

OTTIMIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI PER IL DISINQUINAMENTO: STUDI GEOLOGICI

A cura di V. Francani, Revisionato a cura di C. Rampolla

vincenzo.francani@polimi.it

carla.rampolla@gmail.com

Indice

1	GLI INTERVENTI PER IL DISINQUINAMENTO	2
1.1	OPERE CON ESTRAZIONE E/O INIEZIONE DI ACQUA	2
1.1.1	Solo estrazione	2
1.1.2	Estrazione e ricarica	2
1.2	Opere che comportano soprattutto interventi chimico-fisici e biologici	2
1.3	Opere di sbarramento	2
2	OPERE DI DISINQUINAMENTO CON ESTRAZIONE DI ACQUA	2
2.1	Analisi dei fattori che condizionano la propagazione dei contaminati	4
2.1.1	Permeabilità del sistema	5
2.1.2	Direzione preferenziale di flusso	6
2.2	Fattore di tortuosità	7
2.3	Variazioni di trasmissività	8
2.4	Influenza della ripartizione della trasmissività sulle permeabilità globali	8
2.4.1	Lenti di trasmissività diversa	8
2.4.2	Tratti di acquifero con trasmissività elevata	11
2.5	Ubicazione delle opere per l'estrazione delle acque	11
2.6	Sistemi anisotropi	12
2.6.1	Studio dell'anisotropia degli afflussi alle captazioni ai fini del disinquinamento	12
2.6.2	Anisotropia degli afflussi dovuta a fattori esterni	12
2.6.3	Conclusioni: fattori che influenzano l'andamento del flusso di contaminanti	16
2.7	Schemi di soluzione dei calcoli relativi alla collocazione delle opere di decontaminazione nei sistemi del III tipo	16
2.7.1	Valutazione della posizione più idonea per le opere che comportano l'estrazione di acque (es. barriera di pozzi di prelievo)	16
3	REFERENCES	23

1 GLI INTERVENTI PER IL DISINQUINAMENTO

In questo capitolo esamineremo i problemi salienti della collocazione delle opere di bonifica, raggruppando gli interventi secondo il ruolo esercitato dalle indagini idrogeologiche nei progetti di recupero nelle seguenti categorie:

1. interventi con estrazione e/o iniezione di acqua
2. interventi chimico fisici
3. sbarramenti

1.1 OPERE CON ESTRAZIONE E/O INIEZIONE DI ACQUA

1.1.1 Solo estrazione

- Barriera di pozzi
- Dreni orizzontali

1.1.2 Estrazione e ricarica

- Ricarica e barriera in falda
- Lavaggio del non saturo e pozzi barriera

1.2 OPERE CHE COMPORTANO SOPRATTUTTO INTERVENTI CHIMICO-FISICI E BIOLOGICI

- Depurazione in profondità
- Insufflazione di aria ed estrazione di gas
- Biodegradazione
- Lavaggio con intervento chimico e chimico-fisico

1.3 OPERE DI SBARRAMENTO

- Copertura
- Sbarramento
- Sbarramento e sfioro

Nei paragrafi seguenti verranno esposte, per ognuna delle principali tipologie, le indagini a compiere.

2 OPERE DI DISINQUINAMENTO CON ESTRAZIONE DI ACQUA

L'identificazione del tipo di sistema acquifero, del suo grado di eterogeneità e della permeabilità globale costituisce la premessa indispensabile per posizionare le opere di decontaminazione.

Si eseguono solitamente la scelta e il collocamento delle opere di bonifica sulla base dei dati acquisiti nella fase preparatoria, che vengono elaborati in modo da consentire di quantificare le conseguenze positive o negative delle soluzioni adottate.

In tale operazione acquista grande rilevanza l'identificazione delle vie di più rapida alimentazione e circolazione, rappresentate dalle aree dotate di maggiore permeabilità, perché tramite questi settori avvengono i fenomeni di maggiore interesse per questo tipo di studi: l'infiltrazione del contaminante e l'arrivo dell'acqua non inquinata.

Lungo le direttrici di maggiore permeabilità avviene inoltre il massimo il massimo flusso di inquinante, talora con la massima concentrazione; è chiaro che, essendo lo scopo della bonifica eliminare la maggior parte del contaminante con la minima estrazione di acque da depurare, è opportuno che le opere di prelievo delle acque sotterranee siano collocate lungo tali direttrici di flusso.

Le modalità per individuare queste aree sono di due tipi:

- Analisi della struttura idrogeologica
- Identificazione delle modalità di circolazione tramite modelli matematici, la cui costruzione prevede una serie di operazioni, tra le quali una corretta rappresentazione dei parametri di maggiore rilevanza ai fini di una simulazione.

a) Analisi della struttura idrogeologica

La ricostruzione mediante cartografie e sezioni della struttura idrogeologica pone in luce l'andamento dei corpi acquiferi e dei diaframmi meno permeabili.

Nel caso in cui si conosca la posizione e la natura della fonte inquinante e si possiedano molti dati sui parametri idrogeologici, è possibile comprendere con sufficiente immediatezza quale può essere la distribuzione dei contaminanti nelle falde, e avere anche un'idea della loro concentrazione e flusso nei diversi acquiferi, tenendo presente che le contaminazioni si propagano con maggiore facilità in quelli più permeabili; dipenderà solamente dalla interconnessione con gli acquiferi nei quali è posta la fonte di inquinamento se un settore sarà o meno interessato dal degrado.

Una buona ricostruzione di tipo tradizionale della struttura idrogeologica permette quindi solitamente di comprendere gli aspetti salienti delle modalità di sviluppo di un inquinamento

b) Modelli matematici

I risultati ottenuti con la sola ricostruzione della struttura non sono quasi mai sufficienti in un progetto che richiede una ragionevole previsione dei tempi, dei costi e delle modalità del disinquinamento.

Nei progetti esecutivi è pertanto richiesta una più precisa valutazione del flusso del contaminante negli acquiferi, possibile solo con modelli di simulazione del comportamento delle falde.

È utile tuttavia precisare che nella predisposizione dei modelli matematici ha grande rilievo la corretta distribuzione dei principali parametri idrogeologici; una imprecisa attribuzione dei valori di trasmissività, permeabilità, dimensione della sezione di flusso, può essere tollerata per i comparti dell'acquifero che non incidono sulla circolazione idrica del sistema. Quando invece gli errori interessano settori e strutture di grande importanza per l'entità delle portate che attraversano l'intera struttura, il modello risulta inadatto a simulare la circolazione idrica sotterranea, perché gli errori si ripercuotono sul comportamento dell'intero sistema.

Appare quindi evidente che l'utilizzo della sola analisi idrogeologica o dei soli modelli non permettono risultati concreti o definitivi, mentre l'impiego integrato di queste tecniche e di altre (fondamentali quelle idrochimiche), consente il raggiungimento degli obiettivi di salvaguardia ambientale a condizioni economicamente tollerabili.

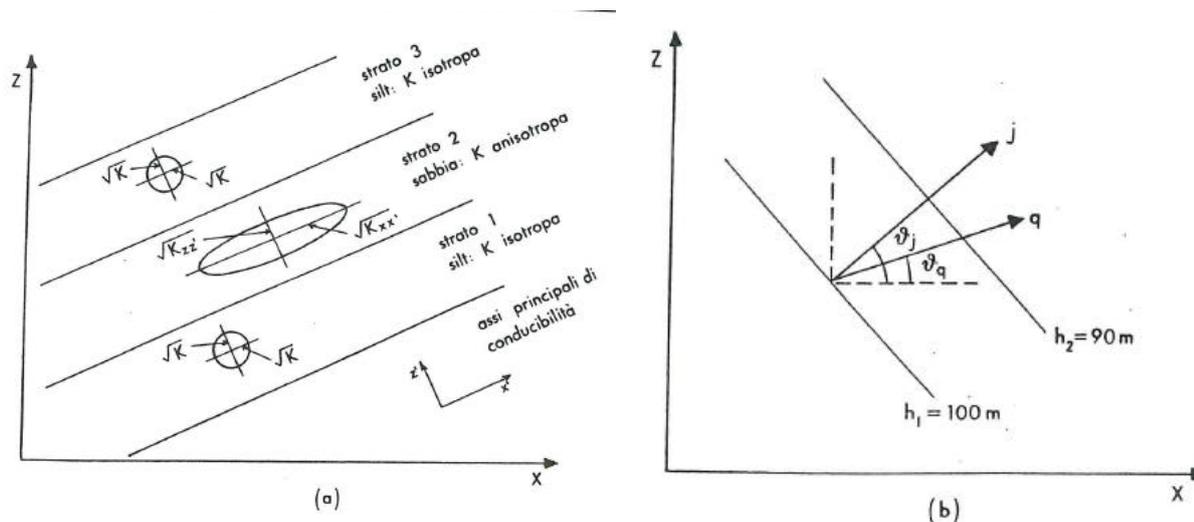


Figura 1 – distribuzione della permeabilità in terreni anisotropi (a); in (b) sono rappresentati alcuni parametri per il calcolo della portata unitaria in due diverse direzioni: ϑ_j rappresenta la direzione della massima cadente piezometrica, ϑ_q quella in cui si ha la massima portata unitaria coincidente con quella della massima trasmissività

2.1 ANALISI DEI FATTORI CHE CONDIZIONANO LA PROPAGAZIONE DEI CONTAMINATI

Allo scopo di meglio descrivere le relazioni che intercorrono fra i principali parametri idrogeologici e idrodispersivi, esaminiamo i rapporti fra le variabili che influiscono sulla propagazione dei contaminanti.

