

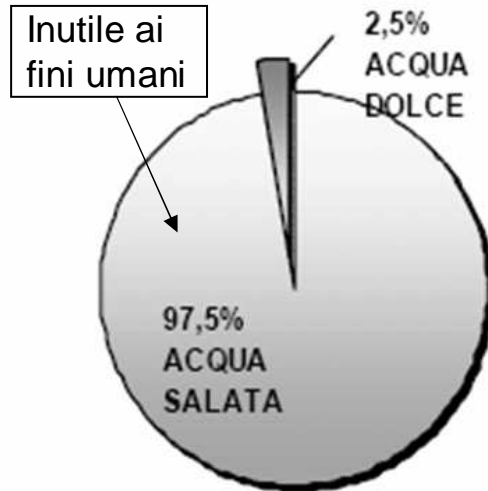
Università degli Studi di Napoli “Federico II”
Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica e Ambientale

Idrodinamica degli Acquiferi Costieri



Prof. A. Carravetta

Obiettivi del corso



Nel 20° secolo, il tasso di crescita della popolazione è raddoppiato mentre la domanda d'acqua è cresciuta di 6 volte rispetto al secolo precedente. Si stima che al 2025 circa 4 miliardi di persone vivranno in condizioni di scarso accesso all'acqua potabile. L'aumento della domanda è stato accompagnato da una diminuzione della disponibilità della risorsa idrica per fenomeni di:

- ✓ Inquinamento
- ✓ Mancata gestione "sostenibile"

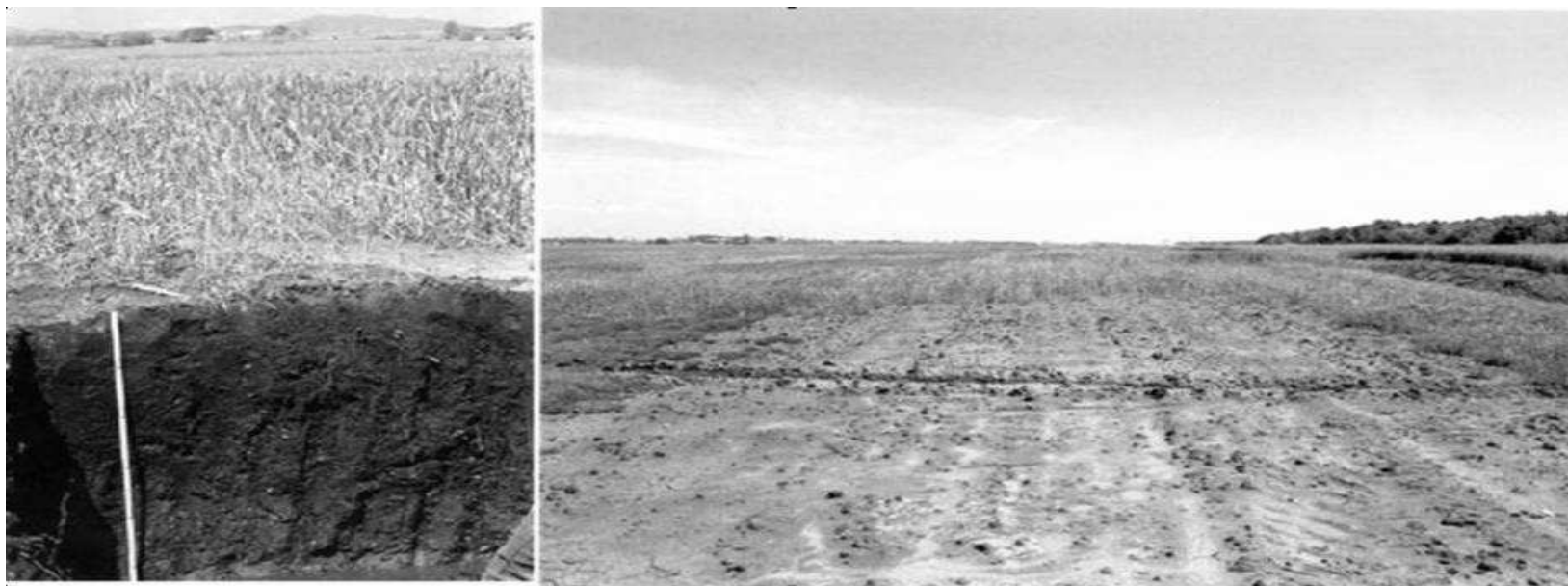
Prelievi indiscriminati da falda per uso agricolo hanno generato gravi fenomeni di danneggiamento delle falde, a volte irreversibili, con gravi conseguenze ambientali come la progressiva salinizzazione per intrusione del cuneo salino di acqua marina, esaurimento delle riserve di acqua dolce di alta qualità.

L'obiettivo del corso è quello di analizzare metodi per la gestione e il controllo dell'evoluzione del fenomeno di "cuneo salino" tramite metodi analitici e numerici.



Il problema dell'intrusione salina

Il **cuneo salino** è la forma particolare di stratificazione delle acque per differenza di densità, che si determina a causa dell'intrusione dell'acqua marina (a densità maggiore) al di sotto di una falda acquifera (a densità minore). L'intrusione salina è causata da eccessivi prelievi delle acque di falda; interessa molte zone costiere, ma può colpire anche, con l'aggravarsi del fenomeno, ampie zone interne. L'acqua salata prende il posto dell'acqua dolce, determinando un aumento del volume di acqua sotterranea salata e un decremento del volume di acqua sotterranea dolce.

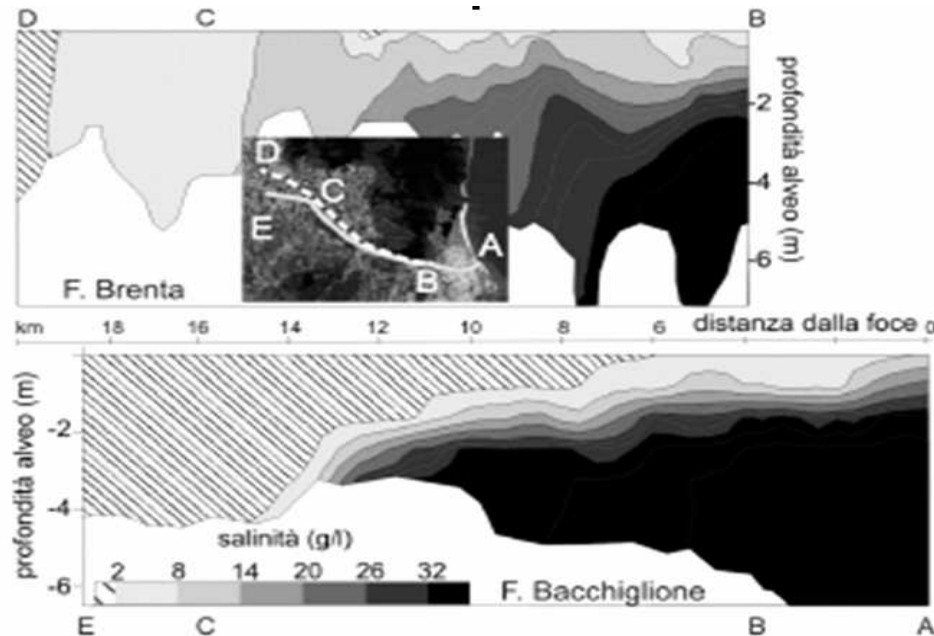


Esempio di effetto limitante dei sali in un suolo organico acido nella fascia costiera lagunare toscana.



Esempi di intrusione salina

□ Intrusione salina nel comprensorio lagunare veneziano



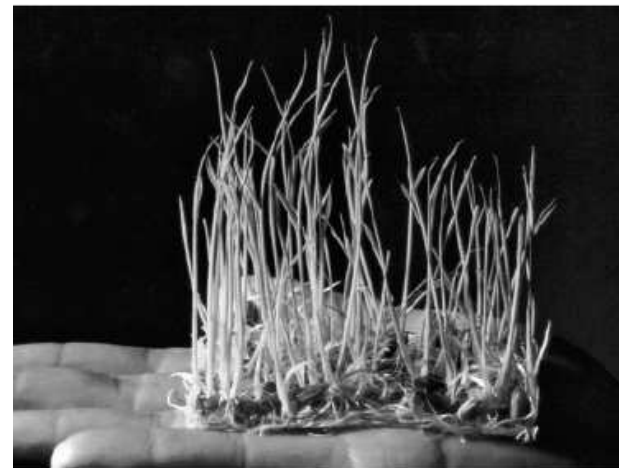
▪ Nell'estate 2003 nella zona del Brenta e Bacchiglione si sono eseguite campagne di misura:

- litostratigrafiche
- idrologiche
- geoelettriche

▪ per valutare l'estensione della risalita delle acque di mare lungo i due corpi idrici e istituire una rete di monitoraggio. La classificazione del tenore salino delle acque è stata condotta facendo riferimento ai limiti accettabili per le principali colture. Sono state quindi stabilite tre classi di qualità dell'acqua: salate, salmastre, dolci, in relazione alla conducibilità elettrica misurata.

□ Allarme sale nel Polesine

Le aziende di risicoltori della zona dichiarano la necessità di intervento delle istituzioni per garantire al Po una portata minima sufficiente a fermare la risalita del mare, arrivata ormai a 20 chilometri dalla foce. L'emergenza per ora colpisce Rovigo, ma non è escluso che il problema del cuneo salino sia una minaccia anche per le province vicine.



