

# Modellizzazione Matematica di una sorgente appenninica a scopo gestionale

Costanza Cambi, Dipartimento di Fisica e Geologia  
Università degli Studi di Perugia



## CReIAMO PA

Per un cambiamento sostenibile



# Il problema

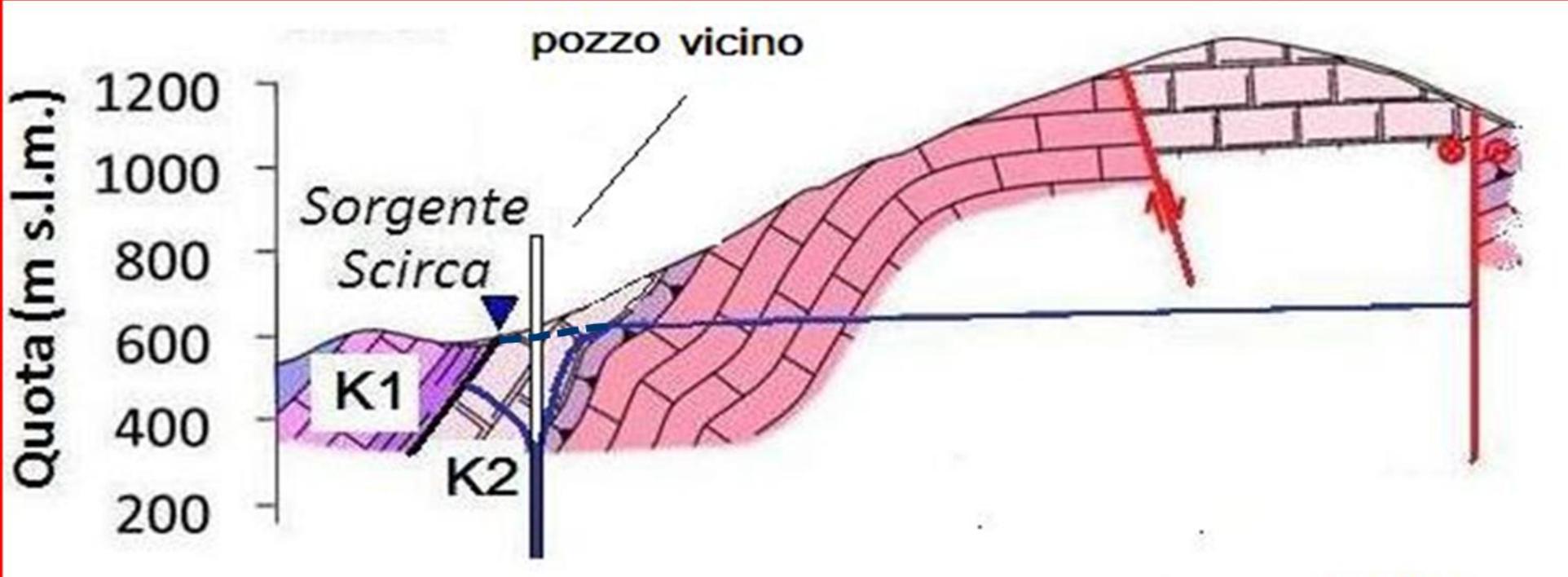
Le sorgenti rappresentano una delle principali risorse a cui l'Italia attinge per scopi idropotabili: il 35% dell'acqua potabile italiana viene dalle sorgenti, e questa percentuale aumenta al 64% nelle zone montane dell'Appennino centro meridionale.

Tuttavia, nelle zone caratterizzate da una forte stagionalità delle precipitazioni, come quella appenninica, la portata delle sorgenti varia sensibilmente a seconda della stagione, con valori estivi molto più bassi di quelli invernali e primaverili. Ciò comporta che la massima richiesta di acqua si verifica quando la disponibilità è inferiore, così che il fabbisogno non può essere sempre soddisfatto. Questo fatto è attualmente aggravato anche dalla crescente frequenza con cui si verificano siccità forti e prolungate, che mettono in crisi i sistemi sorgivi.

Questo costringe a dover sempre più spesso integrare le risorse fornite dalle sorgenti con altre risorse di diversa provenienza.



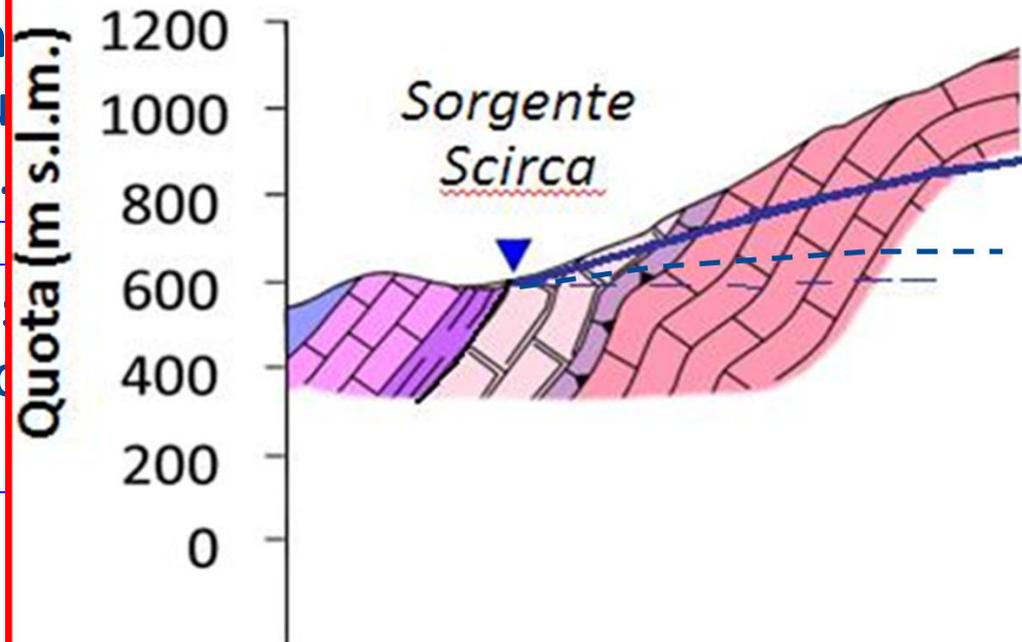
La perforazione integrale scende attraverso



er  
ca  
te

Tuttavia le sorgenti appena di un limite geologico a fluidraulicamente inefficienti.

Inoltre, la ulteriore depressione che la portata naturale con ovvie conseguenze sia



zzate in prossimità  
no ad esse li rende

a dal pompaggio fa  
si annulli del tutto,



# L'obiettivo di questo lavoro

Investigare, mediante modelli matematici, la possibilità di gestire le sorgenti in maniera innovativa integrando le basse portate disponibili in estate o a seguito di prolungate siccità con prelievi da pozzi ma garantendo, allo stesso tempo, il deflusso minimo vitale.

Autori della scuola romana e napoletana hanno già teorizzato la possibilità di “regolarizzare” la portata naturale delle sorgenti incrementando tramite prelievo dalle riserve geologiche la quantità di acqua erogata in estate, a scapito dei picchi di portata invernali, che verrebbero abbassati.

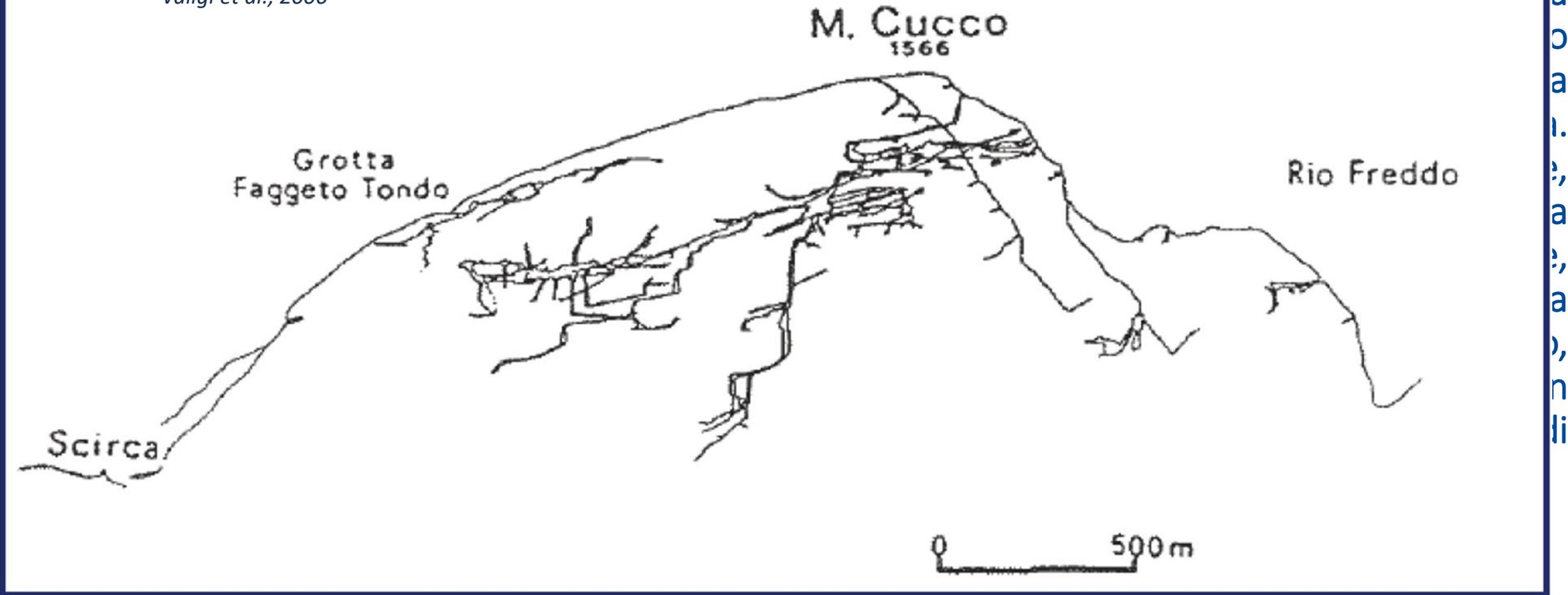
Boni e Petitta (1994) hanno sviluppato questo concetto tramite la modellizzazione di un sistema teorico.

Con questo lavoro tale idea è stata ulteriormente sviluppata modellizzando un sistema reale: la sorgente Scirca.



