



TAKING  
COOPERATION  
FORWARD



SOLVENTI CLORURATI NELLE FALDE ACQUIFERE: IL PROGETTO “AMIIGA” INTERREG CENTRAL EUROPE E ALTRE ESPERIENZE REGIONALI

Parma, 4 maggio 2018



## La modellazione numerica degli acquiferi



Andrea Zanini, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Parma

# INDICE

Introduzione ai  
modelli

Esempio sintetico

Modello  
preliminare  
dell'acquifero  
Parmense



■ Fornire uno strumento che permette di prendere decisioni mirate al raggiungimento di un determinato obiettivo, senza violare vincoli sia tecnici che legislativi. Per esempio:

- Valutazione della posizione ottimale e quantificazione dell'emungimento di un campo pozzi a scopo idropotabile;
- Valutazione dell'impatto di un'opera su un acquifero;
- Progettazione di opere di controllo idraulico in siti contaminati (barriere idrauliche, pump and treat, ...);
- ...

United States  
Environmental Protection  
Agency

Office of  
Research and  
Development

Office of Solid Waste  
and Emergency  
Response

EPA/540/S-92/005  
April 1992



## Ground Water Issue

Fundamentals of Ground-Water Modeling

Jacob Bear<sup>a</sup>, Milovan S. Beljin<sup>b</sup>, and Randall R. Ross<sup>c</sup>

TAKING COOPERATION FORWARD



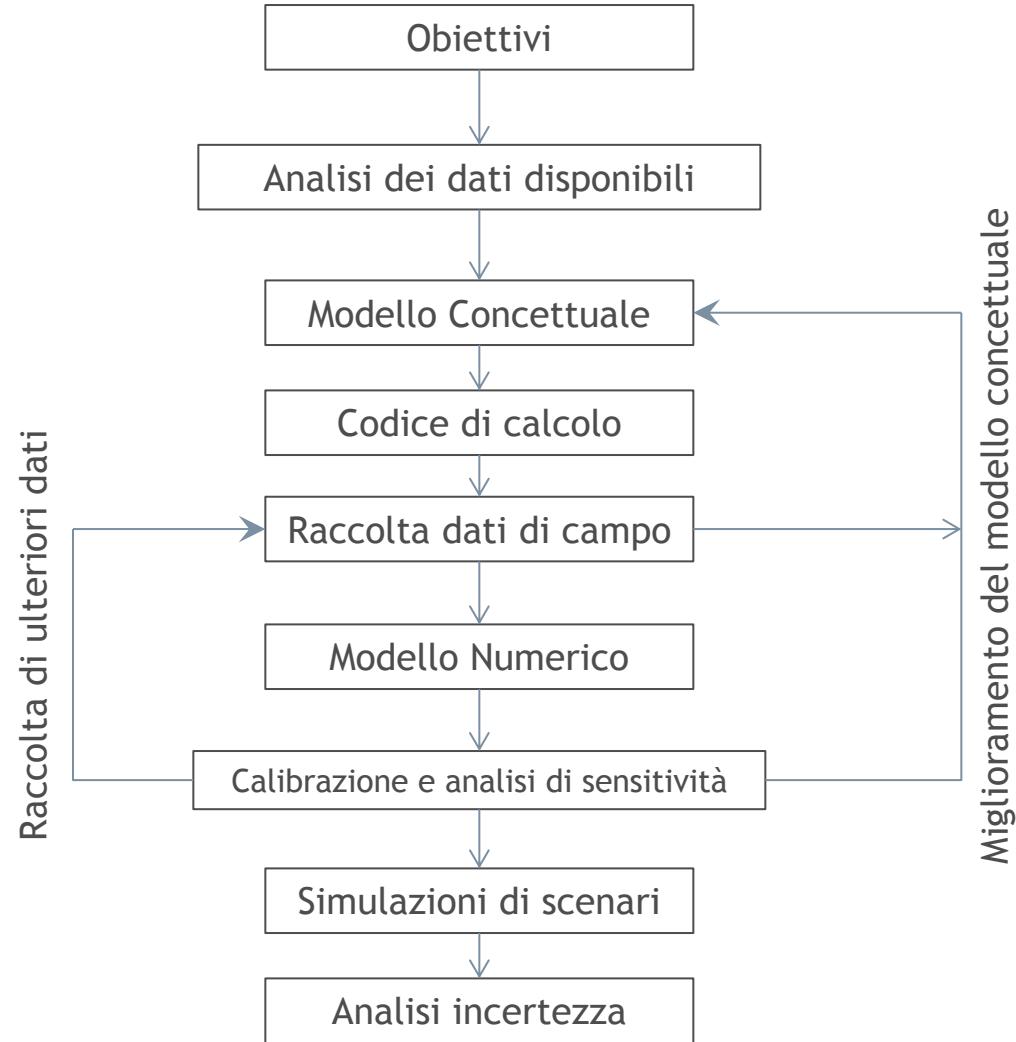
- Un modello può essere definito come la versione semplificata della realtà che permette di analizzare le risposte a date sollecitazioni.
- Vista la complessità dei fenomeni naturali, il modello richiede la necessità di alcune semplificazioni relative alla geometria del problema, la natura del mezzo poroso, le proprietà del fluido, le condizioni al contorno, ...
- Differenti ipotesi portano a modelli e risultati differenti.
- *Il primo passo nella modellazione è la costruzione di un modello concettuale mirato allo studio di un preciso problema.*



I modelli numerici forniscono **sempre** un risultato



# APPROCCIO METODOLOGICO



■ La selezione di un modello concettuale appropriato e il grado di semplificazione dipende da:

1. Obiettivo dello studio
2. Livello di dettaglio dello studio (locale/regionale)
3. Risorse disponibili
4. Dati disponibili
5. Normativa di riferimento

Una volta completato il modello concettuale lo si trasforma in numerico



- Geometria dell'acquifero in studio: Confini, Topografia, Stratigrafia
- Tipologia del mezzo poroso: Omogeneo? Isotropo? proprietà idrauliche, ...
- Tipologia di flusso: 1-D, 2-D, 3-D
- Proprietà dell'acqua (densità, comprimibilità, ...)
- Tipologia di acquifero: Confinato, Libero, Semi-confinato
- Presenza di sorgenti o di prelievi sia di acqua che di contaminanti all'interno del dominio in studio
- Condizioni iniziali
- Condizioni al contorno
- Analisi in stazionario o in transitorio



## ■ Definizione della geometria e confini (Semplificazioni)

- Dimensioni planimetriche maglie della griglia di calcolo
- Numero di strati e loro spessore
- Condizioni al contorno
- Stazionario/transitorio
- Parametri idraulici

## ■ Equazioni di bilancio delle variabili in oggetto

■ Equazioni di moto delle variabili in oggetto  $\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$

## ■ Equazioni che definiscono il comportamento dei fluidi

■ Equazioni che definiscono le condizioni iniziali (stato di fatto ad un certo tempo per una determinata variabile, per esempio livello, concentrazione, ...)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + q_s C_s$$

■ Equazioni che definiscono le condizioni al contorno (interazioni del dominio oggetto di studio con l'ambiente circostante)

## ■ Scelta del software di calcolo



# INDICE

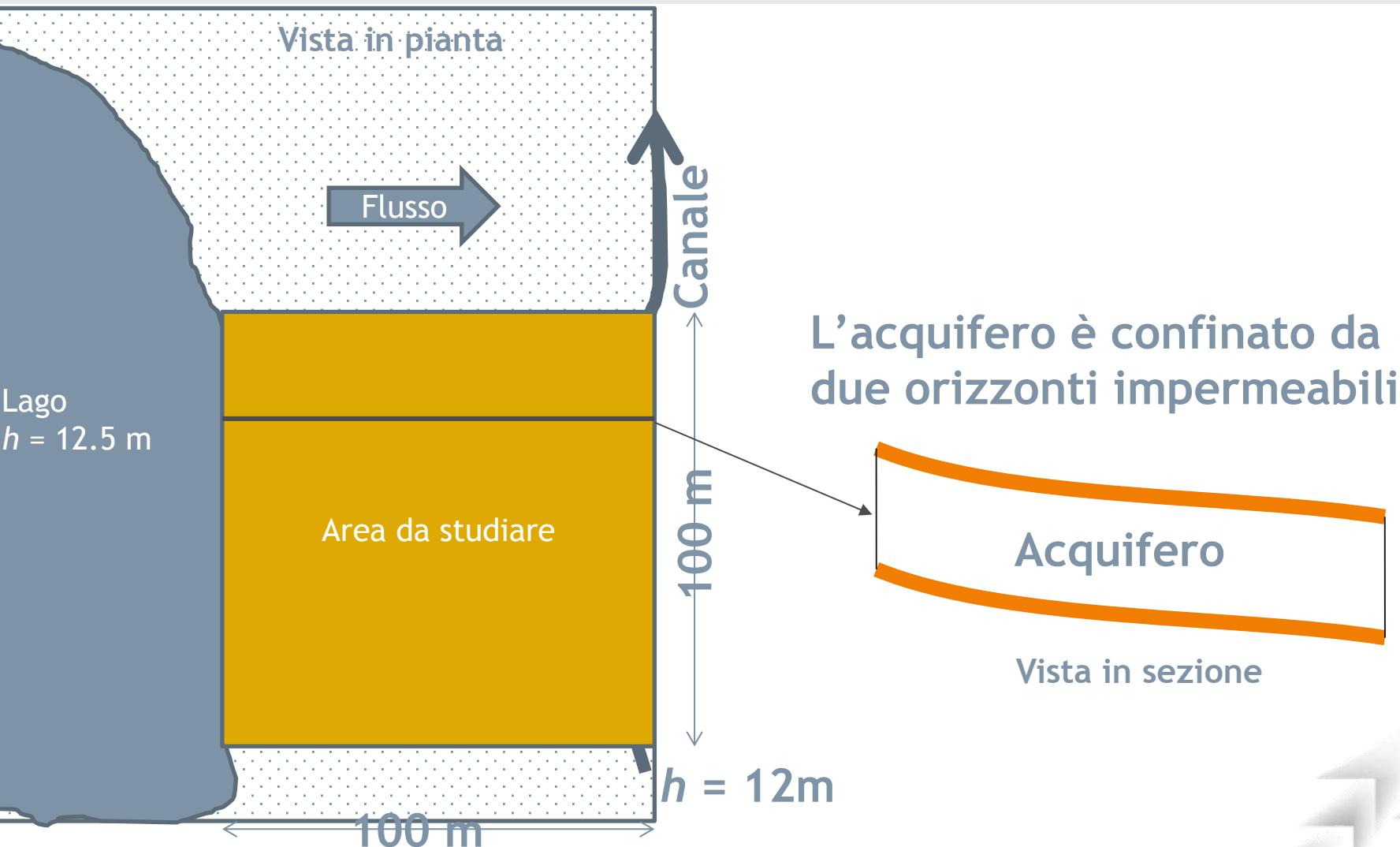
Introduzione ai  
modelli

Esempio sintetico

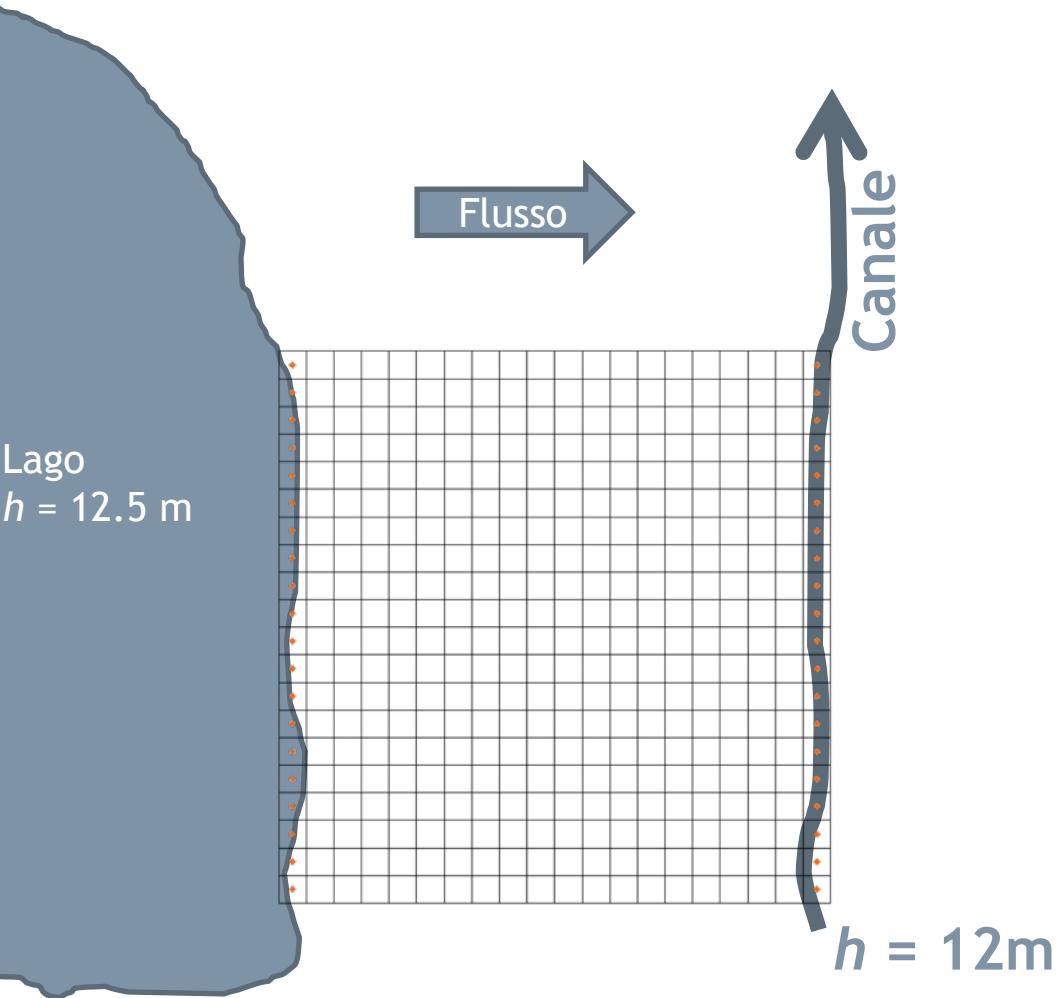
Modello  
preliminare  
dell'acquifero  
Parmense



