

La modellistica matematica  
delle acque sotterranee  
a supporto della pianificazione e  
gestione della risorsa idrica.  
Esempi applicativi in Emilia-Romagna

**Ing. Andrea Chahoud**

Direzione Tecnica ARPAE Emilia-Romagna  
Centro Tematico Regionale Sistemi Idrici  
Unità Pianificazione Risorsa Idrica

Bologna, 25 novembre 2019



# Chi siamo



Con la Legge Regionale n.44/1995 viene istituita ARPA, Agenzia Prevenzione e Ambiente dell'Emilia-Romagna.



Con la Legge Regionale n.13/2015 **nasce ARPAE**, Agenzia Prevenzione, Ambiente ed Energia dell'Emilia-Romagna. ARPAE è operativa dal primo gennaio 2016.

ARPAE integra le funzioni di ARPA, dei Servizi Ambiente delle Province e del Demanio Idrico della Regione. ARPAE assume così anche il ruolo di ente autorizzativo ambientale.



ARPAE è parte del **SNPA** (Sistema nazionale per la protezione dell'ambiente).

Dal 14 gennaio 2017, con l'entrata in vigore della legge 28 giugno 2016 n. 132, "Istituzione del Sistema nazionale a rete per la protezione dell'ambiente e disciplina dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, parte l'attività del Sistema Nazionale delle Agenzie Ambientali ed Ispra".

**Attività di monitoraggio, vigilanza, controllo, poteri autorizzativi e sviluppo delle conoscenze in campo ambientale**

# Sommario

1. Elementi generali sulle acque sotterranee nel contesto dell'Emilia-Romagna
2. Elementi generali sulla modellistica delle acque sotterranee
3. Applicazioni modellistiche realizzate in Emilia-Romagna: elementi comuni nelle fasi di sviluppo ed utilizzo dei modelli
4. Esame di specifici casi applicativi a scale diverse e per obiettivi diversi: il modello regionale ed i modelli locali

# La modellistica matematica delle acque sotterranee a supporto della pianificazione e gestione della risorsa idrica. Esempi applicativi in Emilia-Romagna

## *PARTE 1*

*Elementi generali sulle acque sotterranee nel contesto  
dell'Emilia-Romagna e sulla modellistica matematica  
delle acque sotterranee*

**Ing. Andrea Chahoud**

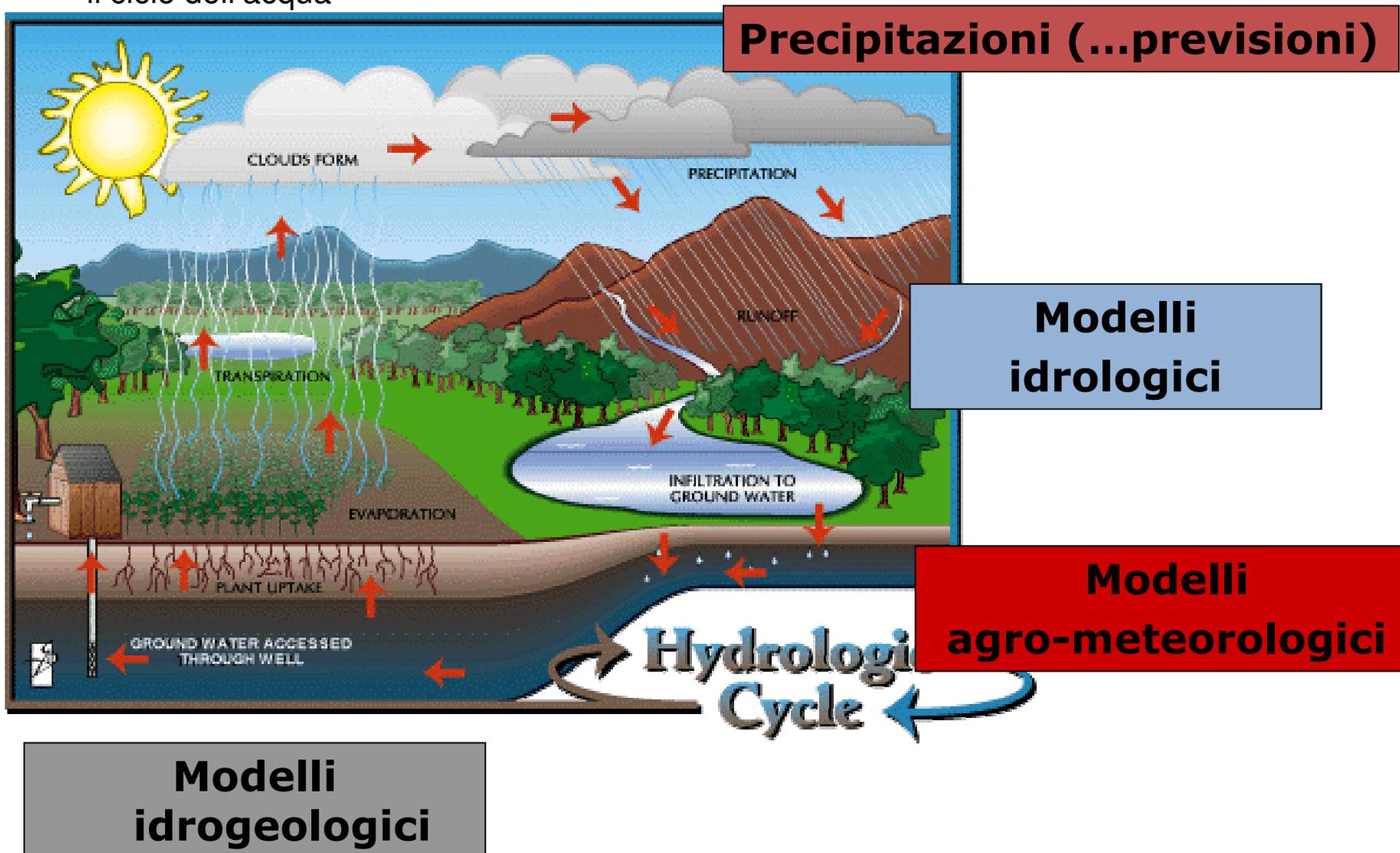
Direzione Tecnica ARPAE Emilia-Romagna  
Centro Tematico Regionale Sistemi Idrici  
Unità Pianificazione Risorsa Idrica

**Bologna, 25 novembre 2019**

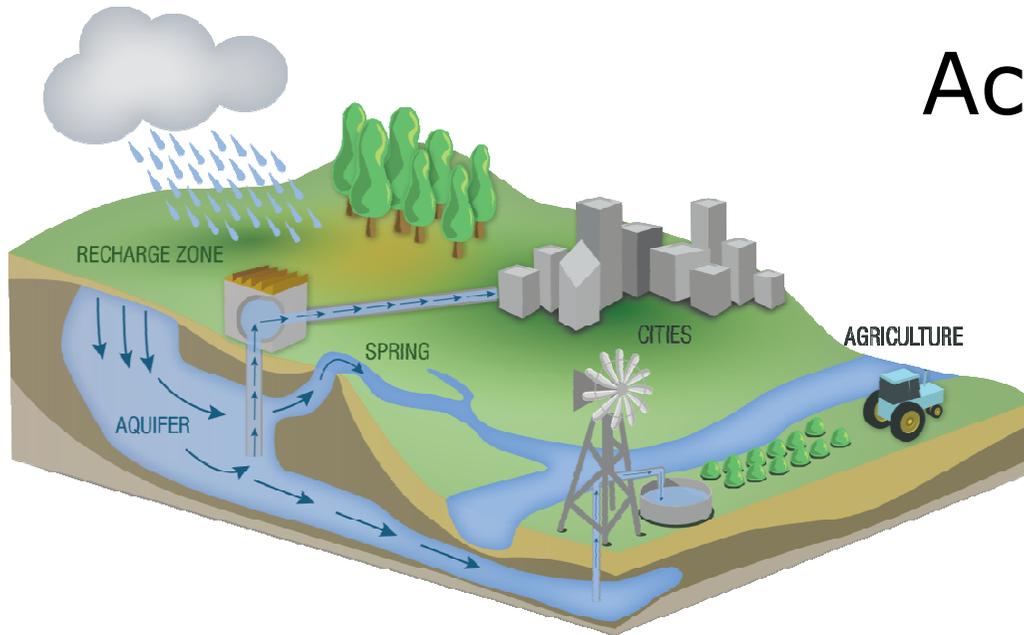
**arpae**  
agenzia  
prevenzione  
ambiente energia  
emilia-romagna