# Inquadramento Geologico. Quota di emergenza 573 m s.l.m., sul versante occidentale

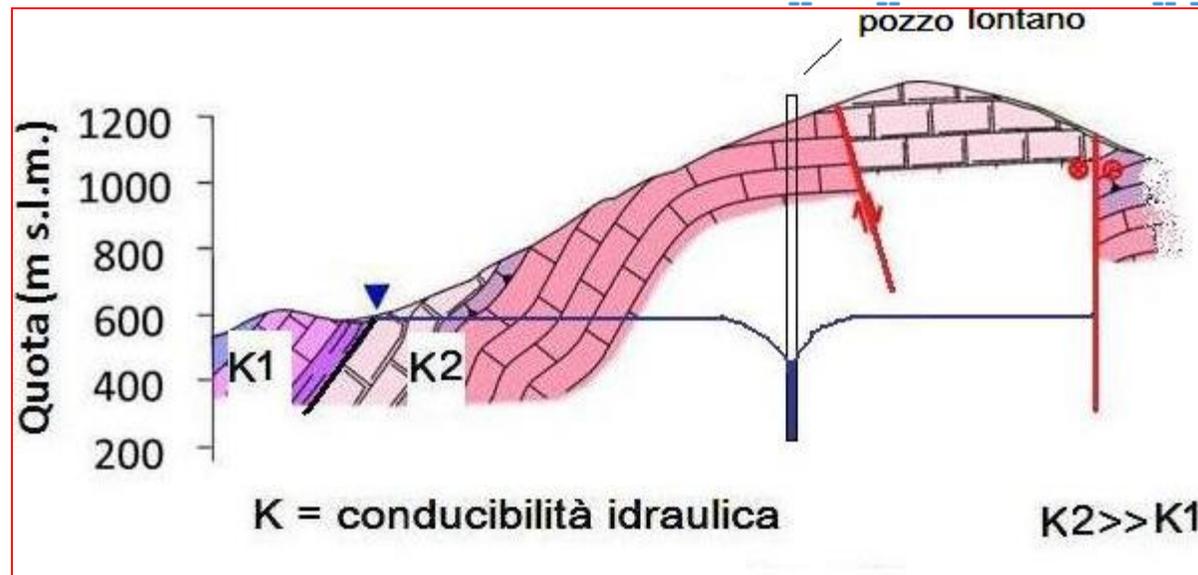
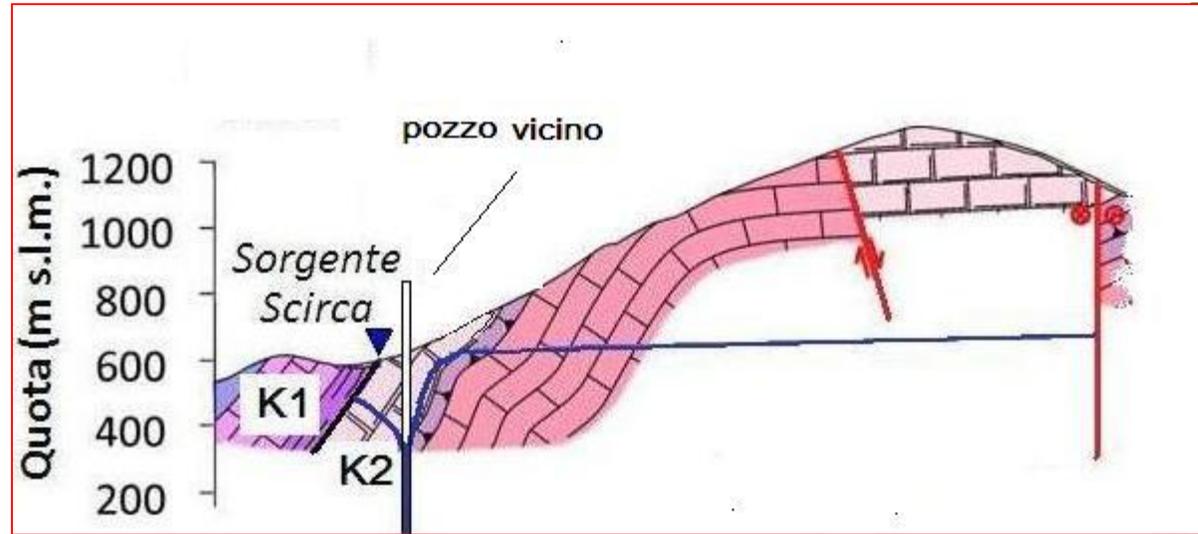
Valigi et al., 2006



CReIAMO PA

a  
o  
a  
l.  
a  
v  
a  
e  
,  
n  
li

# L'effetto dei pozzi



Sebbene si tratti di un acquifero fratturato/carsico fortemente eterogeneo, per la modellazione si è scelto di utilizzare un modello darciiano secondo il principio del mezzo poroso equivalente.

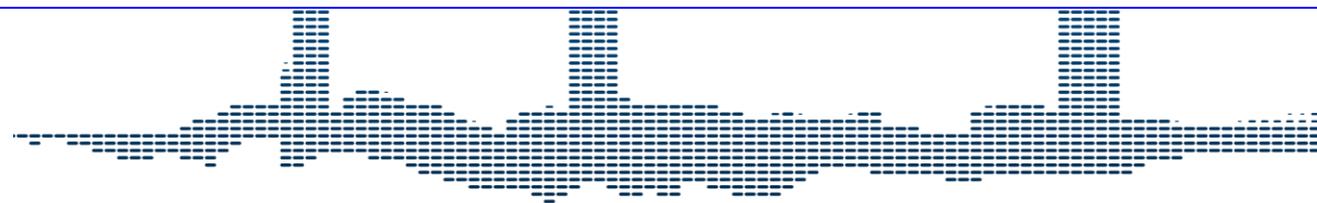
Nel caso della sorgente Scirca questo approccio sembra valido perché è noto dalla letteratura che questa sorgente si comporta più come un mezzo poroso che come un acquifero carsico (Angelini, 1997), in particolare in condizioni di basse portate (la curva di recessione segue l'equazione di Maillet).

Probabilmente ciò si deve al fatto che i fenomeni carsici sono prevalentemente sviluppati nella zona non satura.

L'approccio sembra a maggior ragione corretto in considerazione del fatto che le simulazioni si concentreranno sui periodi di portate basse, quando la componente rapida è nulla e il comportamento della sorgente è darciiano (Maillet).

L'approccio utilizzato può essere considerato valido purché si tengano ben presenti i limiti dei risultati e gli ambiti in cui il modello può essere utilizzato:

lo scopo di questo lavoro è quello di riprodurre il bilancio idrogeologico e di simulare la portata. Non sarebbe possibile utilizzare lo stesso approccio per simulare direzione e velocità di flusso.



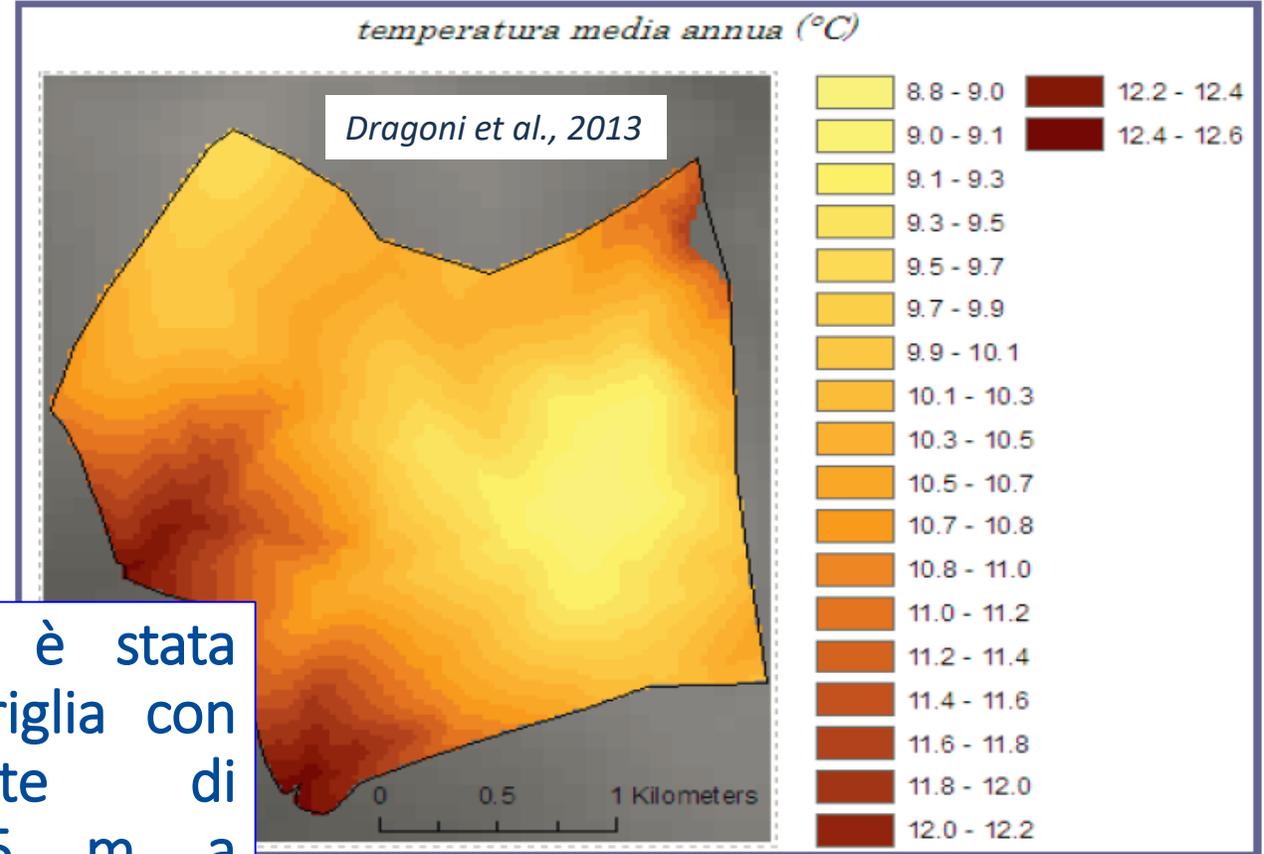
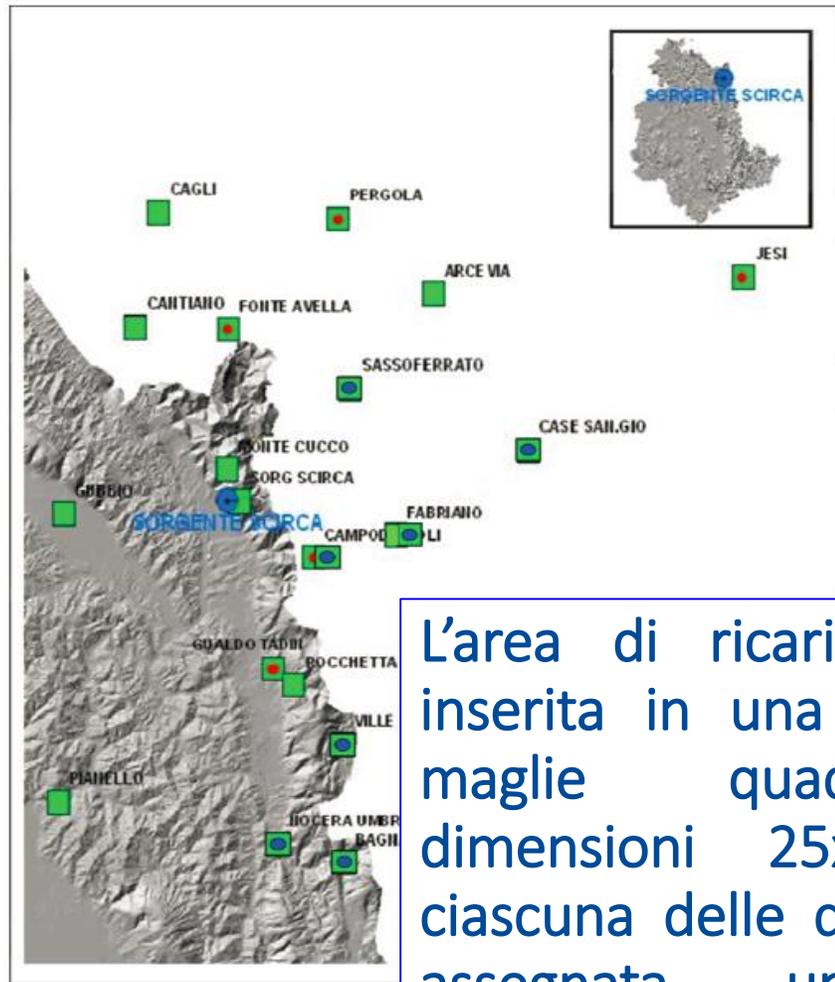
Per costruire un modello idrogeologico è necessario stabilire una condizione iniziale da cui far partire le simulazioni: questa condizione è stata scelta come la distribuzione piezometrica corrispondente alla portata media annua della sorgente pari a 225 l/s (stato stazionario).

Questa distribuzione piezometrica è associata alla ricarica media annua ricadente sull'area di alimentazione precedentemente definita.

Per la stima della ricarica media annua ci si è avvalsi di dati storici di temperatura e di pioggia registrati nelle stazioni più prossime all'area di alimentazione (in mancanza di affidabili stazioni interne all'area di ricarica e situate in alta quota).



