

I MODELLI DI FLUSSO E TRASPORTO NELLA PROGETTAZIONE DEGLI IMPIANTI GEOTERMICI A CIRCUITO APERTO

CORSO ONLINE ORGANIZZATO DALL'
ORDINE DEI GEOLOGI DEL PIEMONTE

04 MAGGIO 2021
ORE 09:00 – 13:00

RELATORE:
DOTT. GEOL. GABRIELE BERNAGOZZI
RESPONSABILE DELL'AREA IDROGEOLOGIA DI ENSER SRL

ENSER SRL - VIALE ALFREDO BACCARINI, 29, 48018 FAENZA RA

Argomenti trattati

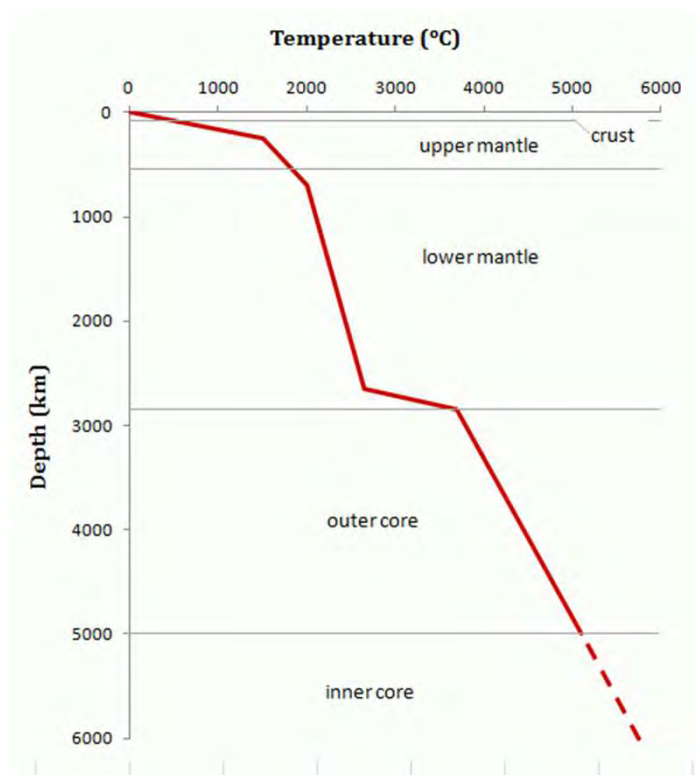
- **Geotermia tradizionale** e geotermia a **bassa entalpia** per riscaldamento e raffrescamento di edifici
- Cos'è una pompa di calore e come funziona (cenni)
- Pompe di calore ad aria e pompe di calore geotermiche
- Geotermia a **circuito chiuso** e a **circuito aperto**
- **Aspetti amministrativi** della geotermia a circuito aperto
- **MODFLOW**, cos'è, come funziona, come si installa, come **muovere i primi passi**
- Schema concettuale di un impianto geotermico a circuito aperto
- Modello Modflow semplificato per capire il problema delle variazioni di carico idraulico e cenni sul **MODPATH**
- **MT3DMS** per il trasporto di calore
- Caso reale di impianto con un pozzo di presa e uno di resa
- Caso reale di impianti con 5 pozzi di presa e 5 pozzi di resa

OBIETTIVO

Cercare di far capire il **ruolo del geologo**, nella sua specializzazione **idrogeologica**, nell'ambito della progettazione di un impianto geotermico a circuito aperto **mostrando i passi che deve compiere** per raggiungere il risultato

La geotermia tradizionale

L'energia geotermica è l'energia generata sfruttando il calore naturale del pianeta Terra.



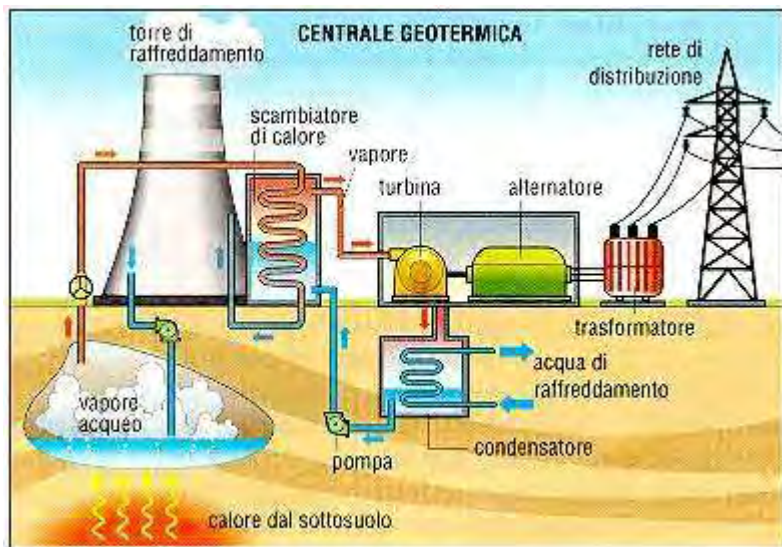
<https://www.e-education.psu.edu/eme807/node/712>

Il gradiente medio nella crosta terrestre (misurabile dai sondaggi) è di circa 25 °C per km.



Misura più profonda: Penisola di Kola, 12262 m di profondità. T=180 °C

La geotermia tradizionale



Impianto di Larderello



Curiosità: primo esempio conosciuto di uso della geotermia



La più antica piscina conosciuta alimentata da una sorgente calda, costruita durante la dinastia Qin nel III secolo a.C.

https://it.wikipedia.org/wiki/Energia_geotermica

La pompa di calore ad aria

La geotermia a bassa entalpia non sfrutta il calore del sottosuolo ma la sua inerzia termica.

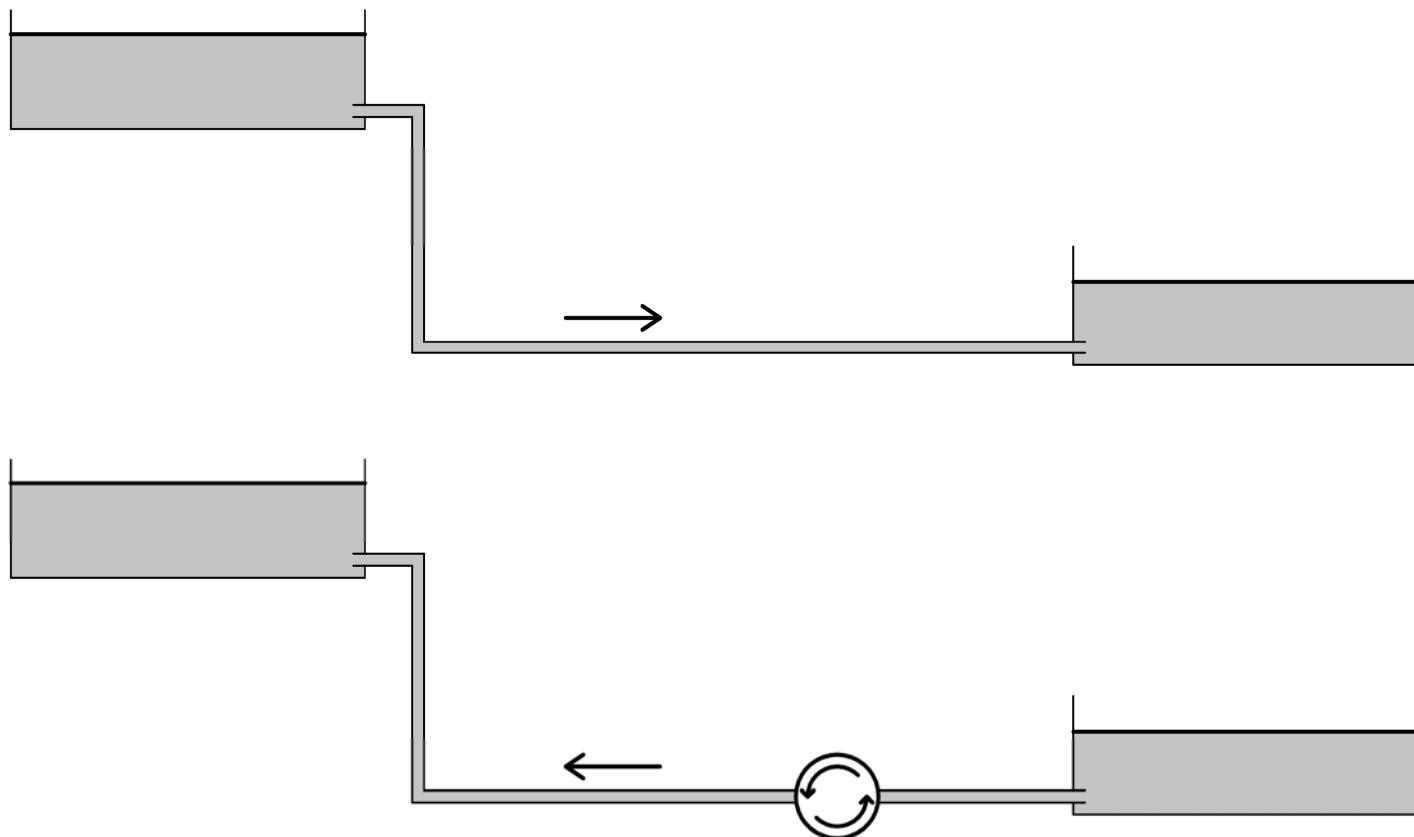
Lo scambio di calore viene sempre eseguito mediante una Pompa di Calore



Concettualmente il funzionamento è analogo alle pompe di calore ad aria

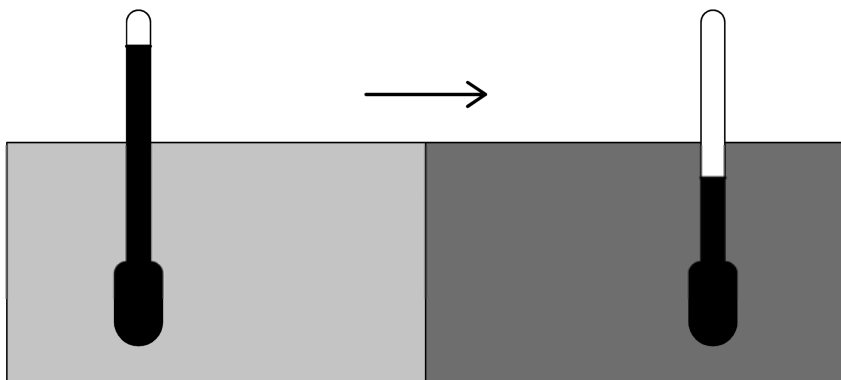


Perché «pompa di calore?»

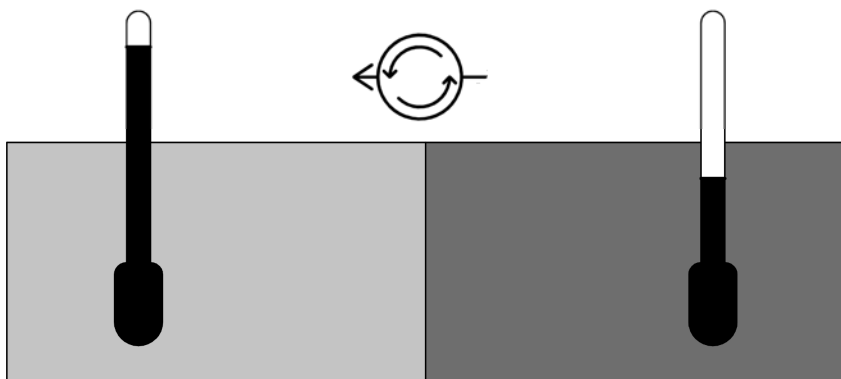


L'acqua spontaneamente si sposta dall'alto verso il basso. Per spostarla dal basso verso l'alto occorre una pompa

Perché «pompa di calore?»



Il corpo caldo diventa un po' più freddo mentre quello freddo si scalda un po'. Questo è ciò che capita **naturalmente**.



Con la pompa di calore **il calore viene pompato** dal corpo più freddo verso quello più caldo:

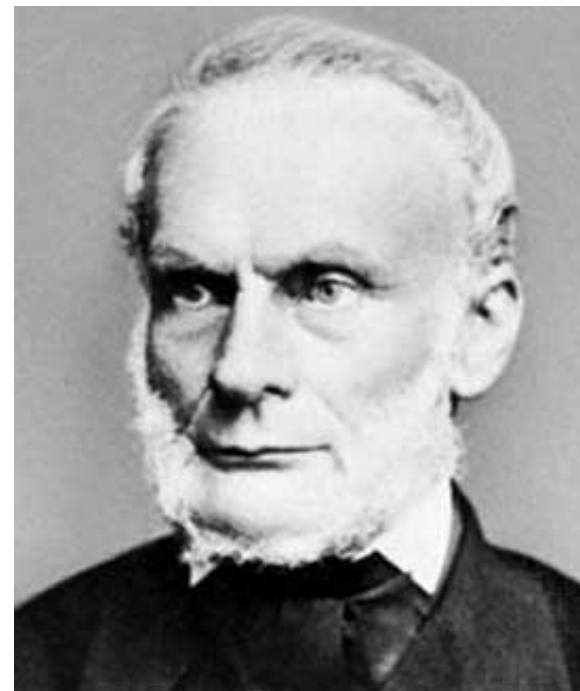
- Il corpo **freddo** diviene ancora **più freddo**;
- Il corpo **caldo** diventa ancora **più caldo**.

La pompa di calore ad aria

E' impossibile realizzare una trasformazione termodinamica il cui unico risultato sia quello di far passare del calore da una sorgente a temperatura inferiore a una a temperatura superiore.

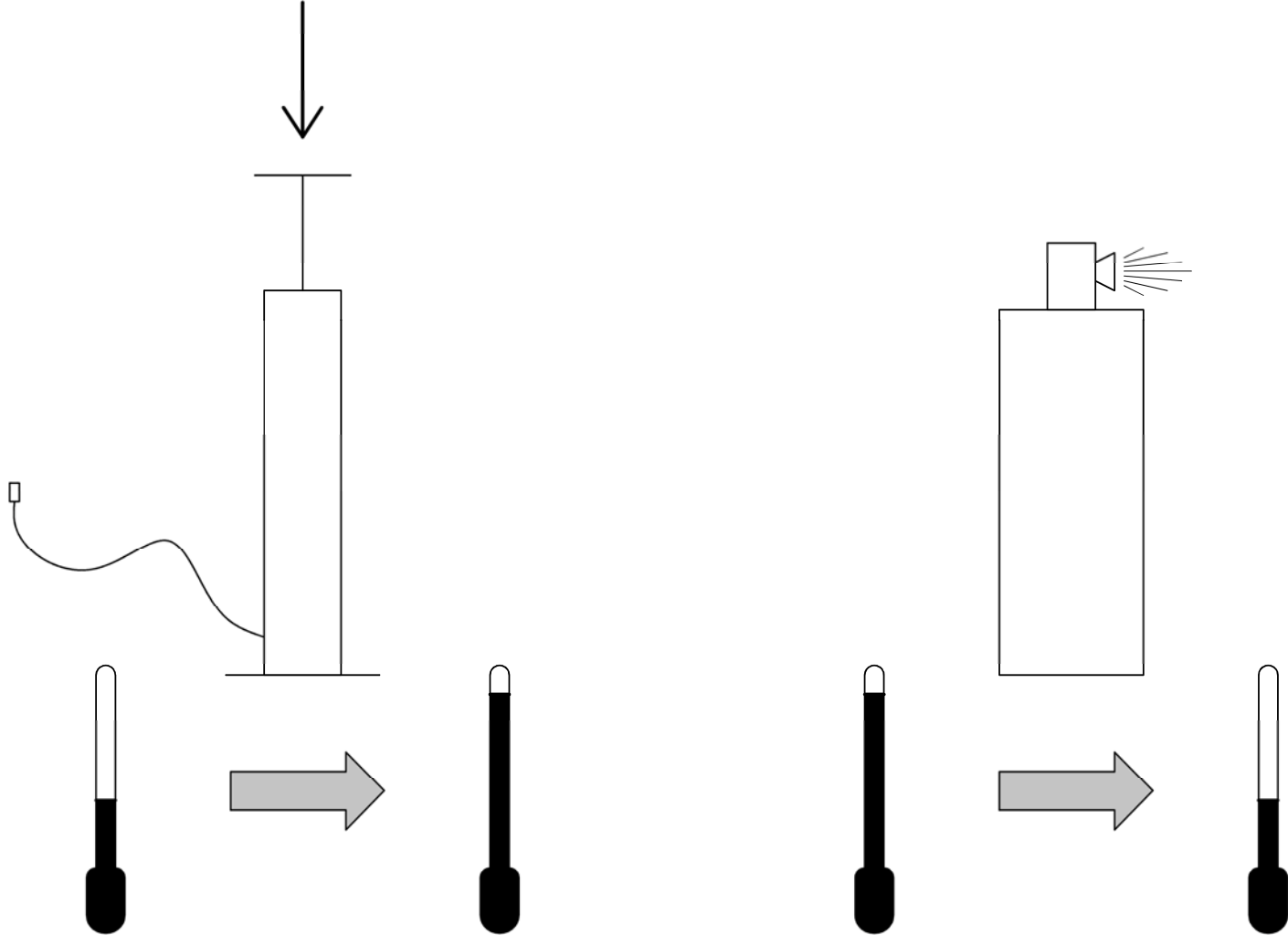
In pratica, per trasferire calore da un corpo più freddo ad un corpo più caldo è necessario che ci sia un lavoro esterno al sistema.

Il frigorifero per funzionare deve essere attaccato alla corrente elettrica. Attraverso il compressore **il frigorifero pompa il calore** dall'interno (che è freddo e diventa più freddo) all'esterno (dove è più caldo e diventa ancora più caldo)



Rudolf Clausius

La pompa di calore ad aria



La pompa di calore – principio di funzionamento



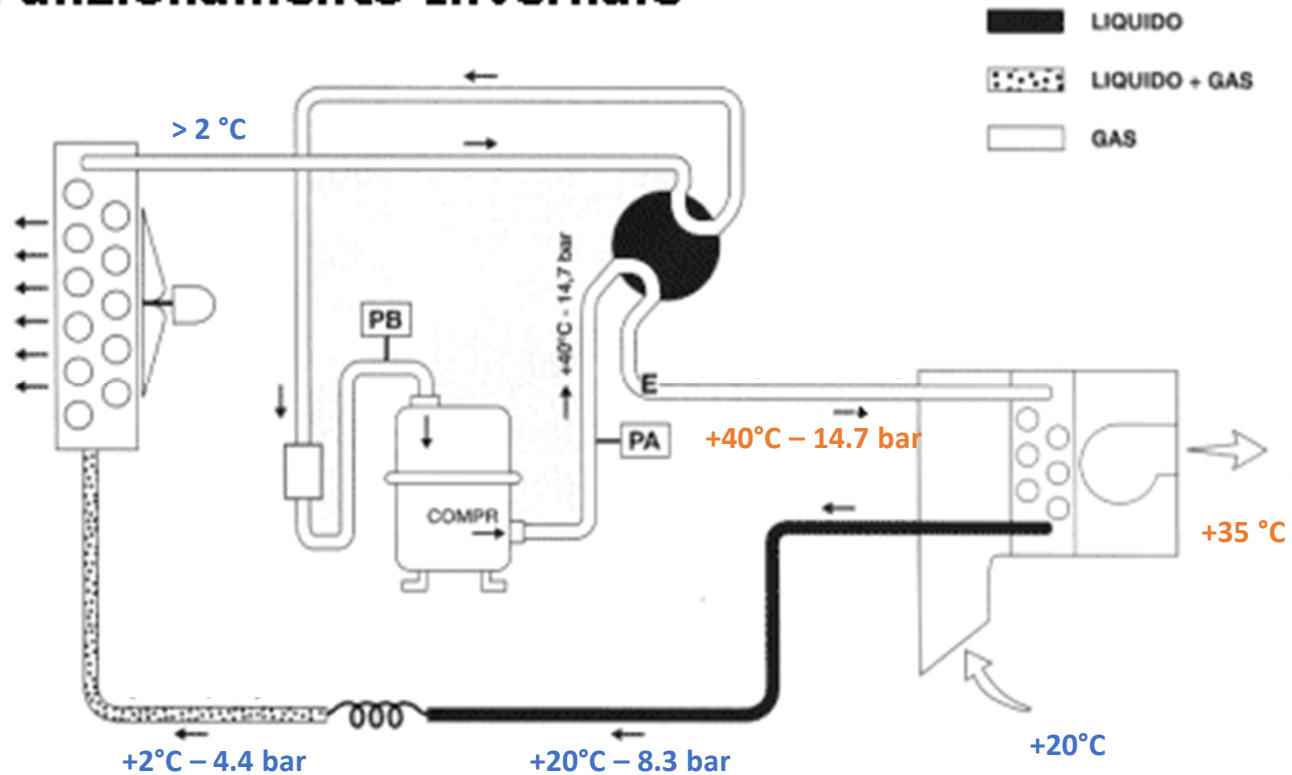
<https://www.gruppfondarioitalia.it/wp-content/uploads/2018/07/pompa-di-calore-funzionamento-e-costi.jpg>

La pompa di calore, utilizzando un lavoro (W) prodotto dal compressore, riesce a spostare il calore dalla sorgente fredda alla sorgente calda, facendolo muovere in senso inverso rispetto a come andrebbe spontaneamente

La pompa di calore ad aria – ciclo invernale

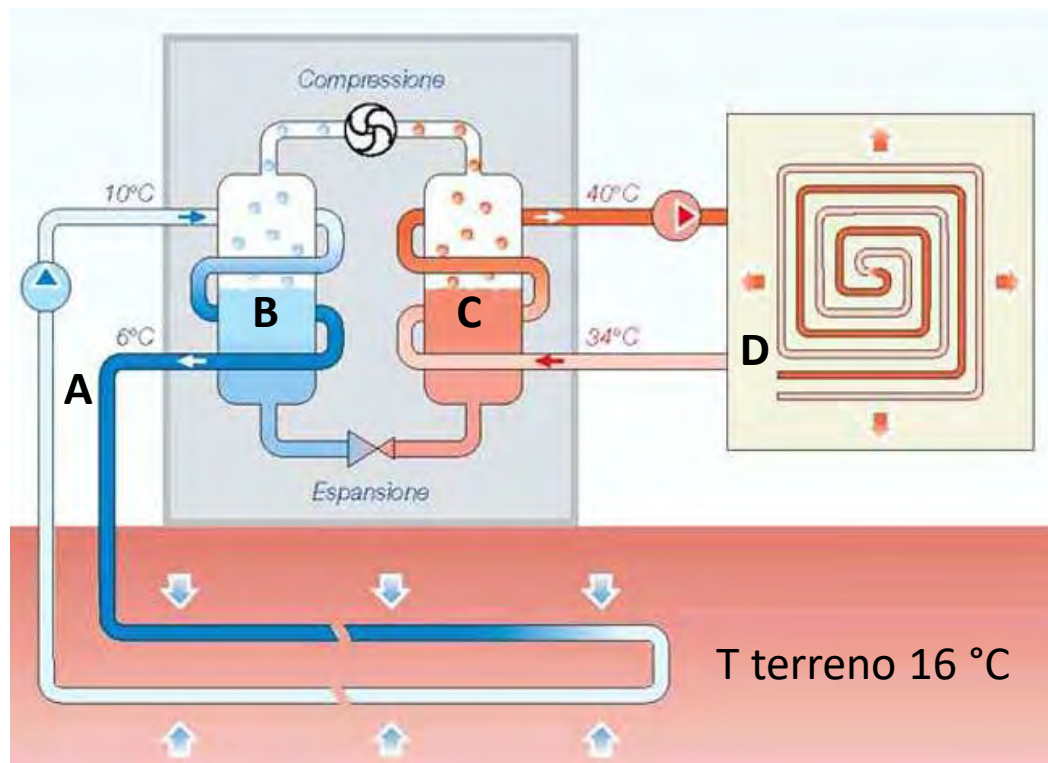
Funzionamento Invernale

All'esterno la temperatura è $> 2\text{ }^{\circ}\text{C}$



<http://web.tiscali.it/rtrctssic-wolit/assisten/pompacal.htm>

La pompa di calore geotermica – ciclo invernale



<https://www.cosvig.it/wp-content/uploads/2018/10/image-1292-2.jpg>

$$t_D > t_A$$

Quindi il calore naturalmente non può passare da A a B.
Però in virtù del lavoro svolto dal compressore:

$$t_B < t_A$$

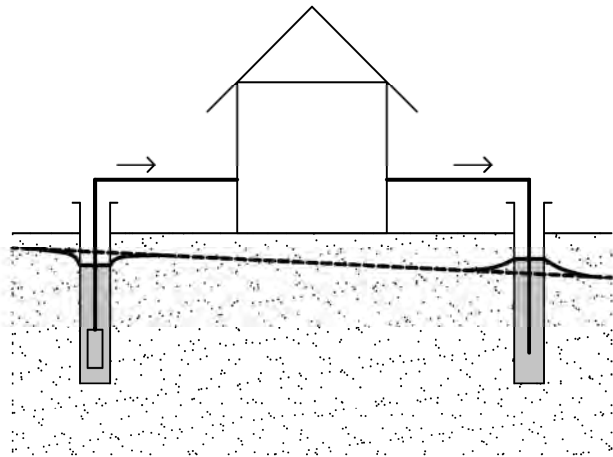
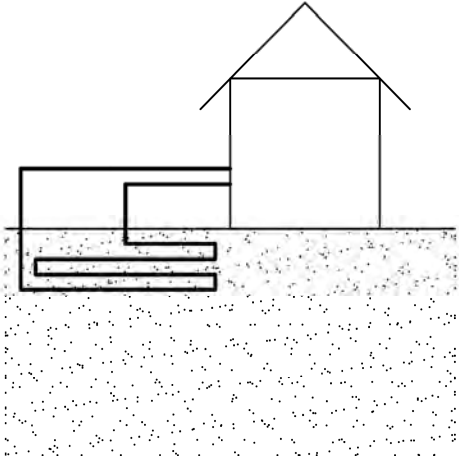
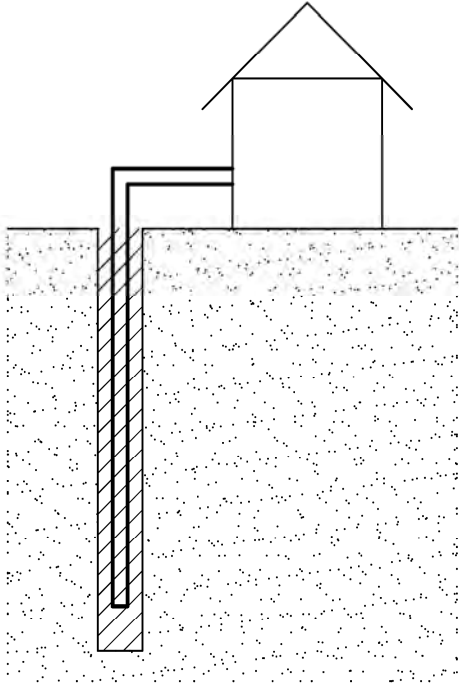
Quindi il calore può passare da A a B
Sempre per il lavoro svolto dal compressore:

$$t_C > t_D$$

Quindi il calore può passare da C a D.

Alla fine quindi il calore viene «pompato» da A a D

Impianti a circuito aperto e a circuito chiuso

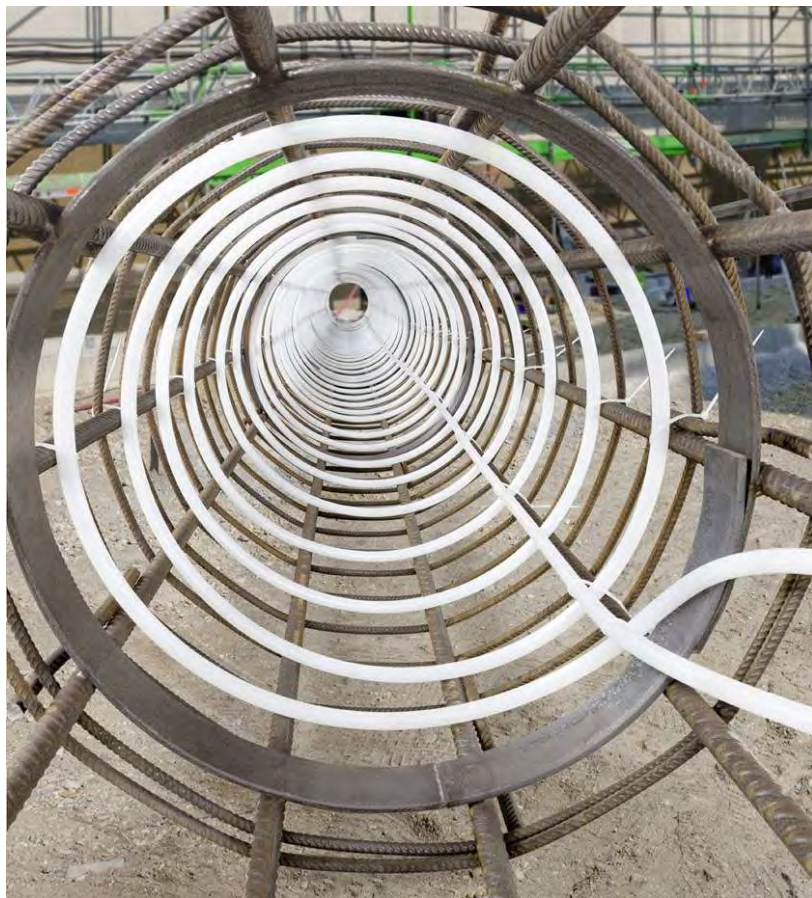


La pompa di calore geotermica – circuito chiuso



Circuito chiuso usando fori di sondaggio (100 – 130 m)

La pompa di calore geotermica – circuito chiuso



Circuito chiuso sfruttando i pali di fondazione



La pompa di calore geotermica – circuito chiuso

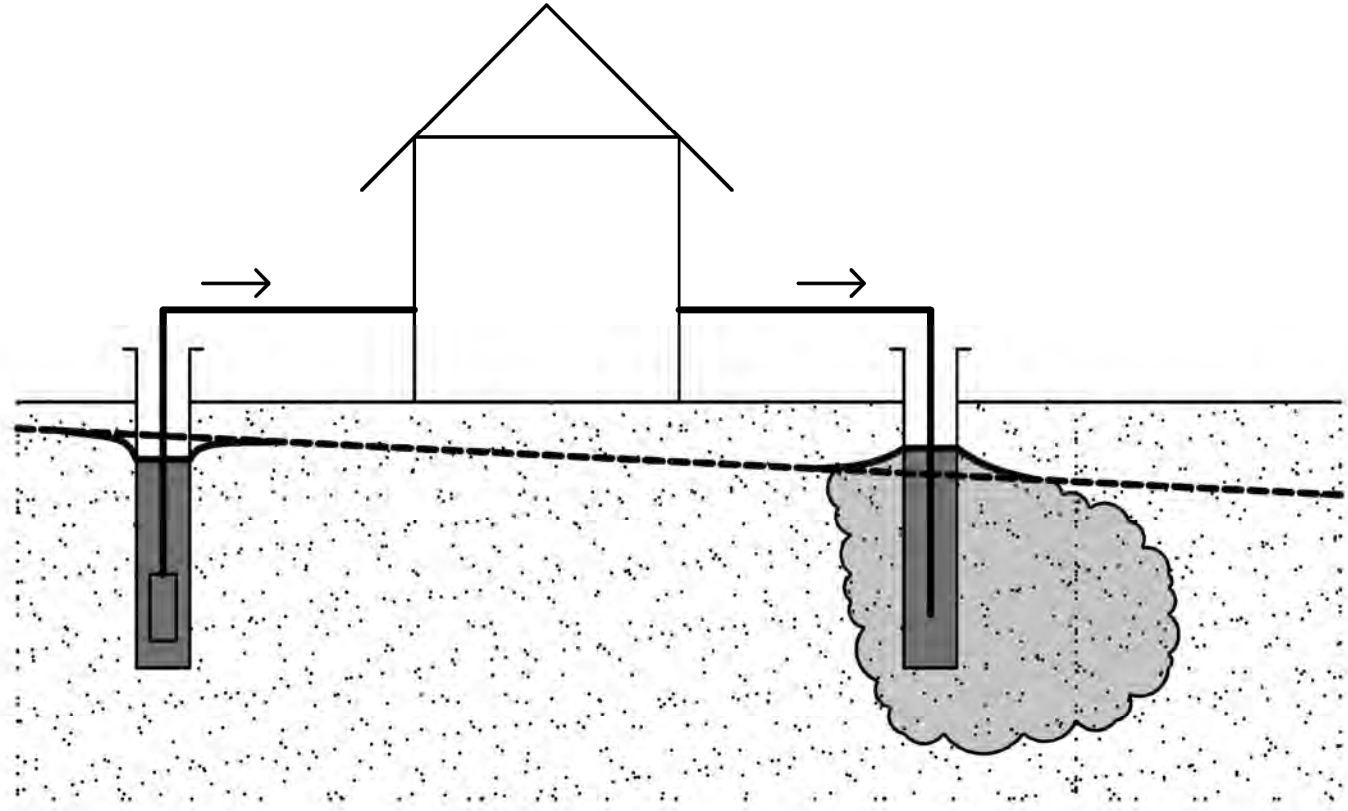


La pompa di calore geotermica – circuito chiuso

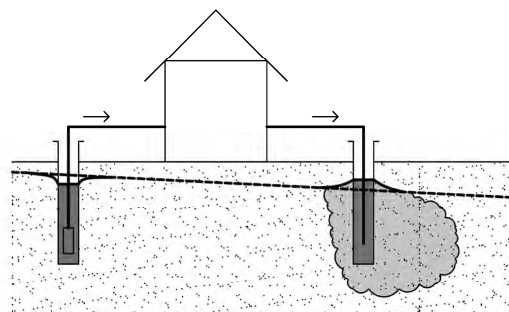


<https://www.rcinews.it/files/2015/07/GEOT.jpg>

La pompa di calore geotermica – circuito aperto



La pompa di calore geotermica – circuito aperto



Occorre estrarre acqua dalla falda

- **Tecnico:** è possibile estrarre acqua in quantità sufficiente? Quali saranno gli abbassamenti Δh di falda in seguito al pompaggio? Esiste il rischio di cedimenti?
- **Amministrativo:** è consentito estrarre acqua? Da quali falde? Con quale portata massima?

Occorre immettere acqua in falda con ΔT

- **Tecnico:** il corpo acquifero è in grado di assorbire acqua? L'acqua immessa cortocircuiterà? Quanto si innalzerà la falda nell'area di immissione? Si allagheranno degli interrati esistenti?
- **Amministrativo:** è consentito immettere acqua? In quali falde? Che caratteristiche deve avere l'acqua per essere immessa? Qual è il massimo ΔT consentito in estate e in inverno? Si disturberanno impianti esistenti a valle? E' possibile scaricare in un corpo idrico superficiale?

Impianti a circuito aperto - Lombardia

DELIBERAZIONE N° X / 6203 Seduta del 08/02/2017

Visto

Delibera:

- 1 - di approvare le modalità realizzative i contenuti delle indagini preventive previste dalla l.r. 38/2015, ai fini del rilascio dell'autorizzazione allo scarico in falda di acque sotterranee prelevate per scambio termico tramite pompa di calore, di cui all'allegato allegato al presente provvedimento che ne costituisce parte integrante e sostanziale;
- 2 - di dare atto che **l'allegato costituisce guida tecnica per predisporre le relazioni da allegare all'istanza di autorizzazione alla reimmissione nelle acque sotterranee delle medesime prelevate per scambio termico in impianti a pompa di calore** e nel contempo costituisce riferimento tecnicoamministrativo per l'Autorità competente al rilascio dell'autorizzazione di cui all'art. 104, comma 2, del d. lgs. 152/2006;
- 3 -

d.g.r. 6203 dell'8 febbraio 2017 che approva i contenuti delle indagini preventive ai fini del rilascio dell'autorizzazione allo scarico in falda prelevate per scambio termico pubblicata sul B.U.R.L. S.O. n. 7 del 15/2/2017 (pagg. da 17 a 25).

Impianti a circuito aperto - Lombardia

Idea di base:

- La normativa statale di norma vieta lo scarico diretto nel sottosuolo o nelle acque di falda ma per le acque prelevate per «scambio termico» è possibile autorizzare lo scarico in deroga

Per consentire questo scarico

- a supporto della richiesta il richiedente deve svolgere specifiche indagini;
- l'indagine è a carico del richiedente e deve essere redatta da un professionista abilitato;
- tanto il prelievo quanto la reimmissione devono avvenire nella **«prima falda»**;
- devono essere eseguite indagini chimiche per garantire che **le acque prelevate siano identiche a quelle immesse** e deve essere definito un **ΔT massimo**.

L'impianto della pompa di calore deve essere costruito in modo tale che l'acqua di falda che circola non subisca alcuna contaminazione con altri fluidi circolanti nell'impianto, in modo che sia garantita «l'invarianza chimica delle acque reimmesse rispetto a quelle prelevate».

Impianti a circuito aperto - Lombardia

La portata d'acqua emunta dall'impianto è funzione della potenza termica/frigorifera necessaria alla climatizzazione dell'edificio.

Si fissa una **soglia di 5 l/s** che indica due categorie di impianti:

- I. impianti di categoria I con portata media emunta inferiore o uguale a 5 l/s;
- II. impianti di categoria II con portata media emunta superiore a 5 l/s.

Il valore di portata prelevato è determinato dal massimo fabbisogno giornaliero (volume) di acqua dell'impianto per svolgere le funzioni di condizionamento dell'edificio diviso il numero di ore giornaliere di funzionamento dello stesso.

Per gli impianti di categoria I non sono necessarie indagini idrochimiche ma ci si può basare sulla bibliografia.

Per gli impianti di categoria II occorre eseguire un campionamento a monte e uno a valle per **verificare che il livello di inquinamento sia analogo nei due punti**.

Costituiscono eccezioni a tale modalità, anche per gli impianti di categoria I, **i casi di prelievo di acque in zone di contaminazione diffusa o di presenza di plume**. Costituisce ulteriore caso a parte la reimmissione di acque prelevate per scopi geotermici provenienti da siti oggetto di procedure di bonifica;

Impianti a circuito aperto - Lombardia

Contenuti della relazione a corredo dell'istanza di reimmissione in acquifero delle acque prelevate per scambio termico

La relazione è composta dalle seguenti tre sezioni:

- Sezione sull'impianto di scambio termico (a cura di un tecnico abilitato);
- **Sezione geologica e idrogeologica (predisposta da un geologo abilitato);**
- Sezione costruttiva delle opere di presa e resa (predisposta da un tecnico abilitato).