Esempi di intrusione salina



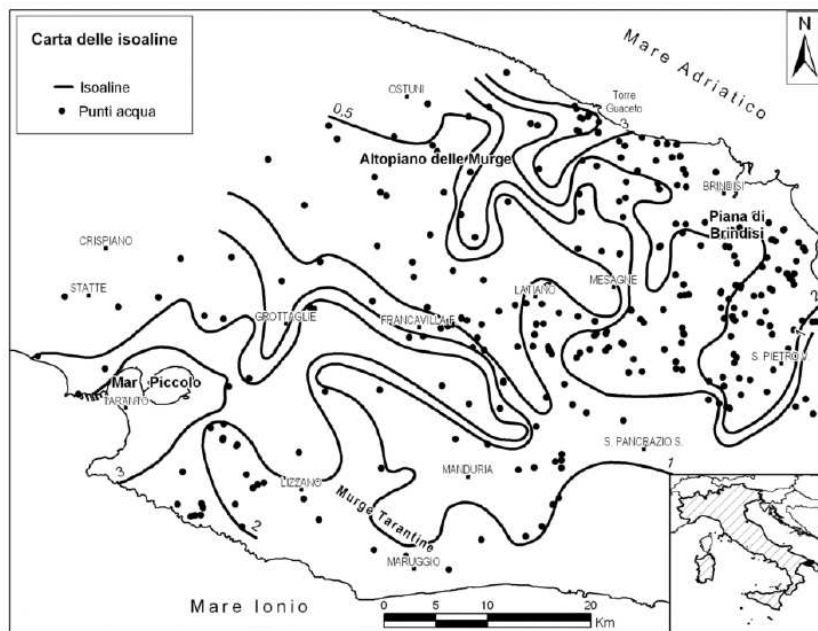
Le problematiche del Parco Naturale Regionale della Maremma

Da studi effettuati nell'ambito del territorio risulta che in corrispondenza della foce del fiume Ombrone si è registrato un processo di erosione che nel trentennio 1954-1985 ha comportato l'arretramento massimo della linea di costa, in corrispondenza della foce, di circa 480 m e la sua trasformazione da un delta a quasi un estuario. Indagini del 1995, inserite nel progetto "Parco Più" indetto dall'Agenda 21 locale, hanno consentito la delimitazione del cuneo salino.

Sviluppo sostenibile

Il progetto «Parco più»: dall'Agenda 21 locale al SGA nell'ente Parco Maremma

Vulnerabilità intrinseca dell'acquifero costiero Pugliese



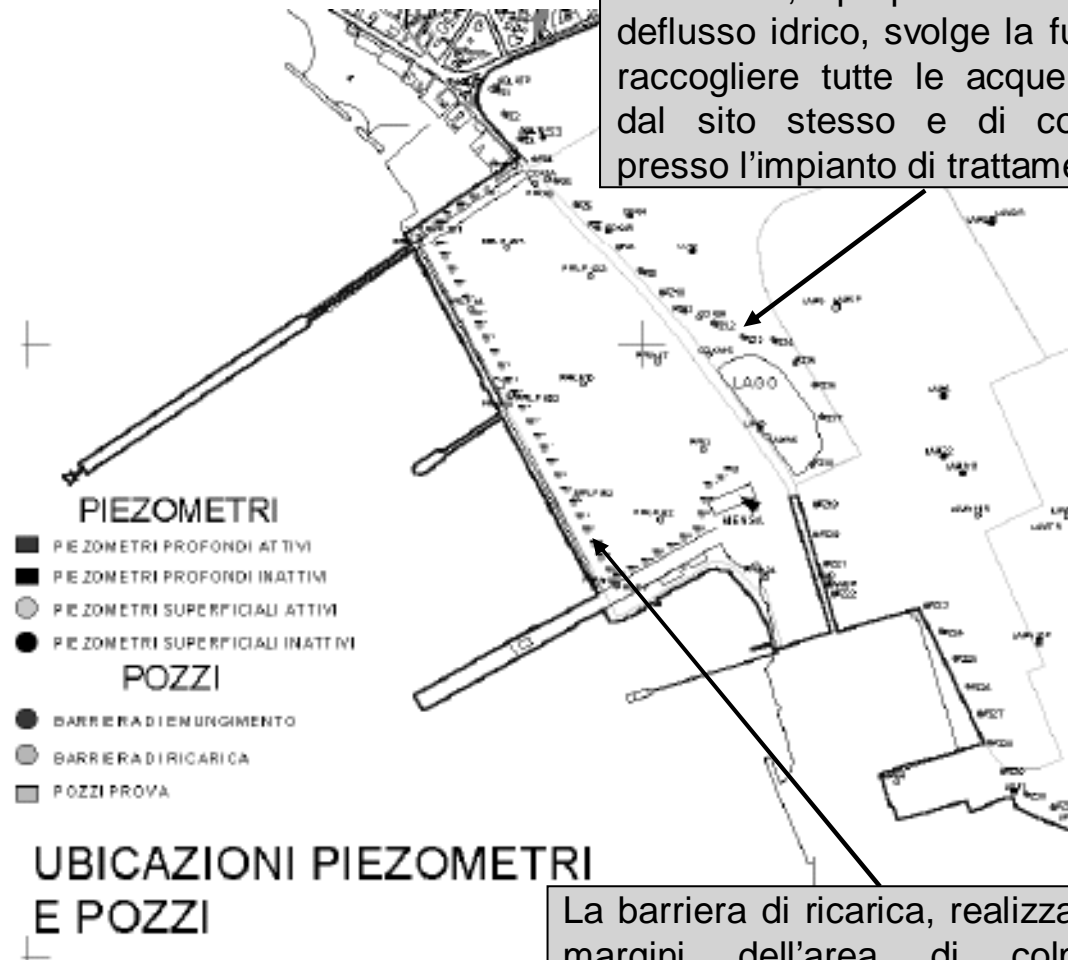
Il territorio pugliese compreso tra le Murge e le Serre Salentine è stato largamente studiato al fine di valutare la vulnerabilità intrinseca della falda profonda pugliese. L'introduzione di un'apposita stringa di pesi ha consentito l'elaborazione di una carta di vulnerabilità rispondente alle caratteristiche dell'acquifero esaminato. I dati acquisiti, georeferenziati, sono stati inseriti in un GIS, che può essere costantemente aggiornato, finalizzato alle attività di controllo e monitoraggio della falda profonda pugliese. Il grado di vulnerabilità "alto", il più diffuso nell'area indagata, si raggiunge nelle zone murgiane.

Esempi di intrusione salina



- **L'influenza dell'intrusione salina nella bonifica delle aree industriali costiere. Gli interventi di bonifica dei siti industriali in prossimità della costa non possono prescindere dalla presenza del mare.**

L'area occupata dall'ex-sito industriale di Bagnoli a seguito dell'inquinamento in essa riscontrato, ha visto negli ultimi anni il susseguirsi di una serie di attività di bonifica per il risanamento e il recupero. Essa è sottoposta a meccanismi di emungimenti e ripompaggi, con conseguente variazione della salinità della falda lungo la verticale nell'entroterra.



La barriera di emungimento realizzata ai margini dell'ex sito industriale, perpendicolarmente al deflusso idrico, svolge la funzione di raccogliere tutte le acque in uscita dal sito stesso e di convogliarle presso l'impianto di trattamento

La barriera di ricarica, realizzata ai margini dell'area di colmata, reimmette gran parte delle acque disinquinata nel sottosuolo

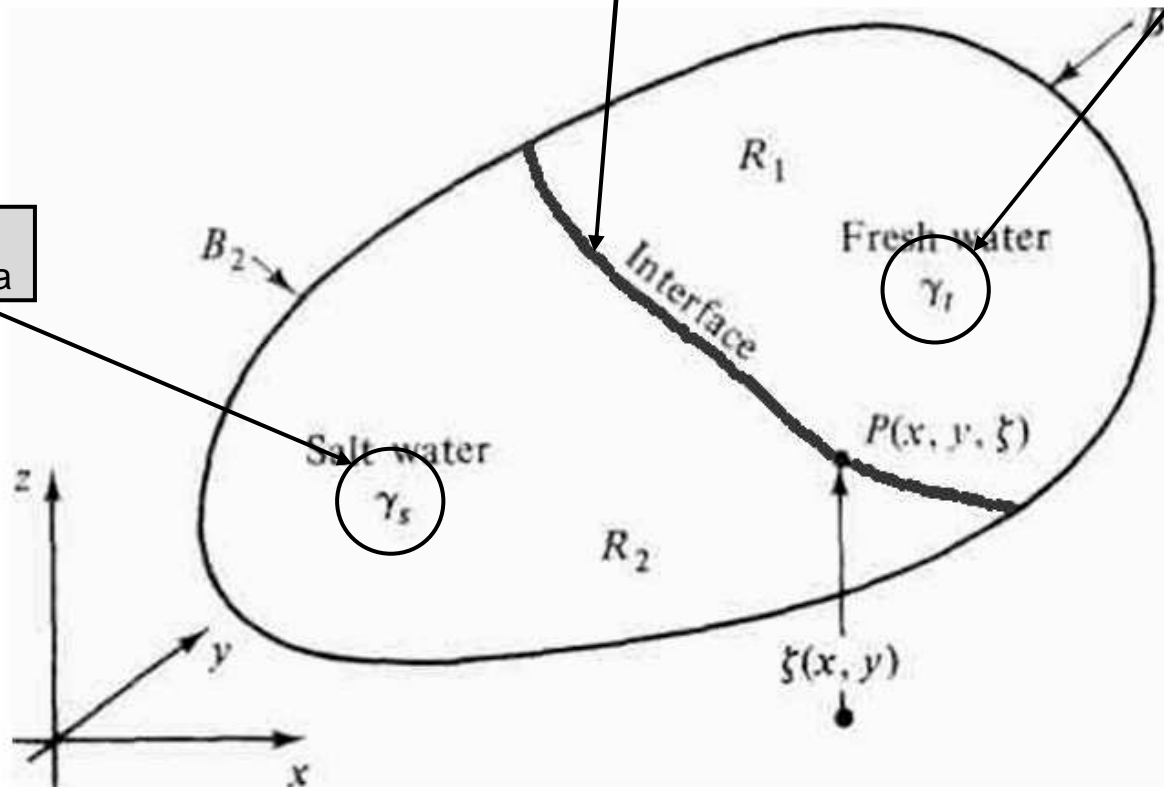


Il cuneo salino: approccio teorico

Interfaccia: superficie di separazione tra i due liquidi, nella realtà non stazionaria, ma sede di elevati gradienti e densità e di inversione nella direzione del deflusso.

