribassati dei corsi d'acqua principali (Avanzini *et al.* 1996).

- *Alluvioni antiche*: depositi olocenici antichi costituiti prevalentemente da ghiaie con ciottoli di tipo calcareo e calcareo marnosi passanti a ghiaie sabbiose più a sud, intercalati a livelli sabbioso-limosi dovuti alle esondazioni.

- *Alluvioni recenti*: depositi ghiaiosi e sabbiosi con lenti d'argilla e limo più o meno estese.

Le caratteristiche geologiche del territorio di Rho differiscono da quelle sopra illustrate, limitatamente alla presenza di un primo livello a grana fine, collocato a circa 6-10 m di profondità dal p.c., caratterizzato da un modesto spessore (1-2 m) e da una discreta estensione areale.

Al fine di verificare le caratteristiche geologiche del sottosuolo, è stata ricostruita una colonna idrostratigrafica tipo dell'area compresa tra i comuni di Rho e Pero (Fig. 1). Si evidenzia la presenza del livello a grana fine a profondità variabile da N a S tra 6,5-9,5 m. Procedendo da W verso E il setto si avvicina gradualmente alla superficie topografica fino ad incontrare il p.c. in corrispondenza dell'abitato di Pero (Calloni *et al.* 1999). Più in profondità si rinvencono livelli limoso-argillosi di spessore maggiore.

2.2 Caratterizzazione idrogeologica

La successione idrogeologica è caratterizzata dalla presenza di più falde idriche sovrapposte (Fig. 1), separate tra loro da orizzonti limoso-argillosi, la cui presenza e spessore tende ad aumentare con la profondità. Un primo acquifero, sede di una falda libera avente uno spessore medio saturo di 35 m, si estende fino ad una profondità di 45 m, con soggiacenza inferiore a 10 m. Tale acquifero è costituito da sedimenti

medio-grossolani (ghiaie e sabbie) con presenza di limitate e isolate lenti limose-argillose. Il primo acquifero risulta separato dal sottostante secondo acquifero tramite livelli limoso-argillosi dello spessore variabile tra 5 e 10 m. Questo acquifero contiene una falda semiconfinata che si estende da 50-60 m a 75-80 m dal p.c. ed è caratterizzato da sedimenti a granulometria medio-fine (Avanzini *et al.* 1995, Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip 2002).

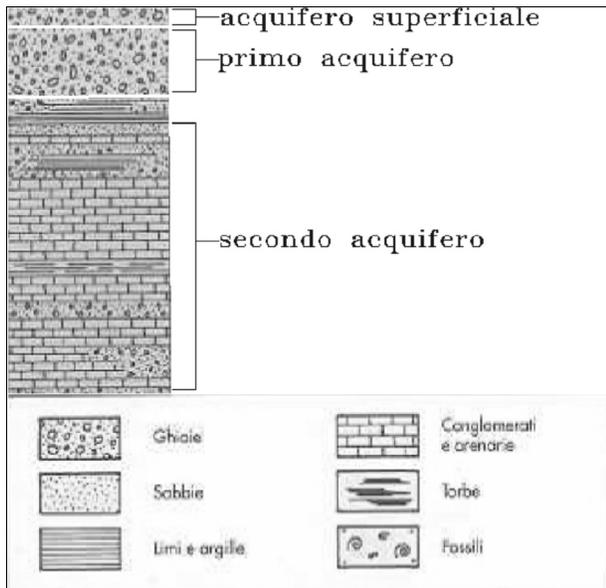


Fig. 1 - Schema degli acquiferi nell'area studiata.
Aquifers of the studied area.

In quasi tutto il territorio comunale è stata riscontrata la presenza di un livello argilloso a 5-9 m di profondità dal p.c., di spessore tra 0,5 e 2 m, che determina la presenza di una falda sospesa di interesse locale, di seguito indicata come "falda superficiale" (Fig. 1).