Sezione sull'impianto di scambio termico (a cura di un tecnico abilitato);

-
- la portata media modulata della pompa di calore;
- la portata massima emunta (l/s) all'opera di presa;
- la temperatura di andata e ritorno dalla pompa di calore;
-

Impianti a circuito aperto - Lombardia

Sezione geologica e idrogeologica (predisposta da un geologo abilitato)

Inquadramento territoriale

Inquadramento geomorfologico, geologico e idrogeologico

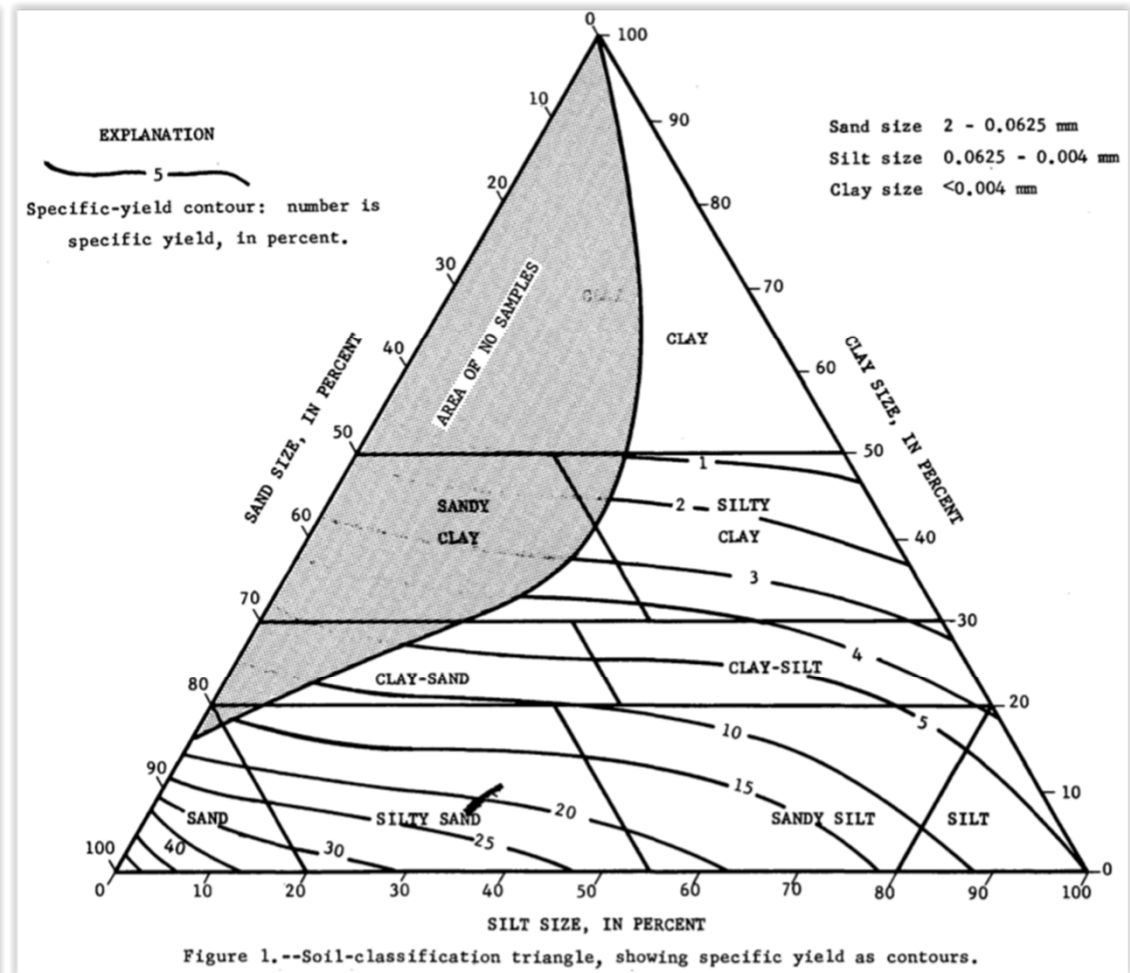
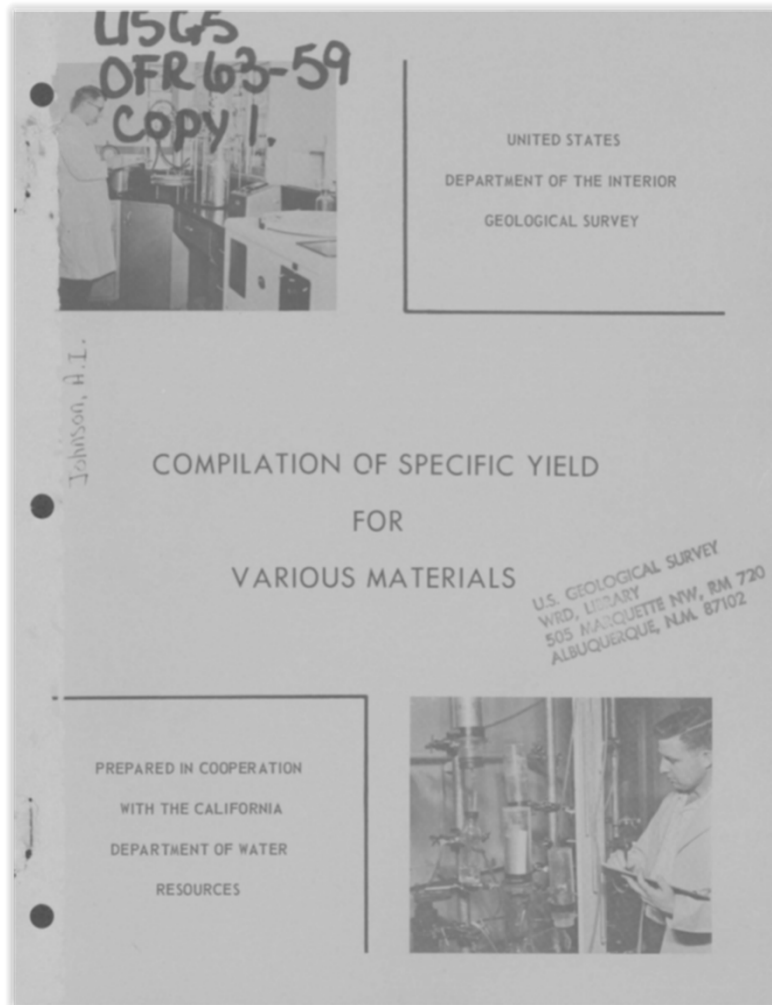
-
- Identificazione dei litotipi sia affioranti che presenti fino alle profondità interessate dalla derivazione (desumibile anche da bibliografia o cartografia geologica esistente)

•

Caratteristiche idrogeologiche e piezometria

-
- tavola sezione idrogeologica
- indicazione dei parametri idrogeologici calcolati o desunti da bibliografia
- indicazione delle oscillazioni della superficie piezometrica nel tempo
- **valutazione dell'interferenza tra le opere di presa e resa**, al fine di **evitare fenomeni di cattura delle acque restituite e/o di eventuale interferenza con altre opere di presa o resa** di terzi; qualora le opere siano pozzi di emungimento la valutazione va effettuata sulle portate di progetto, ad esempio utilizzando formulazioni analitiche o, preferibilmente, [modelli di flusso analitici o numerici](#).

Specific yield – Valori di riferimento da bibliografia



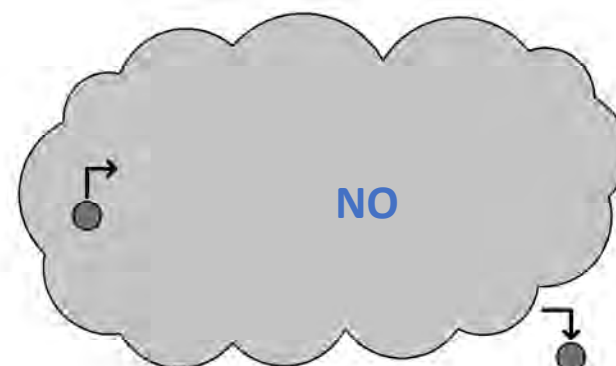
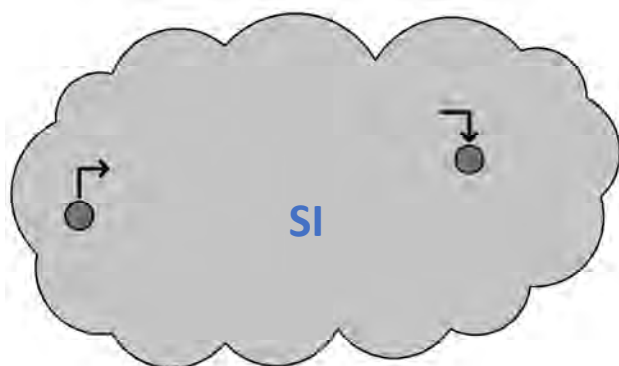
A. I. Johnson, "Specific yield: compilation of specific yields for various materials," Washington, D.C., 1967.

Impianti a circuito aperto - Lombardia

Sezione geologica e idrogeologica (predisposta da un geologo abilitato)

Qualità delle acque sotterranee

Concetto: evitare di spostare dell'inquinamento dall'opera di presa a quella di resa – Punto D)



Impianti a circuito aperto - Lombardia

Sezione geologica e idrogeologica (predisposta da un geologo abilitato)

Recapito

Descrizione dei potenziali effetti sull'andamento piezometrico ed sulle temperature della falda oggetto di reimmissione, in ragione sia delle portate reimmesse previste che della trasmissività dell'acquifero, ad esempio **utilizzando formulazioni analitiche o, preferibilmente, modelli di trasporto analitici o numerici.**

Sezione costruttiva delle opere di presa e resa (predisposta da un tecnico abilitato).

Numero dei pozzi di presa e resa; distanza presa-resa; dimensione e profondità dei pozzi; modalità di realizzazione dei pozzi; gestione dei materiali di perforazione; tipo di pompa installata; modalità di spurgo; **valutazione delle interferenze idrauliche con altre strutture esistenti**, in particolare il **dimensionamento del cono di depressione/ricarica** con altre strutture sotterranee. (questo per la valutazione del rischio di cedimenti/allagamenti interrati)

Impianti a circuito aperto - Lombardia

Relazione tecnica finale

-
- per le opere di presa prove sulla portata emungibile: relazione tecnica descrittiva delle prove effettuate sulle opere di presa con indicazioni degli andamenti degli abbassamenti in funzione del tempo e delle portate estratte, loro interpretazione e definizione del cono di depressione, indicazioni sull'eventuale interferenza idraulica tra le opere di presa e resa oggetto della domanda, valutazione della possibile l'interferenza con altre opere di captazione posti in proprietà esterne, definizione dei parametri caratteristici degli acquiferi captati;
- per le opere di resa prove sulla portata di reimmissione: relazione tecnica descrittiva delle prove effettuate sulle opere di resa con indicazione degli andamenti degli innalzamenti in funzione del tempo e delle portate reimmesse, loro interpretazione e definizione del cono di innalzamento, indicazioni sull'eventuale interferenza idraulica tra le opere di presa e resa oggetto della domanda, valutazione della possibile l'interferenza con altre opere di captazione poste ad una ragionevole distanza in proprietà esterne;

Sintesi dei problemi da affrontare e strumenti di calcolo

Flusso -> MODFLOW

- Come varia l'assetto piezometrico in seguito all'attivazione dell'impianto geotermico (la direzione del flusso localmente si inverte)? (T-A)
- Di che **entità** sono gli **innalzamenti** piezometrici? (T-A)
- Dove sono localizzati? (T-A)
- Di che **entità** sono gli **abbassamenti** piezometrici? (T-A)
- Dove sono localizzati? (T-A)
- Fino a che **distanza** arriva il **disturbo piezometrico**?(A)

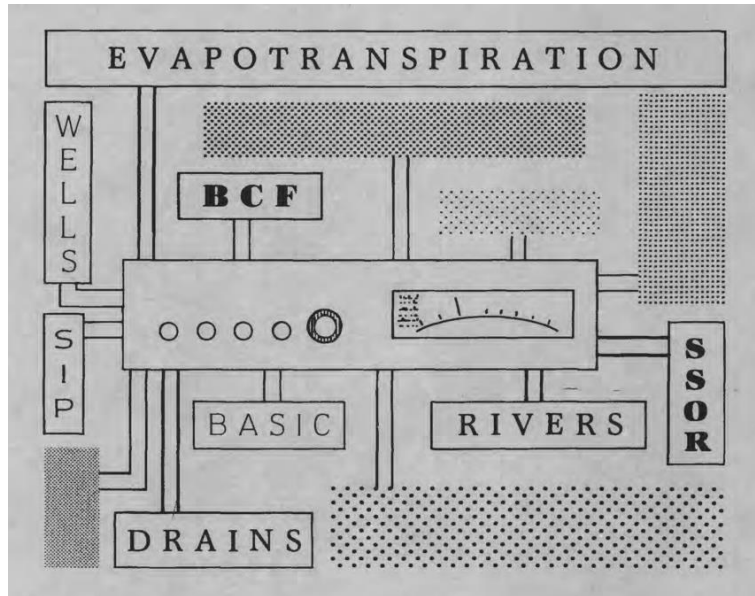
Trasporto -> MT3DMS

- Come si **propaga il pennacchio termico** a valle dell'impianto? (A)
- Il pennacchio termico disturba altri impianti già presenti a valle? (A)
- Esiste il rischio di cortocircuitazione (il pozzo di presa cattura le acque del pozzo di resa vanificando l'idea di inerzia termica del fluido che deve permettere lo scambio del calore con l'impianto)? (T)

T -> Problemi di tipo tecnico

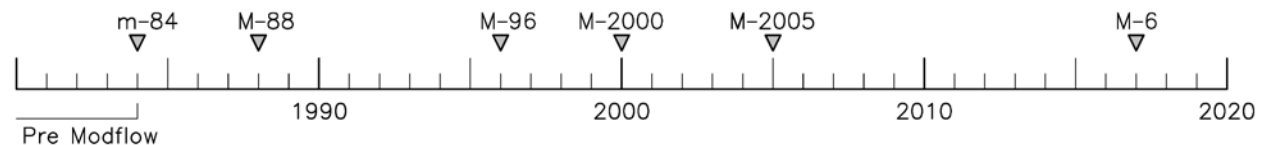
A -> Problemi di tipo amministrativo

Modflow: Cos'è e come si è sviluppato

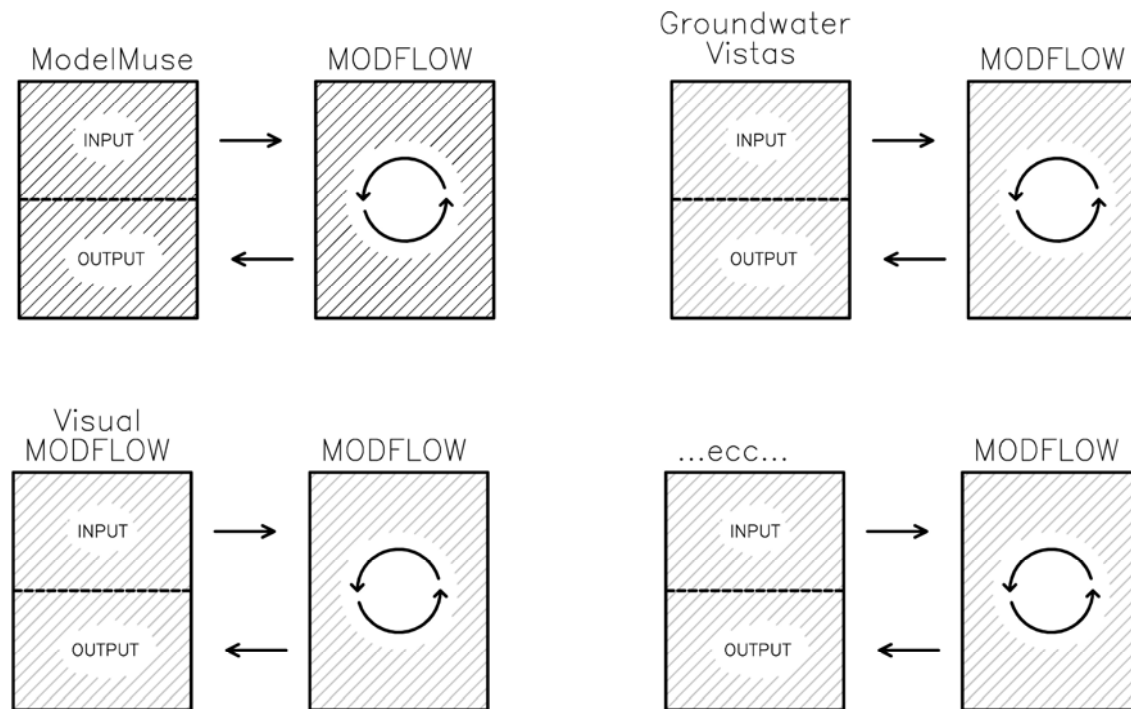


*Copertina del manuale d'uso di
"Modular three dimensional finite
difference ground water flow
model" (1984)*

MODFLOW è programma sviluppato dall'U.S. Geological Survey (USGS) che risolve l'equazione del flusso delle acque sotterranee con il metodo delle differenze finite. Rappresenta uno standard a livello mondiale per lo studio dei fenomeni di filtrazione

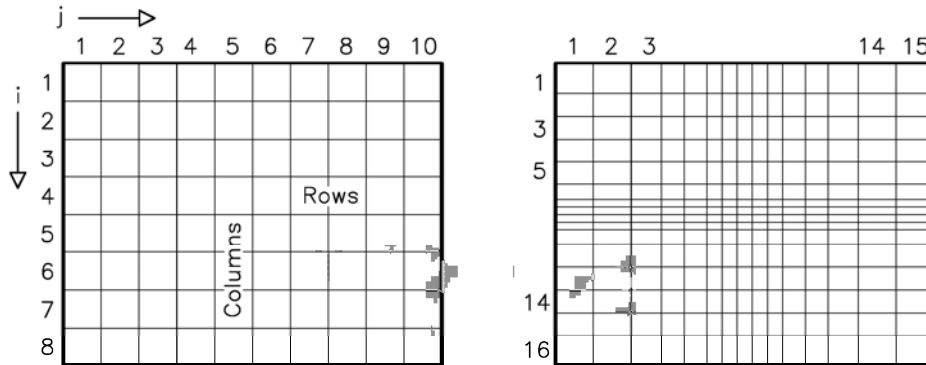


Modflow: per funzionare necessita di una interfaccia grafica



Anche MT3DMS necessita di una interfaccia grafica

Modflow: la discretizzazione del volume del modello

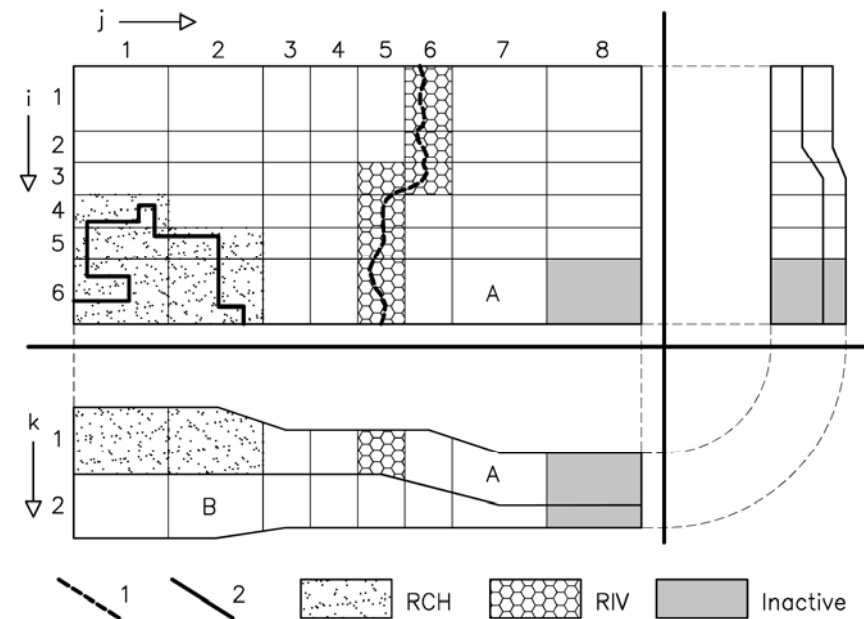


In pianta l'area di modellazione è rettangolare. Viene suddivisa in **celle**, ottenute dall'intersezione di righe e colonne. In MODFLOW-2005 in pianta **le celle sono quadrate o rettangolari**

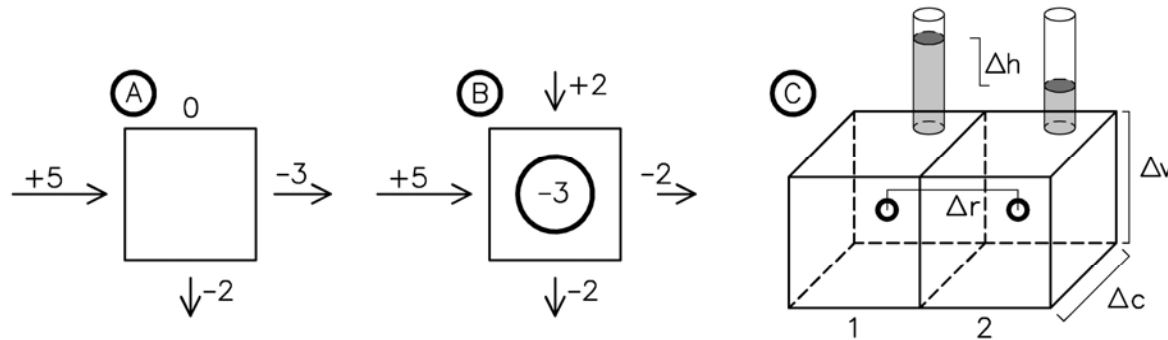
In senso verticale il volume interessato dalla modellazione viene suddiviso in layer. I **layer** possono avere **base e tetto orizzontali o irregolari**.

Se i layer hanno base e tetto orizzontali il loro spessore si mantiene costante.

Le caratteristiche del modello (K , S_y , Condizioni al contorno) vengono associate alle celle e, all'interno di ogni cella, si assumono costanti.



Modflow: principio di funzionamento (1/2)



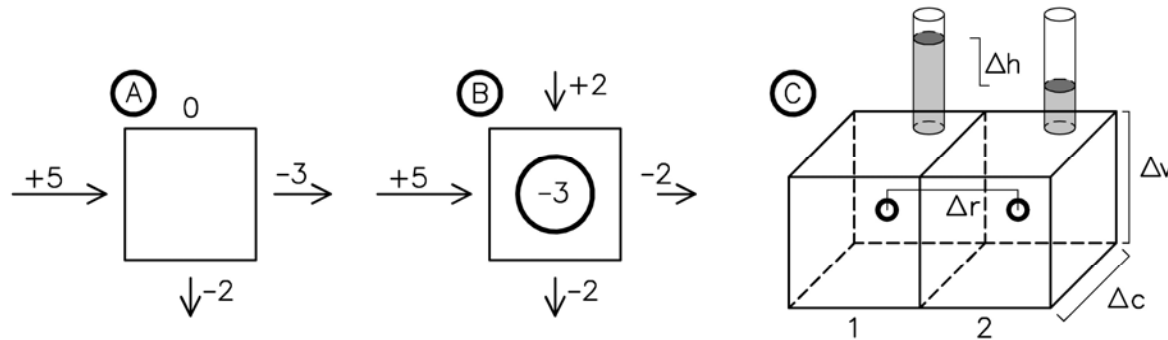
In condizioni stazionarie non ci può essere accumulo o cessione d'acqua dall'acquifero.

Pertanto in ogni cella la somma delle portate in ingresso (+q) deve essere uguale alla somma delle portate in uscita (-q)

A: Cella del modello senza alcuna condizione di stress applicata (quasi tutte);

B: Cella del modello con un pozzo che estrae acqua.

Modflow: principio di funzionamento (2/2)



Come si calcola la portata in entrata e in uscita dalle facce di una cella?

In:

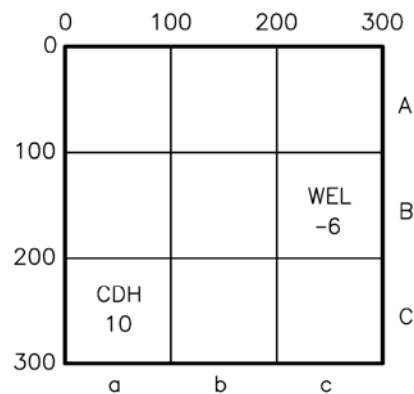
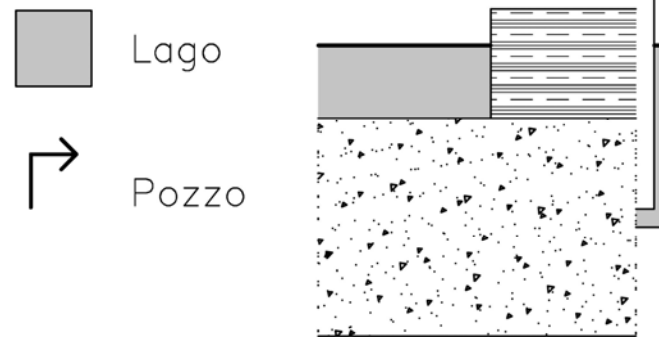
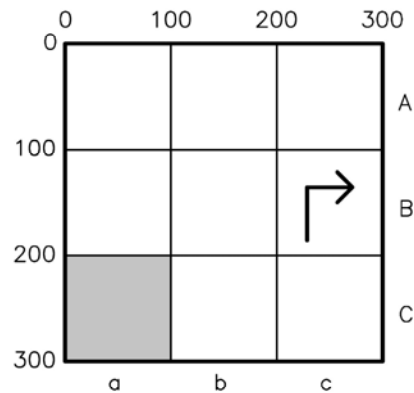
- condizioni stazionarie;
- condizioni confinale;
- K omogeneo ed isotropo;

il calcolo viene eseguito applicando semplicemente la **formula di Darcy**

$$Q = K \frac{\Delta h}{\Delta r} (\Delta c \cdot \Delta v)$$

Δh rappresenta l'unica variabile ignota

Esempio di calcolo – Schema di riferimento



Ideale modello MODFLOW 3 x 3 celle

- 1 layer;
- condizioni stazionarie;
- flusso in condizioni confinate;
- K isotropo e omogeneo uguale a 2;
- celle quadrate di 100 x 100 di lato;
- spessore dell'unico layer di 3;
- livello dell'acqua del lago: 10;
- portata estratta dal pozzo: -6.

Unità di misura?? Qualunque, basta che siano consistenti.

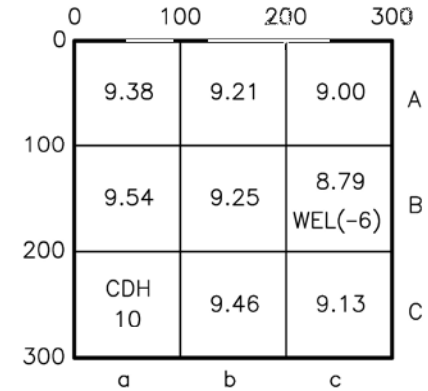
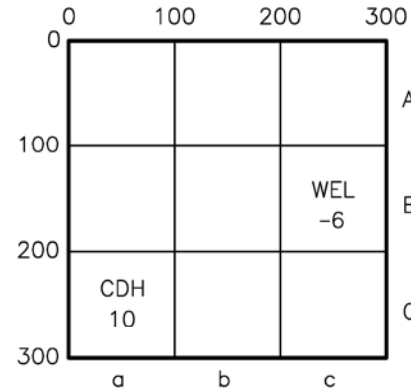
Potrebbero essere metri e secondi; centimetri e minuti; ecc...

Suggerimento: usare sempre metri e secondi.

Esempio di calcolo – Risultati del calcolo

Ideale modello MODFLOW 3 x 3 celle

- 1 layer;
- condizioni stazionarie;
- flusso in condizioni confinate;
- K isotropo e omogeneo uguale a 2;
- celle quadrate di 100 x 100 di lato;
- spessore dell'unico layer di 3;
- livello dell'acqua del lago: 10;
- portata estratta dal pozzo: -6.

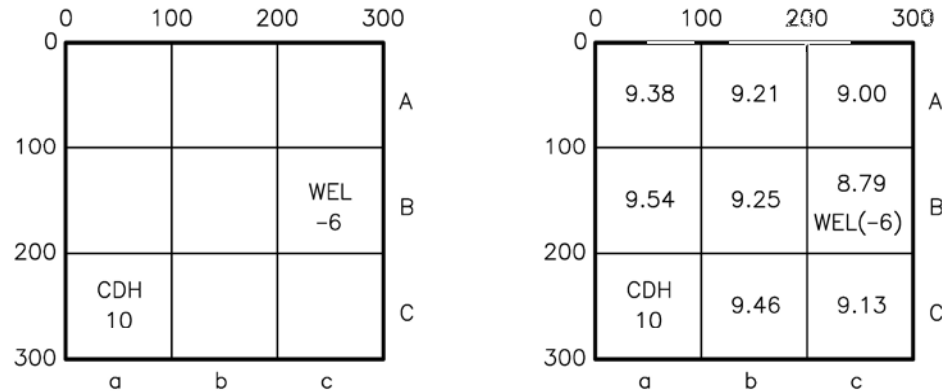


MODFLOW prova e riprova fintanto che non ottiene in tutte le celle del modello una distribuzione dei carichi idraulici tale da soddisfare il bilancio di massa in tutte le celle del modello ($Q_{in} = Q_{out}$).

Formula generale per il calcolo della portata fra due celle del modello:

$$Q = K \frac{\Delta h}{\Delta r} (\Delta c \Delta v) = 2 \frac{\Delta h}{100} 100 \cdot 3 = 6 \Delta h$$

Esempio di calcolo – Verifica del risultato



Si può naturalmente provare a fare l'esercizio in tutte le restanti celle. Per la cella cB ricordarsi di inserire la Q in uscita dal pozzo

$$Q = K \frac{\Delta h}{\Delta r} (\Delta c \Delta v) = 2 \frac{\Delta h}{100} 100 \cdot 3 = 6 \Delta h$$

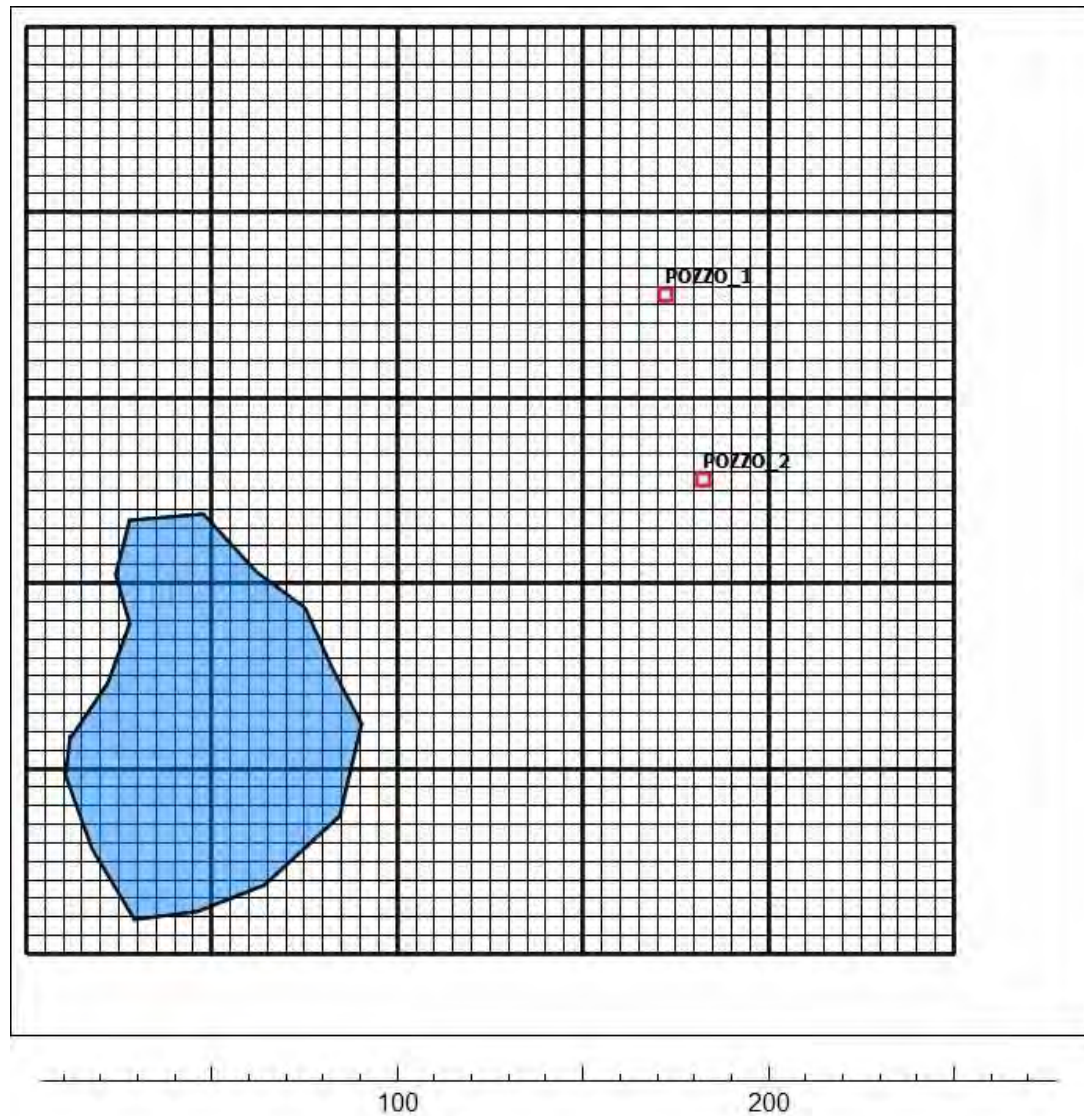
$$Q_{aC} = 6 \cdot (10 - 9.54) = 6 \cdot 0.46 = 2.76$$

Cella_{aB} $Q_{bB} = 6 \cdot (9.25 - 9.54) = 6 \cdot (-0.29) = -1.74$

$$Q_{aC} = 6 \cdot (9.38 - 9.54) = 6 \cdot -(0.16) = -0.96$$

$$Q_{TOT} = 2.76 - 1.74 - 0.96 = 0.06 \approx 0$$

Semplice modello Modflow: lago (alimenta) + 2 pozzi (emungono)



Versione più realistica:

50 x 50 celle quadrate da 5 m di lato ($\Delta c = \Delta r = 5 \text{ m}$)

Lago: CHD=+10 m

Pozzo 1= $Q_1 = -2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = -2 \text{ L/s}$

Pozzo 2= $Q_2 = -3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = -3 \text{ L/s}$

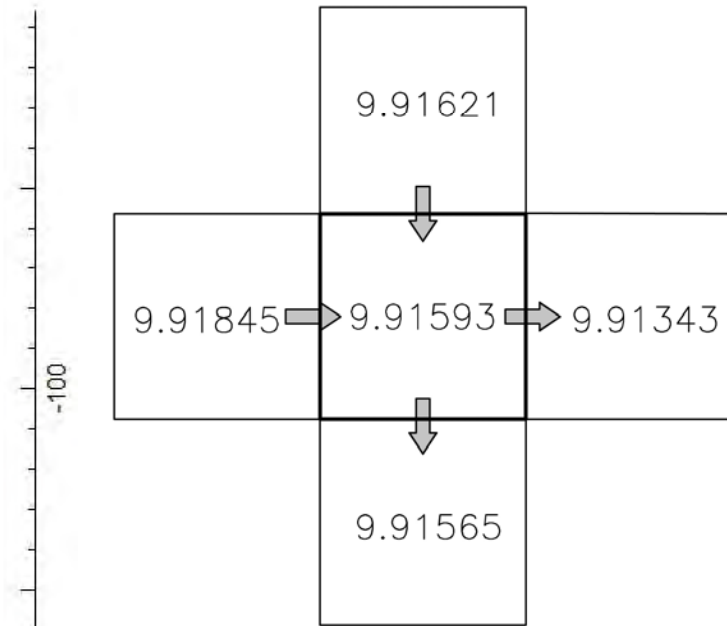
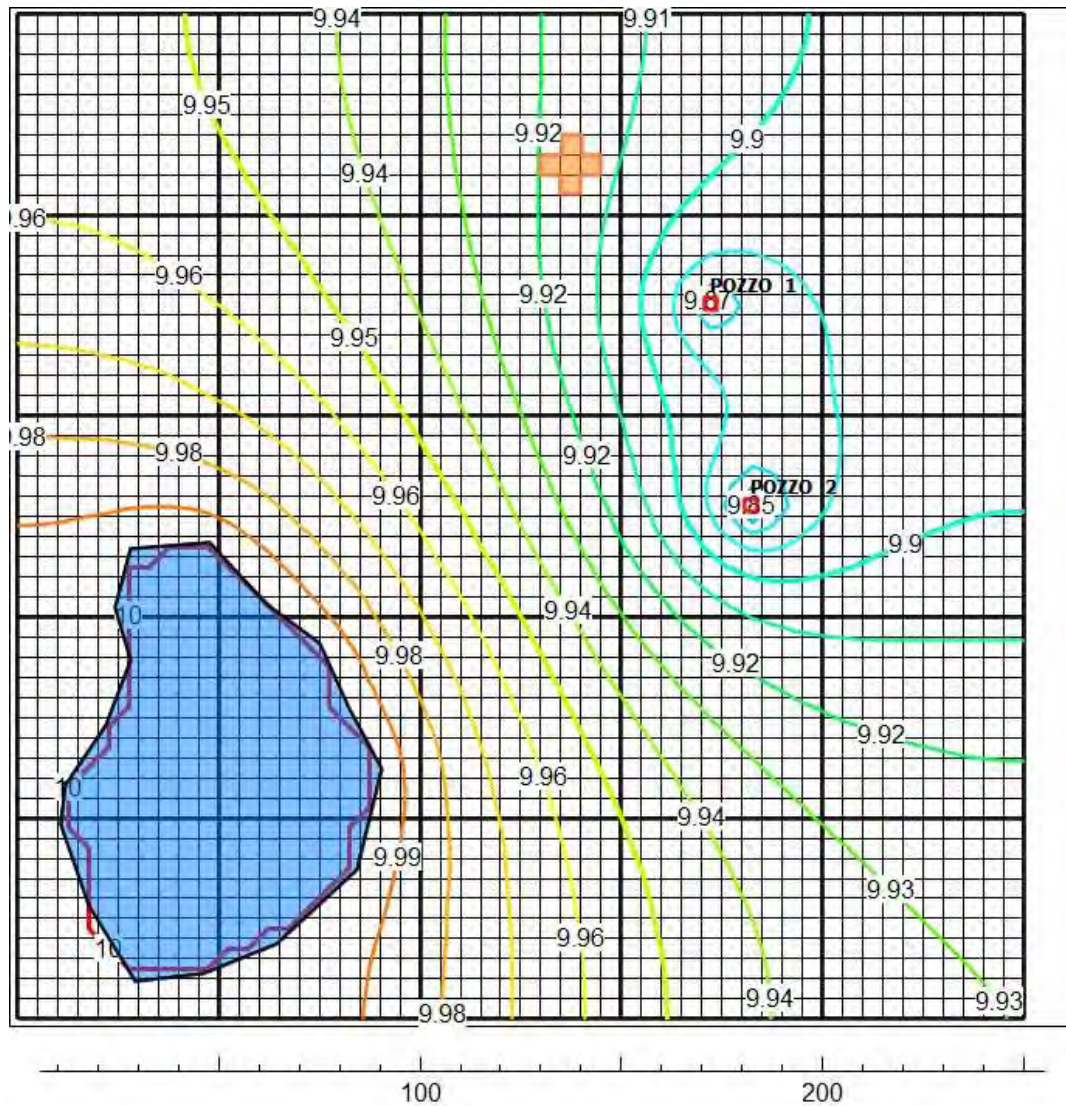
$K=6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Spessore acquifero (Δv): 15 m

Flusso in condizioni confinate

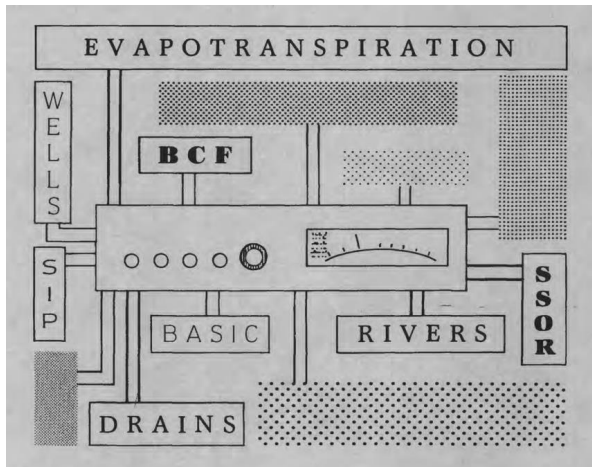
Condizioni stazionarie

Semplice modello Modflow: distribuzione dei carichi idraulici



Rifacendo il calcolo si può verificare che la somma delle portate in ingresso è uguale alla somma delle portate in uscita.