# Determinazione della temperatura media annua



L'area di ricarica è stata inserita in una griglia con maglie quadrate di dimensioni 25x25 m a ciascuna delle quali è stata assegnata una quota costante ricavata da un DEM

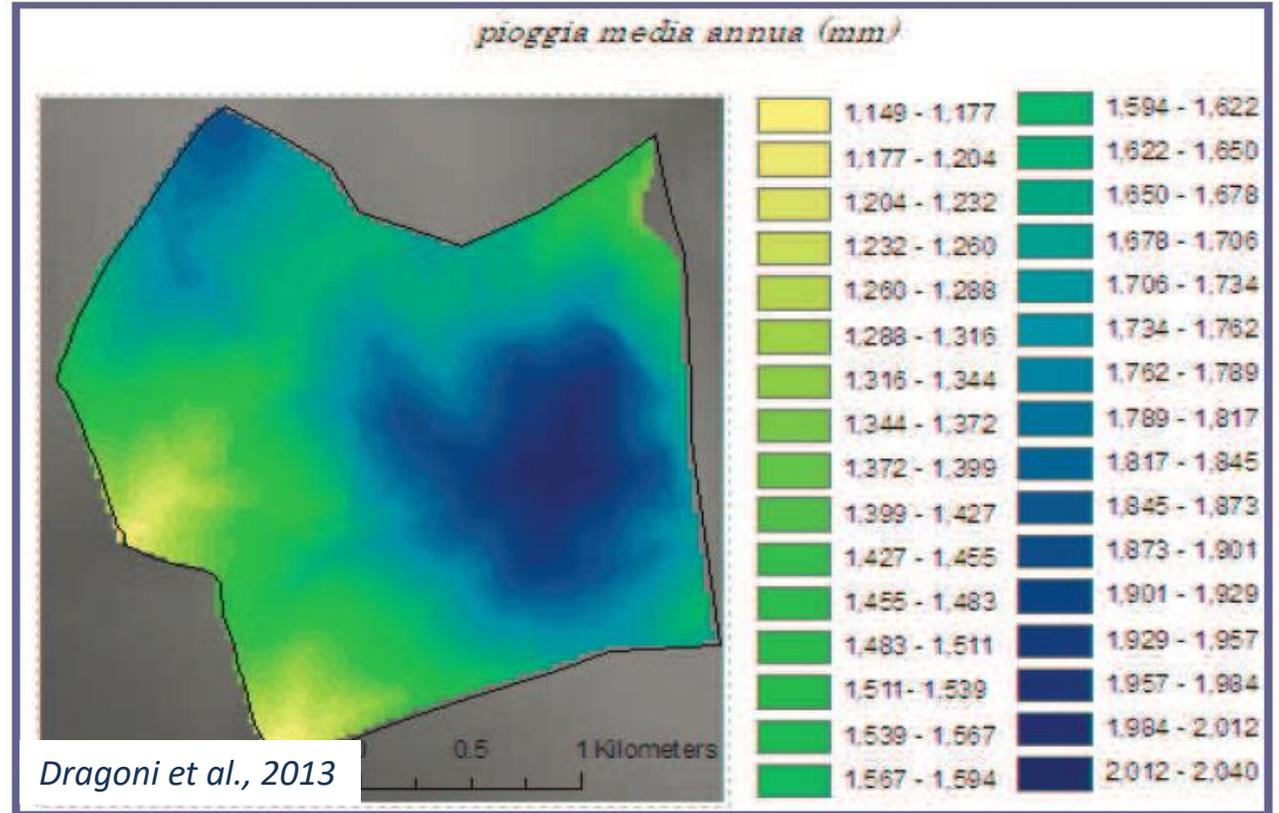
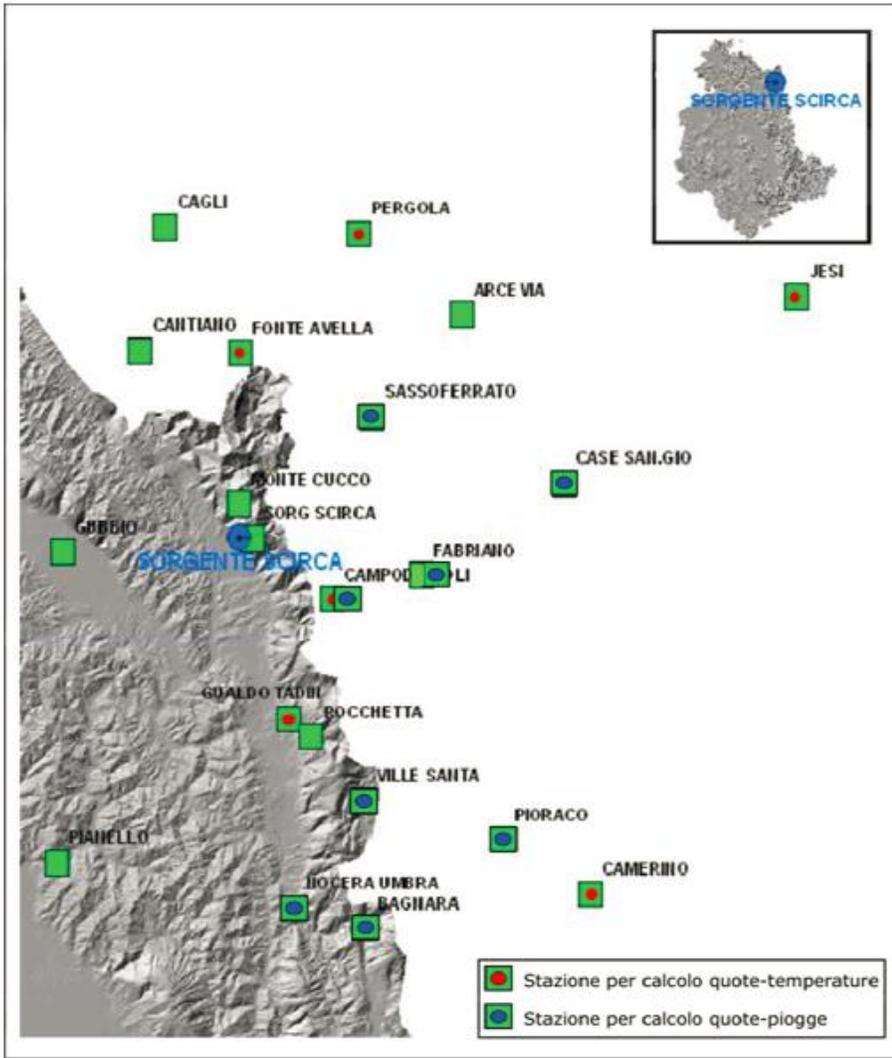
Quota (m s.l.m)

**T = 10.3 °C**



**CReIAMO PA**

# Determinazione della pioggia media annua



Quote (m s.l.m.)

$P = 1661 \text{ mm/anno}$



CReIAMO PA

Pioggia e temperatura media annua sono state utilizzate per valutare ETR media annua attraverso la formula di Turc:

$$\text{ETR}(\text{mm / anno}) = \frac{P_a}{\sqrt{0.9 + \frac{P_a^2}{L^2}}}$$

con

ETR(mm/anno)= evapotraspirazione annua

$P_a$  (mm/anno) = pioggia media annua

$$L = 300 + 25T_a + 0.05T_a^3$$

con  $T_a$  (°C) = temperatura media annua

e, a partire da questa, il valore della pioggia efficace

$$P_{\text{eff}} = P - \text{ETR} = 1661 - 532 = 1129 \text{ mm}$$



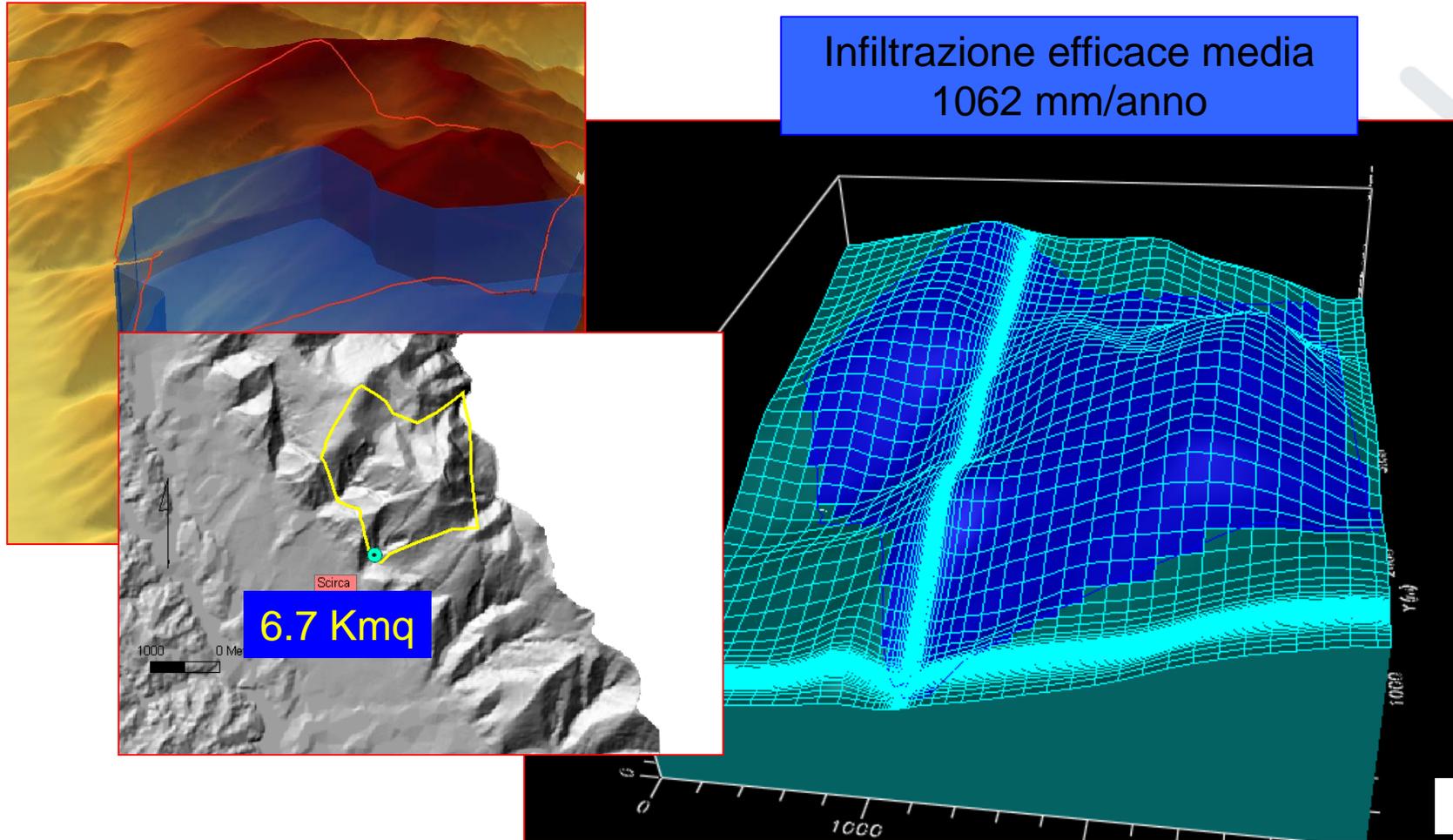
Per un'area di ricarica stimata pari a  $6.7 \text{ km}^2$  di estensione questo valore corrisponderebbe ad una portata media annua  $Q_{eff} = 240 \text{ l/s}$ .

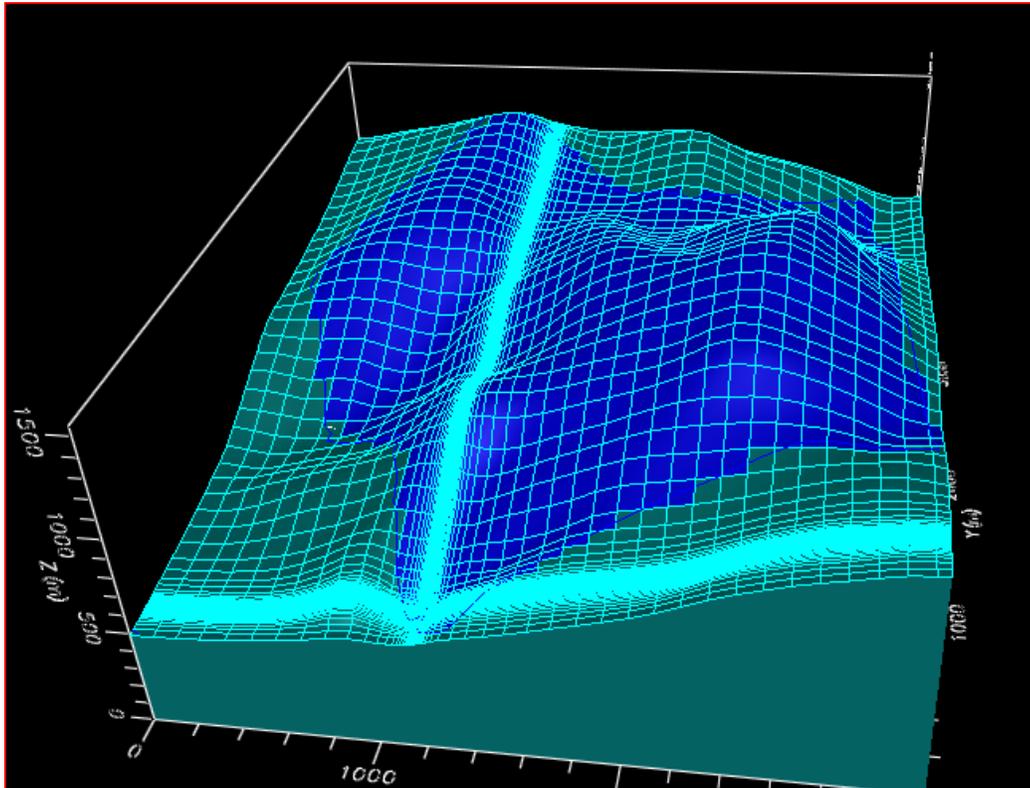
La portata media misurata alla sorgente (misure giornaliere a partire dal 1941) è invece pari a  $Q_{mis} = 225 \text{ l/s}$

Il rapporto  $Q_{mis}/Q_{eff}$  è pari a 0.94, valore che ricade nel range atteso per il coefficiente di infiltrazione potenziale  $CIP$  per rocce calcaree fratturate e carsificate ( $0.75 < CI < 1$ )



Nella discretizzazione del modello matematico l'acquifero è rappresentato da una griglia tridimensionale con maglie di dimensioni telescopicamente decrescenti verso la cella 5x5 m che rappresenta la sorgente.