Peso specifico dell'acqua dolce

Peso specifico dell'acqua salata



Il cuneo salino: approccio teorico



Se un fluido incomprimibile è a potenziale l'introduzione delle:

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

Nell'equazione di continuità

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

porta a riconoscere che ϕ è una funzione armonica, risultando:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$



Il cuneo salino: approccio teorico

$$K_f = \frac{k\gamma_f}{\mu_f}$$

$$\nabla \cdot (K_f \cdot \nabla \phi_f) = S_0 \frac{\partial \phi_f}{\partial t} \text{ in } R_1$$

Quota piezometrica, funzione dello spazio e del tempo

$$K_s = \frac{k\gamma_s}{\mu_s}$$

$$\nabla \cdot (K_s \cdot \nabla \phi_s) = S_0 \frac{\partial \phi_s}{\partial t} \text{ in } R_2$$

Coefficiente di immagazzinamento specifico (per fluido comprimibile e mezzo deformabile)

Per risolvere le due equazioni bisogna specificare le **condizioni al contorno**, in cui imponiamo che su entrambi i lati dell'interfaccia si abbia stesso deflusso specifico e stessa pressione:

$$n\delta \frac{\partial \Phi_f}{\partial t} - n(1 + \delta) \frac{\partial \Phi_s}{\partial t} - K_f \cdot [\nabla_z - (1 + \delta)\nabla \Phi_s + \delta \nabla \Phi_f] \cdot \nabla \Phi_f = 0$$

$$n\delta \frac{\partial \Phi_f}{\partial t} - n(1 + \delta) \frac{\partial \Phi_s}{\partial t} - K_s \cdot [\nabla_z - (1 + \delta)\nabla \Phi_s + \delta \nabla \Phi_f] \cdot \nabla \Phi_s = 0$$

$$\delta = \frac{\gamma_f}{(\gamma_s - \gamma_f)}$$

È necessaria la risoluzione di un sistema di equazioni differenziali parziali non lineare



Il cuneo salino: approccio teorico

**EQUAZIONI DI GOVERNO
CONSERVAZIONE DELLA MASSA DI SOLUTO**

Advezione

$$C \cdot V_x \cdot \theta \cdot \Delta y \cdot \Delta z$$

Diffusione

$$- D^* \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \theta \cdot \Delta y \cdot \Delta z$$

Dispersione meccanica

$$- D'_{xx} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \theta \cdot \Delta y \cdot \Delta z$$

Equazione di advezione dispersione

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\bar{\bar{D}} \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (C \cdot \vec{V}) + C_s \frac{q_s}{\theta}$$

I termini principali del tensore di dispersione sono calcolati come:

$$D_{xx} = \alpha_L \cdot \frac{V_x^2}{|\vec{V}|} + \alpha_H \cdot \frac{V_y^2}{|\vec{V}|} + \alpha_V \cdot \frac{V_z^2}{|\vec{V}|} + D^*$$

$\alpha_L, \alpha_H, \alpha_V$ sono le dispersività

D^* è il coefficiente di diffusione molecolare ($10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)

Il cuneo salino: approcci teorici semplificati



Il problema matematico risulta particolarmente complesso e non ci sono soluzioni analitiche note eccetto che per un numero esiguo di casi specifici.

Per determinare la posizione dell'interfaccia si sono ricercate soluzioni semplificate:

□ Legge di “Ghyben-Herzberg” per falde freatiche (vedi testo Complementi di idraulica Montuori)

- Hp:
1. Strato di transizione di spessore nullo
 2. Acqua di mare sottostante stagnante
 3. Isopieziche verticali

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}$$

Profondità, rispetto al livello del mare, della superficie di separazione

Quota sul livello del mare della superficie libera della falda

□ Risoluzione per tentativi del reticolato idrodinamico

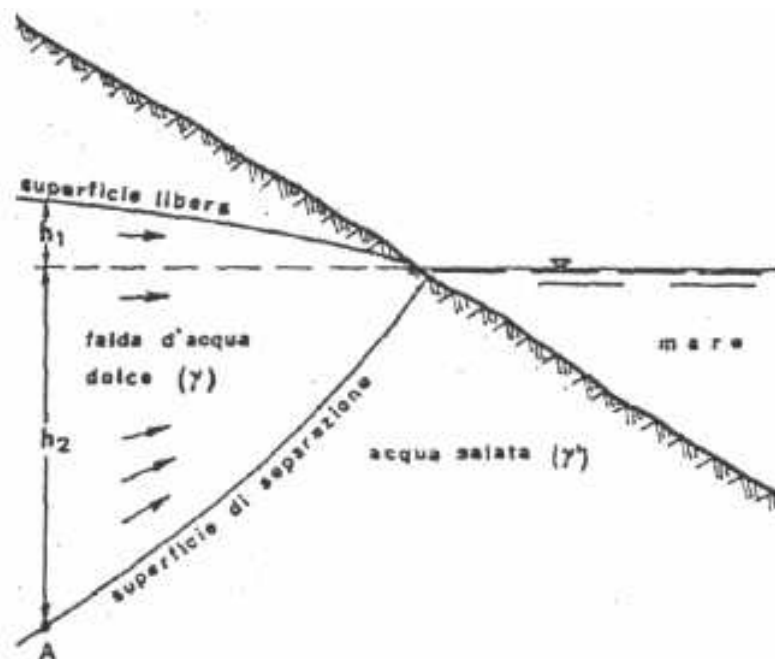
Il metodo si basa sulla ortogonalità delle linee di corrente e delle isopieziche. Viene assegnata per tentativi la posizione dell'interfaccia, risolvendo per via grafica o numerica il relativo campo di moto. La soluzione esatta del problema è quella in cui lungo l'interfaccia è presente una distribuzione di pressione corrispondente a quella del mare. Il metodo risulta molto complesso in campi 3D.

Esiste la necessità di ricorrere ad un approccio numerico e/o sperimentale



Il cuneo salino: approcci teorici semplificati

Modello di Ghyben-Herzberg



Ipotesi:

- interfaccia netta
- condizioni stazionarie
- acqua del mare ferma ($q_s=0$)
- falda sub-orizzontale

$$p_A = \gamma_s h_2 = \gamma_d (h_1 + h_2)$$

$$\gamma_d / (\gamma_s - \gamma_d) = h_2 / h_1$$

$$h_2 / h_1 \approx 35$$

L'acqua risulta fuoriuscire in un solo punto in corrispondenza della linea di costa, con velocità infinita.

Per superare questo problema, alcuni modelli considerano un fronte di infiltrazione a largo

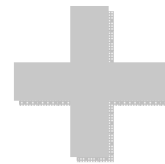
Modelli numerici



L'analisi numerica è un ramo della matematica, applicabile in qualsiasi campo della scienza, che ha per oggetto lo sviluppo di metodi di calcolo approssimati, eseguibili mediante il calcolatore. Al fine di modellare l'intrusione salina possono essere utilizzati Software commerciali (ad esempio il SEAWAT della *Waterloo Hydrogeologic*)

MODFLOW

Programma che risolve le equazioni del flusso per i fluidi.