Modflow: I Packages



Nome del Package	Abbreviazione	Categoria del Package
Basic	BAS	Program Control
Block-Centered Flow	BFC	Hydrologic/Internal
Layer-Property Flow	LPF	Hydrologic/Internal
Horizontal Flow Barrier	HFB	Hydrologic/Internal
Well	WEL	Hydrologic/Stress
Recharge	RCH	Hydrologic/Stress
River	RIV	Hydrologic/Stress
General-Head Boundary	GHB	Hydrologic/Stress
Drain	DRN	Hydrologic/Stress
Evapotranspiration	EVT	Hydrologic/Stress
Strongly Implicit Procedure	SIP	Solver
Preconditioned Conjugate Gradient	PCG	Solver
Direct Solution	DE4	Solver

$$\sum Qf_i + \sum Qs_i - SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V = 0$$

- I Package **Hydrologic/Internal** servono per definire i parametri per **calcolare il flusso fra celle adiacenti**, cioè il termine $\sum Qf_i$ e $SS(\Delta h/\Delta t)\Delta V$;
- i Package **Hydrologic/Stress** servono per definire i parametri da inserire nell'equazione di flusso per quelle celle a cui sono applicate delle **condizioni di stress** (pozzi, fiumi, ricarica, ecc), cioè rappresentano il termine $\sum Qs_i$;
- i Package **Solver** servono per **risolvere il sistema di equazioni** di tutte le celle del modello con il metodo delle differenze finite.
- Il Package **program control non assolve ad alcuna funzione specifica** ma semplicemente sovrintende a tutto lo svolgimento del programma

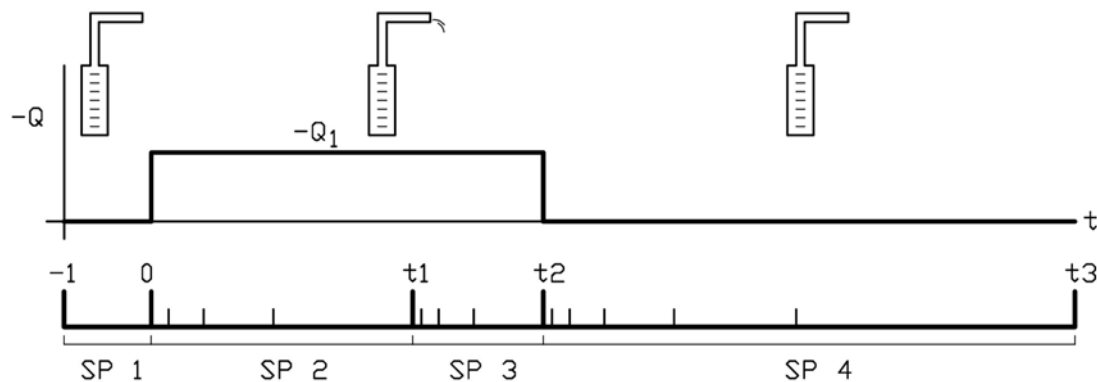
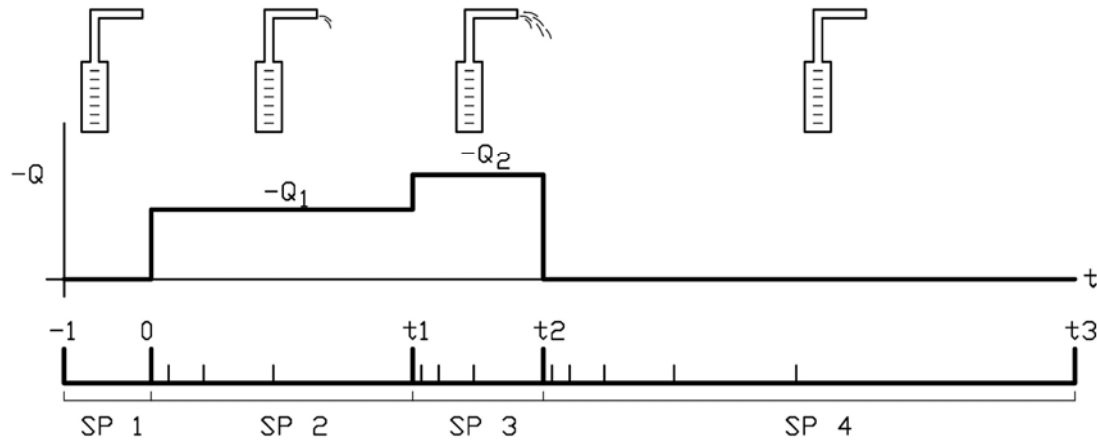
Modflow: I Packages

Combinando i vari Packages fra di loro è possibile simulare qualunque configurazione di flusso, compreso un impianto geotermico a circuito aperto con pozzi di presa (-Q) e pozzi di resa (+Q).

Nome	Abbreviazione	Categoria	MODFLOW-2005	MODFLOW-6
Block-Centered Flow	BCF6	Flow Packages	X	
Layer Property Flow	LPF	Flow Packages	X	
Hydrogeologic Unit Flow	HUF2	Flow Packages	X	
Horizontal Flow Barrier	HFB	Flow Packages	X	X
Unsaturated-Zone Flow	UZF	Flow Packages	X	
Seawater Intrusion	SWI2	Flow Packages	X	
Node Property Flow	NPF	Flow Packages		X
Storage	STO	Flow Packages		X
Time-Variant Specified-Head	CHD	Boundary Conditions	X	X
Flow and Head Boundary	FHB	Boundary Conditions	X	
Recharge	RCH	Boundary Conditions	X	X
Well	WEL	Boundary Conditions	X	X
Drain	DRN	Boundary Conditions	X	X
Drain Return	DRT	Boundary Conditions	X	
Evapotranspiration Segments	ETS	Boundary Conditions	X	X
Evapotranspiration	EVT	Boundary Conditions	X	
General-Head Boundary	GHB	Boundary Conditions	X	X
Lake	LAK	Boundary Conditions	X	
Lake Package for MODFLOW-6	LAK	Boundary Conditions		X
Multi-Node Well	MNW1	Boundary Conditions	X	
Multi-Node Well	MNW2	Boundary Conditions	X	
Multi-Aquifer Well	MAW	Boundary Conditions		X
Water Mover	MVR	Boundary Conditions		X
Reservoir	RES	Boundary Conditions	X	
River	RIV	Boundary Conditions	X	X
Stream-Flow Routing	SFR	Boundary Conditions	X	
MODFLOW-6 Stream-Flow Routing	SFR	Boundary Conditions		X
Stream	STR	Boundary Conditions	X	
Unsaturated-Zone Flow package for MODFLOW-6	UZF6	Boundary Conditions		X
Preconditioned Conjugate Gradient	PCG	Solver	X	
Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control	PCGN	Solver	X	
Geometric Multigrid	GMG	Solver	X	
Strongly Implicit Procedure	SIP	Solver	X	
Direct Solver	DE4	Solver	X	
Iterative Model Solution	IMS	Solver		X



Modflow: le condizioni transitorie



Uno **stress period** è un **intervallo di tempo** durante il quale gli **stress applicati al modello si mantengono costanti**.

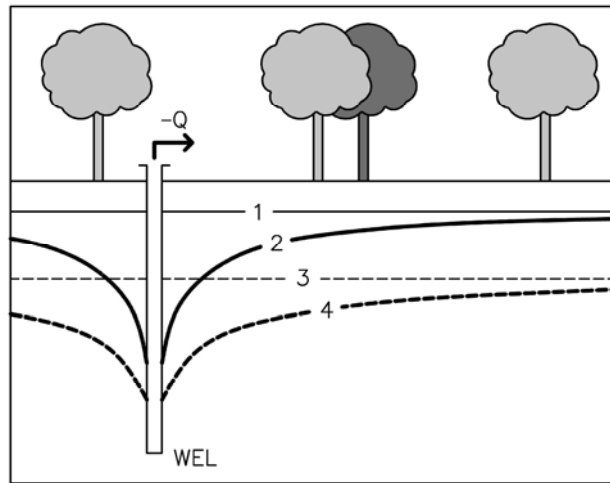
Usualmente:

- una simulazione in condizioni stazionarie consiste di un unico stress period;
- una simulazione in condizioni transitorie consiste in 2 o più stress period il primo in condizioni stazionarie, i seguenti in condizioni transitorie.

Uno **stress period** al suo interno è **suddiviso in time step**. Lo scopo dei Time Step è verificare come evolve il sistema nel corso dello stress period e migliorare il risultato del calcolo

Importanza della scelta corretta dell'Initial head in simulazione Transient State

In **condizioni transitorie** l'Initial Head influenza il risultato finale



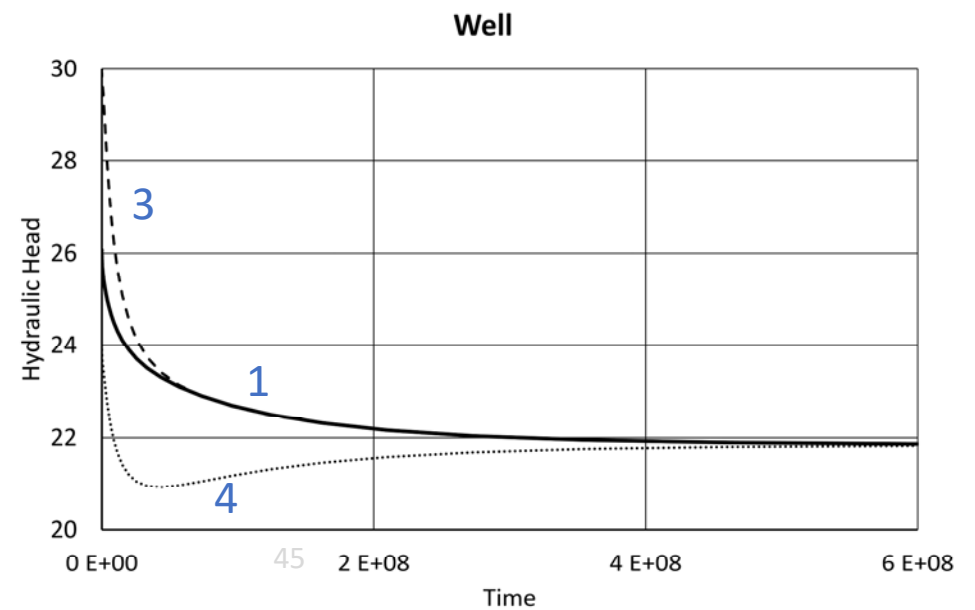
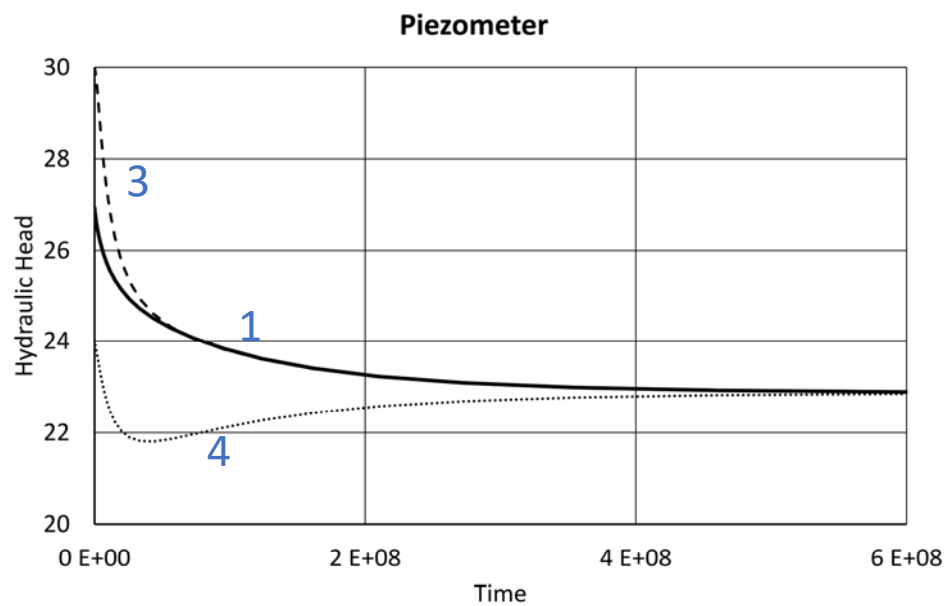
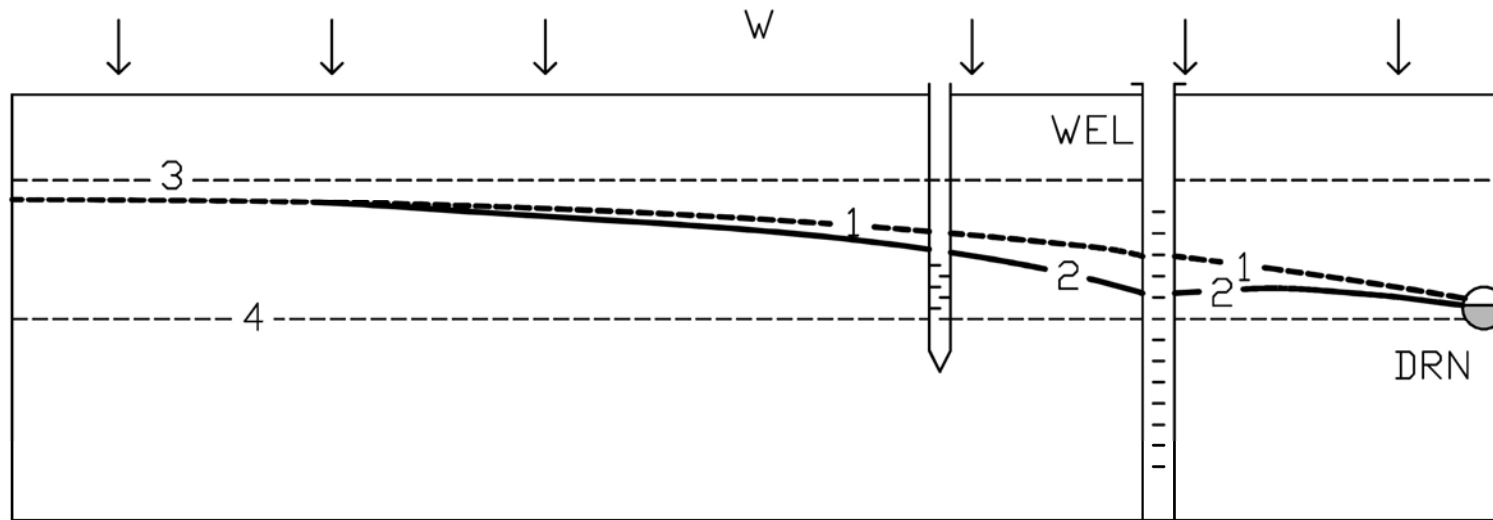
A parità di portata di estrazione e di durata del pompaggio:

- se nel modello le condizioni di partenza prevedono un Initial Head uniforme ed a quota 1, dopo un tempo la superficie piezometrica avrà assunto l'andamento 2.
- se nel modello le condizioni di partenza prevedono un Initial Head uniforme ed a quota 3, dopo un certo tempo la superficie piezometrica avrà assunto l'andamento 4.

Schema metodologico generale:

- si definisce senza troppa cura un andamento dell'Initial Head, ad esempio mantenendolo coincidente con il top del modello;
- si usa questo set di dati come partenza per il **primo stress period** della simulazione in **condizioni stazionarie** finalizzato a ricostruire **l'assetto dell'acquifero indisturbato**;
- a questo primo time step se ne fa seguire **un secondo** (poi eventualmente altri) in **condizioni transitorie** per osservare il comportamento dell'acquifero in seguito all'applicazione dello stress.

Importanza della scelta corretta dell'Initial head in simulazione Transient State



Hydrologic Internal Flow Package – layer confined/convertible

In idrogeologia si intende

Condizioni confinate	Condizioni freatiche
La sezione di filtrazione dipende dallo spessore dell'acquifero e non dipende dal carico idraulico delle condizioni al contorno (sempre che il carico non si abbassi al di sotto del bottom del livello di confinamento superiore).	La sezione di filtrazione dipende dal carico idraulico. Se H aumenta, aumenta anche lo spessore saturo.
In condizioni transitorie non c'è svuotamento o riempimento dei pori in quanto tutto resta sempre saturo. Il rilascio/immagazzinamento dell'acqua avviene per deformazione dello scheletro solido ed è governato dallo Specific Storage (S_s).	In condizioni transitorie c'è svuotamento o riempimento dei pori dell'acquifero. Il rilascio/immagazzinamento dell'acqua avviene per riempimento o svuotamento dei pori, limitatamente a quelli di dimensioni sufficientemente grandi. Il fenomeno è governato dallo Specific Yield ($S_y = n_e$).

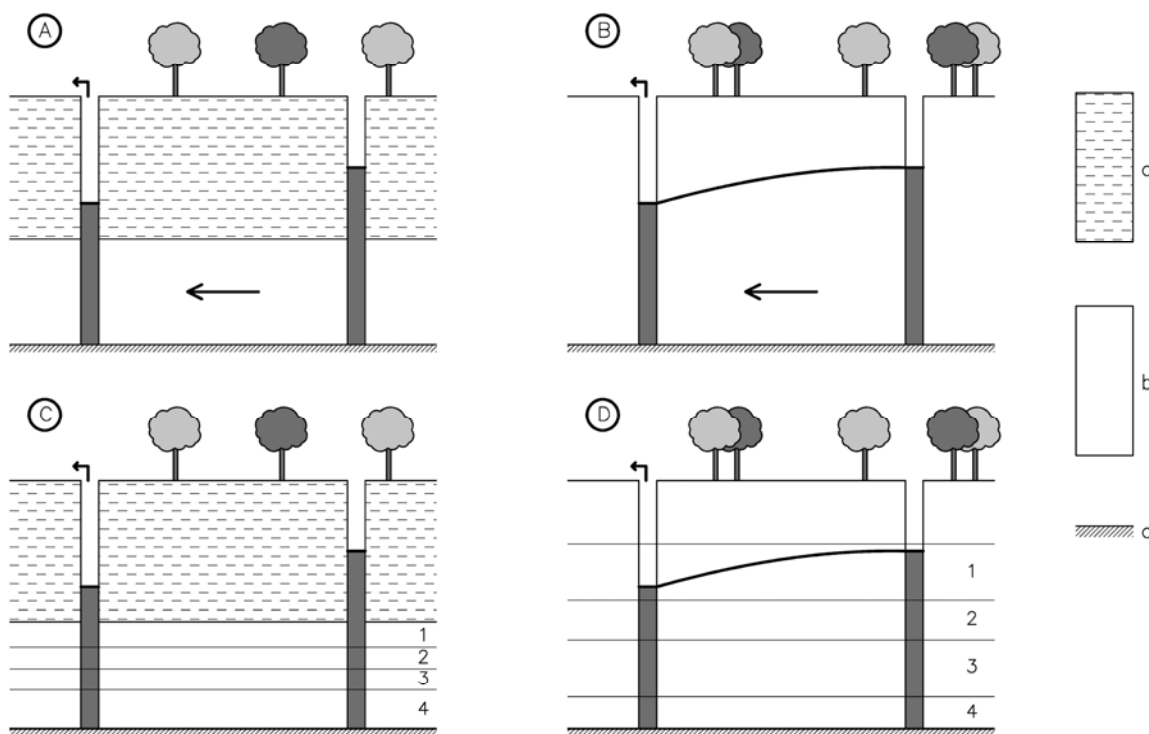
Hydrologic Internal Flow Package – layer confined/convertible

Se si risolve analiticamente

Si applicano formule differenti per il caso di moto in condizioni confinate e per il caso di moto in condizioni freatiche.

Se si risolve con MODFLOW

Si specifica in quali layer il moto è sicuramente di tipo confinato (layer sicuramente sempre saturi) e i layer nei quali ci potrebbero essere condizioni di parziale desaturazione.



A e B: esempi di filtrazione piana fra due trincee

- A: filtrazione in condizioni confinate;
- B: filtrazione in condizioni freatiche.

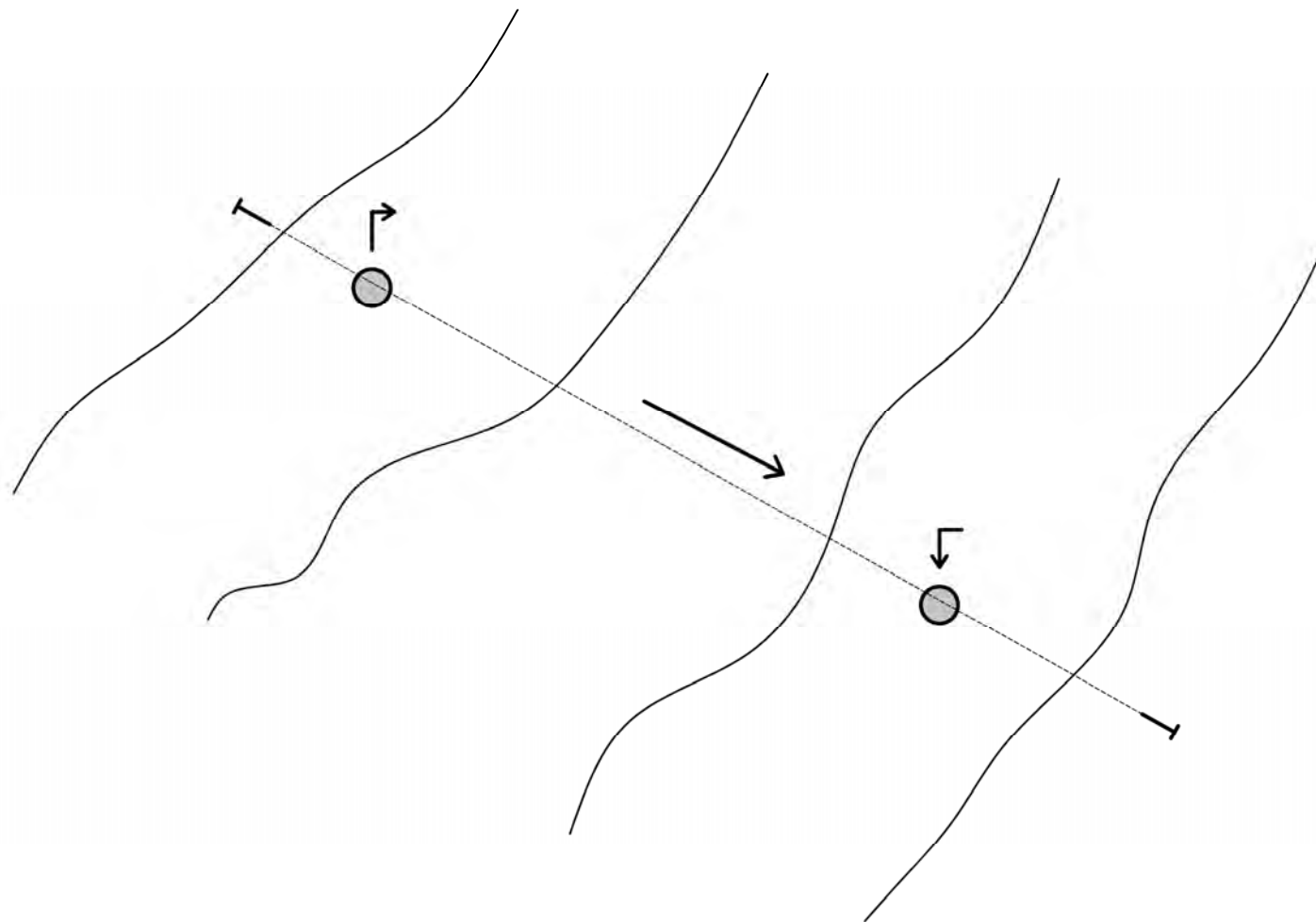
C e D: schematizzazione MODFLOW.

- C: layer 1, 2, 3 e 4 tutti di tipo confined;
- D: layer 1 di tipo convertible; layer 2, 3 e 4 di tipo confined.

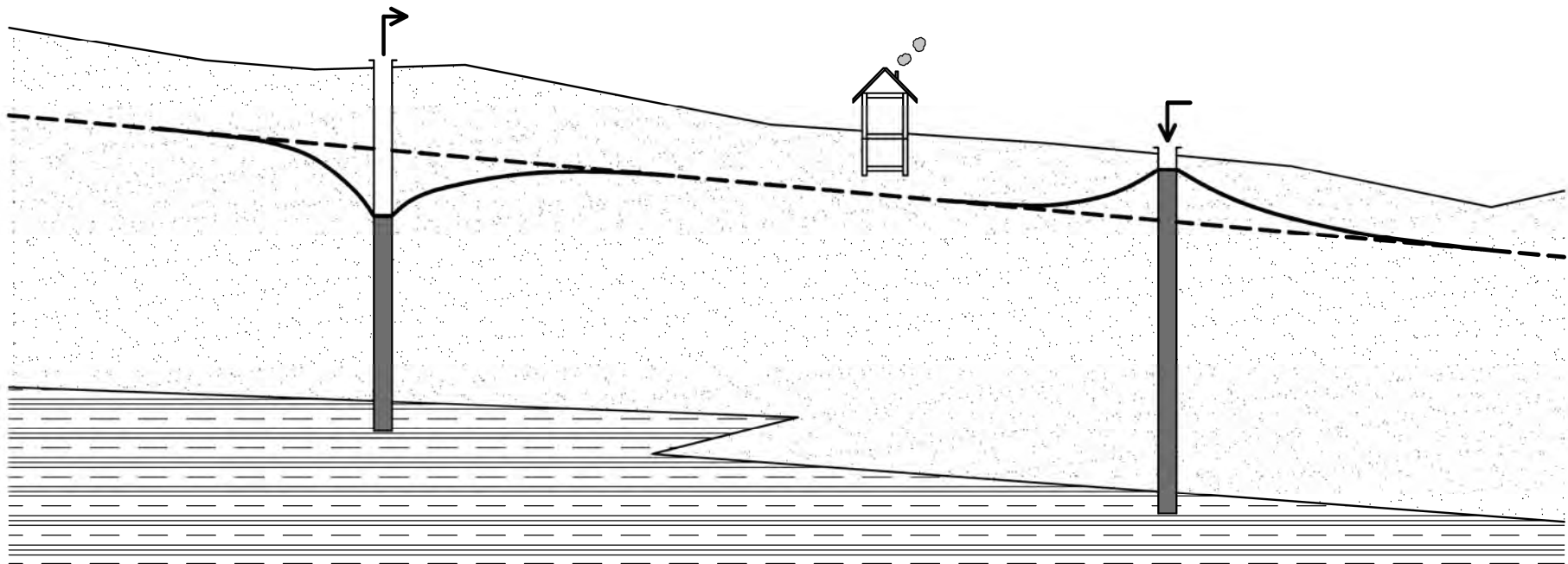
Suggerimenti per iniziare a muoversi con MODFLOW

- Scaricare l'interfaccia ModelMuse
- Installare e configurare MODFLOW
- Partire con casi elementari da risolvere analiticamente poi con MODFLOW per vedere come risponde il modello
- Evitare di usare subito MODFLOW per risolvere problemi reali

Schema concettuale di impianto di presa e resa



Variazioni piezometriche nell'area di presa e di resa



Schema ipotetico di necessità idriche dell'impianto

Ora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	TOT	Q (L/s)
GENNAIO	9	18	23	13	16	19	40	28	22	27	35	23	8	19	7	15	13	19	12	11	19	20	27	16	460	5.3
FEBBRAIO	13	27	27	22	25	20	25	25	37	16	19	13	9	10	9	18	13	12	10	13	31	15	29	20	457	5.3
MARZO	8	8	19	15	10	19	21	20	28	22	16	7	8	6	9	4	10	9	9	17	21	12	10	18	328	3.8
APRILE	6	4	8	8	10	11	18	9	17	16	6	8	4	14	12	6	10	8	3	12	14	12	13	5	232	2.7
MAGGIO	4	1	1	3	2	2	3	7	13	8	10	8	35	16	27	35	32	25	18	6	9	7	3	5	279	3.2
GIUGNO	4	3	5	2	2	3	7	8	22	27	16	37	44	61	27	50	58	24	35	12	6	8	7	7	475	5.5
LUGLIO	12	9	10	7	13	5	5	17	49	55	52	59	37	43	31	95	92	36	40	28	9	8	8	19	737	8.5
AGOSTO	7	8	10	9	10	3	4	27	39	31	26	36	44	38	51	64	63	64	65	24	5	7	7	15	657	7.6
SETTEMBRE	5	4	6	4	6	2	3	8	16	20	23	46	27	31	24	56	28	35	33	6	4	5	2	4	398	4.6
OTTOBRE	4	6	8	4	5	5	7	7	6	13	15	14	16	36	21	31	27	20	27	6	6	7	3	5	298	3.5
NOVEMBRE	15	6	10	10	13	10	10	18	16	17	24	9	12	21	12	7	20	19	11	21	13	8	9	12	323	3.7
DICEMBRE	17	10	8	22	24	11	35	37	17	21	17	9	8	18	14	8	11	13	15	16	10	18	12	19	390	4.5
Max (m ³ /h)	17	27	27	22	25	20	40	37	49	55	52	59	44	61	51	95	92	64	65	28	31	20	29	20		
Max (L/s)	5	7	7	6	7	6	11	10	14	15	14	16	12	17	14	26	26	18	18	8	9	5	8	5		

- Fondo violetto: l'impianto geotermico viene usato per riscaldare (inverno), quindi scarica acqua fredda
- Fondo arancione: l'impianto serve per raffreddare, quindi scarica acqua calda

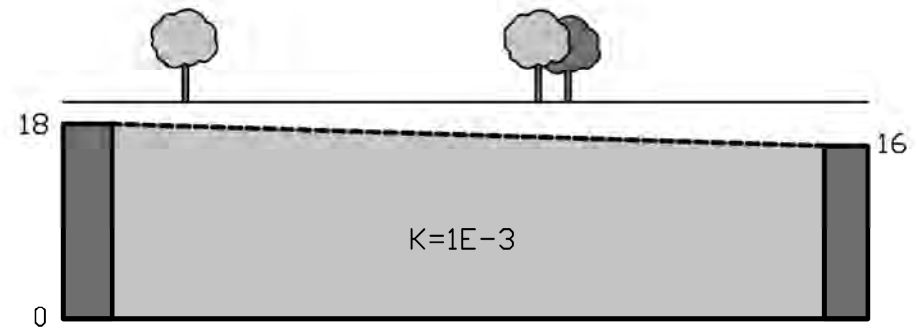
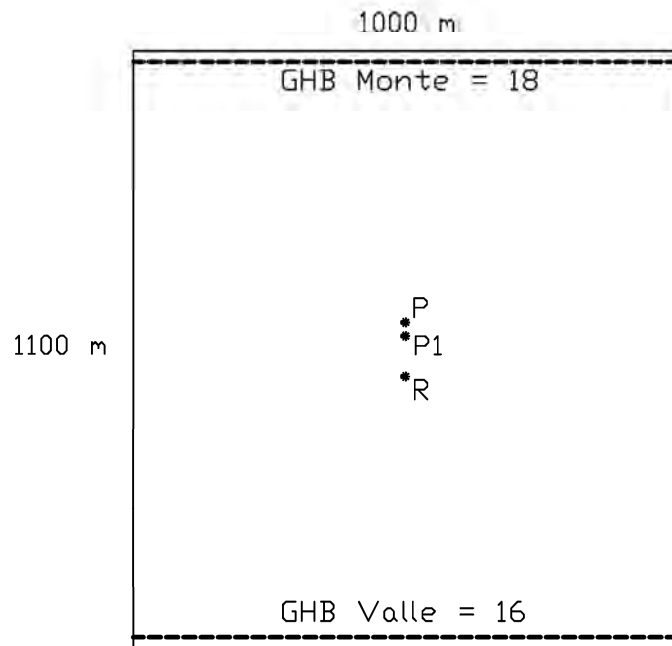
Approcci al calcolo del Δh

Ora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	TOT	Q (L/s)
GENNAIO	9	18	23	13	16	19	40	28	22	27	35	23	8	19	7	15	13	19	12	11	19	20	27	16	460	5.3
FEBBRAIO	13	27	27	22	25	20	25	25	37	16	19	13	9	10	9	18	13	12	10	13	31	15	29	20	457	5.3
MARZO	8	8	19	15	10	19	21	20	28	22	16	7	8	6	9	4	10	9	9	17	21	12	10	18	328	3.8
APRILE	6	4	8	8	10	11	18	9	17	16	6	8	4	14	12	6	10	8	3	12	14	12	13	5	232	2.7
MAGGIO	4	1	1	3	2	2	3	7	13	8	10	8	35	16	27	35	32	25	18	6	9	7	3	5	279	3.2
GIUGNO	4	3	5	2	2	3	7	8	22	27	16	37	44	61	27	50	58	24	35	12	6	8	7	7	475	5.5
LUGLIO	12	9	10	7	13	5	5	17	49	55	52	59	37	43	31	95	92	36	40	28	9	8	8	19	737	8.5
AGOSTO	7	8	10	9	10	3	4	27	39	31	26	36	44	38	51	64	63	64	65	24	5	7	7	15	657	7.6
SETTEMBRE	5	4	6	4	6	2	3	8	16	20	23	46	27	31	24	56	28	35	33	6	4	5	2	4	398	4.6
OTTOBRE	4	6	8	4	5	5	7	7	6	13	15	14	16	36	21	31	27	20	27	6	6	7	3	5	298	3.5
NOVEMBRE	15	6	10	10	13	10	10	18	16	17	24	9	12	21	12	7	20	19	11	21	13	8	9	12	323	3.7
DICEMBRE	17	10	8	22	24	11	35	37	17	21	17	9	8	18	14	8	11	13	15	16	10	18	12	19	390	4.5
Max (m ³ /h)	17	27	27	22	25	20	40	37	49	55	52	59	44	61	51	95	92	64	65	28	31	20	29	20		
Max (L/s)	5	7	7	6	7	6	11	10	14	15	14	16	12	17	14	26	26	18	18	8	9	5	8	5		

- Modello stazionario con Q max (95 m³/h = 26.4 L/s);
- Modello stazionario con media dei picchi cioè (95+92)/2 oppure (51+64+63+64+65+24)/6;
- Modello stazionario con media del mese più critico (luglio, con 8.5 L/s);
- Modello transitorio su base annua (12 stress period, uno per mese) con individuazione del periodo peggiore;
- Modello transitorio con mese peggiore poi 2-3 giorni su base oraria;
- Altro...

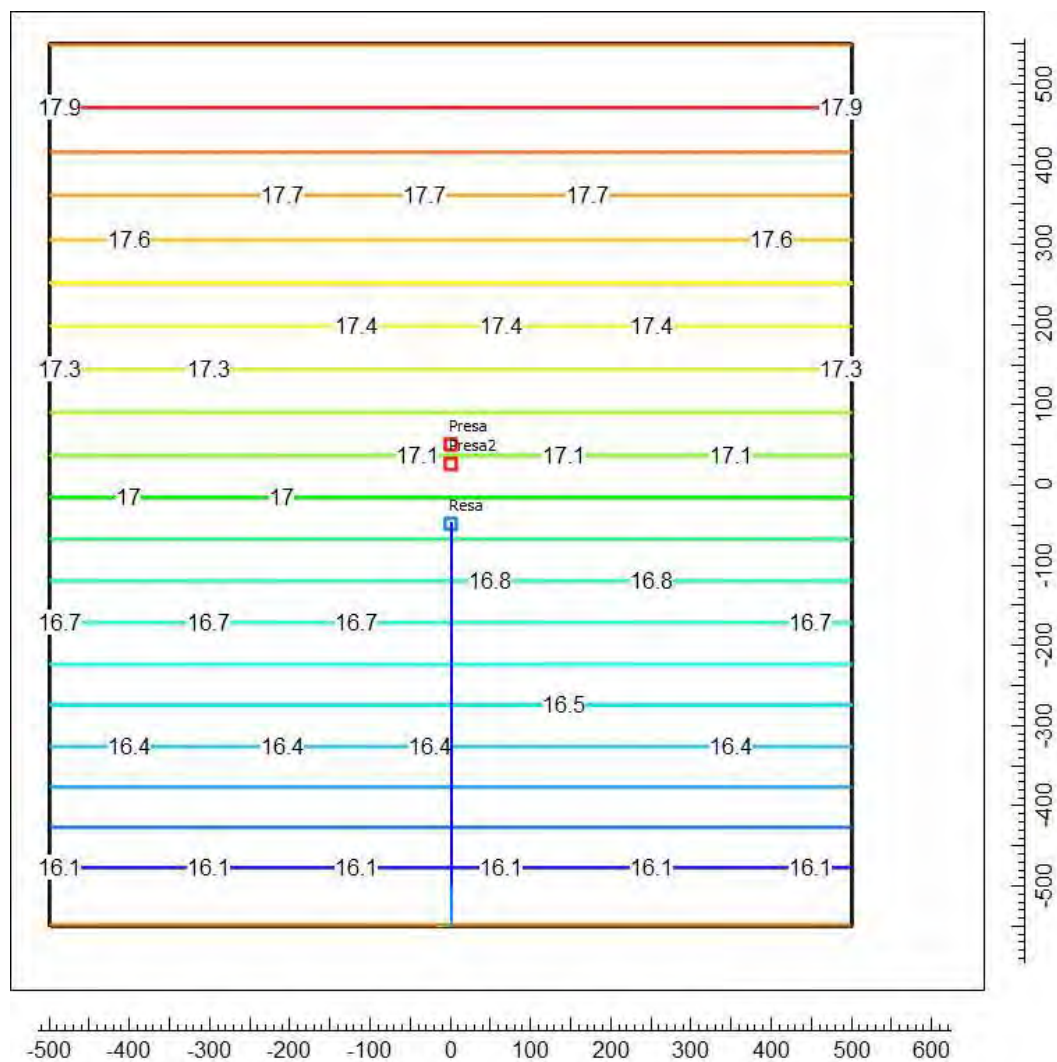
Partire sempre dallo scenario più cautelativo: se quello è verificato è già un valido punto di partenza. Poi farne qualche altro, anche per capire bene cosa succede.