La griglia è costituita da 60 righe, 56 colonne e 56 strati, tutti confinati fuorché il primo.

La cella che rappresenta la sorgente ha un potenziale imposto pari a 573 m, pari alla quota sul livello del mare della sorgente. Questo è di fatto l'unico punto noto della superficie piezometrica.

La ricarica media annua è simulato da un contorno a portate costante che immette nel sistema una ricarica paria 1062 mm /anno, pari alla  $P_{\text{eff}}$  (1129 mm) moltiplicata per il CIP (0.94).

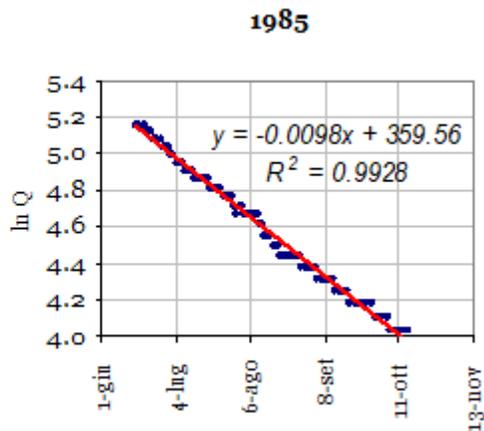
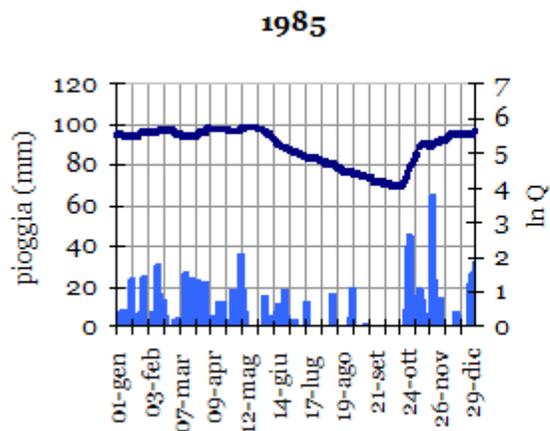


Il primo passo per la calibrazione del modello è stato la determinazione di una distribuzione piezometrica capace di riprodurre, per il valore di ricarica assegnato, la portata media annua della sorgente (225 l/s).

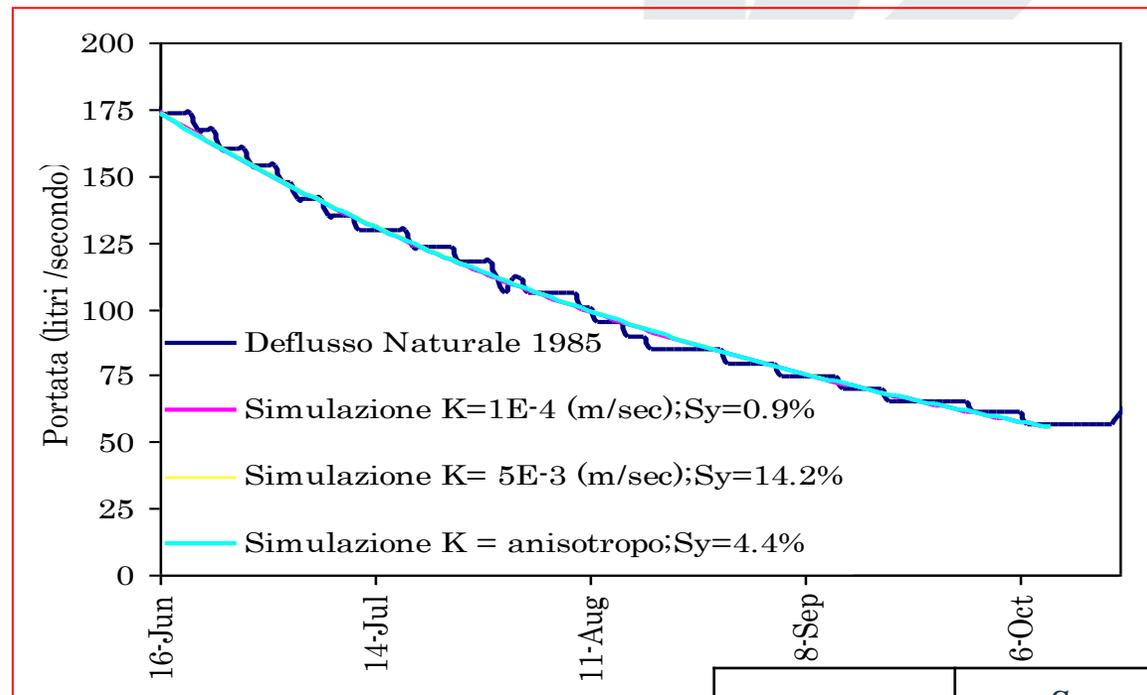
In questa fase i valori di portata simulati dipendono dalla sola permeabilità (stato stazionario): è stato possibile simulare la portata media annua della sorgente con valori di permeabilità compresi tra  $5 \times 10^{-3}$  e  $1 \times 10^{-4}$  m/s.



Una volta definito lo stato stazionario si è passati alla simulazione della curva di esaurimento della sorgente in assenza di ricarica, a partire dalla distribuzione piezometrica corrispondente allo stato stazionario. In questo caso la portata dipende anche dal valore del coefficiente di immagazzinamento (regime transitorio).



anno	Q <sub>0</sub> (l/s)	α (1/giorni)	t (giorni)
1950	129	0.0091	76
1956	215.19	0.0089	113
1967	196.2	0.0095	88
1985	173.47	0.0098	122
1987	195.02	0.01	116
1990	79.6	0.0078	62
1997	166.83	0.0119	65
1998	201.94	0.0091	87
1999	166.83	0.0096	93
2000	165.83	0.0109	91
2001	135.08	0.0105	69
2003	117.26	0.0103	84
		$\bar{\alpha} = 0.0098$	



### Equazione di Maillet

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}$$



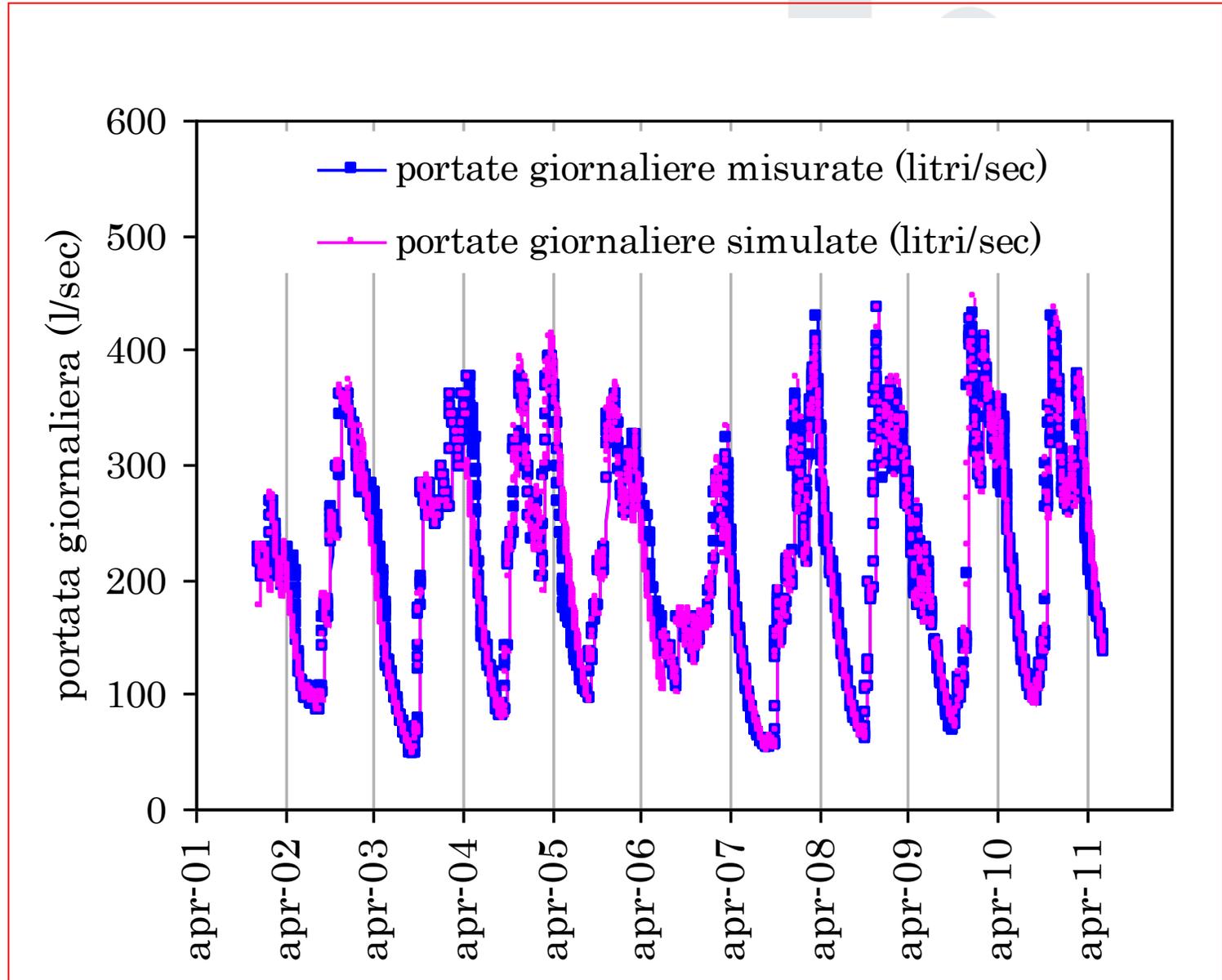
CReIAMO PA

La curva viene efficacemente riprodotta con varie coppie  $K$ - $S_y$ ; le simulazioni sono perfettamente equivalenti.