Il flusso F dell'inquinante (kg/s) è dato dalla relazione;

$$F = C(q + q_i)w$$

In cui C è la concentrazione dell'inquinante risultante dalla miscelazione dalle acque inquinate con quelle non contaminate, q la portata unitaria della falda non inquinata, q_i è la portata di falda contaminata e w la larghezza della sezione di flusso considerata.

I valori di q e q_i dipendono largamente dalla trasmissività e della cadente piezometrica, parametri che nelle strutture geologiche sono molto variabili.

Se si riscontrano le condizioni perché l'inquinamento si presenti concentrato in una sezione di flusso sufficientemente ristretta e lungo una direzione ben precisa (direzione preferenziale di flusso), gli interventi verranno prevalentemente destinati a questo settore.

Riducendo così l'area da sottoporre al disinquinamento, si prevede di poter realizzare notevoli economie, prelevando anche quantità il più possibile limitate di acque pure. Al contrario una propagazione su larghe sezioni di inquinanti poco concentrati determina la necessità di investire con gli studi e le opere in aree spesso molto estese, depurando anche grandi quantità di acque non contaminate. Si è potuto constatare che la distribuzione degli inquinanti è generalmente molto irregolare, in quanto la contaminazione incontra per lo più terreni eterogenei in cui le vie preferenziali di flusso non sono rettilinee; gli inquinanti anzi tendono a seguire una rete intrecciata di percorsi che aggirano le lenti di terreni meno favorevoli alla propagazione del contaminante.

Gli elementi che concorrono nel determinare la concentrazione dei contaminati in alcuni settori dell'acquifero, sono essenzialmente:

- La permeabilità globale del sistema K

- L'anisotropia della struttura
- La continuità degli acquiferi e dei valori di trasmissività
- La tortuosità delle linee di flusso
- La disposizione dell'alimentazione e del recapito nei confronti della direzione di massima permeabilità globale.

2.1.1 Permeabilità del sistema

La permeabilità del sistema è di fondamentale interesse per comprendere in quale direzione si svilupperà l'inquinamento.

In un terreno eterogeneo, costituito da diversi settori, ciascuno dotato di una propria permeabilità, si può con Schneebeli attribuire al sistema una permeabilità detta "globale", data dal rapporto fra la portata unitaria e la cadente piezometrica, che risulta essere una media ponderata della permeabilità dei singoli settori.

Poiché il valore delle permeabilità dipende dalla direzione in cui viene misurata e dalla distanza fra gli estremi, esso cambia a seconda dei punti fra i quali viene misurata la grandezza in esame. L'inquinante defluisce preferenzialmente nella direzione in cui la portata unitaria (prodotto della permeabilità globale per la cadente) è più elevata.

Allo scopo di una comprensione delle modalità di propagazione dell'inquinante è quindi utile avere una precisa idea della permeabilità globale del sistema.

Le soluzioni finora trovate al fine di identificare o di descrivere in modo significativo agli effetti pratici tale parametro riguardano per lo più gli acquiferi stratificati. Si ipotizzi che gli strati a T e k diverse abbiano uno spessore totale a.z e b.z rispettivamente, limitando l'esame al caso in cui siano rappresentati solamente due litotipi, l'uno presente con una percentuale a e l'altro in percentuale b rispetto al totale dello spessore. In tal caso si avrà che $a + b = 1$.

Detta V la velocità di filtrazione, ia la cadente piezometrica nei livelli di tipo a e ib la cadente piezometrica nei livelli di tipo b , si avrà:

$$\begin{aligned} ia &= V / ka \\ ib &= V / kb \end{aligned} \quad (1)$$

in cui ka e kb sono le permeabilità dei due litotipi.

La caduta di potenziale sullo spessore z sarà:

$$\delta\phi = ia.a.z + ib.b.dz$$

e la cadente piezometrica media:

$$i = \delta\phi/dz = a.ia + b.ib$$

Torna a questo punto utile identificare in prima approssimazione la permeabilità complessiva del sistema in una data direzione come il rapporto fra la portata fluente in condizioni stazionarie e il prodotto della sezione di flusso per la cadente.

Per definizione la permeabilità complessiva verticale del sistema è:

$$kv = v/i = V/(a.ia + b.ib)$$

Sostituendo ia e ib con le espressioni definite in (1), si ha che:

$$kv = 1 / (a/ka + b/kb) \quad (2)$$

La permeabilità complessiva orizzontale, parallela agli strati è data da:

$$ko = a.ka + b.kb \quad (3)$$

il rapporto tra ko e kv risulta quindi dal rapporto fra le espressioni riportate in (2) e (3):

$$ko/kv = 1 + ab.(ka-kb)^2/ka.kb \quad (2-3)$$

Tale risultato lascia comprendere come in un sistema formato da strati orizzontali a permeabilità diversa, la permeabilità orizzontale sia sempre superiore a quella verticale: infatti il rapporto k_o/k_v risulta sempre maggiore di 1.

Analogamente, possiamo concludere che in un sistema stratificato con giacitura qualunque, la permeabilità nella direzione parallela alla giacitura degli strati è sempre maggiore a quella ad essa ortogonale.

Le portate Q fluenti nel sistema lungo gli strati sono quindi superiori in ogni caso a quelle fluenti normalmente ad essi, ed il loro rapporto è pari a quello fra k_o e k_v .

Quando i deflussi avvengono invece obliquamente al sistema, sarà possibile ricavare il valore delle portate tenendo conto del fatto che la distribuzione della permeabilità nello spazio tenderà ad assumere l'andamento di un ellissoide le cui sezioni principali saranno l'una circolare, giacente nel piano della stratificazione, e una ellittica, avente asse minore corrispondente con la normale al piano di stratificazione. Sarà quindi possibile ricostruire in ogni punto il valore della permeabilità complessiva utilizzando le proprietà geometriche dell'ellissoide, e da essa ricavare i valori delle portate defluenti nelle diverse direzioni.

Nei terreni non stratificati anisotropi nei quali la permeabilità mostra uno spiccato orientamento, il valore della permeabilità media si ricava dalla nota relazione:

$$K = \sqrt{(k' \cdot k'')}$$

Valida per un flusso bidimensionale dove k' e k'' corrispondono alla portata massima e minima.

Nelle tre dimensioni, la portata fluente nel sistema può essere vista come un vettore, risultante dalla somma delle componenti rispetto alle direzioni x, y, z .

2.1.2 Direzione preferenziale di flusso

Diversi autori utilizzano il concetto di permeabilità globale del sistema per identificare la direzione nella quale le portate unitarie della falda risultano maggiori, indicando un più elevato flusso sotterraneo.

In effetti, quando il prodotto della permeabilità globale in una direzione che con la cadente piezometrica i forma un angolo θ la portata unitaria q_u in quella direzione è data da:

$$q_u = k \cdot e \cdot i \cdot \cos \theta$$

in cui K è la permeabilità globale nella direzione prescelta, e lo spessore dell'acquifero, q_u rappresenta la portata per unità di larghezza della sezione di flusso, ed è quindi misurata in m^2/s .

Negli studi sul disinquinamento l'individuazione della direzione nella quale le portate unitarie sono più elevate ("direzione preferenziale di flusso") ha particolare interesse; se facciamo coincidere il punto in cui calcoliamo la permeabilità globale con quello in cui si colloca la fonte dell'inquinamento, essa viene ad identificare il settore lungo il quale avremo il massimo trasferimento di inquinante. In base alla relazione sul flusso di inquinante precedentemente riportata, il trasferimento dell'inquinante è data dall'espressione:

$$F = C \cdot w \cdot K \cdot e \cdot i \cdot \cos \theta$$

Agli effetti del disinquinamento, il posizionamento di pozzi barriera trasversalmente alla "direzione preferenziale di flusso" rappresenta ovviamente la soluzione più idonea.

È quindi generalmente accettato il principio che l'individuazione della direzione preferenziale di flusso costituisca una fase altrettanto importante dell'indagine idrogeologica.

2.1. Anisotropia ed eterogeneità degli acquiferi

Le strutture geologiche dei depositi alluvionali sono caratterizzate da una marcata anisotropia, così come quelle di molte formazioni rocciose sedimentarie stratificate, per la frequente alternanza di corpi stratiformi o lenticolari di rocce a permeabilità diversa.

Si avrà in questi casi un tensore di permeabilità globale in cui almeno in una direzione i valori di permeabilità sono particolarmente pronunciati.

Tale anisotropia nella permeabilità globale del sistema è accompagnata in questi acquiferi anche da una marcata eterogeneità.

In alcune circostanze i terreni sono invece esclusivamente eterogenei, non avendo un permeabilità globale orientata. Ciò si verifica frequentemente sia in depositi come quelli glaciali sia in ammassi rocciosi fratturati; il tensore della permeabilità globale presenta in questi casi variazioni con la direzione molto irregolari.

Esaminando un acquifero sotto l'aspetto della sua permeabilità globale, si avrà modo di distinguere tre casi:

- *sistema di tipo I*: isotropo dal punto di vista delle permeabilità
- *sistema di tipo II*: permeabilità globale con spiccata anisotropia
- *sistema di tipo III*: distribuzione irregolare della permeabilità.

A seconda dei casi, si può quindi prevedere, sia pure a grandi linee, quale sarà il comportamento dell'inquinante.