Schema del modello semplificato



$$Q = KiA = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2}{1050} \cdot 1000 \cdot 17 = 3.23 \cdot 10^{-2}$$

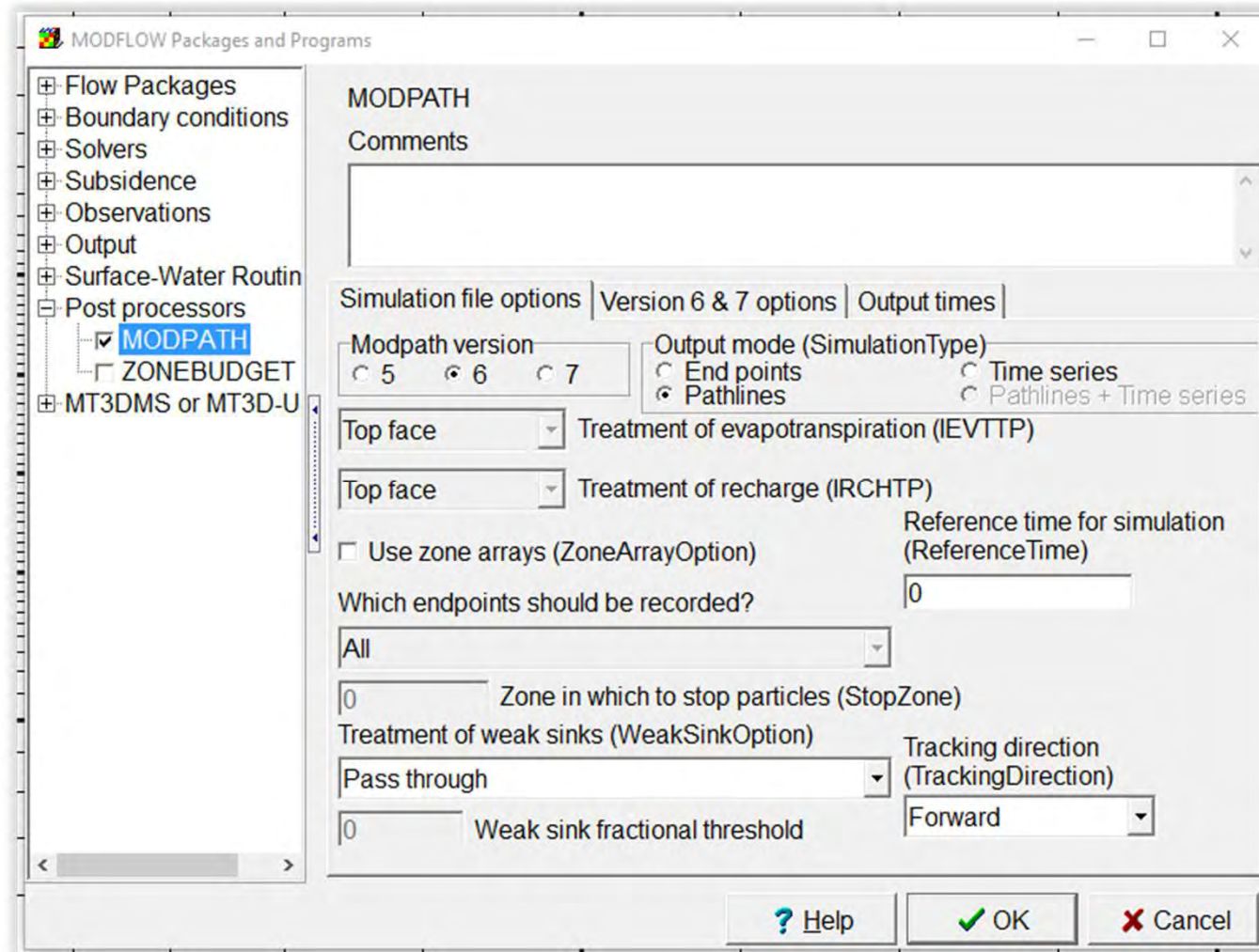
Schema del modello semplificato



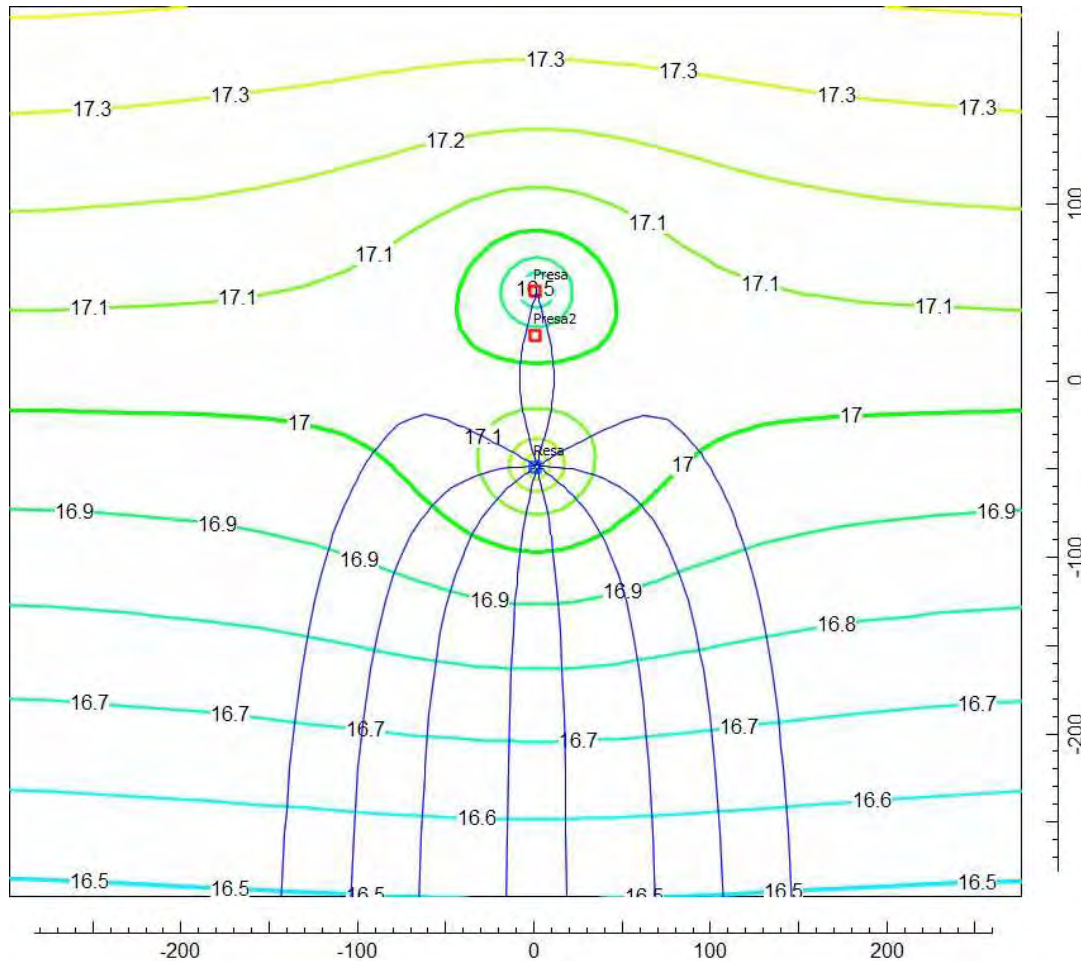
Condizione iniziale: pozzi spenti
e $i=2 \cdot 10^{-3}$

Mod: 1_esempio_deltah_V1
Head_P1_S1

Il postprocessore Modpath



Schema del modello semplificato

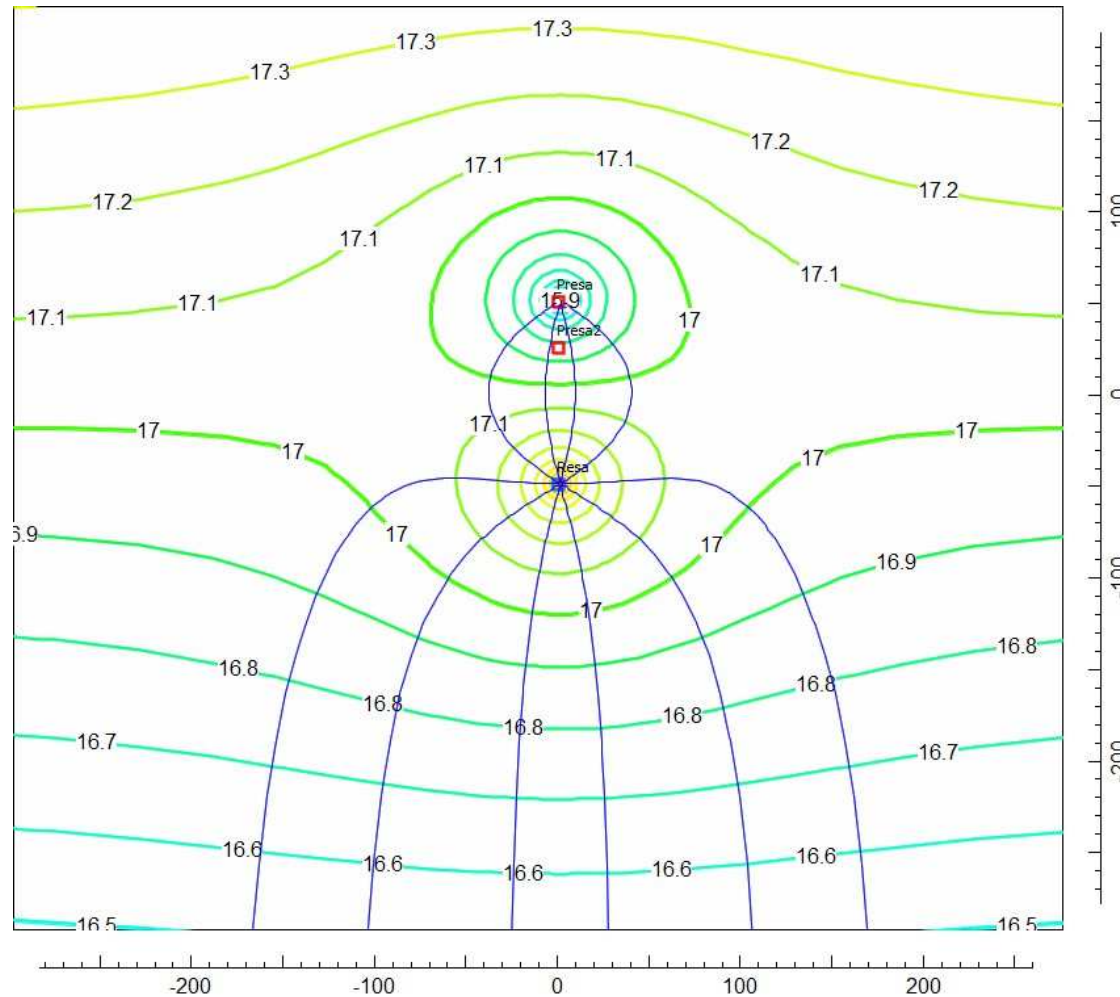


Condizioni stazionarie: $Q=15 \text{ L/s}$
e $i=2 \cdot 10^{-3}$

Andamento della piezometria

Mod: 1_esempio_deltah_V1
Head_P1_S1_1

Schema del modello semplificato

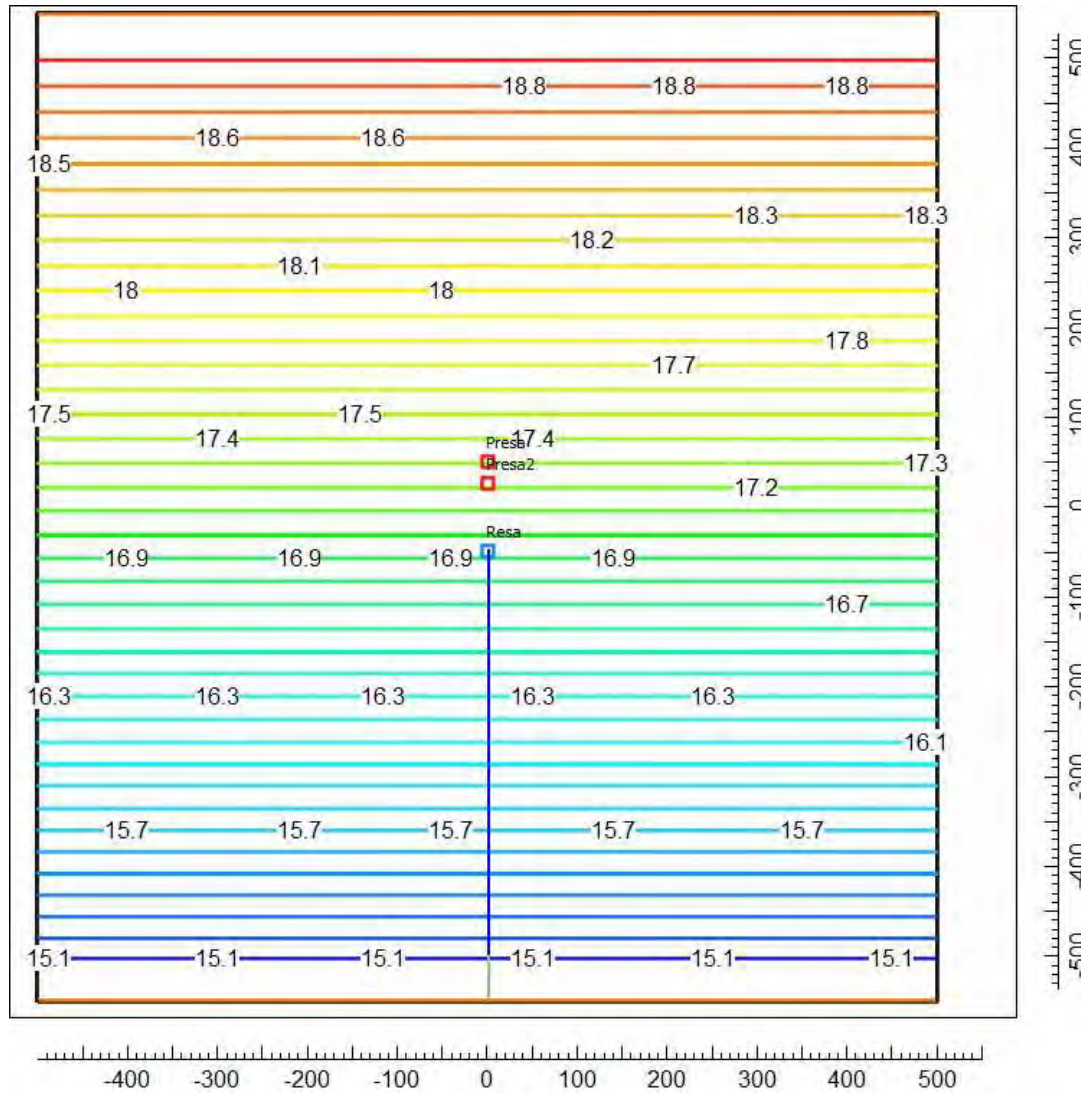


Condizioni stazionarie: $Q=25 \text{ L/s}$
e $i=2 \cdot 10^{-3}$

Andamento della piezometria

Mod: 1_esempio_deltah_V1
Head_P1_S1_2

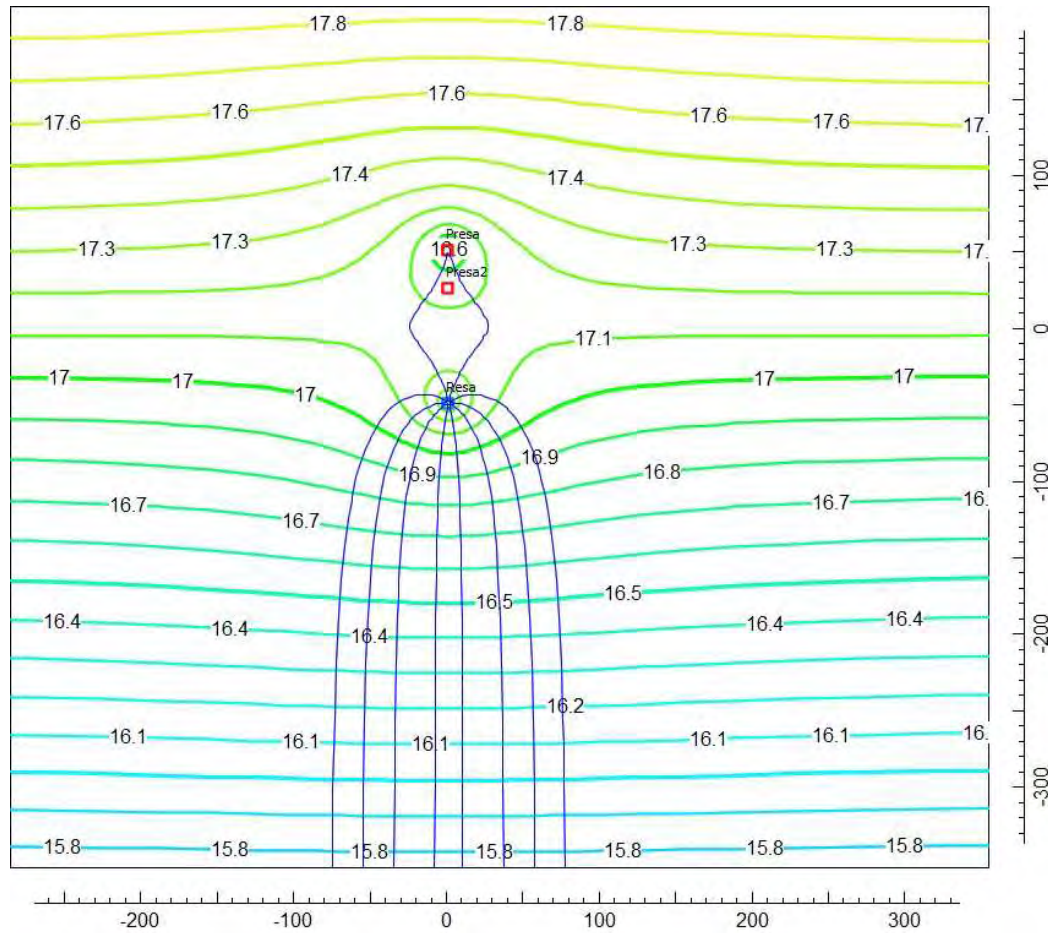
Schema del modello semplificato



Condizione iniziale: pozzi spenti
 $i=4 \cdot 10^{-3}$
 $Q=6.46 \cdot 10^{-2}$

Mod: 1_esempio_deltah_V1
 Head_P1_S1_3

Schema del modello semplificato

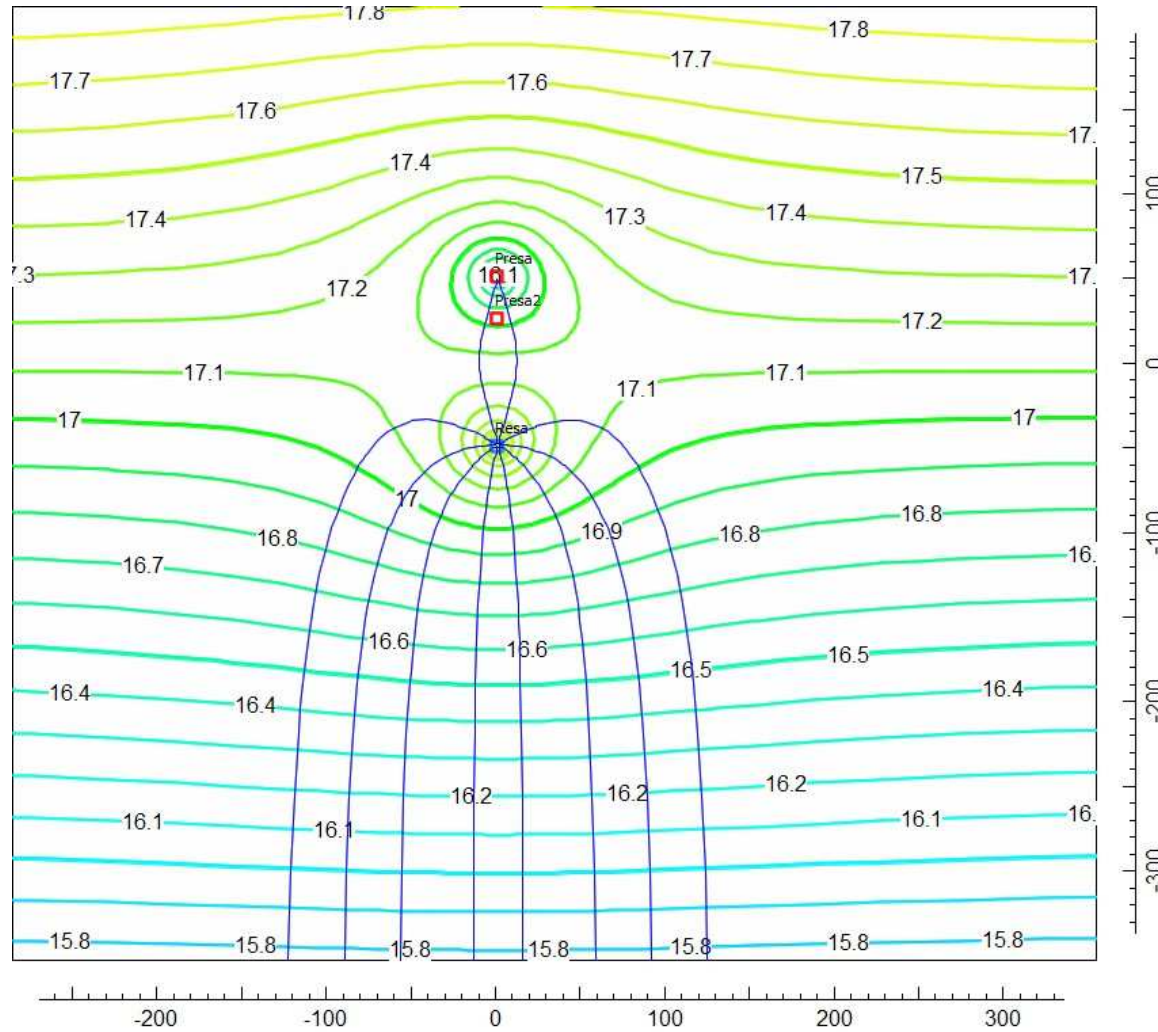


Condizioni stazionarie: $Q=15$ L/s
e $i=4 \cdot 10^{-3}$

Andamento della piezometria

Mod: 1_ esempio_deltah_V1
Head_P1_S1_4

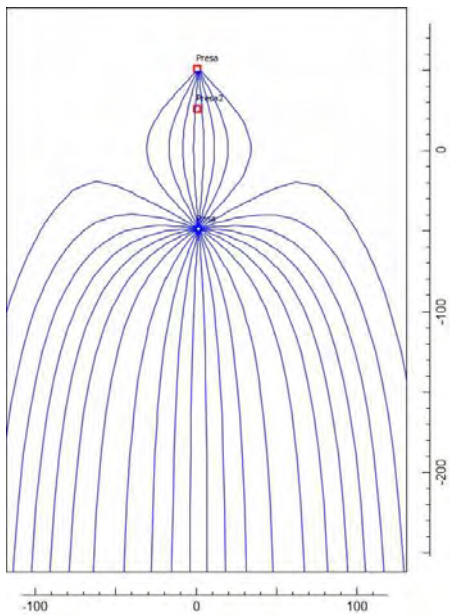
Schema del modello semplificato



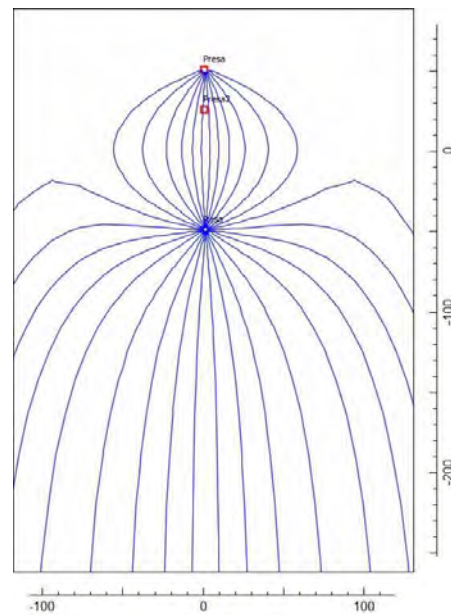
Condizioni stazionarie: $Q=25 \text{ L/s}$
e $i=4 \cdot 10^{-3}$

Andamento della piezometria

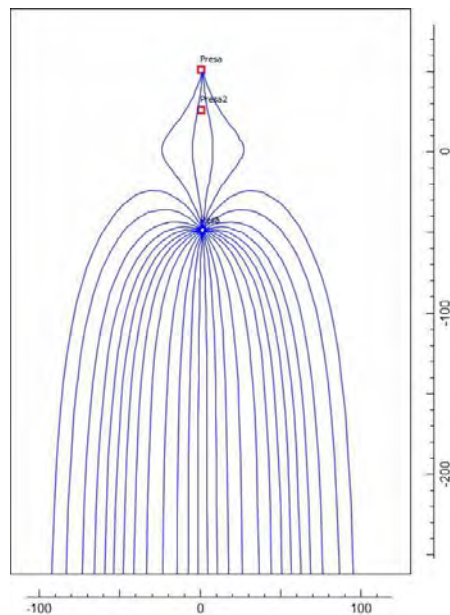
Mod: 1_ esempio_deltah_V1
Head_P1_S1_5



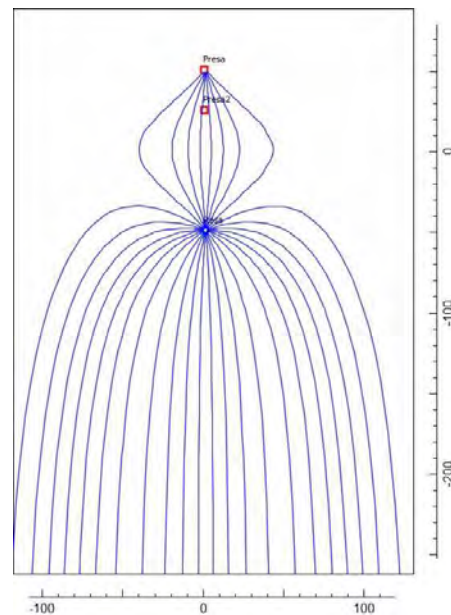
$Q=15 \text{ L/s};$
 $i=2 \cdot 10^{-3}$



$Q=25 \text{ L/s};$
 $i=2 \cdot 10^{-3}$



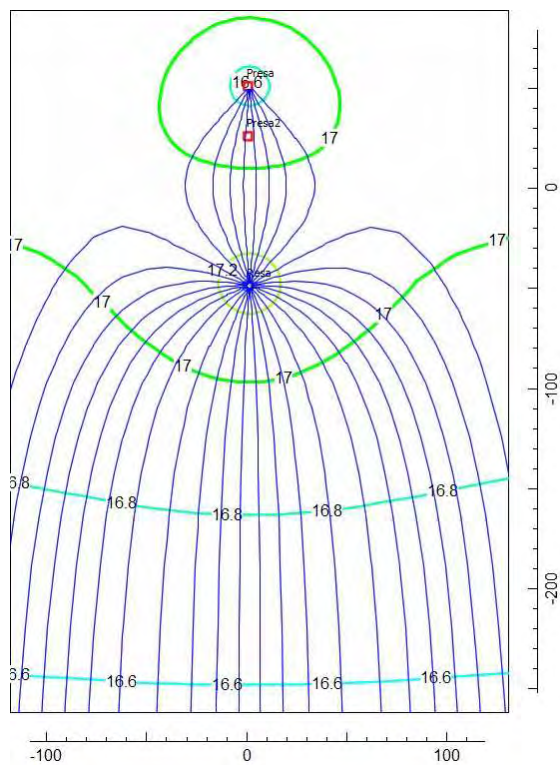
$Q=15 \text{ L/s};$
 $i=4 \cdot 10^{-3}$



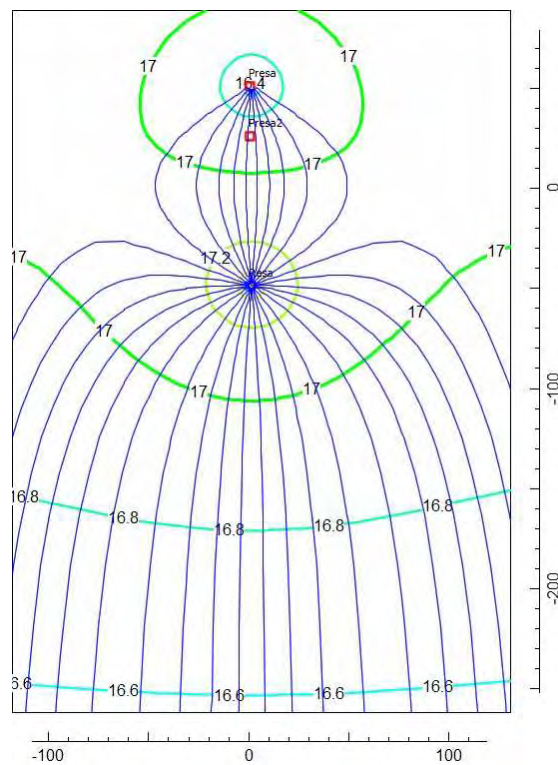
$Q=25 \text{ L/s};$
 $i=4 \cdot 10^{-3}$

Il ruolo della conducibilità idraulica

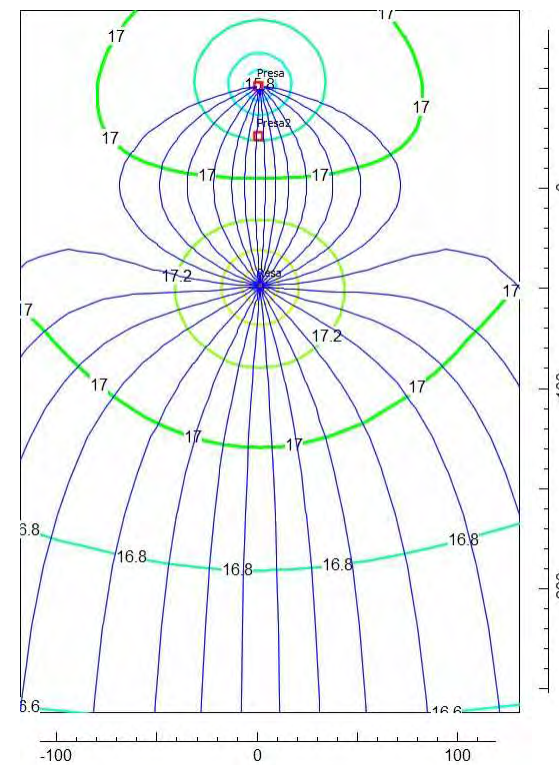
$K=1 \cdot 10^{-3}$



$K=8 \cdot 10^{-4}$



$K=5 \cdot 10^{-4}$

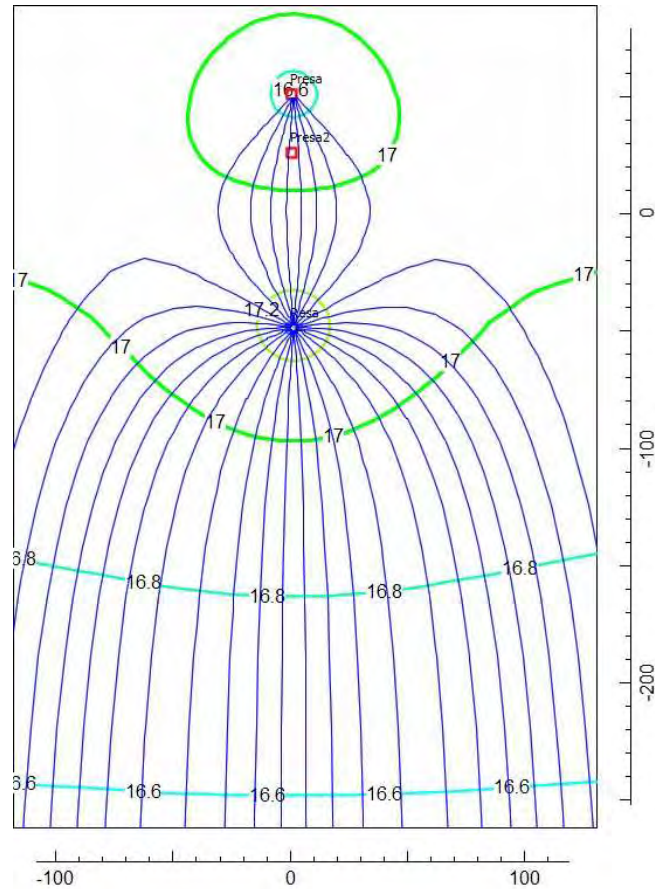


Condizioni per tutti i modelli: $i=2 \cdot 10^{-3}$ e $Q=0.015 \text{ m}^3/\text{s}$

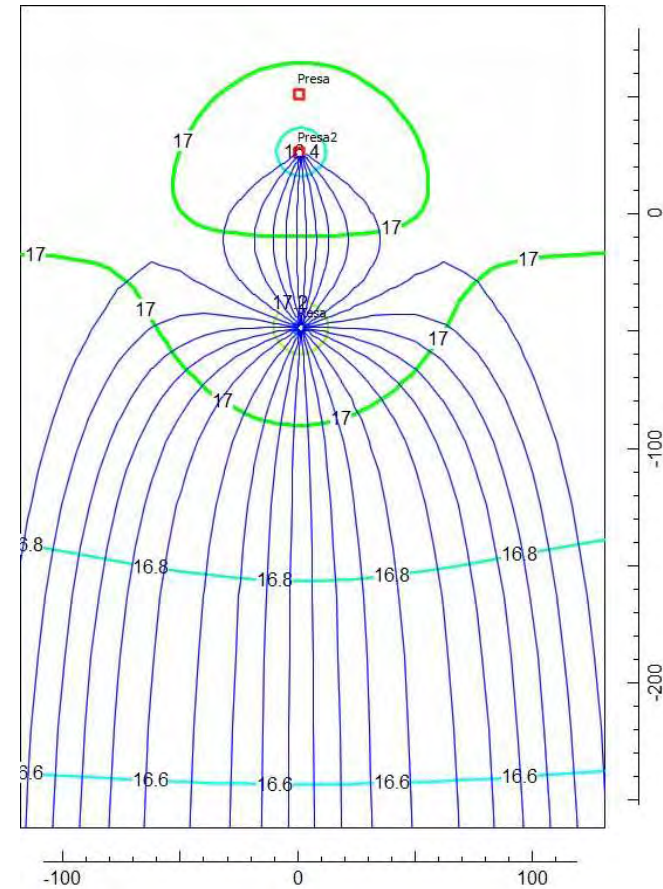
Distanza delle aree di presa e di resa



Pozzi a 100 m di distanza

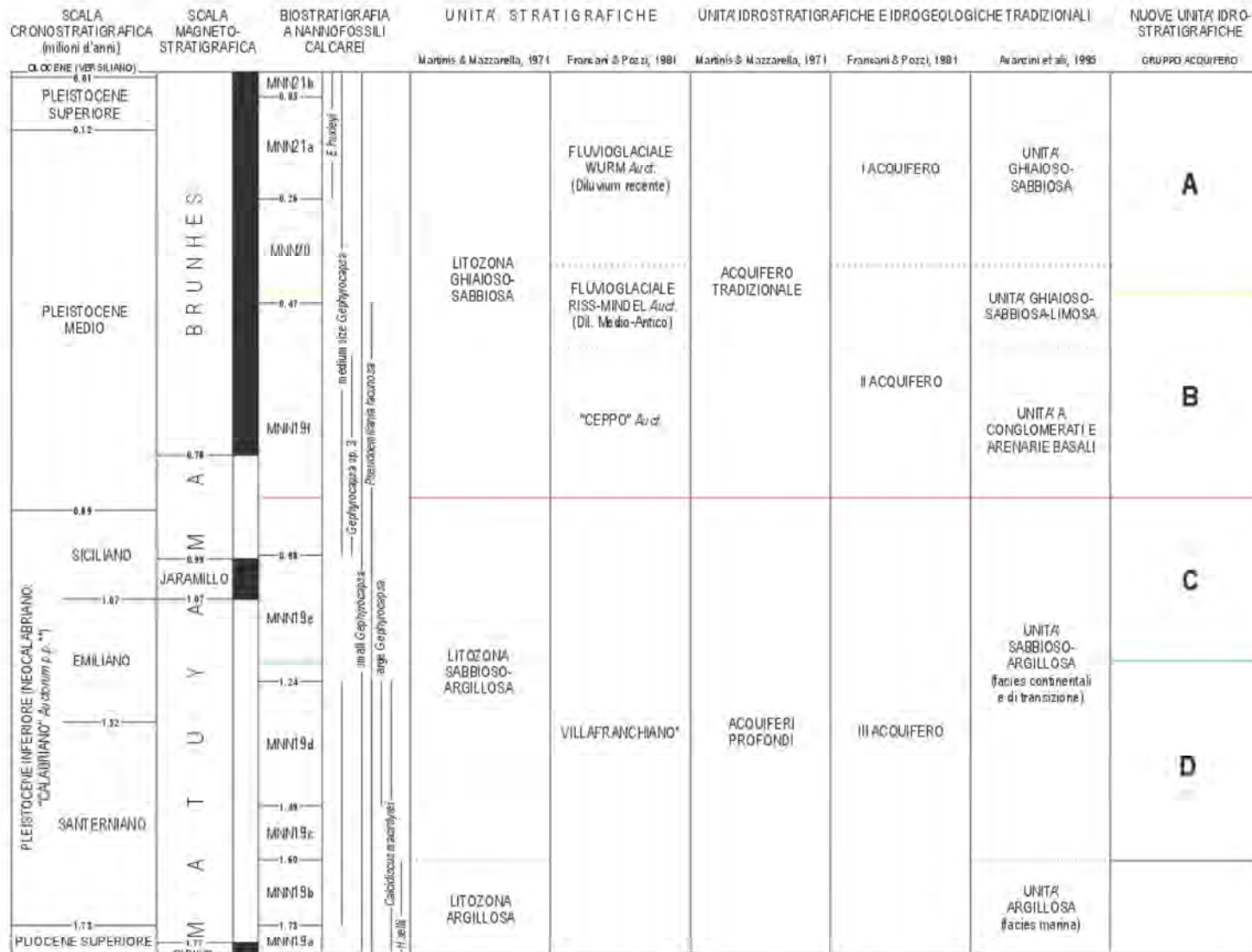


Pozzi a 75 m di distanza



Condizioni per tutti i modelli: $i=2 \cdot 10^{-3}$, $Q=0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ e $K=1 \cdot 10^{-3}$

Problema reale – Inquadramento generale



Problema reale – Inquadramento generale

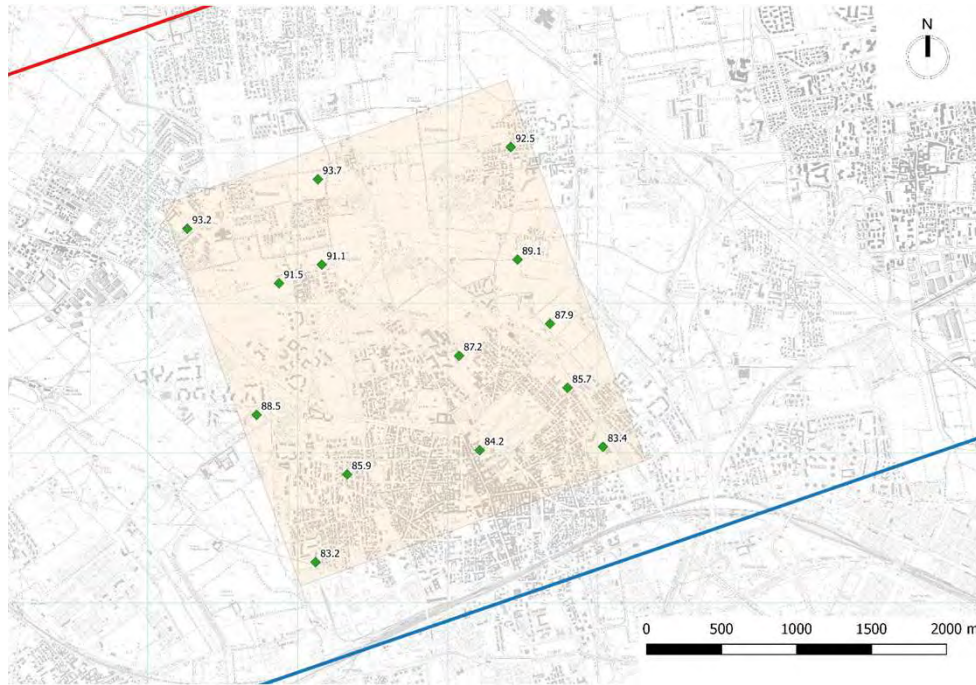
L'Unità A corrisponde al 1° Acquifero, la B al 2° acquifero, la C e D al 3° Acquifero.
A livello molto generale la trasmissività dell'Unità B è compresa tra $5 \cdot 10^{-3}$ e $8 \cdot 10^{-3}$ m²/s, anche se si possono avere valori più elevati in corrispondenza di paleovalvei fluviali o notevolmente più bassi laddove prevalgono le granulometrie sabbiose.

