

## Università degli Studi RomaTRE

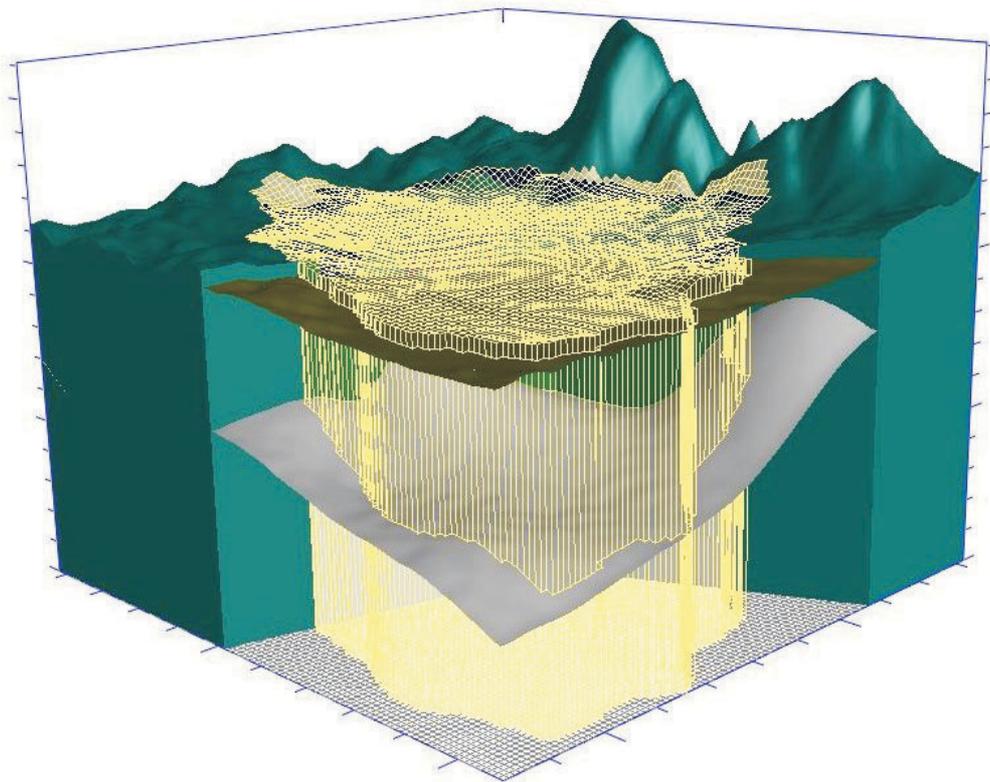
Dipartimento di Scienze Geologiche

Dottorato in Geodinamica XXI Ciclo

# Modello numerico del flusso dell'unità idrogeologica termominerale delle Acque Albule (Roma)

Dottorando: Francesco La Vigna

Docente tutor: Prof. Giuseppe Capelli



**Cotutors:**

Rudy Rossetto (Land Lab, Scuola Superiore S. Anna di Pisa)

Roberto Mazza (Università degli Studi Roma TRE)

Mary C. Hill (U.S. Geological Survey, Boulder, CO – USA)

**Revisori esterni:**

Prof. Vincenzo Francani (Istituto Politecnico di Milano)

Prof. Giovanni Pietro Beretta (Università degli Studi di Milano)



## **Università degli Studi RomaTRE**

Dipartimento di Scienze Geologiche

Dottorato in Geodinamica XXI Ciclo

### **Modello numerico del flusso dell'unità idrogeologica termominerale delle Acque Albule (Roma)**

**Dottorando:** Francesco La Vigna

**Docente tutor:** Prof. Giuseppe Capelli

**Cotutors:** Rudy Rossetto (Land Lab, Scuola Superiore S. Anna di Pisa)  
Roberto Mazza (Università degli Studi Roma TRE)  
Mary C. Hill (U.S. Geological Survey, Boulder, CO – USA)

**Revisori esterni:** Prof. Vincenzo Francani (Istituto Politecnico di Milano)  
Prof. Giovanni Pietro Beretta (Università degli Studi di Milano)



*...ad Emma che tra poco sarà tra noi*



## INDICE

INDICE .....	1
Abstract .....	5
Riassunto .....	5
1. INTRODUZIONE.....	9
1.1 Descrizione dei capitoli .....	9
1.2 Origine dei dati .....	10
1.3 Obbiettivi della modellazione .....	10
1.4 Funzione del modello .....	11
1.5 Inquadramento dell'area.....	11
1.5.1 Collocazione geografica ed assetto fisiografico.....	11
1.5.2 Inquadramento idrologico e meteo-climatico .....	12
1.5.3 Inquadramento geologico.....	15
1.5.4 Inquadramento idrogeologico .....	26
1.5.5 Inquadramento della destinazione d'uso del territorio.....	31
2 MODELLO CONCETTUALE .....	33
2.1 Sistema acquifero .....	34
2.2 Limiti idrogeologici.....	39
2.3 Proprietà idrauliche degli acquiferi .....	39
2.4 Ricarica, sorgenti e prelievi.....	39
2.5 Bilancio idrico .....	40
2.5.1 Approfondimento dell'idrogeologia e di alcuni termini del bilancio idrico .....	40
3 DESCRIZIONE DEI CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	47
3.1 Codice di calcolo MODFLOW-2005 .....	47
3.1.1 Assunzioni.....	48
3.1.2 Processo di Modellazione .....	48
3.1.3 Limiti.....	52

---

3.2	Descrizione del Codice di Calibrazione UCODE_2005 .....	53
4	COSTRUZIONE DEL MODELLO .....	57
4.1	Dominio del modello.....	57
4.2	Parametri idraulici .....	58
4.3	Ricarica, sorgenti e prelievi.....	63
4.4	Condizioni iniziali ed al contorno .....	63
4.5	Selezione dei punti di calibrazione e loro scopo .....	64
4.6	Parametri numerici del risolutore .....	65
5	CALIBRAZIONE .....	67
5.1	Analisi quantitativa e qualitativa.....	67
5.2	Analisi di sensitività e processo di calibrazione.....	67
5.3	Verifica dell'applicazione del modello .....	71
6	SIMULAZIONI .....	73
6.1	Scenario1 di riferimento (di taratura).....	73
6.2	Scenario2 (scenario indisturbato).....	74
6.3	Scenario3 (forte siccità).....	75
6.4	Scenario4 (estate) .....	76
6.5	Scenario5 (proposta di scenario a “risparmio energetico”).....	77
7	SINTESI.....	79
7.1	Considerazioni conclusive.....	79
7.2	Interfacce e software di simulazione a confronto.....	80
7.2.1	Software open source USGS.....	80
7.2.2	Ground Water Vistas V. 5.....	81
7.2.3	Visual Modflow V.4.2 .....	81
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	83
	Ringraziamenti .....	87

---

APPENDICE.....	89
MODEL SIMULATION LOGS .....	
NORME TECNICHE .....	



### **Abstract**

*The Acque Albule Plain is a subsiding basin located close to Rome, Italy. Since the development of a North-South fault system (around 150.000 years ago), intense hydrothermal activity produced travertine deposits up to 80 meters thick.*

*Ancient Roman exploited the Lapis Tiburtinus (travertine) deposits by means of superficial quarrying: the presence of a shallow water table limited their mining. Nowadays, water pumps and resulting dewatering allowed substantial extraction, the city of Rome expanded, so that in this area present buildings coexist with quarries in a precarious balance. To manage this balance, many hydrogeological studies have been conducted and an initial steady-state model of the Acque Albule Plain has been developed using MODFLOW\_2005 and UCODE\_2005.*

*Three main hydrologic units define the groundwater system: the unconfined travertine aquifer, overlying a discontinuous clayey aquitard, which in turn confines a carbonate aquifer. The travertine and the carbonate aquifers present fractured porosity, while the aquitard shows a matrix porosity.*

*Model results clearly show the water table depressed by dewatering, fluxes from the confined to the travertine aquifer, and Aniene River fluxes to the dewatering area.*

*Further development of the model imply calibration and validation of transient simulation, and then coupling with the MT3DHeat code in order to study heat transport in the hydrothermal system.*

### **Riassunto**

La piana delle Acque Albule è un bacino subsidente collocato nel Lazio a ridosso dell'Appennino Centrale, a Nord del Complesso Vulcanico dei Colli Albani. Il bacino è limitato a Nord dai rilievi dei Monti Cornicolani, ad Est dai Monti Lucretili, a Sud dal Fiume Aniene e ad Ovest da rilievi costituiti prevalentemente da terreni marini pliocenici.

Fin dall'inizio della subsidenza, datata attorno ai 150.000 anni, sviluppatasi per mezzo di un sistema di faglie ad andamento circa Nord-Sud, è iniziata un'intensa attività idrotermale nell'area, che ha determinato l'accumulo di un importante e continuo deposito di travertino di spessore massimo intorno agli 80 metri (Faccenna, et al., 1994).

Il flusso idrotermale, ancora oggi attivo, è evidente per la presenza di diverse emergenze di acque sulfuree (con temperature di circa 23°C e conducibilità elettrica di circa 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) localizzate in corrispondenza di probabili punti di risalita dei fluidi endogeni circolanti nel substrato carbonatico confinato (Capelli, et al., 1987).

Fin dall'epoca romana il travertino, "*Lapis Tiburtinus*", ampiamente sfruttato per rivestire la maggior parte dei monumenti dell'Urbe, è stato coltivato superficialmente per la bassa soggiacenza delle acque sotterranee. A partire dal secondo dopoguerra, l'avvento di pompe idrauliche sempre più potenti ha permesso di abbassare la falda acquifera e di approfondire la coltivazione. Attualmente, in seguito all'espansione della vicina Città di Roma a spese delle periferie, la presenza antropica e le attività estrattive nella piana di Tivoli-Guidonia coesistono in un delicato equilibrio. Partendo dai numerosi studi condotti in questi anni sulla geologia e sull'idrogeologia locale, e grazie al monitoraggio in continuo dei principali parametri delle acque di falda (La Vigna, et al., 2007) è stato realizzato un modello numerico in stato stazionario del sistema idrogeologico della piana delle Acque Albule utilizzando i codici MODFLOW\_2005 (Harbaugh, 2005) e UCODE\_2005 (Poeter, et al., 2005).