Studi pregressi (Beretta *et al.*, 2003) indicano che la base del primo acquifero mostra un'immersione regolare verso sud con quote comprese tra 160 e 65 m s.l.m. con un pendenza di circa 0,7%. La base del secondo acquifero immerge nella stessa direzione con una pendenza dell'ordine dello 0,4-0,5% e si ritrova ad una profondità di 90-100 m. La direzione principale di flusso della prima falda è orientata circa NW-SE e il suo andamento risulta caratterizzato da oscillazioni stagionali dell'ordine di 1,5-2,5 m. I minimi stagionali coincidono, in linea di massima, con i periodi di Dicembre-Gennaio e Aprile-Maggio, mentre i massimi si registrano tra agosto e novembre (Provincia di Milano 1999).

La trasmissività del primo acquifero presenta valori compresi tra 0,26 e $1,5 \times 10^{-2}$ m²/s, con un aumento dei valori verso W dovuto a spessori maggiori; nel secondo acquifero si registrano valori inferiori che oscillano mediamente tra 3 e 7×10^{-3} (Beretta *et al.* 2003). Dagli spessori degli acquiferi si ricava indirettamente una conducibilità idraulica pari per il primo acquifero a valori sono compresi tra 1×10^{-4} e

$3,3 \times 10^{-4}$ m/s, mentre il secondo acquifero presenta valori inferiori, compresi nello stesso ordine di grandezza (Beretta *et al.* 2003).

3. Caratterizzazione a scala del sito industriale

3.1 Caratterizzazione geologica

Nell'approccio ad una scala più grande, corrispondente all'estensione del sito industriale (Fig. 2), è stata focalizzata l'attenzione sulla falda superficiale.

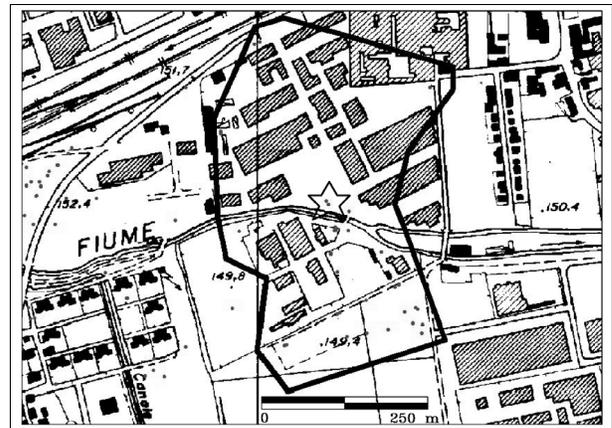


Fig. 2 - Area del sito industriale (contorno nero), circa 30.000 m², e area del test di campo (stella), circa 200 m².
Industrial site area (black border), 30.000 m², and test-site area (star), 200 m².

In quest'ambito sono state esaminate tutte le stratigrafie disponibili del database della provincia di Milano, realizzando opportune sezioni (Fig. 3). Gli elaborati prodotti evidenziano la continuità dello strato argilloso che sostiene la falda superficiale limitatamente a questa scala di lavoro. Tale livello sembra infatti chiudersi verso E-SE, dove viene rinvenuto solo in alcuni sondaggi. Questo porta ad affermare che in tali zone il suddetto livello sia presente in lenti con diverse soluzioni di continuità.

In accordo con quanto derivato da studi condotti su un'area limitrofa (Avanzini *et al.* 1996) sono state distinte tre unità litologiche:

- unità superficiale: costituita da limo con sabbia argillosa-ghiaiosa pedogenizzata di colore bruno scuro, dello spessore di 0,5-1,5 m;
- unità intermedia: caratterizzata da lenti di ghiaia con sabbia debolmente limosa con intercalazioni di ciottoli e ghiaie grossolane di colore bruno dallo spessore variabile tra 5 e 9 m, sede della falda superficiale.
- unità di base a bassa permeabilità: rappresentata dallo strato a grana fine dallo spessore di 1-2 m. Nella zona del sito industriale rappresenta il letto della falda sospesa. Da indagini geoelettriche risulta che lo strato argilloso è inclinato in direzione NW-SE e la superficie del tetto risulta caratterizzata da numerose irregolarità morfologiche.

3.2 Caratterizzazione idrogeologica

Al fine di verificare l'andamento locale della falda superficiale e della sottostante prima falda sono state eseguite cinque campagne piezometriche, nel periodo compreso tra ottobre 2004 e aprile 2005.

