

Approccio geostatistico per la simulazione del flusso e del trasporto nel Calcarea di Bari

Claudia Cherubini¹, Concetta Immacolata Giasi²

¹Politecnico di Bari, claudia.cherubini@poliba.it

²DICA- Politecnico di Bari, c.giasi@poliba.it

Geostatistical approach for flow and transport simulation in Bari's limestone.

ABSTRACT: In fissured media, especially in karstified rocks, the high heterogeneity, the groundwater flow velocity, the presence of directions and preferential flow levels are factors that bring to uncertainty in planning remediation interventions. Moreover the anisotropy of the physical parameters and the relating different hydrodynamic conditions determine variability and correlation in their spatial distributions that could be well represented throughout geostatistical analysis of the data. The study has been carried out in a specific area, situated in the city centre of Bari, in which the aquifer is heavily contaminated by petroliferous products. Geomechanical data obtained in the carried out boreholes during the different sampling campaigns have been used and in particular the population of RQD (Rock Quality Designation) values has been considered. The simulation of flow obtained applying the finite element computer code Feflow 5.1 (Wasy) and the results of transport simulation have showed a different behavior at all investigated depths. The obtained results delineate a partly different scenario from the one that was defined on the basis of the previously carried out investigations. This three dimensional model represent the essential basis to study the dynamic behavior of the aquifer during any remediation intervention in order to allow optimizations on the theoretic and economic point of view and verifications of the effective functionality of the system; moreover it could be helpful during the monitoring of groundwater quality.

Key terms: fractures, heterogeneity, RQD, geostatistics, flow and transport modeling.

Termini chiave: fratture, eterogeneità, RQD, geostatistica, modellazione del flusso e del trasporto.

Riassunto

In mezzi fessurati, soprattutto in rocce carsificate, la pronunciata eterogeneità, la velocità del flusso idrico, la presenza di direzioni e livelli di flusso preferenziali sono tutti fattori che comportano incertezza nella progettazione degli interventi di bonifica. Inoltre l'anisotropia dei parametri fisici e le relative differenti condizioni idrodinamiche, determinano variabilità e correlazioni nelle loro distribuzioni spaziali che possono essere ben rappresentate mediante analisi geostatistica dei dati.

Lo studio è stato condotto in un'area specifica, sita nella città di Bari, in cui l'acquifero risulta pesantemente contaminato da sostanze petrolifere. Sono stati utilizzati, tra l'altro, anche i dati geomeccanici rilevati nei sondaggi effettuati nelle varie campagne di indagine ed in particolare si è considerata la popolazione dei valori dell'RQD (Rock Quality Designation). La simulazione del flusso ottenuta applicando il codice di calcolo agli elementi finiti Feflow 5.1 (Wasy) e i risultati della simulazione del trasporto hanno mostrato un comportamento differente alle varie profondità investigate. I risultati ottenuti delineano uno scenario in parte diverso da quello che era stato definito sulla base delle indagini precedentemente condotte. Il modello tridimensionale ottenuto rappresenta la base essenziale per

studiare il comportamento dinamico dell'acquifero durante qualsiasi intervento di bonifica al fine di consentire ottimizzazioni dal punto di vista tecnico ed economico e verifiche dell'effettiva funzionalità del sistema. Ciò non solo ai fini della progettazione della bonifica ma anche del monitoraggio della qualità della falda.

Introduzione

Negli ammassi carbonatici mesozoici murgiani, l'esistenza di importanti discontinuità interconnesse rende frequente la presenza di vie di flusso e livelli idrici preferenziali con lo sviluppo di reti carsiche che agiscono da veri e propri collettori in cui si espleta la maggior parte del flusso idrico sotterraneo. I problemi della modellizzazione del flusso in tale acquifero diventano di fondamentale importanza soprattutto ove si debbano progettare interventi di bonifica. In tali circostanze, infatti, la canalizzazione del flusso secondo livelli a differente permeabilità può consentire modalità di trasporto della contaminazione di difficile interpretazione e condizionare quindi l'efficienza del risanamento. Prassi ricorrente nella modellizzazione del flusso e trasporto in mezzi fratturati e carsici è assumere il mezzo poroso equivalente e quindi inglobare in pochi parametri aspetti di anisotropia rilevabili a più livelli.