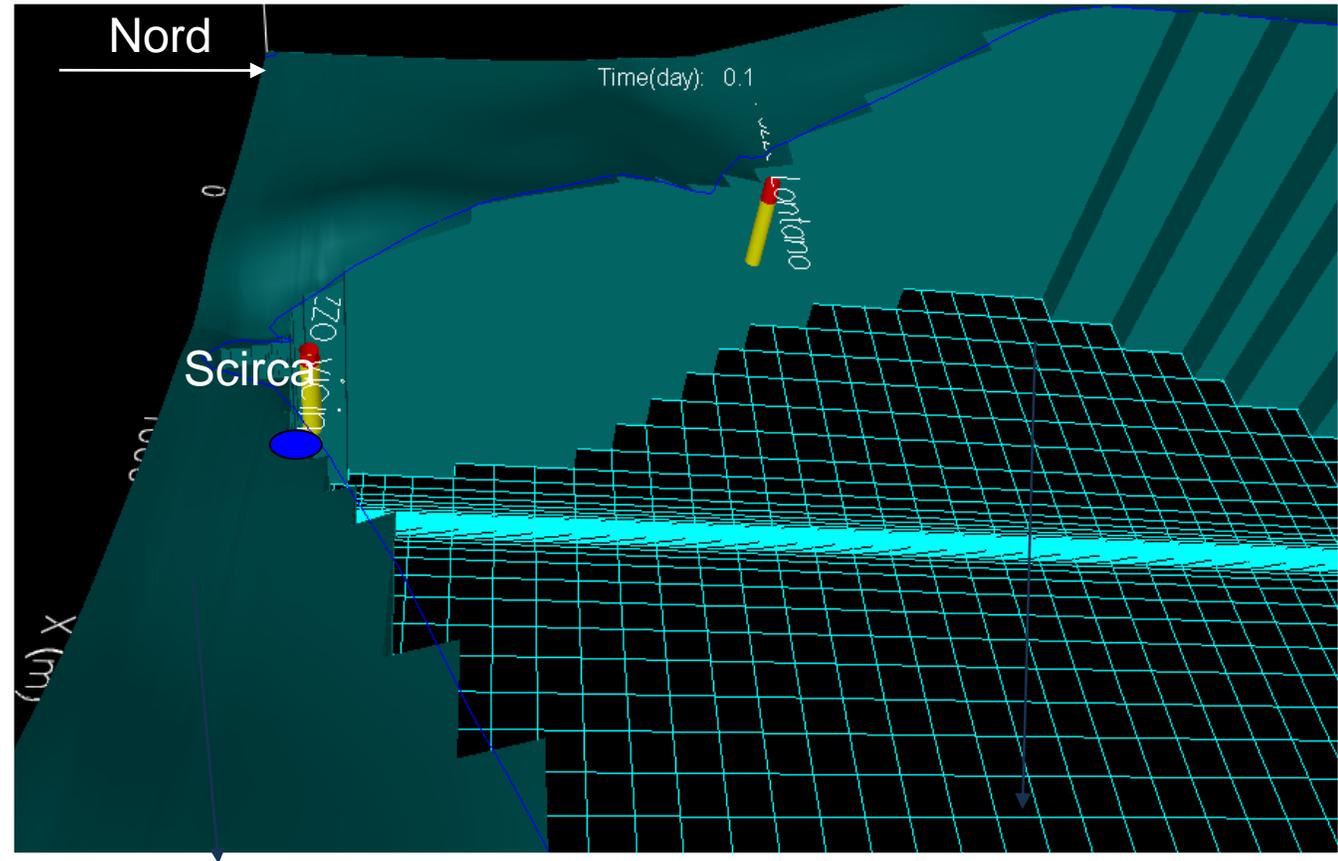
$K$ (m/sec)	$S_y$ (calibrato)
5.00E-03	0.145
3.00E-03	0.12
1.00E-03	0.073
5.00E-04	0.044
1.00E-04	0.009

Una volta disponibili varie coppie K-Sy il modello è stato utilizzato per riprodurre l'idrogramma giornaliero della sorgente per un periodo di 16 anni.

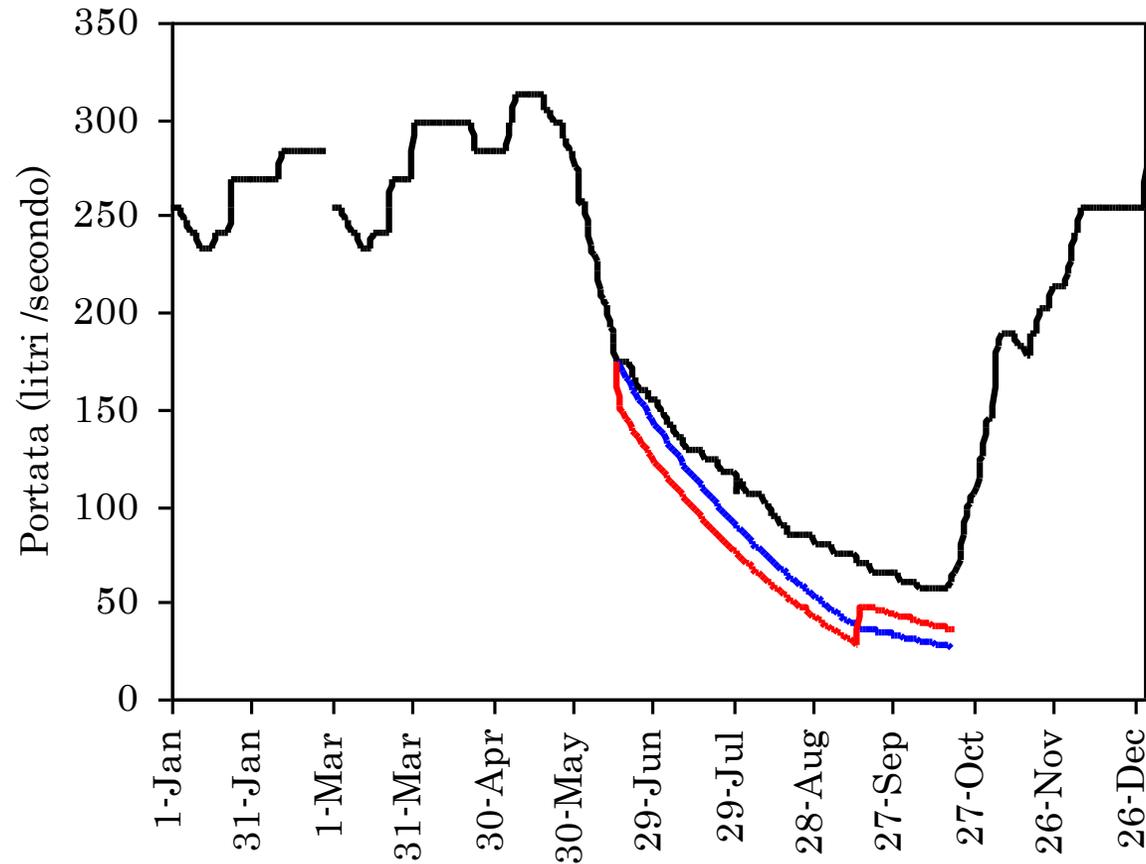
Il modello è stato calibrato per *modellazione inversa* assegnando valori di ricarica giornaliera che permettessero di riprodurre efficacemente l'idrogramma partendo dalla distribuzione piezometrica precedentemente definita per lo stato stazionario.



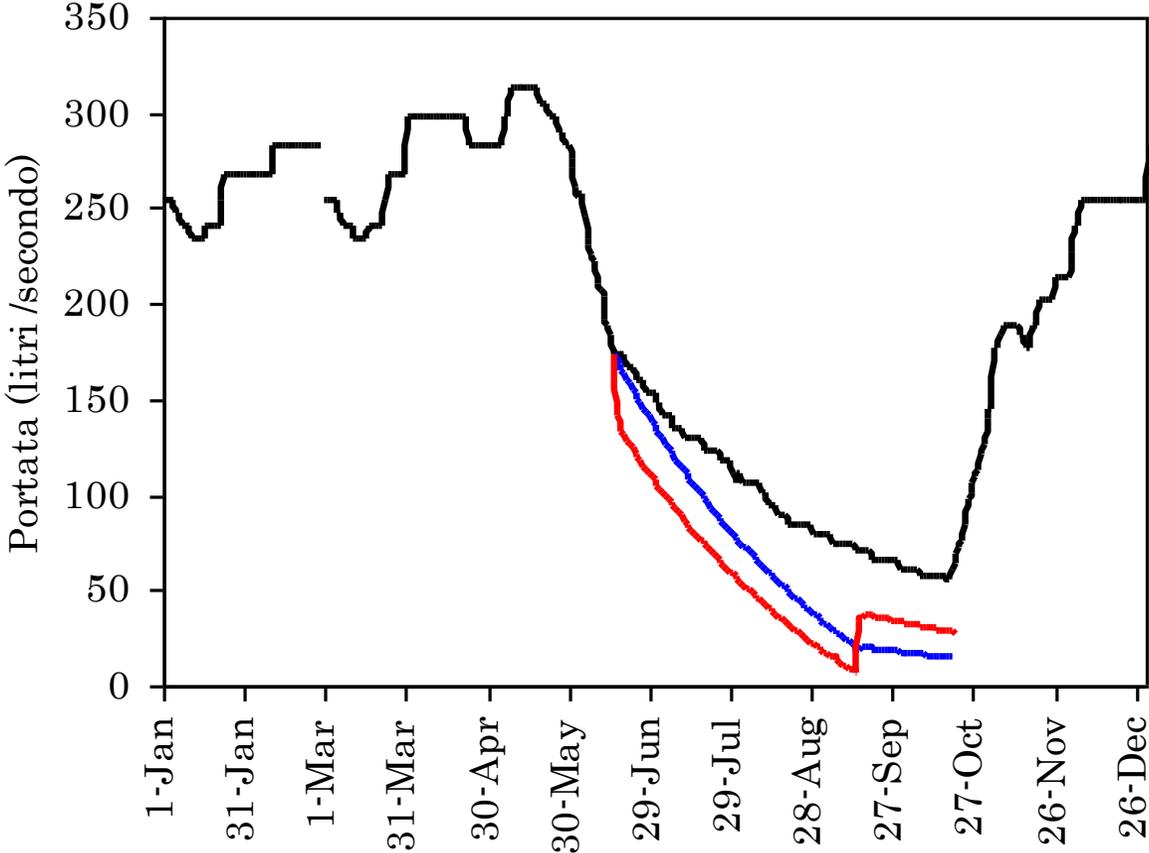
Il modello è stato infine utilizzato per simulare il comportamento della sorgente (variazioni di portata) nell'ipotesi di integrare la portata naturale emungendo da pozzi perforati nell'acquifero che alimenta la sorgente, a differenti distanze da essa.



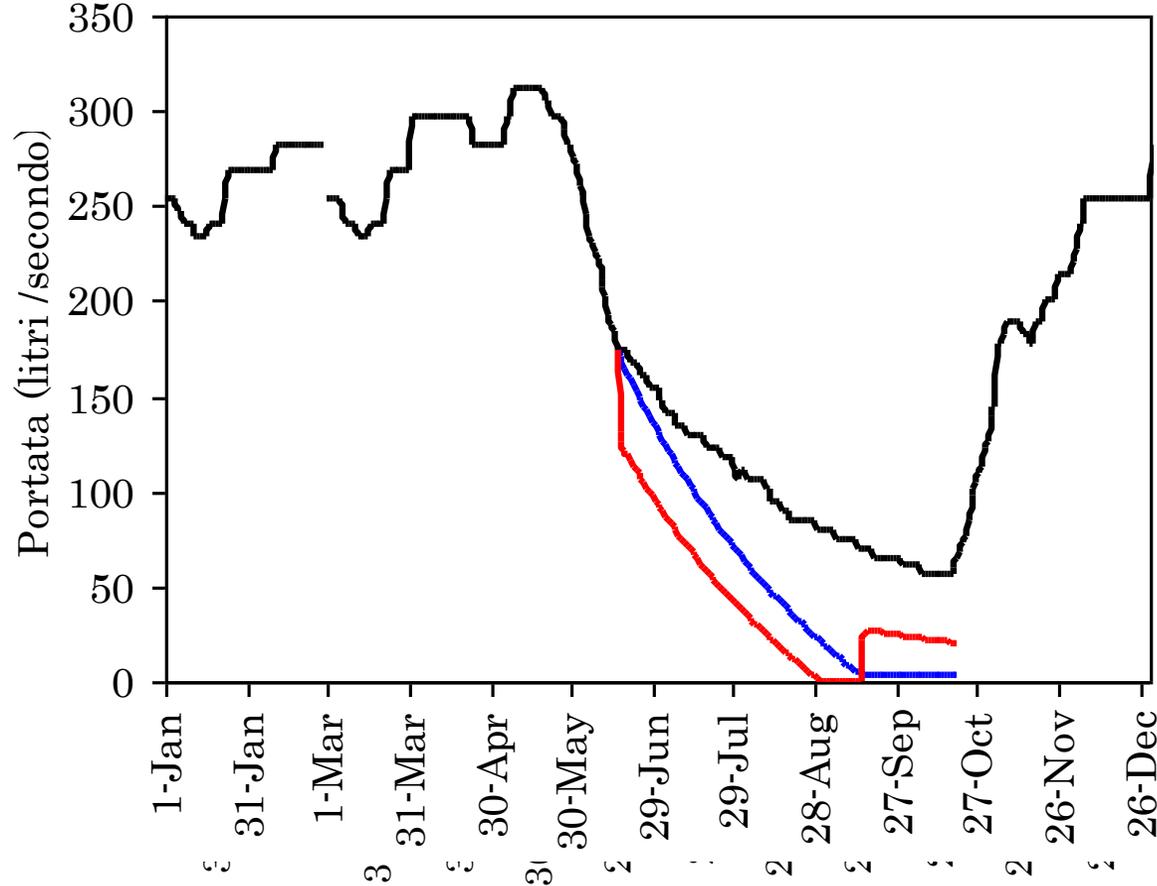
Simulazione della fase di recessione con un pozzo in pompaggio per 90 giorni (60 l/s) a partire dall'8 giugno 1985 (inizio del periodo di esaurimento). L'idrogramma è simulato per un pozzini a 1200 metri e 80 metri dalla sorgente .