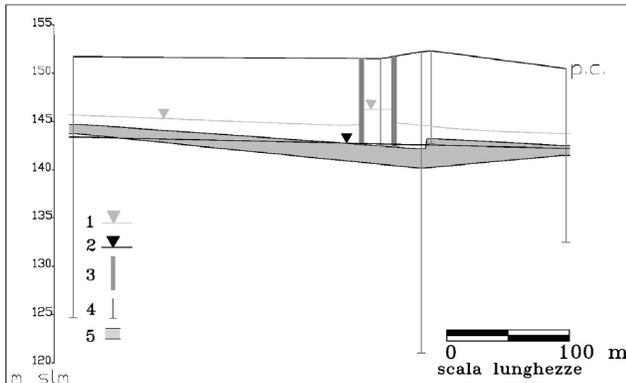


Fig. 3 - Sezione idrogeologica schematica nell'area del sito industriale, direzione NNW-SSE. 1) Traccia della superficie piezometrica della falda superficiale; 2) Traccia della superficie piezometrica della prima falda; 3) Diaframma impermeabile; 4) Perforazioni utilizzate; 5) Setto a bassa permeabilità.

Hydrogeological section of the studied area, NNW-SSE direction. 1) Trace of the water table of the shallow aquifer; 2) trace of the potentiometric surface of the first aquifer; 3) Impermeable diaphragm; 4) Boreholes; 5) Low permeability fine grained layer.

Le piezometrie ricostruite (Fig. 4) evidenziano che la prima falda superficiale ha una direzione di flusso circa NE-SW, mostrando un andamento diverso rispetto a quanto osservato a scala comunale (Provincia di Milano 1999). Il passaggio di scala e il conseguente esame di un maggior numero di informazioni (stratigrafie e dati piezometrici) possono spiegare le differenze riscontrate rispetto alla scala comunale. La falda superficiale mostra una direzione di flusso NNW-SSE e presenta un alto piezometrico anomalo in corrispondenza della zona dove la circolazione idrica sotterranea è impedita dalla presenza del diaframma impermeabile. Si è osservato che il carico idraulico della falda superficiale è sempre maggiore rispetto a quello della prima falda, con una differenza media di circa 2 m. E' stato inoltre possibile stimare per la prima falda un gradiente idraulico medio del 6%, analogo a quello naturale della falda superficiale. Le variazioni di livello piezometrico rispetto alla campagna iniziale dell'ottobre 2004 (Fig. 5) evidenziano un generale abbassamento del livello piezometrico delle due falde nel tempo, con un'anomalia evidente rappresentata dall'andamento del livello piezometrico all'interno della zona delimitata dal diaframma impermeabile. Ciò conferma l'isolamento effettivo operato dal diaframma impermeabile nell'area del sito-test della falda superficiale, che in quella porzione verrebbe ricaricata esclusivamente dalle precipitazioni zenitali.

Per la falda superficiale sono stati calcolati dei valori medi di trasmissività pari a $3,5 \times 10^{-3}$ m²/s, conducibilità idraulica pari a 1×10^{-3} m/s e coefficiente di immagazzinamento pari al 0.22 (Avanzini *et al.* 1996). La conducibilità idraulica verticale del setto a bassa permeabilità, determinata attraverso prove Lefranc, è risultata pari a 7×10^{-8} m/s (Avanzini *et al.* 1996). La prima falda è stata caratterizzata anche mediante l'esame di *slug test*, che hanno fornito un valore di conducibilità idraulica medio di $4,5 \times 10^{-5}$ m/s (Civita *et al.* 2002).