# Acque sotterranee e modellistica

il ciclo dell'acqua

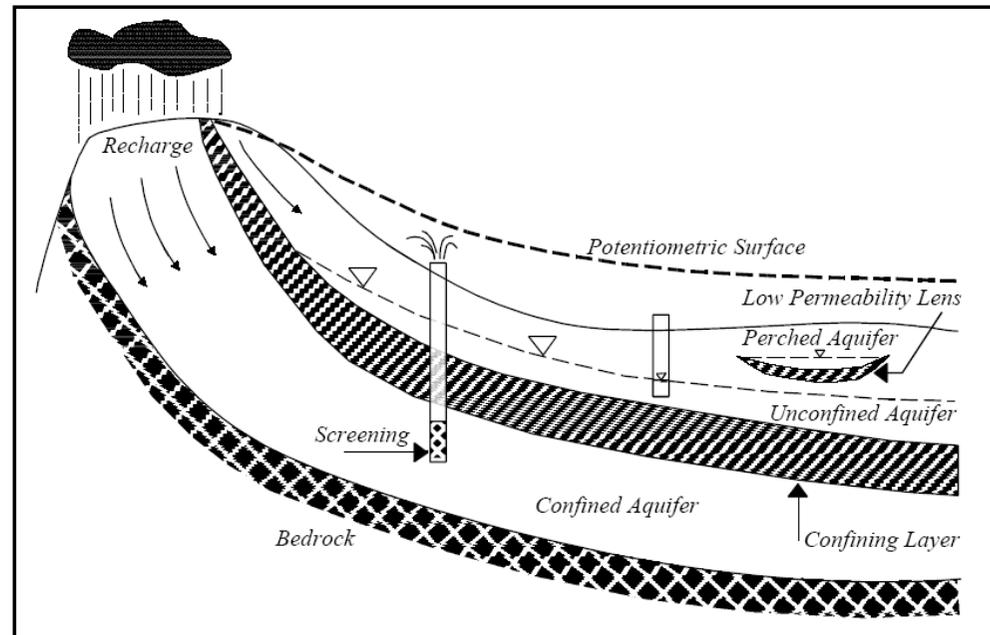


# Acque sotterranee

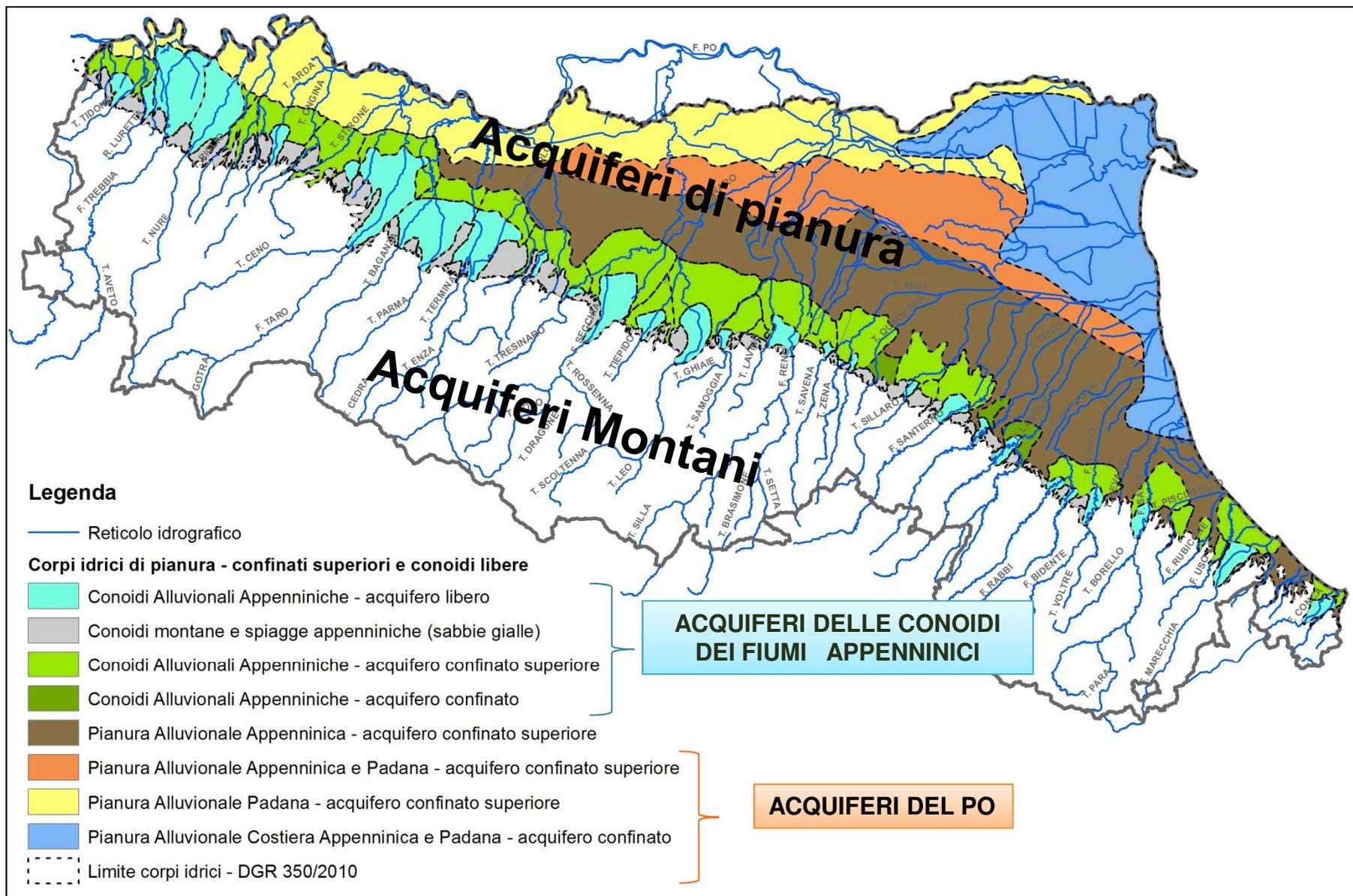


*b. Unconfined aquifers.* Unconfined aquifers contain a phreatic surface (water table) as an upper boundary that fluctuates in response to recharge and discharge (such as from a pumping well). Unconfined aquifers are generally close to the land surface, with continuous layers of materials of high intrinsic permeability (Section 2-11) extending from the land surface to the base of the aquifer.

*c. Confined aquifers.* Confined, or artesian, aquifers are created when groundwater is trapped between two layers of low permeability known as aquitards. In a confined aquifer, the groundwater is under pressure and the water level in a well rises above the upper boundary of the aquifer. Flowing artesian conditions exist when the water level in a well rises above land surface. Recharge to confined aquifers is predominantly from areas where the confining bed is breached, either by erosional unconformity, fracturing, or depositional absence.

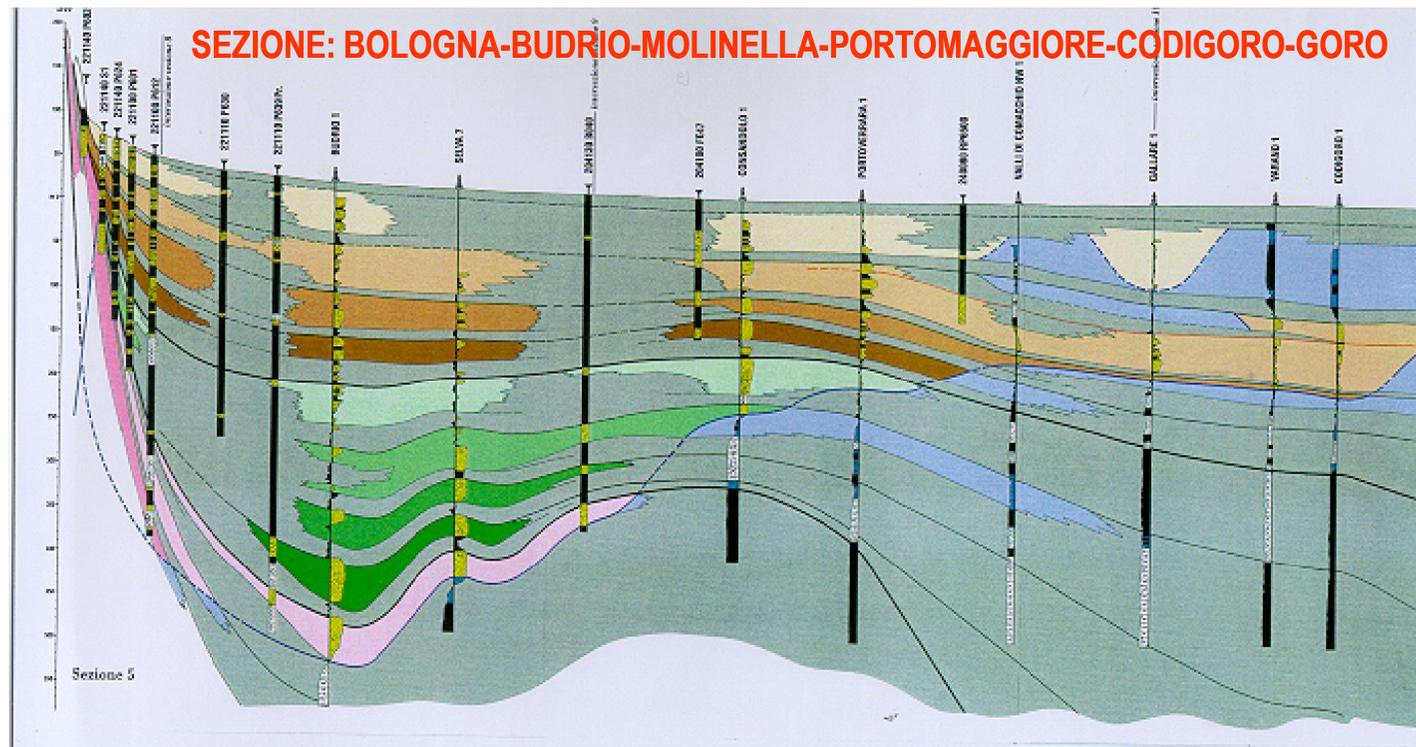


# Acque sotterranee: il contesto dell'Emilia-Romagna



# Schema idrostratigrafico di riferimento

1. Le Unità Idrostratigrafiche fondamentali sono 3 denominate Gruppi Acquiferi (Gruppo Acquifero A, B, C)
2. All'interno di ogni Gruppo Acquifero sono riconoscibili diverse unità idrostratigrafiche secondarie denominate Complessi acquiferi
3. La gerarchizzazione in base a: volume degli acquiferi utili, spessore, continuità ed estensione del livello acquitardo o impermeabile di separazione