La criticità del problema è stata già evidenziata in alcuni lavori già prodotti sul tema. Numerosa letteratura del resto evidenzia i rischi di tali assunzioni.

Un caso di studio relativo all'“approccio del mezzo poroso equivalente” (EPM) è stato presentato da Teutsch (1988), che ha costruito un modello tridimensionale alle differenze finite di una parte moderatamente carsica dell'acquifero Swabian Alb situato in Germania. L'autore ha assunto che questo approccio si poteva ritenere adeguato sulla base dei risultati dei carotaggi che mostravano condizioni sotterranee piuttosto omogenee. Ciononostante non si poteva escludere che il deflusso sotterraneo avesse luogo attraverso zone caratterizzate da alta permeabilità (Kovács 2003). Long et al ha implementato un modello bidimensionale agli elementi finiti, in cui la geometria e la localizzazione delle fratture vengono generate in maniera random, e le fratture sono rappresentate da elementi monodimensionali. Essi hanno esaminato la possibilità di sostituire il sistema discreto di fratture di un acquifero fessurato con un continuo poroso equivalente facendo uso di un tensore simmetrico di permeabilità equivalente. Essi hanno rilevato inoltre che il sistema di fratture si comporta in misura maggiore come un mezzo poroso se la densità delle fratture aumenta, se l'apertura di queste è costante piuttosto che disomogeneamente distribuita, se l'orientazione presenta una certa struttura spaziale piuttosto che essere costante, o infine se vengono considerati campioni di dimensione maggiore (Kovács 2003).

Alcuni approcci modellistici

Per quanto riguarda il flusso nei mezzi carsici, possono essere distinti due approcci basilari.

L'*approccio discreto* considera il flusso all'interno di singole fratture o condotti. Al contrario, l'*approccio continuo* tratta l'eterogeneità in termini di parametri effettivi del modello e della loro distribuzione spaziale (Kovács, 2003). Sono disponibili inoltre vari approcci combinati (Király, 1985, 1988; Király & Morel, 1976). Teutsch and Sauter (1991) hanno proposto un metodo di classificazione gerarchico secondo il quale cinque differenti approcci possono essere utilizzati per la modellizzazione idrodinamica in un acquifero fratturato e carsico:

1) L'Approccio Discreto del Network di Fratture (DFN),
2) l'Approccio Discreto del Network di Canali (DCN) 3) l'Approccio del Doppio Continuo (DC), 4) L'Approccio Combinato Discreto- Continuo (CDC).

1) *Discrete Fracture Network Approach (DFN)*, 2) *Discrete Channel Network Approach (DCN)*, 3) *Double Continuum Approach (DC)*, 4) *Combined Discrete-Continuum Approach (CDC)*.

Nell'Approccio Discreto del Network di Fratture (DFN), solo un certo set di fratture è considerato permeabile. Si assume inoltre che la matrice presenti una permeabilità trascurabile. Questo concetto semplifica il sistema reale in un network di piani di fratturazione bidimensionali. Esso è

applicabile preferibilmente per acquiferi a matrice rocciosa fratturata. La localizzazione, lunghezza, direzione e apertura delle fratture vengono generate statisticamente (Kovács, 2003).

L'Approccio Discreto del Network di Canali (DCN) ha lo scopo di modellizzare il flusso in una rete di canali monodimensionali i quali rappresentano i condotti carsici o le intersezioni tra le fratture. La rete di condotti può essere generata statisticamente o può riprodurre la situazione reale.

La difficoltà di ottenere dati sufficientemente accurati per la costruzione di modelli DCN o CDC e l'impossibilità dell'approccio EPM di riprodurre l'eterogeneità degli acquiferi fratturati e carsici, hanno motivato l'utilizzo del metodo DC, il quale è in grado di simulare specifiche caratteristiche dell'acquifero in questione senza richiedere una conoscenza dettagliata delle geometrie del network di condotti. I primi risultati numerici tramite l'approccio DC sono stati ottenuti da Teutsch (1988), il quale ha utilizzato il concetto originale di Barenblatt et al. (1960). In un modello DC sia la rete dei condotti che il mezzo fessurato sono rappresentati come continui. Lo scambio idrico e di soluto tra i due continui viene calcolato sulla base della differenza di carico idraulico, attraverso l'utilizzo di un termine di scambio lineare.