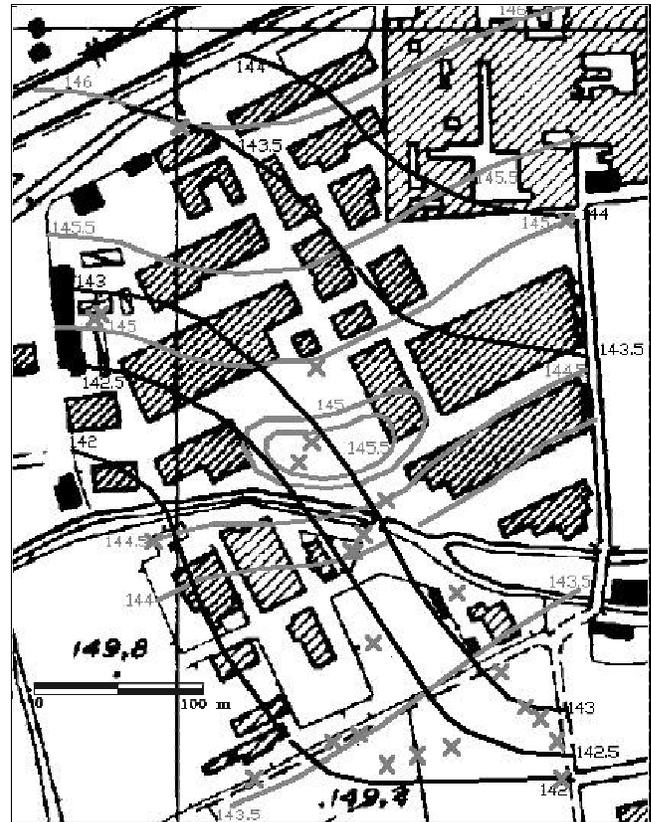


Fig. 4 - Andamenti delle superfici piezometriche rilevate nel Gennaio 2005. Le isopiezometriche (m s.l.m.) della prima falda sono rappresentate con colore più scuro. In grigio le isopiezometriche della falda superficiale.

Piezometric map of January 2005. Darker lines represent the potentiometric lines (m a.s.l.) of the first aquifer. Grey lines represent the potentiometric lines of the shallow aquifer

4. Caratterizzazione a scala del campo prova

4.1 Caratterizzazione geologica

Le indagini sono state effettuate in parallelo alla sperimentazione condotta dal progetto multidisciplinare che riguarda un'area di 200 m² (Fig. 2), dove sono stati realizzati pozzi e piezometri per un test di campo.

Grazie ai 3 sondaggi specificamente eseguiti in corrispondenza di tale area e al reperimento di stratigrafie presenti nel database della provincia di Milano, è stato possibile ricostruire l'assetto stratigrafico dei primi nove

metri di profondità. Il profilo stratigrafico, procedendo dall'alto verso il basso, mostra uno spessore di circa 1,5 m di materiale di riporto eterogeneo sabbioso ghiaioso in matrice limosa, al cui interno si rinvengono livelli decimetrici di materiale bituminoso nerastro, 0,5-1 m di limo sabbioso debolmente argilloso arancione scuro, 0,5-1 m di sabbia grossolana con rara ghiaia e 4,5-6,5 m circa di ghiaie medie-grossolane in matrice sabbiosa con ciottoli poco evoluti. La presenza dell'unità a bassa permeabilità che sostiene la falda superficiale risulta confermata dall'analisi di altre stratigrafie che nelle zone limitrofe superano i 10 m di profondità. Inoltre sono stati prelevati dei campioni, rappresentativi delle diverse litologie riconosciute, al fine di una caratterizzazione granulometrica (Tabella 1), utilizzando lo standard di riferimento USCS.

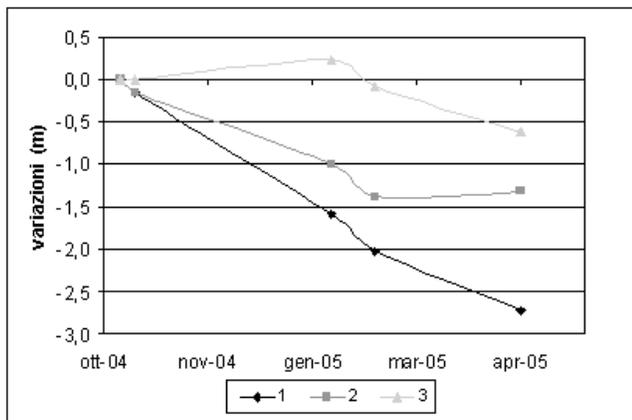


Fig. 5 -Variazioni nel tempo del livello piezometrico misurato in tre piezometri campione. 1) Livello piezometrico registrato in prima falda; 2) livello piezometrico registrato in falda superficiale; 3) livello piezometrico registrato in falda superficiale all'interno del campo prova (area confinata dal diaframma impermeabile).