Infatti il percorso dell'inquinante avverrà nel primo caso in modo da orientarsi in direzione ortogonale alle isopieze secondo le linee di flusso, pur con una certa tendenza alla dispersione sia longitudinale che laterale; nel secondo caso il flusso di inquinante sarà estremamente concentrato lungo la direzione di maggiore permeabilità; nel terzo caso l'inquinante avrà tendenza a disperdersi seguendo le condizioni locali e sarà meno influenzato che nei casi precedenti della permeabilità globale del sistema. Si può quindi constatare come la tipologia della circolazione idrica sia fortemente influenzata dalla permeabilità globale e dalla sua distribuzione.

Esaminiamo ora le condizioni create dagli altri parametri idrogeologici precedentemente elencati.

2.2 FATTORE DI TORTUOSITÀ

Un elemento fondamentale per la previsione dell'andamento dell'inquinamento e soprattutto della distribuzione delle concentrazioni è costituito dalla tortuosità dei percorsi che esso deve seguire. È infatti evidente che il contaminante è costretto a seguire le vie di maggiore permeabilità, evitando gli ostacoli ed aggirando i settori che offrono maggiori difficoltà al flusso.

Quindi gli acquiferi discontinui, come vengono definiti quelli che sono caratterizzati da marcate variazioni di trasmissività e sezioni di flusso, determinano una piezometria di analoga complessità.

Quando infatti il sistema presenta piezometria complessa, e frequenti variazioni del senso di flusso, il valore della permeabilità globale diminuisce in modo rilevante, proporzionalmente al crescere della tortuosità delle linee di flusso. Considerando due punti in un sistema acquifero, si vede facilmente che al crescere della tortuosità aumenta il percorso che il fluido deve compiere per raggiungere da quello posto a monte il punto posto più a valle come specificato in precedenza, cosicché diminuisce parallelamente la portata unitaria e le velocità di flusso.

Si ricorda a tal proposito le relazioni di Carman che consentano la determinazione del fattore di tortuosità. Secondo Carman risulta infatti opportuno definire la velocità di flusso come:

$$\left(\frac{L'}{L}\right) \cdot \frac{v}{me} = v' \left(\frac{L'}{L}\right)$$

In cui L' rappresenta la lunghezza reale del canale, L la distanza in linea retta fra i suoi estremi. Per un sistema la tortuosità può essere definita come il rapporto fra la lunghezza media dei filetti liquidi e la distanza fra alimentazione e recapito. Risulta così evidenziato l'interesse della linearità del sistema (definibile come L/L') che assume i massimi valori per sistemi con linee di flusso ortogonali in ogni punto alle equipotenziali dell'alimentazione e del recapito. A tale scopo, solo una accurata ricostruzione del modello fisico del terreno consente di valutare la tortuosità.

2.3 VARIAZIONI DI TRASMISSIVITÀ

Considerando un bacino idrogeologico alla stregua di un bacino idrografico, appare evidente come il regime delle portate e della piezometria dipenda in larga misura dall'estensione del bacino e dall'interconnessione fra corpi idrici principali e quelli secondari. In particolare, un acquifero frammentato in settori separati da tratti meno permeabili e trasmissivi presenta una produttività ridotta rispetto ad un acquifero che, in tutte le sue parti, presenti una buona trasmissività e facilità di scambio con gli acquiferi di minore importanza, a parità di estensione. Se tale aspetto è ampiamente noto, meno evidente è la reale incidenza della continuità degli acquiferi sulla produttività dei pozzi.

Diminuendo la continuità, ci si porta quindi verso sistemi più simili a quelli definiti di tipo III (eterogenei), che sono generalmente caratterizzati da una minore permeabilità globale a parità di superficie con uguale trasmissività.

Da quanto premesso a proposito della continuità, risulta evidente che pur non variando la superficie coperta da uguali valori di trasmissività, ma solo la disposizione dei settori a uguale trasmissività, la portata complessiva del sistema e dell'acquifero principale subisce una riduzione quando il valore della continuità delle caratteristiche idrogeologiche diminuisce.

È pertanto evidente che un sistema darà luogo a portate tanto maggiori quanto minore è la sua tortuosità e tanto maggiore la continuità della permeabilità e trasmissività degli acquiferi; di conseguenza la portata unitaria più elevata si riscontrerà nei settori che avranno la doppia caratteristica di possedere elevata trasmissività, continuità e linearità.

2.4 INFLUENZA DELLA RIPARTIZIONE DELLA TRASMISSIVITÀ SULLE PERMEABILITÀ GLOBALI

Esaminiamo brevemente gli effetti più considerevoli della distribuzione della trasmissività sul tensore della permeabilità globale.

2.4.1 Lenti di trasmissività diversa

Nel caso in cui compaiano corpi di forma lenticolare di trasmissività molto diversa rispetto a quella del rimanente acquifero, si verificano fenomeni di distorsione delle linee di flusso che, oltre ad influire sulla tortuosità, determinano importanti variazioni nella distribuzione delle concentrazioni del contaminante.

In particolare, si osserva che nel caso di lenti più trasmissive, le linee di flusso convergono da ogni direzione (quindi anche dalla superficie della falda) verso la lente; quando questa è costituita da terreni meno trasmissivi le linee di flusso divergono dalla lente.

Ipotizzando una lente di forma sferica situata all'interno di un flusso cilindrico (cioè a filetti liquidi paralleli) la distribuzione della pressione deve soddisfare la legge di Laplace, che in coordinate sferiche si riduce a:

$$\delta \frac{\left(r^2 \sin \theta \frac{\delta p}{\delta r} \right)}{\delta r} + \delta \frac{\sin \theta \frac{\delta p}{\delta \theta}}{\delta \theta} = 0$$

Dal momento che $\frac{\delta}{\delta \phi} = 0$ essendo il flusso orientato in modo che ϕ sia uguale a zero. In questo rapporto, r rappresenta la distanza dal centro della sfera, mentre le lettere greche rappresentano gli angoli al centro formati dalla retta di lunghezza r con i piani orizzontali e verticali; il simbolo p rappresenta il carico piezometrico del fluido.

Per identificare con un parametro sufficientemente rappresentativo la concentrazione degli afflussi verso le lenti più trasmissive, Phillips O.M. (1991) propose per il caso della lente sferica il fattore adimensionale $G = q_i/q_o$, detto fattore di convergenza (focusing ratio) ricavabile dalla relazione:

$$G = \frac{3k_i}{k_i + 2k_o}$$

In cui k_i è la permeabilità della lente e k_o la permeabilità della parte restante dell'acquifero.

Il fattore G rappresenta il rapporto esistente fra la portata unitaria del flusso all'interno della lente sferica (q_i) e quella esterna alla lente (q_o).

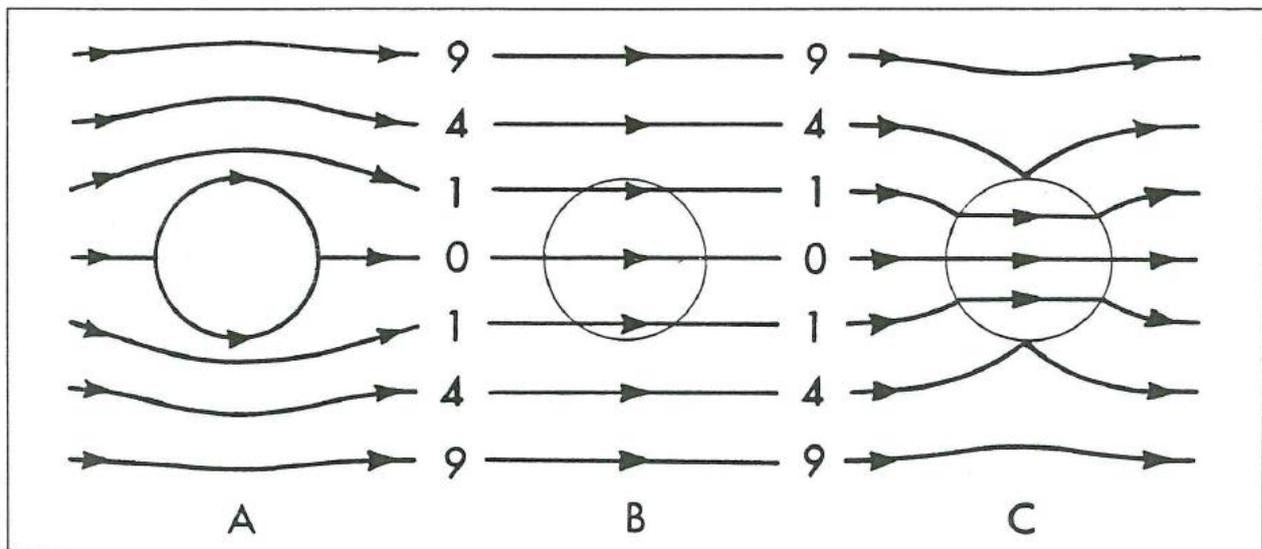


Figura 2 – flusso in corrispondenza di una eterogeneità sferica; k_i rappresenta la permeabilità all'eterogeneità, k_o quella esterna (da Phillips, ridis.)

Quando k_i è maggiore di k_o il fattore G è superiore a 1, mentre succede l'inverso in caso contrario; si osserva inoltre che quando la permeabilità non va il valore di G è pari a 1.

È interessante osservare che se la lente è piena di liquido, cosa che avviene quando la permeabilità della lente è infinita, la relazione comporta un valore di G pari a 3.