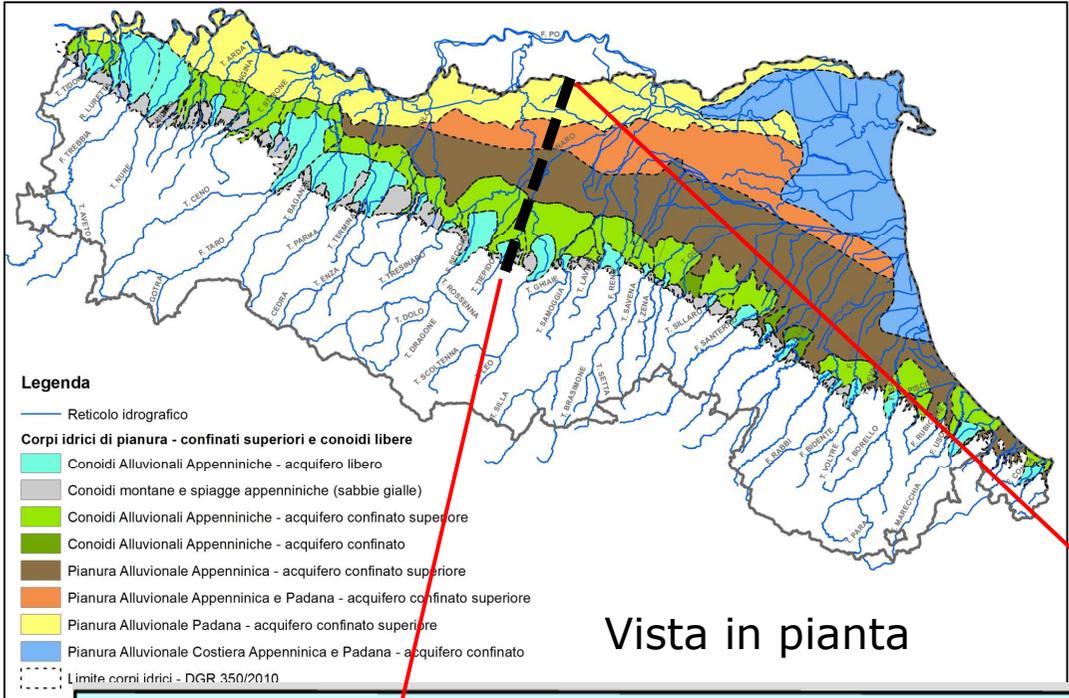
UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE	
GRUPPO ACQUIFERO	COMPLESSO ACQUIFERO
A	A <sub>0</sub>
	A <sub>1</sub>
	A <sub>2</sub>
	A <sub>3</sub>
	A <sub>4</sub>
B	B <sub>1</sub>
	B <sub>2</sub>
	B <sub>3</sub>
	B <sub>4</sub>
C	C <sub>1</sub>
	C <sub>2</sub>
	C <sub>3</sub>
	C <sub>4</sub>
	C <sub>5</sub>
ACQUITARDO BASALE	

Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP (1998)

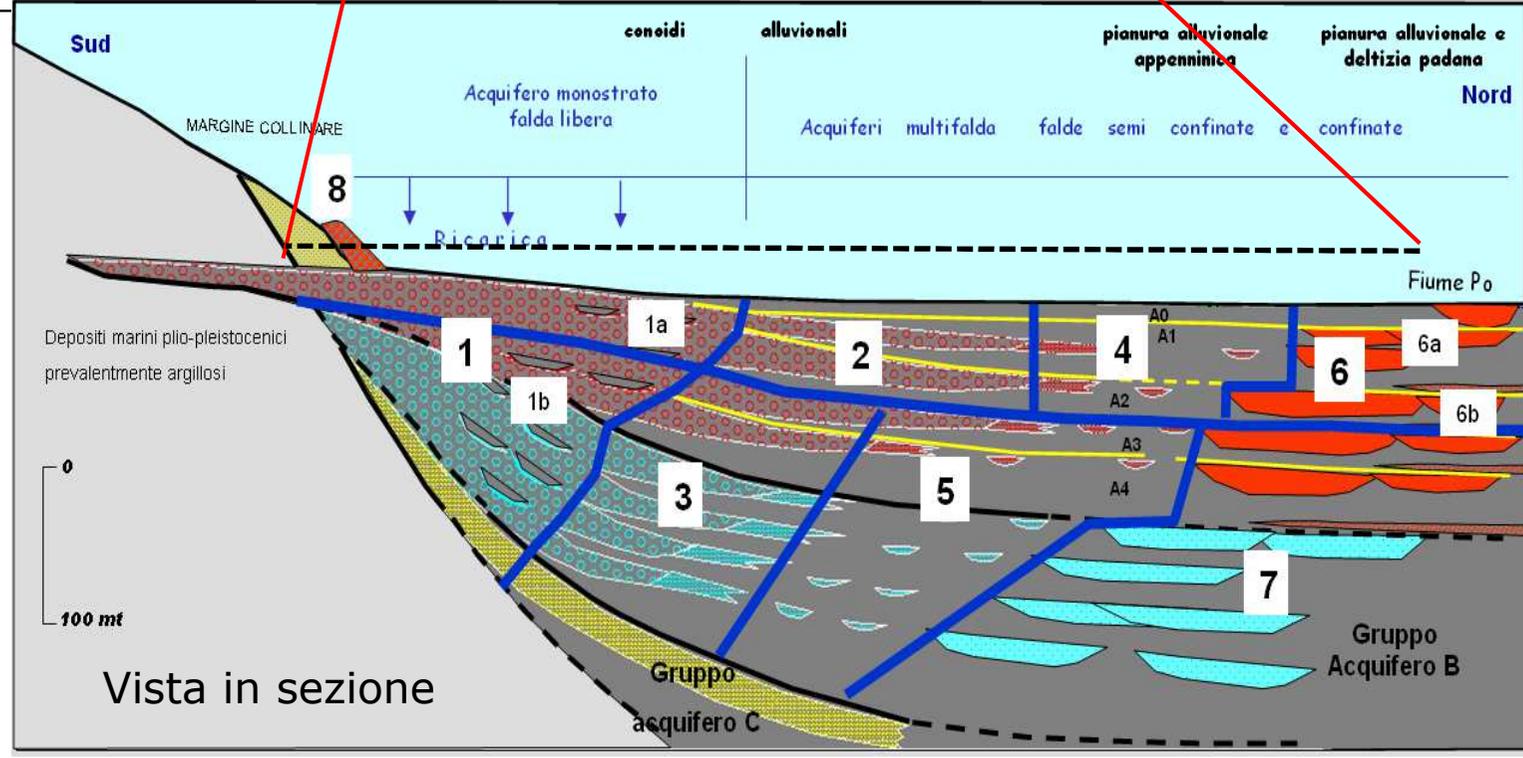
“Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna”

# Definizione dei Corpi idrici

- 1: Conoidi alluvionali "amalgamate" – acquifero libero;
- 2: Conoidi alluvionali "multistrato"- acquiferi confinati superiori (acquiferi A1 ed A2);
- 3: Conoidi alluvionali "multistrato"- acquiferi confinati inferiori (acquiferi A3 - C)
- 4: Pianura alluvionale appenninica - acquiferi confinati superiori (acquiferi A1 ed A2)
- 5: Pianura alluvionale appenninica - acquiferi confinati inferiori (acquiferi A3 - C)
- 6: Pianura alluvionale e deltizia padana - acquiferi confinati superiori (acquiferi A1 ed A2, rispet. 6a e 6b)
- 7: Pianura alluvionale e deltizia padana - acquiferi confinati inferiori(acquiferi A3 - C)
- 8: Conoidi alluvionali pedemontane



Vista in pianta

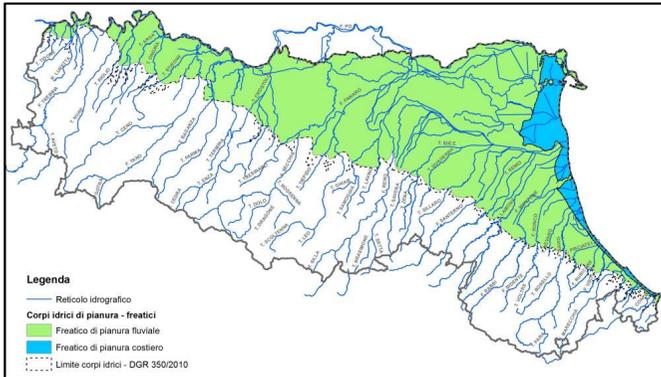


Vista in sezione

Attenzione: le dimensioni sono x3!