Water table variations measured in three boreholes. 1) piezometric level of the first aquifer; 2) piezometric level of the shallow aquifer; 3) piezometric level of the shallow aquifer in test-site area (laterally confined by impermeable diaphragm).

4.2 Caratterizzazione idrogeologica

La determinazione dei parametri idrodinamici della falda superficiale è stata effettuata tramite una prova di pompaggio eseguita nel campo prova, in un piezometro che attraversava per intero l'acquifero in esame. La prova è stata eseguita estraendo dal piezometro una portata di 6,42 l/min e misurando in continuo la variazione del livello piezometrico ogni due minuti, in due piezometri vicini a quello di estrazione. I valori della trasmissività e del coefficiente di immagazzinamento calcolati rispettivamente dai due piezometri sono compresi tra: $2,1-2,7 \times 10^{-4}$ m²/s e 0,17-0,35. Considerando un valore di trasmissività 2×10^{-4} m²/s e uno spessore dell'acquifero saturo di 3,5 m, si è calcolata indirettamente la conducibilità idraulica dell'acquifero superficiale pari a 6×10^{-5} m/s. Tale valore risulta direttamente confrontabile con quello medio del

primo acquifero ($k = 4,5 \times 10^{-5}$ m/s) ottenuto dagli *slug test* (Civita et al. 2002).

W	P(m)	% G	% S	% L	% A	USCS
PM2	0,6	48	31	15	6	SM-SC
	2	25	46	18	10	SM-SC
	7,5	32	44	16	8	SM-SC
PM4	1,8	1	33	44	22	ML
	2	44	32	15	9	SM-SC
	5,6	35	40	18	7	SM-SC
PM7	1,15	36	31	23	10	SM-SC
	1,5	7	43	30	20	ML
	2,8	41	50	6	3	SM
	4,2	43	35	16	6	SM-SC

Tabella 1 - Classificazione granulometrica dei campioni prelevati. W) piezometro; P) profondità dal piano campagna; G) ghiaia; S) sabbia; L) limo; A) argilla; USCS: classificazione secondo la nomenclatura USCS.

Grain size composition of samples. W) borehole; P) depth from ground surface; G) gravel; S) sand; L) silt; A) clay; USCS) USCS classification.

Per verificare il ruolo idrodinamico del setto a bassa permeabilità, che determina nell'area del campo prova una differenza di carico idraulico superiore a 2,5 m (Fig. 3), ipotizzando che le perdite di carico avvengano completamente nel livello a grana fine, è stata calcolata la sua conducibilità idraulica verticale, che è risultata pari a $3,5 \times 10^{-8}$ m/s, direttamente confrontabile con quella risultante dalle indagini precedentemente eseguite in aree limitrofe (7×10^{-8} m/s) (Avanzini et al. 1996). Tale valore, sebbene determini la separazione della falda superficiale da quella più profonda, a causa del limitato spessore del setto a bassa permeabilità (<1m), non sembra garantire l'isolamento a lungo termine della falda superficiale.

L'ipotesi di una comunicazione a lungo termine (>10 anni) tra le due falde assume maggiore considerazione se si prende in esame la ricarica effettiva della falda. Questa è stata stimata indirettamente, sulla base di una porosità efficace del 20%, considerando un metro circa di oscillazione della superficie piezometrica su base annuale, pari a circa 200 mm/anno. Conseguentemente nell'area racchiusa dal diaframma impermeabile (circa 200 m²) sono disponibili potenzialmente ogni anno circa 40 m³ di acqua, la cui unica via d'uscita è rappresentata dalla filtrazione attraverso il setto a bassa permeabilità, verso la sottostante prima falda.

La presenza del diaframma impermeabile, che ha indubbiamente causato un aumento della differenza di carico idraulico tra le due falde, sebbene abbia permesso di limitare la migrazione laterale delle sostanze inquinanti, ha favorito la drenanza delle acque, con passaggio dalla falda superficiale verso la falda sottostante, determinando probabilmente a sua volta la migrazione verso il basso della frazione di inquinante trasportata passivamente in

soluzione.