O.M. Phillips (1992) segnala la possibilità di soluzioni più precise di quella riportata, per le quali si rinvia al testo indicato in bibliografia.

Rimane comunque evidente la rilevante funzione delle variazioni di litologia nell'acquifero, capaci di produrre significative concentrazioni o diluizioni degli inquinanti.

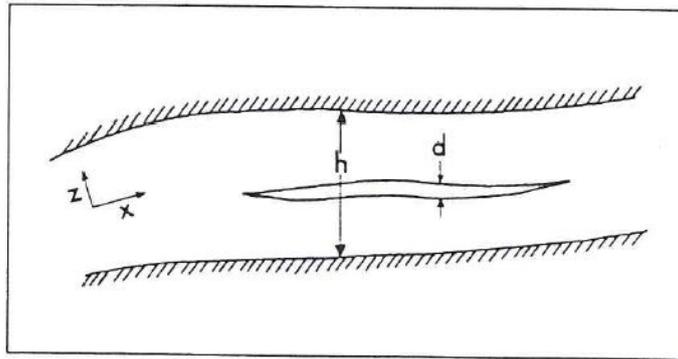


Figura 3 – rappresentazione di una struttura idrologica caratterizzata dalla presenza di una lente di materiale dotato di permeabilità diversa da quella dell'acquifero limitato al tetto e inferiormente da lenti impermeabili (da Phillips, ridis.)

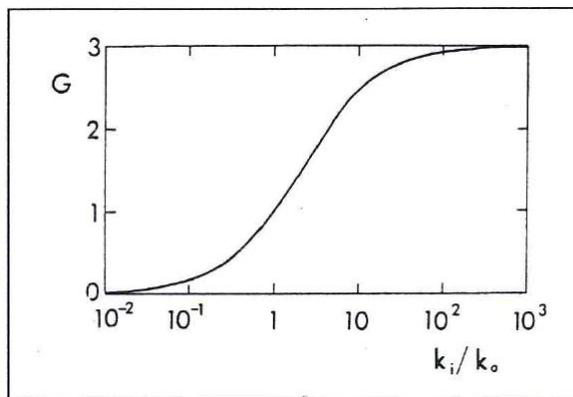


Figura 4 – Variazione del fattore di convergenza in funzione del rapporto tra le permeabilità (da Phillips, ridis.)

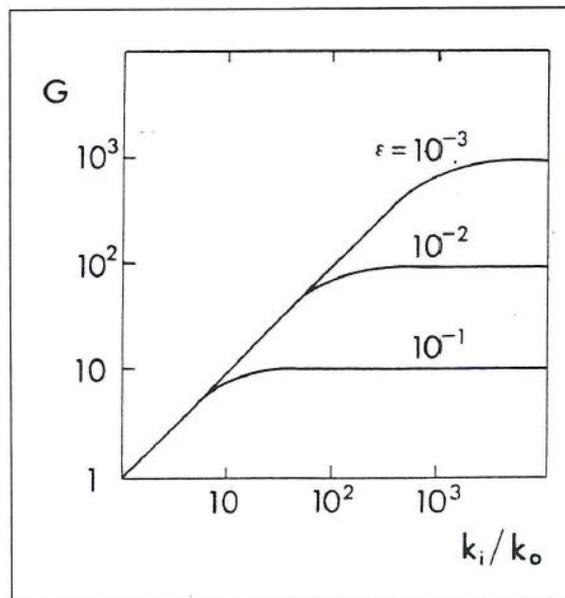


Figura 5 – variazione di G per diversi valori di ϵ e di k_i/k_o (da Phillips, ridis.)

2.4.2 Tratti di acquifero con trasmissività elevata

Nei settori in cui la trasmissività è particolarmente elevata, la pendenza della falda tende a ridursi notevolmente.

Un caso particolare è quello in cui le aree a maggiore trasmissività sono rappresentate da cave in falda; in queste circostanze, come dimostra la trattazione di Avanzini e Beretta (1992), la cadente diviene praticamente nulla e la deformazione della superficie piezometrica risulta dipendere largamente dalla struttura idrogeologica dal bacino che circonda la cava.

In alcune circostanze, proporzionalmente alla differenza di trasmissività fra i diversi settori e alla loro estensione e frequenza, gran parte delle acque finisce per canalizzarsi entro le lenti più permeabili. Tale fenomeno si verifica di preferenza quando i settori di maggiore trasmissività sono allineati secondo il flusso idrico sotterraneo.

Analogamente, si può avere una riduzione delle portate nei casi in cui venga diminuita la differenza di livello piezometrico tra alimentazione e recapito lungo le direttrici di maggiore trasmissività, a parità di differenza media di livello fra alimentazione e recapito.

Riassumendo quanto riportato nel paragrafo, si deve tenere presente che lo studio idrogeologico dovrà identificare gli allineamenti di lenti di materiale più permeabile e trasmissivo. Infatti lungo questi allineamenti la permeabilità globale del sistema è più sviluppata, facilitando la propagazione della contaminazione (dove la piezometria lo consente) sia per la maggiore velocità di flusso in queste direzioni sia per la tendenza delle lenti più trasmissive a far convergere il flusso idrico al loro interno.

2.5 UBICAZIONE DELLE OPERE PER L'ESTRAZIONE DELLE ACQUE

Ottenuta una soddisfacente ricostruzione del modello fisico del sottosuolo, tramite la determinazione della distribuzione dei fattori che indirizzano le modalità del flusso idrico sotterraneo, diventa possibile passare alla scelta della collocazione delle opere di decontaminazione. Esse saranno posizionate, come più volte indicato, in modo da intercettare il flusso inquinante maggiore con il minore prelievo di acque non contaminate.

Il procedimento più consigliabile comporta:

- a. Calcolo della permeabilità globale massima e delle permeabilità globali nelle diverse direzioni del sistema, nonché del tensore delle portate del sistema; identificazione delle strutture che determinano le caratteristiche di circolazione idrica sotterranea, anche sulla base della piezometria;
- b. Costruzione del modello idrogeologico;
- c. Valutazione delle portate unitarie della falda non contaminata e delle portate unitarie della falda contaminata
- d. Valutazione della ripartizione della concentrazione dell'inquinante nelle falde
- e. Calcolo del flusso inquinante
- f. Localizzazione delle opere, simulazione del loro funzionamento e ottimizzazione della scelta.

Nei sistemi di tipo I è sufficiente adottare le indicazioni fornite dalle note relazioni dell'idraulica sotterranea, purché siano considerati due parametri fondamentali: la forma della fonte di contaminazione e l'eventuale influsso dell'infiltrazione. Su tale argomento una chiara impostazione è fornita da Domenico e Schwartz (1990) ai quali si rimanda. Per quanto riguarda l'infiltrazione, è opportuno adottare l'impostazione di Strack (1989).

In questo paragrafo ci si limiterà a fornire indicazioni sui sistemi di tipo II e III.

2.6 SISTEMI ANISOTROPI

Nei sistemi di tipo II si dovrà distinguere i casi in cui l'anisotropia è dovuta a :

- Distribuzione orientata della permeabilità globale
- Presenza di fattori che condizionano la direzione di flusso

2.6.1 Studio dell'anisotropia degli afflussi alle captazioni ai fini del disinquinamento

Solitamente le acque estratte dalle captazioni risultano essere costituite da una miscelazione di acque pure e contaminate. Per aumentare l'efficacia delle opere di decontaminazione è necessario ridurre al minimo gli afflussi di acque pure, ed è pertanto opportuno che lo studio idrogeologico prenda in attenta considerazione l'importanza di ubicare le opere di estrazione delle acque in modo da incrementare il prelievo di acque contaminate.

Si è già ripetutamente sottolineato che il flusso del contaminante è molto alto dove la direzione di massima permeabilità coincide con quella di maggiore cadente piezometrica, e la posizione della fonte di contaminazione è collocata nel settore di maggiore permeabilità. In tali circostanze il posizionamento delle opere di decontaminazione è ovviamente da concentrare lungo il medesimo asse.

Quando il flusso della falda avviene ortogonalmente all'asse di maggiore permeabilità globale, si realizza la condizione meno favorevole per due motivi:

- La dispersione trasversale è massima, obbligando il contaminante a propagarsi su un fronte più ampio, diminuendo quindi il flusso che può essere intercettato dal pozzo di bonifica
- La portata della falda è minima, cosicché aumentano i tempi necessari per l'estrazione del contaminante, a parità di altre condizioni.

Un esempio di struttura geologica semplice che appartiene alla categoria descritta è quello di acquiferi costituiti da rocce molto permeabili separate da banchi semipermeabili verticali.

In queste circostanze si presenta spesso l'opportunità di non collocare i pozzi barriera lungo le linee di flusso della falda, dove riceverebbero un afflusso di acque contaminate inferiore a quanto si otterrebbe collocando i pozzi lateralmente alla fonte di contaminazione lungo l'asse di maggiore permeabilità.

2.6.2 Anisotropia degli afflussi dovuta a fattori esterni

L'ubicazione di pozzi in terreni trasmissivi situati in prossimità di un bacino lacustre o di un fiume richiama un flusso di acque non contaminate la cui estrazione ridurrebbe notevolmente il rendimento delle captazioni al fine del disinquinamento; il pozzo lavorerebbe infatti con inquinante diluito e la decontaminazione comporterebbe il consumo e la depurazione di grandi quantità di acque non inquinate.