Nell'area della media pianura i valori di trasmissività dell'acquifero A sono di circa $2 \cdot 10^{-2}$ – $4 \cdot 10^{-2}$ m²/s; questi si mantengono relativamente elevati anche procedendo verso i settori più meridionali della Provincia di Milano, nonostante una progressiva diminuzione della granulometria, dove si riscontra una trasmissività di $8 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^{-2}$ m²/s.

I pozzi geotermici saranno perforati nell'Unità A che litologicamente è costituita da sedimenti Ghiaioso sabbiosi.



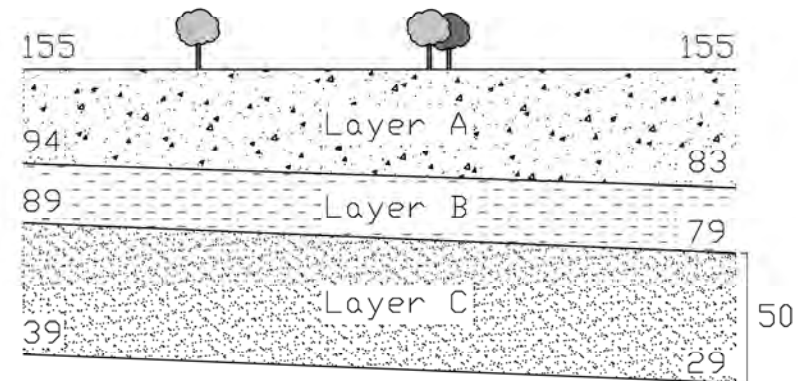
Problema reale – Inquadramento generale



Per tutti gli acquiferi: $S_y = n_e = 0.2$; $S_s = 1E-5 \text{ m}^{-1}$.

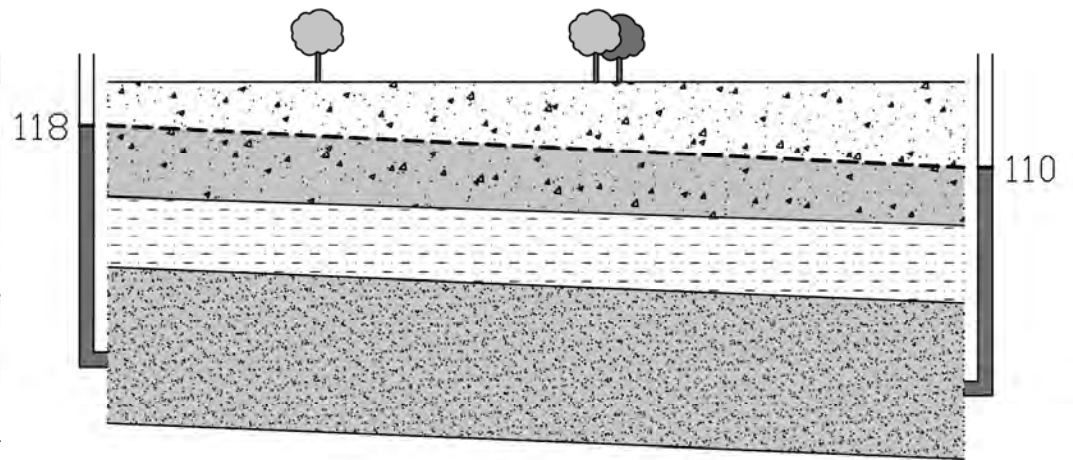
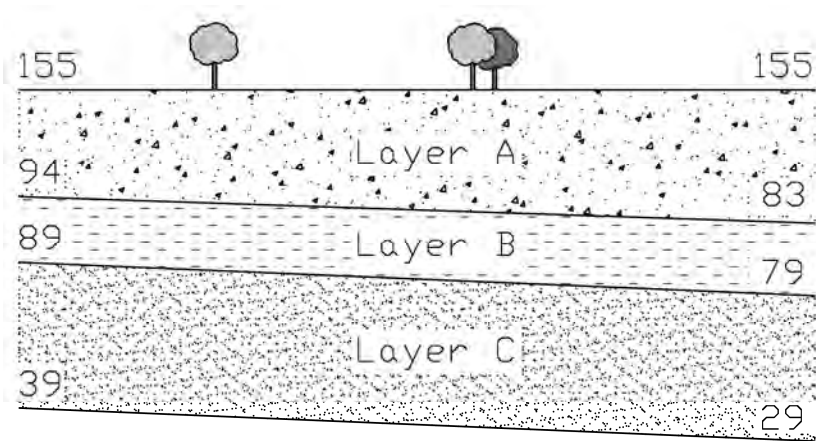
Il piano campagna è considerato orizzontale ed a quota di 155 m s.l.m.

Nell'area sono stati eseguiti, per altri scopi, una serie di sondaggi che hanno consentito di individuare la base dell'acquifero A



Acquifero	Layer	$K_x = K_y$	K_z
Acquifero A	1	0.0012 m/s	$K_h/10$
Separazione AB	2	$5.2E-6 \text{ m/s}$	$K_h/10$
Acquifero B	3	0.00045 m/s	$K_h/10$

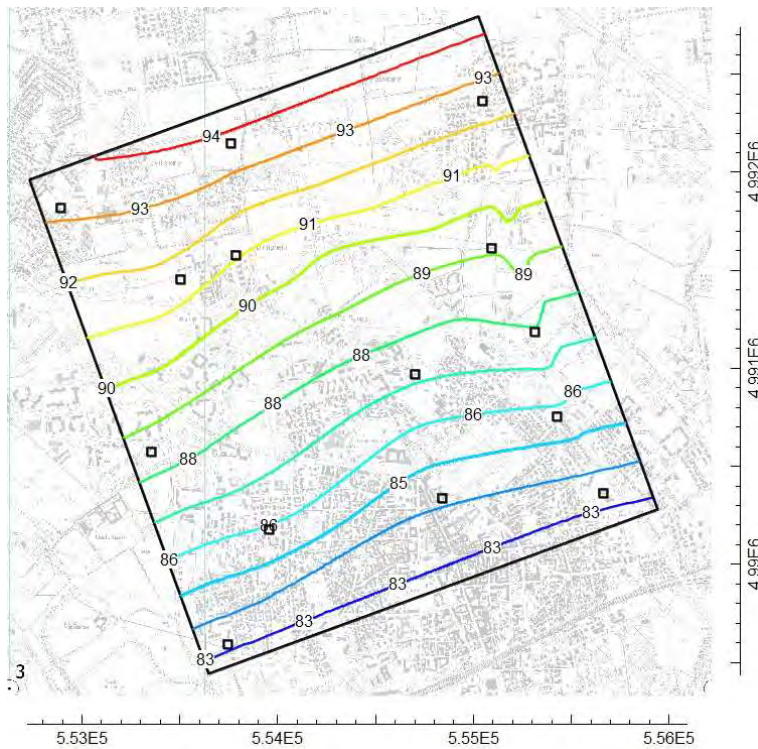
Problema reale - Piezometria



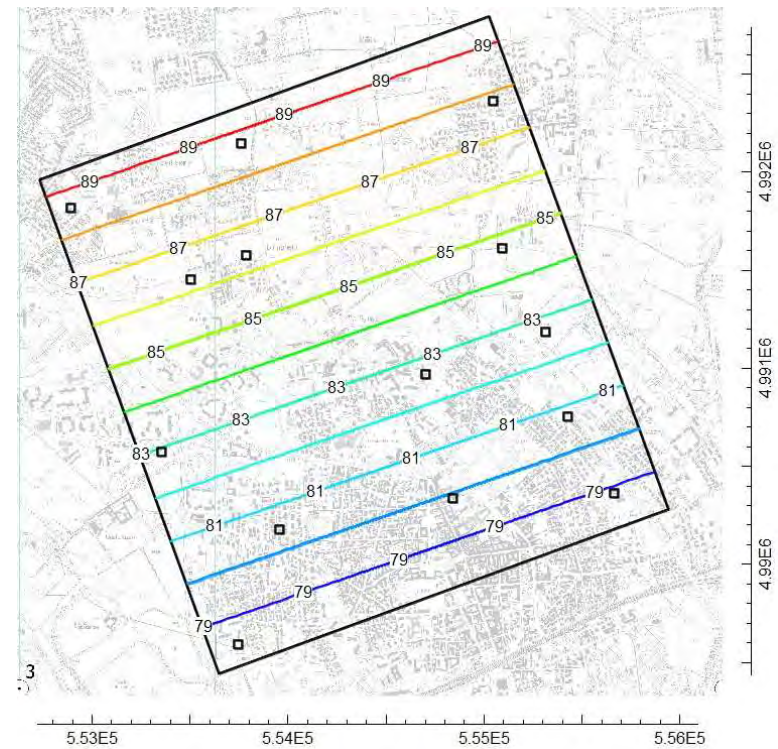
Acquifero	Layer	$K_v=K_y$	K_x
Acquifero A	1	0.0012 m/s	$K_h/10$
Separazione AB	2	5.2E-6 m/s	$K_h/10$
Acquifero B	3	0.00045 m/s	$K_h/10$

Problema reale – Quote del bottom dei layer del modello

Piano campagna: orizzontale a 155 m s.l.m.



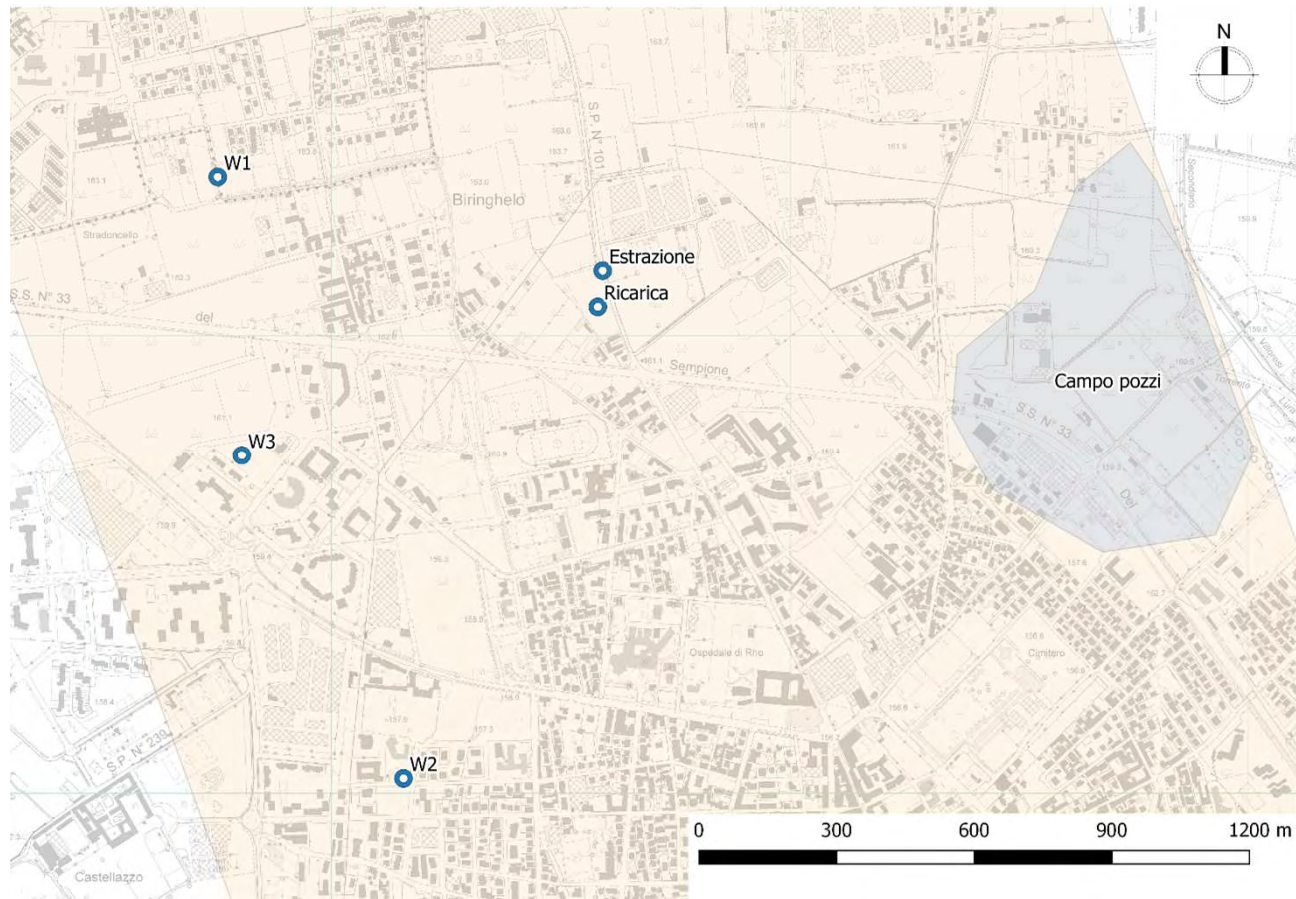
Base acquifero A



Base acquifero B

Spessore acquifero C: 50 m, costante.

Problema reale – Pozzi e campi pozzi attivi



I pozzi e il campo pozzi si assumono funzionanti ininterrottamente con portata costante. La temperatura dell'acqua di falda si assume costante nell'arco dell'anno ed uguale a 15 °C.

Punto	W1 (acquifero A)	W2 (acquifero A)	W3 (acquifero A)	Campo pozzi (acquifero A)	Campo pozzi (acquifero B)
Q [m ³ /s]	-0.004	-0.0032	-0.005	-0.0125	-0.117

Problema reale – Caratteristiche dell’impianto geotermico

L’impianto viene realizzato con **un pozzo di presa e un pozzo di resa**. Tutta l’acqua prelevata viene reimpressa quindi la portata del pozzo di presa è uguale e di segno contrario alla portata del pozzo di resa.

L’impianto **funziona ininterrottamente** tutto l’anno con un **ciclo estivo di 181.12 giorni** e un **ciclo invernale di 184.12 giorni**, con la durata dell’anno medio di 365.25 giorni.

L’impianto ha una **portata di picco di 0.025 m³/s**.

La temperatura dell’acqua di falda è di **15 °C**.

La **distanza** fra il pozzo di presa e il pozzo di resa è di circa **80 m**.

Stagione	Giorni funzionamento	Q media [m ³ /s]	T immissione [°C]
Estate	181.12 gg = 15649111 s	0.014	20
Inverno	184.12 gg = 15908489 s	0.007	10

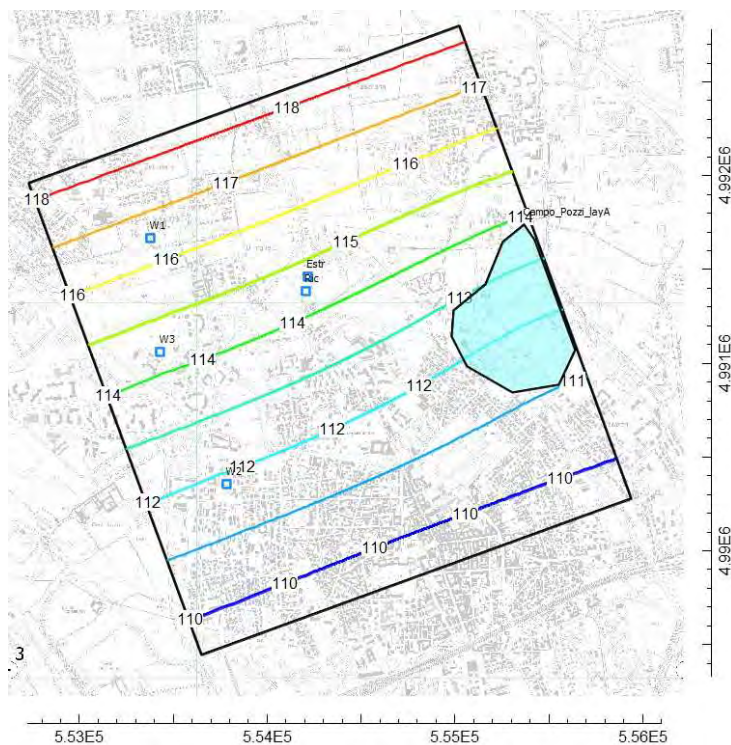
Problema reale – Scopo dello studio

- esaminare le **oscillazioni piezometriche massime** attorno all'impianto quando questo funziona **alla massima portata**, cioè alla portata di picco;
- valutare le **oscillazioni di temperatura** in corrispondenza del **pozzo di presa**;
- valutare le **sagoma del pennacchio termico**;
- valutare le **oscillazioni di temperatura in 4 punti di controllo**.

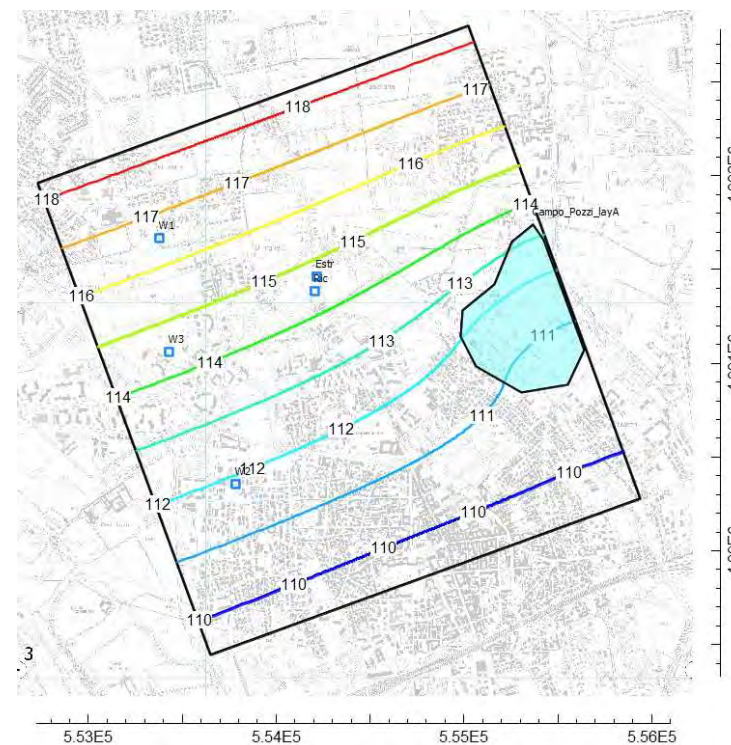


Punti di controllo:
Pz1, Pz2, Pz3 e Pz4

Problema reale – Assetto indisturbato (condizioni stazionarie)

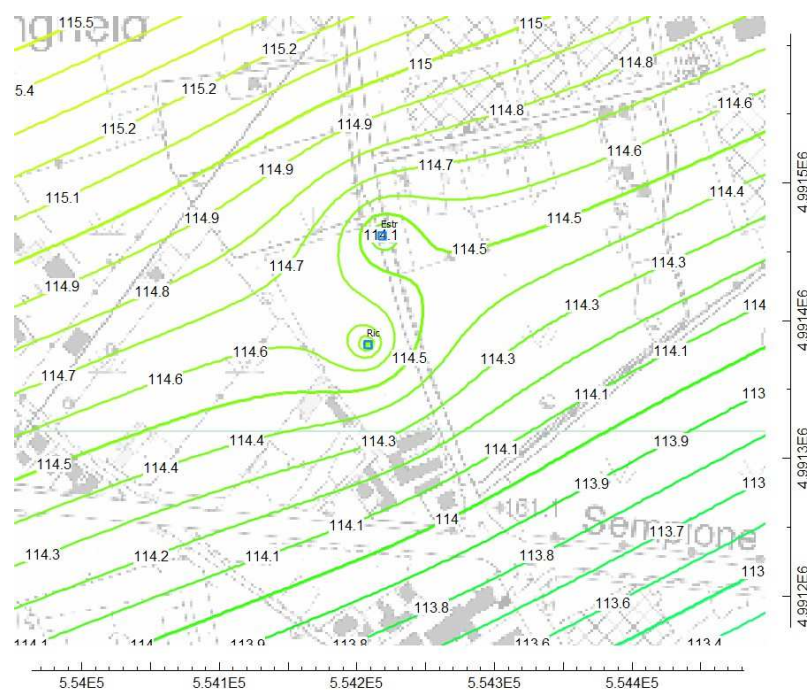


Layer 1 (acquifero A)

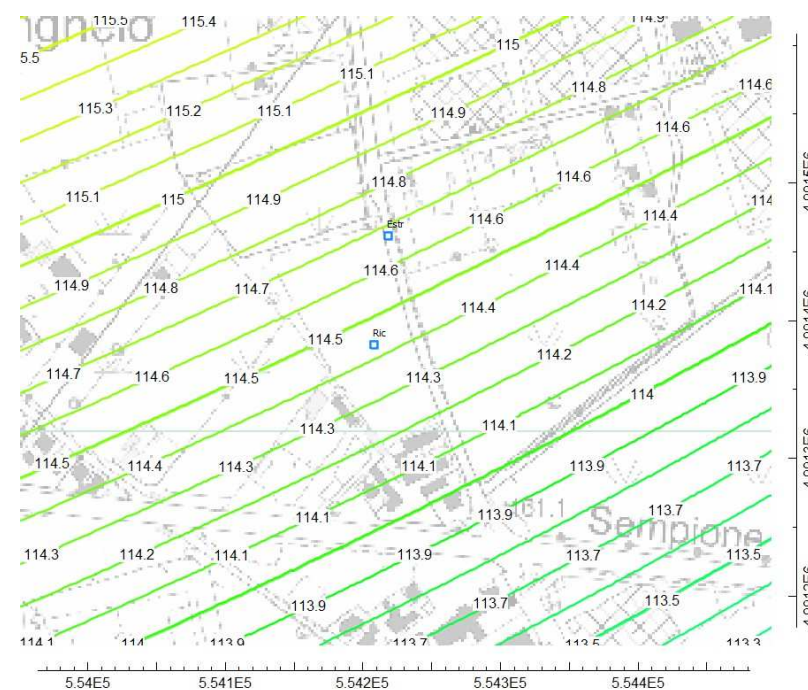


Layer 3 (acquifero B)

Problema reale – Portata massima (condizioni stazionarie)

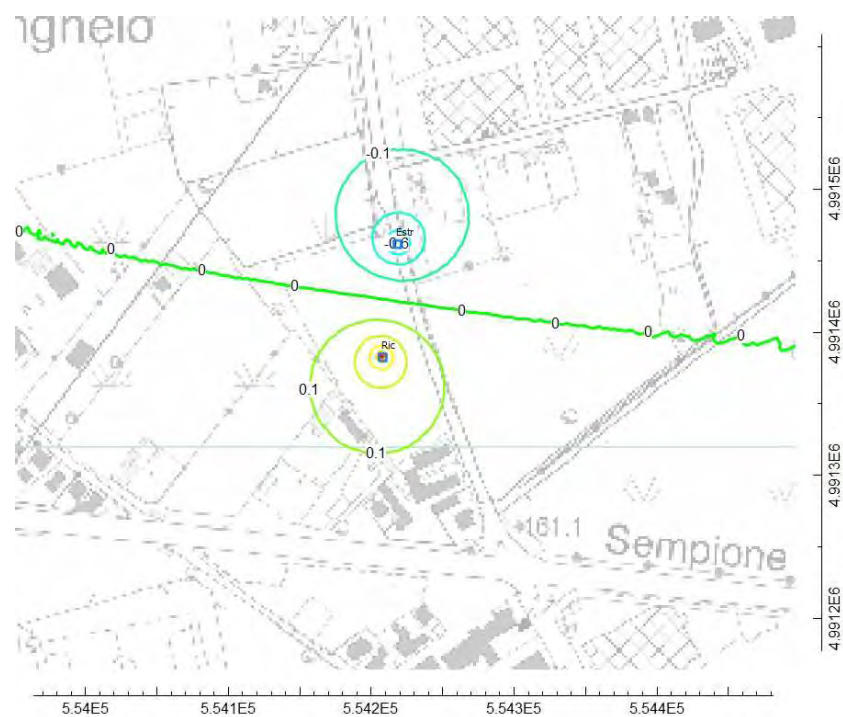


Layer 1 (acquifero A)

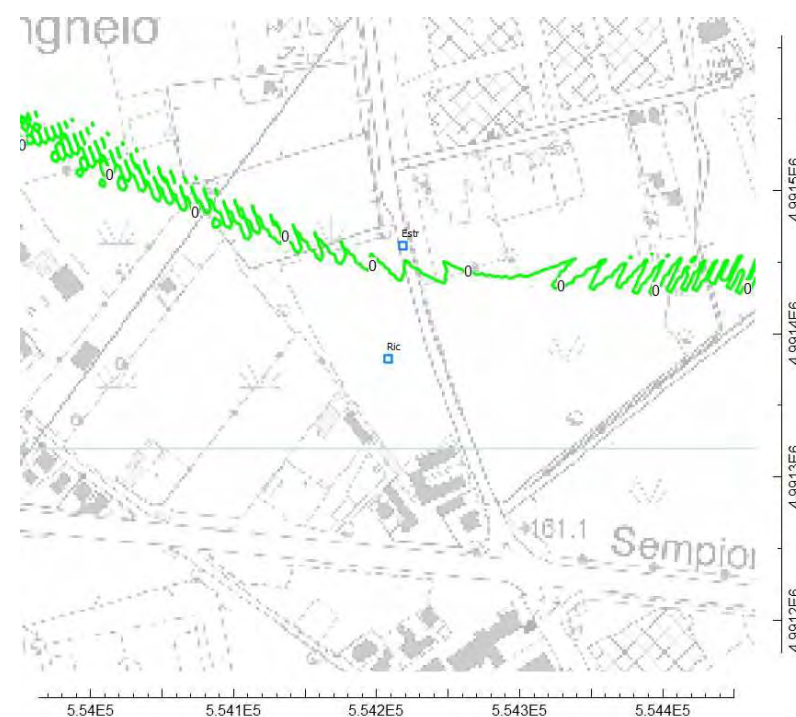


Layer 3 (acquifero B)

Problema reale – Portata massima Δh (condizioni stazionarie)

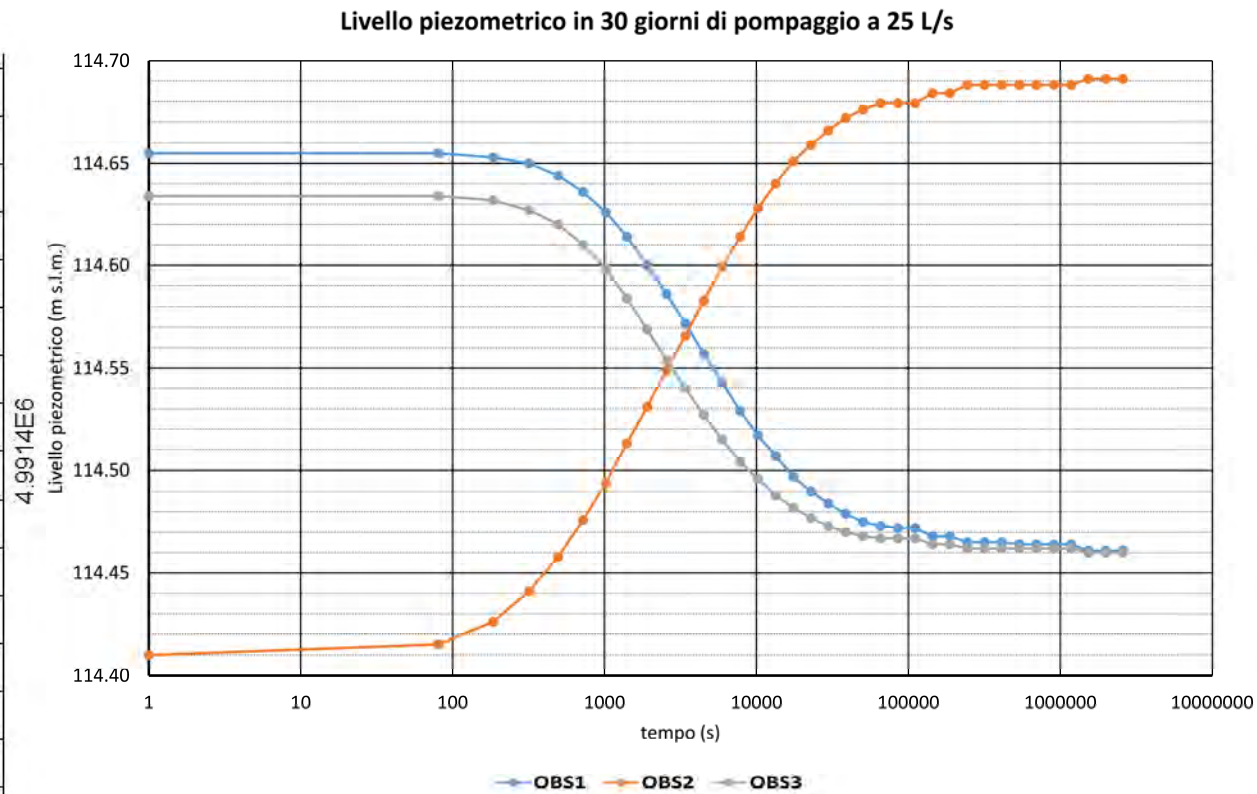
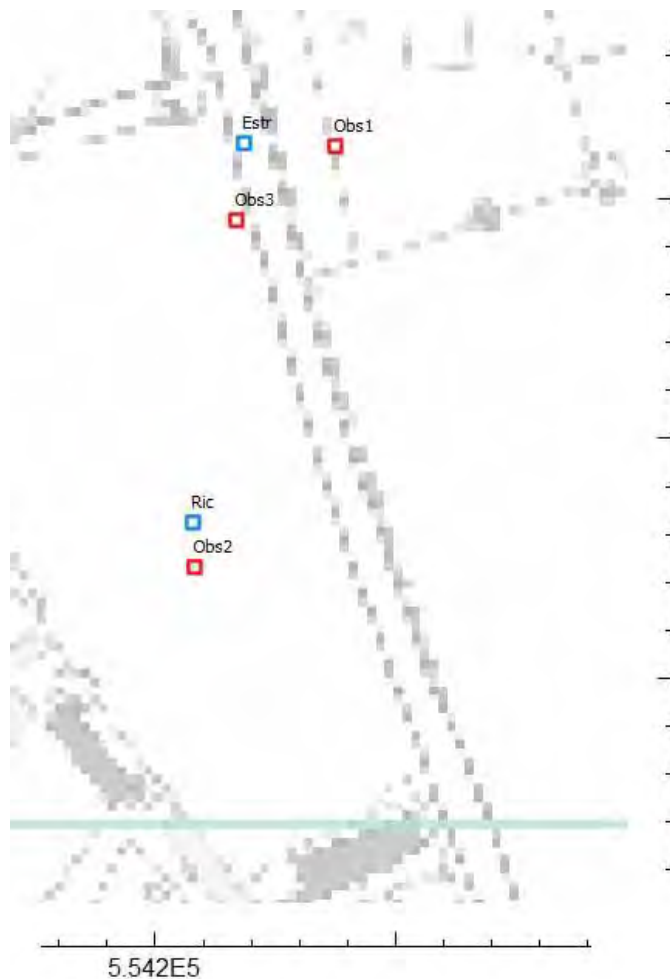


Layer 1 (acquifero A)



Layer 3 (acquifero B)

Problema reale – Portata massima Δh (condizioni transitorie)



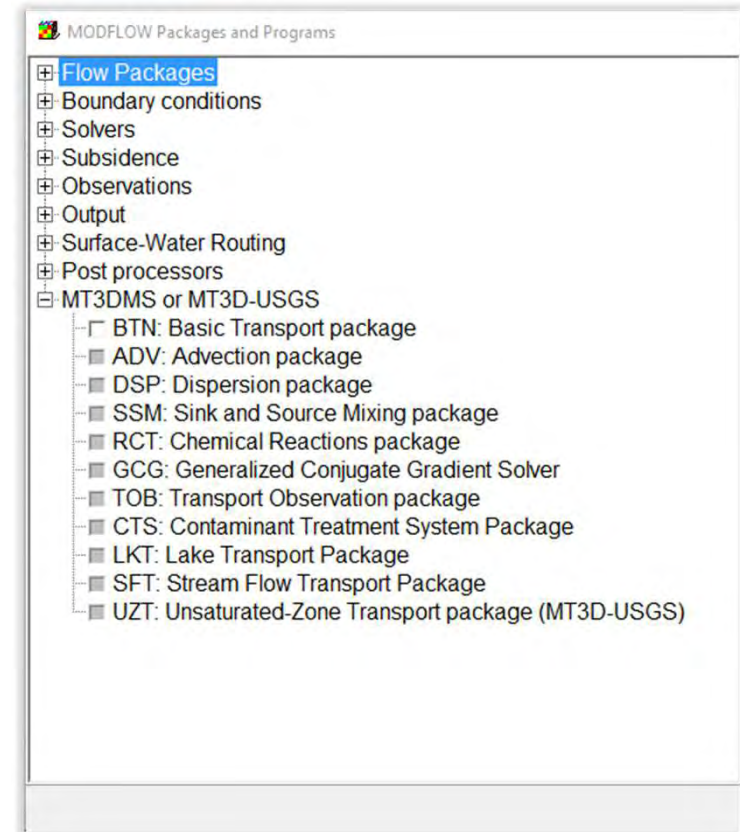
Il trasporto di calore con MT3DMS

MT3DMS è un codice di calcolo ad architettura modulare che consente la simulazione di avvezione, dispersione e reazioni chimiche di una sostanza che è entrata in soluzione con l'acqua di falda.

Funzionamento concettuale del pacchetto:

MODFLOW -> ricostruisce la distribuzione dei carichi idraulici nel modello

MT3DMS -> legge la distribuzione dei carichi idraulici preventivamente elaborate da MODFLOW e li utilizza per ricostruire la parte della simulazione che corrisponde al trasporto



Il trasporto di calore con MT3DMS

Effetti che determinano il trasporto di un soluto in acqua

Trasporto per gradiente di concentrazione

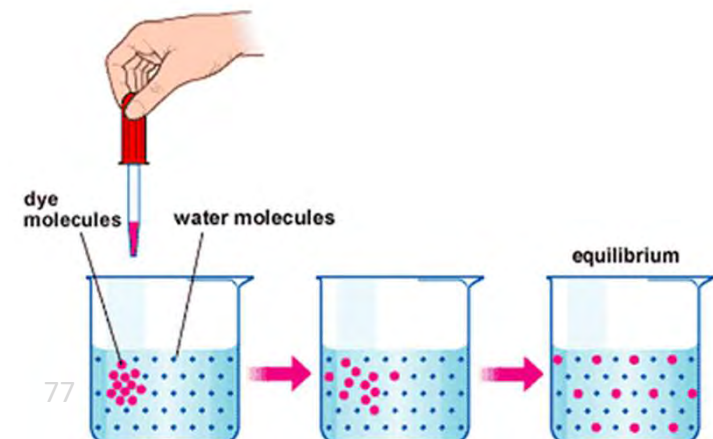
Un soluto in acqua si muoverà da una zona a concentrazione più elevata verso una zona a concentrazione più bassa

Questo processo è conosciuto come **diffusione molecolare** o **diffusione**.

Nel caso di acqua di falda soggetta ad un flusso la componente di movimento determinata dalla diffusione generalmente trascurabile.

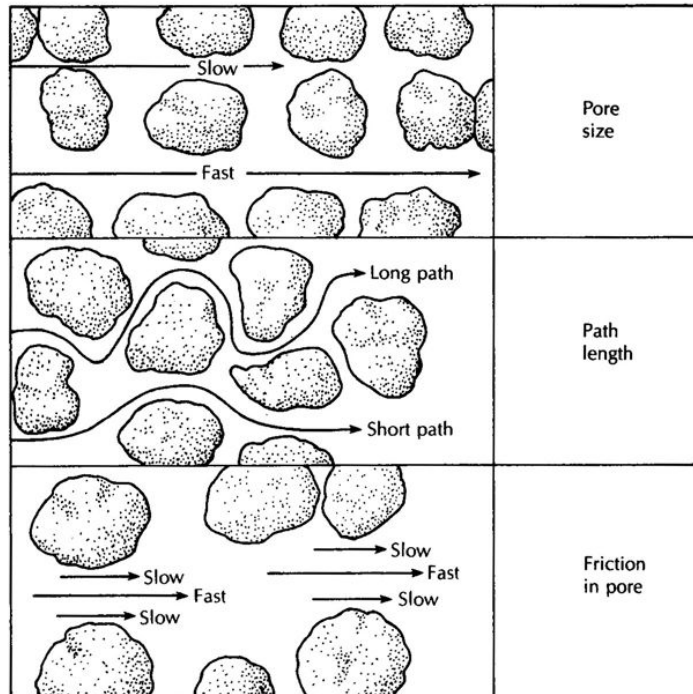
Trasporto per advezione

E' quella componente di trasporto che avviene in virtù del movimento dell'acqua di falda che, con il suo fluire fra i pori del terreno, porta con se il soluto disciolto.



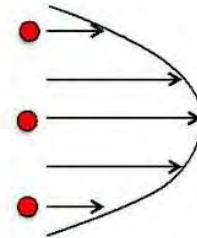
Il trasporto di calore con MT3DMS

Dispersione



Dispersion longitudinale

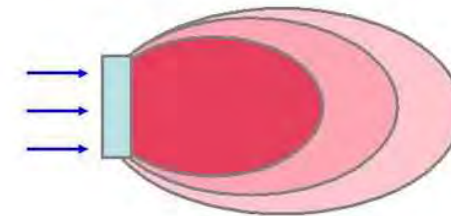
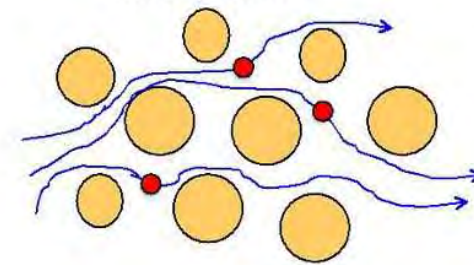
1. Variations in flow velocity



3. Causes the plume to spread

Dispersion trasversale

2. Different solute flow paths



Risultato finale

Il trasporto di calore con MT3DMS

L'equazione che descrive il **trasporto di massa** è **concettualmente simile** all'equazione che descrive il **trasporto di calore**.

Con opportuni accorgimenti è possibile **usare MT3DMS** (concepito per la simulazione del trasporto di massa), allo scopo di **simulare il trasporto di calore**.

Il calore, in questo caso, viene trattato dal software come se fosse un **«inquinante»**.

Va bene solo se nel modello le differenze di temperatura sono abbastanza contenute (la densità e viscosità dell'acqua nel modello è costante).

Per capire:

L'acqua di falda a 15 °C è analogo di acqua di falda nella quale è disciolto in maniera omogenea **l'inquinante «Temp» a concentrazione 15**;

Un pozzo che immette **14 L/s** di acqua con temperatura di **18 °C** è analogo di un pozzo che scarica in falda acqua ad una portata di **14 L/s** con disciolto **inquinante «Temp» a concentrazione 18**.