Lo studio proposto

Lo studio presentato in questo lavoro tende a fornire elementi aggiuntivi e interpretativi in un'area già oggetto di precedenti studi già pubblicati.

L'area è quella dell'ex gasometro, sita nel centro urbano di Bari, in cui è presente una pesante contaminazione della falda principalmente provocata dalla diffusione di composti organici aromatici (BTEX e IPA), di fenoli e di cianuri. Tale falda circola in un acquifero costiero, fratturato e carsico. Le indagini condotte nel piano di caratterizzazione hanno permesso di ricostruire la situazione in atto e di evidenziare, con elaborazioni sempre più accurate, differenze nei risultati ottenuti. Tali differenze sono di significativa rilevanza per il conseguimento della massima efficienza dell'intervento di bonifica da progettare.

Condizioni geomorfologiche e geologiche

Il sito di interesse è posto in un'area morfologicamente depressa, nota storicamente con il nome di “Lago di Marisabella”. In tale area erano convogliate le acque provenienti da due lame, impostate su linee di fratturazione preesistenti. Tali solchi erosivi sono incisioni di natura tettonico pluviale oggi totalmente obliterate dall'impianto urbanistico. Attraverso tali lame venivano smaltite le acque superficiali verso il mare con evidenti segni di alterazione dei materiali interessati.

Da un punto di vista geologico, l'area corrisponde al bordo costiero della piattaforma apula costituita da rocce carbonatiche del Gruppo dei Calcari delle Murge.(Cretaceo). L'assetto geolitologico è caratterizzato

dall'alto, sotto un sottile strato di terreno di riporto, da una successione litologica tardo-quadernaria con interposizione di terre rosse. L'assise superiore dei depositi quadernari risulta costituita da depositi sabbioso-calcarenitici, sovente degradati con rari livelli ben cementati, con intercalazioni di livelli sabbiosi (Giasi, 1982). La parte basale di tale formazione quadernaria è sotto falda e si presenta spesso meno cementata, degradata e alterata. Tali depositi affiorano, in trasgressione sul substrato carbonatico, rappresentato dal Calcarea di Bari che si presenta con un assetto monoclinico, ad andamento NW-SE, con immersione degli strati da 5 a 20° a SSW e pieghe ad ampio raggio, dislocate da faglie dirette che originano un'estesa struttura a gradinata. I depositi terziari e quadernari presentano un assetto stratigrafico orizzontale.

Condizioni idrogeologiche

La struttura idrogeologica presente nell'area dell'ex gasometro si presenta costituita da unità distinte che presentano caratteristiche idrogeologiche sostanzialmente omogenee individuabili in:

- Una unità idrogeologica superficiale costituita da terreni granulari prevalentemente costituiti da calcareniti con spessori molto variabili tra 1,0 e 3m dal p.c.
- Una seconda unità, discontinua nell'area, costituita da terre rosse e limi che si presenta con spessori molto variabili e raramente raggiunge i 6 m
- La terza unità costituita dal substrato calcareao ha profondità variabili nell'area tra i 7,0 e i 10m dal p.c.. Tale unità risulta intensamente fratturata e localmente presenta cavità carsiche che possono presentarsi riempite da terre rosse derivanti da processi di alterazione dei calcari.

Le condizioni geolitologiche e geostretturali dell'area in oggetto inducono a ritenere che l'area sia interessata da un antico solco erosivo impostatosi su lineamenti tettonici per cui la conseguente zona tettonizzata condiziona notevolmente il flusso idrico sotterraneo. Tali solchi erosivi corrispondono a fasce di terreno in cui si rilevano nel sottosuolo litozone alterate, orizzonti tettonizzati, carsismo concentrato e diffuso, intasamenti di prodotti residuali e tasche di detrito.

I metodi utilizzati

Una prima simulazione delle condizioni del flusso nell'area si è ottenuta dalla ricostruzione delle discontinuità presenti nell'area attraverso i valori di RQD desunti dai numerosi carotaggi eseguiti nell'area utilizzando l'algoritmo (Modeling Method) *Inverse-Distance Anisotropic* implementato nel software *rockworks 2004*. Tali valori sono stati messi in relazione alla permeabilità globale dell'ammasso roccioso percorso dal sistema di discontinuità fornendo, quindi, una stima indiretta delle modalità con cui si espleta il drenaggio sotterraneo. In tale prima analisi la ricostruzione della contaminazione è stata ottenuta dalla interpolazione numerica dei dati di contaminazione rilevati nei piezometri posti nell'area. La fig. 1 propone i risultati ottenuti in questa prima analisi pubblicati nel lavoro Cherubini et al, 2004b. Nella seconda analisi prodotta, nella descrizione del trasporto dei contaminanti si è considerata l'advezione, la diffusione e la dispersione, mentre sono stati trascurati i fattori di ritardo, le biodegradazioni e processi di natura chimico fisica presenti negli acquiferi carsici. Si è trascurato anche l'effetto della differente densità dovuta all'intrusione salina.