5. Conclusioni

L'obiettivo principale dello studio è stato quello di realizzare un modello geologico e idrogeologico del sito in esame a tre scale differenti, a denominatore decrescente. Inizialmente è stato realizzato un inquadramento a scala comunale (area di circa 22 km²), cui è seguita la ricostruzione della circolazione idrica alla scala del sito industriale (30.000 m²) ed infine si è ricostruito il modello idrogeologico dell'area adibita alla realizzazione del test di campo (circa 200 m²). L'approccio a scala telescopica è stato adottato al fine di evidenziare come eterogeneità poco significative alla scala comunale possano invece risultare determinanti nella realizzazione del modello concettuale di un'area di estensione minore come quella del sito industriale e ancor più in un'area ristretta come quella del campo prova.

A seguito dell'analisi eseguita si può affermare che:

- L'unità idrogeologica che contiene la falda superficiale risulta costituita alla scala comunale fondamentalmente da ghiaie e sabbie in matrice limoso-argillosa; localmente sono presenti diversi livelli a granulometria variabile difficilmente correlabili tra di loro che contribuiscono a rendere abbastanza eterogeneo il sottosuolo analizzato.
- Il setto a bassa permeabilità posto al letto dell'acquifero superficiale risulta sempre presente nella zona collocata a NW dell'area del sito industriale, mentre risulta discontinuo procedendo verso E in direzione del comune di Pero.
- A scala comunale il primo acquifero presenta valori di trasmissività compresi tra 0,26 e 1,5x10⁻² m²/s e valori di conducibilità idraulica compresi tra 1 e 3,3x10⁻⁴ m/s (Beretta *et al.* 2003).
- Nella caratterizzazione a scala del sito industriale, è stato calcolato per la falda superficiale un valore medio di trasmissività pari a 3,5 x 10⁻³ m²/s e un coefficiente di immagazzinamento medio di 0,22, mentre la conducibilità idraulica della stessa falda è stata valutata nell'ordine di 1x10⁻³ m/s (Avanzini *et al.* 1996). I valori di conducibilità idraulica della prima falda, calcolati nell'area del sito industriale tramite slug test, evidenziano una certa eterogeneità dell'acquifero, attestandosi su valori medi di 4,5 x 10⁻⁵ m/s (Civita *et al.* 2002);
- Il flusso della prima falda ha nell'area del sito industriale andamento circa NE-SW e un gradiente idraulico medio del 6‰, mentre la falda superficiale presenta una direzione di flusso orientata circa NNW-SSE e un gradiente idraulico medio analogo al precedente. Quest'ultima risulta inoltre caratterizzata da un anomalo alto piezometrico collocato in coincidenza con l'area delimitata dal diaframma impermeabile, che ne limita la comunicazione con l'area esterna.

- La falda superficiale, nell'area del campo-prova, risulta avere una trasmissività dell'ordine di 2 x 10⁻⁴ m²/s e un coefficiente di immagazzinamento compreso tra 0,17 e 0,35, da prove di pompaggio appositamente eseguite. La conseguente conducibilità idraulica orizzontale dell'acquifero superficiale risulta pari a 6 x 10⁻⁵ m/s. Tale valore risulta di oltre un ordine di grandezza inferiore rispetto a quello considerato a scala del sito industriale, a testimonianza dell'eterogeneità dell'acquifero superficiale.
- Per il setto a bassa permeabilità, il cui spessore è inferiore al metro nell'area del test, si è calcolata una conducibilità idraulica verticale pari a 3,5 x 10⁻⁸ m/s. Tale valore non garantisce a lungo termine l'isolamento idraulico delle due falde.
- Di conseguenza, a lungo termine è possibile una significativa filtrazione di acque contaminate dalla falda superficiale verso quella sottostante attraverso il setto a bassa permeabilità. Tale processo è favorito dalla presenza del diaframma impermeabile, che determina un aumento della differenza di carico idraulico tra le due falde e la conseguente potenziale filtrazione dell'intera ricarica naturale dell'area confinata (circa 200 mm/anno), stimata nell'ordine di una portata di 40 m³/anno di acqua.

La fase successiva di studio, tuttora in corso, prevede la realizzazione di simulazioni tramite modellazione numerica del flusso e del trasporto alle tre differenti scale di indagine, al fine di verificare il modello concettuale proposto. Ulteriori dati di terreno in fase di acquisizione consentiranno una più accurata taratura dei modelli di simulazione. Infine, apposite analisi di sensitività condotte sui parametri che presentano una maggiore variabilità aiuteranno a stabilire i limiti di validità dei modelli proposti.