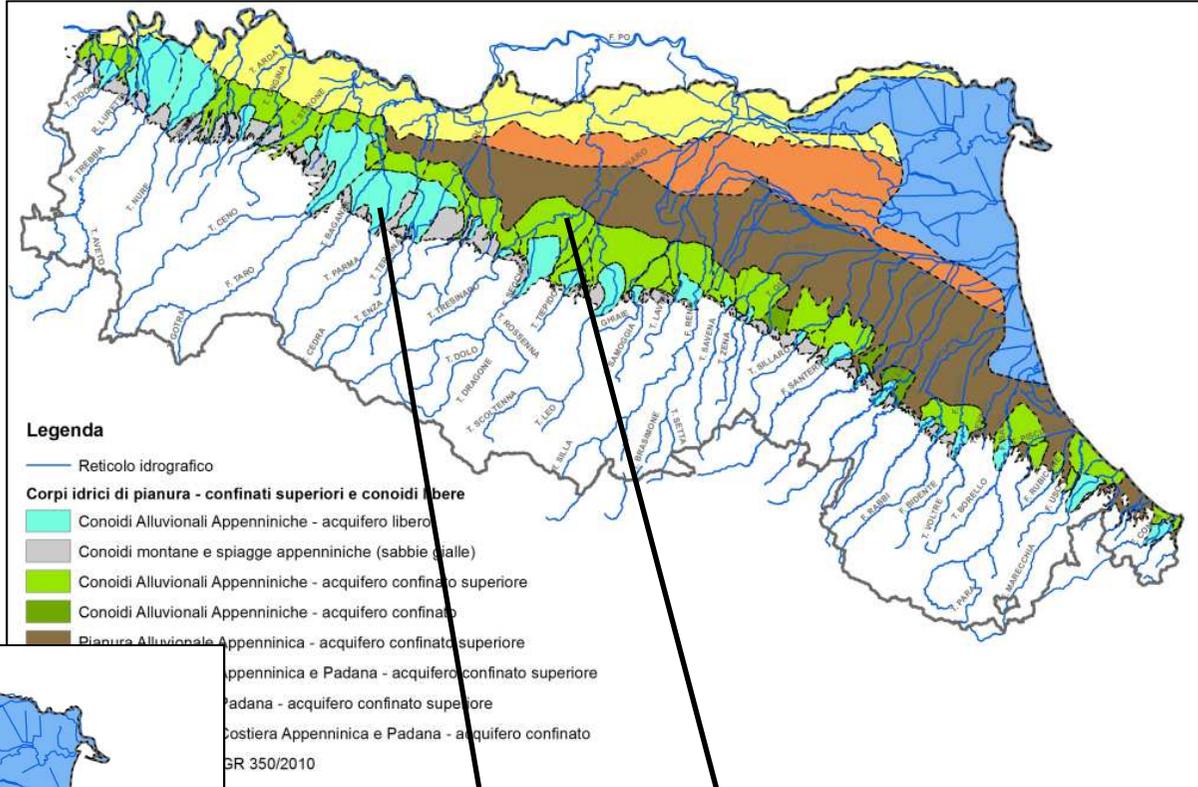
# Acque sotterranee: i corpi idrici sotterranei

## Superficiali: freatico di pianura

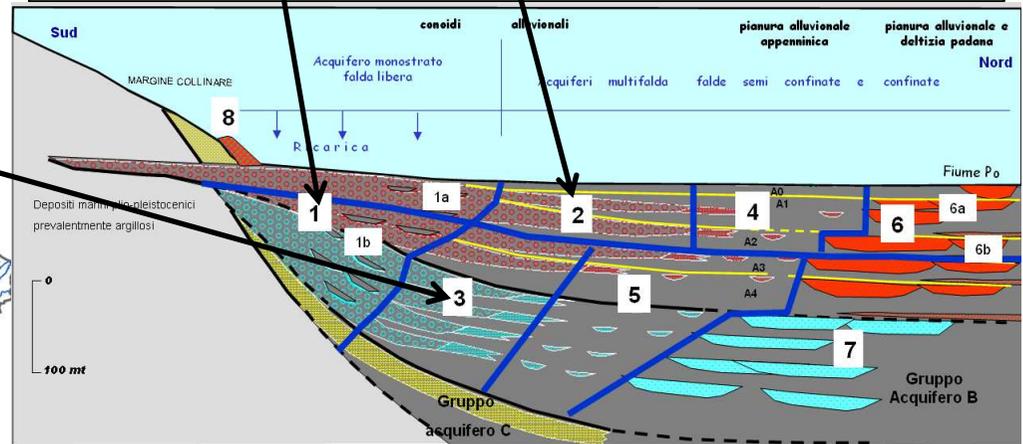
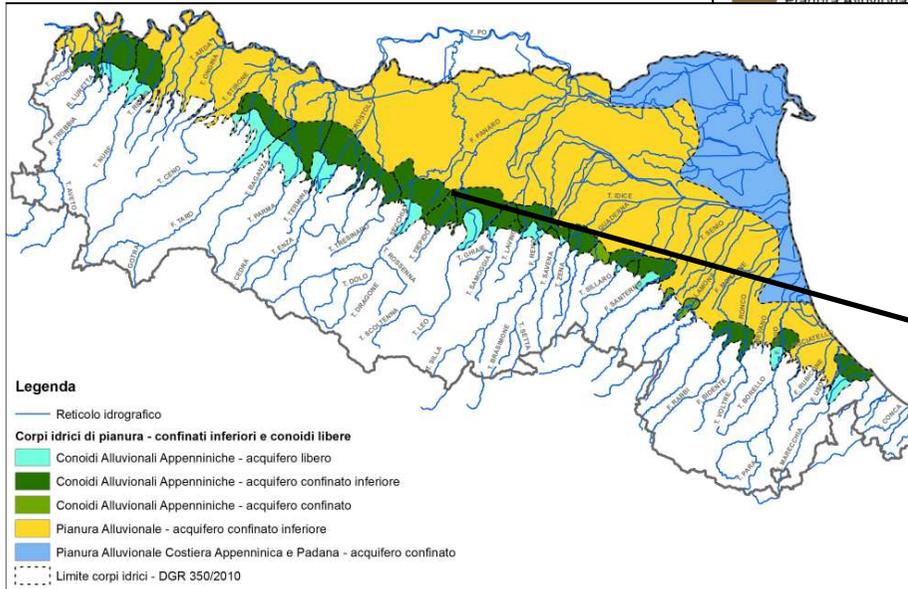


2000/60/CE e 2006/118/CE  
 D.Lgs 152/2006  
 D.Lgs 30/2009

## Profondi: liberi e superiori



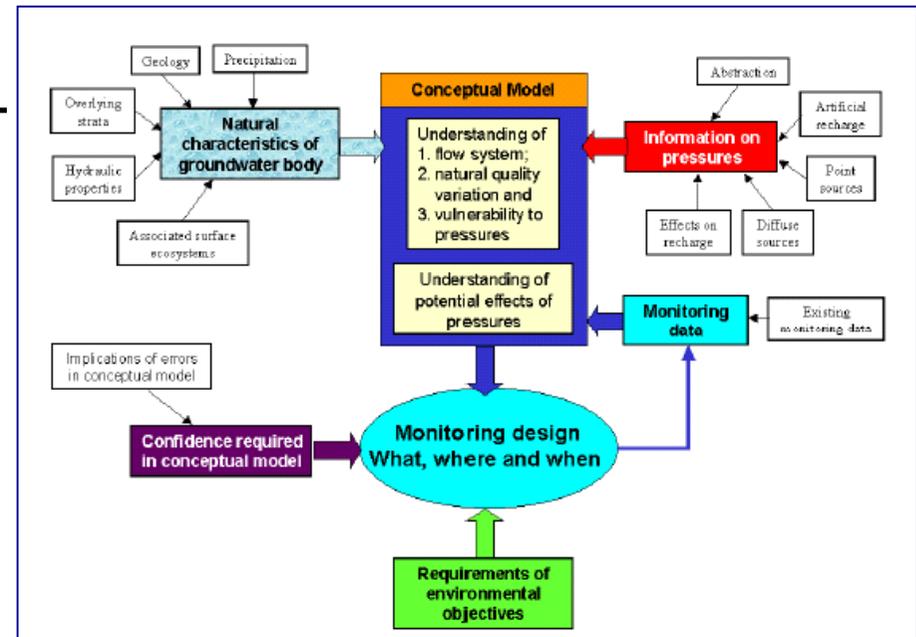
## Profondi: liberi e inferiori



# MODELLO CONCETTUALE

- Schematizzazione idrogeologica semplificata del sottosuolo e una prima parametrizzazione degli acquiferi =

proprietà geologiche +  
caratteristiche idrogeologiche +  
meccanismi di ricarica +  
rapporti tra le falde +  
rapporti falda/fiume +  
caratteristiche qualitative +  
pressioni (quali-quantitative)



- Il modello concettuale NON è il modello matematico ...