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO

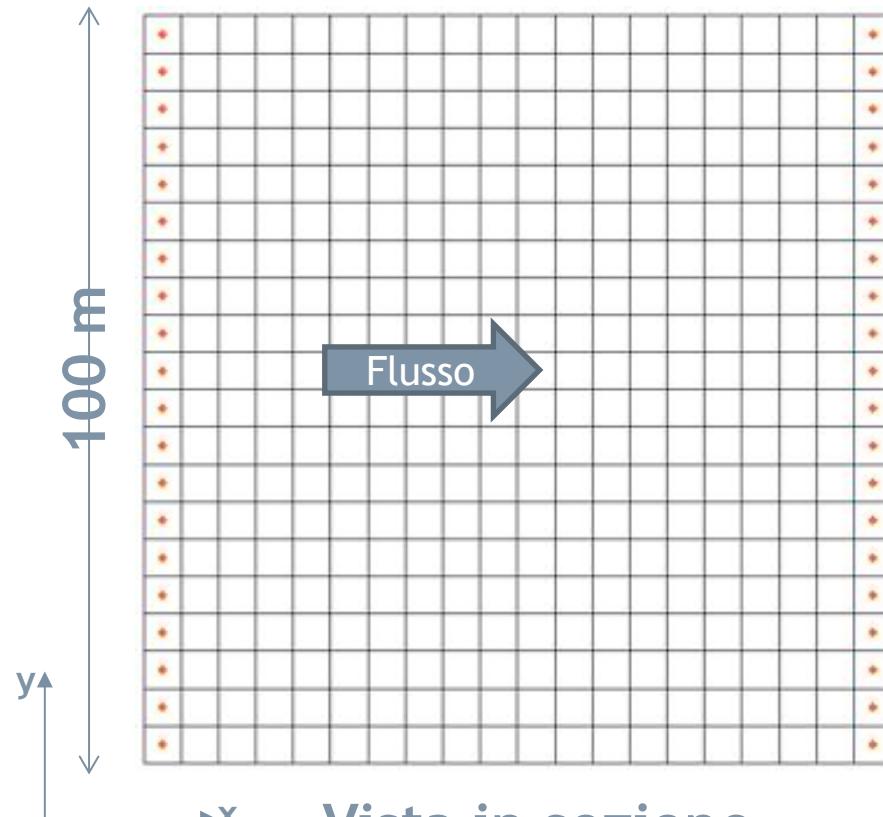


Definizione della griglia  
di calcolo 3D:  
planimetrica e in sezione

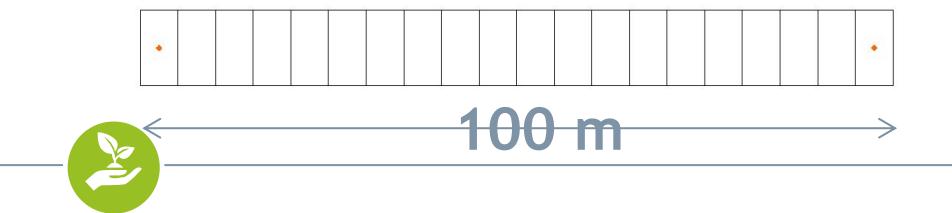


# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO

## Vista in pianta



## Vista in sezione



$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + Q$$

### Ipotesi

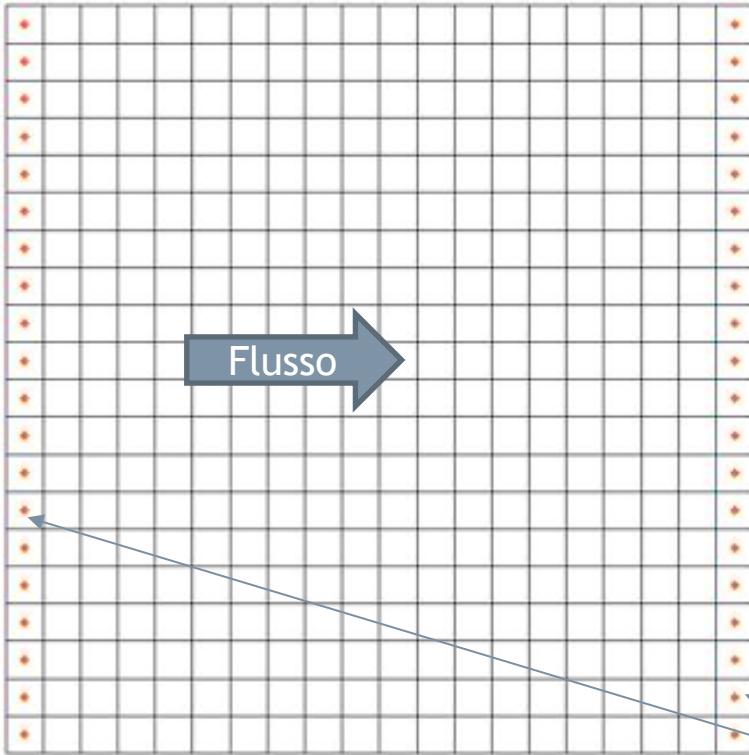
- Acquifero confinato
- Omogeneo, isotropo ( $T_{xx} = T_{yy}$ )
- Stazionario ( $\partial h / \partial t = 0$ )
- Assenza di termini sorgente ( $Q=0$ )

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

$$\nabla^2 h = 0$$

# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO

## Vista in pianta



## Vista in sezione



$$\nabla^2 h = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad y = 0, y = 100\text{m}$$

$$h = 12.5\text{m}, x = 0\text{m}$$

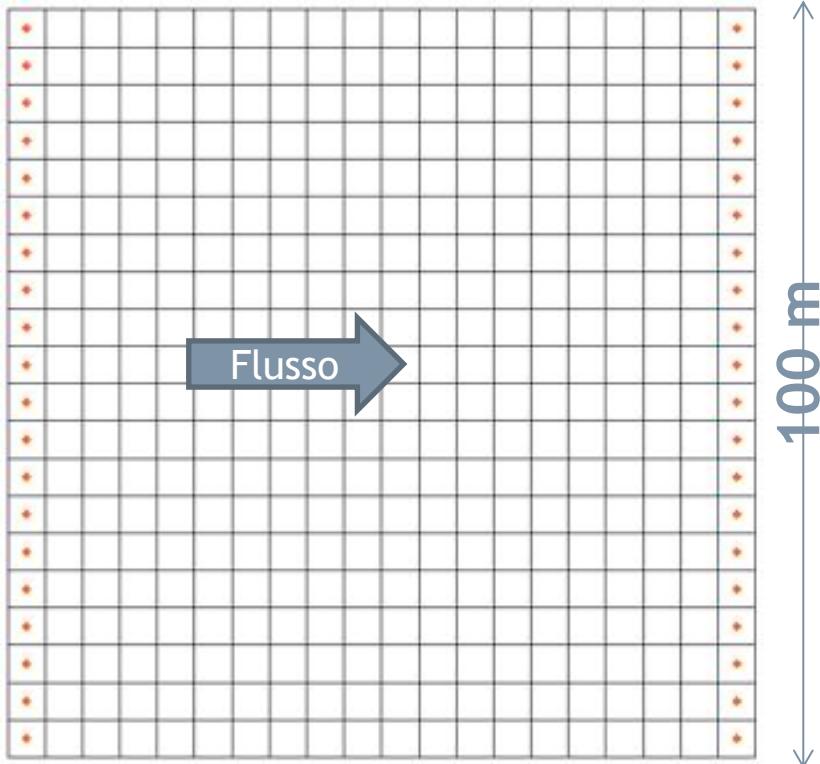
$$h = 12\text{m}, x = 100\text{m}$$

Condizione al contorno



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO

Vista in pianta



$$\nabla^2 h = 0$$

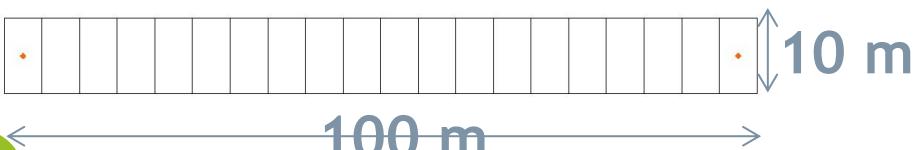
$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad y = 0, y = 100\text{m}$$

$$h = 12.5\text{m}, x = 0\text{m}$$

$$h = 12\text{m}, x = 100\text{m}$$

Proprietà idrauliche:  
Trasmissività o permeabilità

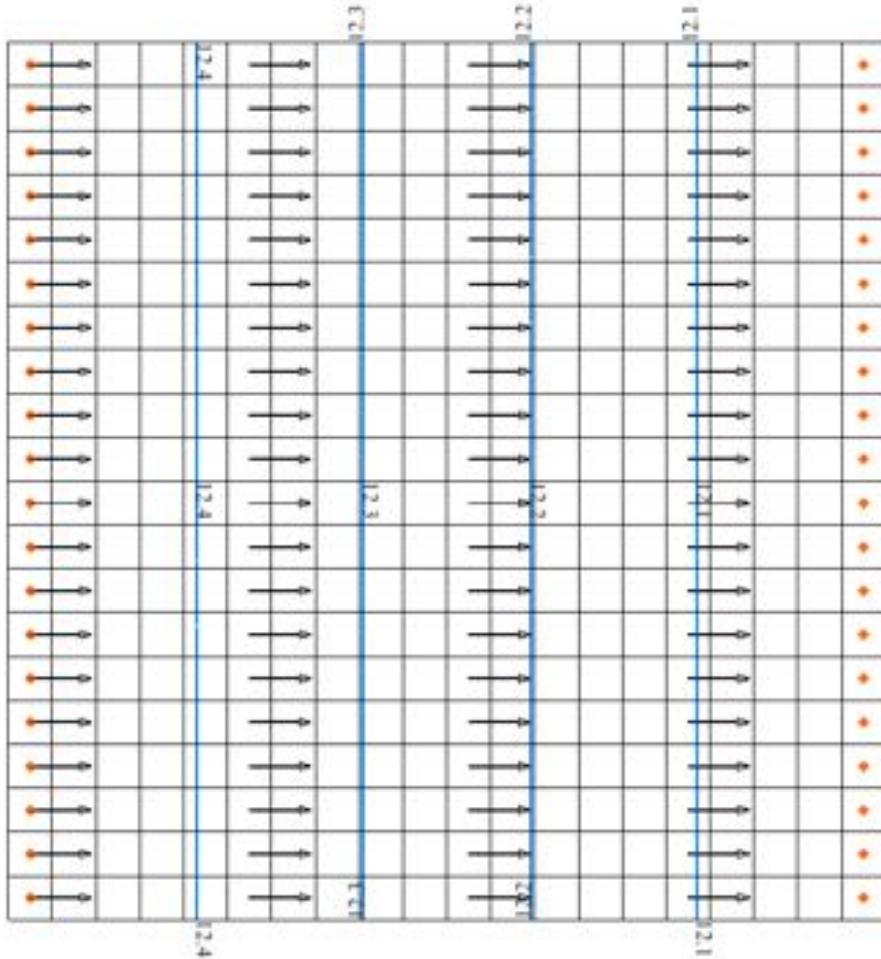
Vista in sezione



TAKING COOPERATION FORWARD



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO



$$\nabla^2 h = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad y = 0, y = 100\text{m}$$