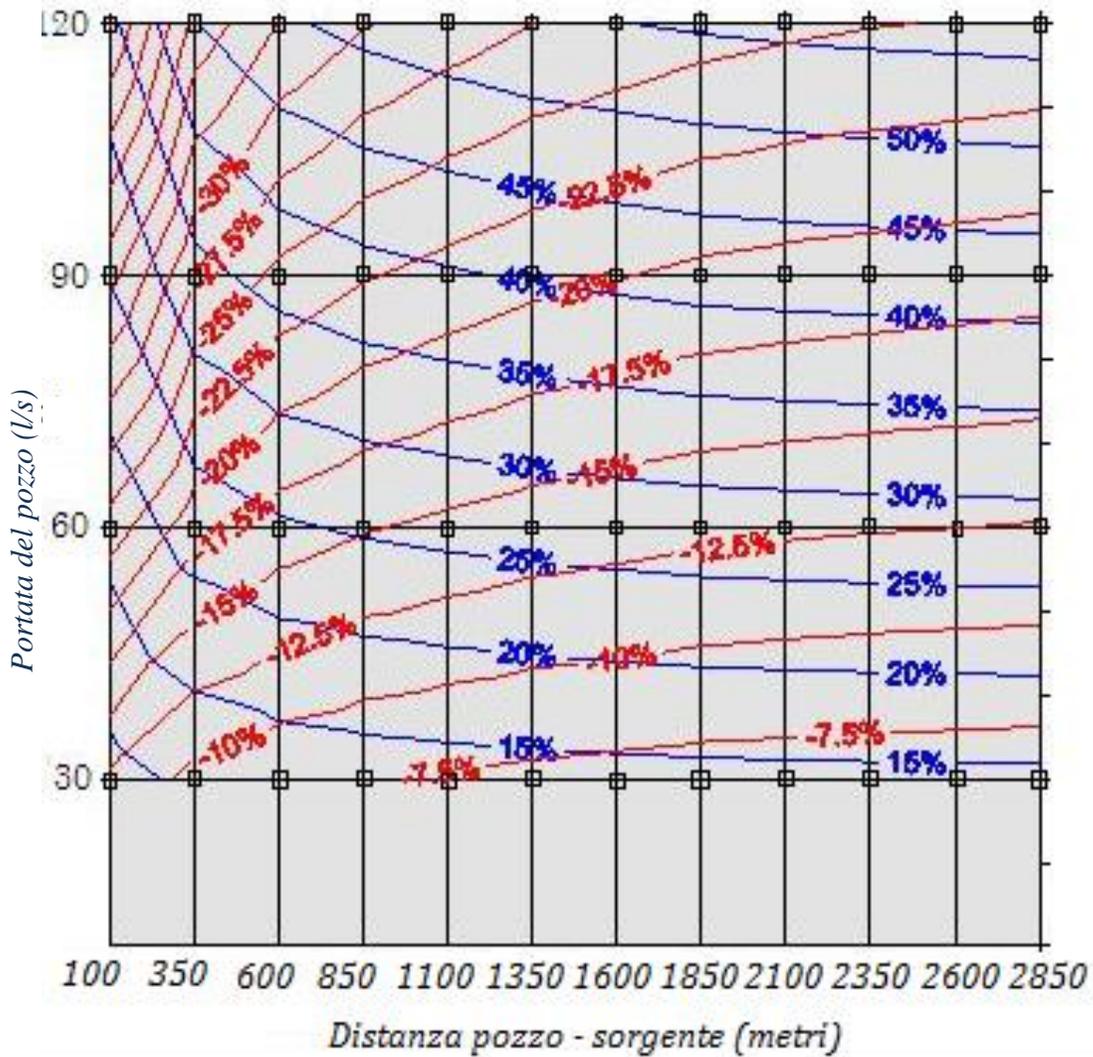


Simulazione della fase di recessione con un pozzo in pompaggio per 90 giorni (90 l/s) a partire dall'8 giugno 1985 (inizio del periodo di esaurimento). L'idrogramma è simulato per un pozzai a 1200 metri e 80 metri dalla sorgente .



Simulazione della fase di recessione con un pozzo in pompaggio per 90 giorni (120 l/s) a partire dall'8 giugno 1985 (inizio del periodo di esaurimento). L'idrogramma è simulato per un pozzini a 1200 metri e 80 metri dalla sorgente .





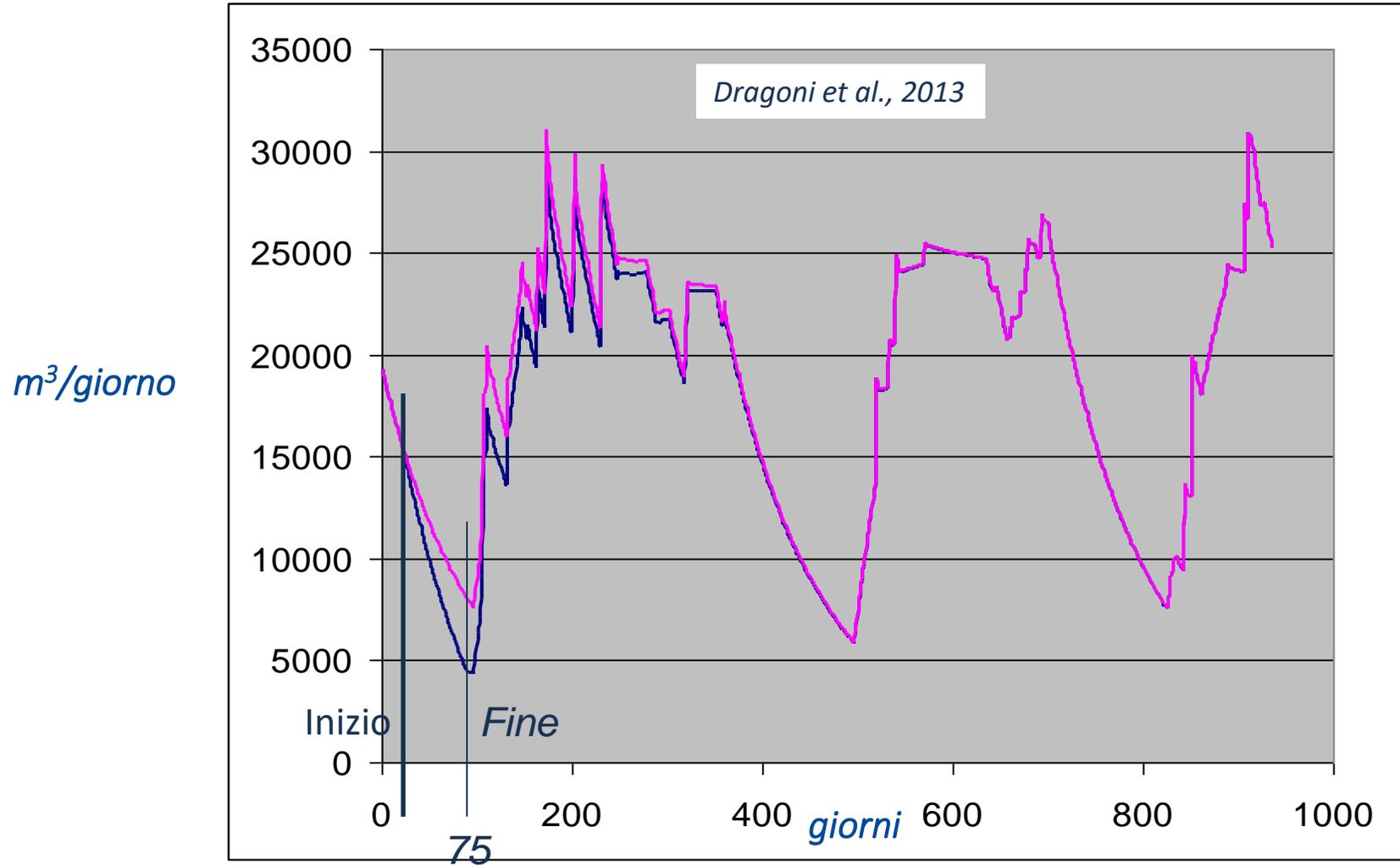
Dragoni et al., 2013

Per quantificare in maniera più efficace l'influenza del pompaggio sulla sorgente sono state eseguite 48 simulazioni incrementando la distanza del pozzo dalla sorgente ad intervalli di 250 m per distanze comprese tra 100 e 2850 m.

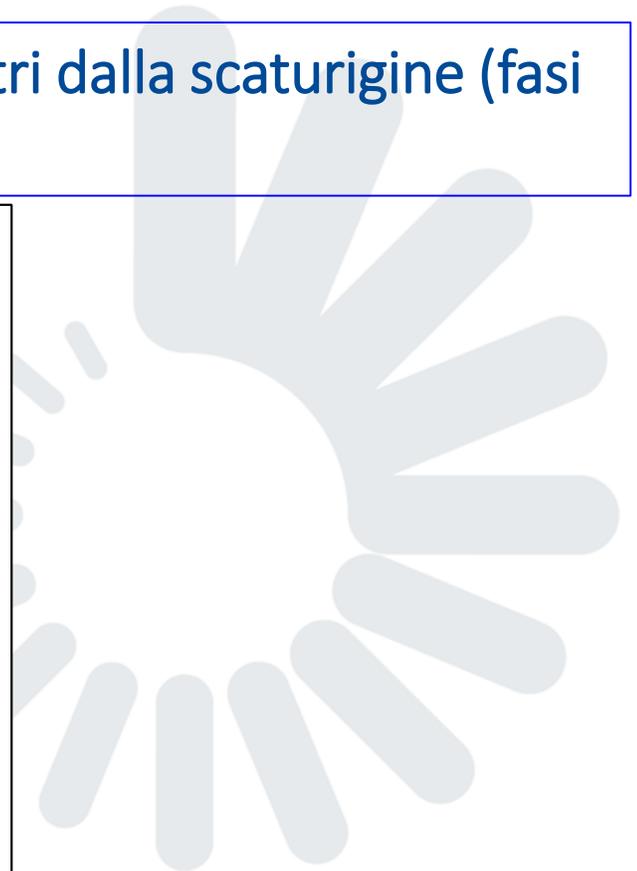
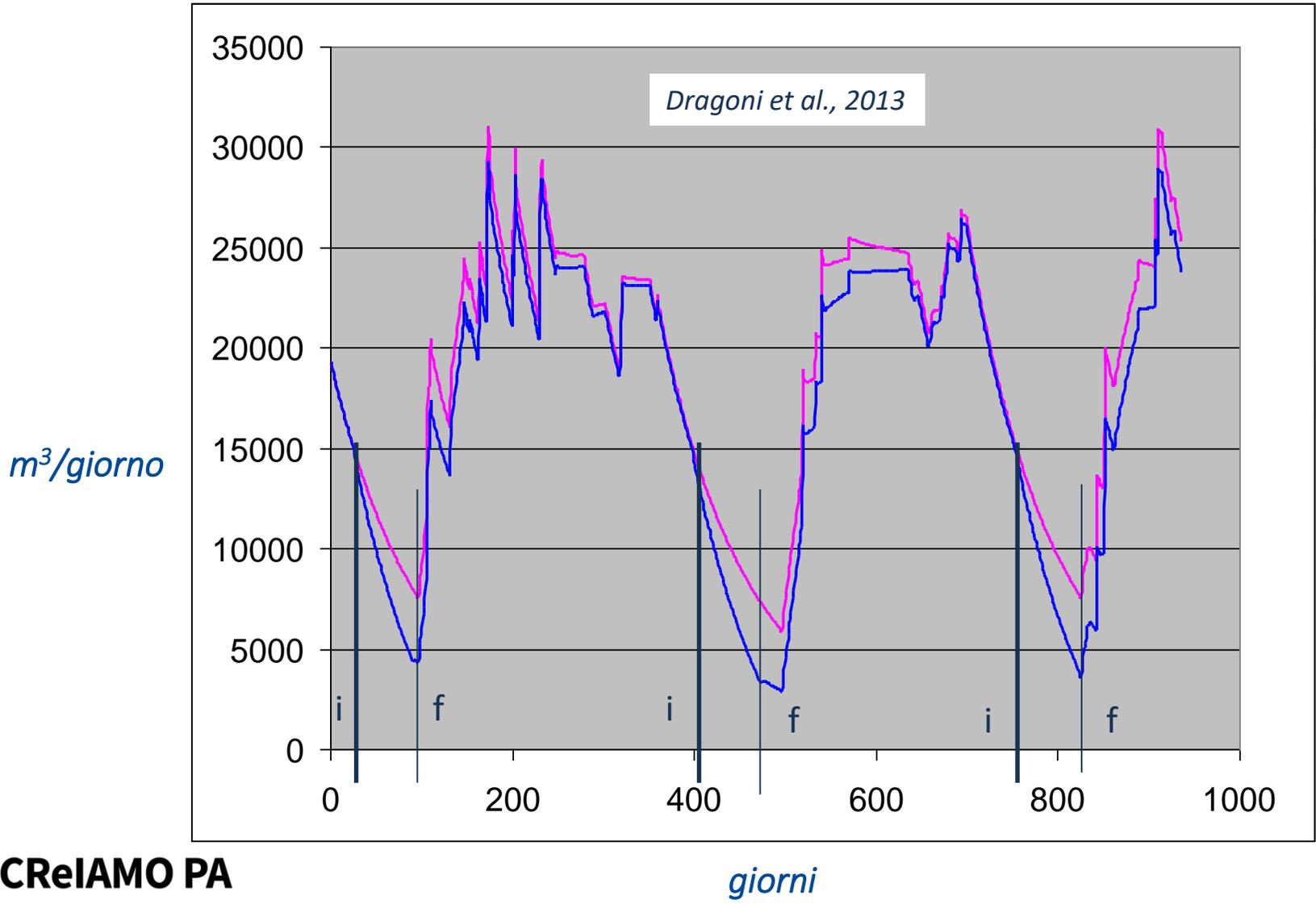
Le portate variano da 30 a 120 l/s, con incrementi progressivi di 30 l/s; il pompaggio è protratto per 90 giorni.

