

## Problematiche idrogeologiche legate all'apertura e all'ampliamento di attività estrattive sottofalda in aree di pianura

Sara Elisa Domenica Castagna, Domenico Antonio De Luca

Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino, sara.castagna@unito.it, domenico.deluca@unito.it

### *Hydrogeological problems related to quarry lakes opening and their following expansion in plain areas*

**ABSTRACT:** Quarry lakes for inert extraction modify the piezometric surface permanently, causing a drawdown in the up-gradient margin of the lake, and a rising in the down-gradient margin. Increasing inert needs require the enlargement of present quarry lakes; the aim of present paper is to evaluate the piezometric deformations due to quarry lakes opening and following expansion. The finite-difference groundwater flow code MODFLOW was used to realized numerical models, representing a plain sector with a quarry lake within. In each model the input parameters of the aquifer (hydraulic conductivity and hydraulic gradient) are fixed, while the dimensions of original lake are varied. For each configuration (enlargement across flow lines, lengthening along them, and deepening), the extent of piezometric deformation and the value of drawdown and rising are calculated. Piezometric deformations are about of 0.20-0.70 metres and are extended for a few kilometres; the greatest deformations are caused by lengthening along flow lines.

*Key terms:* Quarry lakes, Piezometric deformation, Numerical model

*Termini chiave:* Laghi di cava, Deformazioni piezometriche, Modelli numerici

### **Riassunto**

Lo sviluppo di attività estrattiva sottofalda per il reperimento di inerti comporta la creazione di un lago, dovuto all'intersezione degli scavi con la falda superficiale e la sua conseguente messa a giorno. I laghi di cava modificano in modo irreversibile il territorio e la piezometria dell'area interessata dagli scavi, e le principali problematiche ad essi legate, sono rappresentate dall'aumento della vulnerabilità della falda superficiale, e dalla possibilità di mettere in comunicazione la falda superficiale con quelle profonde, generalmente di migliore qualità, mediante un eccessivo approfondimento degli scavi.

La crescente domanda di inerti ha portato alla necessità di prevedere una prosecuzione dell'attività estrattiva sottofalda, con possibile espansione sia in senso areale che in profondità degli scavi esistenti. Scopo del presente lavoro è quello di valutare l'entità delle variazioni apportate alla piezometria di un settore di pianura, causate dall'apertura di uno scavo in falda e dai suoi successivi ampliamenti, al fine di poter prevedere la configurazione di minor impatto sull'assetto piezometrico locale.

Tramite utilizzo del codice di calcolo alle differenze finite MODFLOW, sono state realizzate delle simulazioni di flusso su alcune situazioni tipo, semplificazioni di situazioni reali, presenti nel contesto piemontese studiato. In ciascuna situazione sono stati attribuiti specifici valori di conducibilità idraulica e gradiente all'acquifero

superficiale e, a parità di condizioni iniziali, in ogni scenario sono stati ipotizzati tre tipi di ampliamento di un originario lago di cava, in direzione del flusso idrico prevalente, in direzione ortogonale a questo e in profondità fino al raggiungimento del limite di separazione con gli acquiferi profondi.

Le profondità di scavo sono state fatte variare fra 20 e 40 metri, il gradiente idraulico fra 0.001 e 0.003, la conducibilità idraulica dell'acquifero superficiale tra 0.001 e 0.0001 m/s. Per ciascuna simulazione sono stati valutati l'entità delle variazioni prodotte sulla superficie piezometrica e il raggio d'influenza delle deformazioni piezometriche.

Dai risultati ottenuti si ricava che le deformazioni piezometriche prodotte dalla presenza di un lago di cava, nelle condizioni ipotizzate, raggiungono estensioni di circa 2-5 km sia a monte che a valle dello scavo, mentre le variazioni massime prodotte sono dell'ordine di qualche decimetro. Inoltre risulta che la configurazione di minor impatto, a livello idrogeologico, è quella che prevede ampliamenti areali in senso trasversale alla direzione di deflusso principale, mentre gli approfondimenti non condizionano in modo così evidente l'andamento della piezometria. Al contrario ampliamenti successivi in direzione concorde al flusso idrico prevalente, sono quelli di maggior impatto, in quanto creano coni di depressione a monte e innalzamenti della piezometria a valle dell'ordine del metro, estesi per diversi chilometri.

## 1. Principali problematiche connesse all'attività estrattiva sottofalda

Lo sviluppo di attività estrattiva in falda per il reperimento di materiali inerti (sabbie e ghiaie), utilizzati soprattutto per la confezione dei calcestruzzi impiegati nell'edilizia, comporta la creazione di laghi artificiali, dovuti all'intersezione degli scavi con la falda superficiale e la conseguente messa a giorno di quest'ultima (Figura 1).

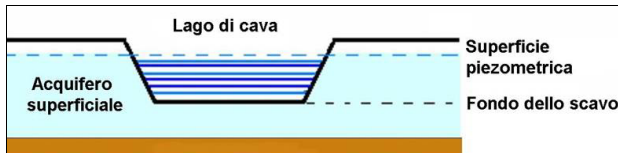


Figura 1 Schema, in sezione, di cava sottofalda.  
Figure 1 Pattern of a quarry lake (section).

Si tratta di un'attività che modifica in modo irreversibile il territorio e l'assetto idrogeologico dell'area interessata dagli scavi (Fornaro, 1998), causando deformazioni piezometriche (Figura 2) che si traducono in un abbassamento della superficie piezometrica a monte del lago e in un corrispondente innalzamento a valle, rispetto alla situazione indisturbata in assenza di lago (Avanzini *et al.*, 1991). In conseguenza di ciò, a monte del lago gli abbassamenti causati possono interagire con sorgenti o pozzi, abbassando in essi il livello piezometrico, con eventuali problemi per quanto riguarda il recapito idrico; sul lato a valle, al contrario, gli innalzamenti possono portare la falda troppo vicina alla superficie topografica, provocando impaludamenti o addirittura ad emergenze idriche indesiderate.