È comunque possibile calcolare la frazione di acque non inquinate che in tal caso perviene al pozzo, sia mediante programmi di calcolo sufficientemente accurati, sia ricostruendo tramite la rilevazione della piezometria l'andamento delle linee di flusso nel corso del pompaggio.

Nei casi di falda orizzontale e di terreno omogeneo, sono applicabili le note relazioni che consentono di calcolare la portata affluente ai pozzi, le quali mostrano come la massima parte dell'afflusso proviene dal fiume.

In tali circostanze è infatti applicabile la relazione che regola l'afflusso Q' delle acque al pozzo in funzione dell'abbassamento nel pozzo s e della distanza L dal fiume, ad esempio per falde in pressione:

$$Q' = \frac{2\pi sT}{\ln(2L/r)}$$

Considerando il fatto che in assenza del corso d'acqua l'espressione della portata al pozzo sarebbe fornita dalla relazione di Dupuit, nella quale è sufficiente sostituire R a L, l'incremento di afflusso Q'-Q è dato dall'espressione:

$$\frac{2\pi sT(\ln R/2L)}{\ln(R2L/r^2)}$$

Si osserva che l'incremento di portata è dovuto alla sola presenza del corpo idrico superficiale, e che esso è tanto maggiore quanto minore è L, mentre si annulla per 2L=R. Le condizioni sono ovviamente diverse quando la falda è inclinata. Nel caso di alimentazione da parte del fiume tutto l'afflusso proviene dal corso d'acqua; in condizione di indifferenza, con isopieze ortogonali al fiume, si avrà uno schema di afflusso molto simile a quello di condizioni di falda piatta. Si dovrà comunque verificare se il fiume ricade nel fronte di richiamo ricostruendo con le note procedure la depressione piezometrica.

In terreni omogenei sarà possibile ricavare l'incremento Q'/Q della portata determinato dal fiume in base al rapporto fra la lunghezza del fronte in presenza del corso d'acqua (F') e la lunghezza F del fronte in assenza del fiume. Infatti si può rilevare che a parità di portata del pozzo:

$$Q'/Q = F/F'$$

Si avrà così un'idea precisa dell'aggravio che tale soluzione comporta.

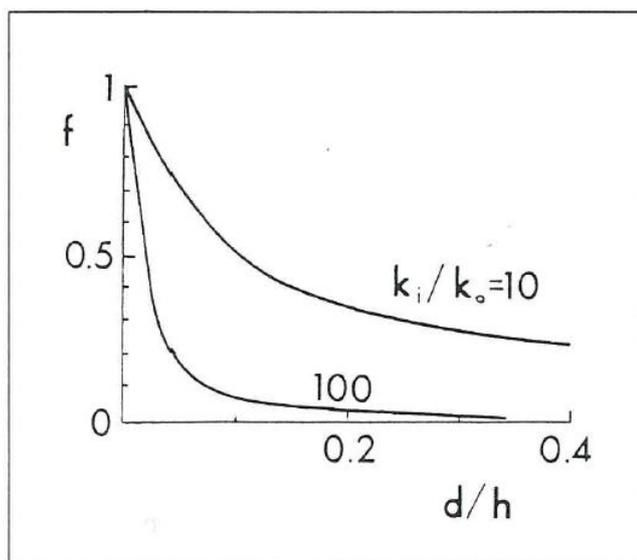


Figura 6 – rapporti tra il fattore f, le dimensioni della sezione di flusso e dell'eterogeneità e G (da Phillips, ridis.)

L'ubicazione di pozzi situati in prossimità di una barriera impermeabile, ipotizzando che l'acquifero si possa suddividere in due parti con un piano verticale passante per il pozzo parallelo a quello che forma la barriera impermeabile, determina un ridotto richiamo dal semispazio nel quale è posta la barriera. Questa è quindi una struttura favorevole solamente nel caso in cui la contaminazione non sia contenuta nel settore comprendente la barriera. Considerata tuttavia la relazione che regola l'abbassamento nel pozzo in prossimità della barriera:

$$Q = \pi sT / \ln (R/r)$$

Vediamo che i prelievi devono essere la metà per ottenere il medesimo abbassamento che si avrebbe in assenza dello sbarramento; per ali motivi si hanno dei vantaggi non indifferenti nelle situazioni di questo tipo in specie quando le barriere vicino al pozzo sono due. Questo può essere

il caso in cui la depressione piezometrica si allarga su i due lati fino al substrato che viene a formare i versanti opposti di una ristretta depressione.

Il calcolo dei vantaggi che si ottengono avvicinando la localizzazione del pozzo alla barriera nel caso di falda orizzontale, può essere fatto in base alla relazione che fornisce la differenza fra la portata in assenza di barriera Q e la portata del pozzo in presenza della barriera Q' , a parità di abbassamento nel pozzo:

$$Q - Q' = \frac{2\pi s T l n L}{r}$$

La relazione, di semplice dimostrazione, permette di evidenziare come avvicinando il pozzo alla barriera, la differenza di portata salga notevolmente; si mette così in rilievo il maggiore vantaggio di questa struttura, consistente nella minore portata necessaria per provocare un pari abbassamento della falda.

Va tuttavia rilevato che la depressione piezometrica è fortemente dissimmetrica: molto accentuata fra pozzo e barriera e piuttosto ridotta, con gradienti modesti, nel semispazio che contiene la barriera impermeabile.

Per tale motivo è necessario che la contaminazione sia molto prossima al pozzo per potere sfruttare convenientemente la possibilità offerta dall'andamento della piezometria.

Nei casi in cui la depressione piezometrica prodotta dal pozzo di decontaminazione interessa anche un settore a trasmissività sensibilmente minore, avremo un caso prossimo a quello descritto: il richiamo di acque da questi terreni sarà inferiore a quello che si manifesta nelle altre direzioni, e l'efficacia del disinquinamento sarà minore se la decontaminazione è posta nei terreni meno trasmissivi. Al contrario, se il pozzo interessa con la sua depressione un settore a trasmissività più elevata, da questo perverrà un afflusso molto maggiore di quello proveniente dalla rimanente porzione dell'acquifero; saranno quindi favorite le decontaminazioni degli inquinanti posti nel settore più trasmissivo.

Un fattore che genera una anisotropia nel sistema acquifero è l'esistenza di una attiva alimentazione, non più tramite un corpo idrico superficiale, ma attraverso l'infiltrazione, che determina l'esistenza di un'area di ricarica dell'acquifero. Il comportamento della falda, come è noto, è in questo caso simile a quello di un corpo idrico alimentato da un fiume, tanto che in alcuni casi l'infiltrazione della superficie è così elevata da poter modificare le concentrazioni dell'inquinante. In queste circostanze si può osservare nella piezometria un allargamento della sezione di flusso accompagnato da una brusca diminuzione della concentrazione del contaminante in corrispondenza del settore in cui avviene tale infiltrazione. È evidente che il pozzo di decontaminazione andrà collocato a monte di tale punto, così da evitare il drenaggio di acque non contaminate.

Analogamente si dovrà procedere nel caso in cui, a valle di una lente meno trasmissiva, due acquiferi prima separati dall'acquitarde vengano a confluire; se una delle due falde risulta inquinata, si deve evitare di collocare il pozzo di decontaminazione immediatamente a valle della lente poco trasmissiva. Anche in questo caso si ha infatti il richiamo di acque non contaminate.

Un importante fattore capace di deformare l'andamento delle linee di flusso della falda, convogliando il flusso del contaminante in determinate direzioni, è rappresentato dalla forma della superficie topografica, che condiziona in modo incisivo la piezometria. È infatti la presenza di depressioni topografiche a determinare l'emergenza delle falde in alcuni punti, verso i quali converge il flusso idrico sotterraneo.

Se ad esempio si ipotizza di essere in presenza di un acquifero dotato di trasmissività costante T, che viene ad affiorare ai piedi di un versante lungo un corso d'acqua è possibile valutare la portata della falda e ricostruire la rete di flusso in base a relazioni relativamente semplici.

Il corso d'acqua funziona infatti come una trincea incompleta (per definizione non scavata fino al substrato impermeabile), alla quale le acque sotterranee affluiscono sia dai lati, sia dal fondo.

Prendendo in considerazione entrambi i fianchi della valle, per calcolare l'afflusso alla trincea (ipotizzata rettilinea per il tratto in esame) si divide l'acquifero in tre parti, dapprima conducendo segmento rettilineo verticale cd dal punto centrale del fondo della trincea fino al substrato, poi con una linea orizzontale che contiene il fondo della trincea e i due punti a e b.

Si può quindi ragionevolmente ipotizzare che la linea orizzontale rappresenti due linee di flusso convergenti verso la trincea di larghezza B.

Costruendo infatti la rete di flusso, si osserva agevolmente che se l'acquifero è omogeneo tale è prevedibilmente l'andamento delle linee di flusso della falda.

Ammettendo che esse si comportino analogamente a spartiacque invalicabili, si potrà considerare libera la falda al di sopra di queste linee, e artesiani quella posta al di sotto.

Ipotizzando che alla distanza L si trovi alla quota δh al di sopra della linea orizzontale che passa per a e b, nella zona superiore l'afflusso q_1 dai due lati per metro di lunghezza della trincea è dato dalla relazione:

$$q_1 = k \frac{(\delta H^2 - h^2)}{L - \frac{B}{2}}$$

E nella zona inferiore:

$$q_2 = h \frac{(\delta H - h)}{\left[\left(L - \frac{B}{2} \right) - (1 - 2\pi) \ln \left(\frac{\pi B}{4P} \right) \right]}$$

In cui h è lo spessore della lama d'acqua nella trincea e P la lunghezza del segmento cd.