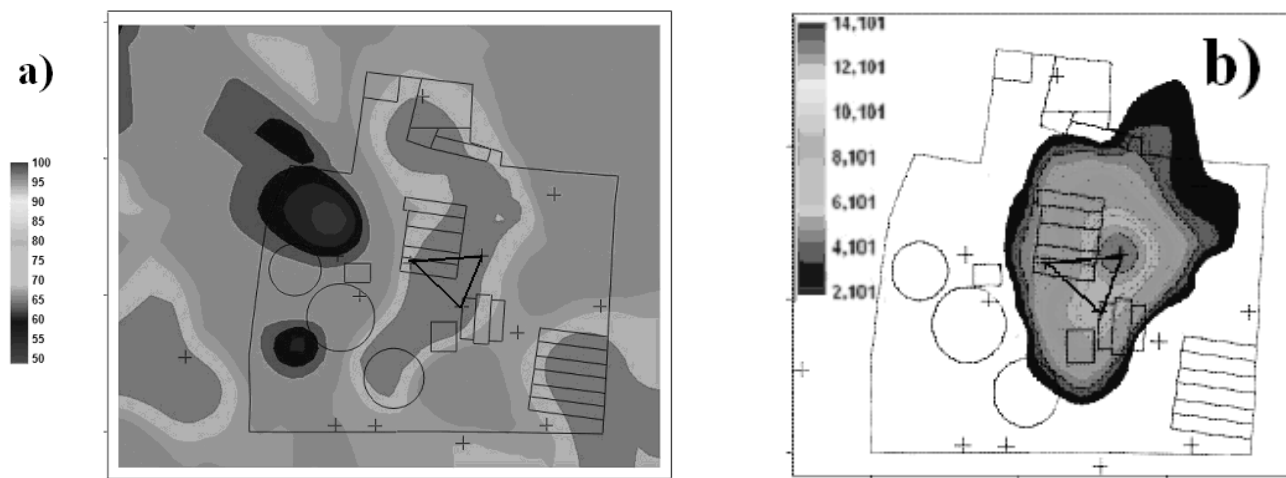
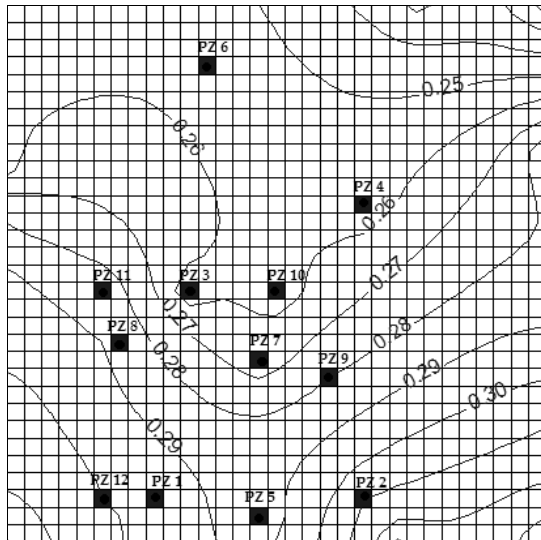


Fig. 1 – a) Mappa ottenuta mediante il complemento delle percentuali di RQD (sinistra) che mostra i percorsi più carsificati e suscettibili di un maggiore accumulo di sostanze contaminanti orientati nella stessa direzione del flusso di falda (da SO verso NE). b) Distribuzione delle concentrazioni ($\mu\text{g/L}$) in falda di Fenolo totale (destra) e localizzazione della zona triangolare a maggiore contaminazione.

a) Map of the complement of RQD's percentages (left) that shows the most karstified paths, susceptible to higher storage of contamination, oriented in the same groundwater flow direction (from SW to NE). b) Distribution of concentrations ($\mu\text{g/L}$) in groundwater of total phenols (right)