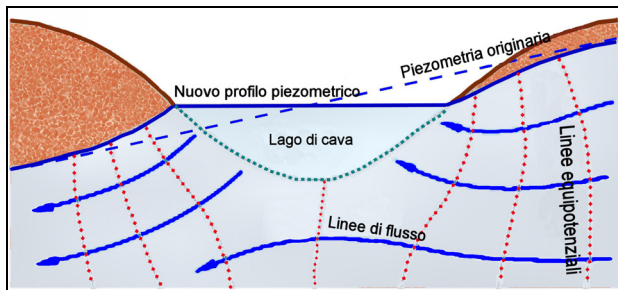


Figura 2 Schema piezometrico, in sezione, del sistema lago-falda. In blu tratteggiato è riportata la piezometria indisturbata, in assenza di lago; le frecce blu indicano le linee di flusso mentre in puntinato rosso sono riportate le linee equipotenziali.  
Figure 2 Piezometric scheme (section) of quarry lake-groundwater system. The blue dashed line represents the original water table, without lake; blue arrows represent stream lines, while the red dotted lines represent equipotential lines.

Le principali problematiche sono legate, in primo luogo, all'aumento della vulnerabilità della falda superficiale nei confronti di eventuali inquinanti in

conseguenza della sua messa a giorno e, in secondo luogo, alla possibilità di degrado delle falde profonde, a causa dell'eventuale approfondimento oltre il limite naturale fra acquifero superficiale e acquiferi profondi, con conseguente commistione di acque di diversa qualità.

La presenza di un lago di cava modifica, inoltre, il bilancio idrico locale, a causa dell'evaporazione che si verifica in corrispondenza della superficie del lago.

La crescente domanda di inerti ha portato alla frequente necessità di prevedere una prosecuzione dell'attività di cava sottofalda con una possibile espansione, sia in senso areale che in profondità, dei laghi attualmente esistenti.

Lo scopo del presente lavoro, alla luce delle considerazioni precedenti, è pertanto quello di valutare l'entità delle modifiche apportate alla piezometria di un settore di pianura, dalla creazione di uno scavo in falda e dai suoi successivi ampliamenti, al fine di poter prevedere la configurazione di minor impatto, in considerazione di aspetti strettamente idrogeologici ed ambientali da un lato e più prettamente estrattivi dall'altro.

## 2. La situazione in Piemonte

Con specifico riferimento alla situazione piemontese, indagata nel corso del presente studio, si osserva che nel territorio regionale sono presenti circa 70 cave sottofalda, attualmente in produzione, che soddisfano circa il 35% dei fabbisogni di inerti della Regione Piemonte (Figura 3).

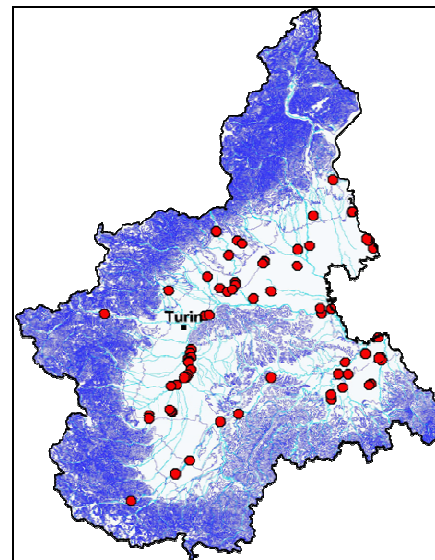


Figura 3 Ubicazione delle cave sottofalda attive presenti sul territorio della Regione Piemonte.  
Figure 3 Active quarry lakes inside the Piemonte territory.

Studi precedenti, condotti sul territorio regionale, hanno messo in evidenza che, per quanto concerne la vulnerabilità degli acquiferi superficiali in relazione alla

presenza di un lago di cava, verifiche qualitative delle acque di falda, intercettate dagli scavi, non hanno dato riscontro di degrado qualitativo, riconducibile all'attività estrattiva (Castagna *et al.*, 2006). Tale problematica è comunque ancora in corso di approfondimento.

Con riferimento all'ampliamento in profondità degli scavi attualmente in produzione, in Piemonte è presente una limitazione all'approfondimento, previsto dalla normativa in vigore (LR 22/96), che vieta di oltrepassare, in fase di scavo, il limite naturale di separazione fra acquifero superficiale e acquiferi profondi, al fine di tutelare la qualità di questi ultimi, generalmente sfruttati a scopo idropotabile.

### 3. Metodologia di lavoro

Sono state realizzate delle simulazioni mediante modelli matematici di flusso, tramite l'utilizzo del codice di calcolo alle differenze finite MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988); le simulazioni sono state svolte su alcune situazioni tipo, semplificazioni di situazioni reali, presenti nel contesto piemontese studiato, allo scopo di definire l'impatto e le conseguenze sulla falda legati alla presenza di un lago di cava.

Nel dettaglio, è stato preso in considerazione un settore di pianura di estensione pari a 7 km x 10 km, al centro del quale è stata simulata la presenza di un lago di cava di dimensioni iniziali di circa 15 ha per 20 m di profondità, valori corrispondenti alle dimensioni medie dei laghi di cava piemontesi. L'acquifero superficiale nel quale è inserito il lago ha uno spessore di circa 40 m, spessore medio dell'acquifero a falda libera della pianura piemontese.

A partire da questa configurazione iniziale, sono stati ipotizzati diversi ampliamenti del lago di cava in esame, in senso areale ed in profondità. Schematizzando, un ampliamento dell'attività estrattiva può prevedere un'espansione laterale, verso valle, con riferimento alla direzione di deflusso della falda, o in profondità, con le limitazioni sopra citate.