MT3DMS

Programma che risolve le equazioni di trasporto di soluto solido

SEAWAT

Programma che simula, in tre dimensioni, il flusso a densità variabile in stato transitorio nei mezzi permeabili. Esso accoppia le equazioni del trasporto solido e quelle del flusso (espresse in termini di quota piezometrica di acqua dolce), con un approccio implicito o esplicito



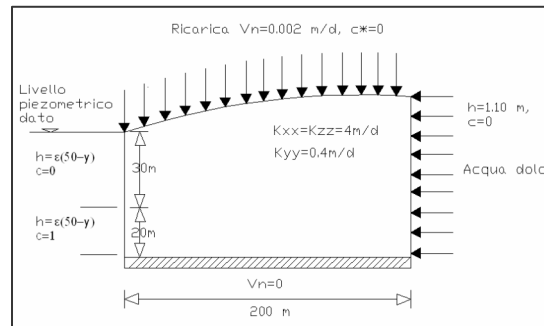
Implementazione dei modelli numerici

La modellazione del processo di intrusione marina in un acquifero costiero, nel quale possono variare le condizioni di alimentazione della falda o le condizioni al contorno, deve essere:

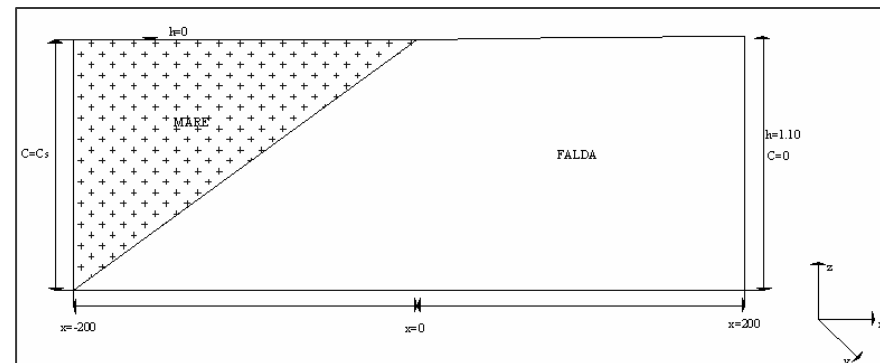
- ✓ tridimensionale
- ✓ transitorio
- ✓ dipendente dalla densità
- ✓ deve tener conto del fenomeno di dispersione

Tale modello non solo è complicato, ma richiede la conoscenza di molti dati non sempre disponibili. Per ottenere soluzioni numeriche tridimensionali per l'analisi del cuneo salino, esistono due diversi approcci:

1. Implementazione di un modello confinato verso valle dalla linea di costa.



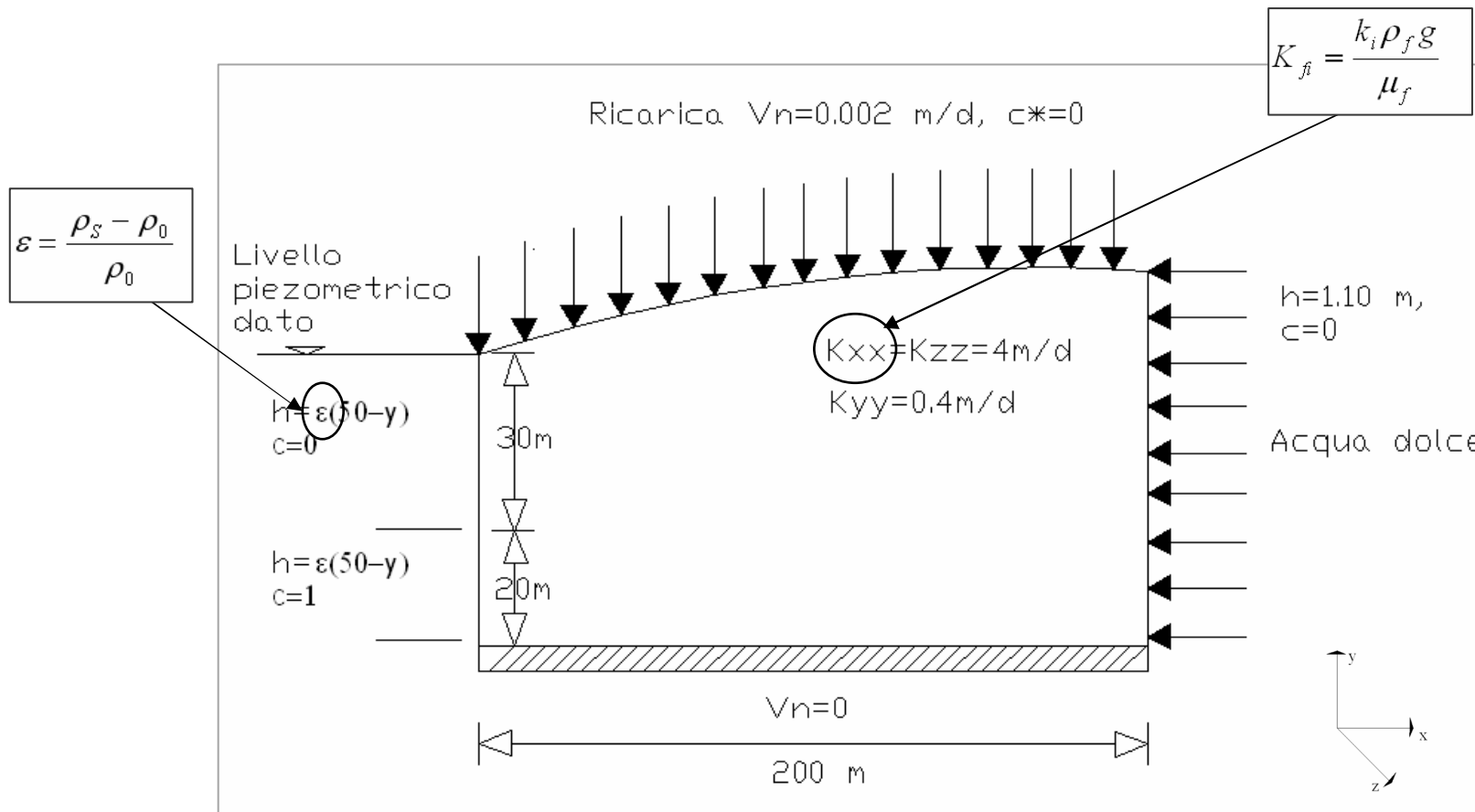
2. Implementazione di un modello con campo di moto esteso anche all'area litoranea





Implementazione del primo modello

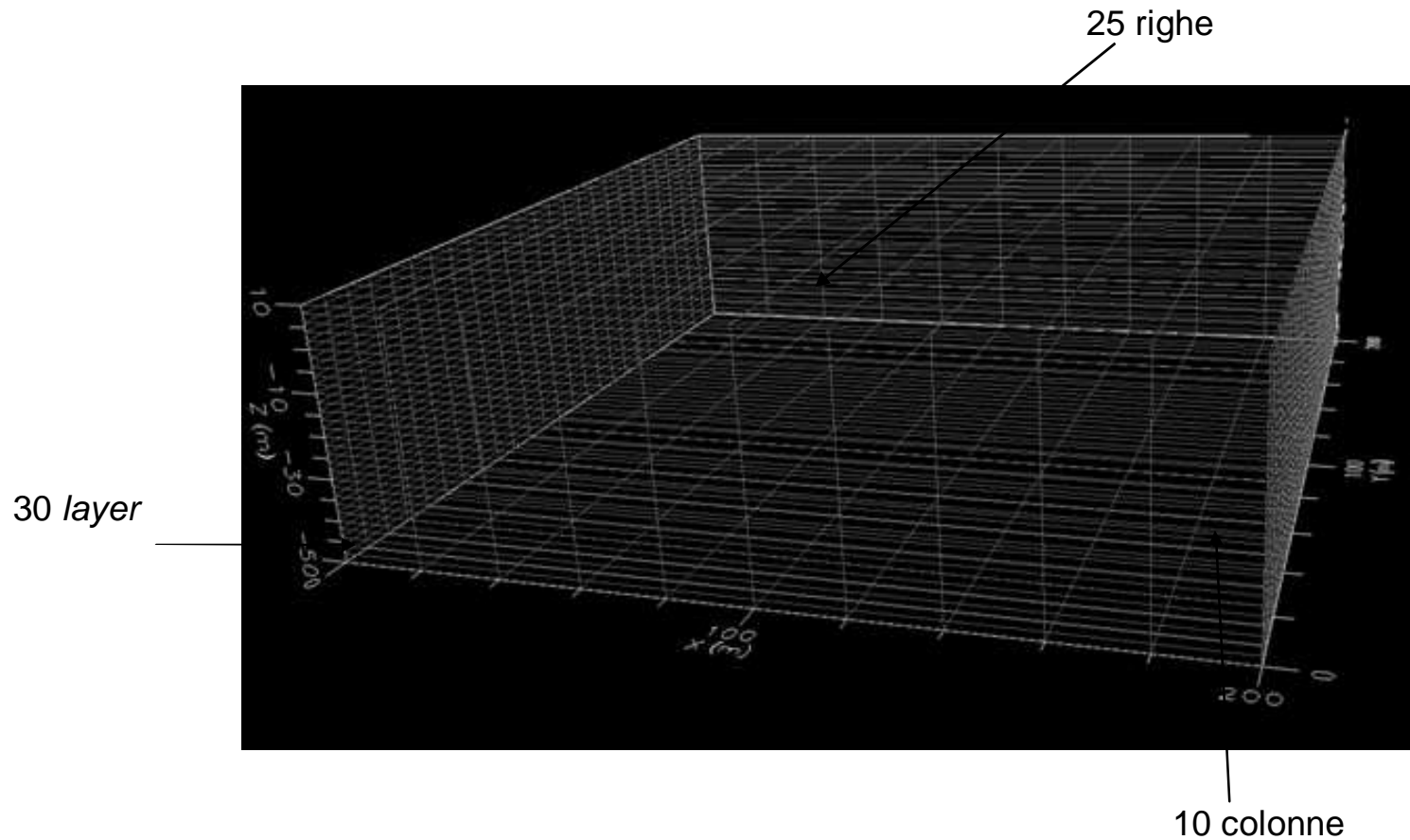
Il caso studio analizzato mediante SEAWAT corrisponde a quello utilizzato da S. Huyakorn, P. F. Andersen, J.W. Mercer e H.O. White Jr. nella verifica del loro modello numerico e presentato in un articolo sulla rivista *Water Resources Research*





Implementazione del primo modello

Al fine di consentire l'approccio risolutivo agli elementi finiti, è necessario effettuare una "discretizzazione", tramite una *mesh* regolare nell'area di studio. In input, nell'interfaccia del SEAWAT, si sceglie una griglia che consenta di affrontare il problema in esame con un adeguato grado di dettaglio.