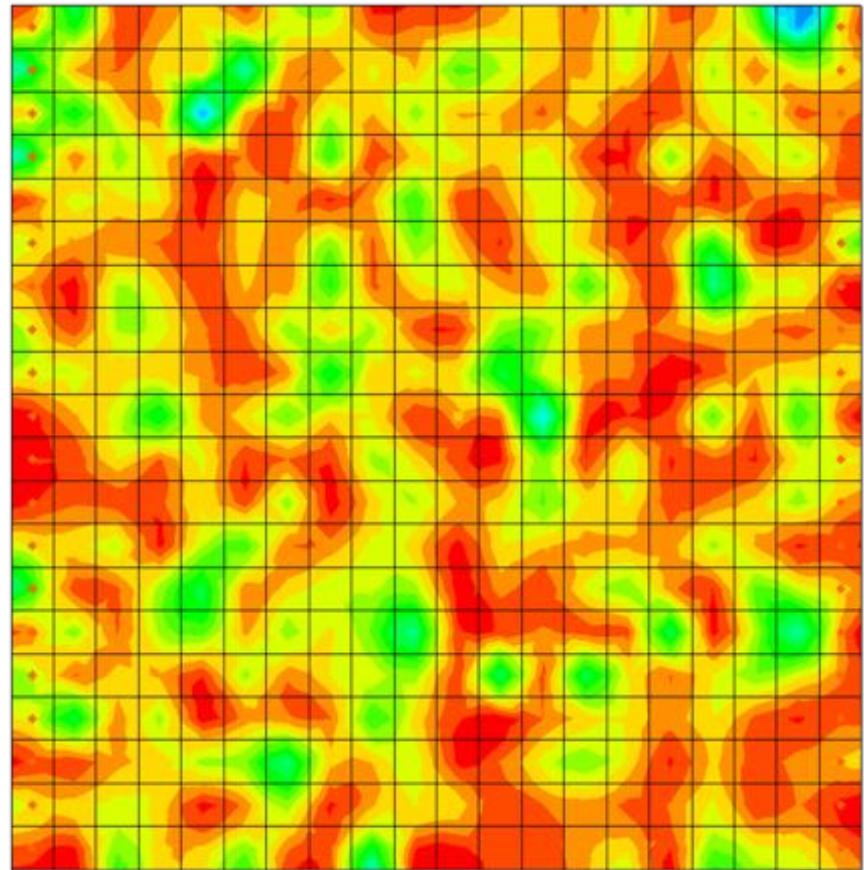
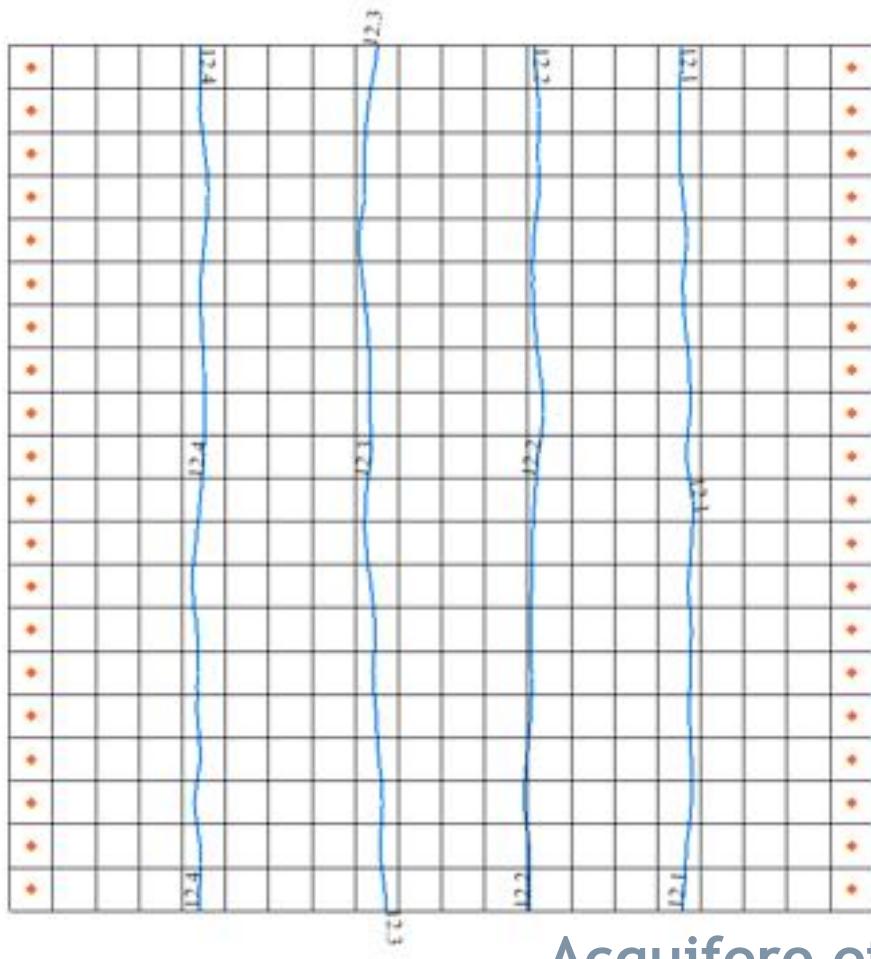
$$h = 12.5\text{m}, x = 0\text{m}$$

$$h = 12\text{m}, x = 100\text{m}$$

**Acquifero omogeneo e isotropo**  
**Permeabilità =  $10^{-4}$  m/s**  
**Flusso =  $5 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s = 43 m<sup>3</sup>/d**



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO

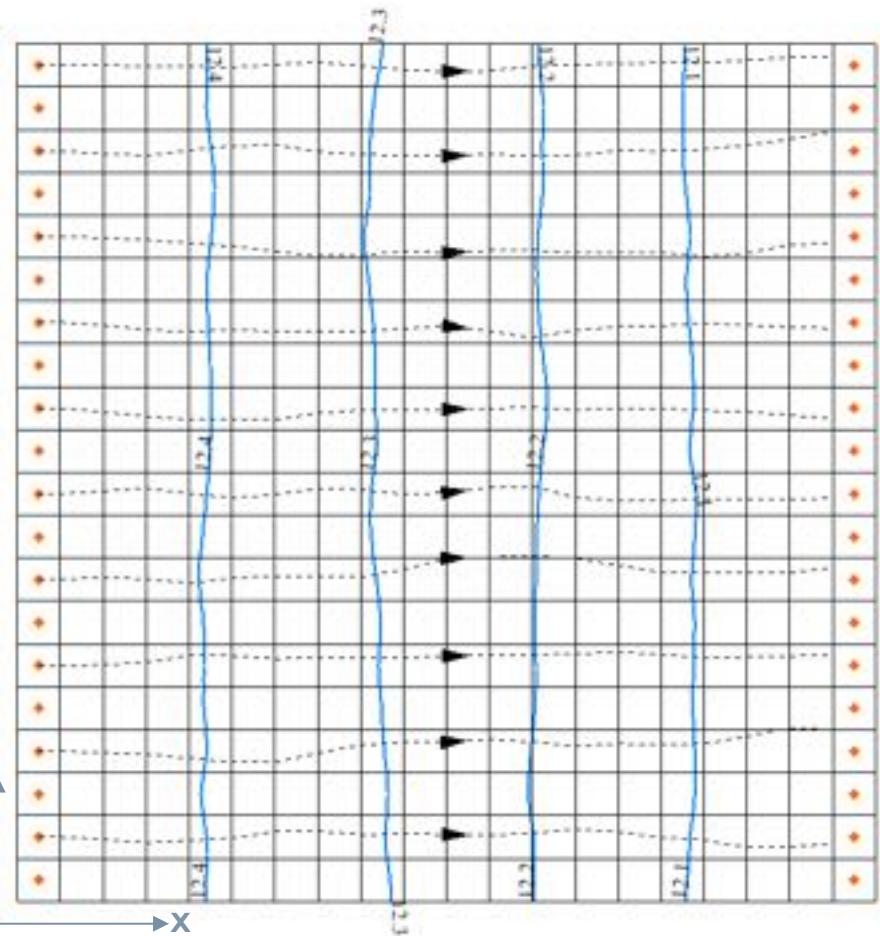


Acquifero eterogeneo  
Permeabilità media =  $10^{-4}$  m/s

TAKING COOPERATION FORWARD



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO



## Acquifero eterogeneo

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad y = 0, y = 100m$$

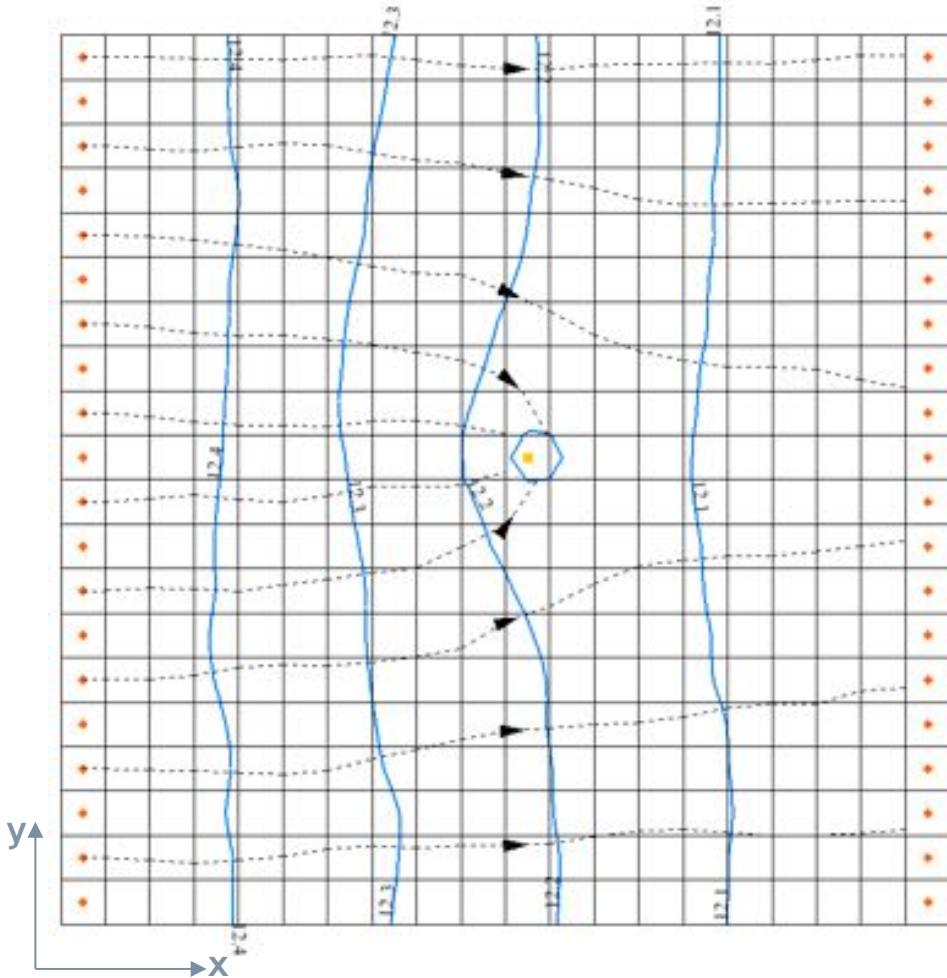
$$h = 12.5m, x = 0m$$

$$h = 12m, x = 100m$$

Traiettorie in avanti



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO



$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Q$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad y = 0, y = 100\text{m}$$

$$h = 12.5\text{m}, x = 0\text{m}$$

$$h = 12\text{m}, x = 100\text{m}$$

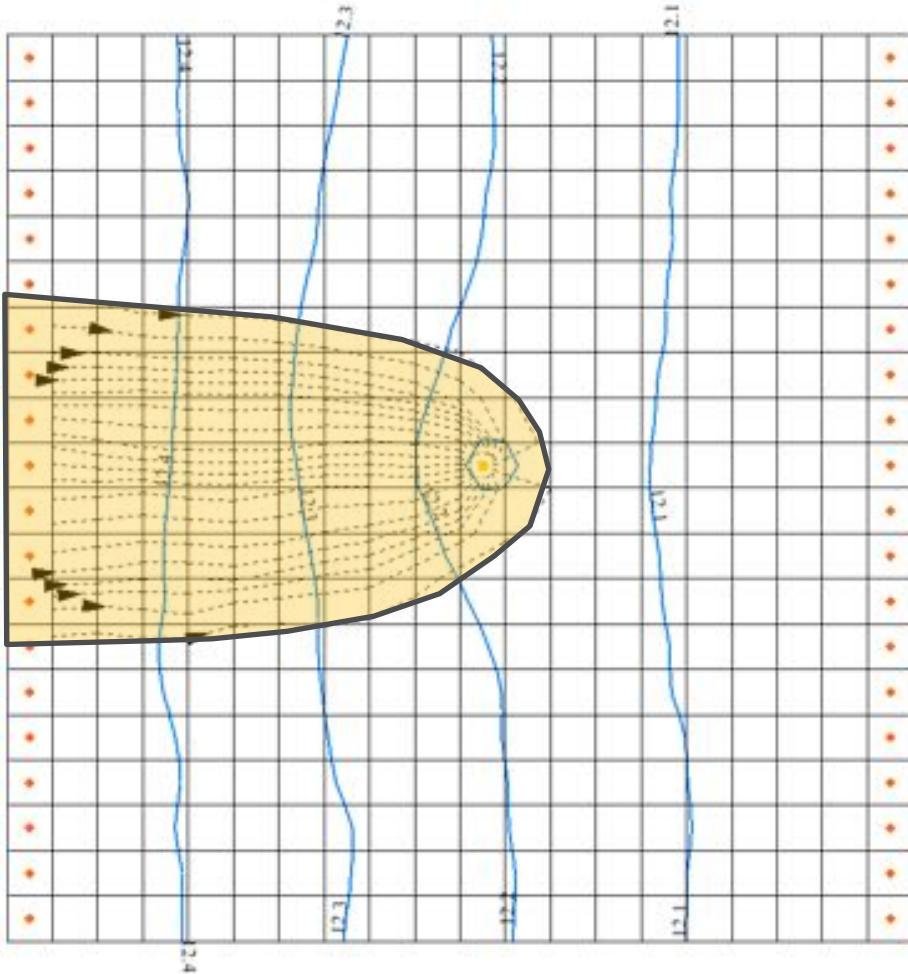
$$Q = 43\text{m}^3/\text{d}$$

**Pozzo in fase di estrazione**  
**Flusso = 115 m<sup>3</sup>/d**

**Traiettorie in avanti**



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO



$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Q$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad y = 0, y = 100 \text{ m}$$

$$h = 12.5 \text{ m}, x = 0 \text{ m}$$

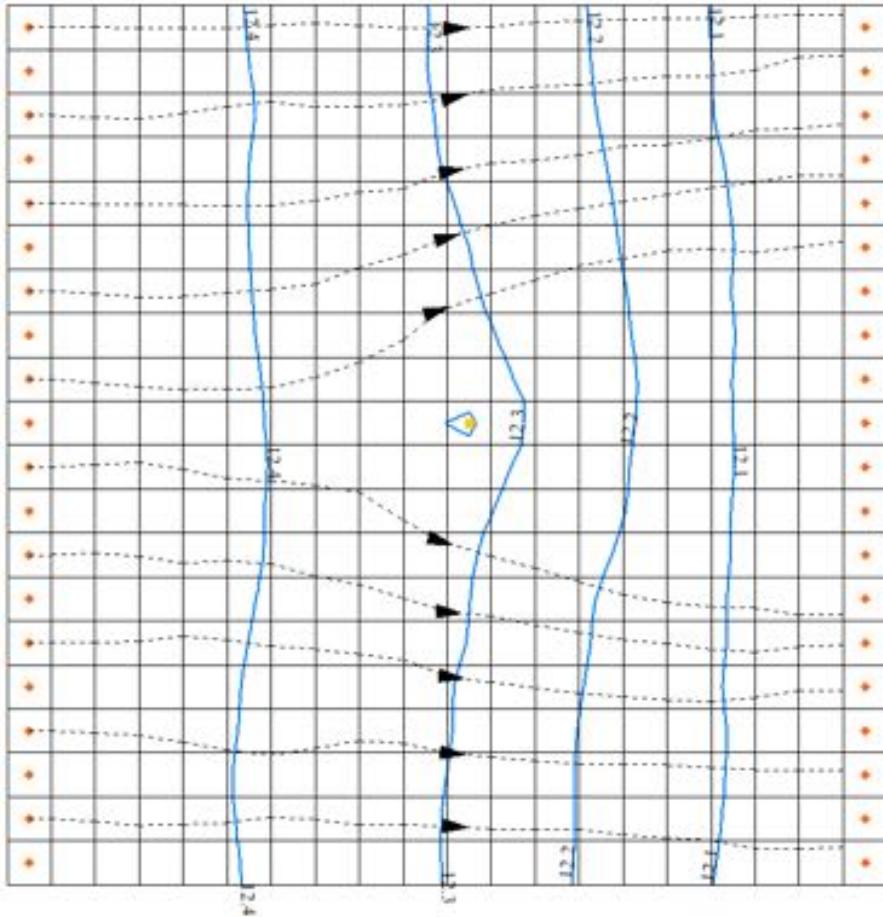
$$h = 12 \text{ m}, x = 100 \text{ m}$$

$$Q = 43 \text{ m}^3/\text{d}$$

**Pozzo in fase di estrazione  
Traiettorie all'indietro**



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO



$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Q$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad y = 0, y = 100\text{m}$$