Pertanto, arealmente, gli ampliamenti previsti sono di due tipi, in senso trasversale rispetto al flusso idrico prevalente, con un allargamento dello specchio d'acqua creato, mediante raddoppio della larghezza del lago e in senso longitudinale rispetto all'andamento della falda, con un allungamento del lago lungo la direzione di deflusso principale, mediante raddoppio del lato rappresentante la lunghezza del bacino lacustre. In profondità, l'approfondimento massimo coincide con il raggiungimento della base dell'acquifero superficiale (Figura 4).

### 4. Descrizione del dominio fisico scelto e parametri di input del modello realizzato

Il sistema fisico preso in esame è discretizzato mediante maglie quadrate di dimensioni massime pari a 500 m di

lato, mentre lungo la direzione z il dominio si estende per una profondità di 50 m; il lago, ubicato approssimativamente al centro dell'area (Figura 4), è costituito da un quadrato di circa 390 m di lato, corrispondente a circa 15 ha nelle sue dimensioni iniziali ed in corrispondenza di questo le maglie sono state infittite (dimensioni 100m x 100 m). L'area occupata dal lago di cava è stata assimilata, nel modello, ad un settore del dominio caratterizzato da valori di conducibilità idraulica molto elevati, pari a 1 m/s, e da valori di porosità efficace e coefficiente di immagazzinamento pari ad 1.

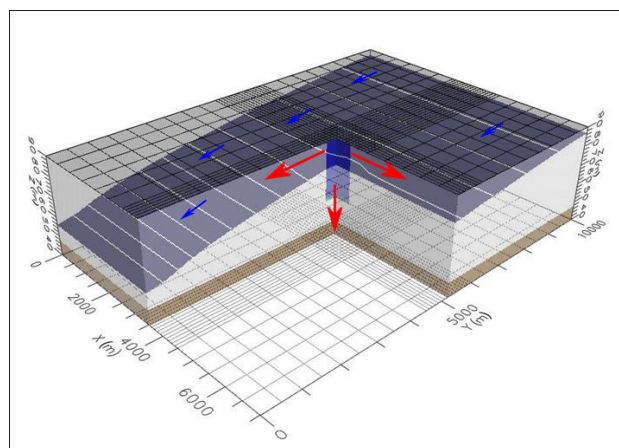


Figura 4 Schema tridimensionale del modello fisico preso in esame; in blu al centro il lago di cava nelle sue dimensioni iniziali; le frecce rosse indicano i tre possibili ampliamenti previsti, mentre le frecce blu rappresentano le linee di flusso della falda, la cui superficie è riportata in azzurro.

*Figure 4 Three-dimensional scheme of studied model; the primary quarry lake (blue) is placed at the core; red arrows represent three likely enlargement of lake, blue arrows describe the stream lines, while the groundwater surface is represented in sky-blue.*

A partire da questa situazione iniziale sono stati fatti variare i diversi parametri idrogeologici caratterizzanti il sistema fisico considerato; in particolare sono state prese in considerazione varie condizioni relative ad effettive situazioni morfologiche e idrogeologiche dei laghi di cava piemontesi. Le profondità di scavo sono state fatte variare fra 20 e 40 metri, il gradiente idraulico fra 0.001 e 0.003, la conducibilità idraulica dell'acquifero superficiale tra 0.001 e 0.0001 m/s. Per ciascuna delle situazioni ipotizzate sono state successivamente fatte variare le dimensioni del lago, prospettando così i diversi ampliamenti possibili, descritti in precedenza, valutando per ciascuno l'estensione della deformazione piezometrica prodotta e l'entità degli abbassamenti indotti nella falda superficiale.

Sono stati inoltre introdotti dati relativi alla ricarica superficiale dovuta alle precipitazioni, pari a 150 mm/anno, e dati relativi all'evaporazione dalla superficie

del lago, calcolata mediante la formula di Visentini (1937), sulla base delle temperature medie mensili, riferite ad un periodo di 10 anni; dalla superficie del lago risultano evaporare in media 700 mm/anno, corrispondenti ad un deficit idrico di circa 0.2 l/s per ettaro di lago.

#### 4.1 Caso 1

Il primo scenario ipotizzato consiste in un acquifero caratterizzato da una conducibilità idraulica pari a 0.001 m/s, in cui è presente una falda libera con un gradiente di 0.001.

In questo contesto è stato inserito un primo lago di cava, che ha prodotto le deformazioni piezometriche riportate in figura (Figura 5A). Successivamente sono stati ipotizzati i 3 ampliamenti possibili, già descritti in precedenza, e per ciascuno di essi sono stati calcolati gli abbassamenti della superficie piezometrica prodotti a monte e i conseguenti innalzamenti a valle del lago, e l'estensione della deformazione piezometrica risultante, mediante sottrazione della piezometria finale rispetto a quella iniziale, in assenza di lago.

Gli abbassamenti e gli innalzamenti così ottenuti sono stati confrontati fra loro e vengono riportati in figura 5.

#### 4.2 Caso 2

Nella seconda situazione modellizzata, la conducibilità idraulica dell'acquifero rimane invariata, pari a 0.001 m/s, mentre viene aumentato il gradiente della falda, pari in questo caso a 0.003. A partire da questi parametri iniziali sono state fatte variare le dimensioni del lago di cava, come nel caso precedente, ottenendo i risultati riportati in Figura 6.

#### 4.3 Caso 3

Nella terza simulazione realizzata è stata variata la conducibilità idraulica dell'acquifero in esame, posta a 0.0001 m/s, mentre il gradiente della falda è stato scelto pari a 0.002. Anche in questa situazione sono stati valutati gli abbassamenti e gli innalzamenti prodotti dalla presenza del lago sulla morfologia della falda, confrontando l'originale piezometria in assenza di lago con quella ottenuta nelle diverse configurazioni ipotizzate (Figura 7).