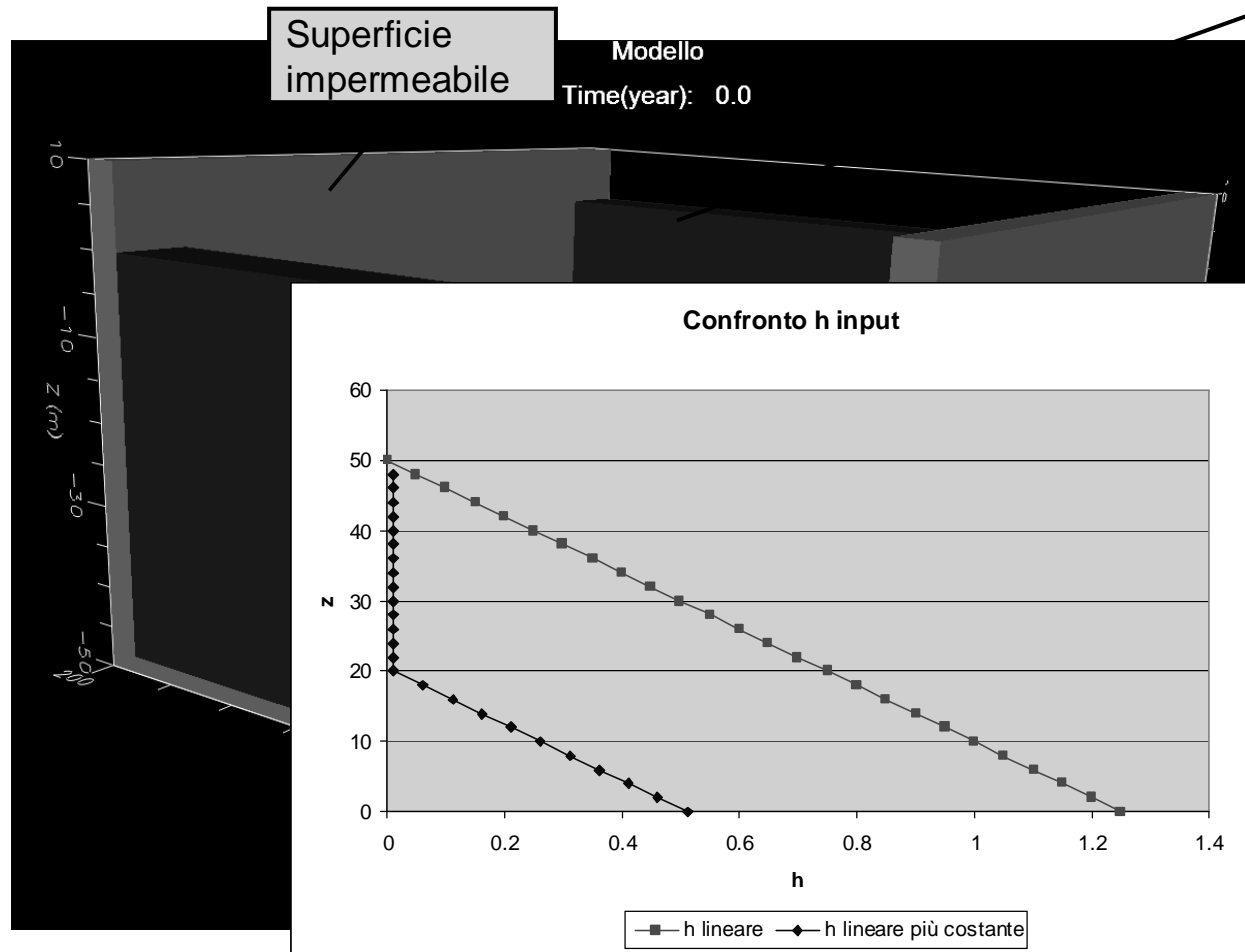


Implementazione del primo modello



Al fine di avere un modello il più possibile aderente al caso in esame si dovranno assegnare opportune condizioni iniziali e al contorno:

Condizioni al contorno



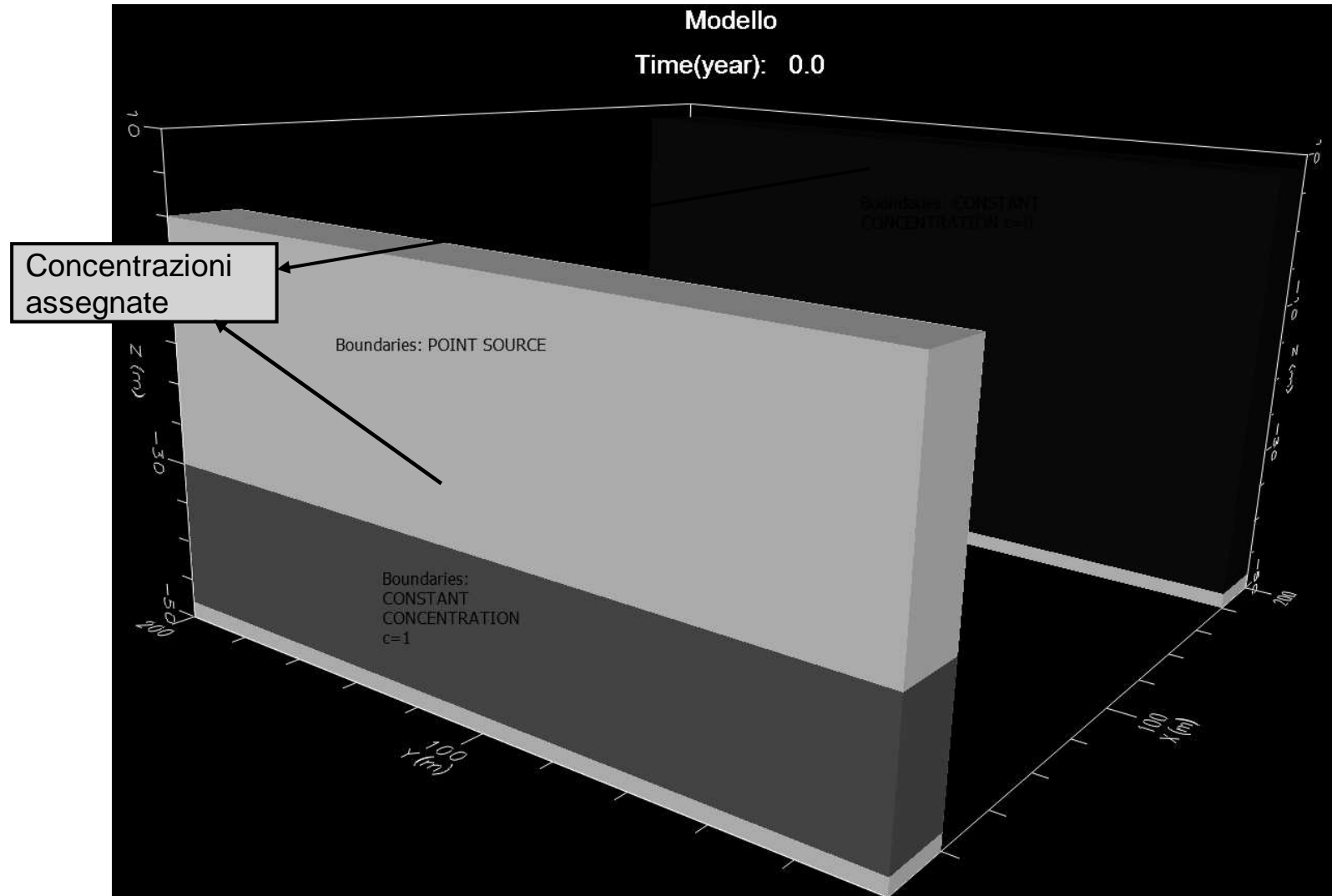
La quota piezometrica si assegna 1.10 m sul livello del mare in corrispondenza di monte ($x=200$) per tutta la verticale di riferimento, mentre a valle ($x=0$) si sono considerati due distinti casi:

1. Quota piezometrica che varia linearmente con z , con valore 0 in corrispondenza del pelo libero e valore 1.25 sul fondo. Tale condizione è analoga a quella imposta nel caso studio.
2. Quota piezometrica pari a 0 fino all'interfaccia, quindi variazione lineare lungo z .