... ..

ma ne è alla base e lo potrà diventare

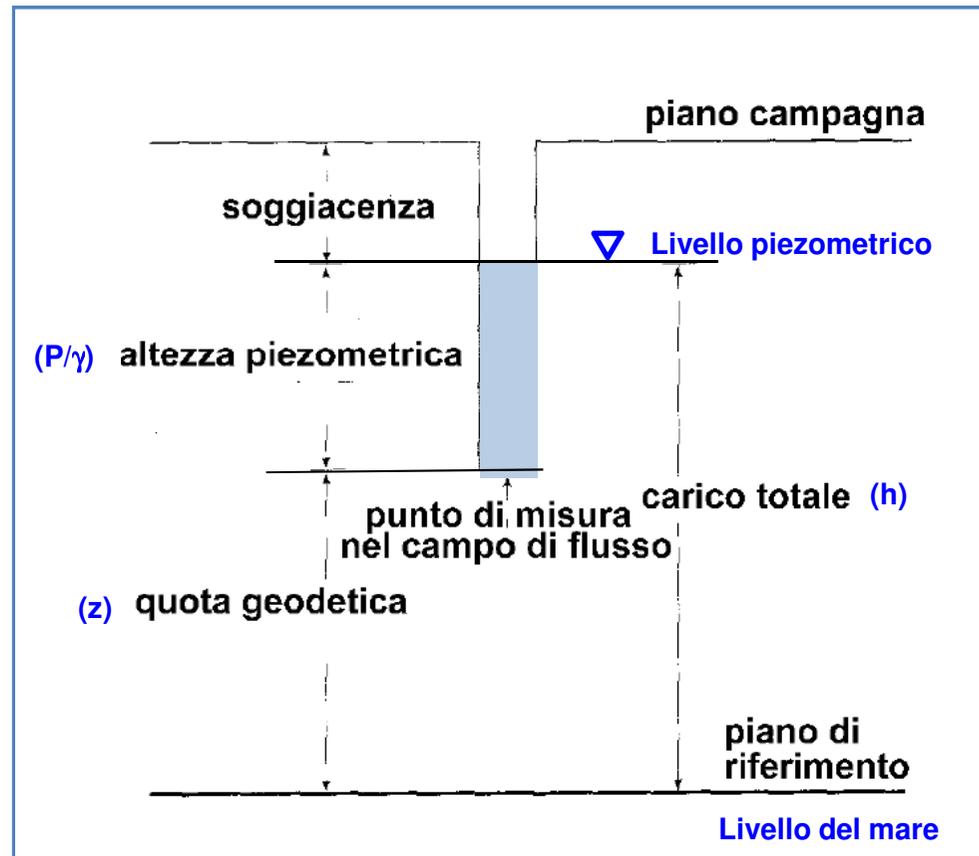
*Da Common Implementation Strategy for the WFD, Guidance on Monitoring under the WFD*

# Misure quantitative acque sotterranee

Pozzi

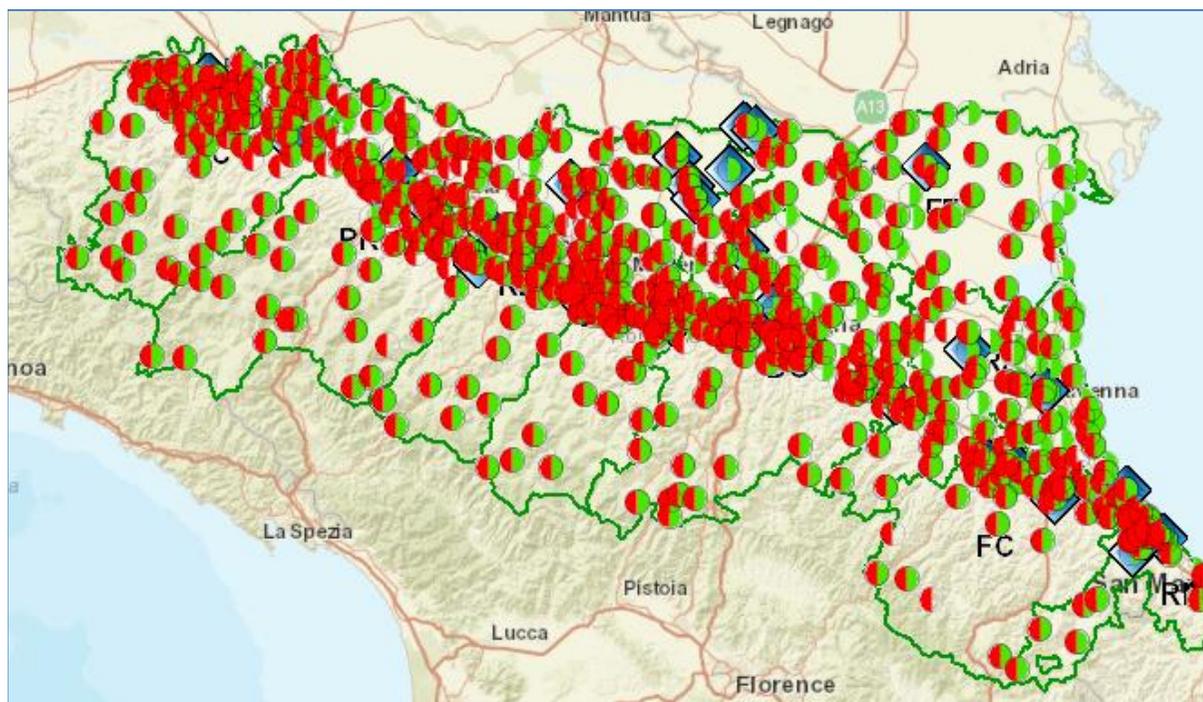


Piezometri con centralina



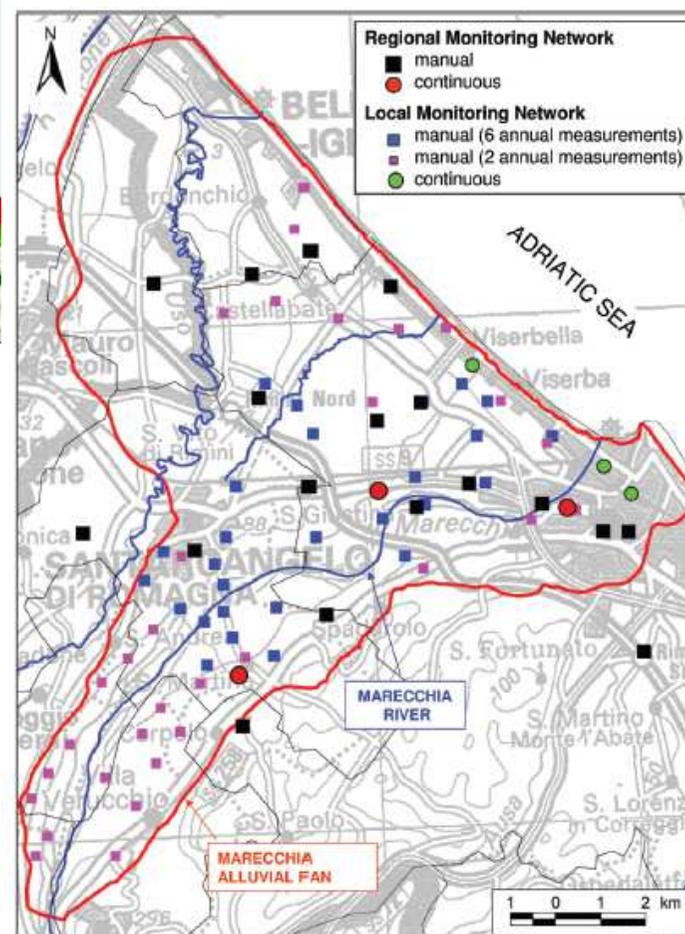
Misure manuali/misure in continuo... le reti di monitoraggio