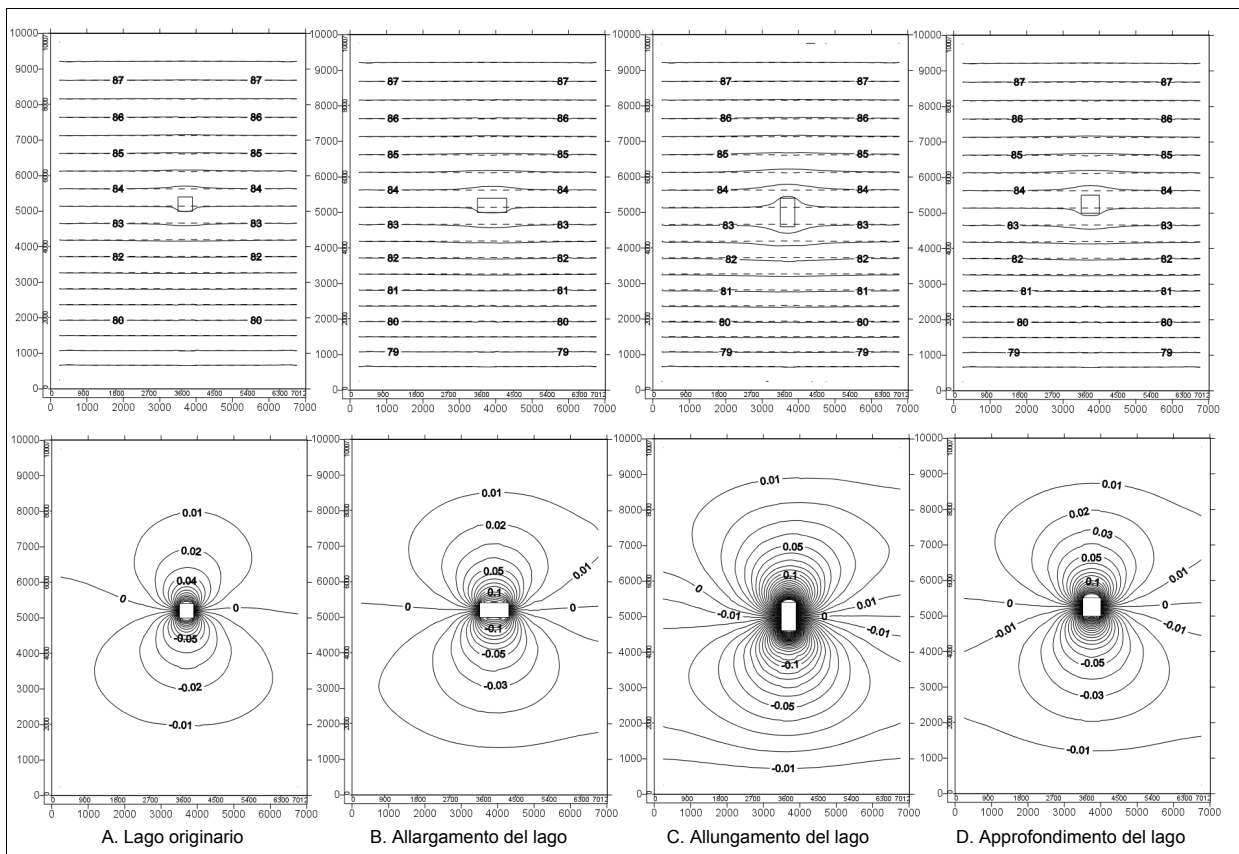


Figura 5. CASO 1 ( $k=0.001$  m/s,  $i=0.001$ ); in alto: andamento in pianta delle isopiezometriche (m slm), in relazione a quelle che si avrebbero in assenza di lago (tratteggiate); in basso: isolinee di uguale variazione del livello piezometrico (m). I valori positivi corrispondono ad un abbassamento della superficie piezometrica, mentre quelli negativi ad un suo innalzamento.

Figure 5 CASE 1 ( $k=0.001$  m/sec,  $i=0.001$ ); Top: piezometric surface, plan view (dashed lines represent the original piezometric surface, without lake); Bottom: contours of variation of piezometric level (m). Positive numbers correspond to uprisings, while negative numbers represent a drawdown. A: Original lake; B: Widening of lake; C: Lengthening of lake; D: Deepening of lake.