Implementazione del primo modello

Condizioni al contorno

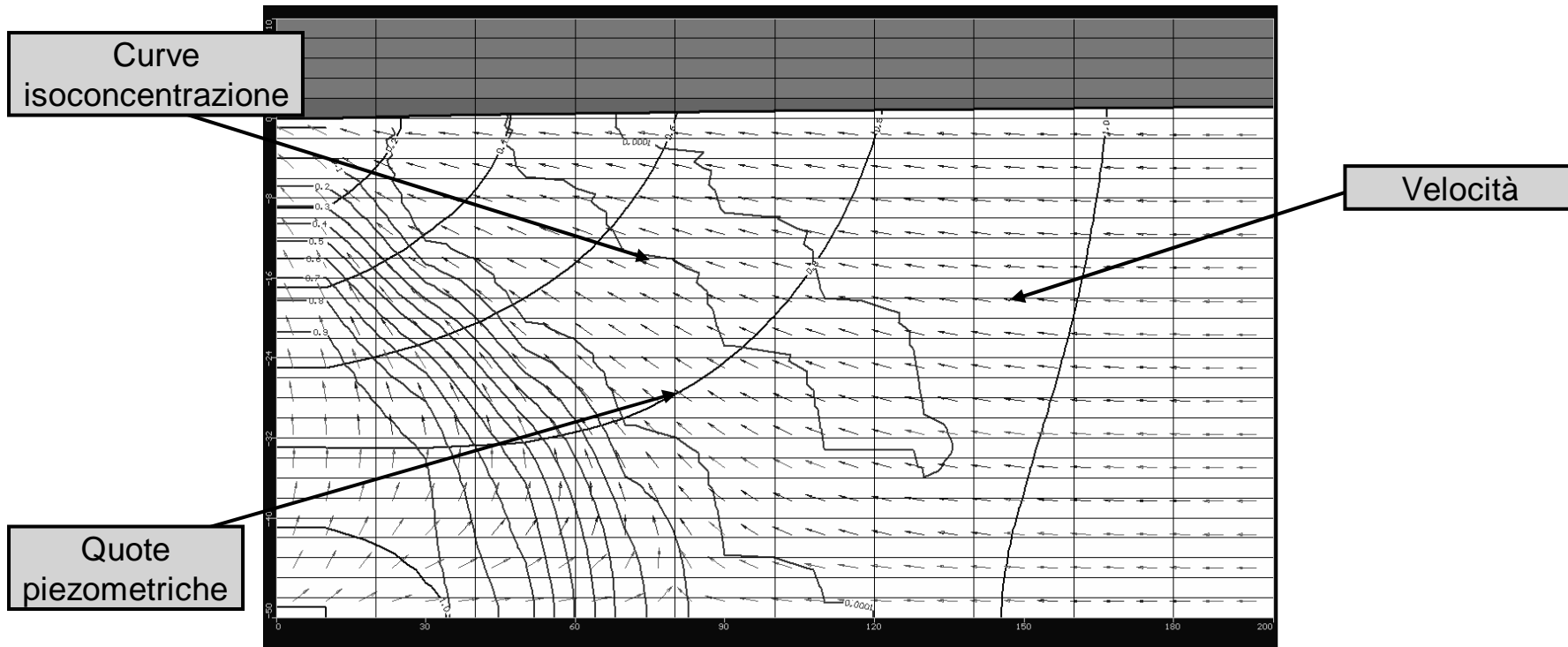




Output del primo modello

Nel modello si sono effettuate una serie di iterazioni in cascata per consentire la coincidenza tra la zona in cui si verifica il cambio delle direzioni dei vettori velocità e quella in cui cambia la concentrazione. Nell'analisi degli output delle modellazioni in SEAWAT, si è verificata la direzione delle velocità degli elementi in prossimità della costa e, nel caso in cui non vi era coincidenza con la zona a cambio di concentrazione, si è rilanciata la simulazione in SEAWAT modificando di volta in volta le condizioni al contorno e quindi la posizione dell'interfaccia. Ciò è stato fatto per entrambe le condizioni al contorno prese in esame.

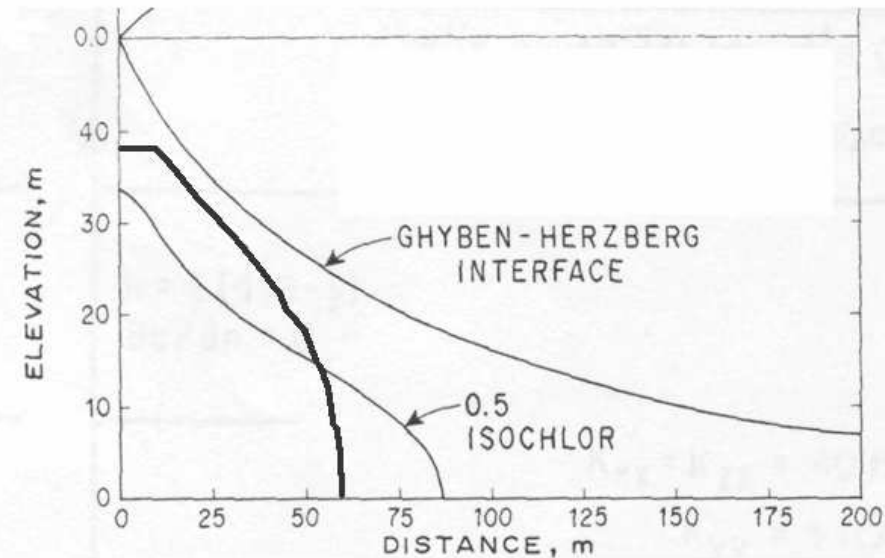
Nella simulazione è stato esaminato un transitorio di 50 anni, tempo in cui si raggiunge la stazionarietà.



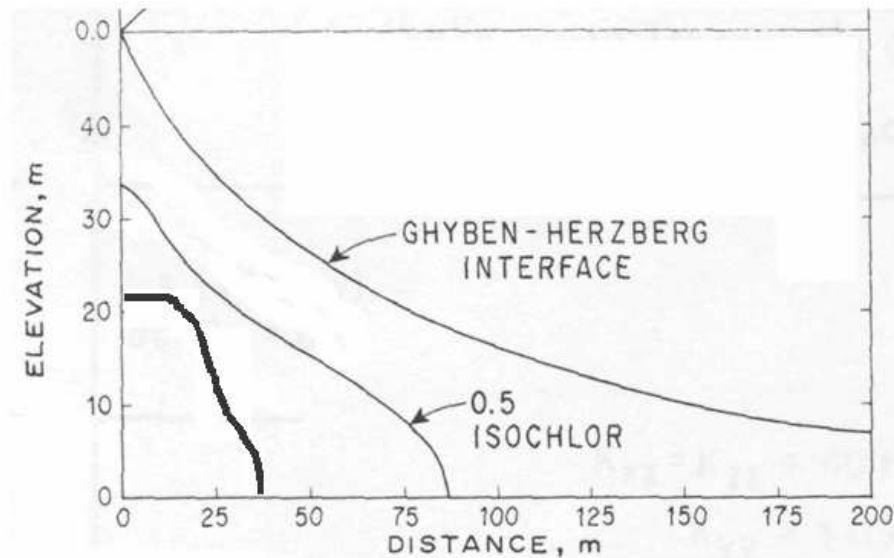


Output del primo modello e confronto con il caso studio

Output della simulazione condotta per il caso di quota piezometrica dell'acqua dolce, al contorno, con andamento lineare



Output della simulazione condotta per il caso di quota piezometrica dell'acqua dolce al contorno con andamento costante fino al valore $z=z_i$ e poi lineare



Output del primo modello e confronto con il caso studio



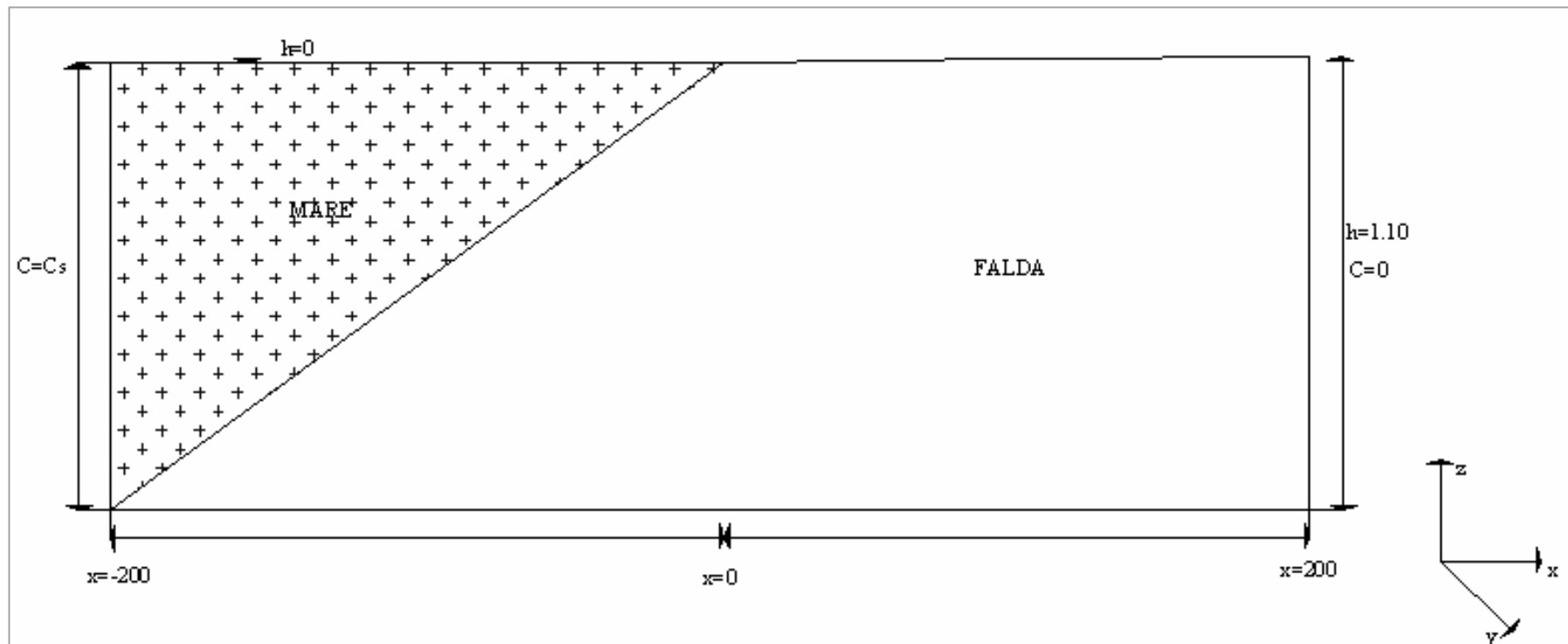
I risultati delle simulazioni svolte con le due condizioni al contorno mostrano:

- Il procedimento iterativo determina altezza del cuneo salino allo sbocco maggiore in SEAWAT che nel modello di S. Huyakorn, P.F. Andersen, J.W. Mercer e H.O. White Jr.
- Ne conseguono, nel tratto più prossimo alla costa, andamenti dell'interfaccia molto prossimi a quelli previsti dalla Legge di Ghyben Herzberg che considera sbocco puntuale.
- Il modello in SEAWAT prevede lunghezze di intrusione di circa il 30% minori rispetto a quelle previste dal modello di S. Huyakorn, P.F. Andersen, J.W. Mercer e H.O. White Jr.
- Le differenze tra l'andamento delle curve in SEAWAT e quelle dell'articolo di S. Huyakorn, P.F. Andersen, J.W. Mercer e H.O. White Jr. potrebbero dipendere dall'approssimazione, nel caso in letteratura, di spessore costante della falda.
- Le condizioni al contorno tipo 2 non consentono la corretta ricostruzione del cuneo salino.