I primi due approcci sono già stati presentati in diversi lavori (Geofluid, 2005; Cherubini et al 2004 a), per cui, in questa sede si proporranno solo i risultati ottenuti. Gli approcci modellistici implementati sono rispettivamente:

- Il modello del set parallelo di fratture, con apertura variabile (Masciopinto, 1999)
- Il modello stocastico del continuo in cui l'acquifero è considerato alla stregua di un mezzo poroso eterogeneo equivalente. L'eterogeneità è rappresentata in termini di parametri idraulici random, che vengono fatti variare secondo predefinite distribuzioni di probabilità (Cherubini et al., 2004a)



In questo secondo approccio, tramite il codice di calcolo (Modflow) (Ruskauff, 1998), le condizioni di anisotropia del mezzo sono espresse dalla mappa delle conducibilità idrauliche. Tale mappa è stata anche elaborata considerando i risultati delle prove di assorbimento a carico variabile (o Lefranc) interpolati con l'ausilio del software rockworks. Entrambi gli approcci, Modflow e FRACT (Masciopinto, 1999) fanno riferimento ad una discretizzazione numerica delle equazioni del flusso alle differenze finite. Il risultato delle simulazioni è visibile dall'andamento delle linee isopieziche riportate in Figura 2.

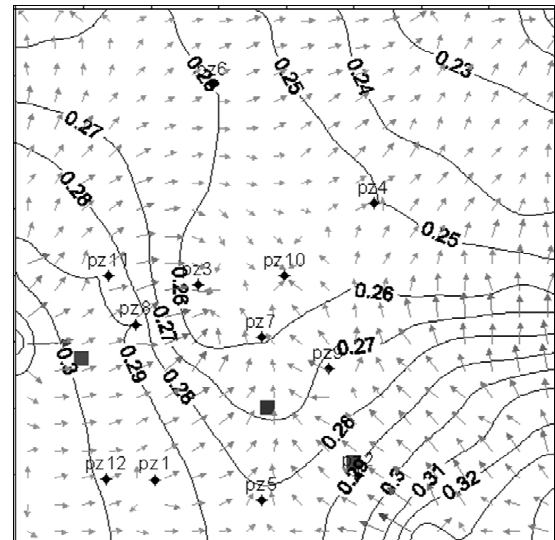


Fig.2 - Andamento delle isopieziche in Modflow (sinistra) e Fract (destra) con rappresentazione vettoriale della velocità di filtrazione nelle fratture (Cherubini et al., 2004a).

Groundwater piezometric heads obtained by Modflow (left) and Fract (right) with vectorial representation of flow velocity in fractures (Cherubini et al., 2004a).

Dai risultati delle simulazioni è possibile evincere che esistono direzioni preferenziali per il percorso delle particelle contaminanti; il flusso si presenta “canalizzato”, fenomeno proprio dei mezzi fratturati. Le velocità di drenaggio sotterraneo sono pari a 6 m/giorno.

I risultati della simulazione del trasporto effettuata con il codice di calcolo MT3DMS, mostrano che le isocone si chiudono all'interno dell'area (fig 3) e presentano concentrazioni massime pari a 0.76 mg/l dopo 100 giorni.

Il terzo modello studiato, la cui trattazione completa è in corso di stampa su rivista specializzata, si basa sull'esame dei dati geomeccanici rilevati nei sondaggi effettuati nelle varie campagne di indagine ed in particolare si è considerata la popolazione dei valori dell'RQD (Rock Quality Designation). Tale popolazione che si presenta come una variabile discreta, è stata assimilata ad una variabile binaria ed ad essa è stato applicato il Kriging a variabile indicatrice (Indicator Kriging).

La figura 4 riporta la distribuzione delle fratture e delle pseudo cavità rilevate dai sondaggi alla profondità di 12 m p.c.