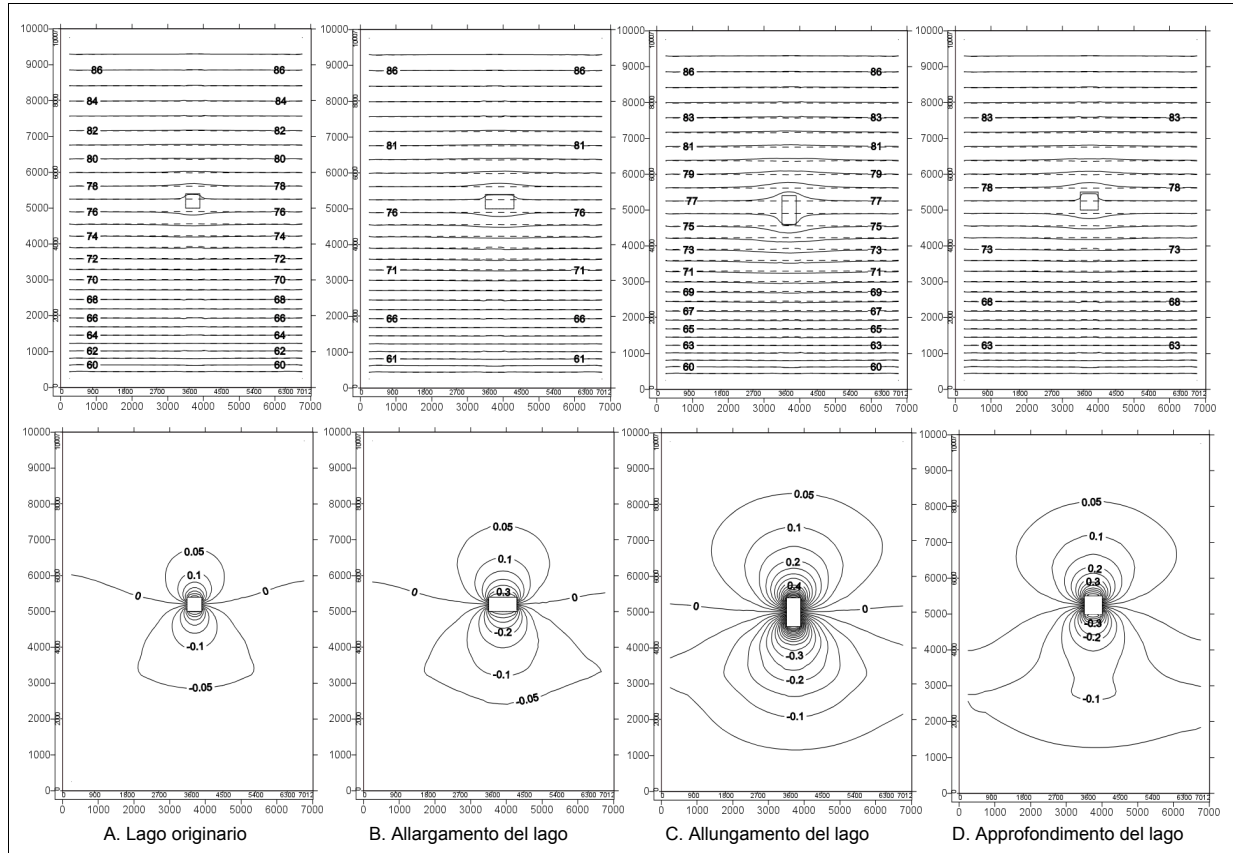


Figura 6. CASO 2 ( $k=0.001$  m/s,  $i=0.003$ ); in alto: andamento in pianta delle isopiezometriche (m slm), in relazione a quelle che si avrebbero in assenza di lago (tratteggiate); in basso: isolinee di uguale variazione del livello piezometrico (m). I valori positivi corrispondono ad un abbassamento della superficie piezometrica, mentre quelli negativi ad un suo innalzamento.

Figure 6 CASE 2 ( $k=0.001$  m/sec,  $i=0.003$ ); Top: piezometric surface, plan view (dashed lines represent the original piezometric surface, without lake); Bottom: contours of variation of piezometric level (m). Positive numbers correspond to uprising, while negative numbers represent a drawdown. A: Original lake; B: Widening of lake; C: Lengthening of lake; D: Deepening of lake.

#### 4.4 Colmatazione del bacino

E' stato simulato il caso di colmatazione di pareti e fondo del lago di cava da parte di sedimenti fini, fenomeno che si verifica nel tempo all'interno dei laghi di cava reali. Questa situazione, se da un lato può risultare positiva in relazione a possibili inquinanti che possano propagarsi dal lago verso l'acquifero, dall'altro, a causa dell'impermeabilizzazione del bacino stesso, riduce gli scambi con la falda, provocando potenzialmente un fenomeno di aumento dello stato trofico del lago.

La situazione modellizzata è caratterizzata nel dettaglio da un gradiente della falda pari a 0.003 e da una conducibilità idraulica dell'acquifero di 0.001 m/s. Sono stati ipotizzati due scenari diversi: nel primo caso al di sotto della base del lago è stato inserito un layer dello spessore di circa 1 m con  $k=10^{-6}$  m/s, per simulare la sedimentazione di materiale fine sul fondo, e alle celle al contorno dello scavo, mediante la condizione "wall" di MODFLOW, è stato imposto uno spessore di un 0.5 m di materiale con la stessa conducibilità; nel secondo caso è stata diminuita la conducibilità del materiale di

riempimento, fino a  $10^{-8}$  m/s, ed è stato aumentato fino ad 1 metro lo spessore del materiale deposto sulle pareti. Questo secondo caso in realtà rappresenta una situazione limite del processo di sedimentazione di materiale fine sul contorno dello scavo.

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 8. Come si osserva dalle figure nel primo caso si hanno sempre abbassamenti della piezometria sul lato a monte del lago di cava e corrispondenti innalzamenti a valle; a differenza della situazione in assenza di materiale fine sul contorno dello scavo (caso 2), si osservano minori variazioni di livello piezometrico ed una limitata estensione dell'area di deformazione prodotta.

Nel caso di colmatazione del bacino da parte di sedimenti a conducibilità molto bassa, si verifica una situazione contraria alle precedenti, con un innalzamento della superficie piezometrica a monte del lago e un suo abbassamento a valle; i valori massimi di deformazione della superficie piezometrica sono intorno a 40 cm, sia a monte che a valle del lago.