$$h = 12.5\text{m}, x = 0\text{m}$$

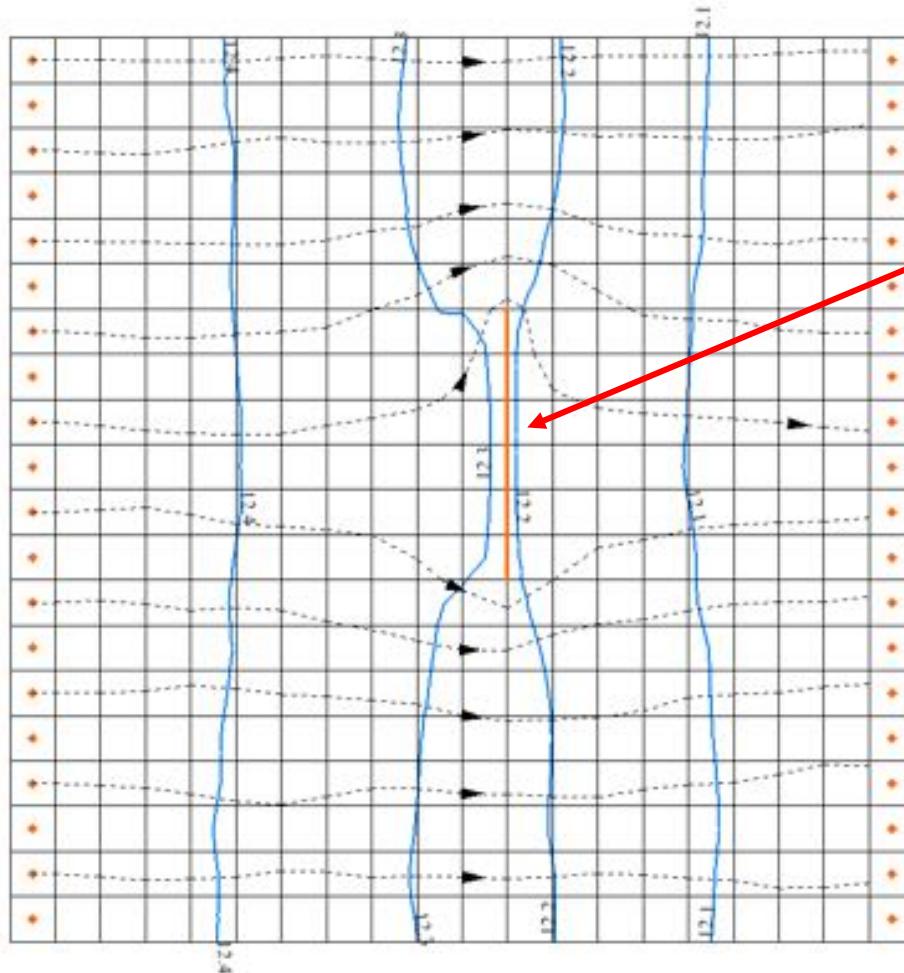
$$h = 12\text{m}, x = 100\text{m}$$

$$Q = -43\text{m}^3/\text{d}$$

Pozzo in fase di immissione



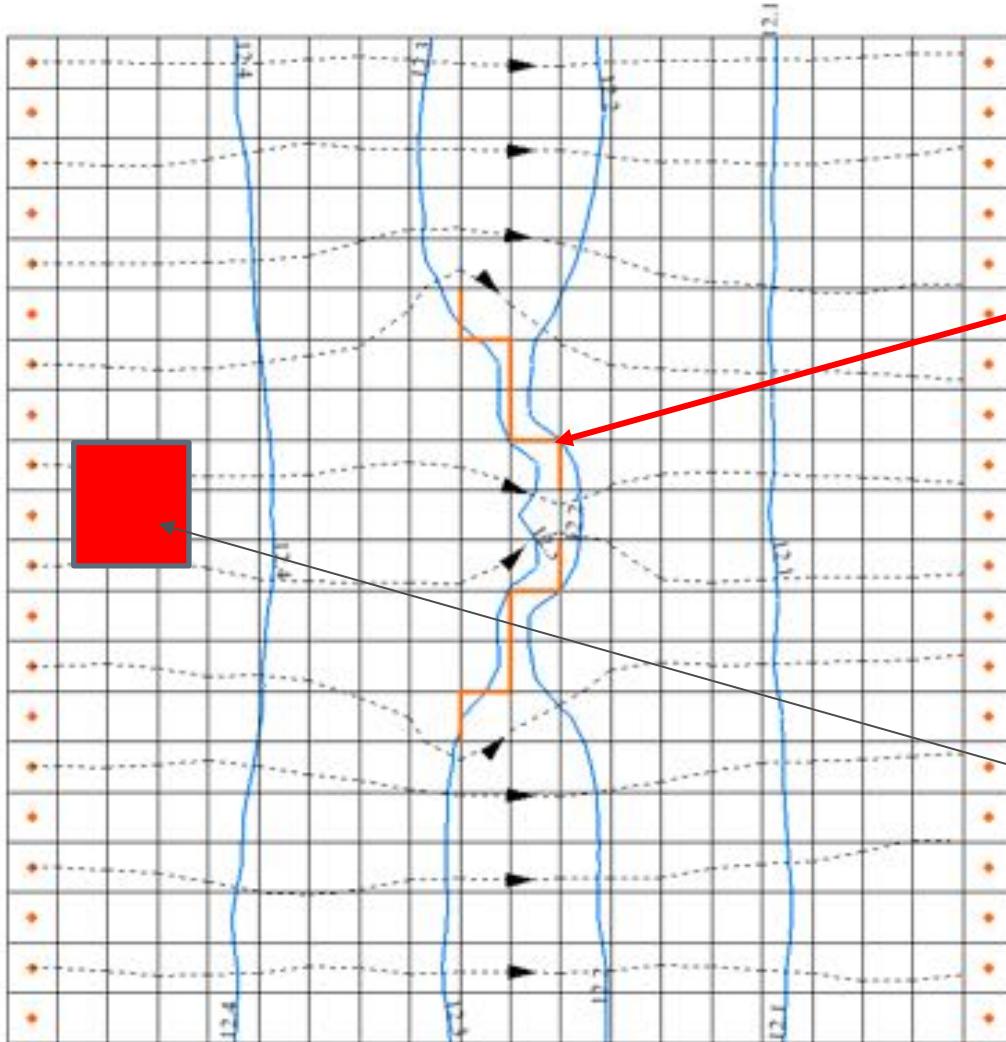
# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO



Barriera fisica



# ESEMPIO: STUDIO DEL MOTO ALL'INTERNO DELL'ACQUIFERO

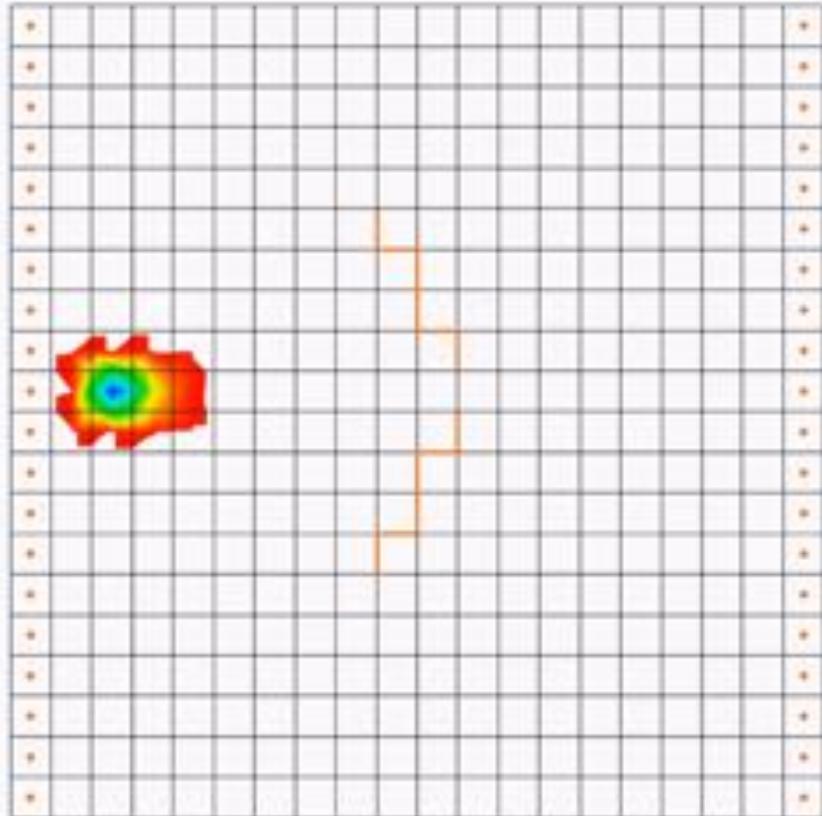


Barriera fisica con  
elemento di barriera  
reattiva centrale

Area  
contaminata



# SIMULAZIONE DI TRASPORTO DI CONTAMINANTE



TAKING COOPERATION FORWARD

## All'aumentare del livello di dettaglio aumentano le informazioni necessarie per completare il modello

- Ricostruzione geologica e idrostratigrafica
- Realizzazione nuovi sondaggi
- Analisi dei livelli osservati nei punti di monitoraggio
- Analisi dei livelli dei corsi d'acqua
- Studio delle influenze tra corpi idrici superficiali e sotterranei
- Individuazione delle direzioni dei flussi e loro quantificazione
- Prove sugli acquiferi
- Stima dei parametri idraulici
- Analisi isotopiche
- Analisi dei contaminanti eventualmente presenti



# INDICE

Introduzione ai  
modelli

Esempio sintetico

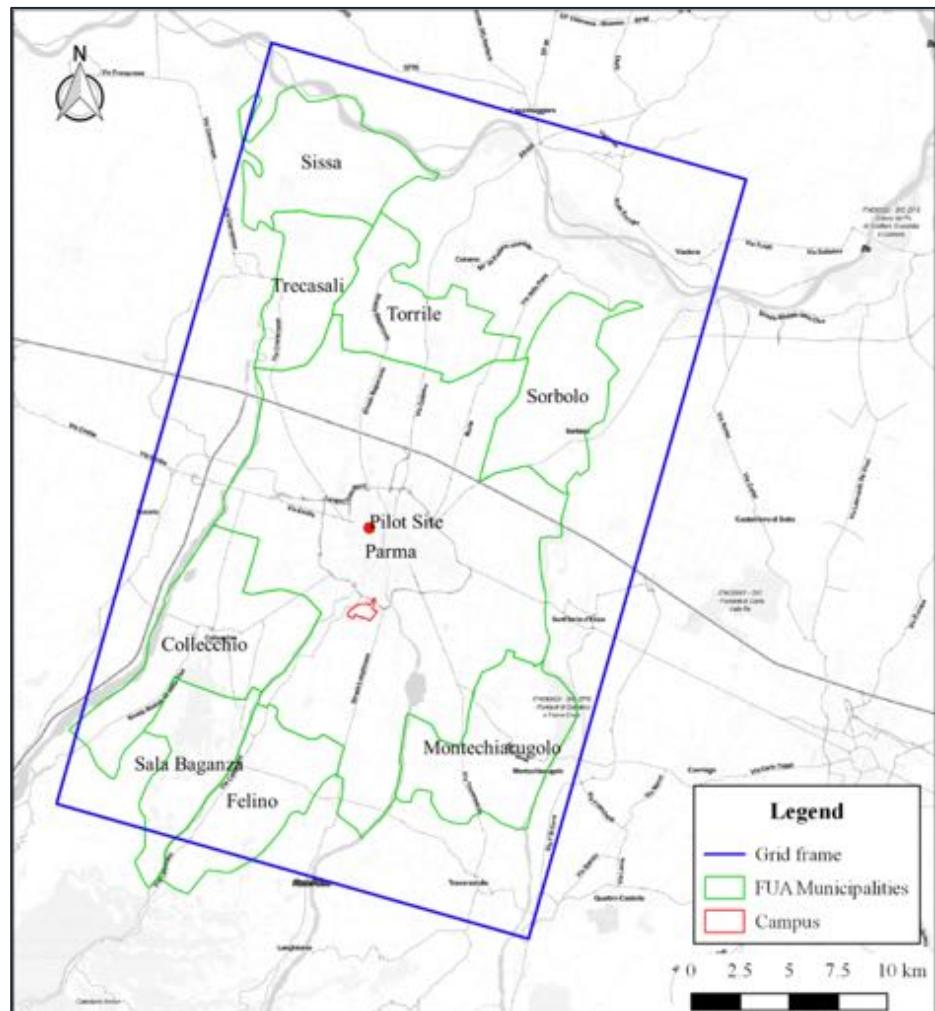
Modello  
preliminare  
dell'acquifero  
Parmense