# Le reti di monitoraggio

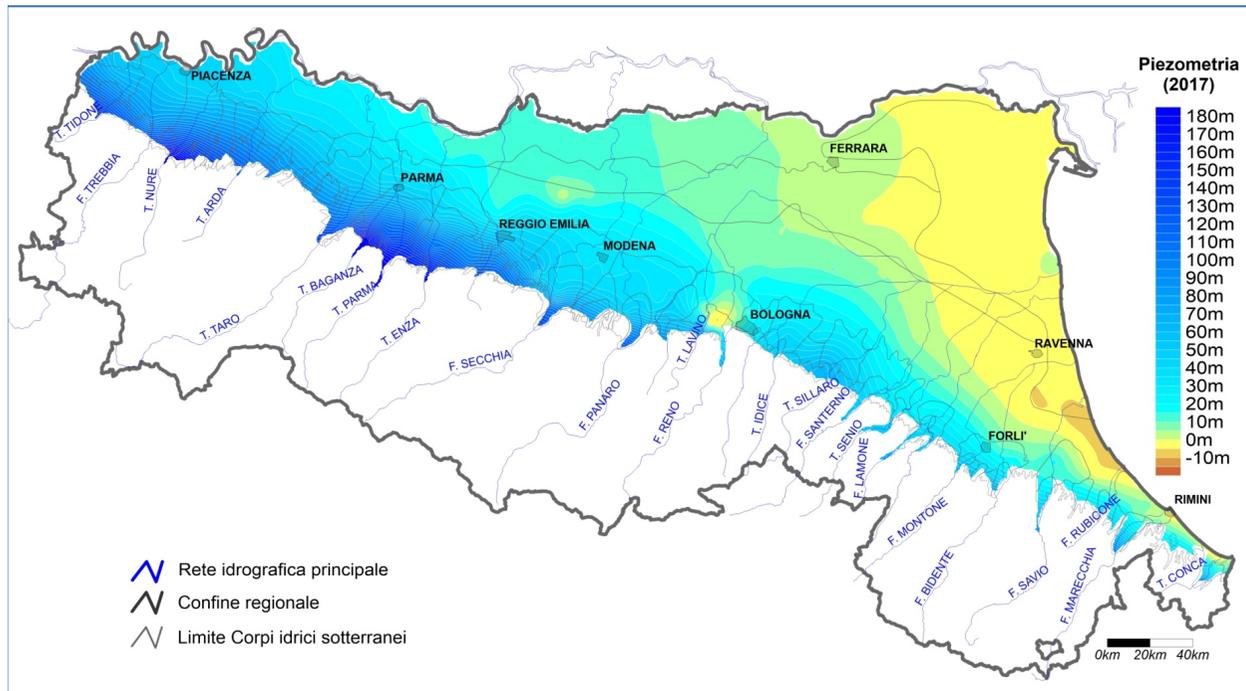


Rete Regionale di monitoraggio delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna

Rete Locale della conoide alluvionale del Fiume Marecchia

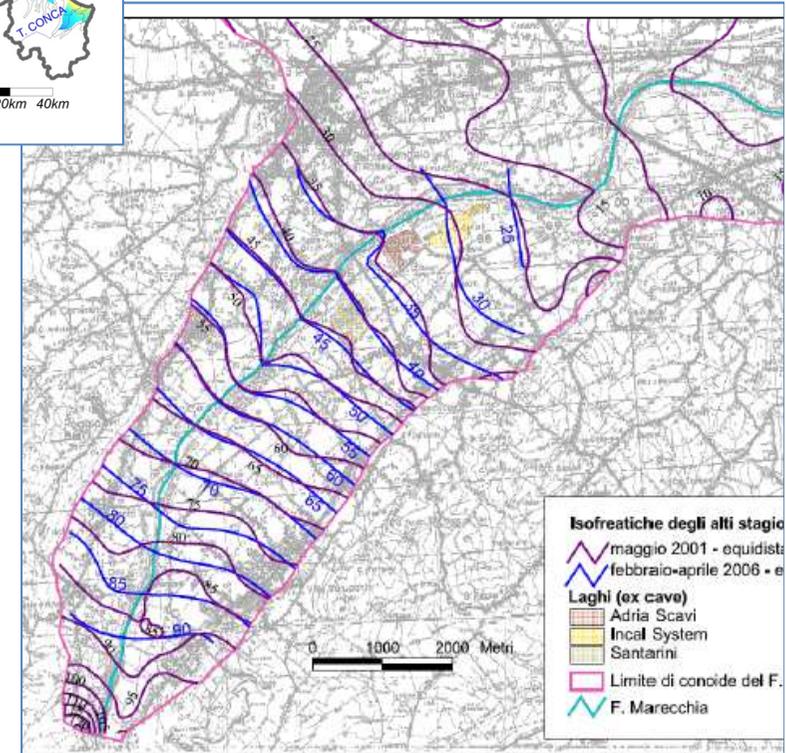


# La carta piezometrica: il deflusso sotterraneo



## Rete Locale della conoide alluvionale del Fiume Marecchia

Rete Regionale di monitoraggio delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna



# Il modello di flusso = Equazione del flusso idrico sotterraneo

Il modello numerico risolve l'equazione del flusso dell'acqua sotterranea

Bilancio di massa nei mezzi porosi  
(Equazione di continuità)

Legge di Darcy

$$v=Q/A = Ki$$

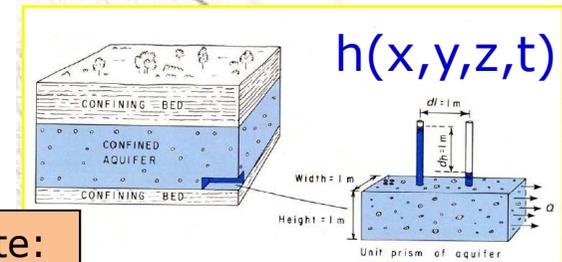
**EQUAZIONI GOVERNANTI**  
equazioni differenziali alle derivate parziali

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ipotesi: mezzo saturo e regime di moto transitorio

**PARAMETRI dell'equazione**

**Variabile dipendente: il carico idraulico**



$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ , and  $K_{zz}$  are values of hydraulic conductivity along the x, y, and z coordinate axes, which are assumed to be parallel to the major axes of hydraulic conductivity (L/T);

h is the potentiometric head (L);

W is a volumetric flux per unit volume representing sources and/or sinks of water, with  $W < 0.0$  for flow out of the ground-water system, and  $W > 0.0$  for flow in ( $T^{-1}$ );

$S_s$  is the specific storage of the porous material ( $L^{-1}$ ); and

t is time (T).

# Grandezze, unità di misura, valori

## La conducibilità idraulica

*b. Hydraulic conductivity.* The hydraulic conductivity of a given medium is a function of the properties of the medium and the properties of the fluid. Using empirically derived proportionality relationships and dimensional analysis, the hydraulic conductivity of a given medium transmitting a given fluid is given as:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$K = \frac{k \rho g}{\mu}$$

(m/s)

$k$  = intrinsic permeability of porous medium [L<sup>2</sup>]

$\rho$  = fluid density [ML<sup>-3</sup>]

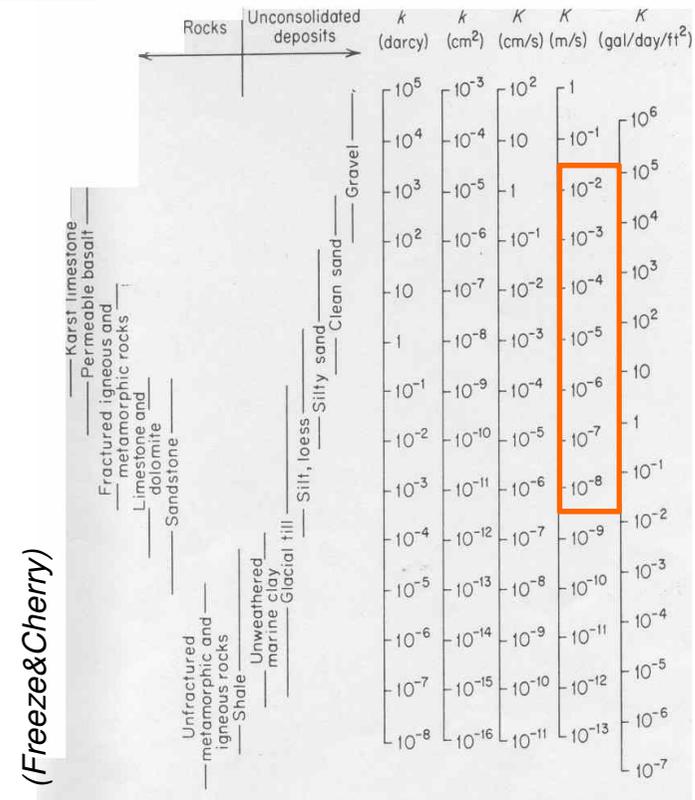
$\mu$  = dynamic viscosity of fluid [ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>]

$g$  = acceleration of gravity [LT<sup>-2</sup>]

**Table 2-2**  
Ranges of Intrinsic Permeability and Hydraulic Conductivity for Unconsolidated Sediments

Material	Intrinsic Permeability (cm <sup>2</sup> )	Hydraulic Conductivity (cm/s)
Clay	10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-9</sup> - 10 <sup>-6</sup>
Silt, sandy silts, clayey sands, till	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-4</sup>
Silty sands, fine sands	10 <sup>-2</sup> - 1	10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-3</sup>
Well-sorted sands, glacial outwash	1 - 10 <sup>2</sup>	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-1</sup>
Well-sorted gravels	10 - 10 <sup>3</sup>	10 <sup>-2</sup> - 1

**Table 2.2** Range of Values of Hydraulic Conductivity and Permeability



# Grandezze, unità di misura, valori

Il coefficiente di immagazzinamento specifico

b. *Specific storage.* The *specific storage*  $S_s$  is the amount of water per unit volume of a saturated formation that is stored or expelled from storage owing to compression and expansion of the mineral skeleton and the pore water per unit change in hydraulic head.