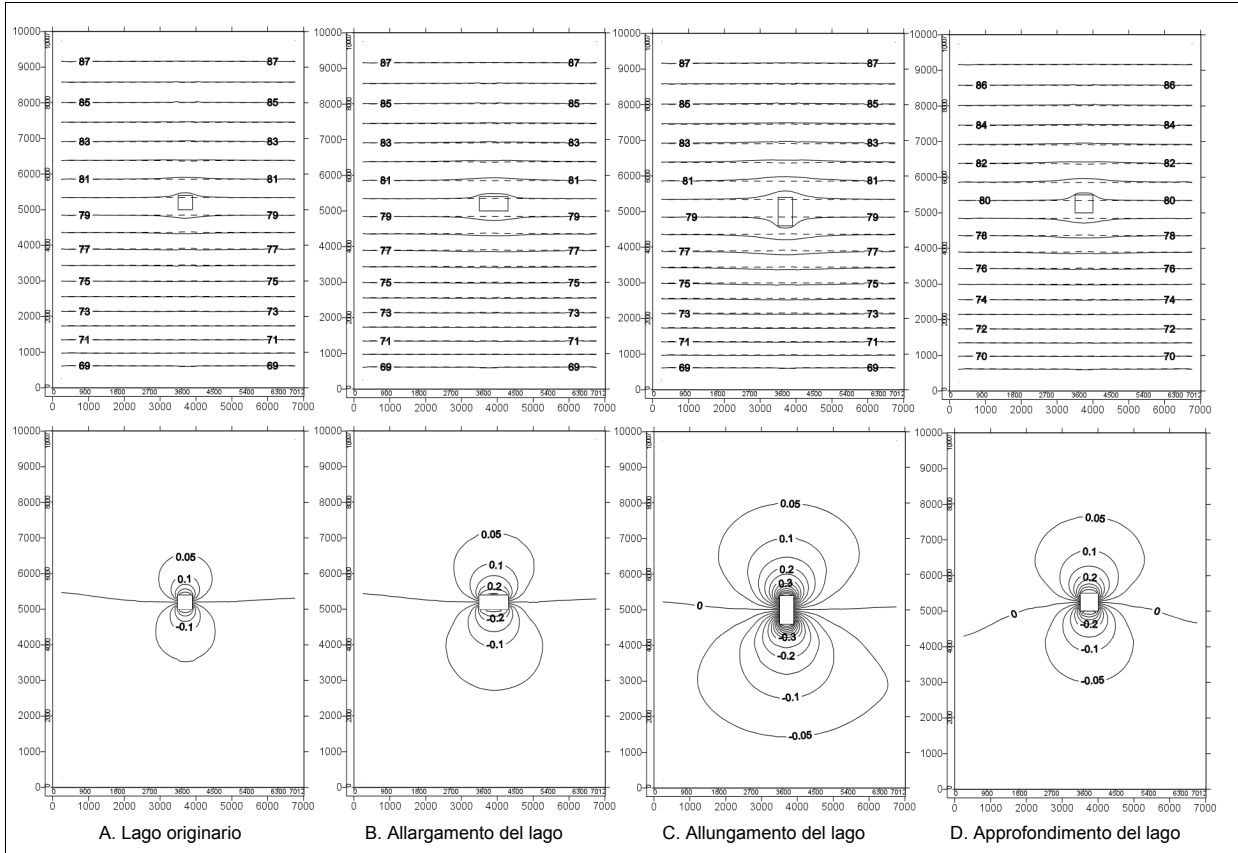


Figura 7. CASO 3 ( $k=0.0001$  m/s,  $i=0.002$ ); in alto: andamento in pianta delle isopiezometriche (m slm), in relazione a quelle che si avrebbero in assenza di lago (tratteggiate); in basso: isolinee di uguale variazione del livello piezometrico (m). I valori positivi corrispondono ad un abbassamento della superficie piezometrica, mentre quelli negativi ad un suo innalzamento.

Figure 7 CASE 3 ( $k=0.0001$  m/sec,  $i=0.002$ ); Top: piezometric surface, plan view (dashed lines represent the original piezometric surface, without lake); Bottom: contours of variation of piezometric level (m). Positive numbers correspond to uprising, while negative numbers represent a drawdown. A: Original lake; B: Widening of lake; C: Lengthening of lake; D: Deepening of lake.

Tabella 1 Riassunto dei risultati ottenuti nelle simulazioni, per ciascuno scenario modellizzato; i numeri riportati rappresentano i valori massimi di abbassamento e di innalzamento osservati, rispetto all'originaria superficie piezometrica, in assenza di lago.

Table 1 Summary of modelling results; the numbers represent the utmost values of drawdown and rising of water table, compared with the original piezometric surface, without lake.

		CASO 1		CASO 2		CASO 3	
		$i = 0.001; k = 0.001$ m/s		$i = 0.003; k = 0.001$ m/s		$i = 0.002; k = 0.0001$ m/s	
		Abbassamento (m)	Innalzamento (m)	Abbassamento (m)	Innalzamento (m)	Abbassamento (m)	Innalzamento (m)
Lago iniziale	Area = 15 ha	0.14	0.16	0.4	0.43	0.29	0.30
	Profondità = 20 m						
Allargamento	Area = 30 ha	0.16	0.18	0.4	0.43	0.29	0.30
	Profondità = 20 m						
Allungamento	Area = 30 ha	0.3	0.4	0.95	1.02	0.68	0.73
	Profondità = 20 m						
Approfondimento	Area = 20 ha	0.2	0.25	0.63	0.58	0.44	0.43
	Profondità = 40 m						

## 5. Risultati ottenuti

In Tabella 1 vengono riportati i valori massimi e minimi della variazione piezometrica prodotta in ciascuna situazione presa in esame. In figura 9 sono riportati

diagrammi che mostrano l'andamento di abbassamenti e innalzamenti della piezometria, prodotti in ciascuna situazione, in funzione della distanza dal centro del lago di cava.