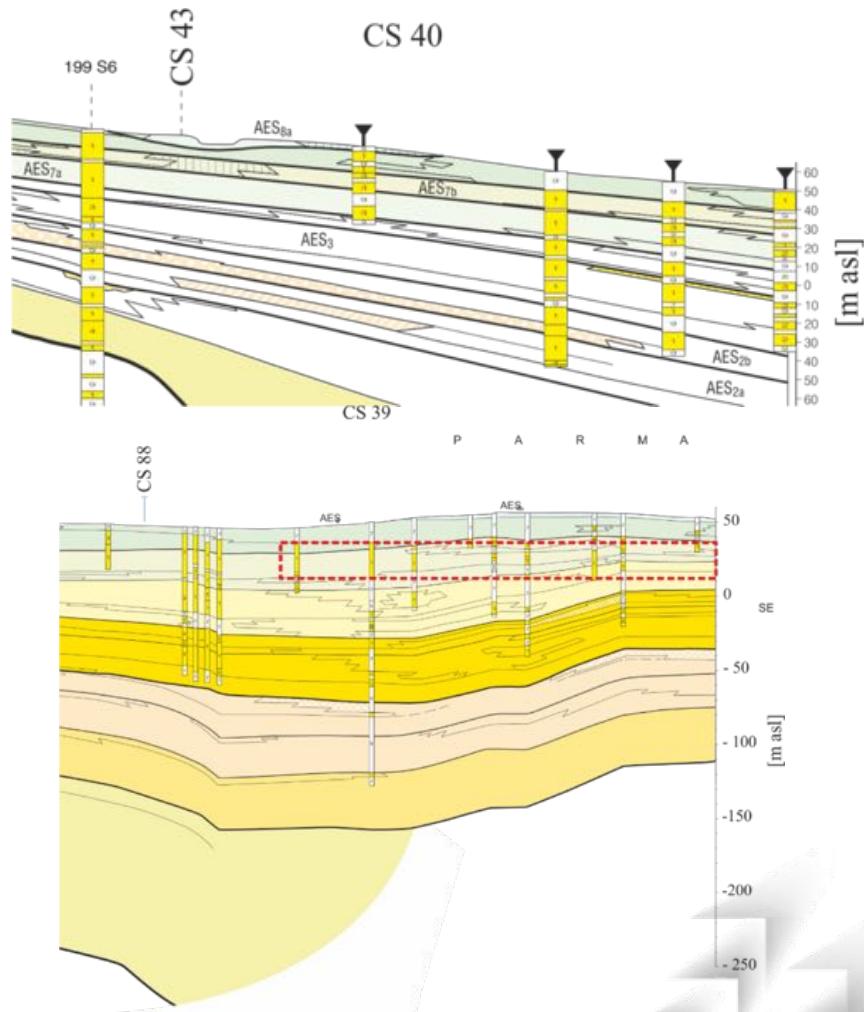
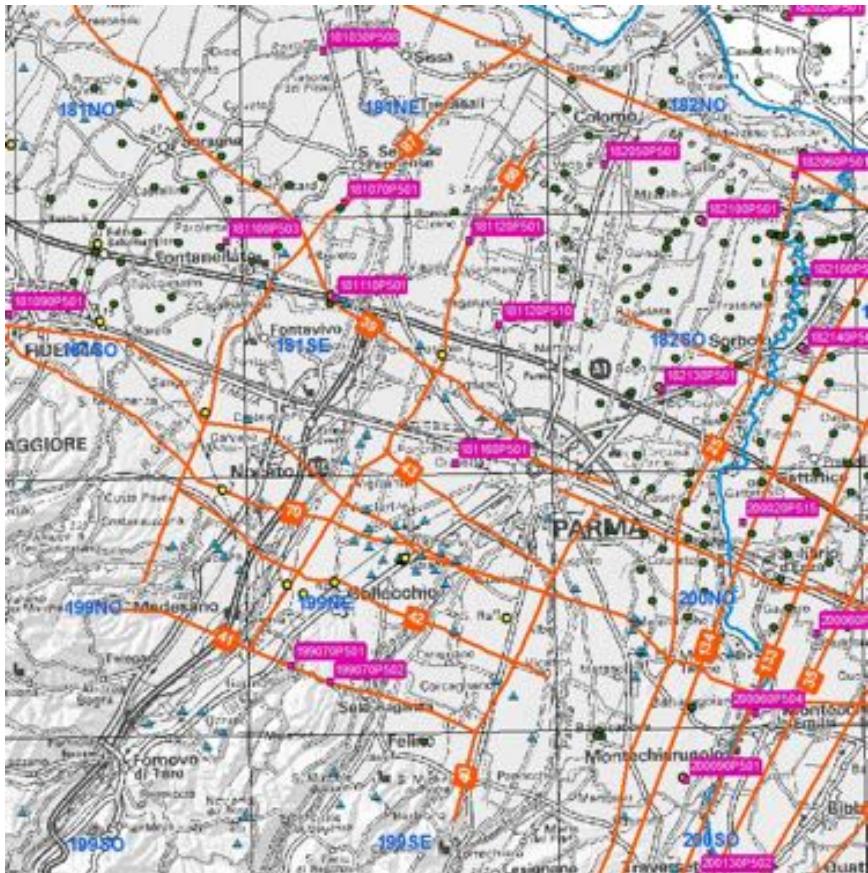
# MODELLO NUMERICO PRELIMINARE A GRANDE SCALA

FUA: 580 km<sup>2</sup>

Parma: 260 km<sup>2</sup>

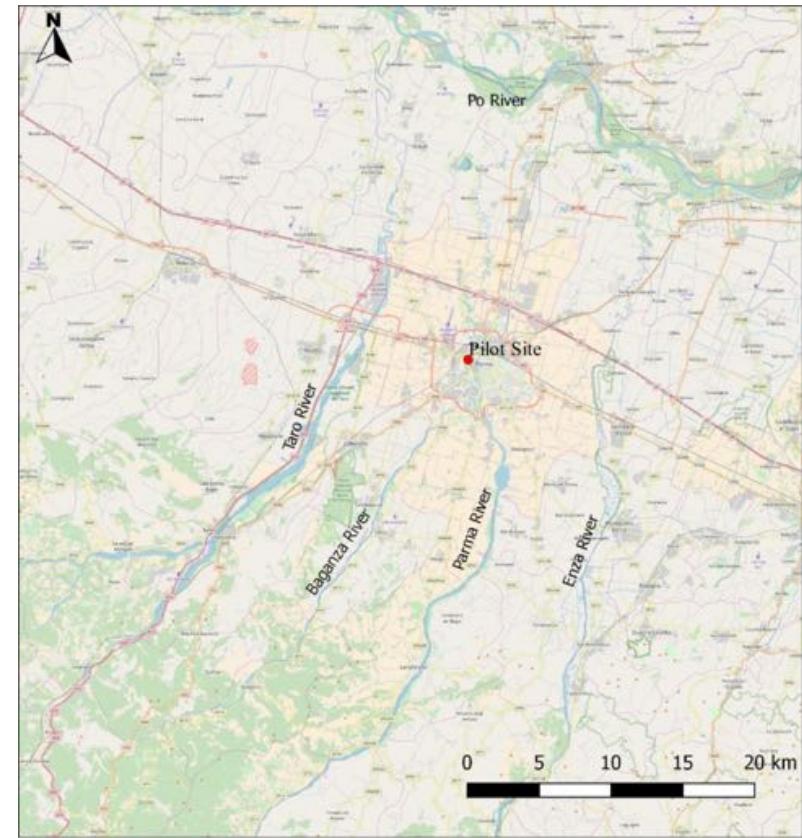
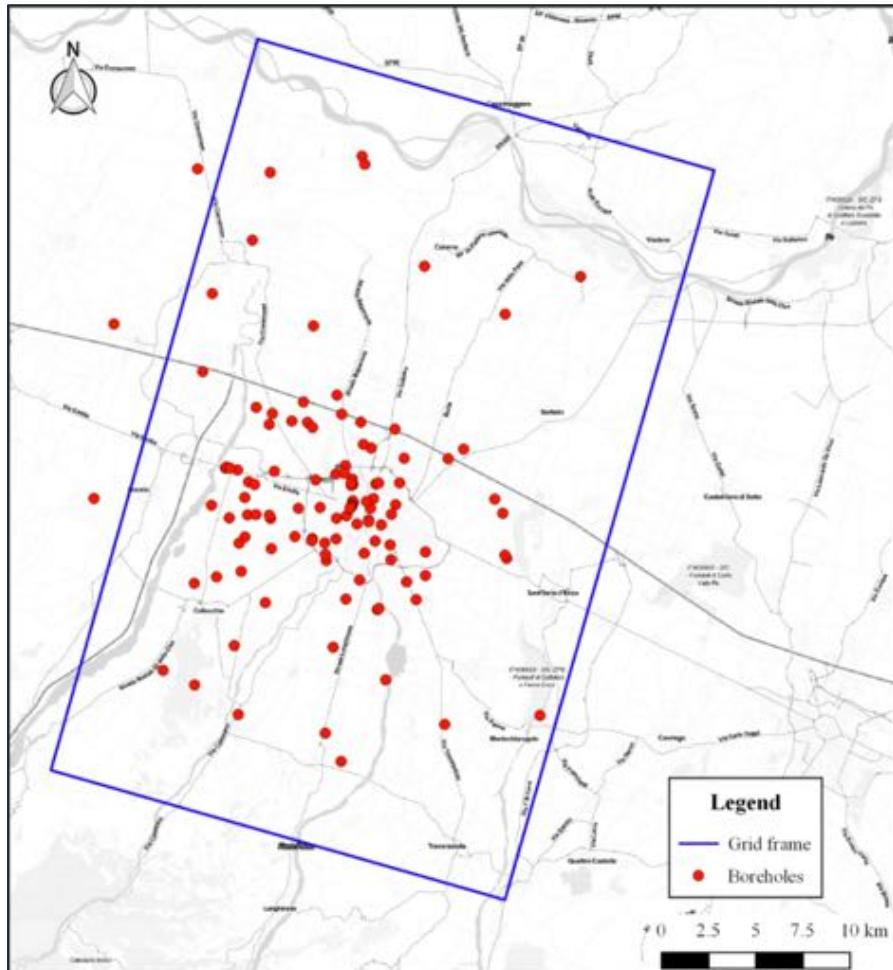


# SEZIONI GEOLOGICHE

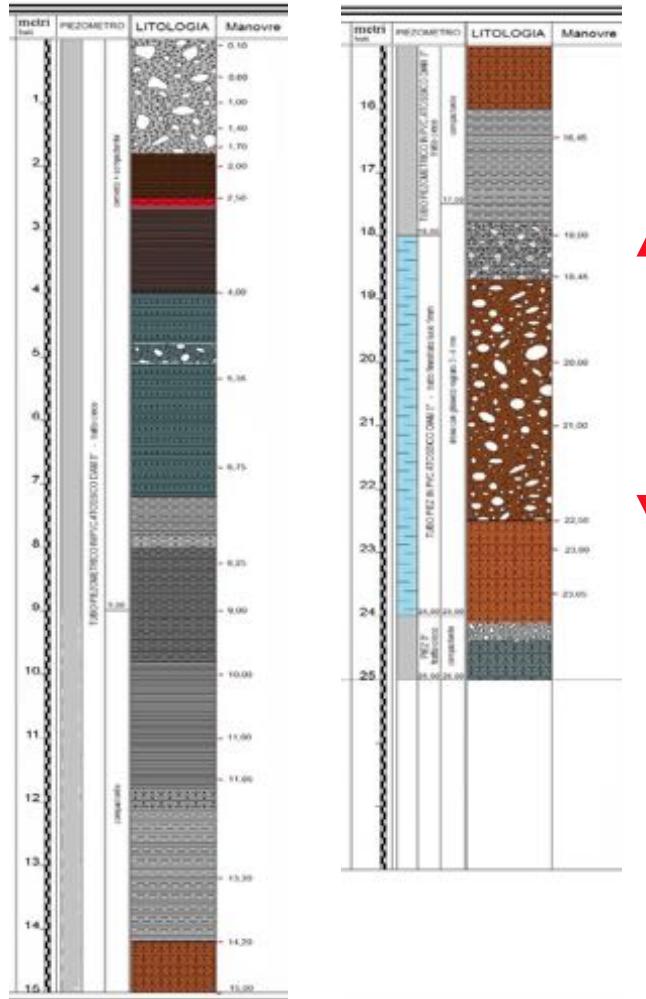


TAKING COOPERATION FORWARD

# MODELLO NUMERICO PRELIMINARE A GRANDE SCALA



# SONDAGGIO



Acquifero oggetto  
dello studio



# GRIGLIA DI CALCOLO

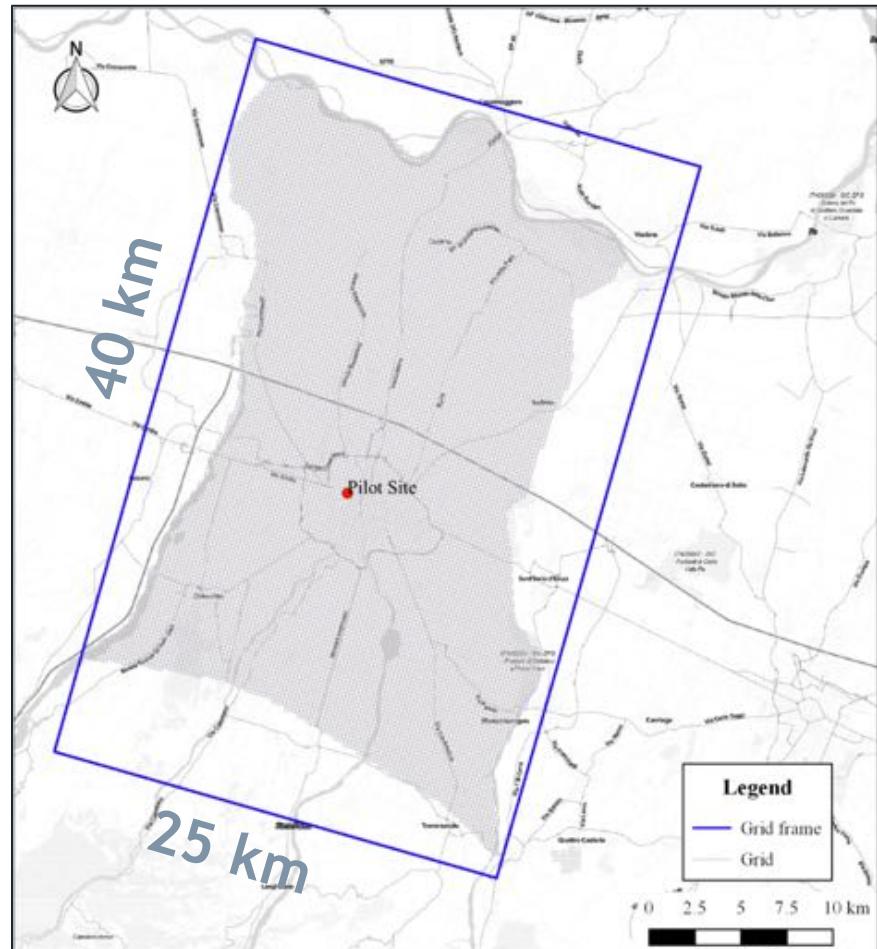
Celle totali: 50000  
Celle attive: 30934