$\rho_w$  = density of water [ML<sup>-3</sup>T<sup>-2</sup>]

$g$  = acceleration of gravity [LT<sup>-2</sup>]

$\alpha$  = compressibility of the aquifer skeleton [1/(ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>)]

$n$  = porosity

$\beta$  = compressibility of water [1/(ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>)]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n \beta) \quad (1/m)$$

Acquifero confinato

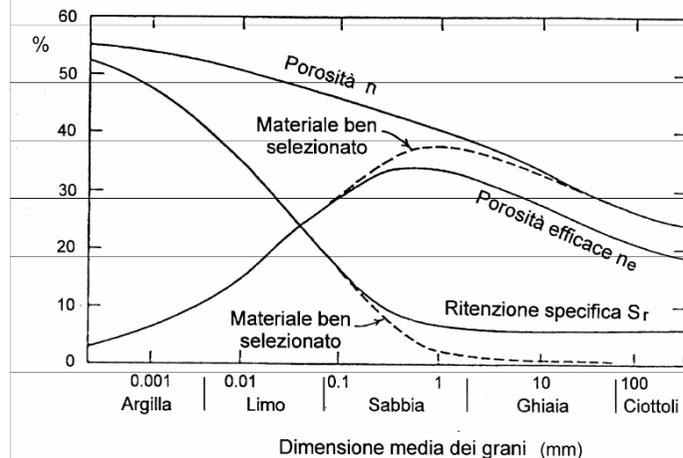
Il coefficiente di immagazzinamento specifico

Specific Storage

(Freeze & Cherry)

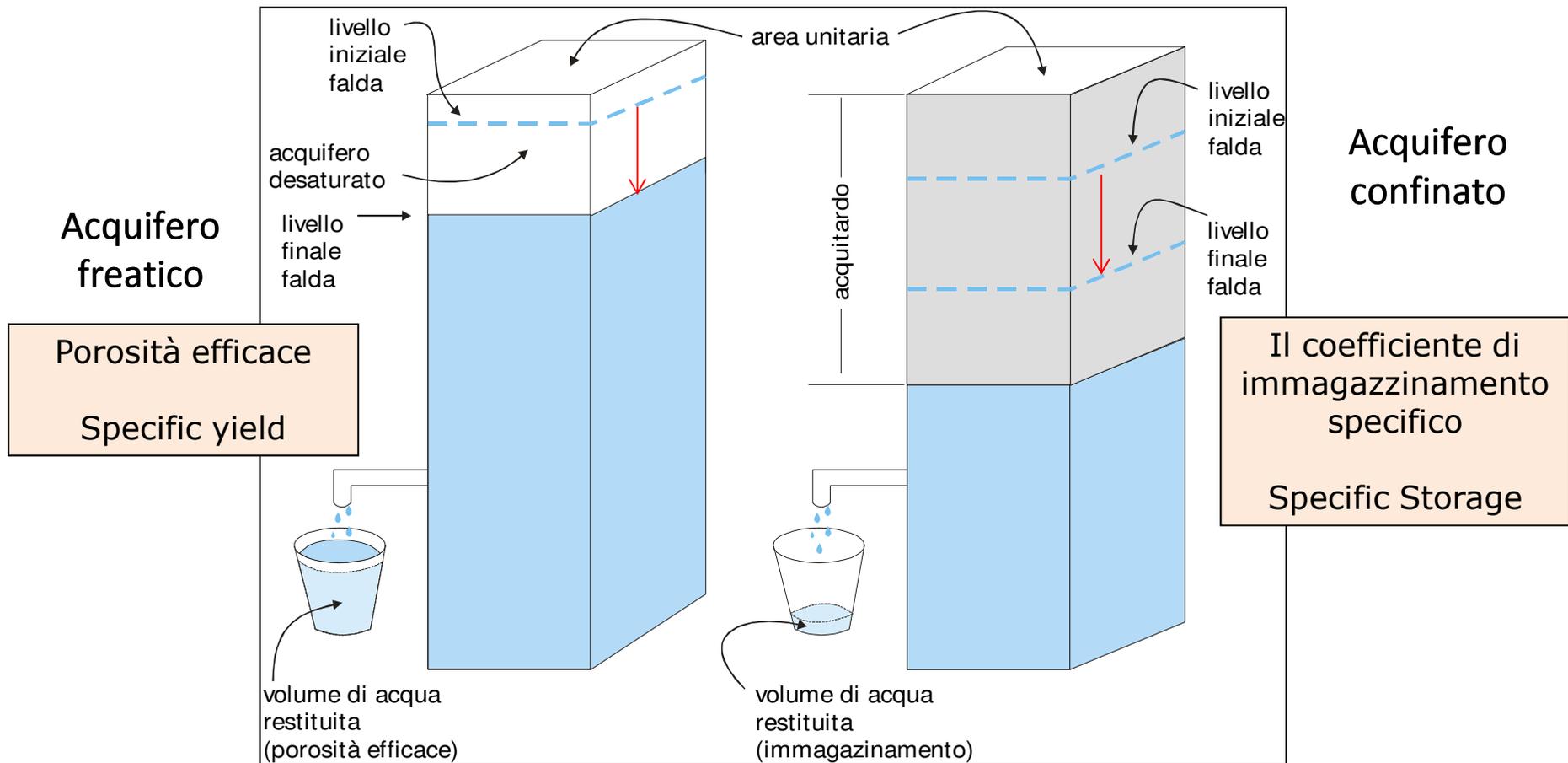
	Compressibility, $\alpha$ (m <sup>2</sup> /N or Pa <sup>-1</sup> )
Clay	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-8</sup>
Sand	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-9</sup>
Gravel	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-10</sup>
Jointed rock	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-10</sup>
Sound rock	10 <sup>-9</sup> -10 <sup>-11</sup>
Water ( $\beta$ )	4.4 × 10 <sup>-10</sup>

Porosità efficace  
Specific yield



Acquifero freatico

# Immagazzinamento e porosità efficace



Rappresentazione schematica dei concetti di immagazzinamento e porosità efficace. A sinistra nell'acquifero freatico, una caduta unitaria del carico idraulico produce un volume di acqua uguale alla porosità efficace. A destra, la stessa caduta unitaria del carico idraulico, produce un volume di acqua inferiore e l'acquifero resta comunque saturo. Nei freatici la porosità efficace è intorno a 0,1, mentre negli artesiani è molto inferiore (0,0001-0,00001 circa; una prima valutazione può essere ottenuta con  $S = 3 \cdot 10^{-6} b$ )

# I modelli di flusso: tipologie

**TIPO DI GEOMETRIA:**  
 MONODIMENSIONALE  
 BIDIMENSIONALE  
 TRIDIMENSIONALE

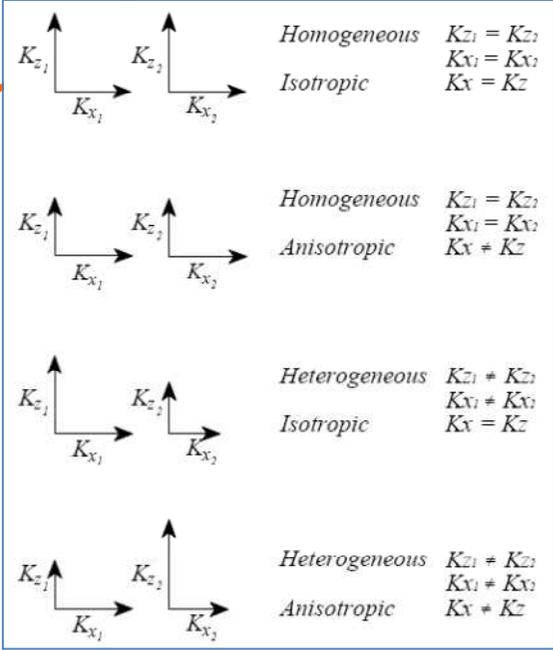
**TIPO DI PROBLEMA:**  
FLUSSO SATURO/INSATURO  
TRASPORTO (NITRATI)  
COMPATTAZIONE (SUBSIDENZA)  
MEZZO POROSO/FRATTURATO