Variando L, si possono determinare i valori di δh e ricostruire l'andamento della piezometria determinata dal fiume. Tale calcolo, ovviamente perfezionabile con l'utilizzo di idonei modelli idrogeologici, consente di evidenziare come al piede del versante vi sia una tendenza alla risalita del flusso idrico, che può trovare sfogo nell'avvallamento, se si trova a pressione sufficiente.

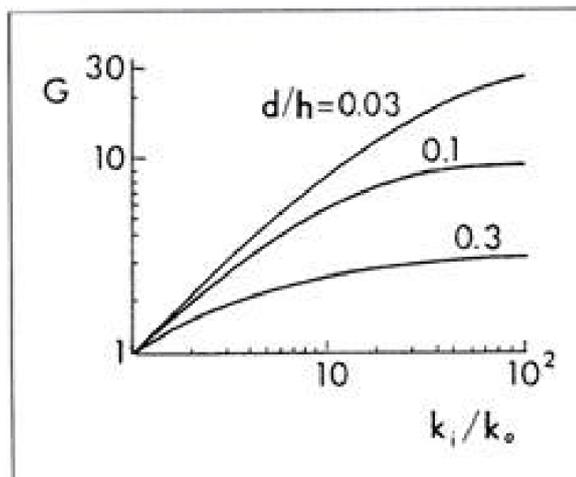


Figura 7 – Variazione del fattore di convergenza in funzione del rapporto fra le permeabilità e fra le dimensioni della sezione di flusso e dell'eterogeneità (da Phillips, ridis.)

2.6.3 Conclusioni: fattori che influenzano l'andamento del flusso di contaminanti

Lo studio geologico deve prendere in esame, come volume rappresentativo dell'area interessata dalla contaminazione, una parte del bacino di alimentazione delle falde interessate sufficiente a comprendere appieno le modalità di alimentazione e di flusso delle falde. Solo in questo modo ci si può infatti rendere conto dei fenomeni che regolano il flusso dei contaminanti.

I fattori che più influenzano su tali aspetti sono:

- La configurazione della piezometria;
- Le variazioni di permeabilità e spessore degli acquiferi;
- La morfologia del rilievo: le depressioni tendono a concentrare il flusso al loro interno;
- L'andamento degli acquiferi più trasmissivi, che concentrano verso il loro interno i flussi degli inquinanti e li convogliano verso le captazioni.

Negli acquiferi anisotropi, nei quali si ha una tendenza alla circolazione idrica secondo direzioni predeterminate dai fattori ora elencati, ha quindi grande interesse la valutazione dei diversi fattori (permeabilità globale, tortuosità, continuità degli acquiferi, allineamento dei corpi più trasmissivi ecc.) che contribuiscono all'accentramento degli inquinanti e al loro trasporto con elevate concentrazioni in settori relativamente ristretti. In questi settori, che si distinguono sostanzialmente per una elevata portata unitaria della falda, accompagnata da una accentuata concentrazione di contaminante, verranno posizionati i sistemi di decontaminazione.

2.7 SCHEMI DI SOLUZIONE DEI CALCOLI RELATIVI ALLA COLLOCAZIONE DELLE OPERE DI DECONTAMINAZIONE NEI SISTEMI DEL III TIPO

Gli acquiferi eterogenei non presentano le possibilità offerte dei sistemi di tipo II, nei quali si ha una naturale concentrazione delle sostanze inquinanti in settori particolari. La elevata eterogeneità impedisce infatti di identificare a priori dove concentrare le opere di estrazione dei contaminanti. Solamente dove l'eterogeneità non è molto spiccata, e dove la struttura idrogeologica è relativamente semplice, è possibile ricorrere ai medesimi criteri indicati per i sistemi di tipo II.

Purtroppo, ci si viene a trovare spesso nelle condizioni di non poter prevedere con sufficiente approssimazione il comportamento delle falde, o per l'eccessiva eterogeneità e complessità degli acquiferi o per la mancanza di dati piezometrici.

In questi casi è necessario ricorrere all'uso di programmi appositamente predisposti che richiedono l'impiego di elaboratori.

Una serie di programmi di facile esecuzione è contenuta in Kinzelbach (1986), testo al quale si rimanda per gli approfondimenti del caso. Si richiama la pregevole trattazione del problema da parte di G.P. Beretta (1992).

Si elencano ora alcune indicazioni per la soluzione dei problemi di collocazione delle opere di decontaminazione in sistemi eterogenei.

2.7.1 Valutazione della posizione più idonea per le opere che comportano l'estrazione di acque (es. barriera di pozzi di prelievo)

Anche per i sistemi eterogenei, dopo l'identificazione della fonte di inquinamento, il primo obiettivo risiede nella determinazione della direzione di flusso della falda.

Tale stima deve essere fatta dapprima valutando in base ai procedimenti di calcolo adottati la permeabilità globale del sistema e le direzioni di massima permeabilità.

In base a tali elementi si potrà individuare correttamente le portate circolanti nel sistema; ovviamente ha notevole importanza la direzione di flusso preferenziale nel settore dal quale trae origine la contaminazione, che sarà maggiormente sviluppata lungo le traiettorie in cui le portate unitarie della falda sono più elevate, cosicché in base a tali dati si potrà opportunamente collocare i pozzi di prelievo.

La scelta deve essere fatta in modo che il fronte di richiamo di ciascuno di essi sia il più possibile sviluppato, così da ridurre il numero di pozzi indispensabile per assorbire tutto il fronte inquinante.

α. Tortuosità a fattore di convergenza

Nei sistemi di III tipo risulta molto importante l'effetto della tortuosità delle linee di flusso, che in questi casi è particolarmente accentuata; è quindi opportuno che i pozzi barriera siano localizzati in settori nei quali lo studio piezometrico o su modello abbiano evidenziato ridotto indice di tortuosità, solitamente corrispondenti a tratti di minore eterogeneità alla scala del raggio di influenza dei pozzi.

Possibilmente la collocazione del pozzo deve essere fatta in corrispondenza di una lente particolarmente sviluppata, dotata di trasmissività elevata.

Secondo le relazioni precedentemente riportate, ricavate da Phillips, il fattore di convergenza favorisce in questo caso il concentrarsi del flusso degli inquinanti all'interno di questi acquiferi.

Nei mezzi eterogenei, a differenza di quelli anisotropi, la disposizione delle lenti non segue precisi allineamenti, rendendo necessario quindi procedere a ricostruzioni molto complicate e spesso impossibili con i mezzi ordinari se si vuole pervenire a un buon dettaglio nell'individuazione della rete di flusso sotterranea.

Concentrando l'attenzione sulle deviazioni prodotte dalle singole lenti, osserviamo che alcune considerazioni si possono fare quando il rapporto ε fra spessore e lunghezza della lente assume valori molto piccoli (quando cioè $\varepsilon = e/l$ molto minori di 1); in questi casi, purché il flusso sia cilindrico e parallelo all'asse di allungamento maggiore della lente, il valore di G diviene all'incirca pari al rapporto k_i/k_o .

Per un migliore dettaglio Phillips considera due casi: quello delle falde in pressione e quello delle falde libere.

Nelle falde in pressione si può ritenere che a monte della lente oggetto di studio, inclusa in un acquifero di spessore h e dotata di uno spessore d , la velocità media di flusso sia U e la permeabilità k su uno spessore H .

Si può anche considerare più lenti di spessore variabile con lunghezza l ; in tal caso d avrà valore $d(x/l)$, e h avrà valore $h(x/l)$.

In corrispondenza della lente la permeabilità del mezzo è k_o e quella della lente k_i .

La velocità nella lente e nel mezzo sono rispettivamente u_i ed u_o e stanno tra loro nel seguente rapporto:

$$\frac{u_i}{k_i} = \frac{u_o}{k_o}$$

per mantenere la continuità fra volumi entranti ed uscenti dall'area interessata dalla lente; avremo anche:

$$u_i * d + u_o (h - d) = UH = \text{costante}$$

per la necessità di conservare le continuità delle portate nell'acquifero.

Il fattore di convergenza G è pari al rapporto fra le portate unitarie all'interno e all'esterno della lente:

$$G = \frac{ui}{U}$$

Secondo Phillips si può esprimere G in funzione di un fattore $f(x/l)$, pari a:

$$f(x/l) = 1/[1 + (k_i/k_o - 1)d/h]$$

come:

$$G = \left(\frac{k_i}{k_o}\right) \left(\frac{H}{h}\right) f\left(\frac{x}{l}\right)$$

Nelle figure sono illustrate le relazioni tra f , il rapporto d/h e il rapporto fra la permeabilità k_i/k_o .

Si osserva che quando k_i/k_o aumenta, f decresce con l'aumentare di d , mentre la velocità di flusso nella lente diminuisce rispetto all'iniziale valore di $u_i = Uk_i/k_o$ con l'aumentare di d .

Il motivo risiede nel fatto che in un acquifero in pressione, quando la lente comincia a cortocircuitare il flusso, attraendolo al suo interno, la cedente diminuisce e la velocità si riduce proporzionalmente.