Implementazione del secondo modello



Come visto una più adeguata ricostruzione del cuneo salino è possibile imponendo una variazione lineare della quota piezometrica riferita all'acqua dolce dalla superficie al fondo. Tale legge di variazione non trova corrispondenza nella distribuzione verticale delle concentrazioni. **Al fine di svincolarsi dalle particolari condizioni al contorno**, utilizzate nel precedente caso, nel prosieguo è stato implementato un nuovo modello il quale simula anche una parte del corpo idrico recettore a valle.



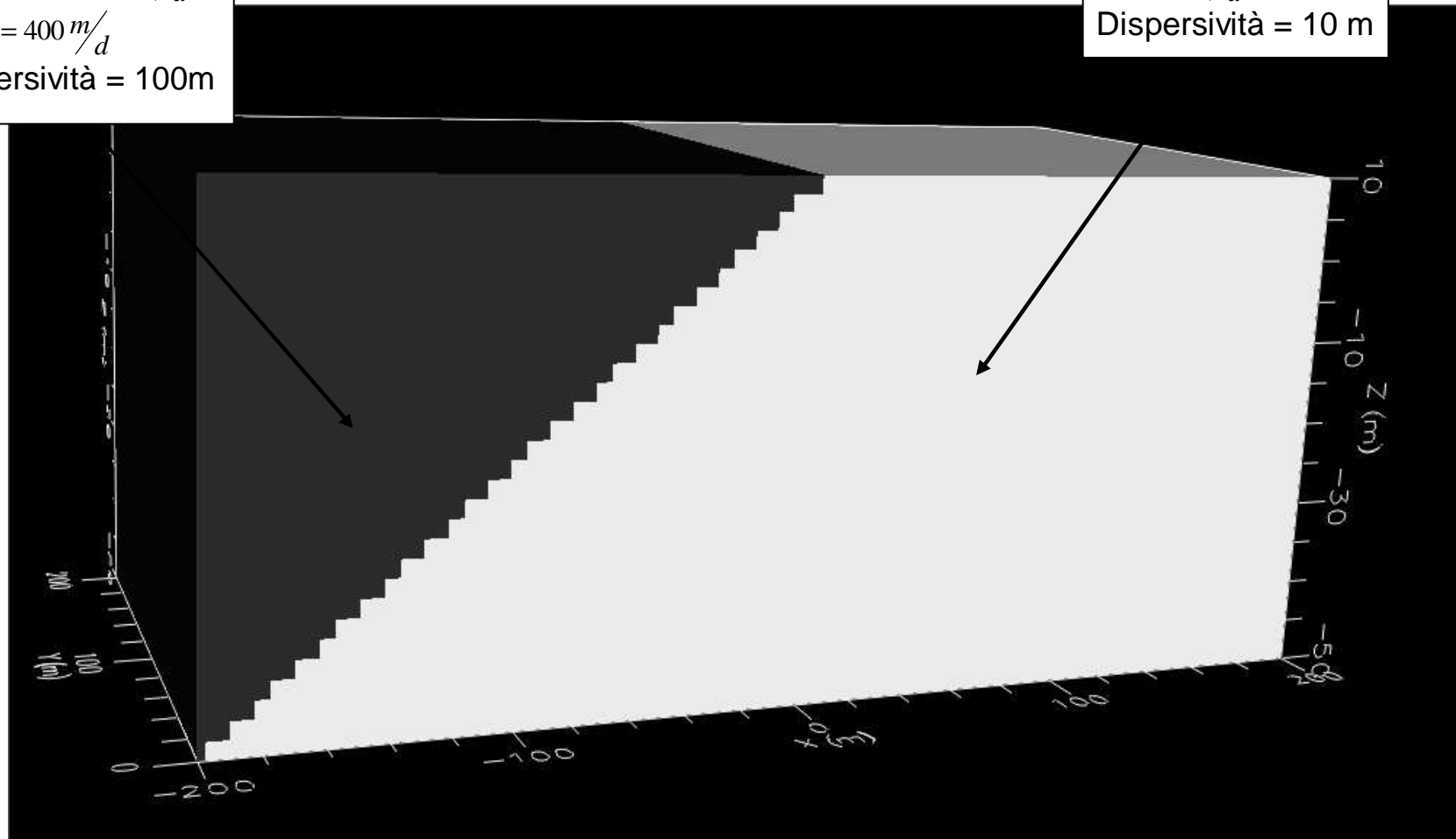
Implementazione del secondo modello



Schematizzazione del lato mare

$K_x = K_y = 4000 \text{ m/d}$
 $K_z = 400 \text{ m/d}$
Dispersionità = 100m

$K_x = K_y = 4 \text{ m/d}$
 $K_z = 0.4 \text{ m/d}$
Dispersionità = 10 m

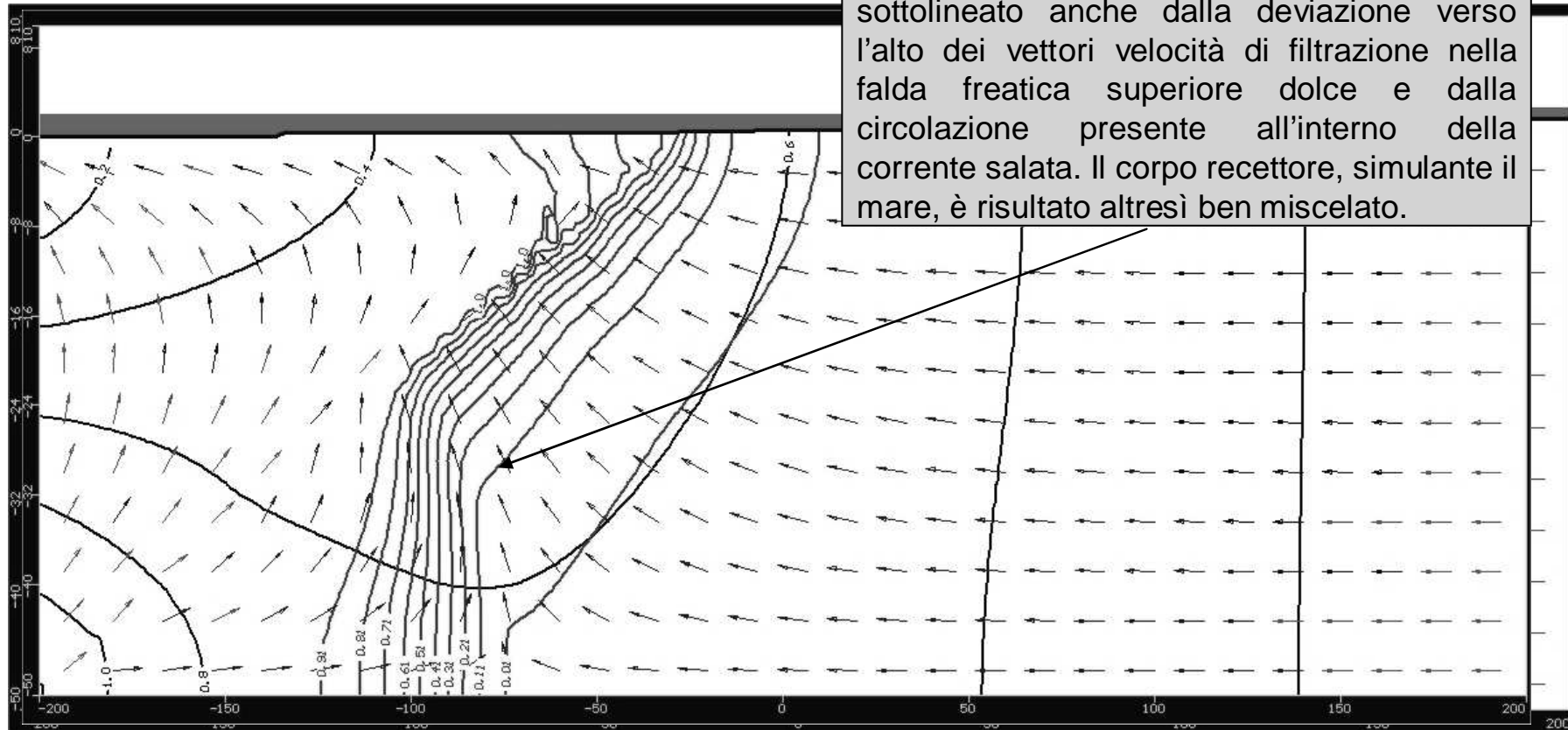




Output del secondo modello

Il modello è stato implementato, con il risolutore WHS, per un tempo di osservazione pari a 100 anni: intervallo temporale in cui la simulazione del fenomeno di intrusione salina ha già raggiunto la stazionarietà. Nel risolutore WHS si sono adoperati 1000 *time steps* (con un moltiplicatore pari ad 1 in modo che essi siano tutti uguali nel tempo). La discretizzazione temporale assunta risulta coerente con le ipotesi di stabilità di Neumann.