La geometria del sistema idrogeologico è stata schematizzata in tre unità idrostratigrafiche principali: un acquifero superficiale definito da travertini e sedimenti superficiali; un *aquiclude* discontinuo sottostante i travertini; il *bedrock* carbonatico affiorante nei rilievi circostanti e confinato dall'*aquiclude* in corrispondenza della piana. La risalita delle acque dal *bedrock* ai travertini si ritiene avvenga attraverso limitate zone a elevata conducibilità idraulica localizzate nell'*aquiclude*.

Il modello concettuale è stato tradotto in un modello di 100Km<sup>2</sup> suddiviso in un reticolo di 100x100 celle quadrate con 100 m di lato e tre strati. Inizialmente è stato assegnato un singolo valore di conducibilità idraulica per strato, successivamente le conducibilità sono state modificate per meglio rappresentare le reali condizioni di continuità tra gli acquiferi. Nonostante i travertini e i carbonati presentino permeabilità secondaria, per le finalità dello studio a carattere prevalentemente regionale, si è utilizzato l'approccio del mezzo poroso equivalente (Anderson, 1992).

Il carico idraulico nei carbonati è stato simulato assegnando un carico costante di 80 metri s.l.m. (valore superiore alle quote della piana, variabili tra i 75 m ed i 35 m s.l.m.) al limite del dominio attivo del terzo strato. Questa scelta è coerente con i bassi gradienti idraulici dell'acquifero carbonatico e con i carichi osservati in cavità carsiche sature nei rilievi dei Monti Cornicolani (Pozzo del Merro [≈80 m s.l.m.] – Pozzo Sventatore [≈80 m s.l.m.]– Grotta dell'Elefante[≈80 m s.l.m.]). Per quanto riguarda le condizioni al contorno, il Fiume Aniene è stato rappresentato con un *River Package*, le sorgenti presenti con il *Drain Package*, mentre il *Well Package* è stato attribuito a tutte le celle in cui sono posizionate le pompe utilizzate per il *dewatering* dell'area estrattiva (McDonald, et al., 1988).

Le prime simulazioni hanno restituito dei valori calcolati molto differenti dai carichi e dai flussi osservati. A seguito di un'analisi di sensitività (utilizzando *composite scaled sensitivities*) si è potuto osservare come i parametri più importanti del modello siano le conducibilità idrauliche dei travertini, le zone a conducibilità idraulica elevata situate nell'*aquiclude*, i pompaggi e la conduttanza di alcuni dreni.

La calibrazione del modello si è quindi concentrata su questi parametri, utilizzando misure dirette dei flussi relativi agli emungimenti in atto nell'area estrattiva, delle sorgenti e dei corsi d'acqua.

La superficie potenziometrica simulata rappresenta adeguatamente il sistema reale, evidenziando la depressione in corrispondenza dell'area estrattiva e gli scambi tra il Fiume Aniene e l'acquifero superficiale. La risalita di acque dal *layer* carbonatico è stata visualizzata ponendovi una serie di particelle ed effettuando simulazioni con il codice MODPATH (Pollock, 1989). Partendo dal modello calibrato si è potuto simulare diversi scenari predittivi.

Possibili sviluppi del modello implementato sono la trasformazione del modello stazionario in transitorio e l'applicazione del codice MT3DHEAT (Bayer, et al., 2008) per simulare il trasporto di calore.



## 1. INTRODUZIONE

Il presente REPORT viene redatto secondo la norma *ASTM D 5718-95 (Reapproved 2006)* – *Standard Guide for Documenting a Ground Water Flow Model Application (vedi Appendice)*.

### 1.1 Descrizione dei capitoli

Nel capitolo 1 viene introdotto lo studio partendo dagli obiettivi dello stesso e dall'inquadramento dell'area di studio, dal punto di vista geografico e sotto tutti i punti di vista fisici, da quello fisiografico a quello geologico ed idrogeologico, ma anche sotto il punto di vista della presenza antropica, facendo riferimento alle grandi realtà industriali, abitative e ricreative presenti. Nell'ambito dell'inquadramento idrologico e meteo-climatico viene riportato il bilancio idrico dell'area noto da studi precedenti.

Nel capitolo 2, entrando da subito nel merito del modello concettuale di circolazione proposto, viene descritta tutta l'attività di ricerca effettuata negli ultimi anni per arrivare a ridefinire uno schema idrogeologico dell'area, comprese le campagne sperimentali e i monitoraggi. Viene definita la geometria semplificata del sistema derivata dallo studio dei principali corpi acquiferi e quindi la definizione dei limiti idrogeologici e degli aggiornamenti di alcuni termini del bilancio idrico.

Il capitolo 3 entra nel merito della modellistica numerica idrogeologica presentando teoricamente in breve il codice di calcolo MODFLOW utilizzato per le simulazioni di questo studio e le fasi previste dal processo di implementazione. Vengono esposti i limiti di questo codice; a partire dal tipo di approccio che è stato utilizzato fino alla limitazione di un modello che, pur essendo in area idrotermale, non prende in considerazione il contrasto di densità e le differenze di temperatura delle acque. Viene inoltre descritto il programma di calibrazione UCODE.

Con il capitolo 4 si entra nel merito della costruzione del modello con le specifiche circa gli elementi costituenti, la discretizzazione, la parametrizzazione e l'attribuzione delle condizioni al contorno.

Nel capitolo 5 si descrive il processo di calibrazione e viene discussa la validità del modello tramite vari processi.

Nel capitolo 6 il modello viene applicato considerando scenari differenti per visualizzare le variazioni nei carichi e nei flussi cambiando le condizioni al contorno.

Nel capitolo 6 si riassumono le conclusioni a cui si giunge con questo studio e si mettono a confronto i software utilizzati per le simulazioni, da una parte gli strumenti "originali" messi in rete in modalità "open source" dall'*USGS (U.S. Geological Survey)*, dall'altra le costose interfacce grafiche di più semplice e più immediato utilizzo.

Lo studio si chiude poi con i riferimenti bibliografici, i ringraziamenti e l'Appendice.

### **1.2 Origine dei dati**

I dati utilizzati in questa ricerca, a seconda della loro tipologia, derivano sia da archivi e banche dati pubbliche e private sia direttamente da analisi effettuate sul campo.

I dati meteo-climatici derivano sia dal Servizio Idrografico della Regione Lazio che ha fornito tutti i dati delle stazioni idrometriche e pluviometriche dell'area, che dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare che ha reso disponibili le serie di dati relativi all'aeroporto di Guidonia.

I dati geofisici geoelettrici relativi al substrato carbonatico della Piana delle Acque Albule provengono dagli archivi della CMP (Compagnia Mediterranea Prospezioni) che negli anni '60-'70 ha svolto importanti indagini di alta qualità per la ricerca di acque per l'approvvigionamento idrico in tutto il territorio nazionale.

I dati stratigrafici utilizzati per ricostruire la geometria degli acquiferi derivano principalmente dall'archivio dati stratigrafici del Laboratorio di Idrogeologia Numerica e Quantitativa dell'Università di RomaTRE, ma anche grazie al contributo di molti professionisti che hanno fornito parte dei loro dati.

Tutti i dati dei carichi idraulici e dei flussi di sorgenti e pompe da dewatering sono stati invece misurati *ad hoc* per questa ricerca in un periodo di tempo limitato per permettere una loro correlazione.

La modellazione dell'attività idrotermale presente nel sistema da simulare non rientra negli scopi di questo studio.

Si è voluto approfondire la conoscenza idrogeologica di questa zona in quanto pur essendo sempre stata molto studiata dal punto di vista geodinamico, geochimico e geologico-strutturale, gli aspetti relativi alla circolazione idrica sotterranea sono sempre stati oggetto di poca considerazione dal punto di vista scientifico.

### **1.3 Obiettivi della modellazione**

Lo scopo di questo studio è quello di realizzare uno strumento di gestione della risorsa idrica per la piana delle Acque Albule tramite cui poter prevedere le variazioni dei carichi e del campo di moto della falda acquifera al variare delle condizioni climatiche e degli stress antropici nel sistema.

In seguito alla proposta di uno schema concettuale di circolazione delle acque sotterranee nell'area viene implementato quindi un modello numerico del flusso riproducendo le geometrie dei corpi idrici e le loro caratteristiche idrauliche.

La modellazione numerica viene effettuata in regime stazionario e i diversi scenari che si vuole analizzare vengono implementati variando di volta in volta le condizioni al contorno, senza inserire il parametro tempo.

#### **1.4 Funzione del modello**

Il modello numerico delle Acque Albule è sviluppato in stato stazionario, calibrato anche per mezzo di analisi sul campo condotte in una breve finestra temporale (febbraio 2008) e viene applicato a diversi scenari predittivi implementati secondo quelli che sono gli scopi precedentemente riportati.

Verranno quindi proposte e discusse delle “istantanee” del sistema idrogeologico in condizioni al contorno differenti e corrispondenti a diverse situazioni indotte o naturali.

#### **1.5 Inquadramento dell'area**

##### **1.5.1 Collocazione geografica ed assetto fisiografico**

La piana di Tivoli – Guidonia (detta delle Acque Albule) è situata nel centro Italia, nel Lazio centrale, a pochi Km ad Est di Roma.