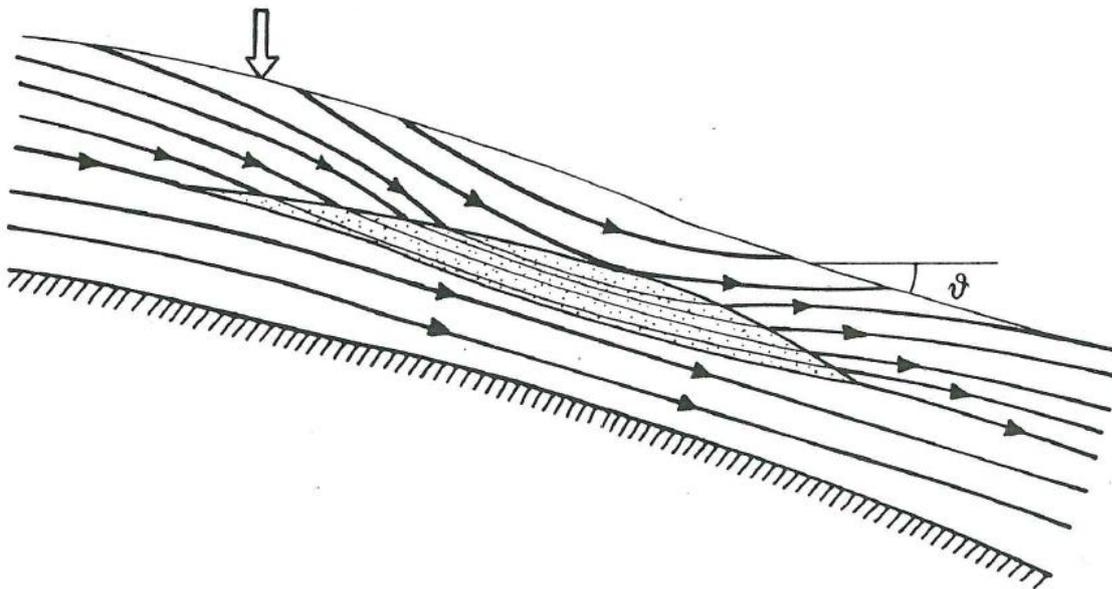


Figura 8 – effetti della presenza di una lente più permeabile in un acquifero freatico (da Phillips, ridis.)

Il flusso complessivo nella lente, o nel sistema di lenti considerato, invece aumenta con d .

Quando k_i è molto maggiore di k_o , il valore G si avvicina notevolmente al rapporto h/d , e la frazione del volume totale che fluisce lungo le lenti diviene praticamente uguale a:

$$u_{id_m} / UH = 1 - (k_o/k_i)(h/d_m)$$

in cui d_m rappresenta la massima potenza della lente o del complesso di lenti considerato.

La riduzione della cadente piezometrica che si verifica in un acquifero in pressione, non si realizza invece nel caso di falde freatiche, essendo mantenuta la cadente dell'andamento della superficie libera, che permane costante.

La velocità di flusso al di fuori della lente è $k_o \sin \theta$ e all'interno è $k_i \sin \theta$.

Secondo questo schema, l'acqua è drenata verso il basso al limite superiore della lente e restituita al limite inferiore. Phillips osserva che tale drenaggio avviene solamente verso il basso, mentre la superficie inferiore della lente non viene attraversata dalle linee di flusso. Questo schema è molto interessante; esse peraltro non è perfettamente riscontrabile nella realtà, in cui la superficie freatica mostra spesso di risentire della presenza di corpi più trasmissivi.

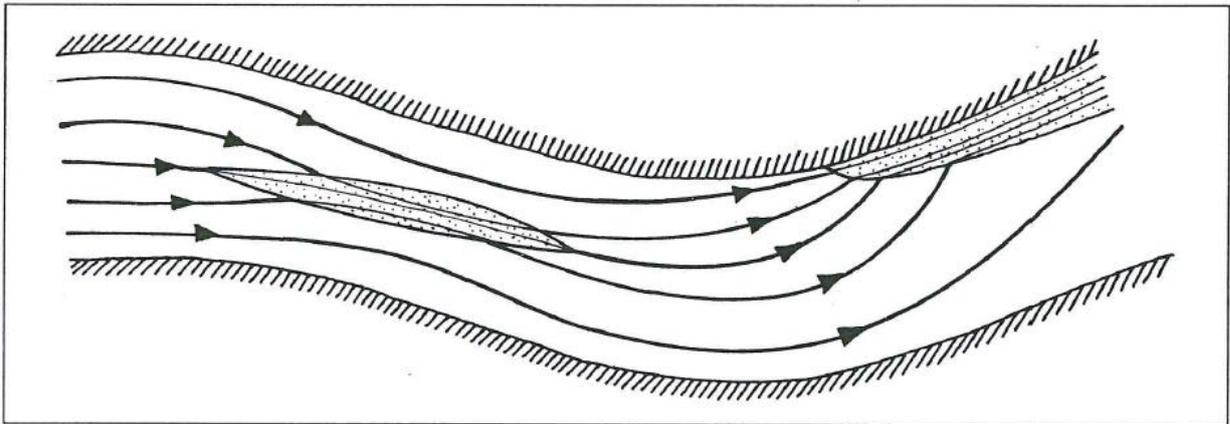


Figura 9 – conseguenze della presenza di lenti più trasmissive in un acquifero in pressione (da Phillips, ridis.)

La capacità delle lenti o degli strati più permeabili e trasmissivi di attirare i soluti, determina forti cambiamenti nella composizione chimica delle acque sotterranee. Lasciando da parte il caso dei soluti che vengono drenati verso acquiferi con i quali possono reagire e generare specie chimiche meno dannose, ad esempio meno solubili, l'effetto di maggiore interesse dato dalla variazione del gradiente di concentrazione verticale.

A monte della lente in effetti molti composti presentano concentrazioni che sulla verticale variano regolarmente: ad esempio i nitrati tendono a diminuire regolarmente con la profondità riducendosi a zero intorno ai 150 m al massimo, salvo casi particolari. Entrando nella lente più permeabile questi composti inizialmente mostrano una caduta di concentrazione sulla verticale molto marcata; infatti su uno spessore ridotto, si passa dalle concentrazioni tipiche della parte superiore della falda, molto elevate, fino a quelle tipiche della parte inferiore, perché la miscelazione non è ancora avvenuta.

Successivamente, propagandosi all'interno della lente stessa i filetti liquidi a diversa concentrazione si mescolano anche per effetto della dispersione.

Quando la soluzione esce dalla lente finisce con l'assumere una concentrazione pressoché identica, che caratterizza una larga porzione di acquifero sia in verticale che lateralmente.

Il gradiente finale di concentrazione all'uscita della lente è quindi molto ridotto rispetto a quello iniziale. È interessante constatare che questa dispersione (detta megadisersione per le dimensioni dei volumi di terreno che ne è interessato) è un fenomeno determinato dalle caratteristiche geologiche dell'acquifero che altera profondamente il quadro della dispersione considerata solamente a livello microscopico.

Le figure riportate mostrano anche come la presenza di lenti di questo tipo sia in grado di deviare considerevolmente le linee di flusso seguite dagli inquinanti, sia lateralmente sia verticalmente: i mezzi meno trasmissivi non sono in effetti in grado di ospitare un flusso di contaminante elevato, fatto che li rende poco produttivi ai fini del disinquinamento.

Un problema che deriva da queste considerazioni è quello rappresentato dalla necessità di determinare l'andamento delle linee di flusso in presenza di captazioni anche sulla verticale. Al fine di favorire la collocazione di filtri dei pozzi in posizione opportuna per l'intercettazione delle linee di flusso del contaminante.

Ciò si rende fattibile applicando il principio della sovrapposizione degli effetti, che consente di valutare l'entità dell'abbassamento piezometrico prodotto da un pozzo i cui filtri abbiano un

lunghezza nota, e siano posti in corrispondenza di un acquifero continuo con quello in cui sono stati rilevati gli andamenti del potenziale idraulico ϕ_0 , con uguale trasmissività.

La relazione di Bear fornisce:

$$\pm \delta\phi = \frac{Q_w}{8\pi k 2L} \ln \frac{11 + 12 + 2L}{11 + 12 - 2L}$$

In cui 11 e 12 sono le distanze del punto dall'estremo superiore e inferiore rispettivamente del filtro. Quando il punto è molto distante (più di L) dal pozzo, la relazione si semplifica ponendo:

$$\delta\phi = \frac{Q_w}{2\pi k 2L} \ln \frac{2L}{r}$$

Secondo Bear è possibile il calcolo dell'abbassamento anche in regime transitorio.

Si tenga presente che l'abbassamento (o il sollevamento) risulta sempre proporzionale alla portata estratta dal pozzo Q_w .

b. Influenza delle variazioni di trasmissività

Quando la continuità degli acquiferi non è particolarmente elevata (ad esempio quando lenti di grande trasmissività sono intercalate, lungo la direzione di maggiore permeabilità globale, con lenti meno trasmissive) e il sistema è comunque fortemente anisotropo, la migliore disposizione delle opere di decontaminazione è quella che consente di raggiungere un'ampia estensione dell'area di richiamo delle acque contaminate, pur raccogliendo una minima quantità di acqua non contaminate.

Tale condizione si realizza al limite tra le lenti di diversa trasmissività.

Si esamini come esempio il caso di una contaminazione che può essere intercettata da una semplice trincea. È questo il caso di acquiferi nei quali il substrato si colloca a piccola profondità. In questi casi particolarmente semplici, come ad esempio lungo un tubo di flusso, è facile calcolare la posizione più idonea per la trincea.