righe: 200  
colonne: 125

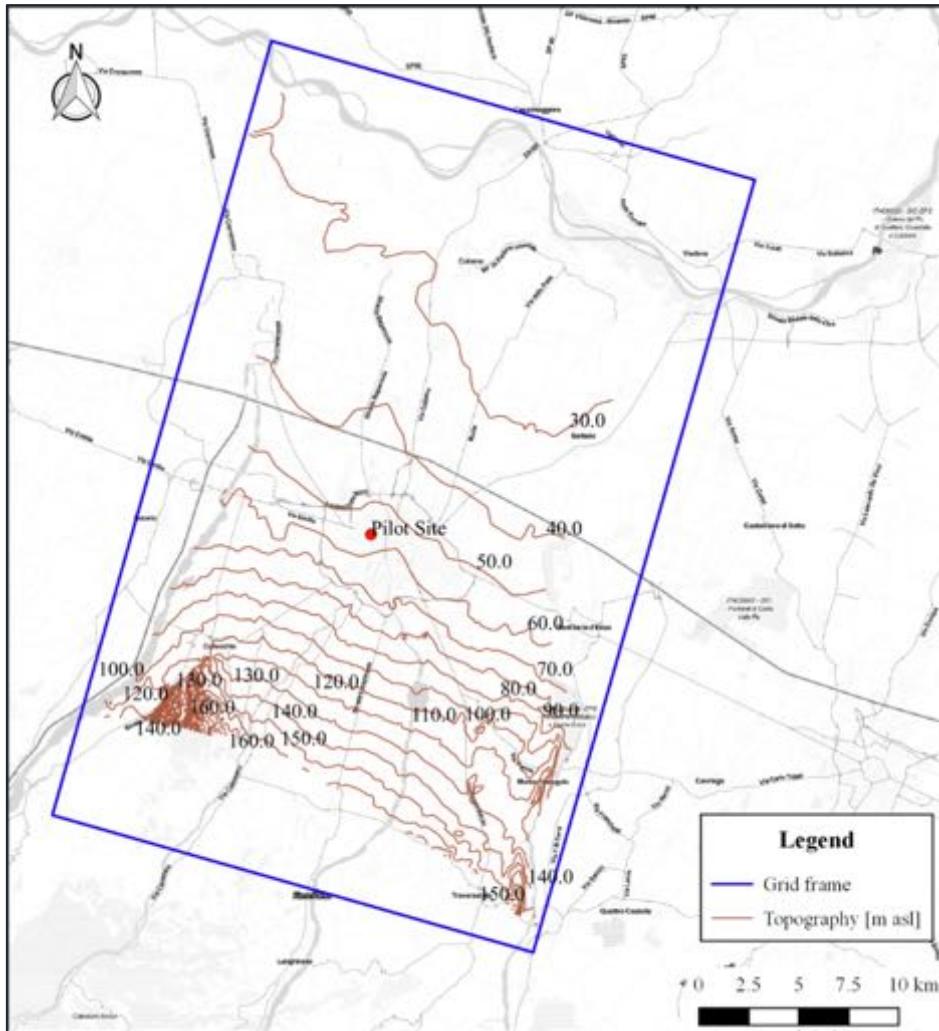
$\Delta X = \Delta Y = 200$  m

strati: 2

Area attiva: 612 km<sup>2</sup>

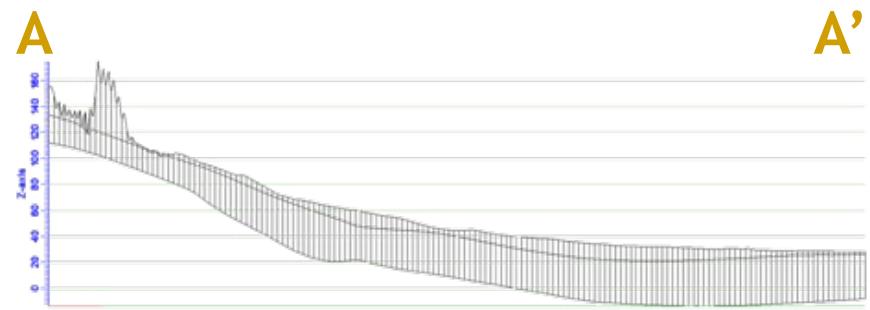
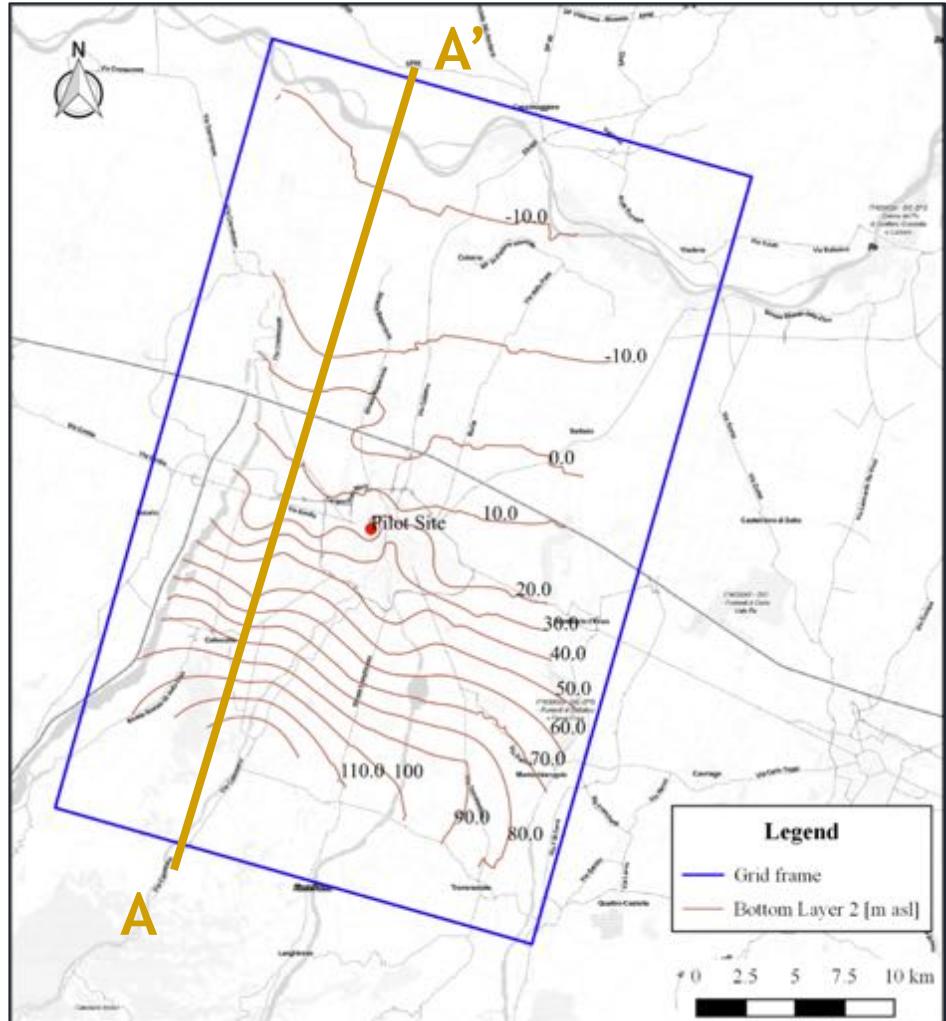