L'area comprende una zona semi pianeggiante che degrada dolcemente verso il suo settore meridionale in cui scorre il Fiume Aniene, tributario in sinistra del Fiume Tevere. L'area semi pianeggiante è racchiusa ad Est dai rilievi dei Monti Lucretili, a Sud dalle zone collinari progradanti dal vulcano dei Colli Albani, ad Ovest da dolci rilievi della zona di Marco Simone e a Nord dai

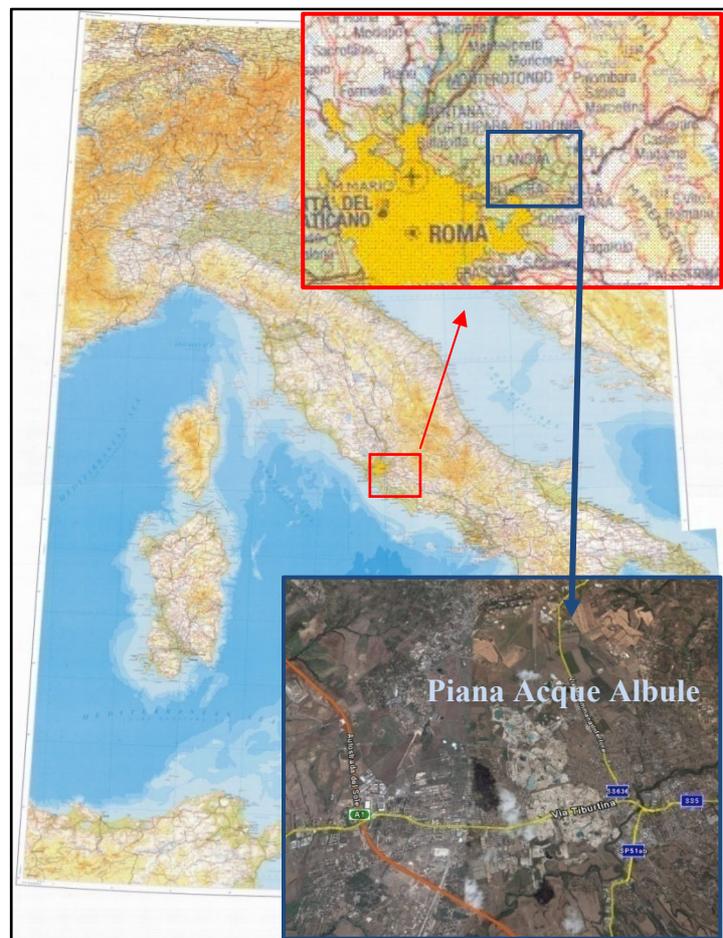


Figura 1 Collocazione geografica dell'area di studio

Monti Cornicolani. I rilievi circostanti più alti vanno dai circa 600 – 1000 m. s.l.m. dei Monti Cornicolani e Lucretili ai circa 100 m. s.l.m. dei rilievi più bassi posti a Sud e ad Ovest.

L'area centrale degrada invece dai circa 75 m. s.l.m. delle zone poste più a ridosso dei Monti Cornicolani fino ai circa 35 – 40 m. s.l.m. di quelle situate nei pressi del Fiume Aniene.

All'interno della piana sono riconoscibili spesso fenomeni di crollo, identificati come *Sinkholes*, messi in evidenza dalle loro forme sub circolari. Solitamente gli stessi presentano diversi metri di rigetto tra il piano campagna e la parte sprofondata e molto frequentemente risultano allagati per l'intercettazione della falda acquifera.

I casi più eclatanti di questo fenomeno sono il Lago S.Giovanni, i Laghi termali Regina e Colonnelle, e una delle sorgenti termali posta in località Barco, nei pressi del Fiume Aniene. Nella piana sono però presenti numerosi altri fenomeni di sprofondamento meno evidenti, come è possibile notare sulla banca dati on line dei fenomeni di sprofondamento IWSD (*italian web sinkhole database*) (La Vigna, et al., 2007).

Il Fiume Aniene, principale asse drenante dell'area, verso cui drenano tutte le acque superficiali del bacino, presenta un alveo inciso che genera una discreta differenza tra le aree pianeggianti circostanti e il livello idrometrico medio, che si espleta spesso attraverso ripide scarpate.



Figura 2 Il sinkhole del Lago S.Giovanni. La foto scattata verso NE mostra sullo sfondo i rilievi dei Monti Lucretili



Figura 3 Il Lago della Regina, principale sorgente termale (sinkhole) della Piana delle Acque Albule

### 1.5.2 Inquadramento idrologico e meteo-climatico

Il bacino idrogeologico delle acque confluenti verso il “Bacino delle Acque Albule” e naturalmente drenanti verso il Fiume Aniene comprende un'area di circa 258 Km<sup>2</sup>. I limiti idrogeologici vengono individuati in corrispondenza degli spartiacque di potenziale ricavati dall'andamento delle linee

isopiezometriche (limiti dinamici) e in corrispondenza di importanti lineamenti strutturali interpretabili come limiti a flusso nullo o trascurabile.

Il deflusso idrico sotterraneo viene alimentato in massima parte dagli acquiferi ospitati nelle dorsali carbonatiche dei Monti Lucretili e Cornicolani, ed in misura minore dalle acque di infiltrazione meteorica nei travertini della piana di Tivoli-Guidonia e nei piccoli lembi di depositi piroclastici.

Dal punto di vista dell'analisi del bilancio idrico, in questo settore, alla complessità dell'assetto geologico-strutturale e idrostrutturale, si aggiunge la presenza di significative modificazioni dei flussi sotterranei, connessi sia con le attività antropiche (area estrattiva dei travertini) che con l'utilizzo delle acque per scopi idropotabili, industriali ed idrotermali.

Viene riportata di seguito una tabella riassuntiva dei dati del bilancio idrico per il periodo 1999-2001 estratta dal lavoro inedito del PUC (piano stralcio per l'uso compatibile delle risorse idriche

<b>Bacino 26 - Tivoli-Guidonia (Acque Albule)*</b>					
Superficie km <sup>2</sup> 258	Prelievi/Inf. Eff. 46%	mm/anno	l/s	Mmc/anno	% di P
Precipitazioni		994	8.133	256	100,0
Ruscellamento		185	1.516	48	18,6
Evapotraspirazione		362	2.960	93	36,4
<b>Infiltrazione efficace</b>		<b>435</b>	<b>3.558</b>	<b>112</b>	<b>43,7</b>
<b>Deflusso di magra in alveo (misurato)</b>		<b>25</b>	<b>206</b>	<b>6</b>	<b>2,5</b>
<b>Deflusso indotto dall'attività estrattiva</b>		<b>350</b>	<b>2.862</b>	<b>90</b>	<b>35,2</b>
Prelievi da pozzi e sorgenti per gli acquedotti		145	1.187	37	14,6
Prelievi per gli usi industriali e termali		45	365	12	4,5
Prelievi per gli usi agricoli		12	98	3	1,2
<b>Totale prelievi</b>		<b>202</b>	<b>1.650</b>	<b>52</b>	<b>20,3</b>
<b>Ripartizione delle risorse idriche per i diversi usi</b>					
Acque riservate per gli usi idropotabili pubblici		170	1.387	44	17,1
Acque riservate per il mantenimento del deflusso naturale		178	1.458	46	17,9
Volume massimo che può essere concesso o autorizzato al prelievo per il complesso degli usi domestici, agricoli ed industriali		87	713	22	8,8

Tabella 1 Bilancio idrologico della Piana delle Acque Albule (da Capelli & Mazza, 2005)

degli acquiferi vulcanici del Lazio (Capelli, et al., 2005))

Per quel che riguarda le precipitazioni e l'infiltrazione efficace riportate in tabella, l'analisi dei regimi della ricarica degli acquiferi è stata effettuata su scala mensile per il periodo compreso tra il 1996 e il 2001. In tale periodo, le precipitazioni hanno presentato un'estrema variabilità, con valori medi annui sull'area compresi tra i 418 mm, nel 2001 e 1350 mm, nel

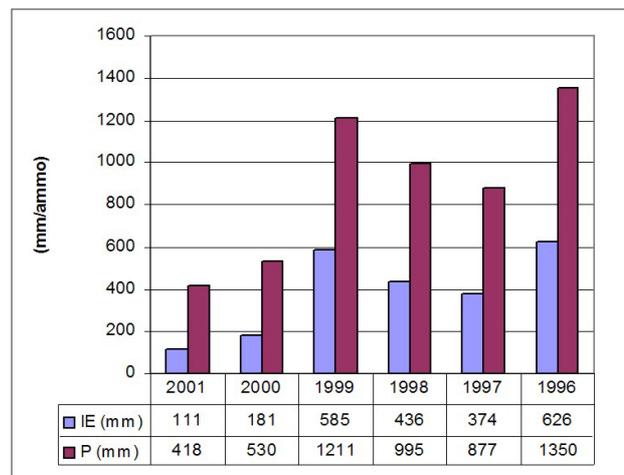


Figura 4 Precipitazioni e infiltrazione efficace calcolati a scala mensile e cumulati a scala annua nell'area del bacino idrogeologico delle Acque Albule (258 km<sup>2</sup>)

1996. In particolare, gli anni 2001 e 2002 hanno costituito un periodo di estrema aridità, proseguendo almeno fino al 2003. Analogamente, i valori di ricarica dell'acquifero presentano un "crollo" nei primi anni del 2000, ampiamente confermate dalle osservazioni di campagna effettuate nel corso degli studi del Piano stralcio (2002-2004) che hanno riscontrato i seguenti fenomeni:

- Diminuzione di alcune centinaia di l/s della portata della Sorgente Acquoria
- Abbassamento di circa 2 m del livello del Lago della Regina
- Abbassamento di 3-4 metri del livello idrico nel Pozzo del Merro e nel Lago S.Giovanni
- Perdita di portata nel fosso di S.Angelo

Le precipitazioni durante il periodo preso come riferimento (1996-2001) evidenziano una grande variabilità della ricarica che, in mancanza di adeguate serie di misure sperimentali dei deflussi naturali ed indotti artificialmente, rende sostanzialmente impossibile una precisa correlazione tra cause ed effetti sui livelli idrici e sulle portate e i tempi di risposta del sistema acquifero. Nonostante ciò, si può affermare che il sistema acquifero superficiale risulta molto sensibile agli apporti meteorici come messo in evidenza dai dati di alcune sonde fisse installate. Infatti un evento eccezionale di pioggia verificatosi nel maggio 2008 ha portato un repentino innalzamento dei livelli piezometrici in tempi davvero rapidi.