In tali circostanza infatti, lungo la direzione di flusso l'abbassamento piezometrico lungo il limite a monte del settore oggetto di studio n è dato dalla relazione:

$$H - h = \frac{(s + n)\delta}{\left[s + \left(\frac{nT'}{T}\right)\right]\delta}$$

In cui s è il numero di tratti di ugual lunghezza L in cui è suddiviso l'acquifero lungo la linea di flusso che congiunge alimentazione e recapito, nei quali la trasmissività vale T; n è il numero dei tratti in cui la trasmissività vale T'; δ corrisponde all'abbassamento per ciascun tratto L e di pari lunghezza uguale a T.

Infatti quando la trasmissività è dovunque uguale, l'abbassamento fra alimentazione e recapito è pari a:

$$\begin{aligned} N &= n + s \\ H - h &= N\delta \end{aligned}$$

La portata è quindi:

$$Q' = T(h - h)(w / \sum L)$$

Tale valore può anche essere espresso come:

$$Q' = \frac{TwN\delta}{NL} = \frac{Tw\delta}{L}$$

se $w = L$

$$Q' = T\delta$$

In caso di acquifero composto da s tratti di trasmissività T e da tratti di trasmissività T' (con $s+n=N$) la portata passa da Q' a Q''.

Quando le celle sono disposte in serie e presentano trasmissività diversa, essendo la portata costante:

$$\delta' T = \delta'' T''$$

In cui δ' rappresenta la riduzione del livello piezometrico in n intervallo di lunghezza L e trasmissività T, nel nuovo acquifero in cui un numero n di intervalli ha trasmissività T'' . Il valore di δ'' si può dedurre da quello di δ , essendo $H-h$ uguale a $N\delta$; infatti:

$$H - h = \delta's + \delta''n = \delta N$$

Si può facilmente constatare che $\delta'' = \delta' (T'/T'')$, pertanto:

$$H - h = \delta'(s + nT'/T'') = \delta N$$

E quindi:

$$\delta' = \delta (m + nT'/T'') N$$

Che permette di calcolare il valore di δ' (incognito) a partire da quello di δ e di conseguenza anche quello di δ'' e di Q'' . In effetti, ai fini della valutazione di Q'' , è sufficiente conoscere il valore di δ'' o di δ' indifferentemente, in quanto la portata è costante su tutta la serie delle celle.

$$Q'' = \delta' T = \delta'' T''$$

L'incremento di portata che si verifica in presenza di n celle con trasmissività T'' è ricavabile dalla relazione :

$$Q'' - Q' = T (\delta' - \delta) = \delta \cdot [(s + \frac{nT'}{T''}) / (N - 1)]$$

E il rapporto fra le portate d:

$$\frac{Q''}{Q'} = \frac{\delta'}{\delta} = \frac{N}{(s + \frac{nT'}{T''})}$$

Queste relazione permettono di valutare rapidamente la differenza di portata fra un sistema continuo e uno discontinuo, nel quale si presentino n tratti di trasmissività T'' di lunghezza L.

Si constata che non ha importanza l'ordine con il quale si succedono le celle, ma solo il numero di quelle con trasmissività, ma solo il numero di quelle con trasmissività diversa.

Ad esempio, in un sistema con sette tratti di lunghezza L e dislivello totale $10-2 \text{ m} = 8\text{m}$, trasmissività $T=1\text{m}^2/\text{s}$ in tutti i tratti meno uno, $T'' = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ in un solo tratto centrale, in base alla formula precedente δ è pari a $8/6= 1.333$ in caso di T omogeneamente distribuita su tutta l'area, mentre inserendo T' avremo $\delta'=60/55$ del valore precedente cioè 1.454, mentre δ'' risulta pari a 0.727.

Risulta quindi evidente che il collocamento dreno a valle di una serie di celle con elevata trasmissività, andrà ad inserirsi in un tratto a debole pendenza della falda; si potrà quindi esercitare in questo settore il massimo dei prelievi possibili, corrispondente al massimo abbassamento prevedibile.

Se il sistema è composto di molte celle, facilmente il livello piezometrico si abbassa fino al substrato; è quindi opportuno tracciare il profilo piezometrico utilizzando la predetta relazione, e collocare il dreno in un punto di elevata trasmissività che soddisfi la necessità di corrispondere a un settore in cui il livello piezometrico è ancora molto elevato rispetto al substrato.

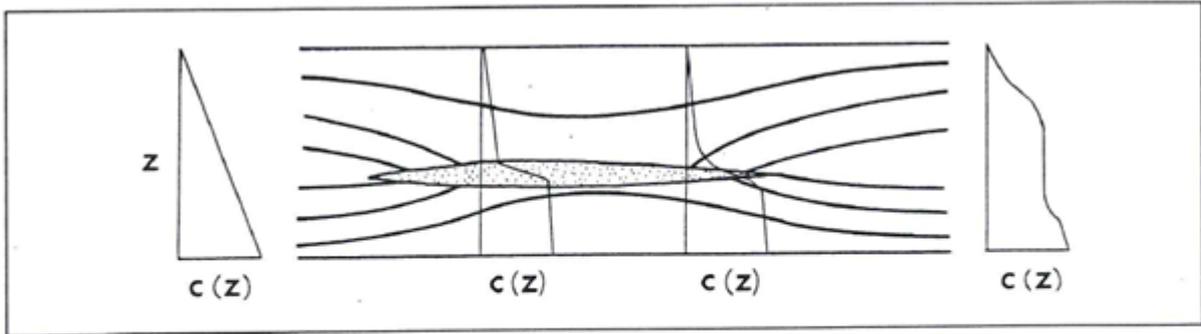


Figura 10 - Deviazione delle linee di flusso in corrispondenza di una eterogenità in falda contenente un contaminante che presenta una variazione di concentrazione (c) in funzione della profondità z ; si vuole segnalare come all'uscita (a destra) del contaminante dalla lente si abbia un rilevante incremento della concentrazione nella parte alta della falda, una completa miscelazione nella parte centrale, una forte variazione di concentrazione nella parte inferiore dell'acquifero (da Phillips, ridis.).

c. Distanza dalla fronte delle barriere

Un altro elemento condiziona in modo determinante l'efficienza del sistema di decontaminazione: la distanza alla quale deve essere posizionata la barriera dei pozzi rispetto alla fonte dell'inquinamento.

Dall'esame della distribuzione delle concentrazioni, è quasi sempre possibile, una volta calcolata la dispersività, la permeabilità e la velocità reale di filtrazione, delimitare il settore nel quale prevale il trasporto per avvezione, il cosiddetto "nucleo dell'inquinamento".

Ad esso corrisponde il massimo del flusso del contaminante, ed è al suo interno che viene solitamente posizionato il sistema di prelievo per ottenere la massima efficienza nell'intervento.

Una impostazione di questo tipo permette infatti di eliminare la massima parte del contaminante in tempi ristretti.

Generalmente la parte dell'inquinante che è già più a valle del fronte di avvezione, per effetto della dispersione e degli altri fenomeni che favoriscono la depurazione, tendono ad estinguersi in tempi che sono inversamente proporzionali alla dispersività, alla permeabilità, al potere auto-depurante del terreno, all'entità dell'infiltrazione di acque non contaminate. Solamente con un modello di flusso e di trasporto sarà possibile disporre in modo ottimale i pozzi.

Secondo una ricerca su questo argomento, la migliore disposizione dei pozzi di decontaminazione prevede che essi vengano disposti in numero sufficiente a produrre un fronte così ampio da attrarre tutto il corpo idrico contaminato; raramente tuttavia un allineamento in direzione ortogonale alle linee di flusso dei pozzi è soddisfacente, in quanto una parte della contaminazione tende a sfuggire alla barriera.

Risulta infatti molto più efficace disporre i pozzi secondo la direzione di flusso, purché essi siano sufficientemente vicini da evitare punti di ristagno della falda (Arduini et al., 1994).

Convorrà posizionare i pozzi a valle dell'intero settore inquinato solamente quando si tema che i fattori che favoriscono l'estinzione dell'inquinamento non siano sufficienti a garantire la sicurezza degli impianti per l'approvvigionamento idrico. In questo caso i costi del disinquinamento salgono esponenzialmente con la distanza dal fronte di avvezione, per l'accrescersi del volume delle acque che risulta necessario depurare.

3 REFERENCES

Arduini C., Colombo F., Raffaelli L., Rosti G (1994). Studi per il disinquinamento della falda in Provincia di Milano

Avanzini M., Beretta G.P. (1992) - La perimetrazione delle zone di rispetto dei pozzi: un approccio geostatistico per l'applicazione di modelli analitici e numerici. 2° Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori di Geologia Applicata, 28-31 ottobre, Viterbo

Domenico P.A., and Schwartz F.W., (1990). Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, New York.

Kinzelbach W.(1986). Groundwater Modelling: An Introduction with Sample Programs in Basic. Elsevier Science Inc. New York, NY, USA ISBN:0444425829

Phillips O. M. (1991). Flow and Reactions in Permeable Rocks. Cambridge, Port Chester, New York, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press. Price £40.00, US \$59.50 (hard covers). ISBN 0 521 38098 7.

Schneebeli, G. (1966). Hydraulique Souterraine. Eyrolles, Paris.

Strack, O. D. L.(1989) Groundwater Mechanics. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.