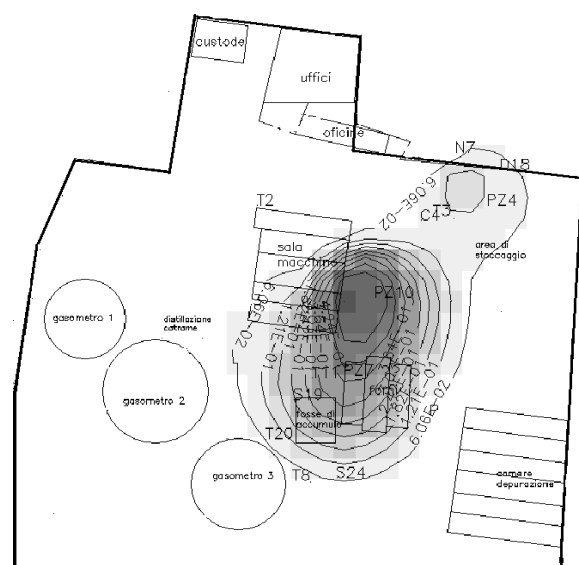


Fig.3- Simulazione del trasporto a 15 m con MT3DMS
Transport simulation at 15 m with MT3DMS

La simulazione del flusso è stata ottenuta applicando il codice di calcolo agli elementi finiti Feflow 5.1 (Wasy), discretizzando l'acquifero in uno strato superficiale di materiale poroso (calcarenite) fino alla profondità di 8m dal p.c., poggiante su una successione di strati calcarei fino alla profondità di 15m dal p.c.

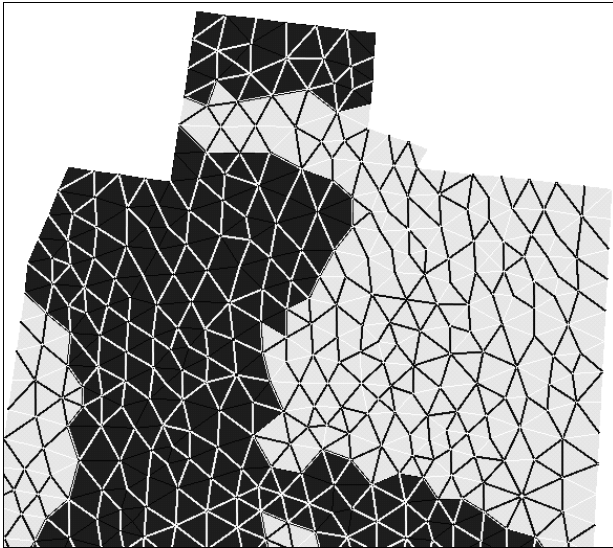


Fig 4 - Distribuzione delle fratture a 12 m dal pc.
Distribution of fractures at 12 m from ground level.

La fratturazione di tale successione di strati è stata riprodotta sulla base dei dati geomeccanici elaborati come detto in precedenza. I risultati di tale simulazione, considerando un regime di flusso transitorio, hanno prodotto il seguente scenario:

- Nel primo strato di materiale poroso si hanno isocone che si chiudono, anche se il plume si abbatte di poco (fig. 5a) e si hanno valori massimi di contaminazione pari a 12 mg/l. Ciò è spiegabile a causa dei bassissimi valori di velocità, pari a $7 \cdot 10^{-2}$ m/giorno.
- Negli strati calcarei invece le velocità sono altissime, mostrano dei valori variabili all'interno del range $7-9 \cdot 10^4$ m/giorno. Il plume si abbatte notevolmente (fig. 5b), si propaga in maniera differente alle varie profondità e ciò a causa della fratturazione del mezzo.

E' da notare come nel modello che assimila l'acquifero ad un poroso equivalente i valori di velocità (6 m /giorno) siano mediati rispetto a quelli presenti nell'ultimo modello considerato: qui essi oscillano, a causa dell'estrema disomogeneità riprodotta, da valori molto bassi nello strato calcarenitico, dove la contaminazione permane in elevate concentrazioni, a valori molto alti negli strati più profondi dove il plume si propaga a valle e si abbatte maggiormente.

Appare evidente che il flusso e il trasporto si presenta diverso alle varie profondità. A basse profondità la contaminazione appare sostanzialmente contenuta all'interno dell'area mentre a profondità maggiori, ove è stato rilevato un maggior grado di fratturazione e presenza

di cavità non riempite di terra rossa, si possono verificare condizioni di maggior drenaggio sotterraneo e relativo trasporto, per cui a queste profondità la contaminazione può propagarsi all'esterno.