# MODELLO REGIONALE DTM



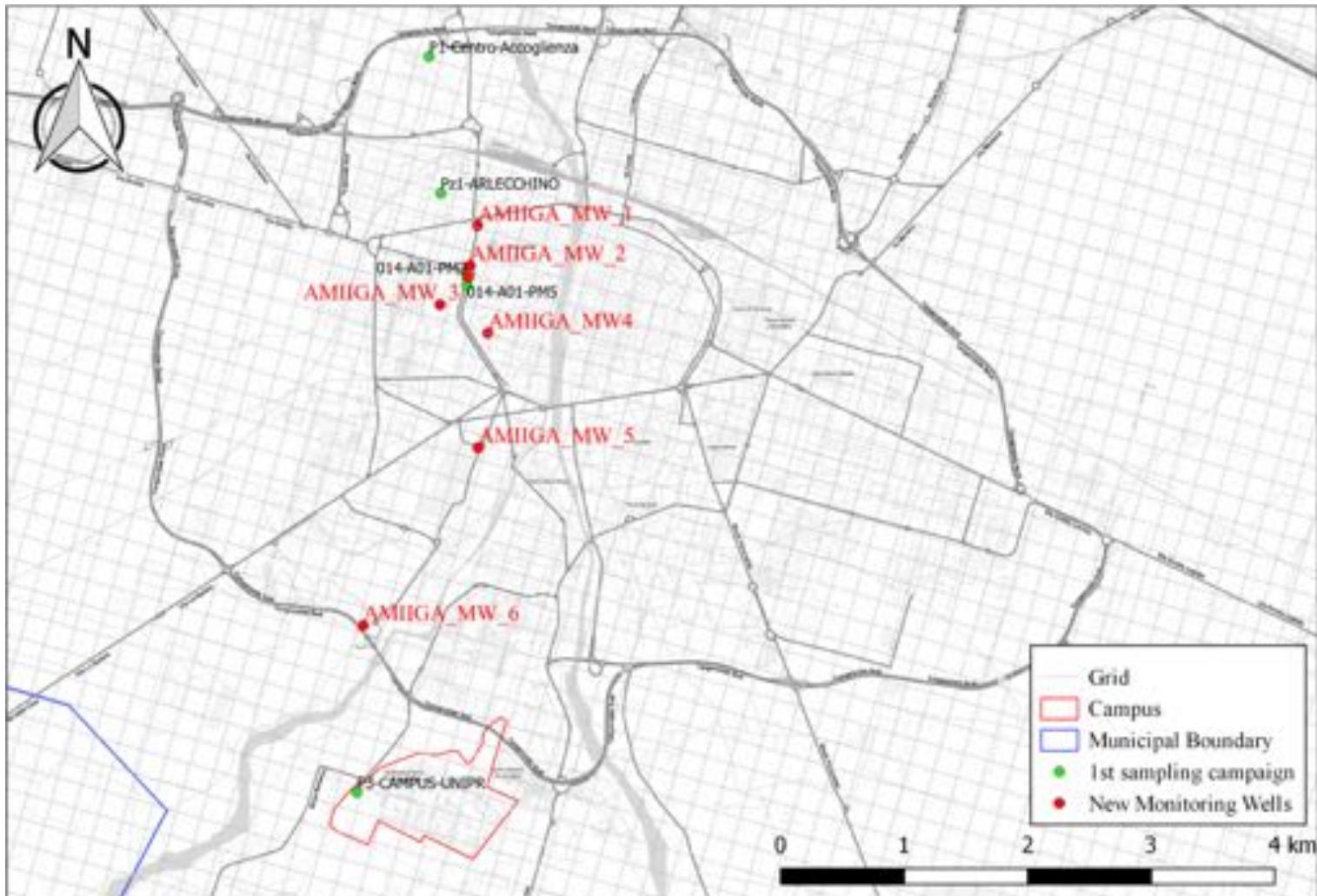
TAKING COOPERATION FORWARD

# BASE STRATO 2

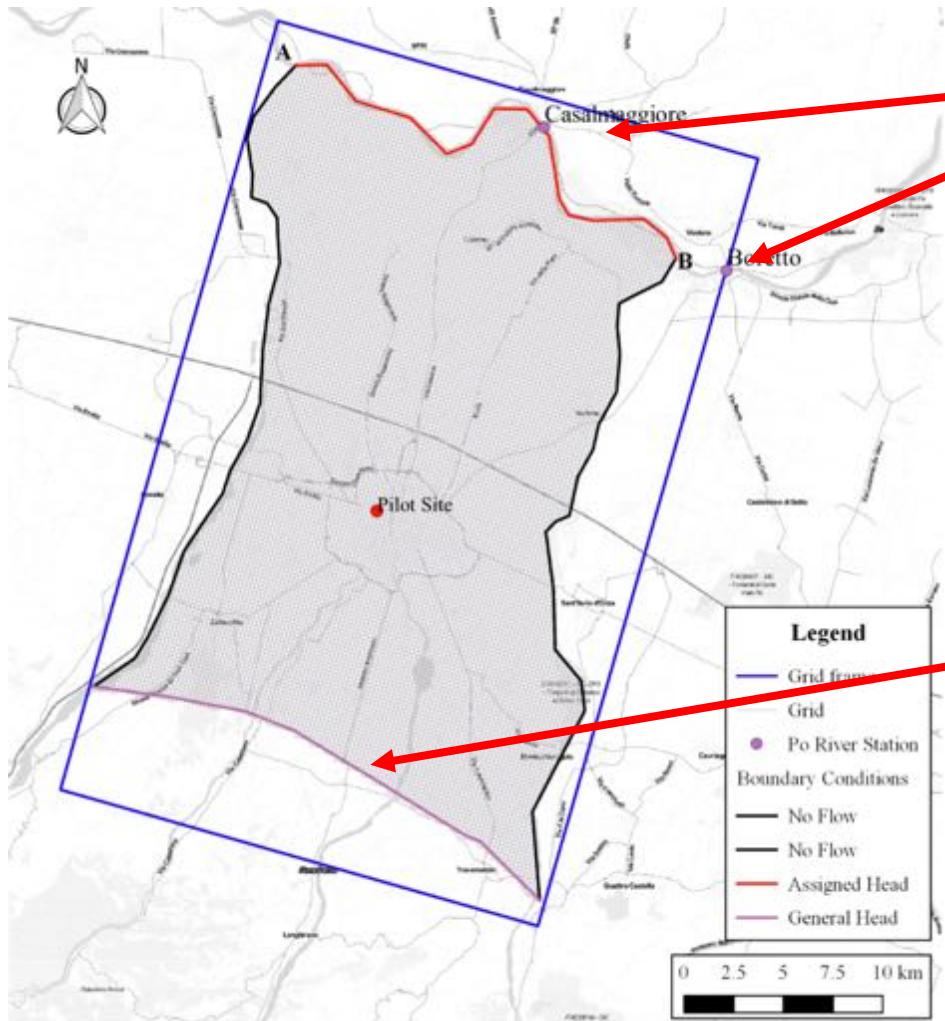


TAKING COOPERATION FORWARD

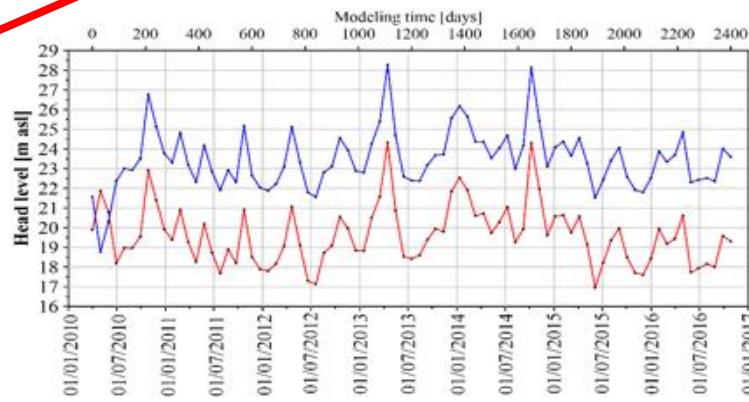
# DETTAGLIO GRIGLIA DI CALCOLO



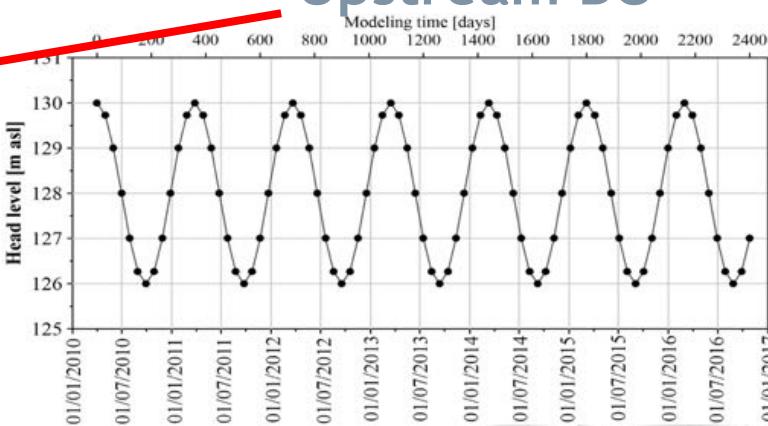
# CONDIZIONI AL CONTORNO



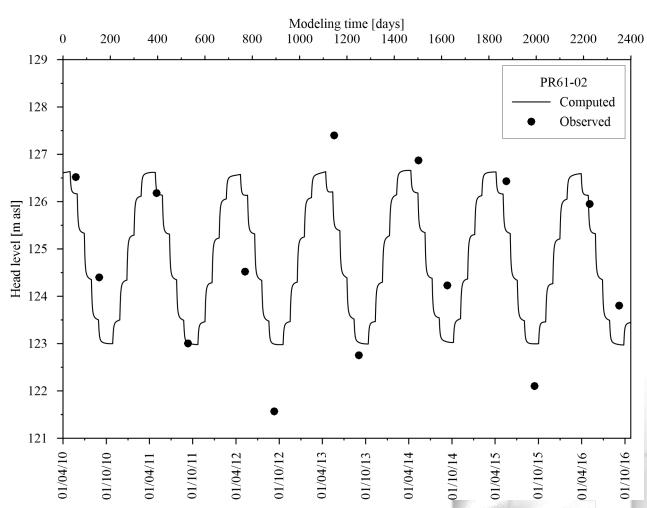
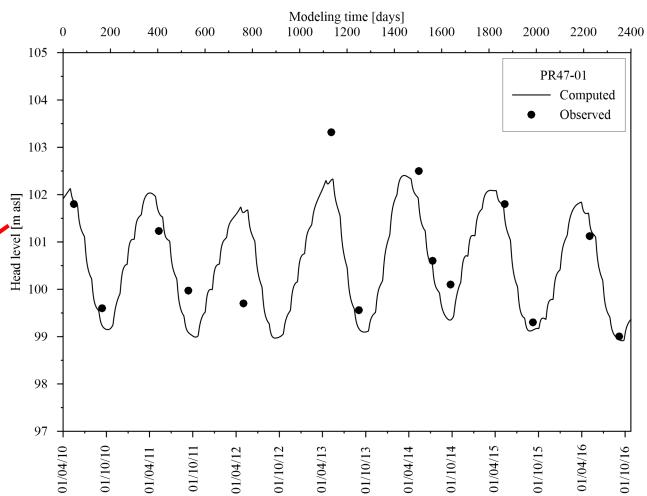
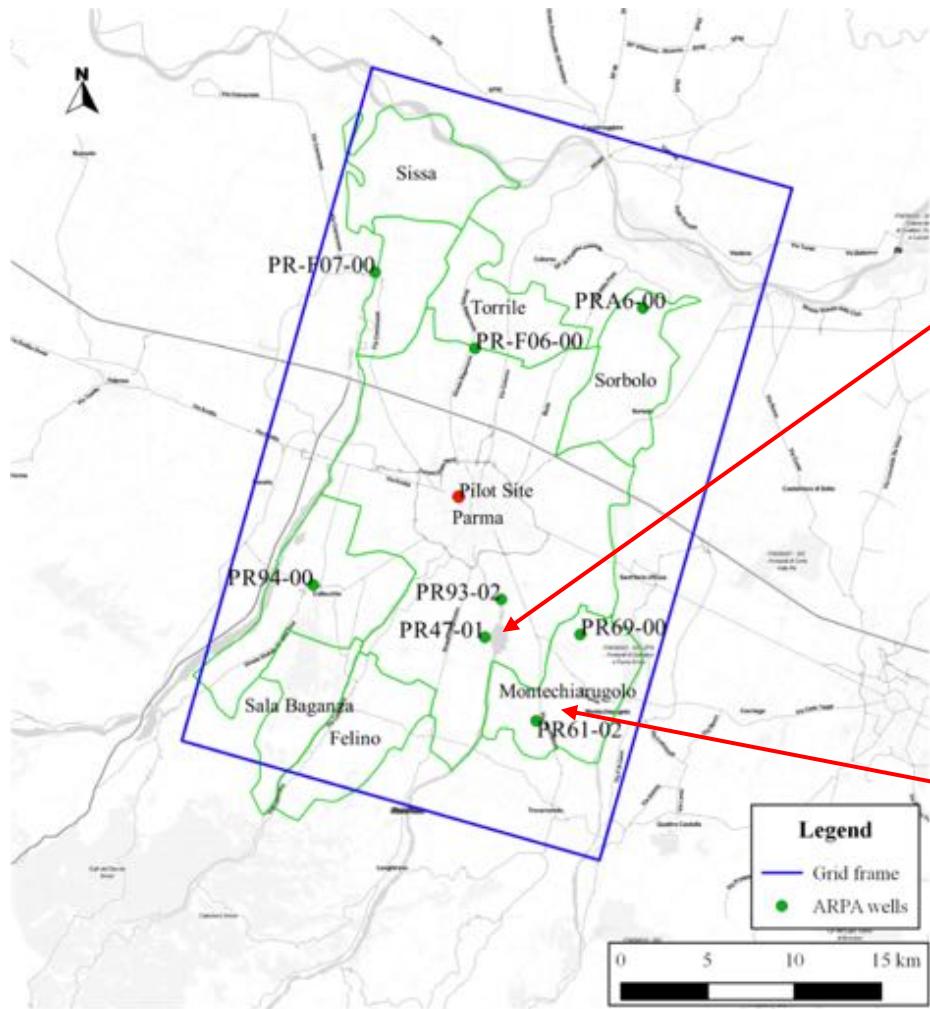
**Po River Station**



**Upstream BC**



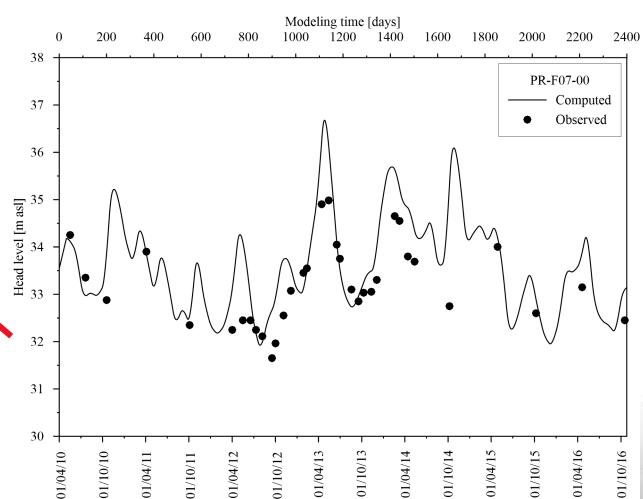
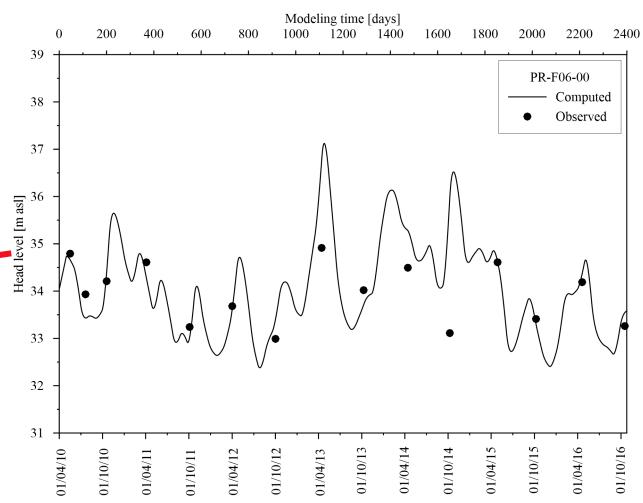
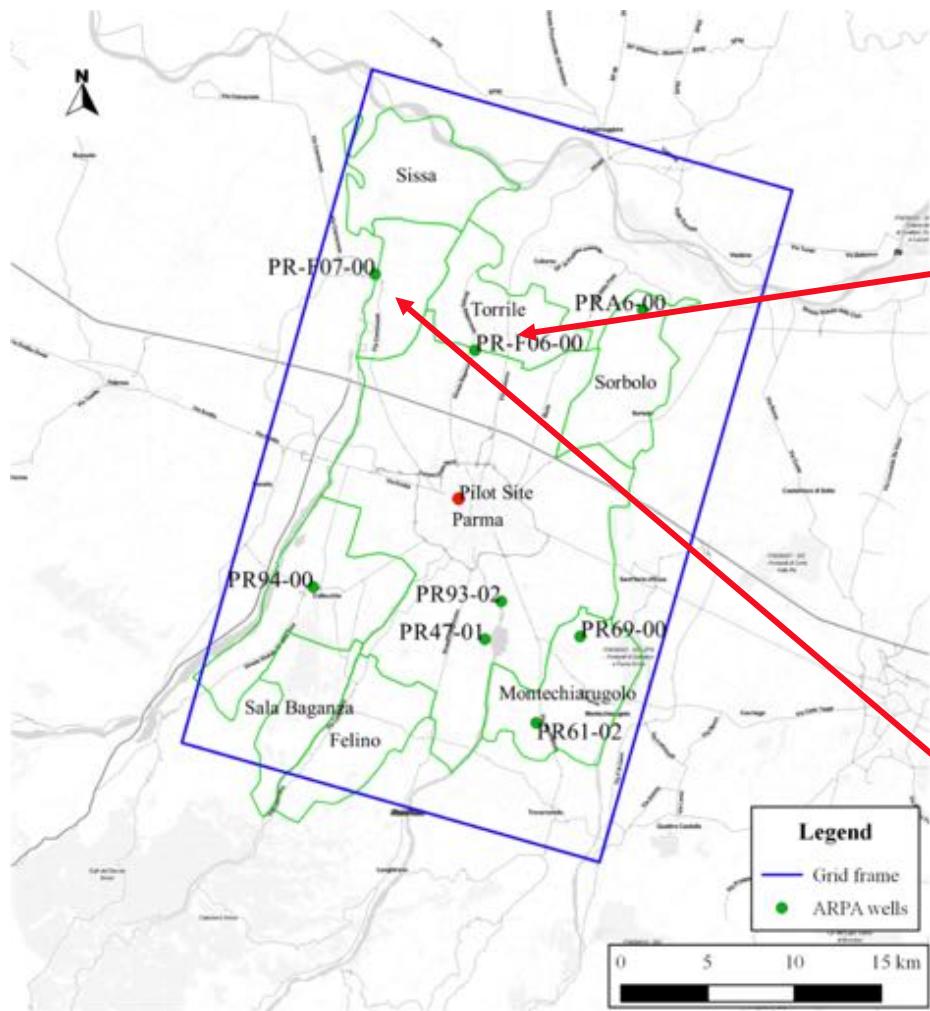
# RISULTATI CALIBRAZIONE