Problema reale – Simulazione del trasporto di calore

Stagione	Giorni funzionamento	Q media [m ³ /s]	T immissione [°C]
Estate	181.12 gg = 15649111 s	0.014	20
Inverno	184.12 gg = 15908489 s	0.007	10

Starting time	Ending time	Temp concentration or mass-loading
0	1	T_Fondo
1	15649112	T_Inverno
15649112	31557601	T_Estate
31557601	47206712	T_Inverno
47206712	63115201	T_Estate
63115201	78764312	T_Inverno
78764312	94672801	T_Estate
94672801	110321912	T_Inverno
110321912	126230401	T_Estate
126230401	141879512	T_Inverno
141879512	157788001	T_Estate
157788001	173437112	T_Inverno
173437112	189345601	T_Estate
189345601	204994712	T_Inverno
204994712	220903201	T_Estate
220903201	236552312	T_Inverno

21 Number of times

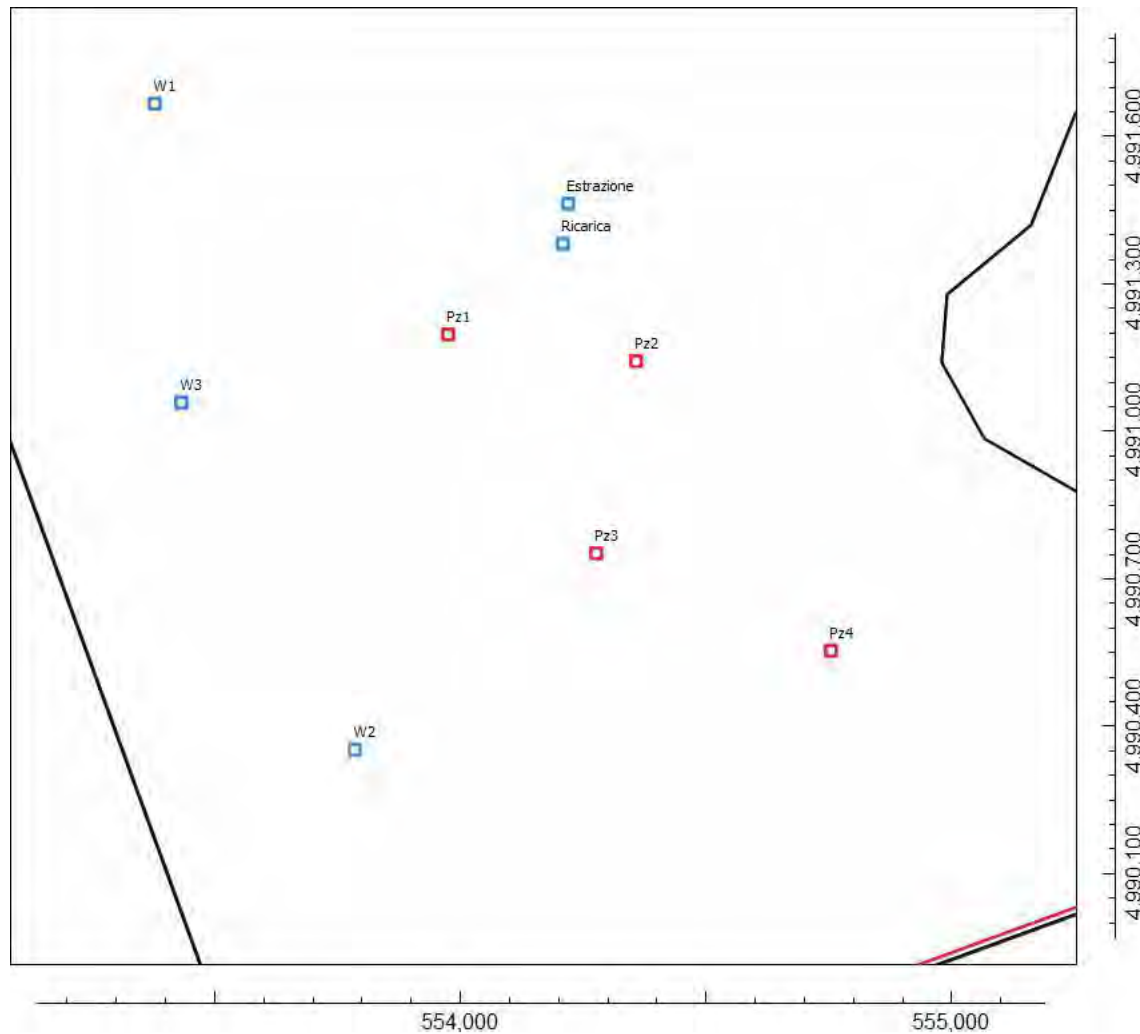
Formula		
Starting time	Ending time	Pumping rate
0	1	Q_Stop
1	15649112	Q_Inverno
15649112	31557601	Q_Estate
31557601	47206712	Q_Inverno
47206712	63115201	Q_Estate
63115201	78764312	Q_Inverno
78764312	94672801	Q_Estate
94672801	110321912	Q_Inverno
110321912	126230401	Q_Estate
126230401	141879512	Q_Inverno
141879512	157788001	Q_Estate
157788001	173437112	Q_Inverno
173437112	189345601	Q_Estate

21 Number of times

Pumping rate interpretation

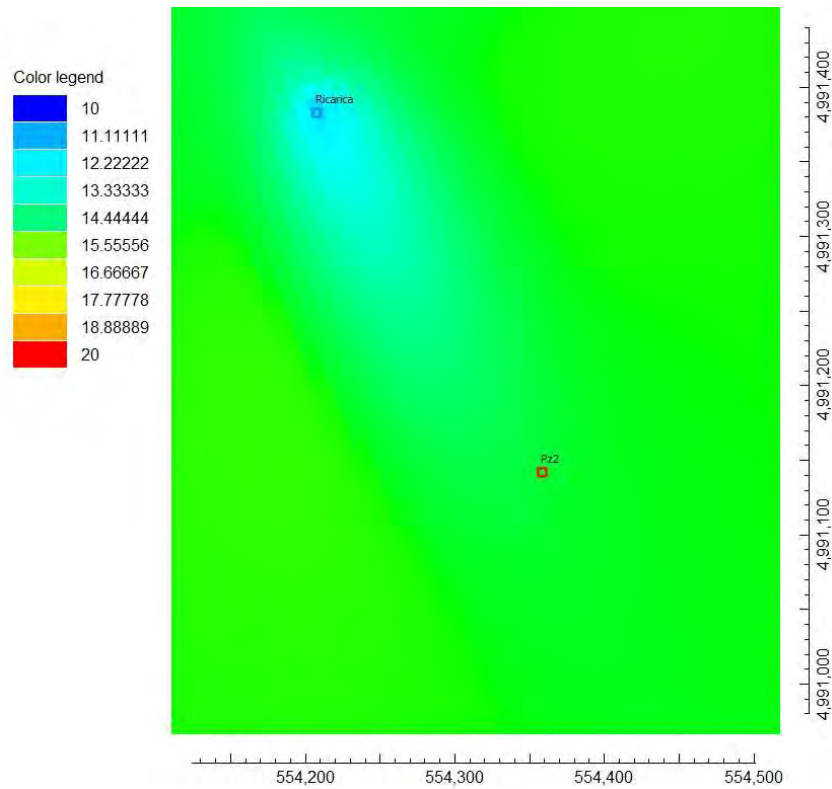
La simulazione si estende di solito per 10 anni

Problema reale – Simulazione del trasporto di calore

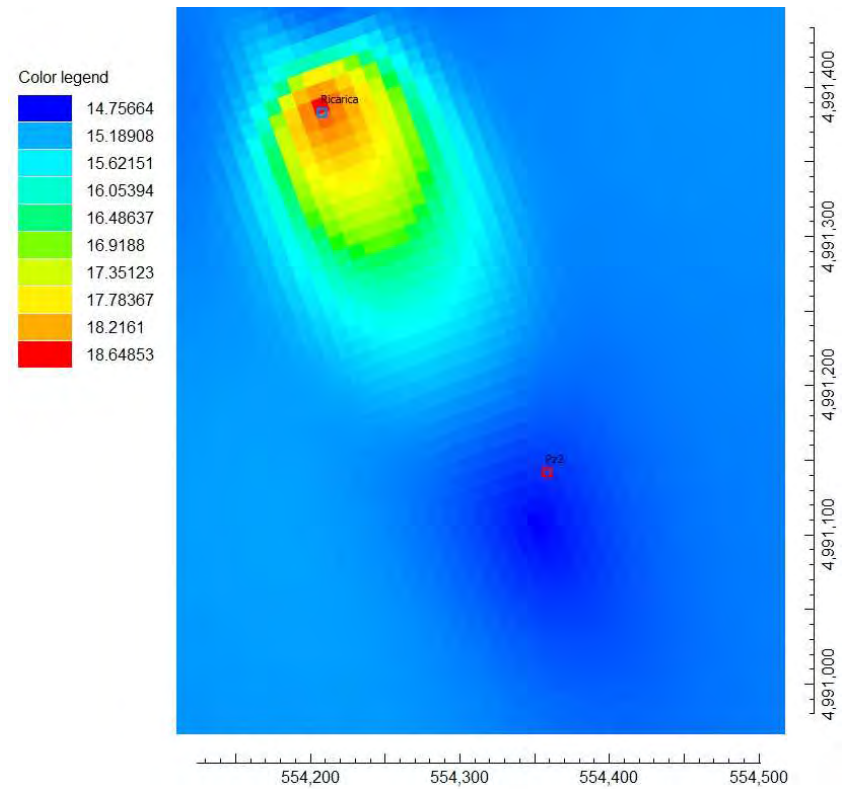


Distanza da ricarica
Ricarica -> 0 m
Estrazione -> 80 m
Pz1 -> 297 m
Pz2 -> 284 m
Pz3 -> 638 m
Pz4 -> 1000 m

Problema reale – Simulazione del trasporto di calore

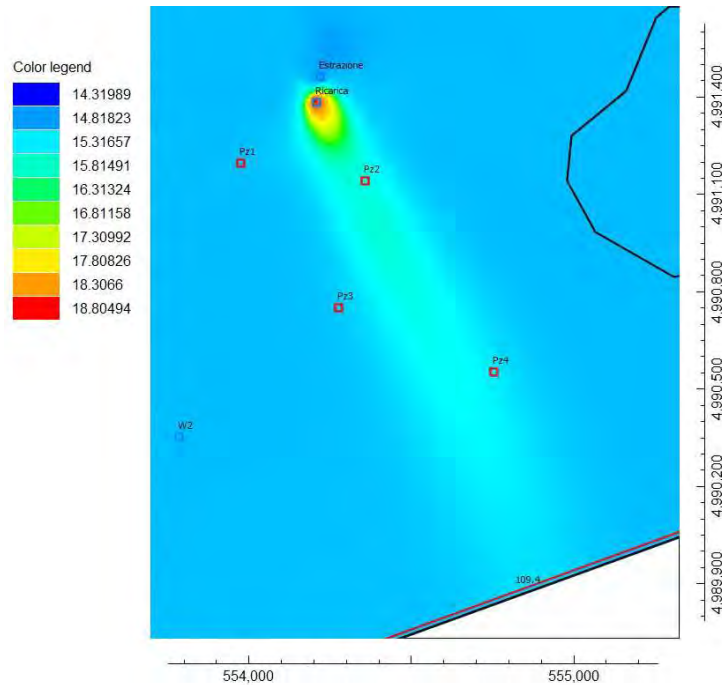


Inverno 1

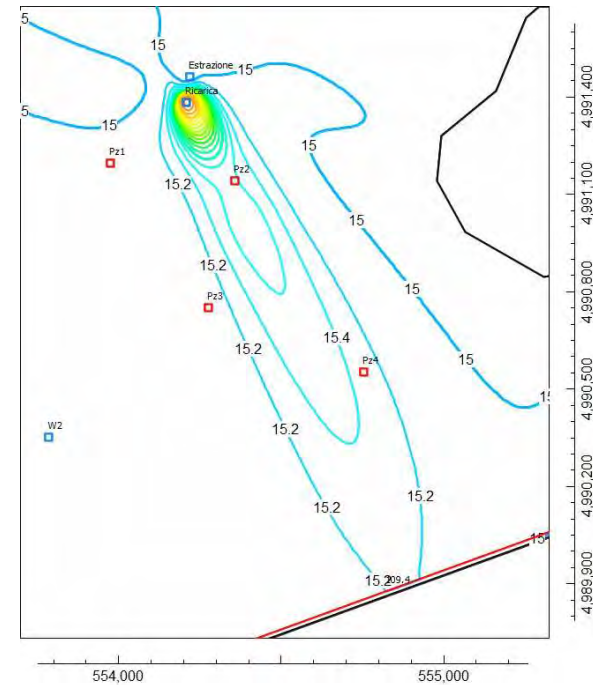


Estate 1

Problema reale – Simulazione del trasporto di calore



Fine estate 10

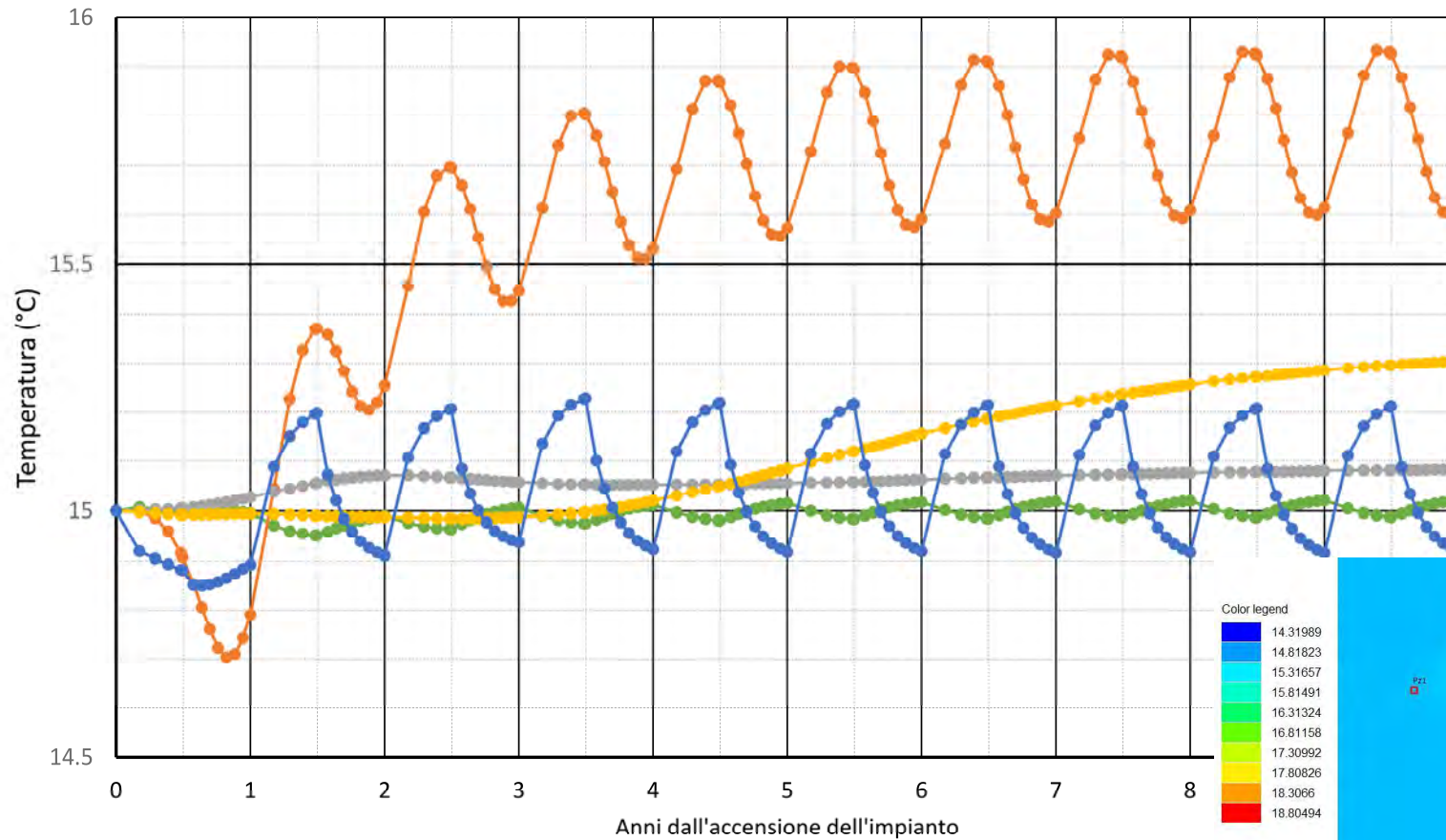


Fine estate 10

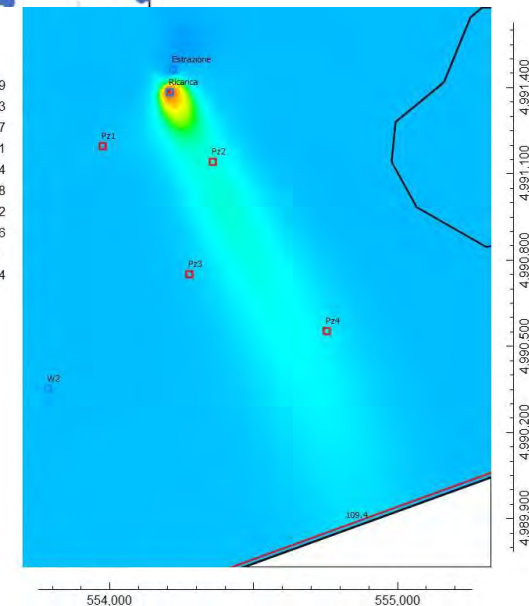
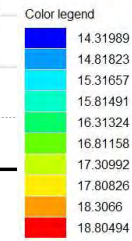
Problema reale – Simulazione del trasporto di calore



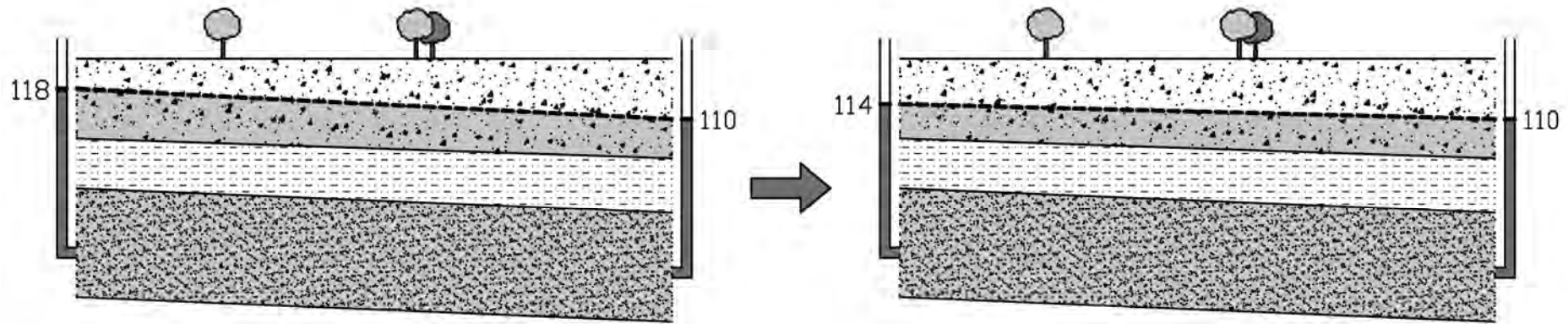
Andamento della temperatura nel tempo



— PZ1 — PZ2 — PZ3 — PZ4 — Estrazione

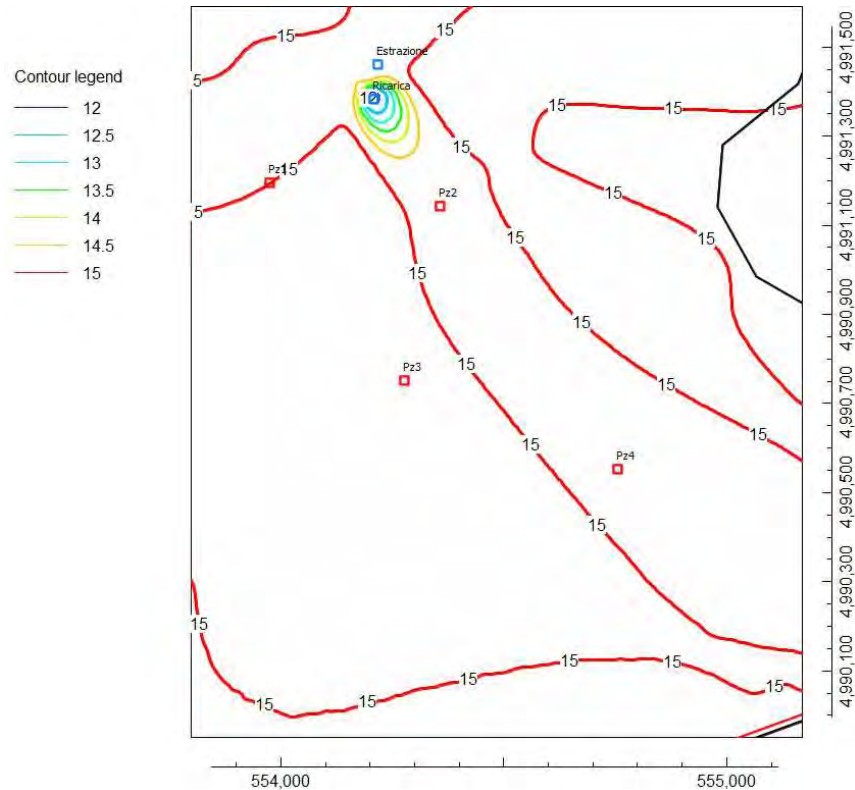


Problema reale – gradiente idraulico dimezzato

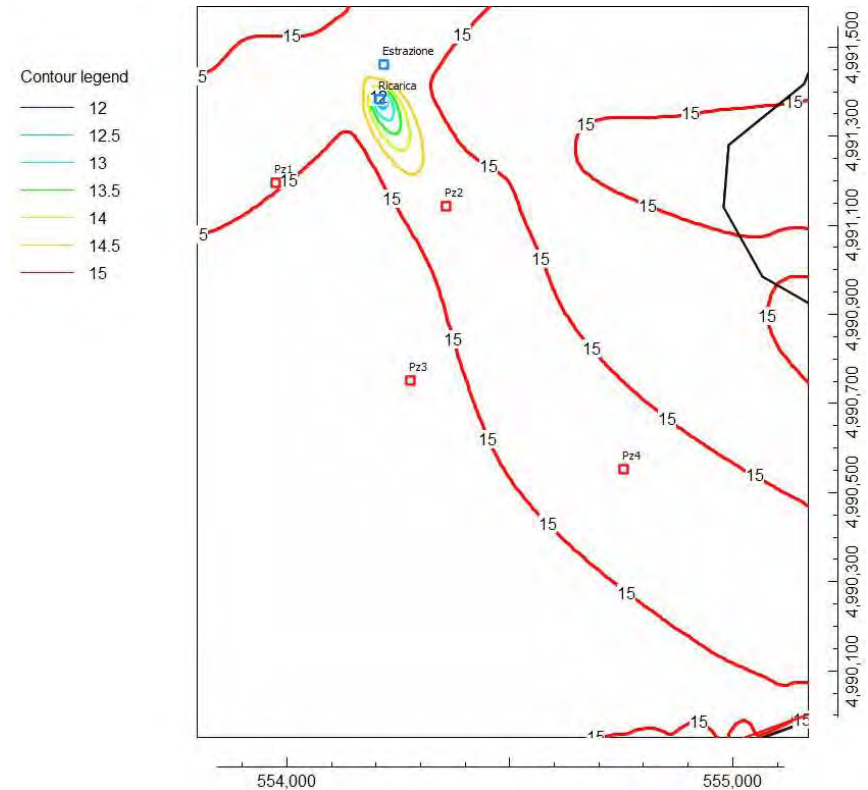


Modello uguale al precedente ma con gradiente idraulico dimezzato

Problema reale – gradiente idraulico dimezzato – Fine inverno 1

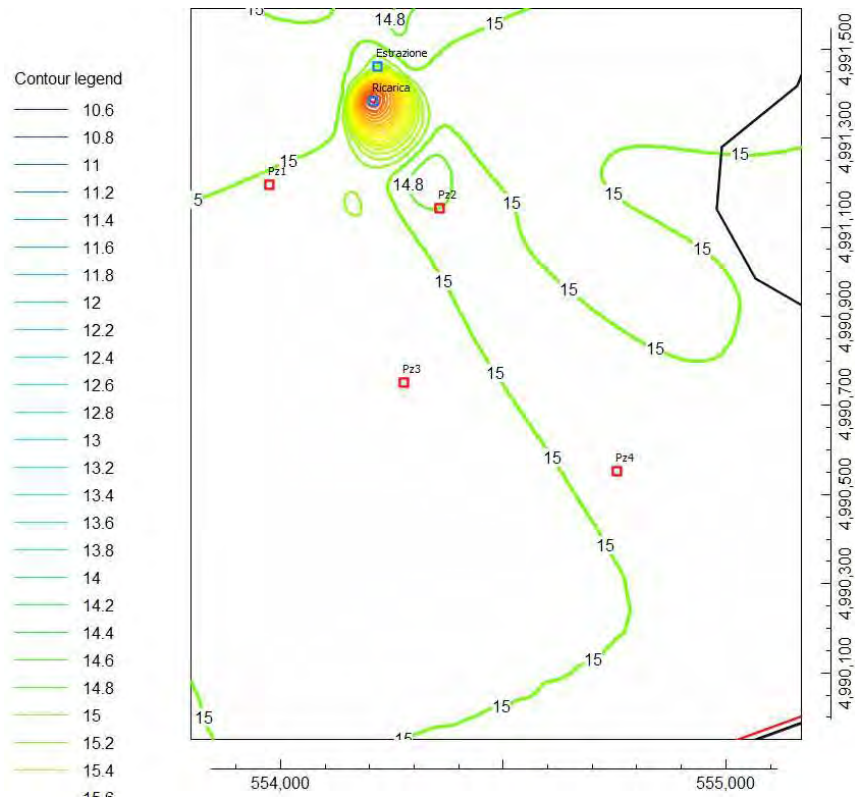


Gradiente idraulico dimezzato

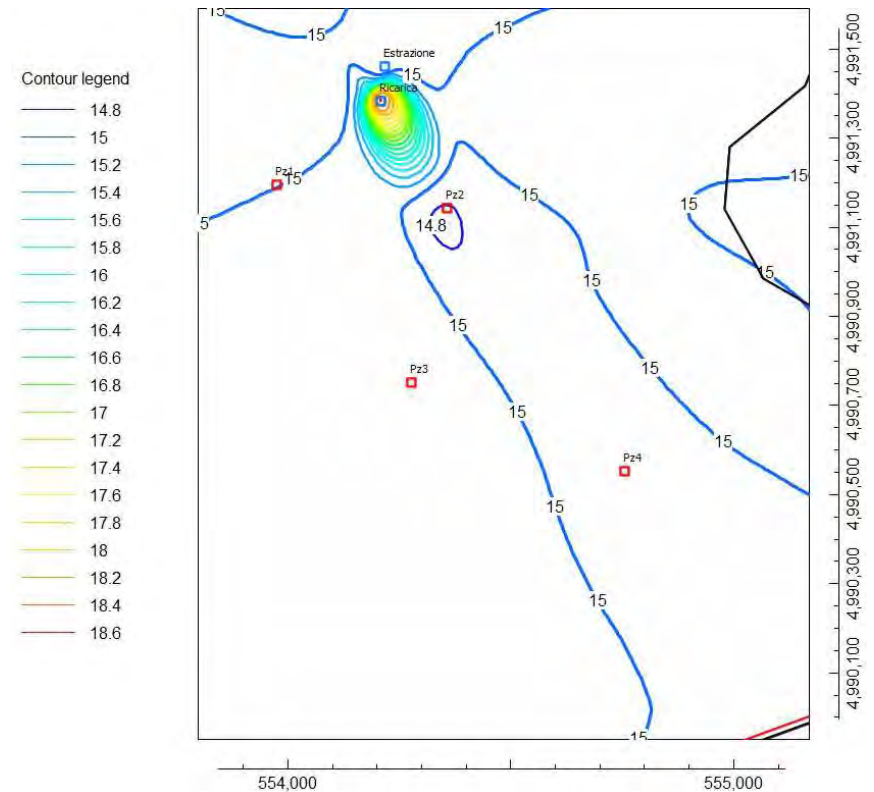


Gradiente idraulico inalterato

Problema reale – gradiente idraulico dimezzato – Fine estate 1

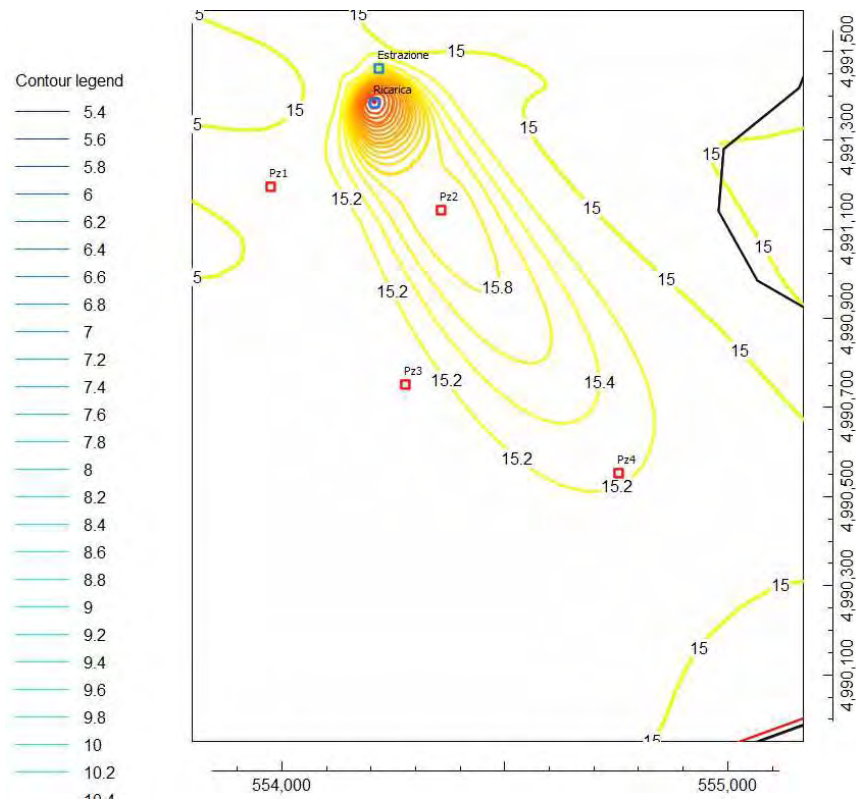


Gradiente idraulico dimezzato

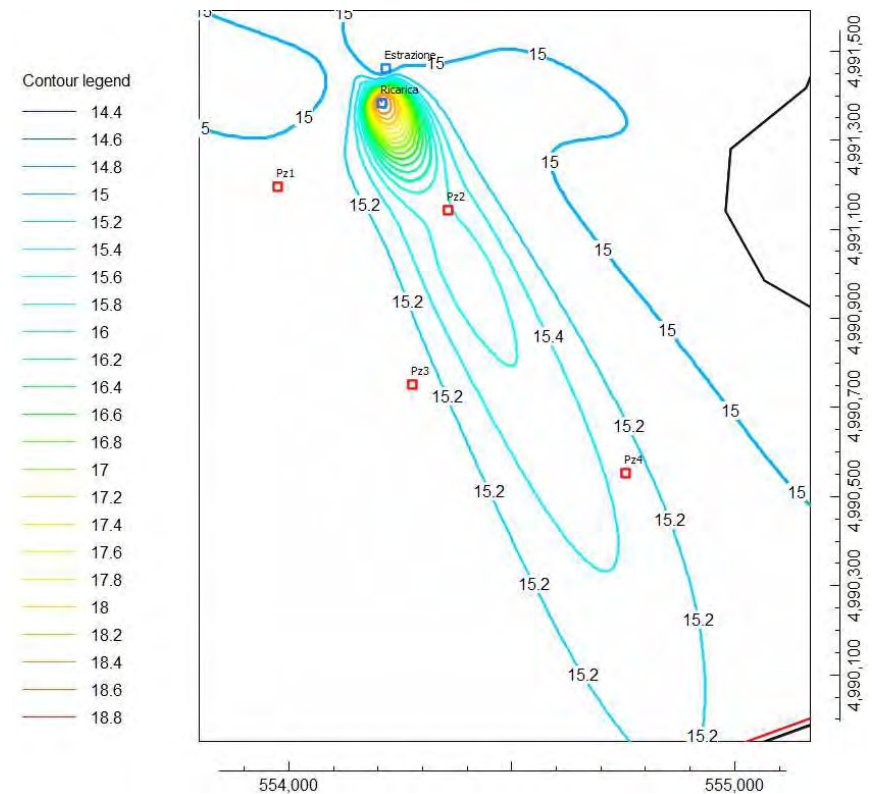


Gradiente idraulico inalterato

Problema reale – gradiente idraulico dimezzato – Fine estate 10

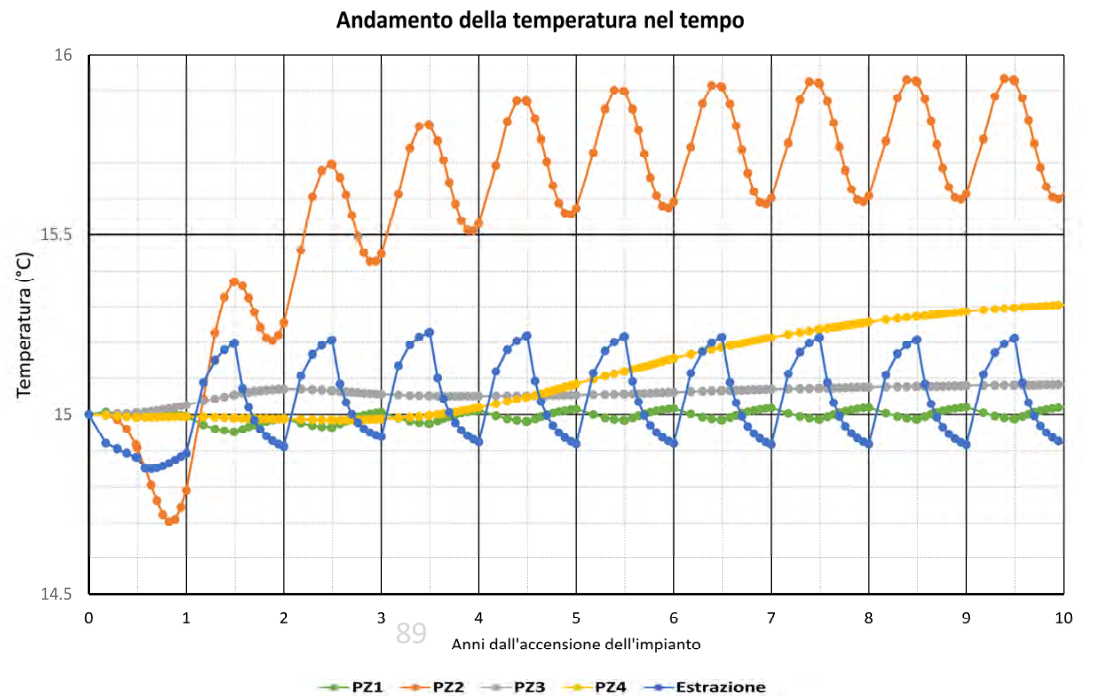
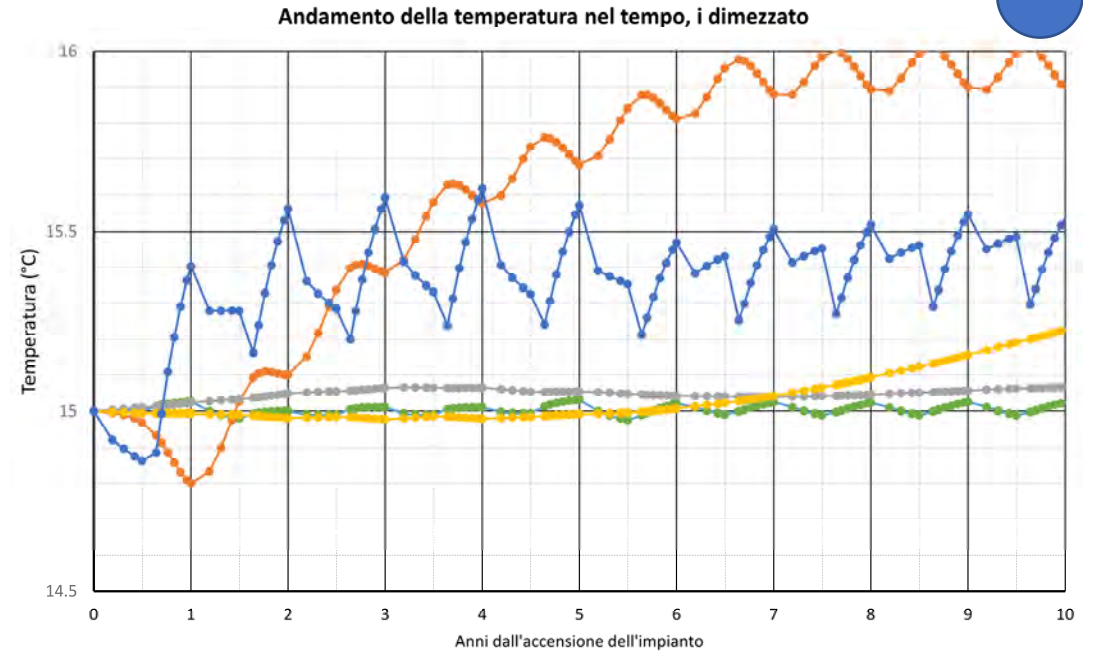
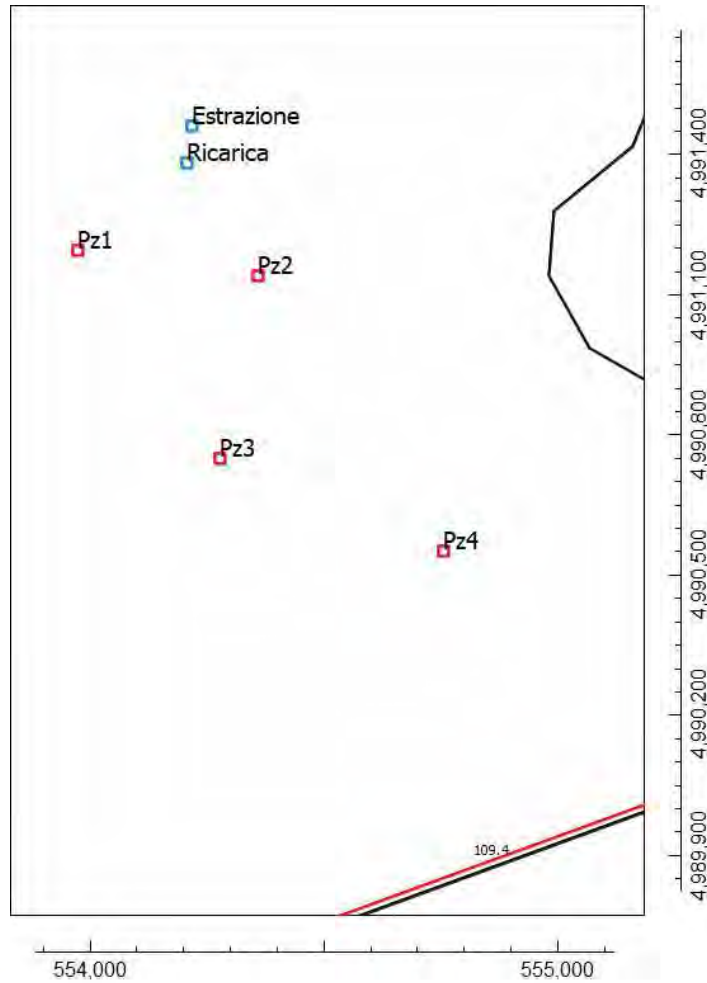