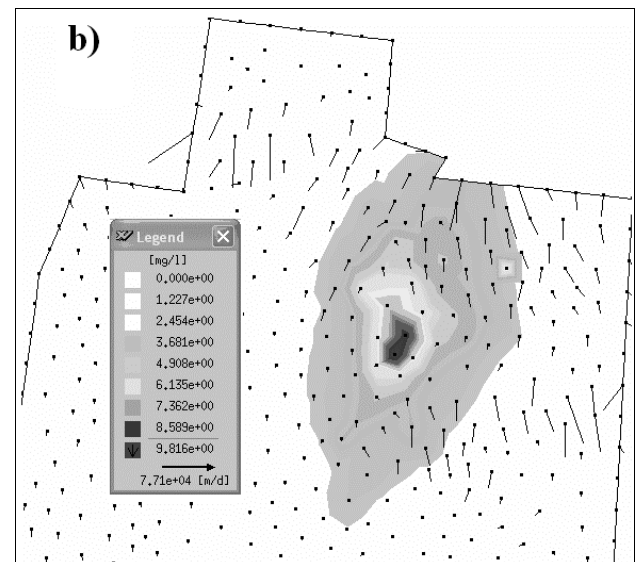
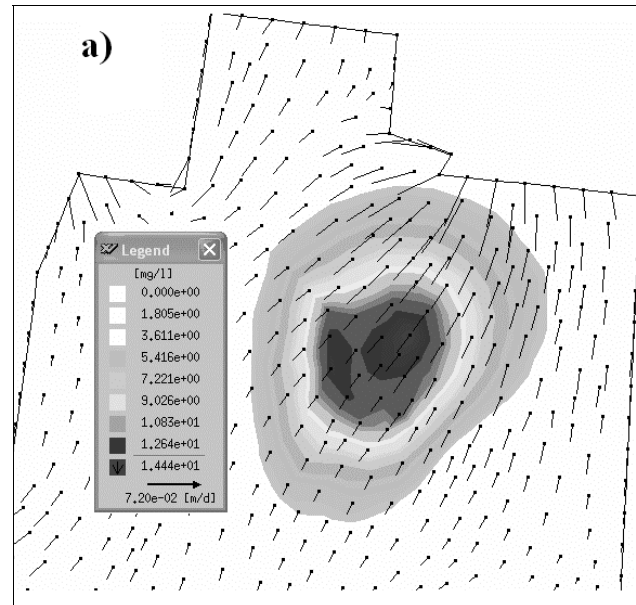


Fig 5 Simulazione del trasporto nel primo strato di materiale poroso (a) e a 10 m di profondità (b)

Transport simulation in the first layer of porous material (a) and at 10 m depth (b)

Considerazioni sui risultati ottenuti

Le indagini di caratterizzazione condotte nell'area si sono concluse con la costruzione del modello concettuale dell'area che evidenzia una certa canalizzazione del flusso con una zona di richiamo situata nel centro dell'area e isocone della contaminazione che appaiono chiudersi

all'interno del sito .

Tale circostanza porta a pensare che, per particolarissime condizioni connesse alla natura anisotropa dell'acquifero, le condizioni locali realizzino una vera e propria messa in sicurezza della falda con il contenimento della contaminazione.

Per avere conferma di tale ipotesi sono stati perforati 4 piezometri a valle dell'area in modo da intercettare l'eventuale flusso della falda in uscita dall'area in studio.

Dai dati rilevati nei 4 piezometri si è avuta conferma dell'ipotesi sostenuta dalle simulazioni effettuate; infatti, in questi ultimi si sono registrati valori bassissimi della concentrazione degli analiti considerati .

Tuttavia, l'esame dei risultati ottenuti dalla terza simulazione porta a ritenere un diverso flusso e conseguente trasporto a profondità maggiori. Infatti, dall'applicazione del terzo modello appare evidente che il flusso si espleta per

livelli preferenziali; a profondità contenute anche questo modello porta a considerare chiuse le isocone e assenza di flusso all'esterno dell'area, mentre, a profondità maggiori, la situazione potrebbe essere notevolmente differente. Il flusso potrebbe non essere contenuto all'interno dell'area ma uscire all'esterno propagandosi verso il mare e investendo lungo il percorso i 4 piezometri. Per cui, la circostanza che questi ultimi non registrino contaminazione potrebbe essere esclusivamente ascrivibile alla profondità degli stessi non sufficiente ad intercettare il plume. Un approfondimento degli stessi e ulteriori analisi a profondità più elevate consentirà di verificare la veridicità di questa nuova ipotesi .