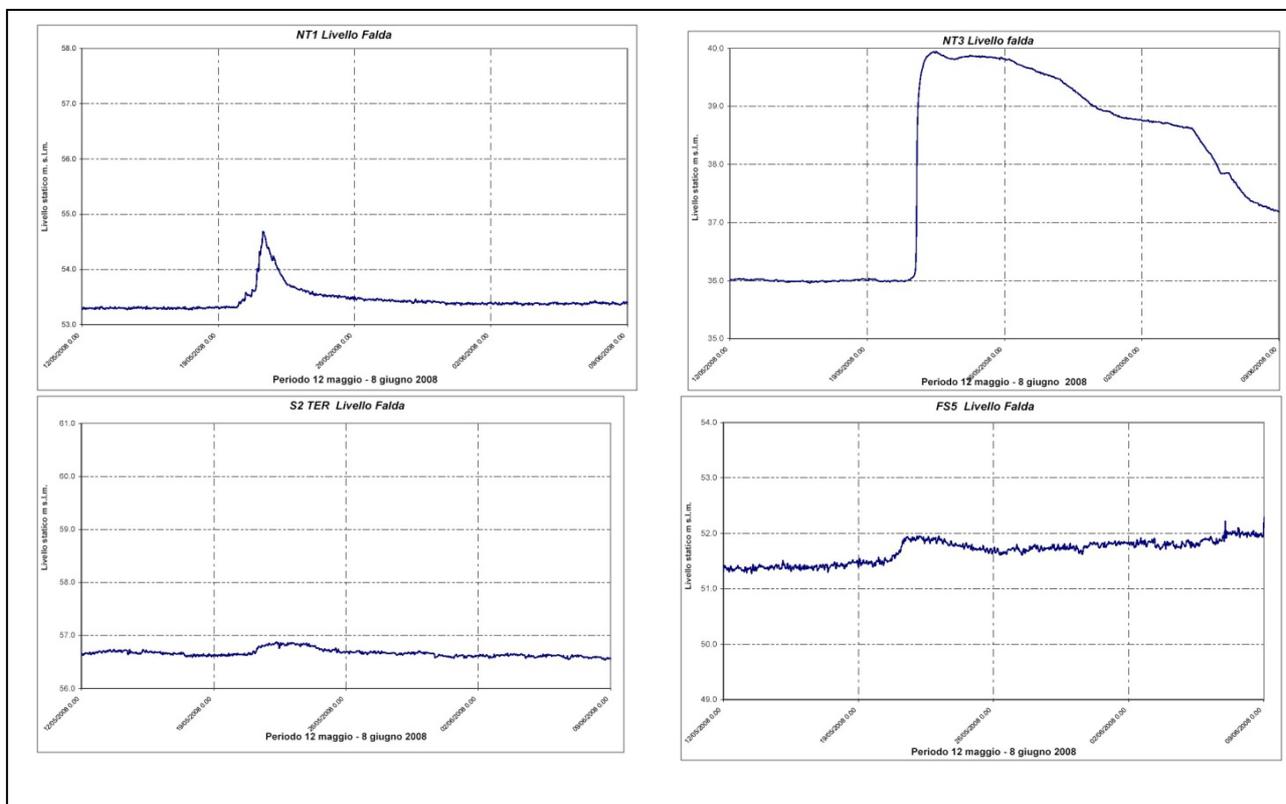


Figura 5 Grafici del livello piezometrico in alcuni fori della rete di monitoraggio delle Acque Albule. A seconda delle zone viene mostrata la risposta della falda ad un evento piovoso eccezionale

Il valore riportato nella tabella del bilancio come deflusso di magra in alveo, è riferito a valori di misure effettuate nel 2004 che può essere indicativo di valori di portata minima del deflusso di base del reticolo drenante alimentato dall'acquifero. In questo valore non è compreso l'eventuale incremento di portata in alveo dell'Aniene.

Sono poi da tenere ben presenti nella sommatoria dei flussi i prelievi sia industriali (come quelli dovuti al dewatering in atto dell'attività estrattiva) che domestici, agricoli e acquedottistici. I dati presentati in questo bilancio, sono però da prendere in considerazione come puramente descrittivi del bacino; infatti alcune delle voci di bilancio sono state aggiornate *ad hoc* per questo studio e vengono presentate in seguito.

### 1.5.3 Inquadramento geologico

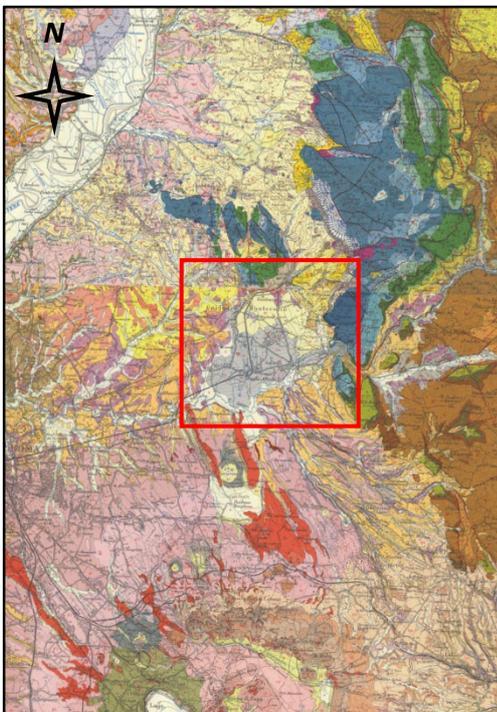


Figura 6 Stralcio di cartografia geologica 1:100.000, F.144 e F.150 e area di studio evidenziata

Dal punto di vista geologico – geodinamico l'area studiata, collocata a ridosso dell'Appennino Centrale, a Nord Est del Complesso Vulcanico dei Colli Albani, viene considerata un bacino subsidente. Ricade infatti in un settore

distensivo della catena appenninica in cui, un sistema di faglie con andamento circa meridiano, ha permesso

ad un settore corrispondente all'attuale piana di andare in subsidenza e successivamente di essere colmato da spessi depositi di travertino.

Le strutture sedimentarie che bordano ad Est e a Nord la zona depressa comprendono rispettivamente i Monti Lucretili e i Monti Cornicolani, mentre a Sud

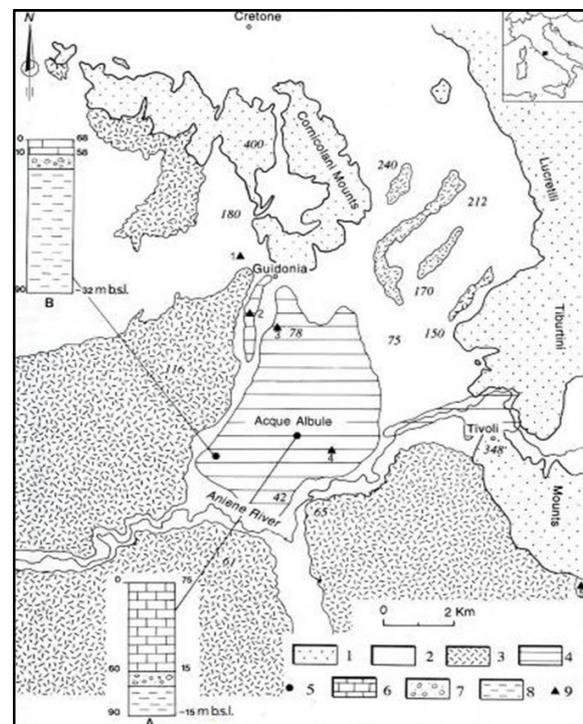


Figura 7 Schema geologico del settore delle Acque Albule (da Faccenna, 1994). Legenda: 1 – Unità Meso-Cenozoiche Carbonatiche; 2 – depositi Plio-Quaternari; 3 – Depositi piroclastici del Vulcano Laziale; 4 – Travertini; 5 – Log stratigrafici rappresentativi; 6 – Travertini nei log; 7 – Conglomerati e sabbie nei log; 8 – Argille Plioceniche marine nei log.

l'area depressa è bordata dal complesso vulcanico dei Colli Albani.

Per esigenze di sintesi i settori marginali e centrali vengono di seguito descritti separatamente

### Geologia dei Monti Lucretili

L'assetto tettonico dei Monti Lucretili, ricostruito da Cosentino e Parotto (1986) ricalca, nelle linee generali, i caratteri strutturali dell'intero settore sabino della catena appenninica. Questo è caratterizzato dalla sovrapposizione di diverse unità tettoniche derivanti dalla deformazione di un dominio paleogeografico di transizione tra dominio umbro-marchigiano, di mare aperto, e quello laziale-abbruzzese di piattaforma carbonatica.

Tale deformazione, come già noto in letteratura, è avvenuta in tempi diversi, secondo campi di stress orientati in maniera diversa a partire dal Serravalliano superiore (Parotto, 1980). E' noto infatti come la successione stratigrafica del settore lucretile non contiene termini più recenti delle "Calcareniti a Briozoi e Lithamni" del Serravalliano p.p., a testimonianza di una probabile emersione già nel Tortoniano inferiore o addirittura nel Serravalliano superiore.

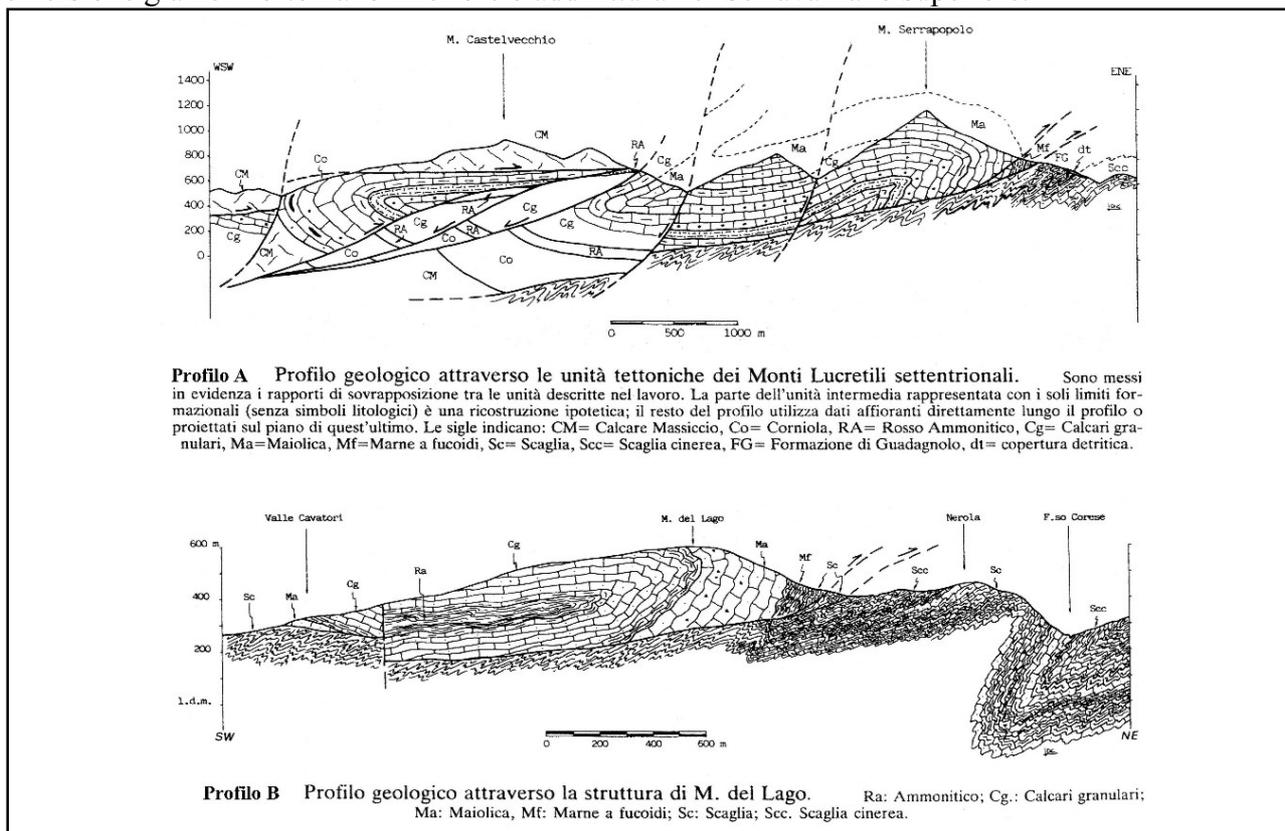


Figura 8 Profili teorici dei Monti Lucretili (da Cosentino & Parotto 1986)

Tutta la dorsale montuosa Lucretile è caratterizzata dall'affioramento di unità litostratigrafiche prevalentemente mesozoiche, sovrascorse verso Est sui termini più recenti della successione sabina. In definitiva, l'assetto strutturale del settore sabino dell'orogeno appenninico è caratterizzato dalla

struttura embriata di diverse unità tettoniche accavallate verso Est, individuate da una serie di piani di sovrascorrimento di cui la linea “Olevano-Antrodoco” rappresenta l'involuppo degli accavallamenti più esterni (Cavinato, et al., 1986).