**EQUAZIONI GOVERNANTI**  
 equazioni differenziali alle derivate parziali

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

**TIPO DI MOTO:**  
 TRANSITORIO/STAZIONARIO

**TIPO DI MEZZO:**  
 ISOTROPO/ANISOTROPO  
 ETEROGENEO/OMOGENEO



$$K = \frac{k \rho g}{\mu}$$

# I modelli di flusso: metodi di risoluzione

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

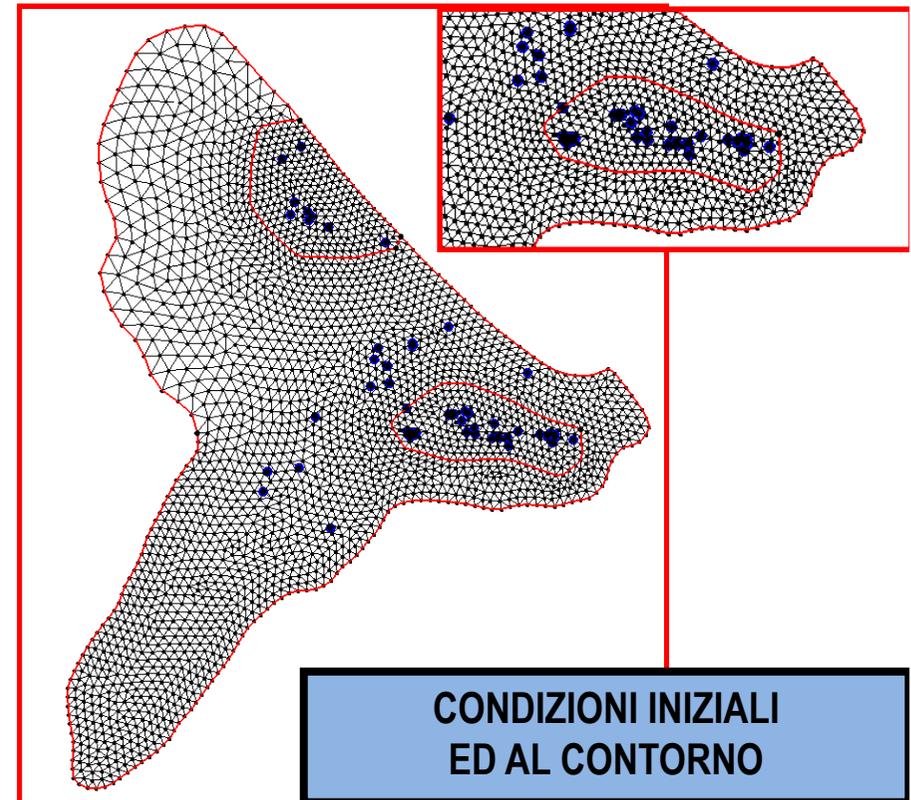
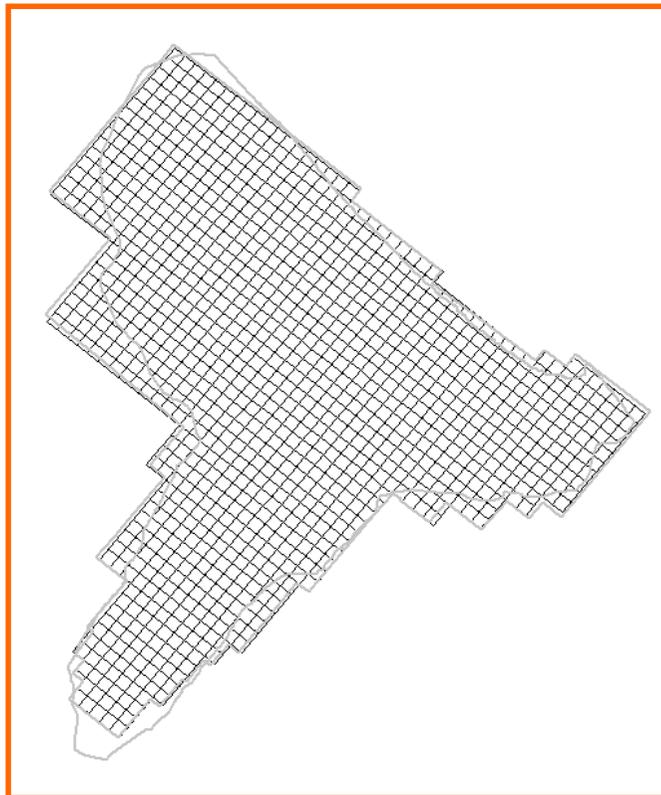
Applicazione del modello ad un dominio di calcolo:

## DISCRETIZZAZIONE SPAZIALE

Unità di volume di sistema sul quale vengono risolte le equazioni:

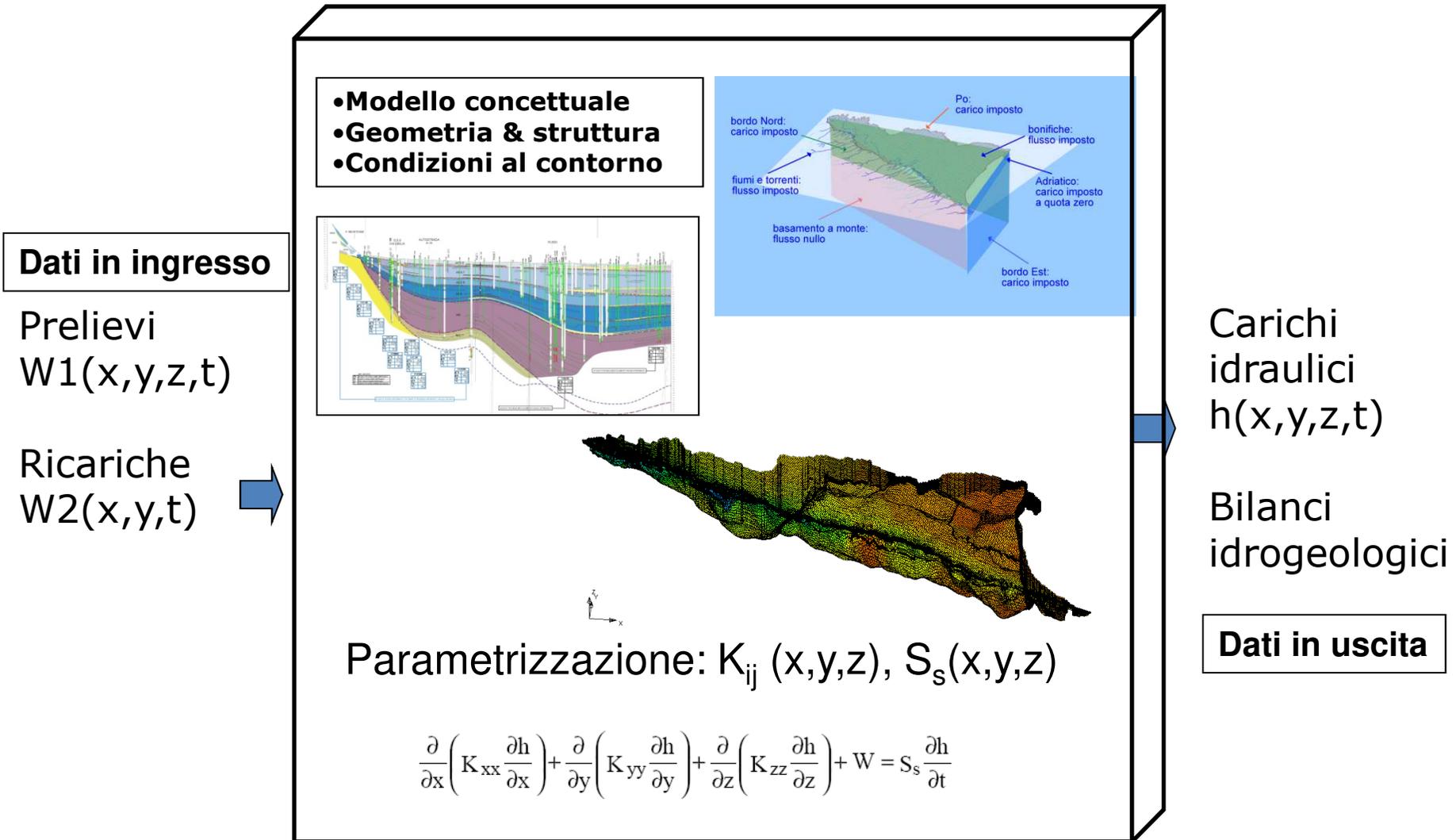
Differenze Finite (FDM)

Elementi Finiti (FEM)



# Schema operativo/funzionale del modello

Il modello matematico di simulazione delle acque sotterranee consente di ricostruire la complessa dinamica del moto delle acque sotterranee.



# L'ambiente di sviluppo dei modelli

Per lo sviluppo di un modello matematico di simulazione delle acque sotterranee della complessità quale quella richiesta occorre poter gestire una notevole quantità di dati/informazioni.

In particolare occorre:

1. una efficiente integrazione con gli usuali strumenti GIS e con le banche dati depositarie degli strati informativi che devono essere utilizzati;
2. la disponibilità di generatori automatici della discretizzazione spaziale;
3. il ricorso alla geostatistica 2-D e 3-D sia per la valutazione preliminare dei dati sia per il passaggio dal dato discreto (rete di monitoraggio, dato sperimentale) al dato "regolarizzato" sulla discretizzazione spaziale;
4. una interfaccia grafica amichevole per il set-up completo del modello;
5. poter agevolmente lanciare un gran numero di simulazioni e rapidamente effettuare il post-processamento dei risultati come richiesto dal processo di calibrazione;
6. disporre di avanzati strumenti di visualizzazione grafica ed animazione per la rappresentazione finale dei risultati.

# L'ambiente di sviluppo dei modelli

Esistono molti pacchetti che includono sia le interfacce grafiche sia i codici numerici (ad es. MODFLOW-2k) e dove tutte le funzionalità richiamate si integrano in un unico ambiente di sviluppo.

Esempi pacchetti commerciali:

- ❑ GROUNDWATER MODELING SYSTEM (Aquaveo, <http://www.aquaveo.com>)
- ❑ VISUAL MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic, <http://www.swstechnology.com>)
- ❑ GROUNDWATER VISTAS (<http://www.groundwater-vistas.com>)
- ❑ FEFLOW (DHI-WASY, <http://www.feflow.info>)
- ❑ .....

Esempi prodotti Open source/free:

- ❑ ModelMuse (A Graphical User Interface for Groundwater Models, USGS)
- ❑ FREEWAT (FREE and open source software tools for WATER resource management, SSSA H2020 project)
- ❑ .....