Gradiente idraulico dimezzato

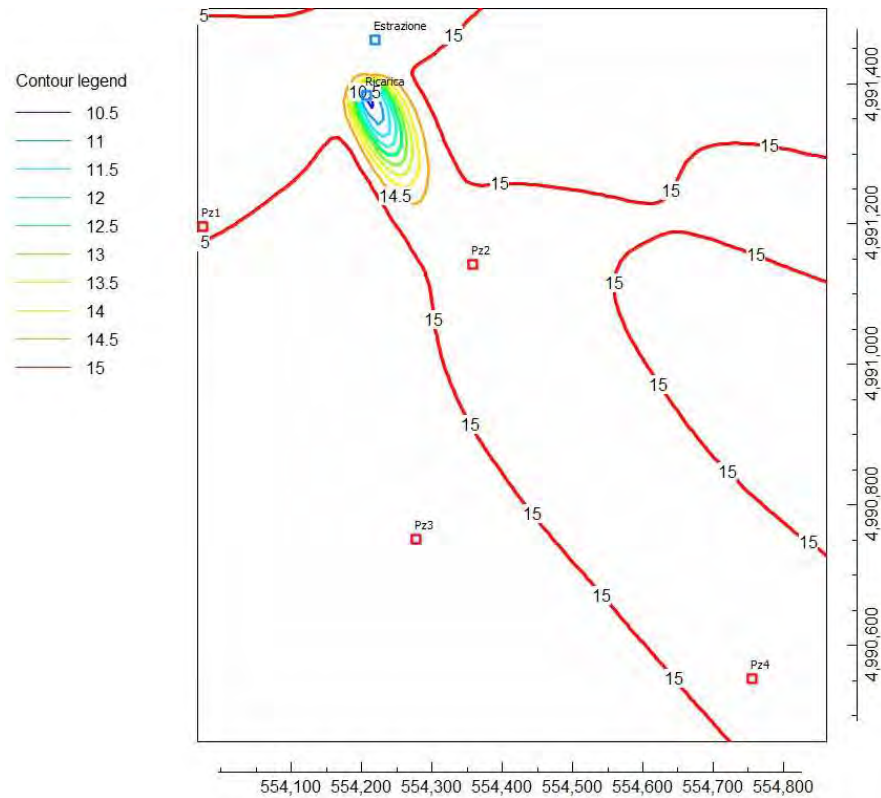


Gradiente idraulico inalterato

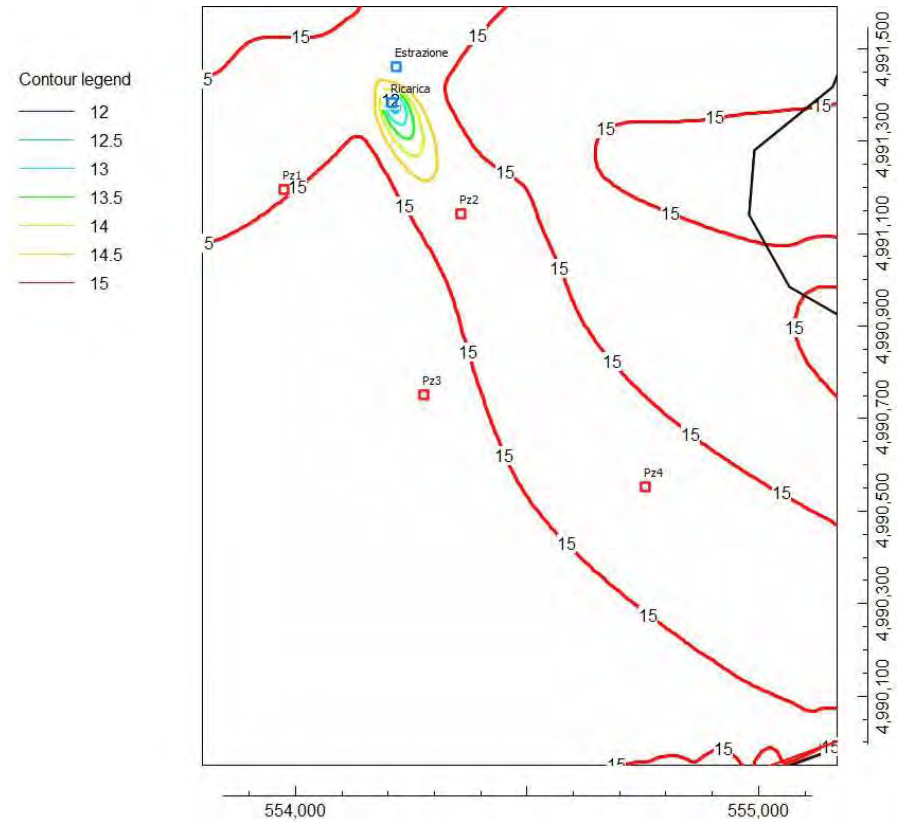
Problema reale – gradiente idraulico dimezzato – Comparazione Δt



Problema reale – modifica della longitudinal dispersivity fine inverno 1



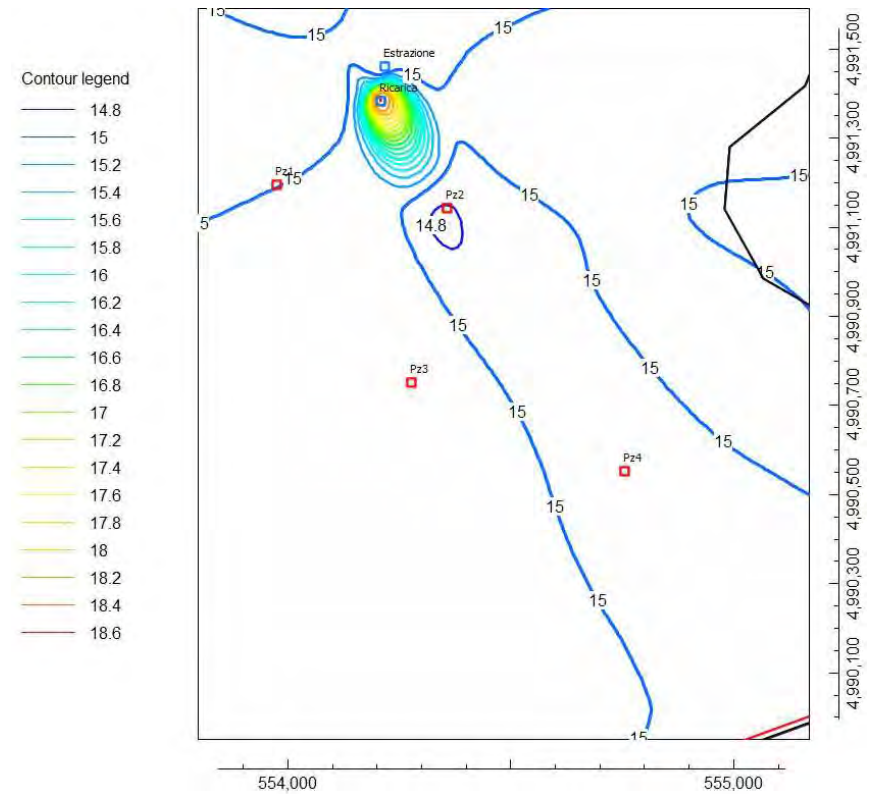
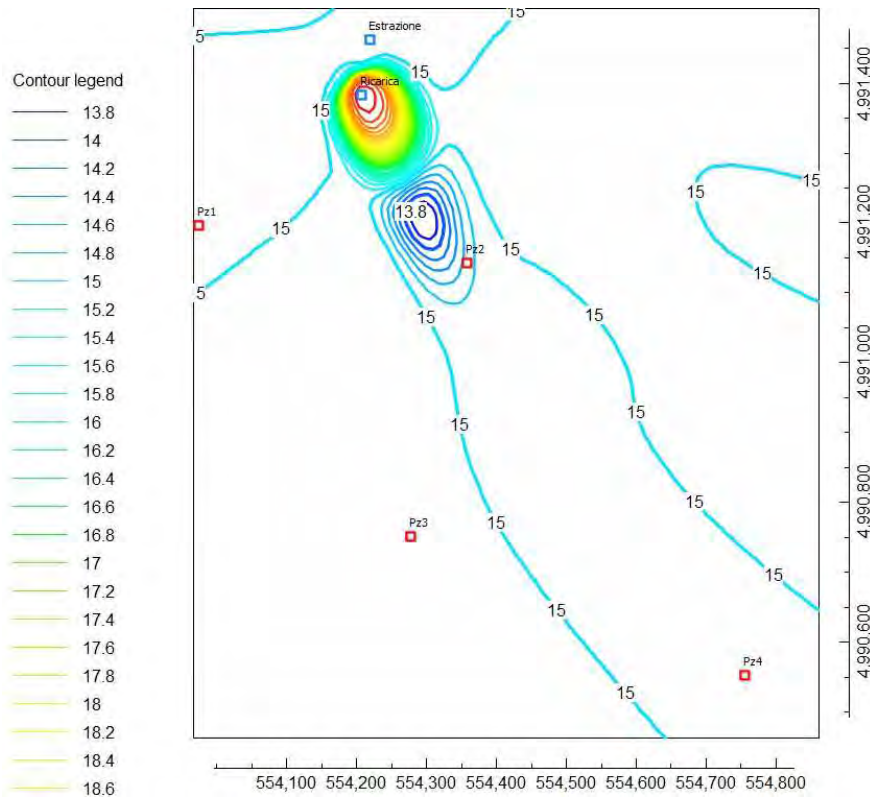
Longitudinal dispersivity = 8



Longitudinal dispersivity = 64

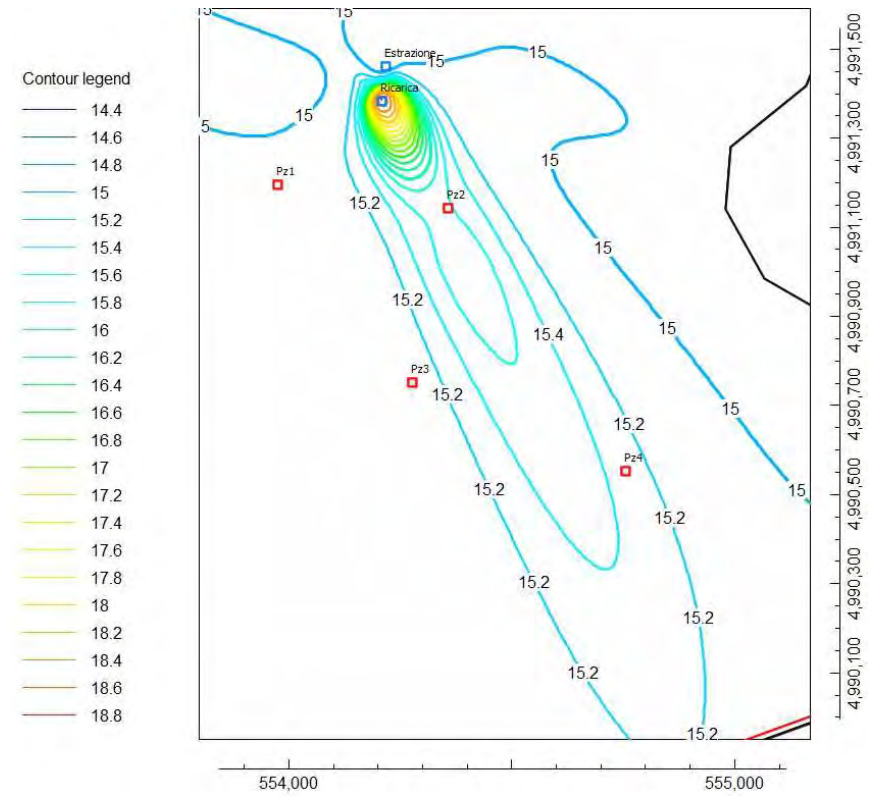
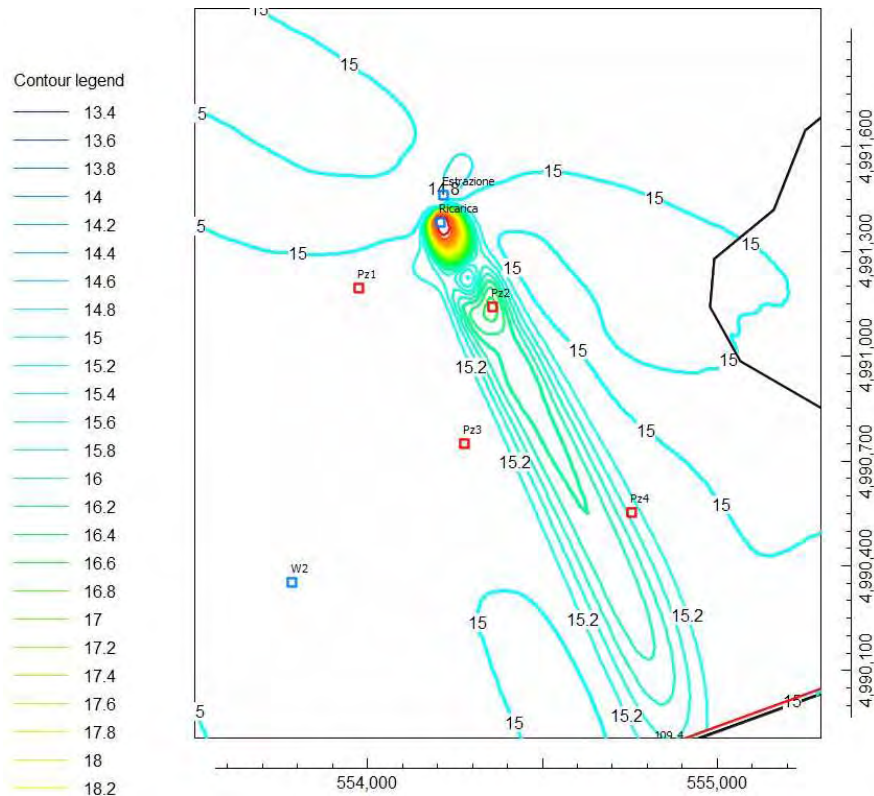
Problema reale – modifica della longitudinal dispersivity

Fine estate 1

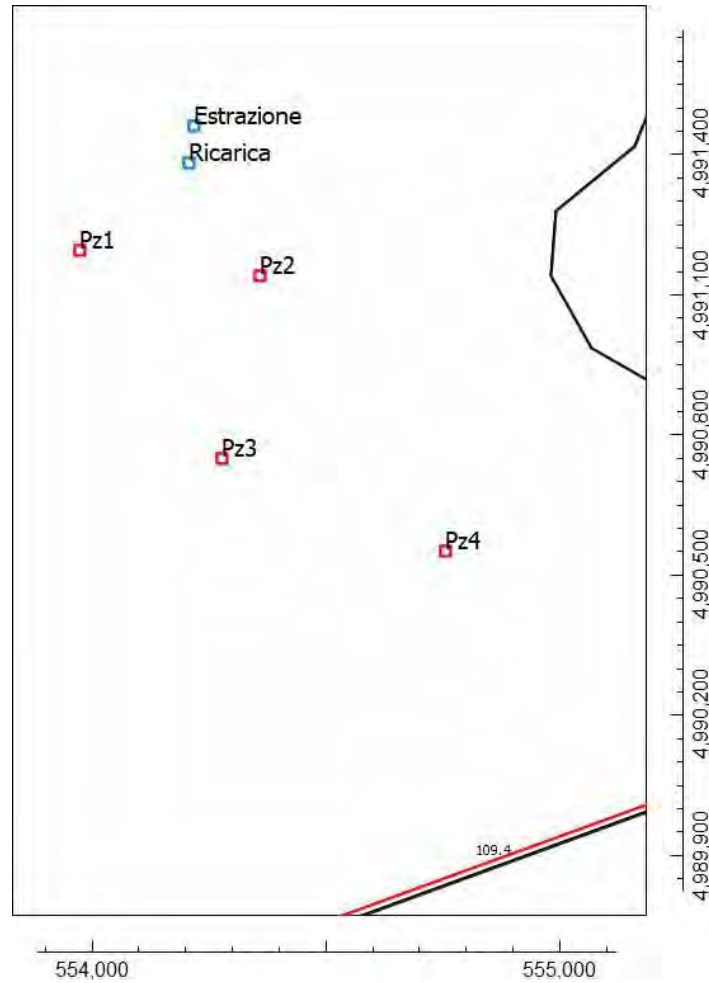


Problema reale – modifica della longitudinal dispersivity

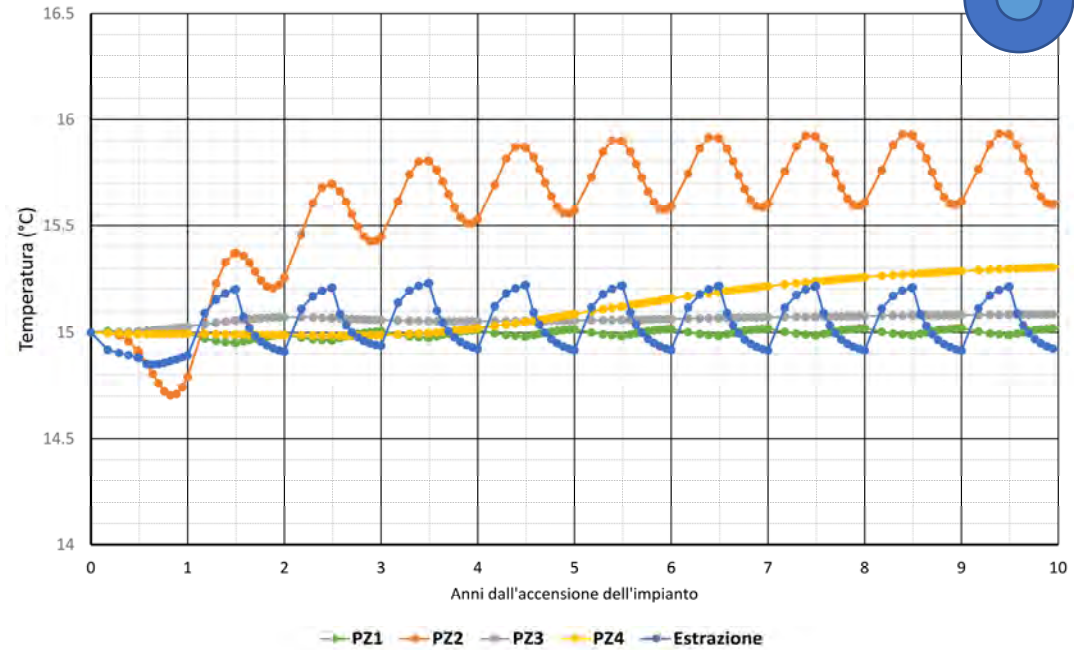
Fine estate 10



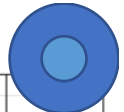
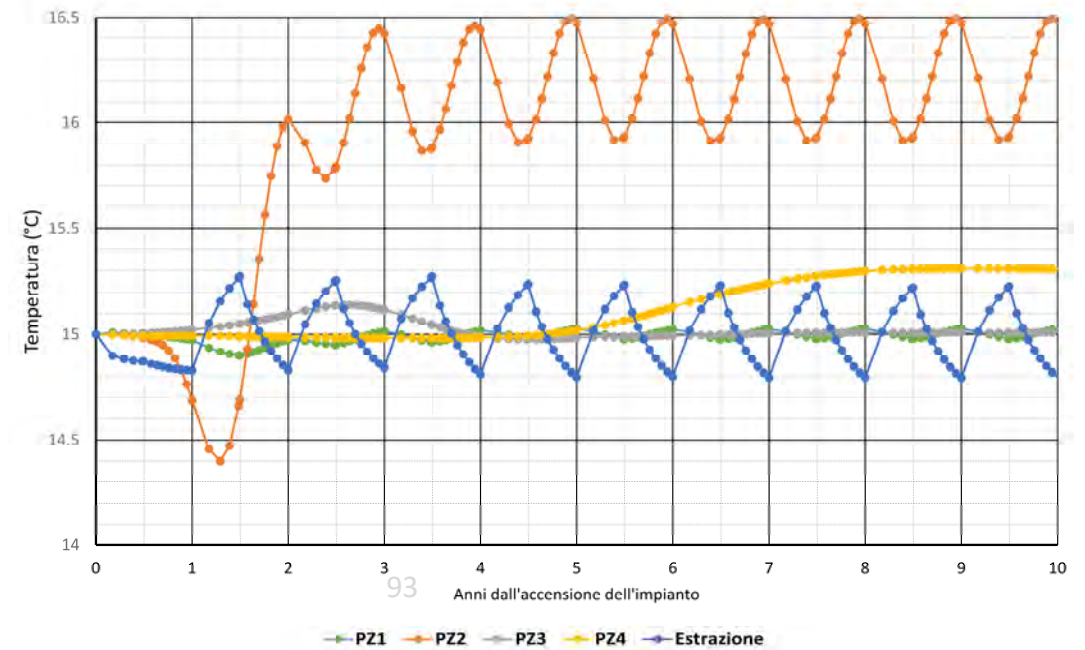
Problema reale – variazione della longitudinal dispersivity



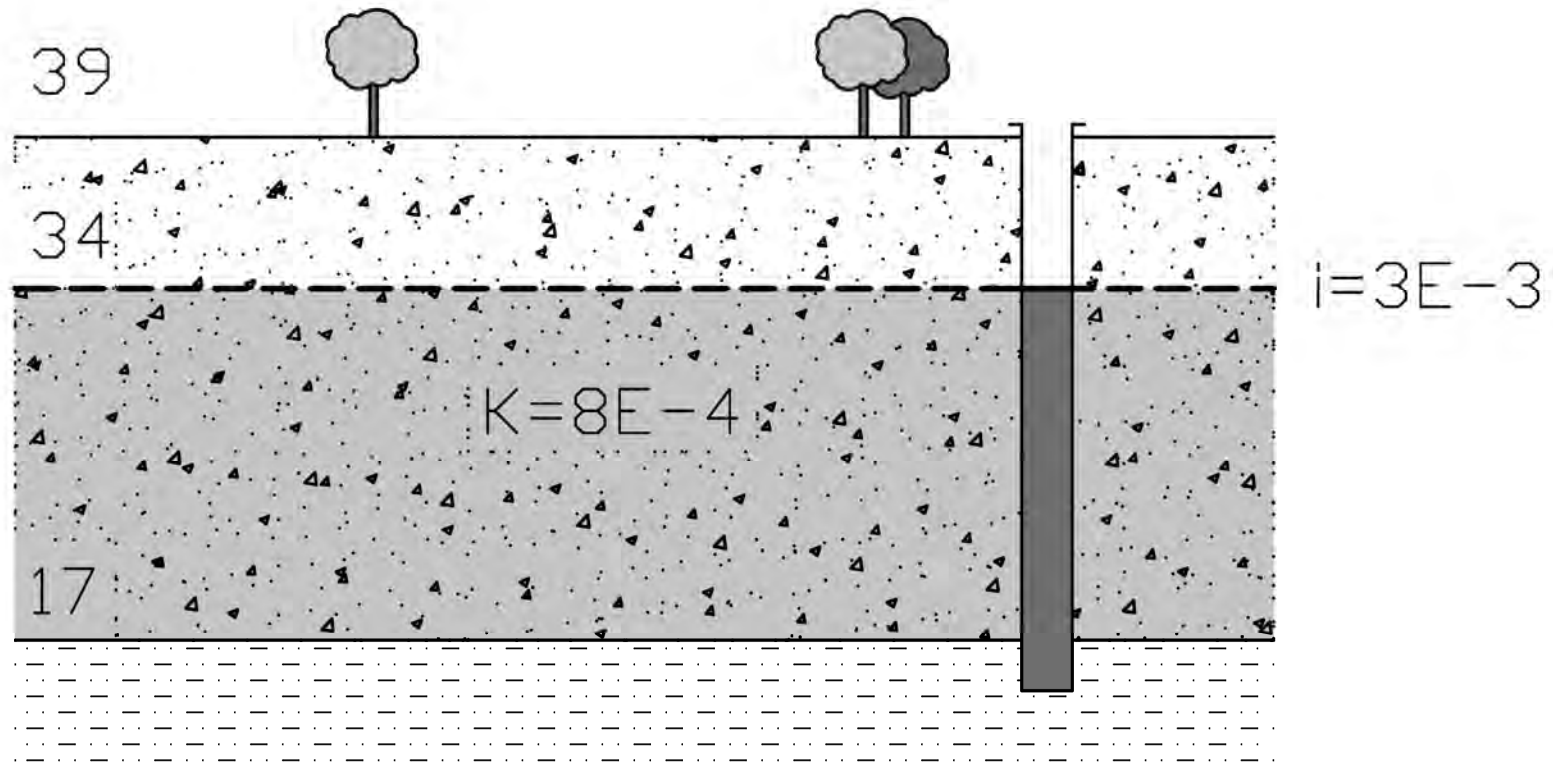
Andamento della temperatura nel tempo - Long. Disp = 64



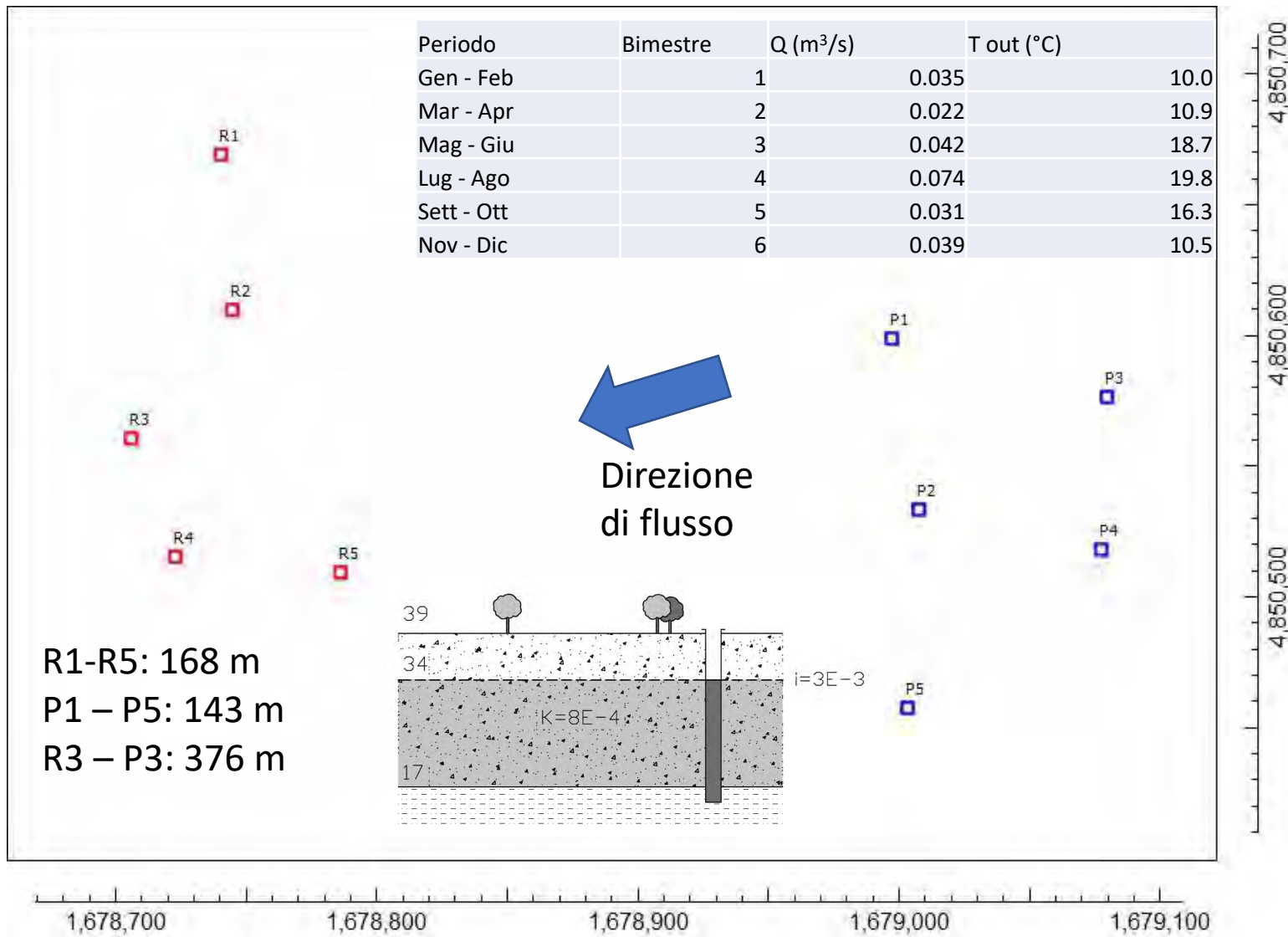
Andamento della temperatura nel tempo - Long. Disp = 8



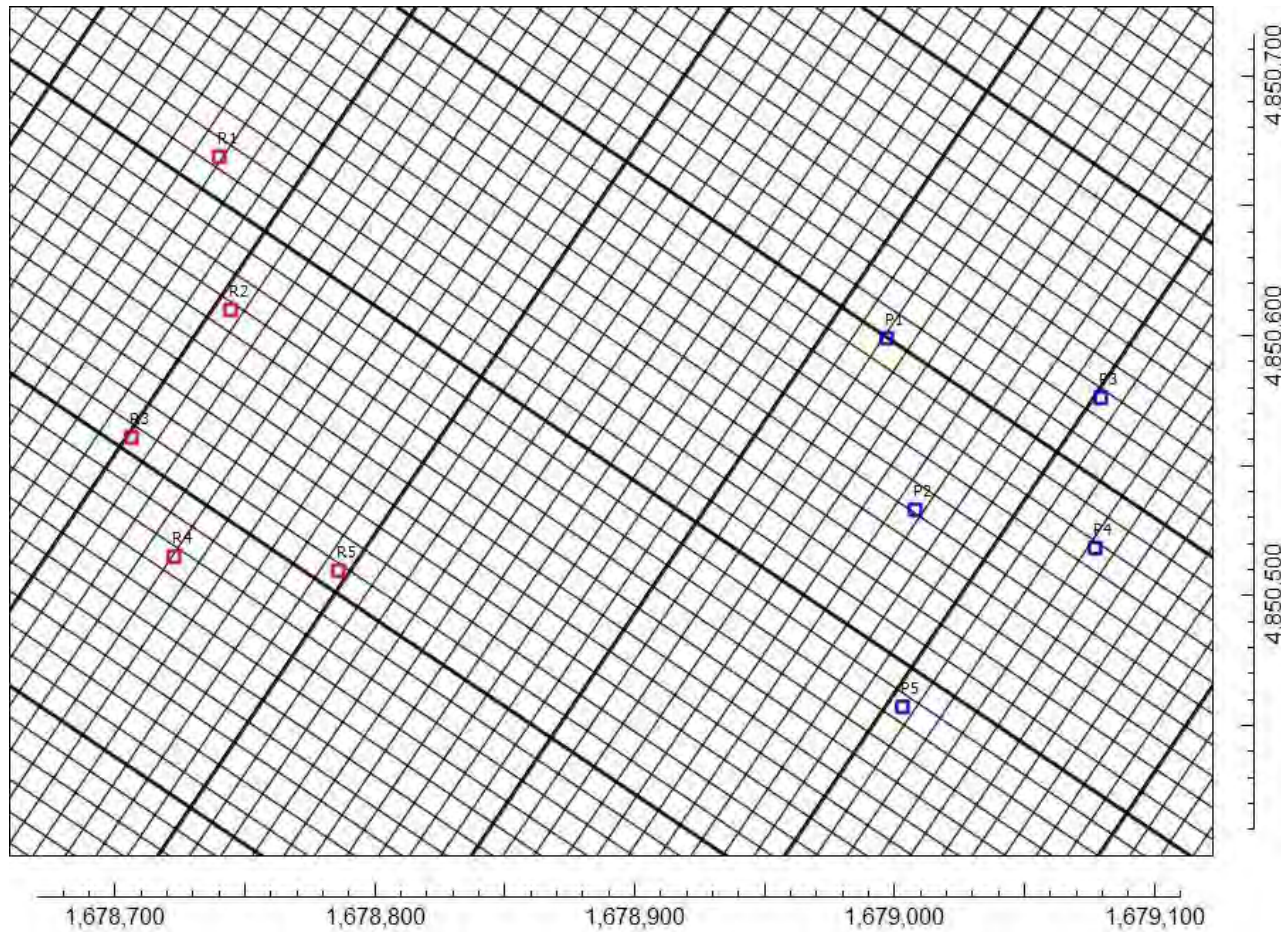
Problema reale – Modello Toscana 5 + 5



Problema reale – Modello Toscana 5 + 5



Problema reale – Modello Toscana 5 + 5



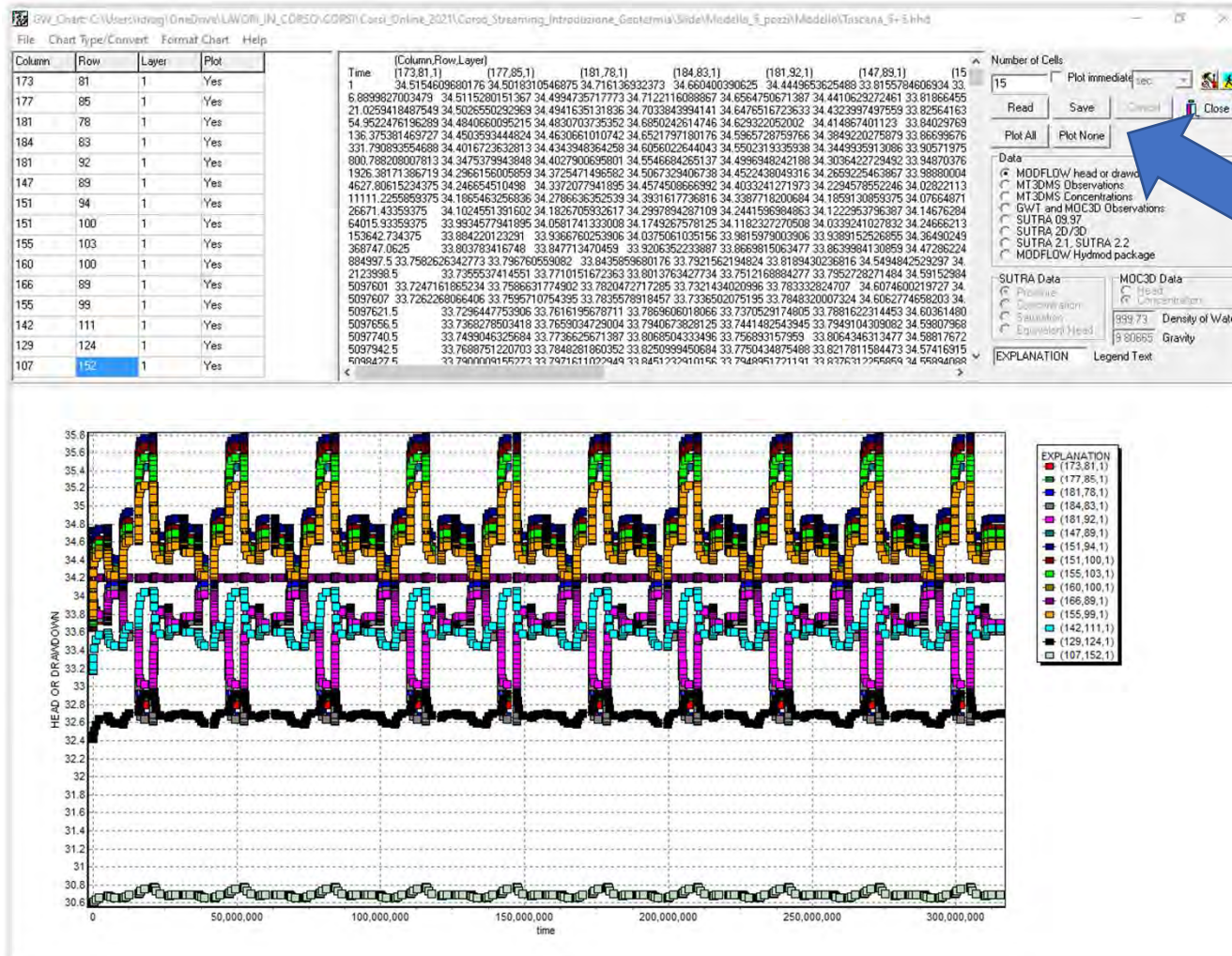
Codice	Col	Row
P1	173	81
P2	177	85
P3	181	78
P4	184	83
P5	181	92
R1	147	89
R2	151	94
R3	151	100
R4	155	103
R5	160	100
Obs1	166	89
Obs2	155	99
Obs3	142	111
Obs4	129	124
Obs5	107	152

Visualizzazione dei dati con GWChart

The screenshot shows the USGS website page for GW_Chart. The header includes the USGS logo and navigation links for SCIENCE, PRODUCTS, NEWS, CONNECT, and ABOUT. A search bar is also present. The main content area features the title "GW_Chart: A Program for Creating Specialized Graphs Used in Groundwater Studies" and a release date of June 26, 2020. An overview section lists various graph types created with the software, such as Calibration Plots, Water Budget Plots, Hydrographs, Lake Plots, Piper Diagrams, Cell Water Budgets, and Farm Budgets. It also lists the programs it reads data from, including ZONEBUDGET, MODFLOW, MOC3D, MODFLOW2000-GWT, SUTRA, MT3D, HST3D, UCODE-2005, and OPR-PPR. A graph titled "Budget Components from a MT3D-USGS Simulation" is displayed, showing mass flow components over time. The graph has a y-axis labeled "Mass Flow (kg)" ranging from 0 to 7,000,000,000 and an x-axis labeled "STORED TIME" ranging from 0 to 30,000. The legend includes: IN RECHARGE (red line with circles), IN MASS STORAGE (DUCUTE) (blue line with squares), FLOW SPREAD (green line with triangles), OUT MASS STORAGE (FLOW MODEL) (orange line with diamonds), and OUT MASS STORAGE (POINT) (purple line with crosses). The graph shows that IN RECHARGE increases over time, while IN MASS STORAGE (DUCUTE) and OUT MASS STORAGE (FLOW MODEL) decrease. FLOW SPREAD and OUT MASS STORAGE (POINT) remain relatively constant. A caption below the graph reads: "Graph of budget components from a MT3D-USGS simulation versus time generated by GW_Chart based on results from a hypothetical model." The page also includes contact information for the USGS MODFLOW Team and Richard B. Winston, Ph.D., a hydrologist at USGS Water Resources Mission Area. A "View All" link is provided at the bottom right of the content area.