La struttura attuale del settore sabino risulta fortemente condizionata dall'intensa tettonica distensiva che in tempi recenti ha interessato questa porzione di catena, individuando blocchi diversamente dislocati.

In affioramento i Monti Lucretili presentano una successione stratigrafica costituita da termini calcareo-silico-marnosi, contenenti una notevole quantità di materiale detritico grossolano, proveniente dallo smantellamento di aree interessate da successioni in facies di soglia e di piattaforma carbonatica, intercalato, a partire dal Lias medio, in tutti i termini della sequenza stratigrafica locale, nota come successione sabina.

L'assetto tettonico del settore lucretile è notevolmente complesso e ancora lungi dall'essere definito con certezza. La scarsa quantità di dati cinematici per i principali elementi tettonici presenti nell'area, non consente al momento, di fornire un modello di evoluzione deformazionale per questo settore del thrust belt appenninico. Uno schema tettonico preliminare suggerisce una struttura che, in affioramento, interessa l'intera successione meso-cenozoica, ad esclusione dei terreni miocenici, dominata da pieghe rovesciate verso Est, interessate a volte da fianchi coricati e bordata, al margine orientale, da una superficie di accavallamento.

#### *Geologia dei monti Cornicolani*

I Monti Cornicolani sono un piccolo complesso montuoso, radicato e impostato su calcari mesozoici e delimitato a Sud del Bacino delle Acque Albule, a Nord ed Est dalla depressione pliocenica di Palombara-Marcellina e a Ovest dai depositi piroclastici. Il complesso collinare dei M.

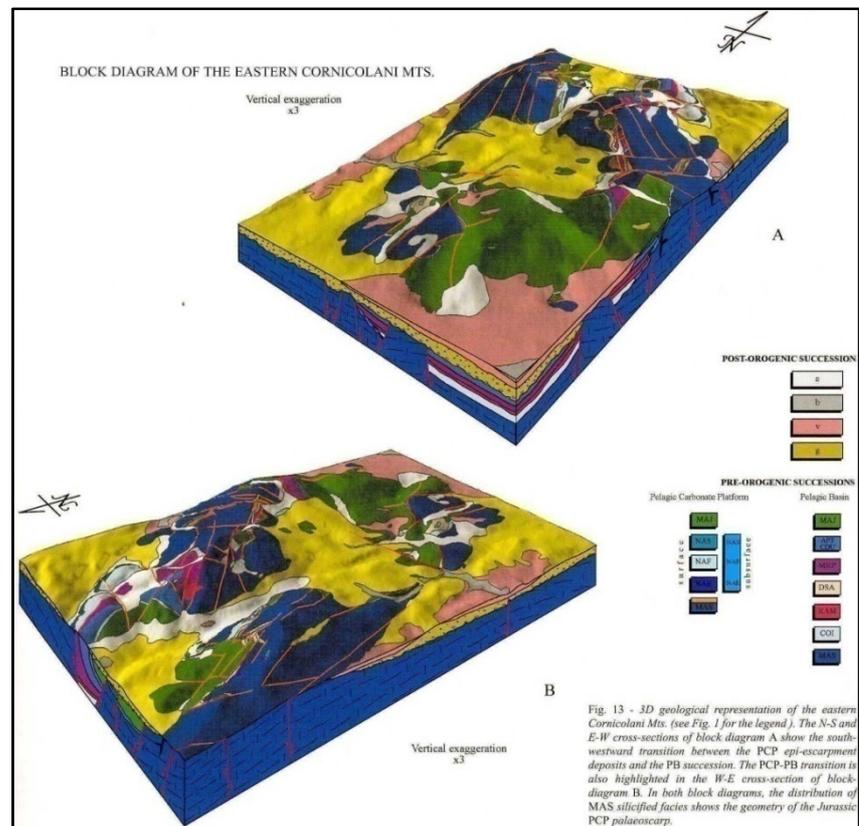


Figura 9 Blocco diagramma dei Monti Cornicolani (da Cosentino et al. 2004)

Cornicolani si eleva per un'altezza di circa 400 m s.l.m. ed è caratterizzato da tre rilievi principali. Il primo rilievo è costituito da S. Angelo Romano (400m), Colle Grosso (180m) e Colle Largo (222m) orientato NNW-SSE. Il secondo rilievo, orientato NNW-SSE è costituito dal Monte S. Francesco (206m) e Colle Monsignore (149m). Infine il terzo rilievo, orientato N-S, è costituito dal Colle Chiesuola (240m), Poggio Cesi (413m), Montecelio (389m) e Colle Carcibove (260m) (Chiocchini, et al., 1980). Nella parte meridionale del complesso dei Cornicolani questa morfologia è interrotta occasionalmente da faglie. Il settore è costituito prevalentemente da calcari del Lias inferiore e in minor misura da sedimenti del Lias medio-Cretacico; schematicamente corrisponde a tre alti strutturali. I sedimenti successivi al Calcare Massiccio non raggiungono mai potenze elevate; la loro deposizione ha avuto inizio in tempi sempre più recenti da Est verso Ovest e si arresta durante il Cenomaniano inferiore. La zona, per le sue caratteristiche di relativa stabilità strutturale, rappresenta l'estremo settore meridionale affiorante della "Dorsale Tiberina", della quale un altro lembo, verso NW, è il Monte Soratte.

Dal punto di vista tettonico i Monti Cornicolani, presentano uno stile disgiuntivo, essendo gli affioramenti più cospicui costituiti da una litoformazione particolarmente rigida come il Calcare Massiccio; inoltre assai scarsa è l'influenza della componente orizzontale dei movimenti tettonici (Chiocchini, et al., 1980).

La tettonica dei Monti Cornicolani è quindi strettamente collegata e fortemente caratterizzata da quella del Calcare Massiccio. Lo stile prevalentemente rigido di quest'ultimo è evidenziato da tre sistemi di faglie sub verticali con direzione NW-SE, NE-SW e N-S.

E' probabile l'esistenza, al margine settentrionale del gruppo dei Monti Cornicolani, di un ulteriore sistema orientato E-W.

Le faglie di maggiore estensione lineare e di maggiore evidenza morfologica, riferibili ai primi due sistemi, sono quelle che suddividono in tre elementi morfologici l'intero gruppo collinare e in particolare quella che costituisce anche il margine orientale dei rilievi di Colle della Chiesuola – Poggio Cesi – Montecelio (Fosso Marocco – Fosso Vazoletto).

La faglia marginale occidentale di S. Angelo Romano è accompagnata da una faglia parallela che decorre subito a W dell'abitato e doveva rappresentare una falesia pleistocenica: infatti su un'estensione di circa 400m e per uno spessore di qualche metro, si rinvengono brecce e puddinghe grossolane ad elementi da poco a non elaborati di calcare Massiccio, con matrice ruditico-arenitica. Il riferimento di questa faglia ad un elemento paleo morfologico di tale natura, sembra confermato dalla presenza di un ampio terrazzo di abrasione situato poco a valle e a Sud della faglia anzidetta.

Si rileva che la tettonica locale risulta attiva anche in tempi successivi al Pleistocene, se si considera che i depositi e gli elementi paleo morfologici di questa età appaiono dislocati, frammentati e parzialmente distrutti; infatti si rinvencono nell'area brevi tratti di paleo costa, posta a quote diverse ed evidenziata da allineamenti di fori di litofagi e/o da porzioni di falesie e/o da terrazzi di abrasione, così come si rinvencono a diverse quote numerosi e piccoli affioramenti di depositi sabbioso-conglomeratici.

Recenti sondaggi effettuati nel settore sud-occidentale dei M. Cornicolani hanno messo in luce un assetto strutturale a gradinata che coinvolge sia il Calcere Massiccio che i sovrastanti Calcari a filaments. Più difficile è stabilire se anche le coperture argillose plioceniche sono state dislocate unitamente ai calcari.