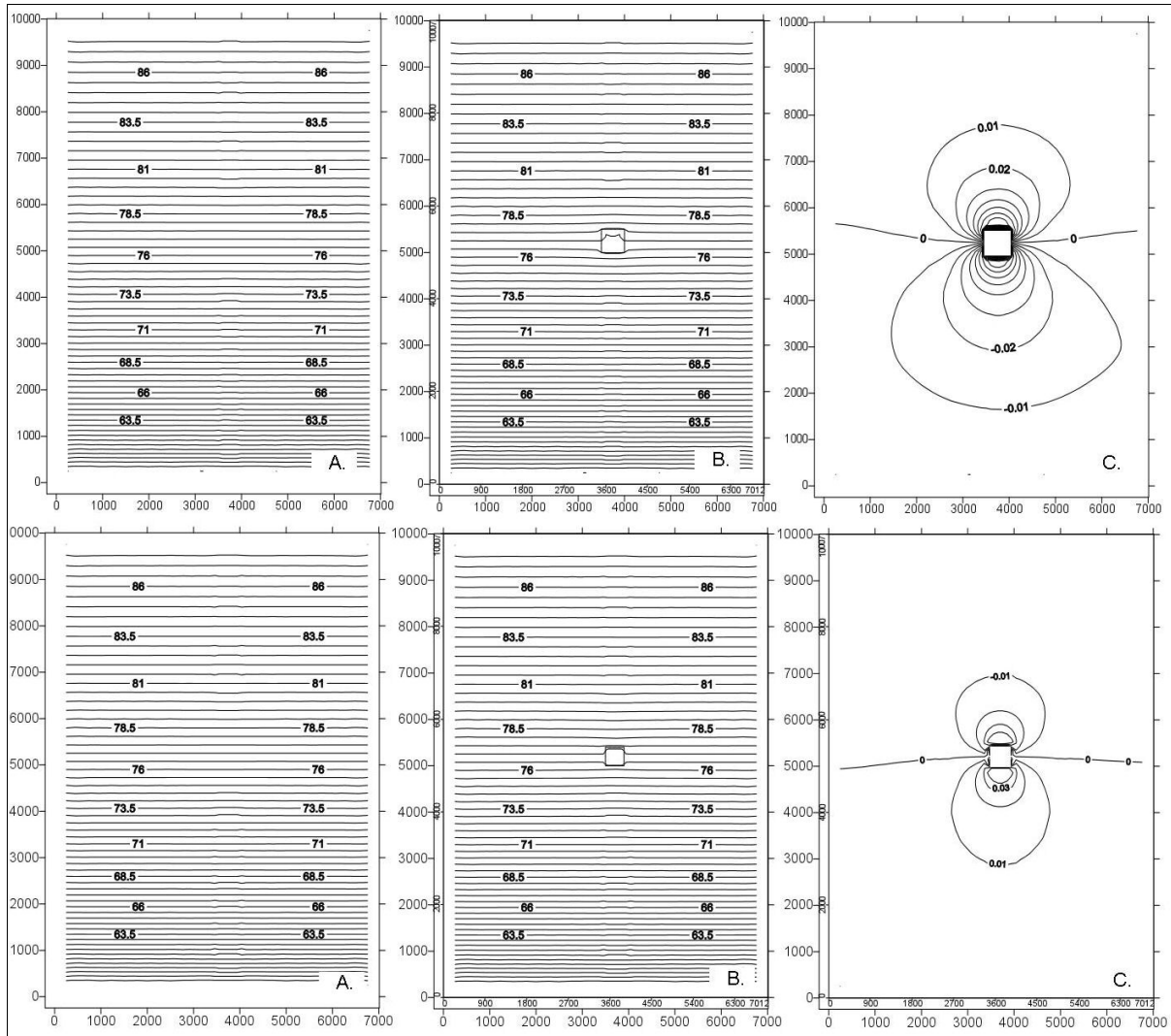


Figura 8 Colmatazione di pareti e fondo dello scavo. In alto: sedimenti di riempimento con  $k=10^{-6}$  m/s e spessori di 0.5 m sulle pareti dello scavo. In basso: sedimenti di riempimento con  $k=10^{-8}$  m/s e spessori di 1 m sulle pareti dello scavo. A: piezometria indisturbata, in assenza di lago; B: piezometria risultante dall'inserimento del lago e con i gradi di colmatazione ipotizzati; C: isolinee di variazione del livello piezometrico (m).

Figure 8 Silts depositing over walls and bottom of lake. Top: deposits with  $k=10^{-6}$  m/s and thickness of 0.5 m along the wall, and 1 m at the bottom; Bottom: deposits with  $k=10^{-8}$  m/s and thickness of 1 m along the wall and at the bottom. A: original water table (plain view); B: water table obtained after lake inserting; C: contours of variation of piezometric level (m).

In generale si osserva che le variazioni piezometriche prodotte dall'apertura di una cava sottofalda sono dell'ordine di qualche decimetro (10-40 cm); ampliando l'originario lago in senso trasversale al deflusso, mediante un allargamento dello specchio d'acqua, l'entità delle variazioni prodotte sulla falda è confrontabile con le precedenti, mentre così non è nel caso di un approfondimento del lago e soprattutto di un suo allungamento nella direzione di deflusso principale. In quest'ultimo caso, si osservano infatti i valori maggiori di abbassamento della falda a monte del lago e di innalzamento a valle di questo (da 30-40 cm a circa 1 m).

Dal punto di vista del bilancio idrico, questa situazione è spiegabile mediante il fatto che un

allungamento dello specchio d'acqua in senso longitudinale rispetto all'andamento della falda, provoca maggiori perdite per evaporazione in conseguenza dell'incremento di superficie del lago, non bilanciate da altrettanti apporti in ingresso.

La situazione opposta, che prevede un allargamento del lago raddoppiando la larghezza in direzione perpendicolare rispetto al deflusso idrico principale, comporta abbassamenti piezometrici di entità minori, poiché le maggiori perdite legate all'evaporazione dal lago sono in questo caso bilanciate dai maggiori afflussi a monte, dovuti all'aumento della sezione.

Nel caso di approfondimento dello scavo esistente si ha una maggiore portata in ingresso nel lago, a causa

dell'aumento della sezione rappresentante la parete del lago a monte, mentre le perdite per evaporazione dalla superficie del lago sono le stesse che si hanno nella situazione di partenza, non essendo aumentata l'area del bacino (Francani, 1993).

Per quanto riguarda l'estensione della deformazione piezometrica conseguente l'apertura di una cava in falda, si osserva come questa aumenti nel caso di allungamento dello scavo, e in generale, all'aumentare del gradiente della falda, rimanendo comunque dell'ordine dei chilometri (Figura 9).

## 6. Conclusioni

Alla luce delle simulazioni fatte e tenendo conto delle semplificazioni adottate, si ricava che le deformazioni piezometriche prodotte dalla presenza di un lago di cava, nelle condizioni indagate, raggiungono estensioni di circa 2-5 km sia a monte che a valle dello scavo, mentre le variazioni massime del livello piezometrico prodotte sono dell'ordine di qualche decimetro.