In questo abaco si mostrano i risultati delle simulazioni.

# Portata della sorgente e simulazione di un pozzo a 120 l/sec a 1200 metri dalla scaturigine (75 giorni di emungimento)



# Portata della sorgente e simulazione di un pozzo a 120 l/sec a 1200 metri dalla scaturigine (fasi recessive)



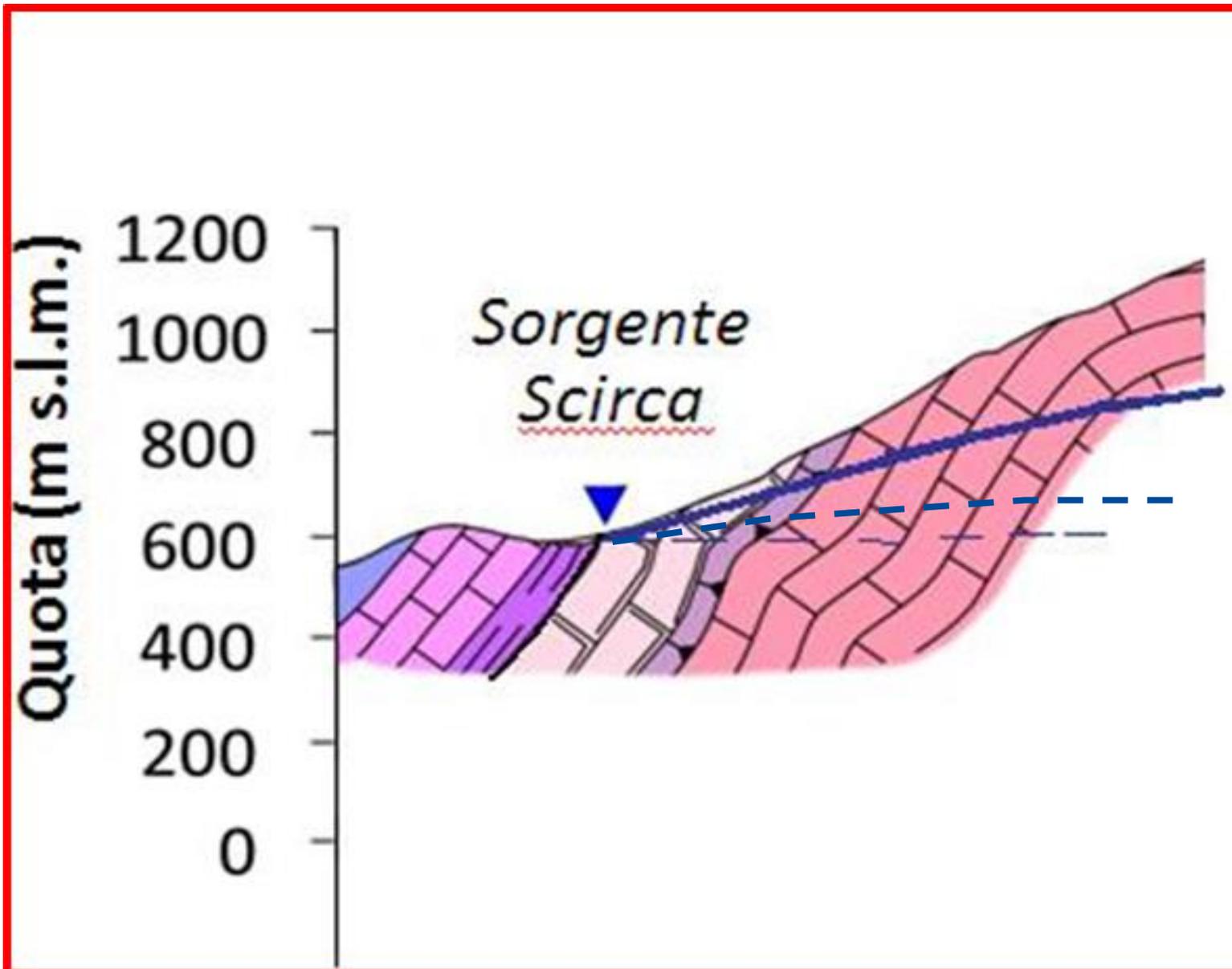
## *Risultati Ottenuti e Conclusioni*

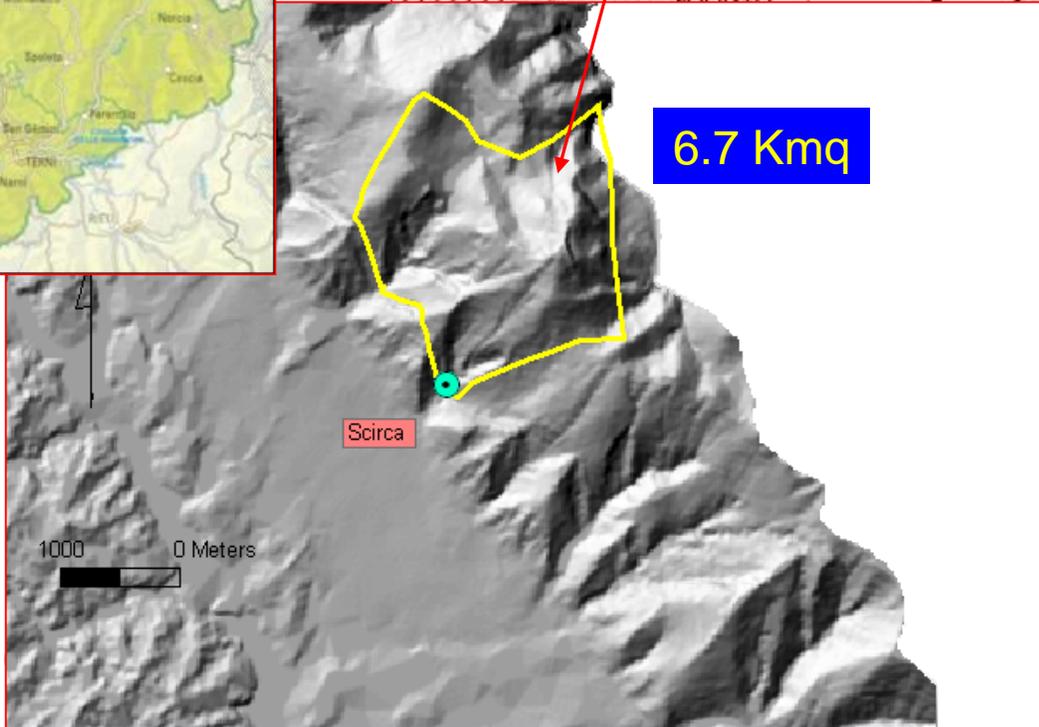
E' stato simulato un criterio di gestione innovativo della sorgente particolarmente efficace che impiega pozzi a grande distanza dalla scaturigine, da cui emerge che la condizione ottimale di sfruttamento del sistema si avrebbe impiegando un pozzo a 1200 metri dall'emergenza con portata di prelievo di 120 litri/secondo, in esercizio per tre mesi all'anno durante i mesi di maggiore richiesta idrica (giugno, luglio, agosto). Tali simulazioni possono costituire la base operativa su cui pianificare una gestione della sorgente che tiene conto dei rilasci in alveo e dei prelievi tramite pozzo (nei mesi siccitosi) su base economica a lungo termine.

Sono stati determinati, sotto alcune ipotesi di sfruttamento, i tempi necessari alla sorgente per assorbire le perturbazioni prodotte dai pozzi di prelievo previsti dal metodo di gestione.

E' stato dimostrato che il sistema idrogeologico di Scirca può realisticamente essere forzato ad erogare meno acqua in inverno e a cederla in misura maggiore in estate, emungendo ciclicamente per 90 giorni all'anno, pluriannualmente, trasformandosi così in un sistema molto più gestibile acquedottisticamente, idoneo alle necessità idriche dell'utenza soprattutto durante la stagione secca.