*Brevi cenni sull'attività vulcanica dei Colli Albani*

L'area in esame si colloca ai margini dell'edificio vulcanico albano e, sebbene localmente, è interessata dai prodotti di ricaduta e colata piroclastica che si sono succeduti durante le diverse fasi di attività. Il Vulcano Laziale (o Vulcano dei Colli Albani), è il più meridionale dei distretti vulcanici a struttura centrale presenti nella regione Lazio. Esso occupa una posizione particolarmente significativa nell'ambito dell'assetto strutturale della nostra catena appenninica; sorge infatti a S delle unità mesocenozoiche alloctone dei Monti della Tolfa, a settentrione della piattaforma carbonatica Mesozoica dei Monti Lepini

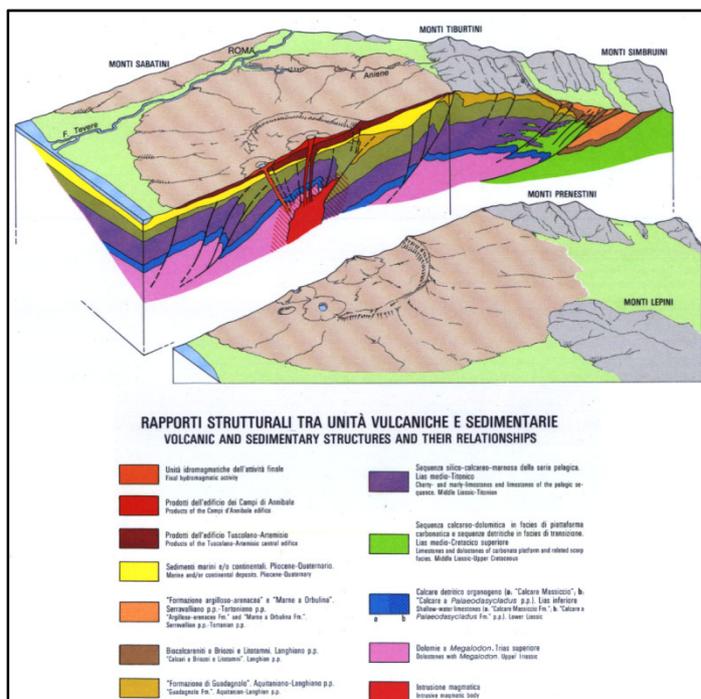


Figura 10 Blocco diagramma del complesso vulcanico dei Colli Albani (De Rita, et al.)

ed in prossimità delle successioni meso-cenozoiche dei Monti-Prenestini e Tiburtini. Il Vulcano si è sviluppato al di sopra di un substrato sedimentario costituito da unità delle successioni pelagiche mesozoiche con testimonianza di una transizione esterna nelle parti più meridionali (Funicello, et al., 1978). Il Vulcano Laziale inizia la sua attività con molta probabilità contemporaneamente agli altri distretti alcalino potassici, ma la prima data radiometrica disponibile indica un'età di circa 530.000 anni e si riferisce alla prima grande unità esplosiva in colata piroclastica emessa durante il primo ciclo di attività del primordiale apparato centrale Tuscolano-Artemisio.

L'attività del Vulcano Laziale può essere suddivisa fondamentalmente in tre fasi principali:

#### *Tuscolano-Artemisio*

Questa fase dura circa 240.000 anni, da 600.000 a 360.000 anni fa, ed è suddivisibile in 4 cicli, ognuno dei quali è caratterizzato dalla messa in posto di colate piroclastiche e di piroclastiti e lave a chiusura dell'attività. In tutto il volume dei prodotti eruttati in questa fase sono stati stimati in 200km<sup>3</sup>. Durante il secondo ciclo è stata messa in posto l'unità delle "Pozzolane Rosse" (Auct.), una colata piroclastica che si è espansa fino a 80 km dal centro eruttivo e ha risalito le pendici dei Monti Tiburtini fino a circa 400m di quota. Nell'ultimo ciclo sono state messe in posto altre due unità di flusso molto importanti, il "Tufo Litoide" e il "Tufo di Villa Senni" (Auct.). Questa ingente eruzione determina la fine dell'attività del Tuscolano-Artemisio, la cui parte sommitale collassa secondo fratture controllate dalla tettonica regionale. Il collasso viene accompagnato da un ingente lancio di scorie e di lapilli con effusioni laviche subordinate e con l'emissione di scorie saldate dalle fratture di collasso.

#### *Campi d'Annibale o Faete*

Questa fase è datata tra 300.000 a 200.000 anni ed ha un'importanza sicuramente molto subordinata rispetto a quella del Tuscolano-Artemisio.

Sono solo due i km<sup>3</sup> di materiale eruttato in questa fase. Il piccolo edificio si imposta come stratovulcano nei pressi della zona collassata della fase precedente.

#### *Idromagmatica finale*

In questa fase si chiude l'attività del Vulcano Laziale. L'attività diventa idromagmatica e le violente eruzioni squarciano i settori dell'edificio corrispondenti ai crateri di Albano, Ariccia e Nemi. Tipico deposito di questa fase è il Peperino, conosciuto nell'antica Roma come "Lapis Albanus".

Il prodotto più giovane eruttato nell'ultima fase ha un'età di circa 20.000 anni.

#### *Geologia della Piana delle Acque Albule*

Il processo di subsidenza responsabile della formazione del Bacino delle Acque Albule e il sistema di alimentazione profonda del circuito idrotermale sono controllati dall'azione di un sistema di faglie a decorso meridiano attive nell'area durante il tardo Pleistocene. La faglia principale, ben osservabile nei rilievi dei Monti Cornicolani, si allinea con le sorgenti principali dell'area (Laghi della Regina e delle Colonnelle) e prosegue in modo discontinuo sino alle pendici del distretto vulcanico dei Colli Albani, bordando anche la depressione di Pantano Borghese. All'interno del bacino la localizzazione di questo sistema di faglie è stata posizionata su basi indirette. La

cinematica del sistema di faglie principali presenta una componente trascorrente destra. All'altezza di Collefiorito di Guidonia, dal sistema principale dipartono splay divergenti a direzione  $N20^{\circ}-40^{\circ}$  con cinematica prevalentemente obliqua (componente estensionale e trascorrente destra) (Faccenna, et al., 1994).

In superficie queste strutture si manifestano con faglie trascorrenti N-S o  $N20^{\circ}$  destre a cui si associano fratture estensionali e faglie normali con direzione media oscillante intorno a  $N40^{\circ}-70^{\circ}$ . Il limite del bacino, nel settore occidentale, è segnato da faglie oblique. Più raramente si notano piccole faglie inverse, e faglie antitetiche trascorrenti sinistre E-W.

L'età della deformazione è di difficile definizione. Per esempio, all'interno della cava Unicem di Guidonia, le argille plioceniche mostrano un sistema pervasivo di fratture estensionali, con direzione  $N40^{\circ}-70^{\circ}$ , riempite di una "lamina" di calcite, con una spaziatura media di circa 1m. Accanto a queste deformazioni sono presenti sistemi di faglie oblique-distensive orientate  $N40^{\circ}$  e sistemi di faglie trascorrenti destre orientate  $N200^{\circ}$  ed E-W. Le fratture estensionali, presentano un angolo diedro di circa  $30^{\circ}$  e possono essere interpretate come "strutture ibride coniugate" mentre le discontinuità trascorrenti *en-echelon*  $N200^{\circ}$  rappresentano dei Riedel *shear* sintetici della faglia principale.

È importante sottolineare che i depositi piroclastici (I colata piroclastica e depositi di ricaduta) poggianti sopra i depositi argillosi, presentano solo alcuni disturbi tettonici, assolutamente non comparabili, come intensità di deformazione, con quanto osservato nei depositi sottostanti. Tuttavia, le datazioni radiometriche dei depositi calcitici all'interno dei piani di faglia e delle fratture estensionali, hanno dato un'età rispettivamente di  $178ka \pm 66 - 44$  e di  $49ka \pm 8$ . L'età dei riempimenti delle fratture è coeva a quella del corpo principale dei travertini di Tivoli, evidenziando il nesso causale tra deformazione e circolazione idrotermale.

Sistemi deformativi sono stati osservati, inoltre, anche in località Collefiorito. Deformazioni fragili, con faglie trascorrenti  $N40^{\circ}$  e  $N120^{\circ}$  e faglie N-S *dip-slip* interessano depositi travertinosi

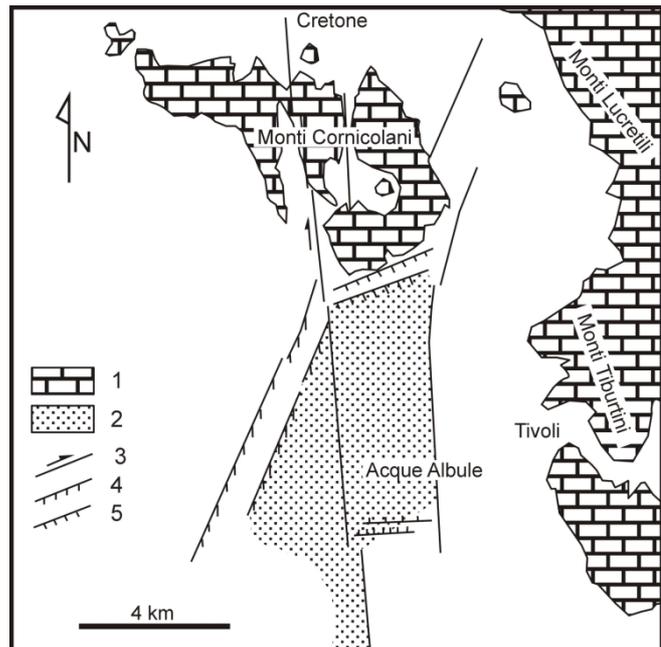


Figura 11 Modello schematico del bacino delle Acque Albule : 1) unità carbonatiche meso-cenozoiche; 2) area subsidente; 3) faglie trascorrenti; 4) faglie oblique; 5) faglie normali (da Faccenna et al., 1994)

non consolidati che hanno un'età di 28 ka ( $\pm 16$ ). Queste deformazioni sono in accordo con i sistemi di faglie N-S osservati da Maxia (1950), riscontrati nella stessa località.

In corrispondenza della S.S.N°5 Tiburtina (km 18-19), la II colata piroclastica è interessata da un sistema di faglie trascorrenti destre a direzione N-S e oblique distensive a direzione N30°, disposte in zone di taglio larghe meno di un metro; accanto a queste un importante faglia obliqua a direzione N30°E mostra un rigetto orizzontale e verticale di alcuni metri. L'intensità della deformazione sembra comunque diminuire spostandosi verso i settori nord-orientali. La cinematica del segmento di faglia è di tipo obliquo, con componente estensionale e trascorrente destrale, e provoca un modesto rigetto (inferiore a 1-2 metri). L'età durante la quale si è sviluppato questo episodio deformativo non è definibile: sicuramente è successiva ai prodotti piroclastici albanici (355 ky) ed è precedente ai suoli e travertini di età post-romana e ai resti archeologici.

Nell'area di Villa Adriana, la III e la IV colata piroclastica sono interessate da un sistema di faglie trascorrenti destre ad andamento meridiano e dalle fratture estensionali ad esse associate, aventi direzione preferenziale N40°.

Nell'area di Colle Cesarano, di Villa Adriana e ad ovest dell'abitato di Collefiorito, è presente un sistema di faglie normali a direzione N40° e fratture estensionali ad orientazione N30°-60°. Queste faglie interessano tutti i depositi plio-quadernari, compresi i depositi alluvionali dell' Aniene.