L'approccio multiscale qui adottato, applicato alla caratterizzazione geologico-idrogeologica di siti inquinati, rappresenta un valido strumento per valutare la rilevanza di minime variazioni litologico-stratigrafiche nella corretta formulazione di un modello idrogeologico e nella conseguente adozione di un progetto di bonifica. L'esperienza condotta consente inoltre di ribadire l'esigenza di realizzare una dettagliata e specifica caratterizzazione geologica e idrogeologica nella fase preliminare di un progetto di bonifica.

Ringraziamenti

Lavoro eseguito nell'ambito del progetto PRIN 2004 "Modelli concettuali e numerici di acquiferi per il risanamento e la prevenzione dall'inquinamento", responsabile scientifico Prof. Francesca Bozzano. La sperimentazione a scala di sito è stata realizzata con fondi del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (PR.3.29/URM), resp. scientifico Prof. Mauro Majone.

Bibliografia

- Aulenta, F., Bianchi, A., Majone, M., Petrangeli Papini, M., Potalivo, M., Tandoi, V., 2005. Assessment of natural or enhanced in situ bioremediation at a chlorinated solvent-contaminated aquifer in Italy: a microcosm study. *Environmental International* 31, 185-190.
- Aulenta, F., Leccese, M., Majone, M., Petrangeli Papini, M., Rossetti, S., Stracqualursi, N., Tandoi, V., Viotti, P., 2004a. Assessing the potential for natural or enhanced in-situ bioremediation at a TCE-contaminated site by coupling process analysis and modelling. *Proceedings workshop "Saturated & Unsaturated Zones"*, Rome, 5-7 may 2004, 31-36.
- Aulenta, F., Majone, M., Petrangeli Papini, M., Leccese, M., Viotti, P., 2004b. Biorisanamento in situ di falde contaminate da solventi clorurati: un caso di studio in provincia di Milano. Parte II: attività di ricerca e sperimentazione. *Atti del convegno: "Nuovi indirizzi nella bonifica dei siti inquinati"*, CD-ROM, Provincia di Milano.
- Avanzini, M., Beretta, G.P., Francani, V., Nespoli, M., 1995. Indagine preliminare sull'uso sostenibile delle falde profonde nella Provincia di Milano. C.A.P. Milano.
- Avanzini M., Beretta, G.P., Giudici, D., Nespoli, M., Pagotto, A., 1996. Remediation systems of a Hydroxyisobutyronitrile spill in Milano area (Italy). *Proceedings 1st International Conference "The Impact of Industry on Groundwater Resources"*. Cernobbio, Como (Italy), 22-24 May, 797-805.
- Beretta, G.P., Bianchi, M., Raimondi, P., 2003. Modellazione di una di una barriera idraulica per la gestione in sicurezza della bonifica riqualificazione ambientale dell' ex raffineria Rho-Pero (Milano). *Geologia tecnica e ambientale* 1, 35-46.
- Calloni, A., Sala, P., Virgilio, R. , 1999. Inquinamento della falda nell'ambito territoriale di Pero e Rho. Provincia di Milano.
- Civita, M., Fiorucci, F., Pizzo, S., Sappa, G., 2002. Caratterizzazione idrodinamica dell'acquifero soggiacente il sito di bonifica di un'area industriale della provincia di Milano. *Ingegneria e geologia degli acquiferi* 17, 45-55.
- Provincia di Milano, 1995. Le risorse idriche sotterranee della provincia di Milano, vol.1: lineamenti idrogeologici. Assessorato all'Ambiente -Politecnico di Milano D.S.T.M.-Geologia Applicata.
- Provincia di Milano, 1999. Esempio di intervento di disinquinamento di aree industriali sotto il controllo dell'ente pubblico: l'ex raffineria Agip di Rho". Provincia di Milano, 1-7.
- Provincia di Milano, 2002. La Provincia di Milano per la tutela e la valorizzazione della risorsa idrica. Cd-rom Provincia di Milano.
- Regione Lombardia, Eni Divisione Agip, 2002. *Geologia degli acquiferi padani*. S.EL.CA (Firenze).