<https://www.usgs.gov/software/gwchart-a-program-creating-specialized-graphs-used-groundwater-studies>

Visualizzazione dei dati con GWChart



Nel caso in cui si esaminino molte serie conviene esportare in Excel

Andamento dei carichi idraulici nel tempo nei 15 punti di controllo selezionati

Visualizzazione dei dati con GWChart

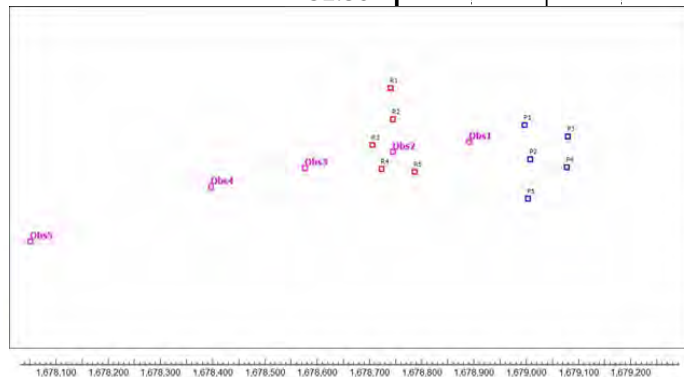
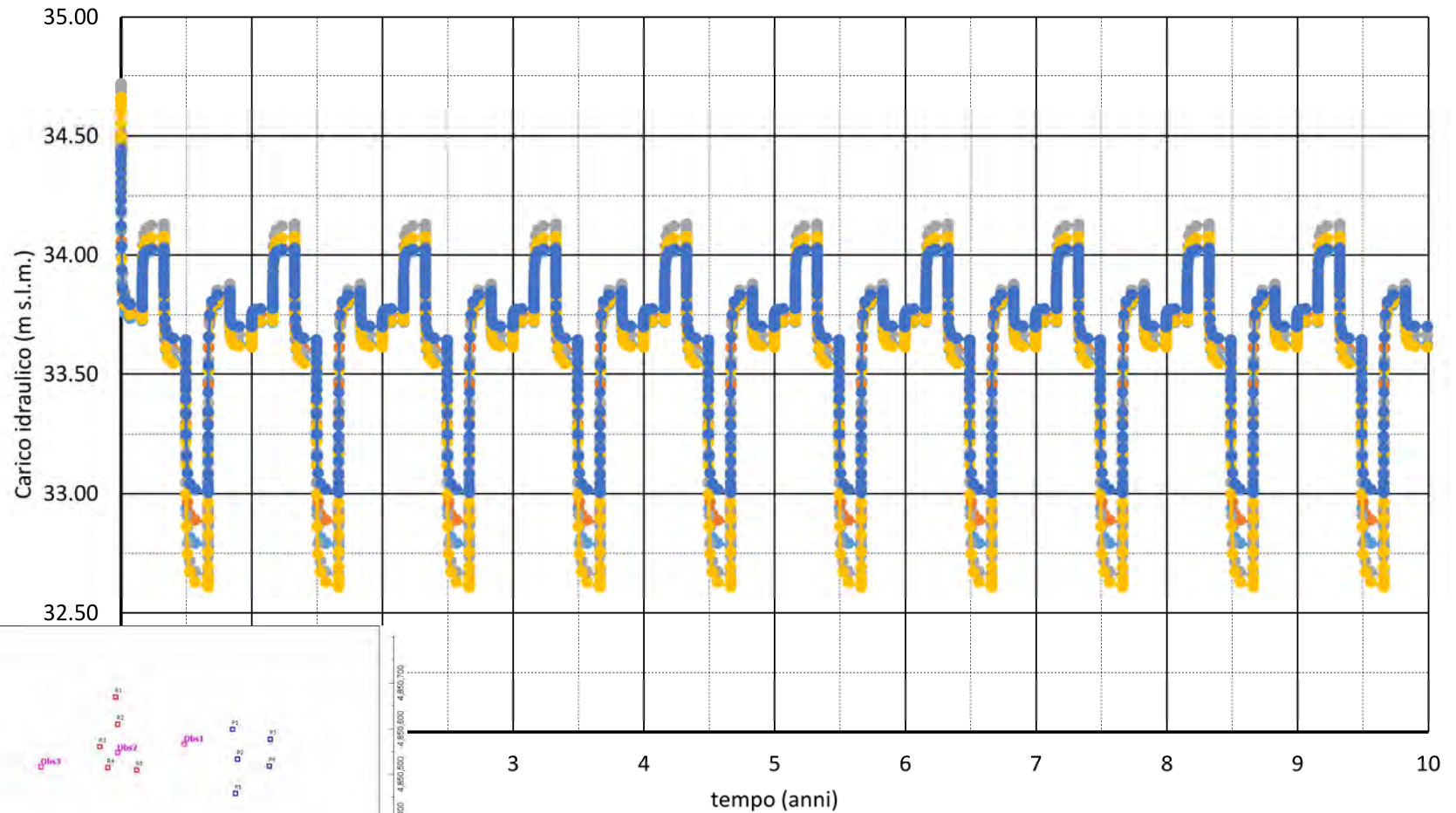
1	Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8
2	(Column,Row,Layer)							
3	Time	(173,81,1)	(177,85,1)	(181,78,1)	(184,83,1)	(181,92,1)	(147,89,1)	(151,94,1)
4	1	34.5154609680176	34.5018310546875	34.716136932373	34.660400390625	34.4449653625488	33.8155784606934	33.784309
5	6.8899827003479	34.5115280151367	34.4994735717773	34.7122116088867	34.6564750671387	34.4410629272461	33.8186645507813	33.788925
6	21.0259418487549	34.5026550292969	34.4941635131836	34.7033843994141	34.6476516723633	34.4323997497559	33.8256416320801	33.799282
7	54.9522476196289	34.4840660095215	34.4830703735352	34.6850242614746	34.629322052002	34.414867401123	33.8402976989746	33.820682
8	136.375381469727	34.4503593444824	34.4630661010742	34.6521797180176	34.5965728759766	34.3849220275879	33.8669967651367	33.858551
9	331.790893554688	34.4016723632813	34.4343948364258	34.6056022644043	34.5502319335938	34.3449935913086	33.9057197570801	33.911296
10	800.788208007813	34.3475379943848	34.4027900695801	34.5546684265137	34.4996948242188	34.3036422729492	33.9487037658691	33.967788
11	1926.38171386719	34.2966156005859	34.3725471496582	34.5067329406738	34.4522438049316	34.2659225463867	33.9888000488281	34.020458
12	4627.80615234375	34.246654510498	34.3372077941895	34.4574508666992	34.4033241271973	34.2294578552246	34.0282211303711	34.075515
13	11111.2255859375	34.1865463256836	34.2786636352539	34.3931617736816	34.3387718200684	34.1859130859375	34.0766487121582	34.148704
14	26671.43359375	34.1024551391602	34.1826705932617	34.2997894287109	34.2441596984863	34.1222953796387	34.1467628479004	34.253002
15	64015.93359375	33.9934577941895	34.0581741333008	34.1749267578125	34.1182327270508	34.0339241027832	34.2466621398926	34.384376
16	153642.734375	33.884220123291	33.9366760253906	34.0375061035156	33.9815979003906	33.9389152526855	34.3649024963379	34.518291
17	368747.0625	33.803783416748	33.847713470459	33.9206352233887	33.8669815063477	33.8639984130859	34.4728622436523	34.627140
18	884997.5	33.7582626342773	33.796760559082	33.8435859680176	33.7921562194824	33.8189430236816	34.5494842529297	34.699645

Andamento dei carichi idraulici nel tempo - Estrazione dei dati in Excel

Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Carichi idraulici nel tempo – pozzi di presa

Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

Carichi idraulici - pozzi di presa



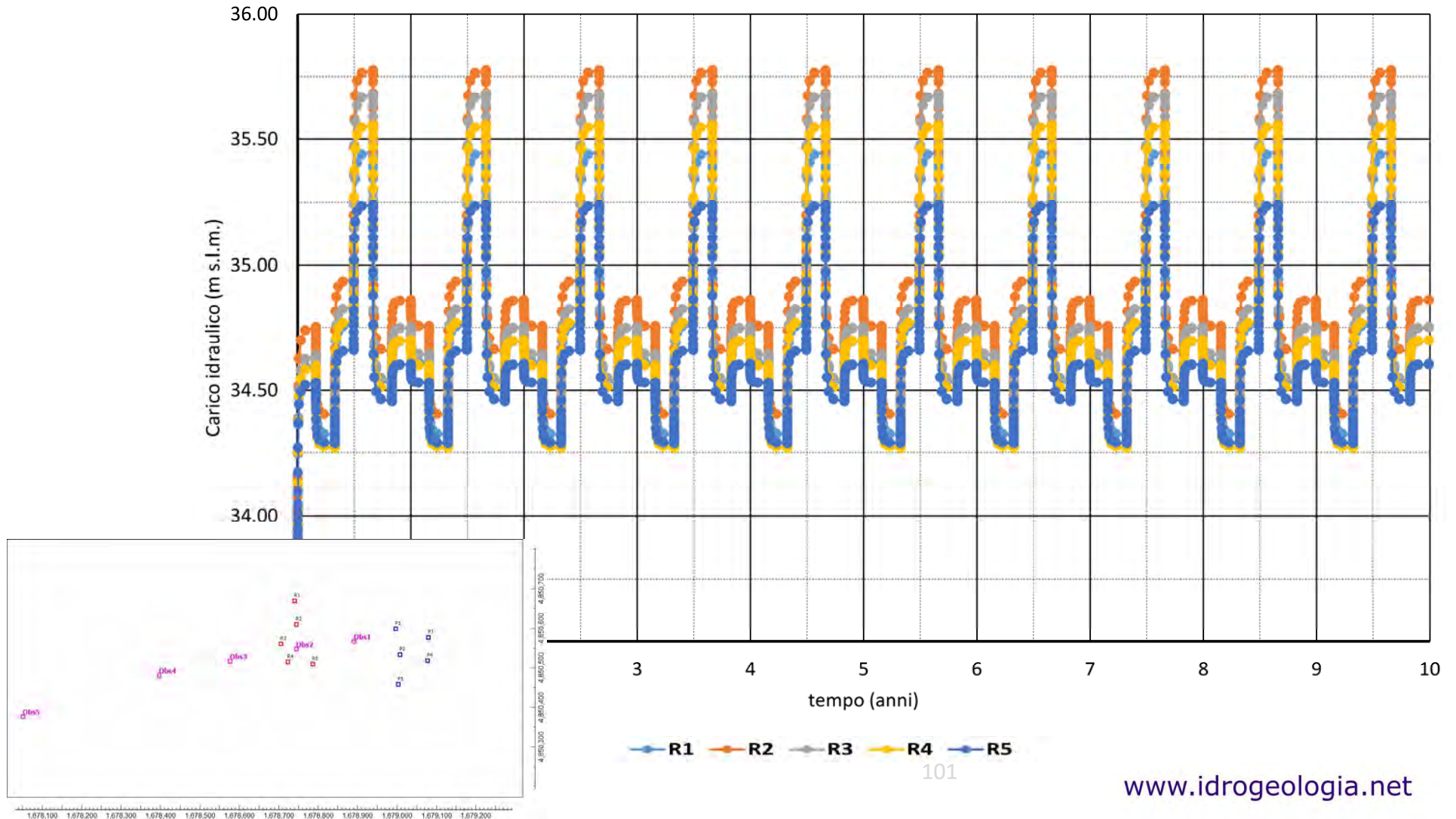
—●— P1
 —●— P2
 —●— P3
 —●— P4
 —●— P5

100

Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Carichi idraulici nel tempo – pozzi di resa

Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

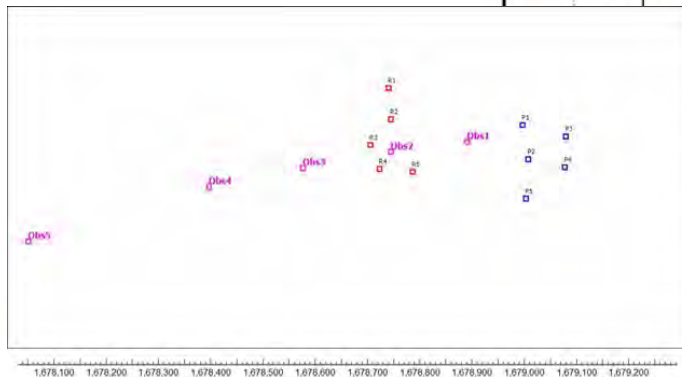
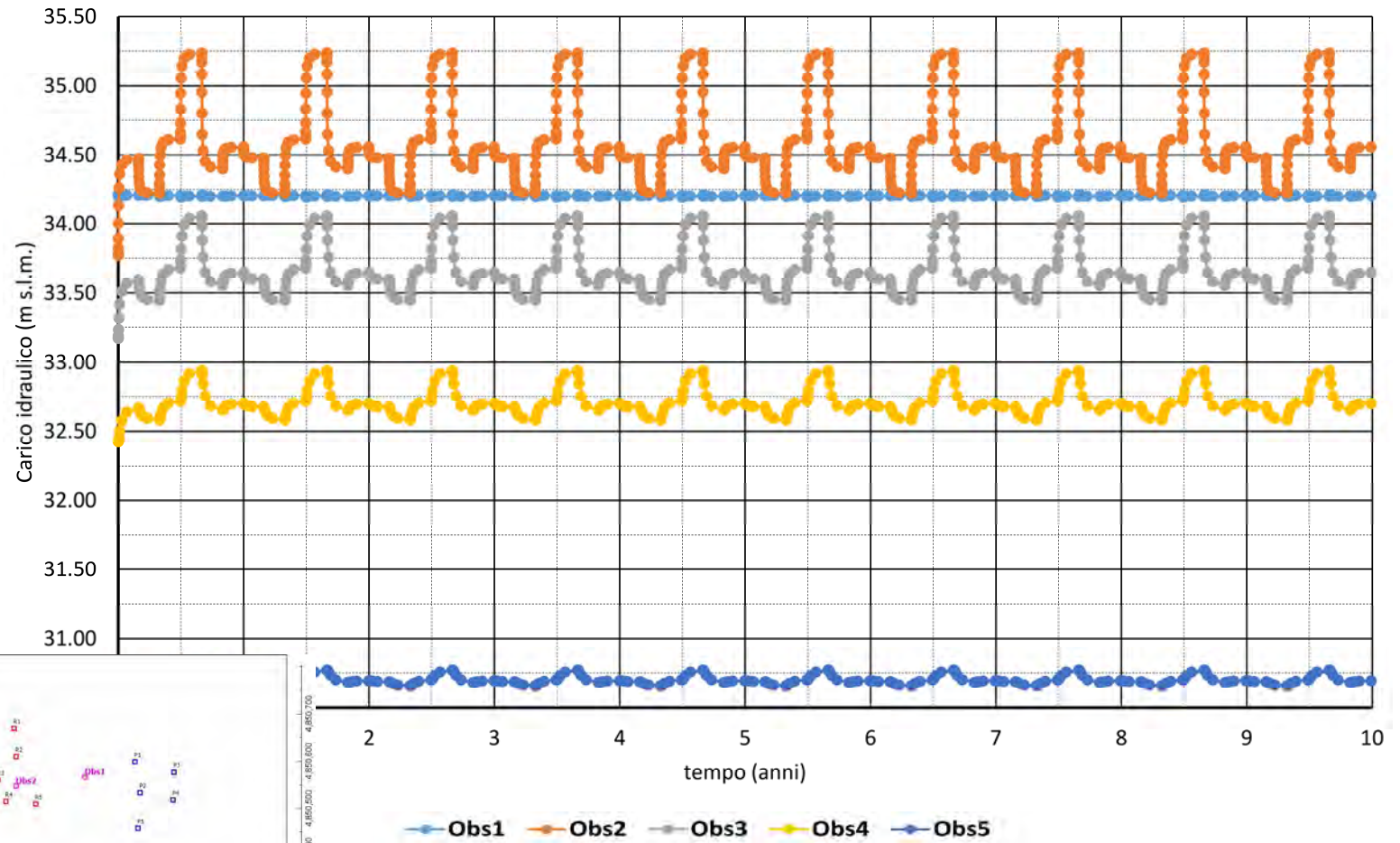
Carichi idraulici - pozzi di resa



Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Carichi idraulici nel tempo – Obs

Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

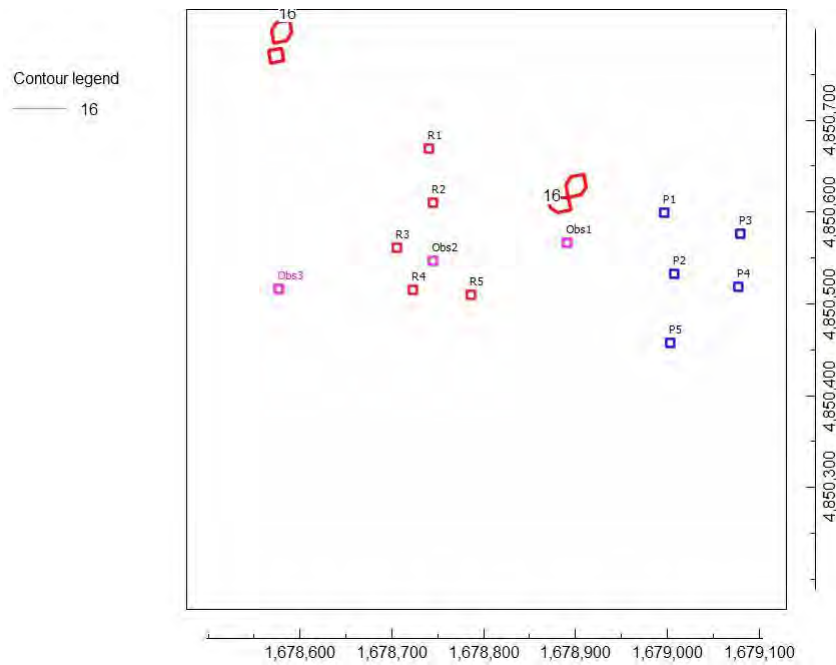
Carichi idraulici - Punti di osservazione



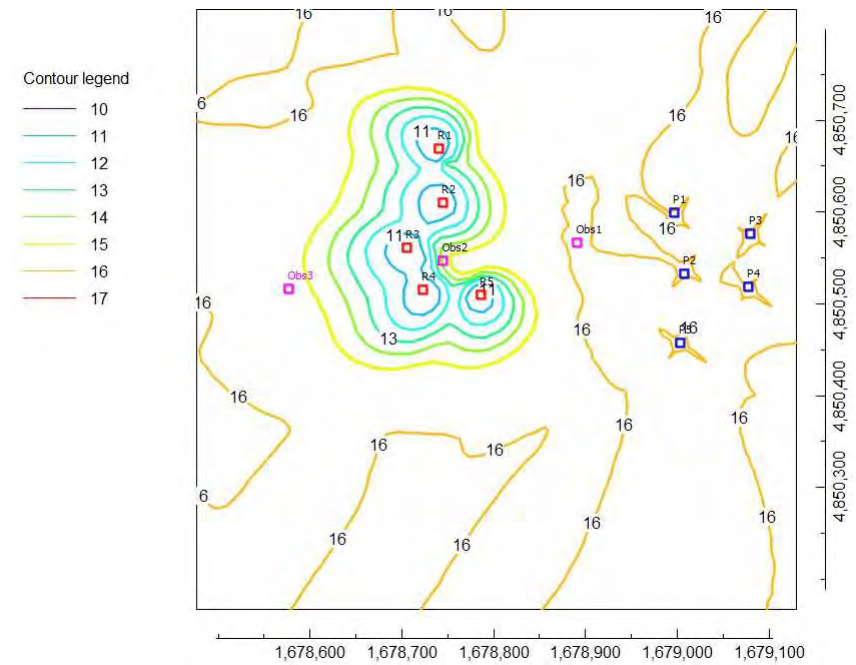
Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

Istante 0 (impianto spento)



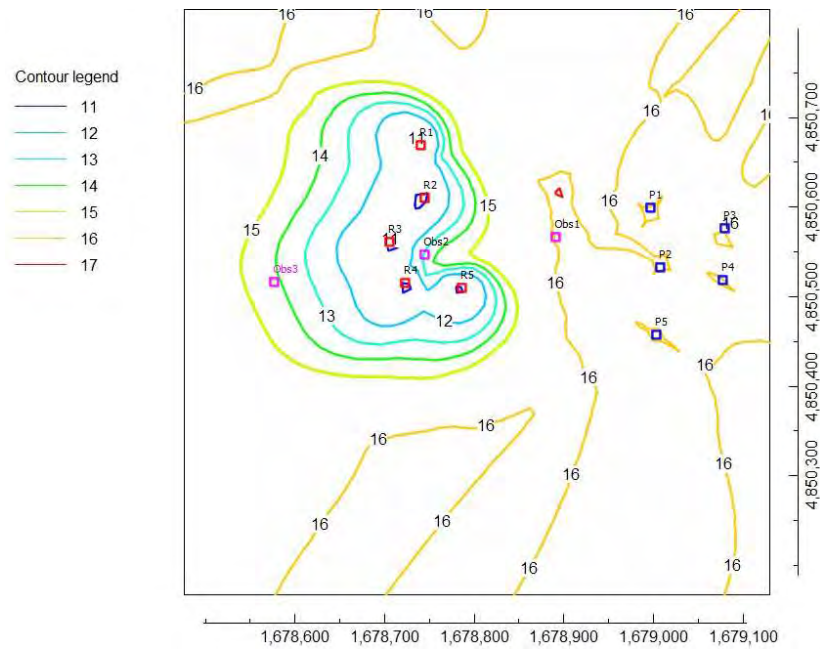
Bimestre 1 (gen-feb)



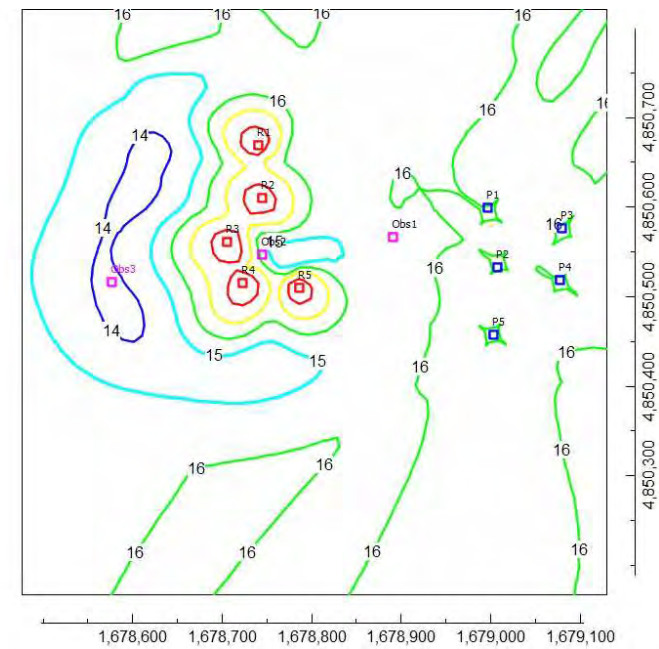
Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

Bimestre 2 (mar-apr)



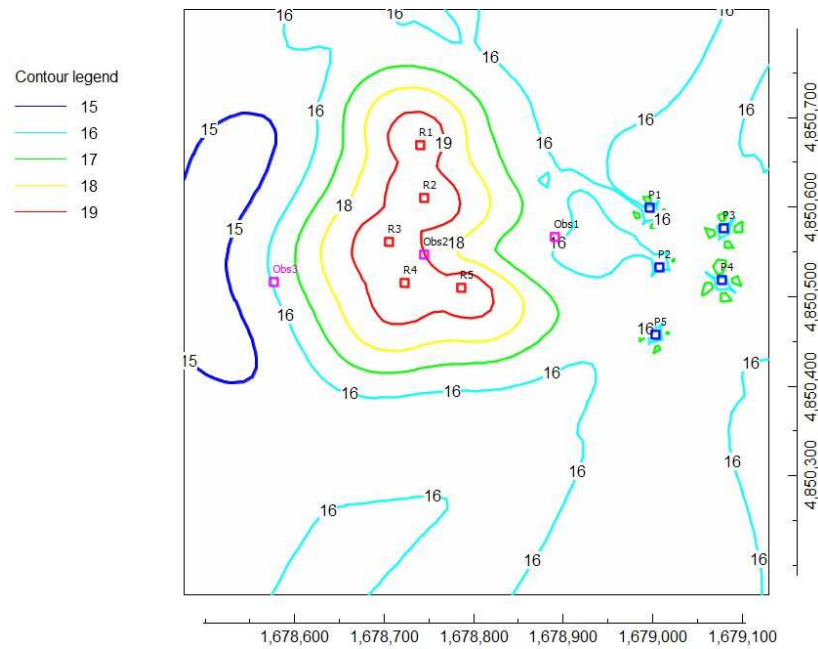
Bimestre 3 (mag-giu)



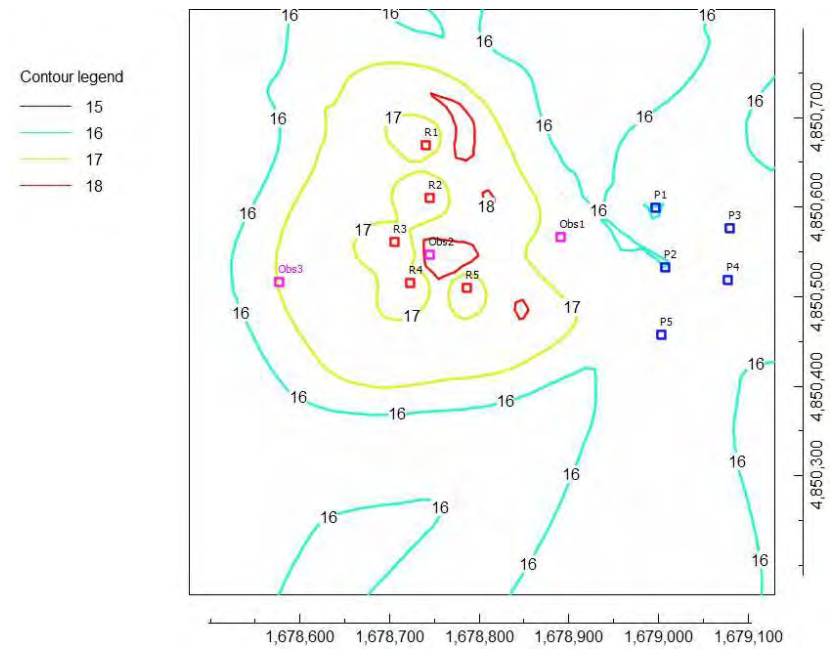
Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

Bimestre 4 (lug-ago)



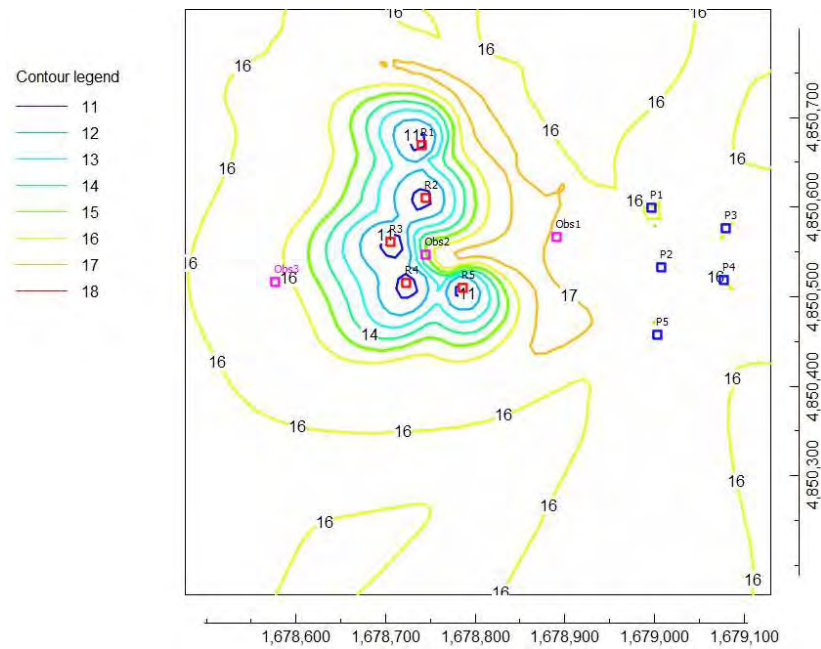
Bimestre 5 (set-ott)



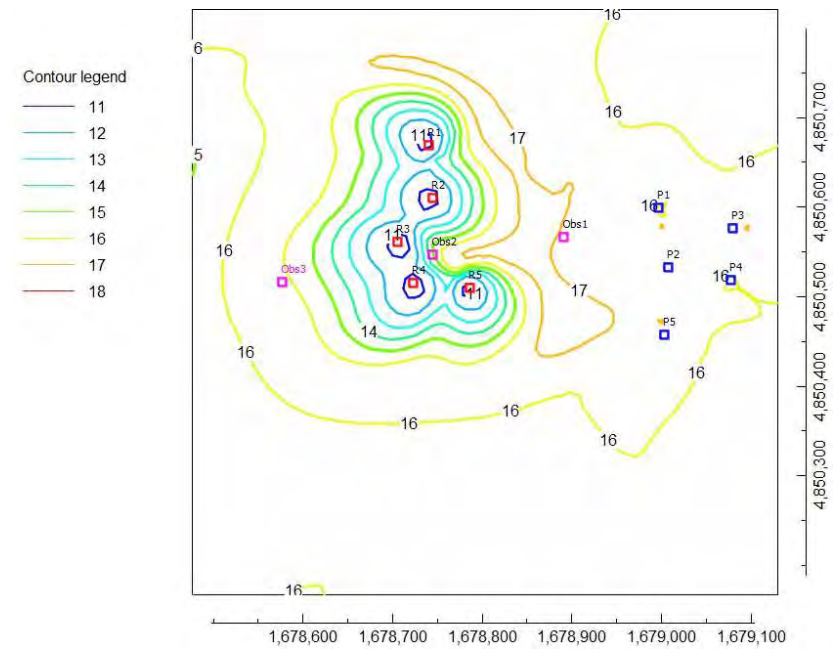
Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

Bimestre 6 (nov-dic)



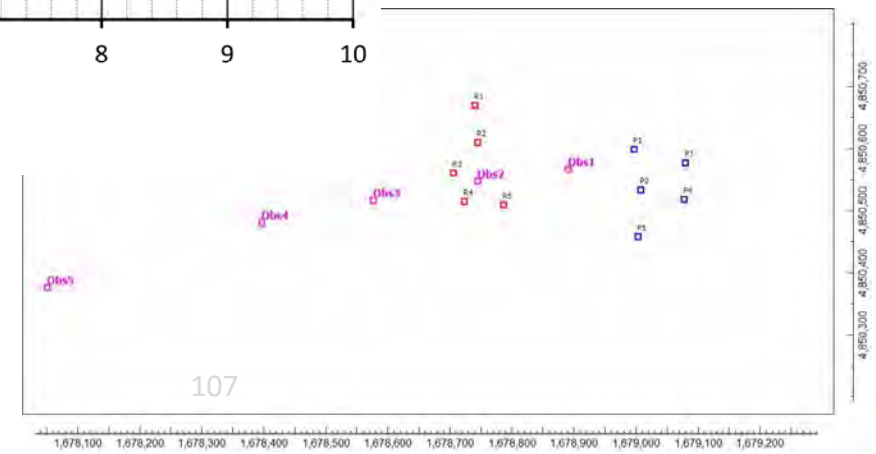
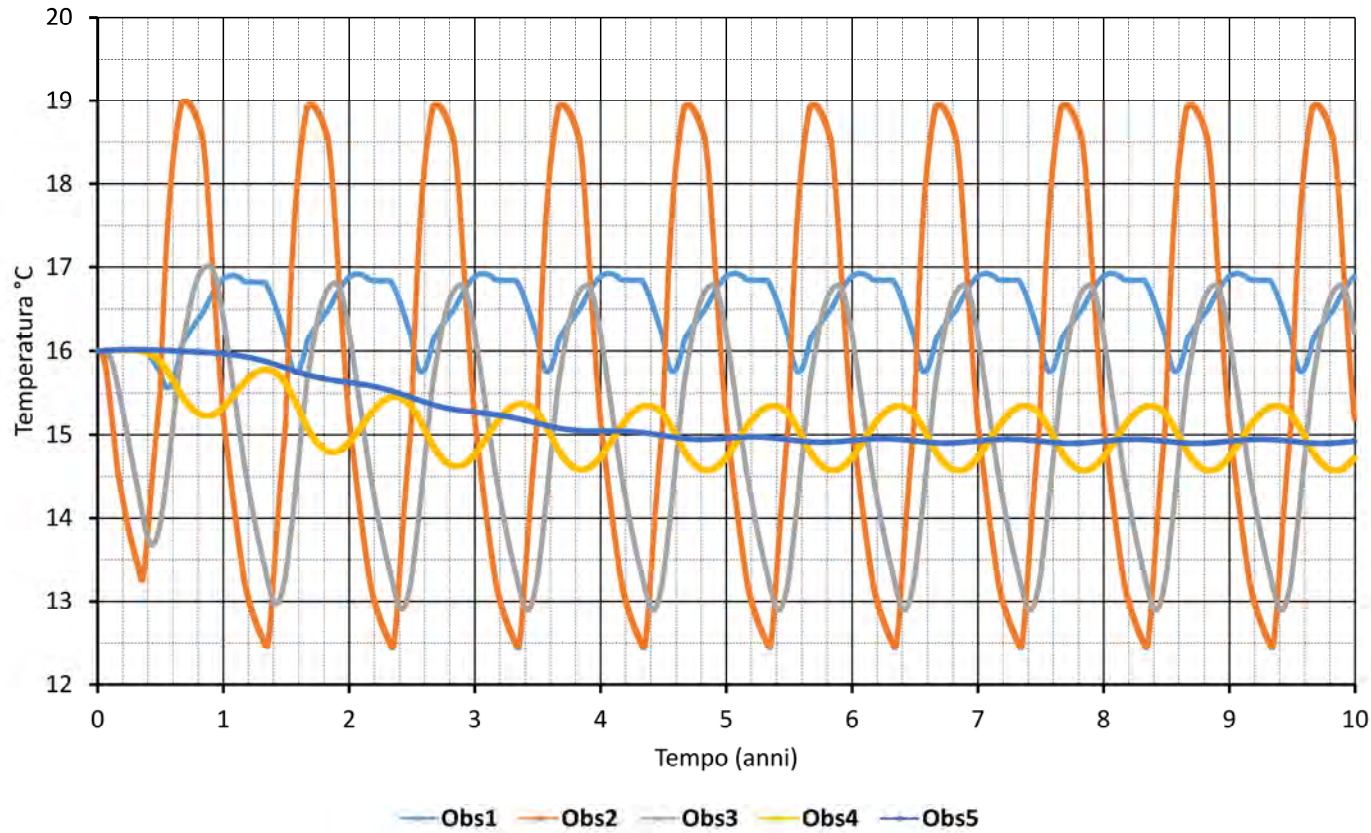
Bimestre 60 (nov-dic)



Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

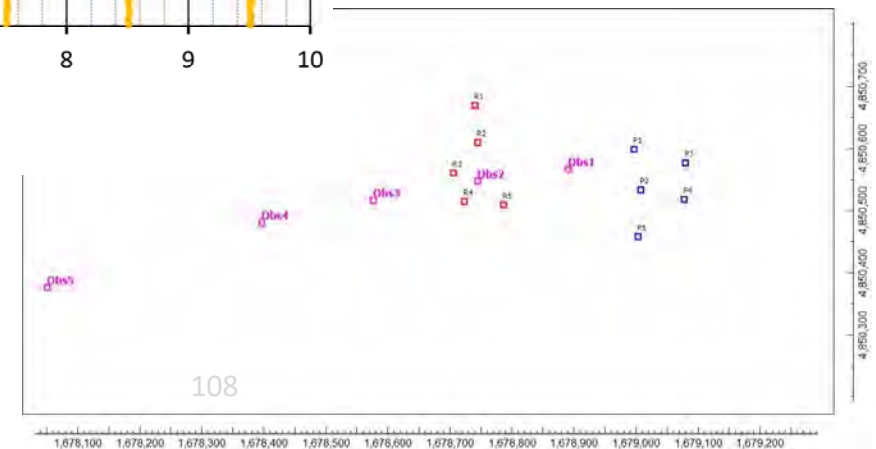
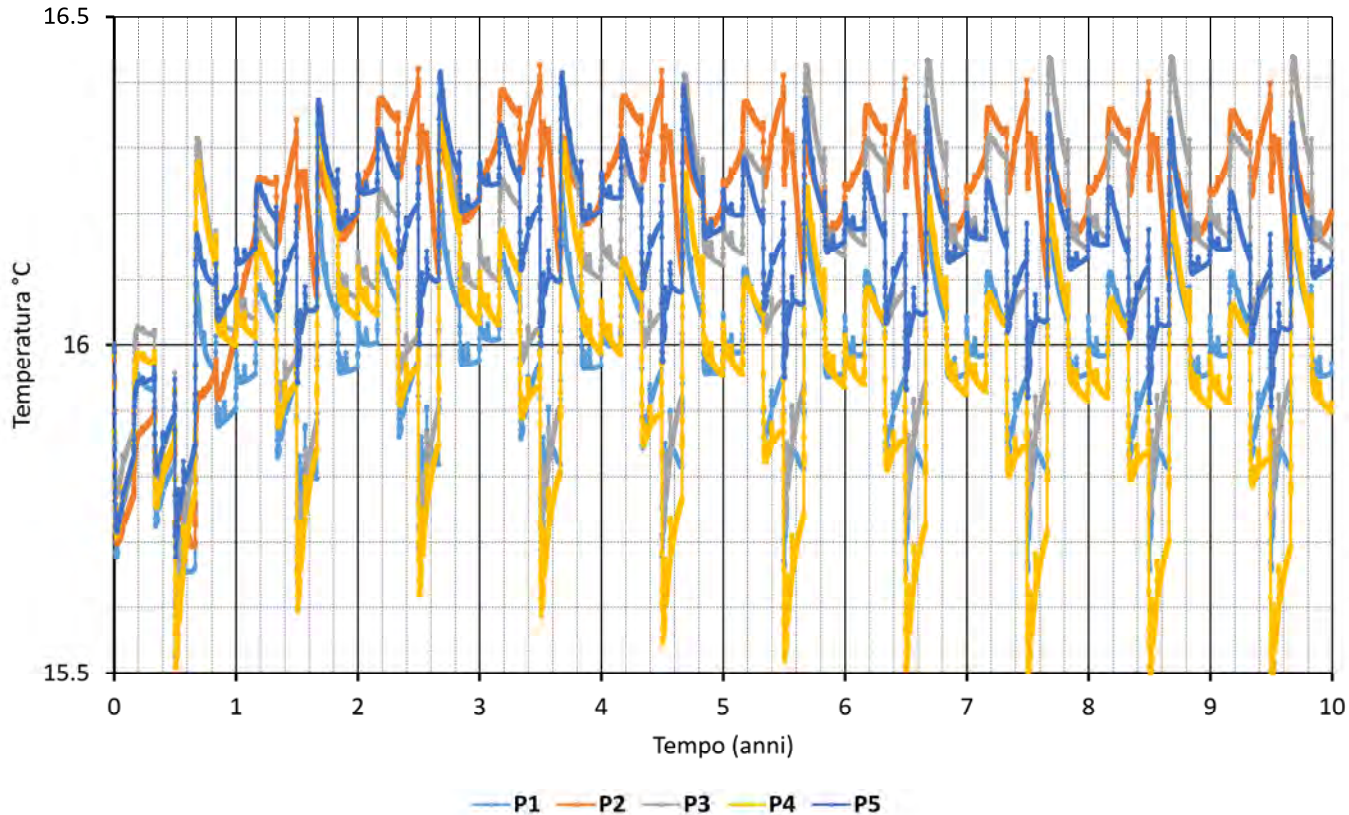
Andamento delle temperature nel tempo



Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

Andamento delle temperature nel tempo



Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo



Periodo	Bimestre	Q (m ³ /s)	T out (°C)
Gen - Feb	1	0.035	10.0
Mar - Apr	2	0.022	10.9
Mag - Giu	3	0.042	18.7
Lug - Ago	4	0.074	19.8
Sett - Ott	5	0.031	16.3
Nov - Dic	6	0.039	10.5

Andamento delle temperature nel tempo