All'interno dell'area estrattiva del travertino, il quadro deformativo riconosciuto si caratterizza per

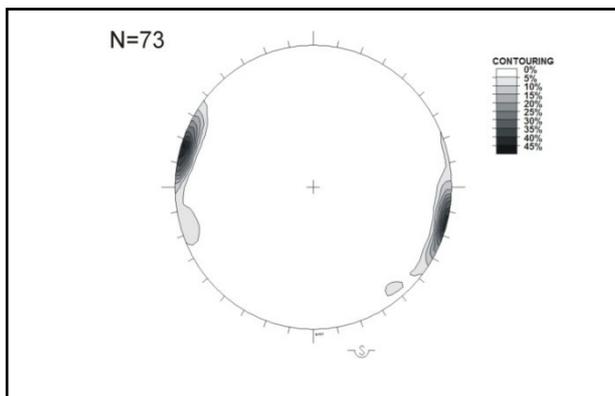


Figura 12 *Contouring* (reticolo equiareale emisfero inferiore) relativo ai dati di fratturazione nell'area di studio (Faccenna, 2006)

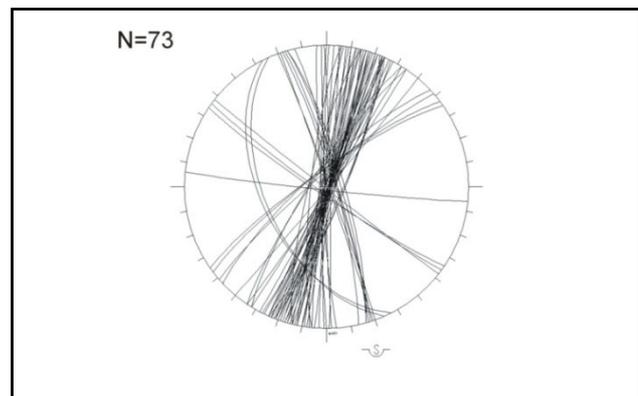


Figura 13, Rappresentazione stereografica (reticolo equiareale di Schmidt, emisfero inferiore) dei dati di fratturazione nell'area di studio (Faccenna, 2006)

una serie di fratture estensionali, che sono il risultato della risposta fragile delle litologie travertinose alle sollecitazioni tettoniche. Le fratture hanno decorso variabile, con un massimo di distribuzione in direzione circa NNE–SSW. Esse si presentano in genere subverticali, o con valori di inclinazione comunque elevati. La loro spaziatura è variabile, così come la loro distribuzione areale. E' da notare, infatti, che l'intensità della fratturazione è maggiore nel settore settentrionale dell'area, dove anche le aperture delle singole fratture, di norma, assumono i valori massimi.

Raramente le fratture presentano un riempimento al loro interno; quando esso è presente, è costituito per lo più da materiale argilloso.

La Fig.13 mostra il totale delle superfici di frattura rilevate nello studio di Faccenna (2006) (73 elementi), mentre in Fig.12 viene riportata la distribuzione percentuale delle direzioni dei poli di proiezione delle fratture stesse. La concentrazione maggiore si trova in direzione N288°, a cui corrisponde una direzione media delle fratture N18°,88°.

Il valore medio dell'orientazione del campo di fratturazione rilevato nell'area di studio (N18°, 88°) è espressione di un campo di sforzo che prevede una direzione di minimo sforzo tensionale ( $\sigma_3$ ) ad orientazione WNW-ESE e pendenza sub-orizzontale. Tale orientazione è compatibile con il regime tettonico trascorrente destro ad andamento meridiano che controlla l'evoluzione neotettonica dell'area (Faccenna, et al., 1994). In questo quadro, è dunque possibile ipotizzare che il regime di fratturazione riconosciuto si sia sviluppato in regime trascorrente, parallelamente alla direzione di massimo sforzo tensoriale ( $\sigma_1$ ).

Il Bacino delle Acque Albule è una depressione morfologica di recente formazione avente un'estensione di circa 30 km<sup>2</sup>, una lunghezza in senso meridiano di circa 7 km e una pendenza generale da nord verso sud e da est verso ovest, con quote che variano da circa 80 m s.l.m. a meno di 40 m s.l.m.

Questa area è nota per le sorgenti idrotermali e per i depositi di travertino ad esse associati ed oggetto di attività estrattiva sin dall'epoca Romana.

Attualmente, i depositi travertinosi occupano una superficie di oltre 20 km<sup>2</sup> (circa il 70% dell'intero bacino).

I materiali più litoidi sono coperti da un bancone di travertino quasi spugnoso ed incoerente conosciuto come *testina* o *cappellaccio*, il cui spessore è variabile e raggiunge i suoi valori massimi nella parte centrale del bacino; Maxia (1950) definisce questa facies travertinoso come "Tartari delle Acque Albule-Pietra spugna".

La stratigrafia del settore centrale del bacino è costituita da travertino per uno spessore medio di circa 60 metri e massimo di oltre 85 metri (Maxia, 1950), il quale poggia sopra ad una sequenza di argille, conglomerati e sabbie plio-quadernarie. Nel margine occidentale l'unità dei travertini è spessa circa 10 metri e giace su pochi metri di conglomerati ed almeno 75 metri di argille.

Verso est il travertino ha spessori assai esigui e poggia sopra depositi alluvionali ed epivolcanici. Nella parte più orientale del bacino, ai piedi dei Monti Tiburtini, è presente una facies travertinoso conosciuta come *tartaro* formata dalla precipitazione delle acque dell'Aniene. Il settore periferico

del bacino si differenzia per il minor spessore della coltre travertinosa che poggia sui depositi alluvionali e sulle piroclastiti albane.

La zona delle Acque Albule è un campo di doline, alcune trasformate in laghetti, ora prosciugati, ora attivi. Tra quelli ormai bonificati ricordiamo il Lago dei Tartari, il Pantano ed altri, per i quali non esiste neanche un toponimo, rimasti disseccati per le incrostazioni calcaree dei vegetali.

Per quanto nel tempo siano stati proposti vari tentativi di ricostruzione degli spessori di travertino a partire dai dati dei sondaggi esistenti nell'area (Maxia, 1950) (Faccenna, 2006), le determinazioni dei diversi spessori risultano piuttosto approssimate, in quanto, anche se tali perforazioni risultano abbastanza ben distribuite all'interno del bacino stesso, esse sono state eseguite per svariati scopi e, spesso, sono state interrotte a profondità inferiori a quelle necessarie per attraversare completamente i depositi di travertino; in particolare, non si conosce ancora quale sia il massimo spessore che essi raggiungono.

I dati di sondaggio suggeriscono comunque che i maggiori spessori di litologie travertinose (fino oltre 90 metri) si trovano lungo una fascia allungata in direzione N-S che si estende dall'area delle sorgenti (Lago della Regina e Lago delle Colonnelle) fino all'abitato di Tivoli Terme (Villalba di Guidonia).

Verso i margini occidentale e orientale del bacino si hanno più informazioni stratigrafiche: gli spessori del travertino sembrano diminuire bruscamente verso ovest, mentre, procedendo verso est, ciò avviene in modo più graduale.

In sintesi, dal punto di vista stratigrafico, l'area della piana è caratterizzata da:

- I carbonati meso-cenozoici affioranti alle pendici dei Monti Lucretili e dei Monti Cornicolani
- I terreni pliocenici in facies sia conglomeratica e sabbiosa, sia prettamente argillosa
- I terreni pleistocenici per lo più corrispondenti conglomerati e sabbie
- I prodotti vulcanici dei Colli Albani
- I travertini
- I terreni alluvionali olocenici dell'Aniene
- Le coperture recenti
- I terreni di riporto antropico e di risulta delle attività estrattive

I terreni descritti sono molto ben osservabili in superficie, mentre l'andamento distribuito dei più antichi in profondità è meno noto per via dell'assenza di perforazioni importanti che attraversino tutta la serie. Grazie a studi geofisici (sondaggi elettrici verticali condotti dalla CMP - Compagnia Mediterranea Prospezioni negli anni '70) può essere ricostruito con un buon dettaglio l'andamento in profondità dei terreni più resistivi associabili alle strutture Meso-Cenozoiche carbonatiche ribassate.



Figura 12 Foto della piana delle acque albule scattata guardando in direzione Nord. Sullo sfondo sono ben visibili i rilievi dei Monti Cornicolani e verso Est i rilievi dei Monti Lucretili. Il taglio della grande cava mette in evidenza l'andamento pianeggiante del piano Campagna e le spesse bancate di travertino leggermente immergenti verso Sud-Est. Subito sotto il piano campagna si nota un limite che mette in evidenza lo strato di qualche metro di travertino "Testina" non litoide, e alcune depressioni colmate di sedimento (paleo sinkholes)

#### *1.5.4 Inquadramento idrogeologico*

L'area delle Acque Albule appartiene al “Sistema Idrogeologico dei Monti Sabini” (Boni, et al., 1986) impostato prevalentemente su complessi carbonatici in facies di transizione. Il sistema si estende per 832 Km<sup>2</sup> in senso meridiano da Monte S. Giovanni Reatino a Palestrina, con uno sviluppo lineare di circa 70 Km. Da un punto di vista idrogeologico il sistema è limitato a Est dalla linea tettonica Olevano-Antrdoco, a Sud dal Complesso delle argille plioceniche e dai depositi flyschoidi tortoniani ricoperti dalle vulcaniti, a Ovest dai depositi clastici sabbioso-argillosi del Pleistocene e più a Nord, oltre il Fiume Farfa, dalla linea tettonica M. Tancia – M. Ode.

Il settore centrale del sistema, compreso tra il Torrente Farfa e il F. Aniene, è condizionato dall'esistenza di tre unità tettoniche accavallate e separate tra loro da superfici di sovrascorrimento a debole immersione verso Ovest. Ad esse si aggiunge un'altra unità legata ai depositi travertinosi del Bacino delle Acque Albule.

La complessità dell'assetto geologico-strutturale, le differenze di quota, di regime e di chimismo delle sorgenti ubicate in questo settore della Sabina, vengono interpretate riferendosi ad un modello di circolazione più articolato rispetto a quello definito nel 1986 nello “Schema Idrogeologico dell'Italia Centrale” (Boni, et al., 1986). Sono state, infatti, individuate quattro unità idrogeologiche che in parte ricalcano le unità strutturali presenti.