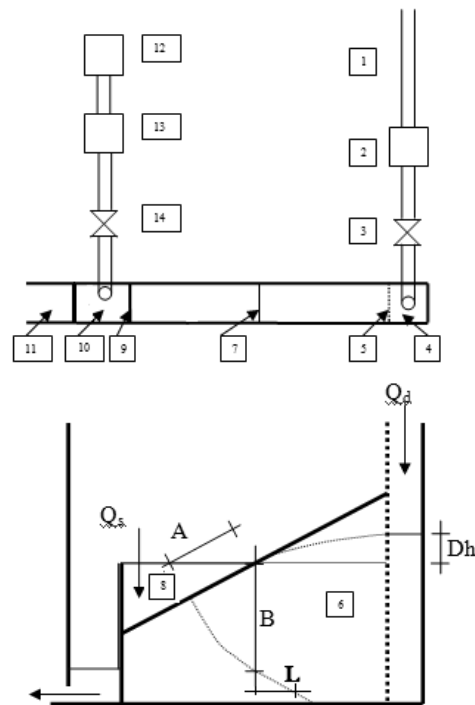
Esiste un chiaro fenomeno di intrusione salina all'interno dell'acquifero. Esso è sottolineato anche dalla deviazione verso l'alto dei vettori velocità di filtrazione nella falda freatica superiore dolce e dalla circolazione presente all'interno della corrente salata. Il corpo recettore, simulante il mare, è risultato altresì ben miscelato.



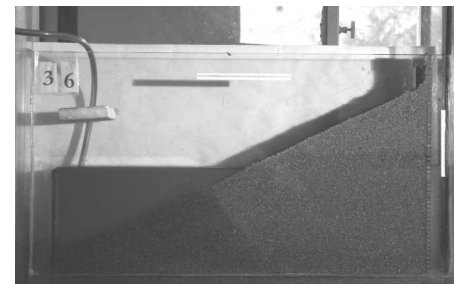


Modelli di laboratorio

- ❑ I risultati numerici, nel loro complesso, hanno portato a ritenere che debbano essere presenti particolari condizioni di sbocco lungo la linea di riva dovute alla differente densità dei due fluidi.
- ❑ Le condizioni al contorno da imporre nei modelli numerici, in relazione alla conformazione assunta dall'interfaccia acqua dolce/salata in prossimità del mare, possono essere ricercate mediante modelli sperimentali



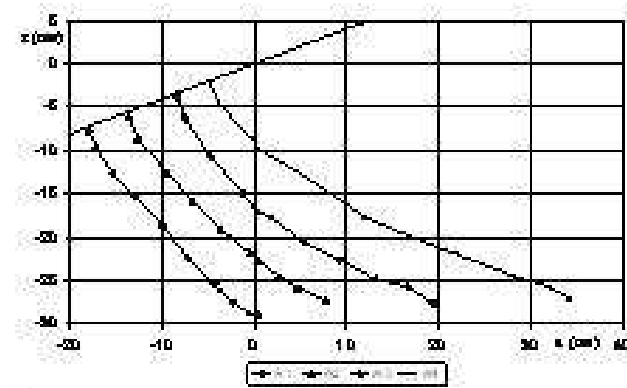
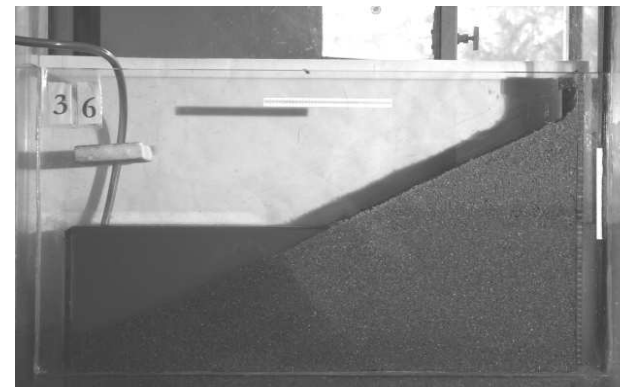
- 1) Circuito di alimentazione acqua dolce
- 2) Flussimetro
- 3) Saracinesca di regolazione
- 4) Camera di alimentazione
- 5) Rete metallica di contenimento
- 6) Mezzo poroso
- 7) Linea di costa
- 8) Corpo idrico recettore
- 9) Soglia di sfioro
- 10) Camera di scarico
- 11) Scarico
- 12) Vasca di preparazione acqua salata
- 13) Vasca di carico
- 14) Saracinesca di regolazione



Modelli di laboratorio



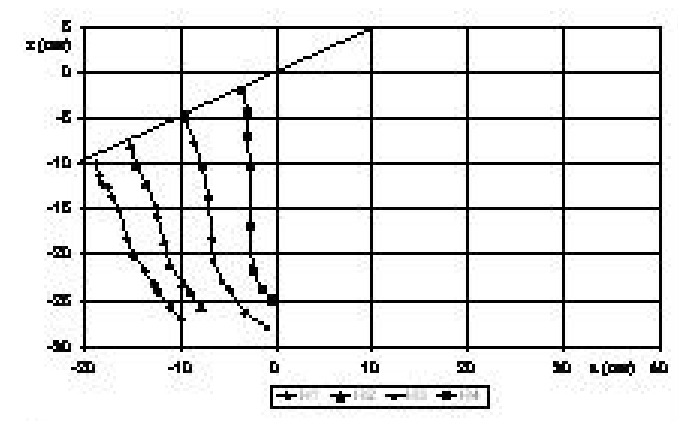
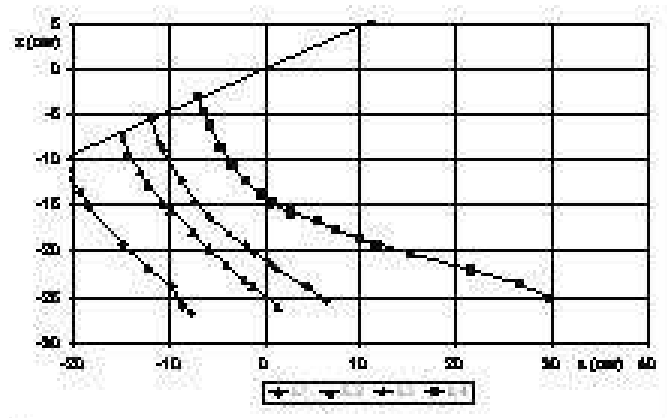
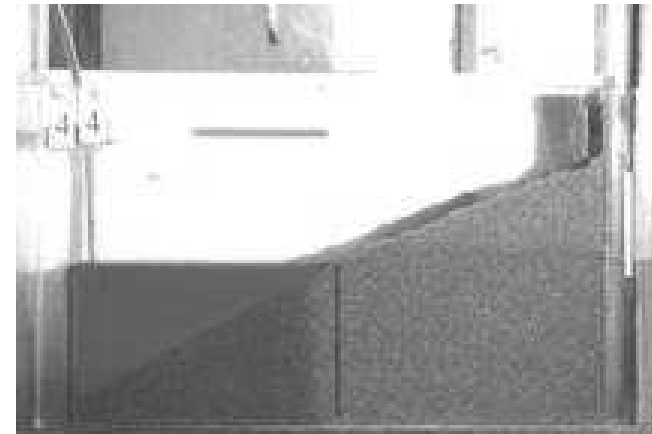
- ❑ Sono state provate sinora due configurazioni di sbocco: sbocco libero e barriera di contenimento.
- ❑ Per ciascuna configurazione è stata ricostruita la conformazione dell'interfaccia
- ❑ Nel caso di sbocco libero l'intrusione salina si verifica solo per le maggiori portate





Modelli di laboratorio

□ In presenza di barriera di contenimento la conformazione assunta dall'interfaccia acqua dolce/salata in prossimità del mare e la lunghezza di intrusione sono fortemente legate alla profondità di infissione della barriera



Conclusioni



- L'idrodinamica degli acquiferi costieri è un fenomeno complesso, specie in condizioni di deflusso variabile o di particolari configurazioni di sbocco in mare della falda.

- Le condizioni di deflusso variabile più gravose sono rappresentate da emungimenti e/o ripompaggi intermittenti, che determinano continue e profonde variazioni della conformazione dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata.

- Le configurazioni dello sbocco più difficili da ricostruire sono rappresentate dalla presenza di linee di riva non lineari e/o da barriere di contenimento.

- Il fenomeno può essere ricostruito per via analitica o numerica.

- Più complesso è il campo di moto più difficile risulta la verifica della verosimiglianza fisica delle condizioni al contorno assunte nel modello.

- Nel caso in cui occorre ricostruire con esattezza la posizione dell'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata può essere necessario affiancare alla ricostruzione teorico/numerica un confronto con risultati sperimentali di laboratorio o di campo