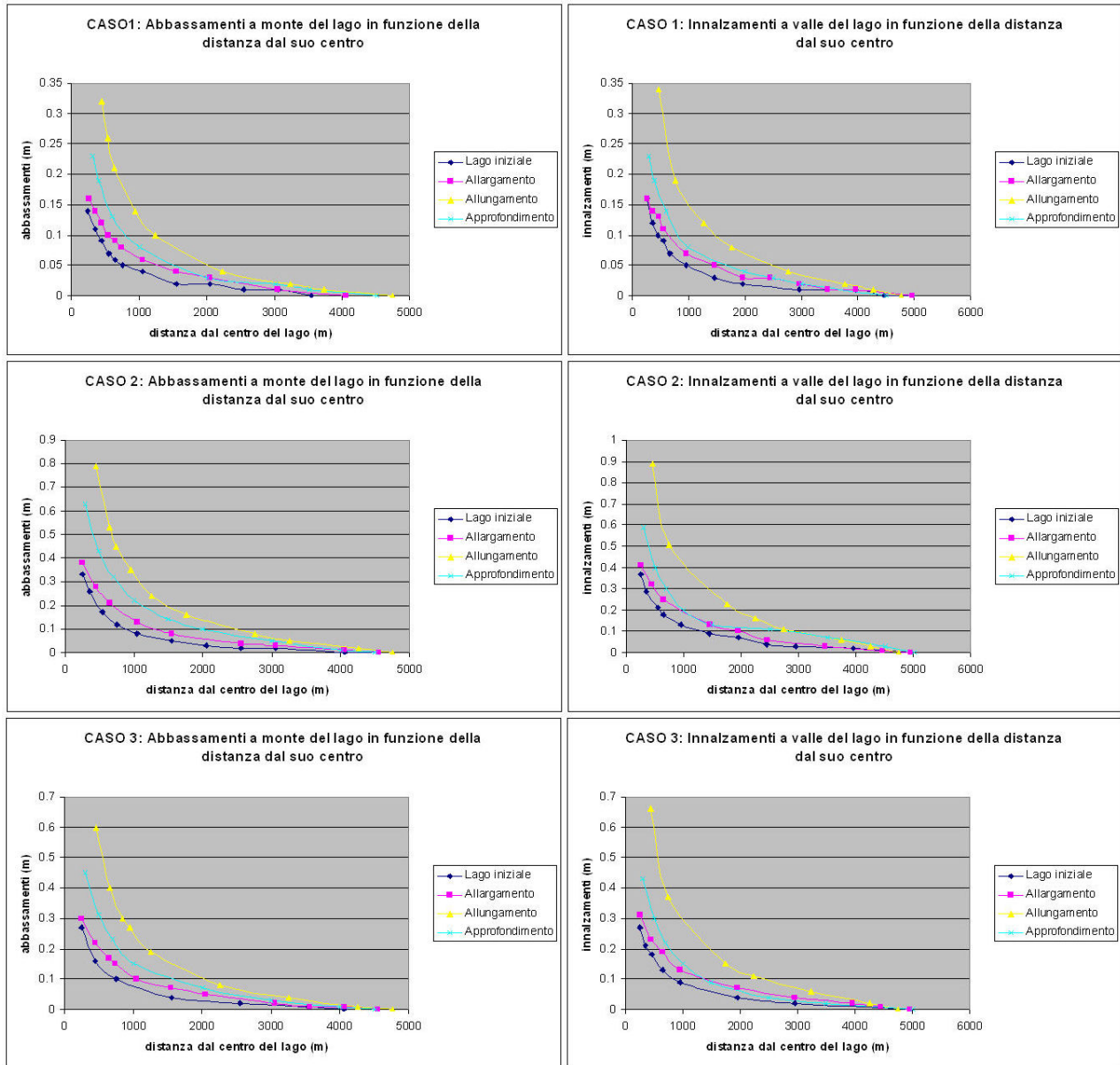


Figura 9 Abbassamenti (sinistra) ed innalzamenti (destra) prodotti nei tre scenari ipotizzati per ciascun ampliamento, in funzione della distanza dal centro del lago di cava.

Figure 9 Water table drawdown (on left) and rising (on right) obtained in each case, depending on distance from the centre of the lake.



Inoltre risulta che per le attività estrattive sottofalda, la configurazione di minor impatto per quanto concerne le deformazioni piezometriche è quella che prevede ampliamenti areali in senso trasversale alla direzione di deflusso principale, mentre gli approfondimenti non condizionano in modo così evidente l'andamento della piezometria.

Al contrario ampliamenti successivi in direzione concorde al flusso idrico prevalente, sono quelli di maggior impatto a livello idrogeologico, creando zone di

depressione a monte e innalzamenti della piezometria a valle dell'ordine del metro, estesi per diversi chilometri.

Le deformazioni piezometriche prodotte non sono dunque rilevanti a tal punto da interferire in modo incisivo su eventuali punti di recapito idrico posti a monte di un lago di cava; allo stesso modo, anche gli innalzamenti sul lato a valle sono sempre inferiori al metro; di conseguenza rimane improbabile l'eventualità di impaludamenti delle aree a ridosso del lago.

### Riferimenti bibliografici

Avanzini M., Beretta G.P., 1991. Il sistema idrodinamico "falda-cava" in relazione alla struttura idrogeologica. Atti I Convegno nazionale dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Gargnano (BS).

Castagna S., De Luca D.A., Fornaro M., Lasagna M., 2006. Hydrogeological problems related to quarry lakes in plain aquifers. Integrated Water Resource Management and Challenges of the Sustainable Development

(GIRE 3D), International Congress, Atti, Marrakech, 135.

Fornaro M., 1998. La coltivazione delle cave ed il recupero ambientale. Vol. I and II, Politeko Edizioni, Torino.

Francani V., 1993. Criteri idrogeologici per l'ottimizzazione dell'attività estrattiva della provincia di Milano in funzione della compatibilità ambientale. Pitagora Editrice Bologna.

McDonald MG, Harbaugh AW, 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Scientific Software Group, Book 6, WA, USA.

Visentini M., 1937. L'evaporazione dagli specchi liquidi. Memorie e Studi Idrografici. Pubbl. N.2 del Servizio Idrografico, Ist. Poligrafico dello Stato, 9, Roma.