TAKING COOPERATION FORWARD



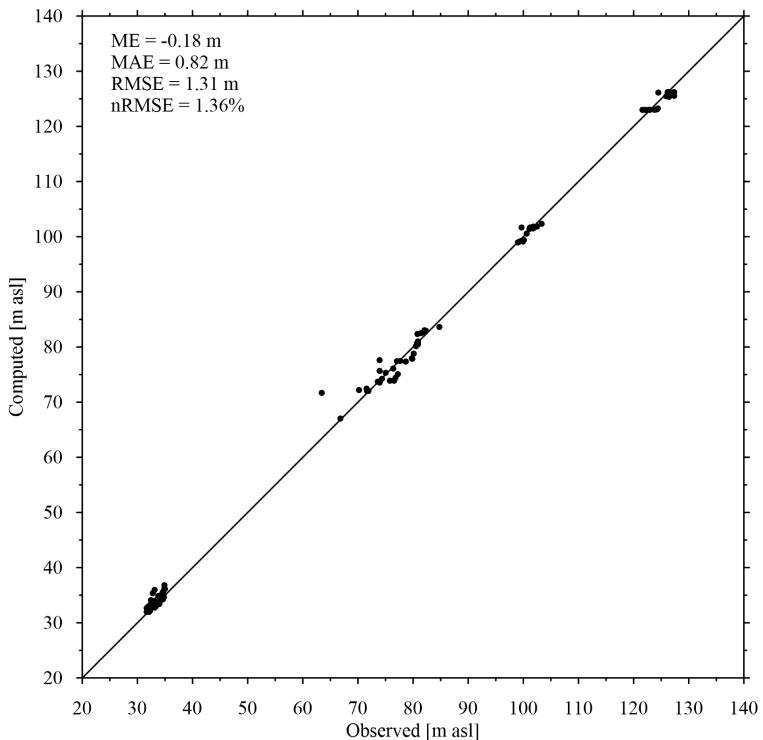
# RISULTATI CALIBRAZIONE



TAKING COOPERATION FORWARD



# RISULTATI CALIBRAZIONE



$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Hc_i - Ho_i = -0.18\text{m}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Hc_i - Ho_i| = 0.82\text{m}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Hc_i - Ho_i)^2} = 1.31\text{m}$$

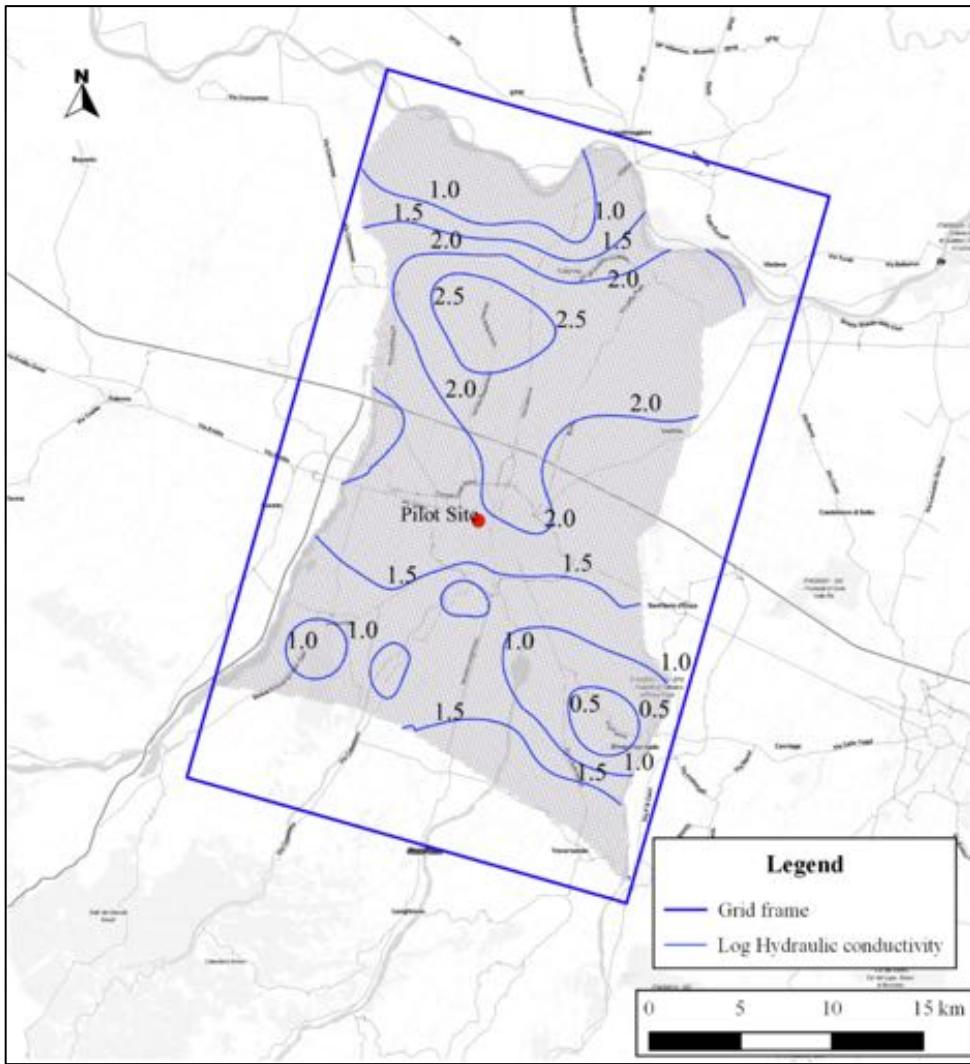
$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Hc_i - Ho_i)^2}}{HoMAX - HoMIN} = 1.36\%$$

111 osservazioni



TAKING COOPERATION FORWARD

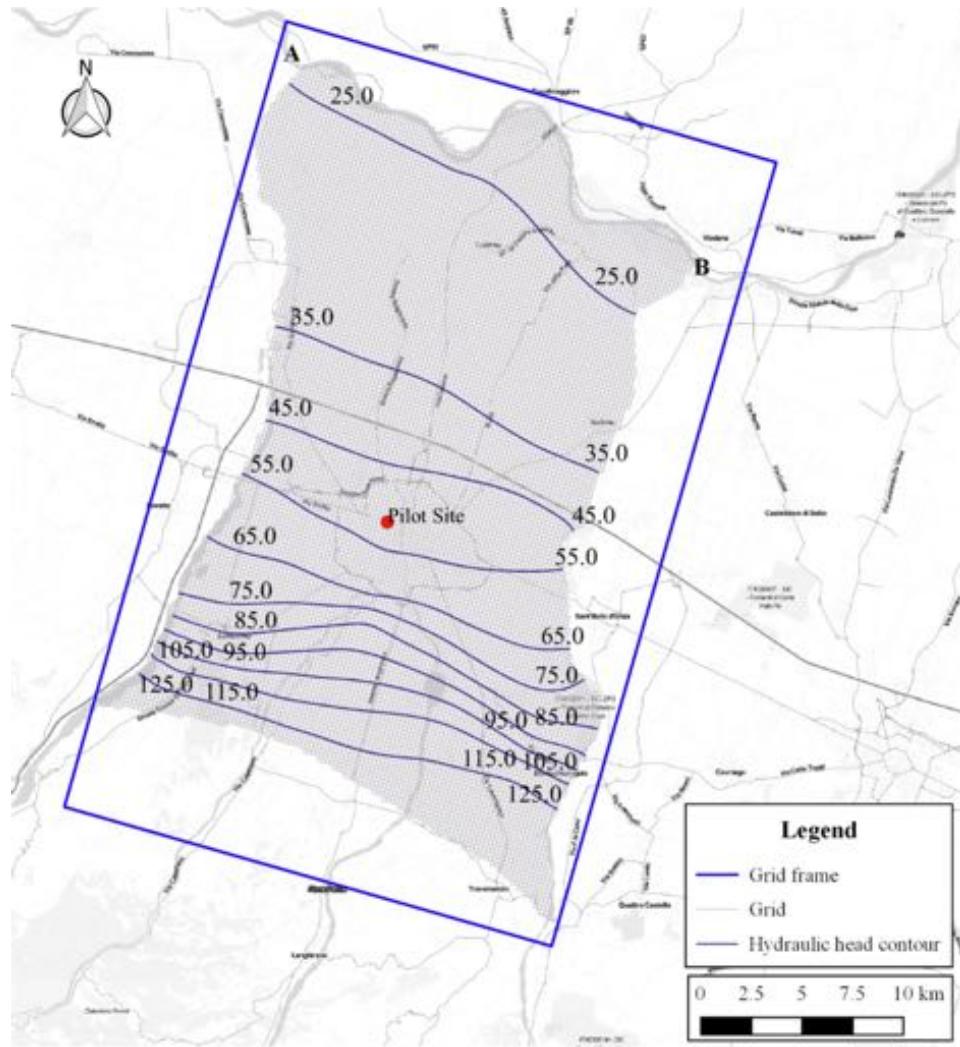
# RISULTATI CALIBRAZIONE



TAKING COOPERATION FORWARD



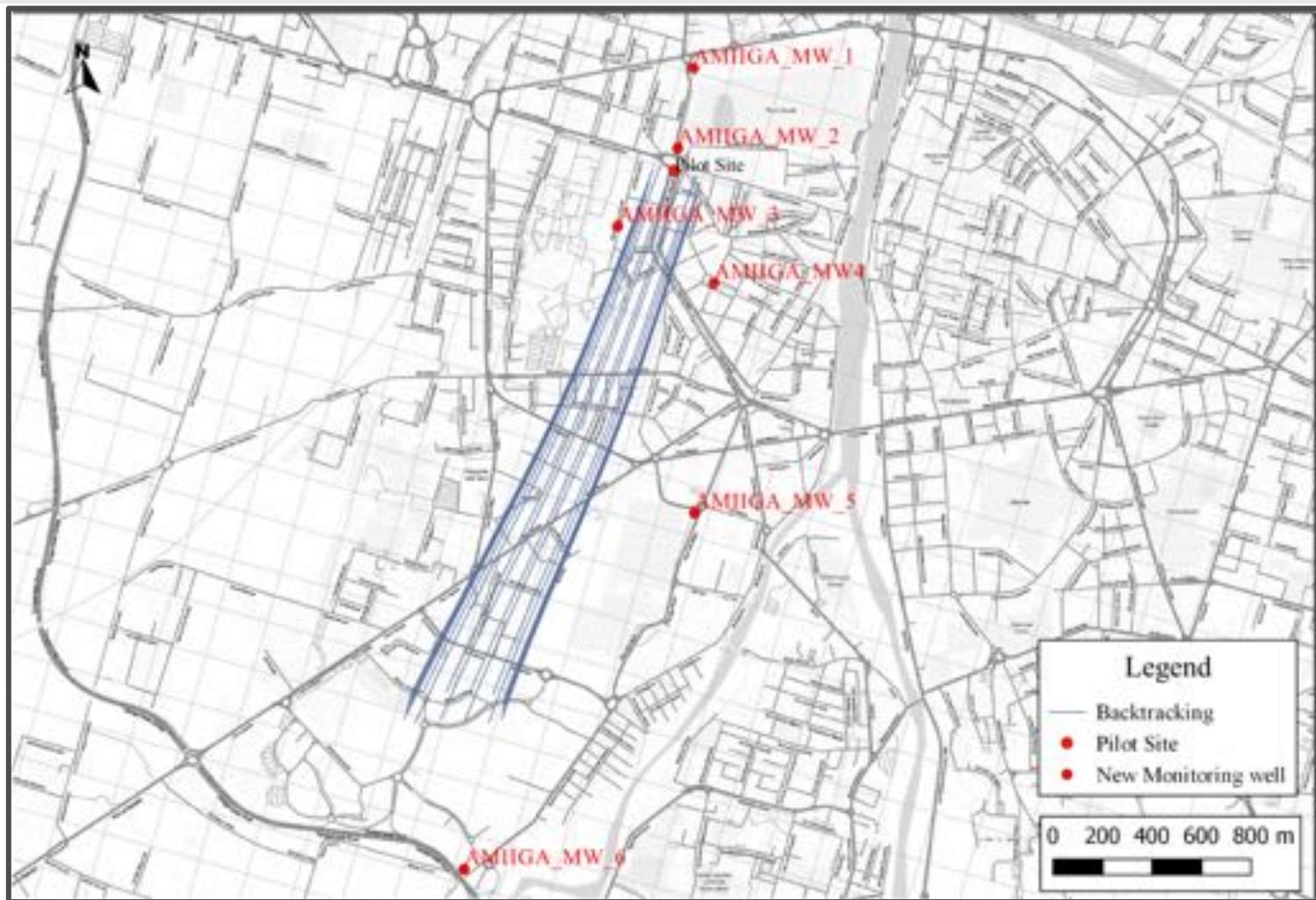
# RISULTATI CALIBRAZIONE



Primavera 2016

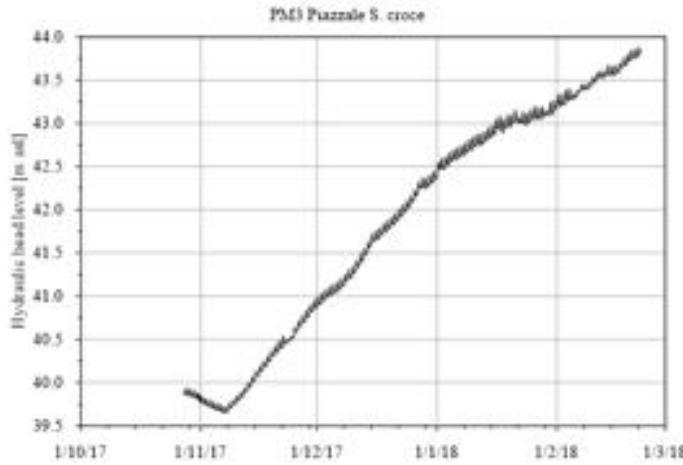


# TRACCIAMENTO ALL'INDIETRO



# ATTIVITÀ FUTURE

- Utilizzo dei nuovi sondaggi realizzati nel 2017 per migliorare il modello concettuale
- Sviluppo di un modello numerico di dettaglio sull'area pilota di Parma
- Taratura del modello numerico utilizzando i dati raccolti in campo nel 2017-2018
- Analisi delle potenziali aree sorgenti della contaminazione



**No one trusts a model except the man who wrote it;  
everyone trusts an observation, except the man who  
made it** Harlow Shapley



# GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Ing. Andrea Zanini



Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e  
Architettura, Università degli Studi di Parma



[andrea.zanini@unipr.it](mailto:andrea.zanini@unipr.it)



+0521 905931