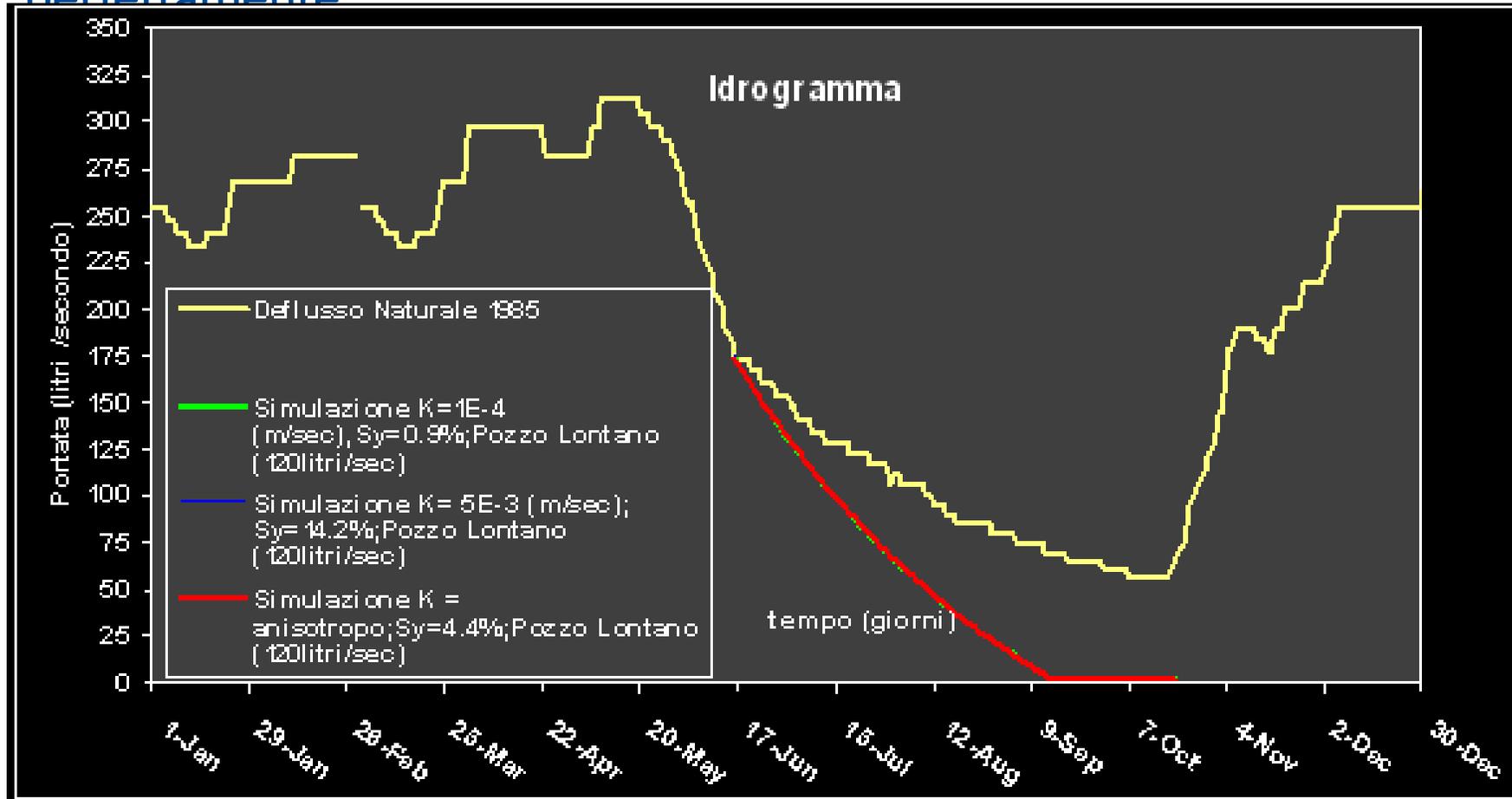


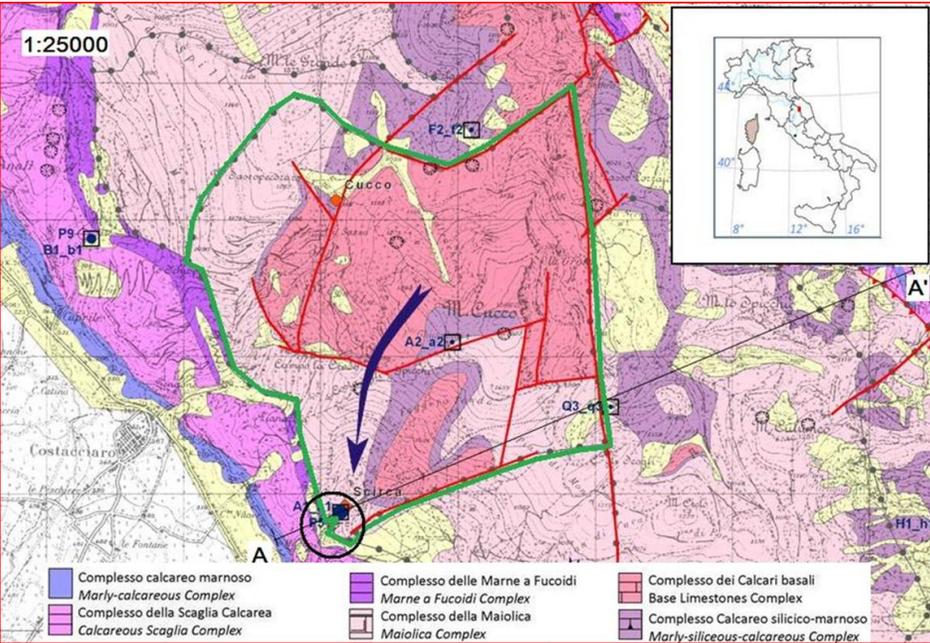
Sorgente Scirca. Quota di emergenza 573 m s.l.m., sul versante occidentale del massiccio di Monte Cucco.



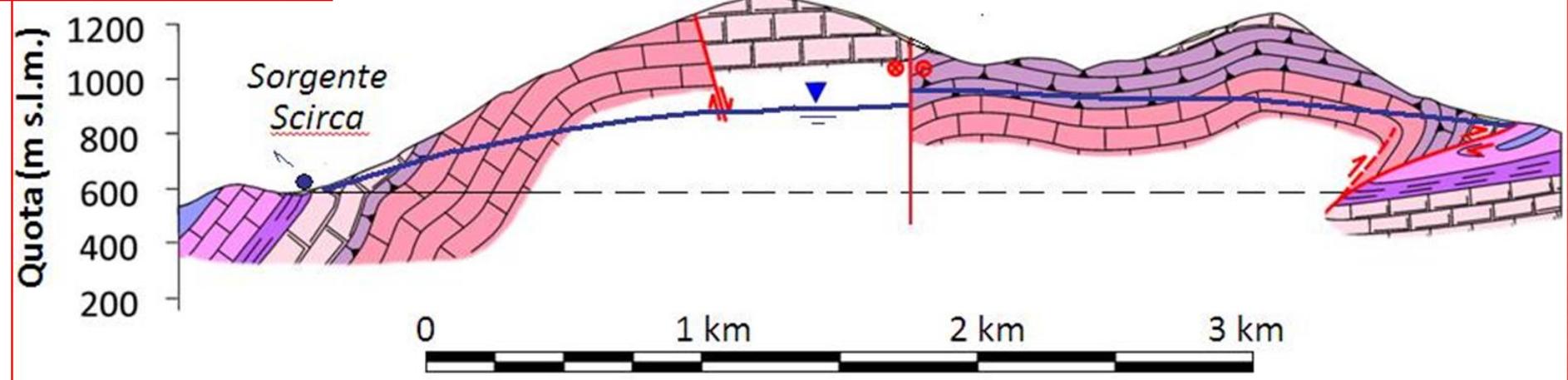
CREIAM

simulazioni per portata della portata naturale della sorgente durante la fase di recessione con pozzo lontano in pompaggio per tre mesi naturale della fase di recessione per varie conducibilità idrauliche, isotrope e non. Le simulazioni sono perfettamente equivalenti., tanto da sovrapporsi perfettamente

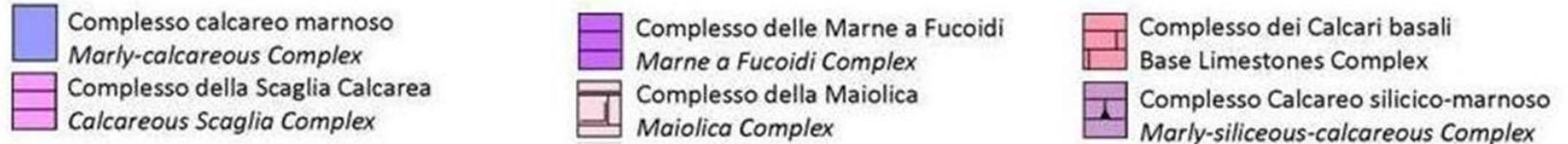


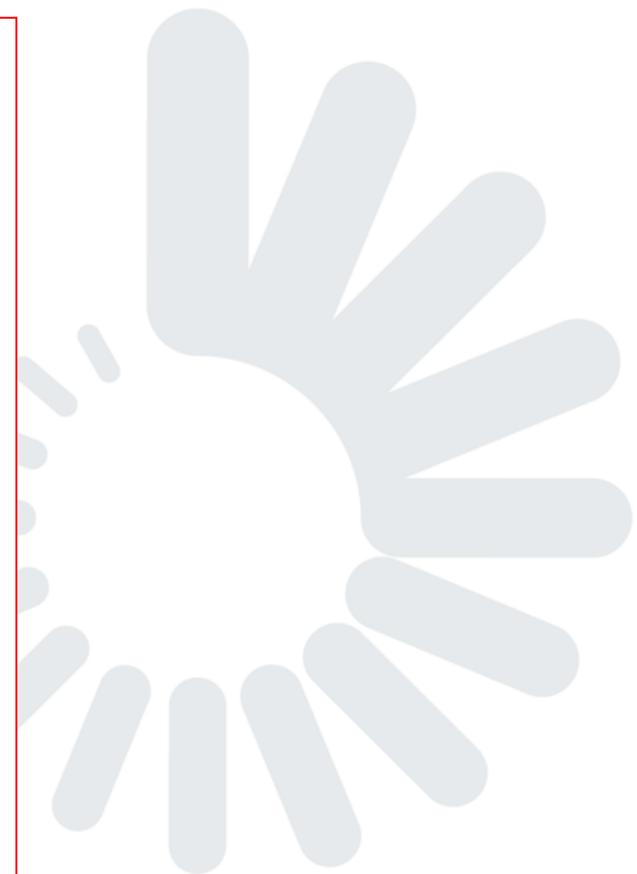
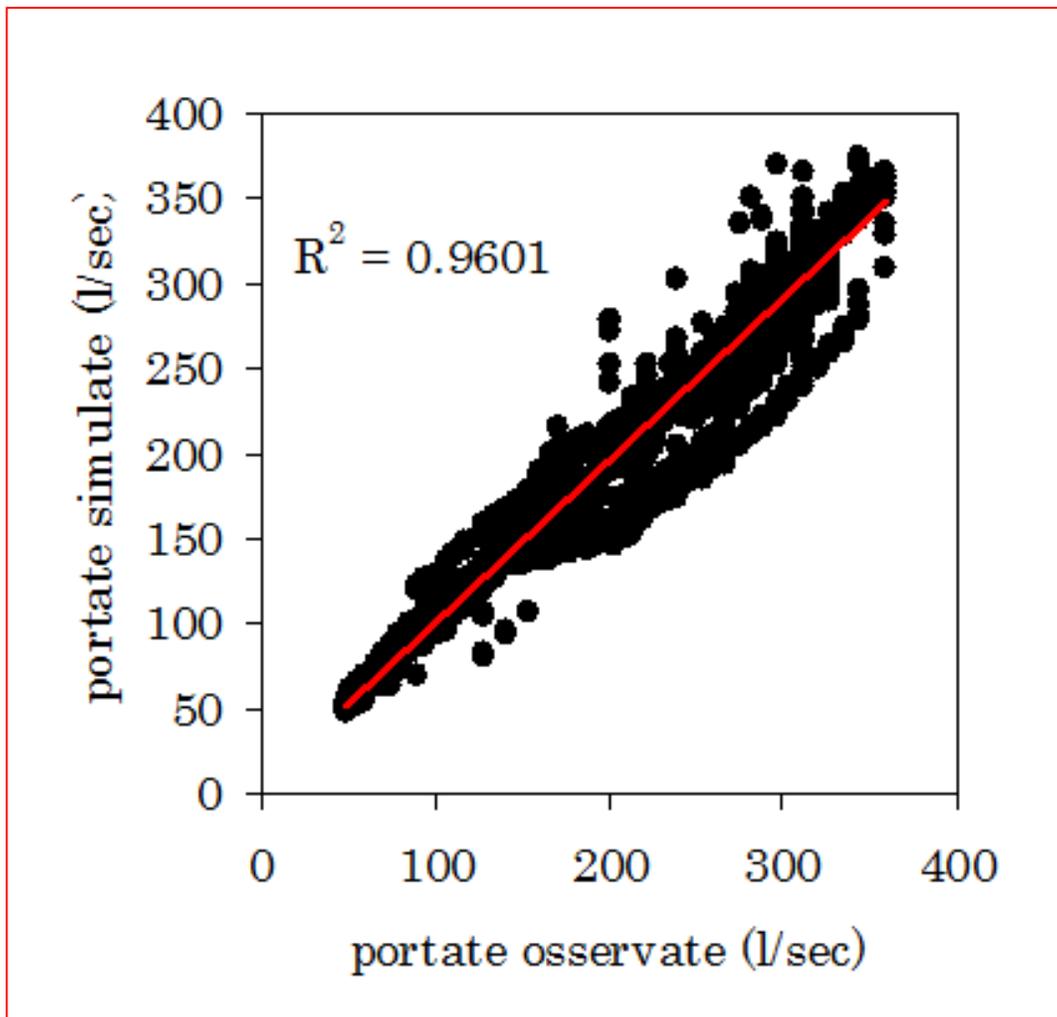


### SEZIONE IDROGEOLOGICA A-A'



Scala 1:25000





Bontà della Simulazione pluriennale valutata attraverso il grado di correlazione lineare tra portate osservate e portate simulate



**CReIAMO PA**

# Grazie per l'attenzione

**Costanza Cambi, Dipartimento di Fisica e Geologia  
Università degli Studi di Perugia**



**CReIAMO PA**