Tale ipotesi, se provata, potrà costituire la base sostanziale degli interventi di clean-up che dovranno essere progettati considerando le condizioni di anisotropia verticale del trasporto dei contaminanti nell'area in studio.

Bibliografia

- Bear J. (1972): "Dynamic of fluid in porous media" Elsevier, Amsterdam.
- Beretta G.P.(1992): "Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee", Ed.Pitagora, Bologna.
- Beyer Matthias (2002): " Prediction of groundwater flow and transport in fractured aquifers".
- Institut für Hydromechanik Universität Karlsruhe Bericht Nr. 794
- Birk Steffen (2002) : "Characterization of Karst Systems by Simulating Aquifer Genesis and Spring Responses: Model Development and Application to Gypsum Karst". Tübinger Geowissenschaftliches arbeiten (TGA)
- Cherubini Claudia., Giasi C.I., Castore M. De Palma D., Errede V., Guastamacchia M.: "Analysis and visualization of data and construction of the hydrogeologic model to study the remediation of the 'ex Gasometer' area in the city centre of Bari (Italy)". UDMS 2004, 24th Urban Data Management Symposium, October 27-29, 2004, Chioggia - Venice, Italy.
- Cherubini Claudia & Giasi Concetta I. "A hydrodynamic model of a contaminated fractured aquifer" Geotechnical and Geological Engineering (in corso di stampa)
- Cherubini Claudia., Giasi C.I., Masciopinto C.: "Stochastic fracture flow modelling and influence of the computational procedures on the pollutants migration in a case study "FEM MODFLOW International Conference on Finite Element . Karlovy Vary, Czech Republic.2004
- Cherubini Claudia., Giasi C.I., Masciopinto C.: Flusso di contaminanti in sottosuoli fratturati: diversi approcci modellistici a confronto in un sito industriale dismesso: In printing on "Acque sotterranee". In press.
- Di Fazio A., Maggiore M., Masciopinto C., Troisi S., Vurro M. (1990): "Stazione per lo studio sperimentale di fenomeni idrodispersivi in acquiferi fessurati", Quaderno IRSA,88, Roma 1990
- Deere, D.U.(1964): "Technical description of rock cores for engineering purposes", Rock Mechanics and Engineering Geology, vol.I
- Giasi C.I.(1982): "Sulle problematiche connesse alla prevenzione della influenza marina sulle falde acquifere in aree carsiche." *Geologia Appl. e Idrogeol.* Vol XVII.
- Kiraly, L. (1998): "Modeling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach." *Bulletin du Centre d'Hydrogeologie, Neuchatel*, Vol. 16, pp. 77-98.
- Kiraly, L. & Morel, G. (1976): « Etude de regularisation de l'Areuse par modele mathematique ». *Bulletin du Centre d'Hydrogeologie, Neuchatel*, Vol. 1, pp. 19-36.
- Kovács, A. (2003): "Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers: A hydrodynamic modeling approach". Ph.D. thesis, University of Neuchâtel, Switzerland. 131 p.
- Kovács, A., Perrochet, P., Király, L. & Jeannin, P-Y (2004): "A quantitative method for the estimation of karst aquifers hydraulic and geometric parameters based on spring hydrograph analysis". *Journal of Hydrology*, submitted.
- Masciopinto, C. (1999): "Particles transport in a single fracture under variable flow regimes", *Advances in Engineering Software*, 35, 5, 327-337.
- Meneghini (1966): "Chimica applicata e industriale", Casa Editrice Dr. Francesco Vallardi, Milano
- Warren, J.E. & Root, P.J. (1963): The behaviour of naturally fractured reservoirs. *Soc. Pet. Eng. J.*, Vol. 3, pp. 245-255.
- Shuster, E. T. and W. B. White (1971) : "Seasonal variations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers". *Journal of Hydrology* 14: 93-128.
- Teutsch, G. & Sauter, M. (1991): "Groundwater modeling in karst terranes: Scale effects, data acquisition and field validation". 3rd Conference on hydrology, ecology, monitoring and management of ground water in karst terranes, Nashville, USA.
- Teutsch, G. & Sauter, M. (1998): "Distributed parameter modeling approaches in karst-hydrological investigations". *Bulletin du Centre d'Hydrogeologie, Neuchatel*, Vol. 16, pp. 99-109.