#### *Unità 1*

La prima e più importante unità idrogeologica del Sistema dei Monti Lucretili si identifica in affioramento con i rilievi Cornicolani e la catena dei M. Castelvecchio, M. Zappi, M. Morra e M. Lecinone. L'acquifero è costituito essenzialmente dal termine triassico della successione sabina, dal “Calcere Massiccio” e dalla “Corniola” e subordinatamente dalla “Maiolica” e dai “Calcari Granulari”. La formazione del “Rosso Ammonitico”, pur essendo presente in affioramento e in profondità, non gioca un ruolo determinante nella ricarica di questa idrostruttura e la sua presenza contribuisce più che altro a mantenere elevato il gradiente piezometrico che supera probabilmente lungo alcune direttrici il 10%. Da Nerola a Montorio il limite della prima unità è individuato dal piano sub-orizzontale di accavallamento di questa sull'Unità idrogeologica inferiore, identificata con il numero 3. Procedendo verso Sud, il limite di flusso è rappresentato da una struttura sinclinalica sub-orizzontale coricata verso Est, che dalle sorgenti delle Capore-S. Angelo si prolunga sino a M. La Guardia. Verso Sud un elemento strutturale costituito da una anticlinale coricata verso Sud-Est riduce fortemente la possibilità di drenaggio dell'Unità 1 verso l'Aniene. La funzione



di tamponamento su tutto il fianco occidentale è esercitata dalle coperture plio-pleistoceniche, caratterizzate in massa da bassa permeabilità.

Il drenaggio sotterraneo del settore lucretile dell'Unità 1 è rivolto verso:

- I rilievi cornicolani mediante sifonamento al di sotto della serie neogenica;
- Il complesso dei travertini per trabocco della falda cornicolana sopra il pliocene, per sifonamento al di sotto della serie neogenica, per risalita lungo le finestre d'erosione e/o le discontinuità tettoniche;
- La sorgente di Acquoria, posta al piede dello stacco morfologico delle cascate di Tivoli
- Il settore del Fiume Aniene compreso tra Acquoria e la confluenza con il fosso del Muracciolo.

Le aree di ricarica lucretili e cornicolane ricoprono una superficie decisamente ridotta rispetto a quella dell'intero dominio saturo che si prosegue verso il Fiume Tevere al di sotto della copertura plio-pleistocenica, per mezzo della quale rimane confinato.

In profondità, al di sotto del territorio compreso tra le Sorgenti termali di Cretone, Sant'Angelo

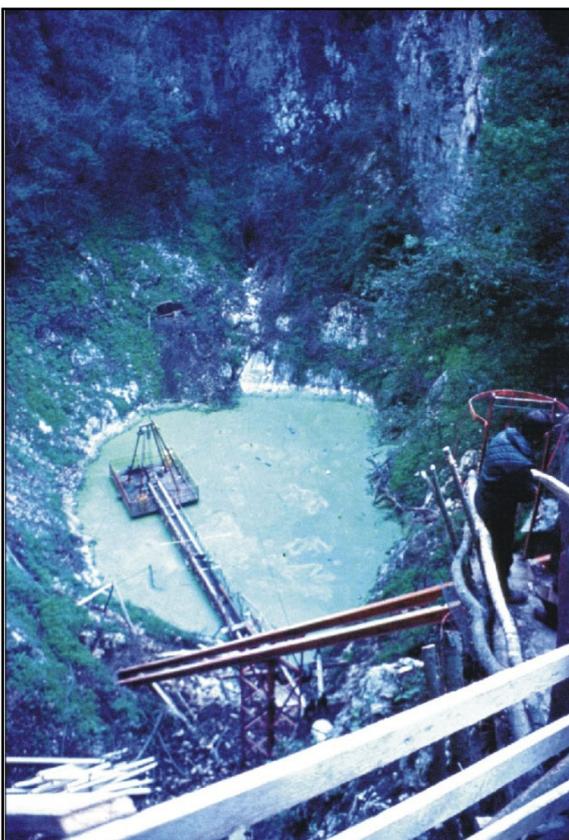


Figura 16 Prove di Pompaggio nel Pozzo del Merro durante gli anni '70 effettuate dall'ACEA.

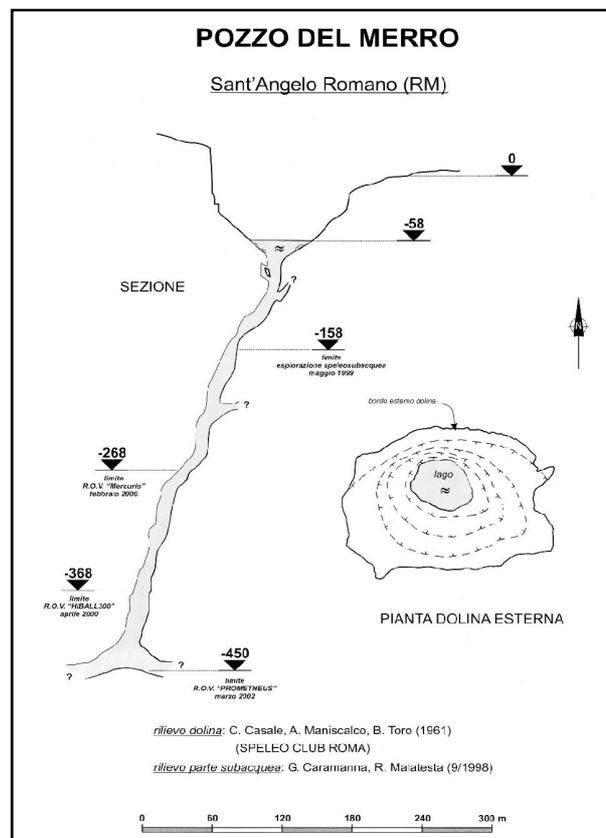


Figura 17 Batimetria del Pozzo del Merro (Monti Cornicolani) considerato come punto di accesso alla saturazione dell'unità carbonatica cornicolana (da Caramanna et al. 1998)

Romano, Guidonia, e le Sorgenti delle Acque Albule, l'ingente volume di acqua proveniente dal circuito carsico lucretile-cornicolano si miscela con convogli gassosi e termominerali che risalgono, provenendo da masse a media entalpia, lungo le faglie distensive e/o trascorrenti che hanno sbloccato la serie meso-cenozoica e pliocenica in questo settore.

Tale circostanza fa sì che in un'area assai vasta a ridosso dei principali motivi tettonici, si manifestino sorgenti termominerali. Il termalismo della falda dei Cornicolani è testimoniato dalle temperature anomale positive dell'area rilevate in molte cavità carsiche e dall'intercettazione di acque mineralizzate a 23°C durante la prova di pompaggio effettuata dall'ACEA negli anni '70 all'interno del Pozzo del Merro nei Monti Cornicolani.

A conferma del fatto che il termalismo è già presente nei carbonati in profondità, vi è il Pozzo Cretone, nella realizzazione del quale l'acqua a 23°C fu intercettata a circa 300m, dopo aver attraversato una serie di depositi pressoché sterile.

#### *Unità 2*

Si estende a ridosso del margine orientale dei Monti Lucretili. Essa è costituita dai termini meso-cenozoici della successione sabina che vanno dal "Rosso Ammonitico" alle "Marne a brecciole a macroforaminiferi" e può essere suddivisa in due sotto unità 2a e 2b.

Sul margine occidentale della sottounità 2a la presenza in profondità di una serie di scaglie fortemente tettonizzate e di una sinclinale con marcato stile compressivo, impedisce il drenaggio verso l'Unità 1 che presenta una superficie di saturazione posta a quote decisamente più basse rispetto a quelle della sottounità 2a. La direzione principale del flusso sotterraneo di questa unità è essenzialmente rivolta verso il Fosso delle Capore dove, tra le quote 500 e 400 m, vengono restituiti circa 300 l/s. Più modesti drenaggi si hanno in corrispondenza dell'apice meridionale, ove un sistema di piccole sorgenti da origine al flusso perenne del Fosso di Licenza.

La sottounità 2b, il cui acquifero è costituito prevalentemente dalla "Maiolica", è limitata a NW da un affioramento di "Rosso Ammonitico" che borda quasi per intero. La circolazione sotterranea è rivolta verso l'Aniene e verso alcuni suoi affluenti; un esempio di ciò è rappresentato dalla profonda incisione del Fosso dei Ronci, che intercetta con il proprio alveo la falda dell'idrostruttura, venendo da questa rialimentato.

#### *Unità 3*

Si estende lungo la dorsale di M.Navegna-M.Aguzzo ed è costituita dai termini della successione sabina compresi tra il Cretacico sup. ed il Miocene medio, caratterizzati, per spessori di alcune centinaia di metri, da marne intercalate a calcari marnosi e calcareniti. Le intercalazioni calcaree, generalmente molto fessurate, sono interessate da un diffuso carsismo che può assumere localmente

particolare sviluppo. Nella serie, ove predominano sequenze calcaree e calcarenitiche, sono presenti falde discontinue disposte in orizzonti sovrapposti, che alimentano sorgenti e ruscelli con portata perenne. Essendo la permeabilità delle formazioni affioranti relativamente bassa, si ritiene che la circolazione profonda avvenga prevalentemente a livello della “Scaglia Rossa” come localmente è stato evidenziato dai sondaggi effettuati dall’ACEA, nell’area di emergenza delle Capore.

#### *Unità 4*

La quarta unità coincide con il complesso dei depositi di travertino del Bacino delle Acque Albule, esteso per circa 30 Km<sup>2</sup>. L’unità è interessata da numerosi fenomeni carsici e tettonici. Lungo la principale linea tettonica ad andamento circa Nord-Sud, su cui si struttura il bacino, si hanno le



**Figura 18** Il lago delle Colonnelle, posizionato subito a ridosso del Lago della Regina



**Figura 19** Sorgente idrotermale minore in località Barco



**Figura 20** Sorgente idrotermale minore posizionata in corrispondenza di un cavalcavia dell'Autostrada del Sole A1

principali interazioni tra la falda freatica proveniente dai Cornicolani (a loro volta ricaricati per sifonamento dai Lucretili) e i fluidi idrotermali. Ad eccezione delle aree estrattive, la superficie del bacino è coperta quasi per intero da un sottile strato di piroclastiti e suoli che non costituiscono un ostacolo alla ricarica per apporti zenitali. Per questo motivo nel calcolo del bilancio idrologico, il Bacino delle Acque Albule viene considerato parte integrante dell’area di alimentazione dell’intero sistema. In profondità, al di sotto del territorio compreso tra le sorgenti termali di Cretone, Sant’Angelo Romano, Guidonia e le sorgenti delle Acque Albule, l’ingente volume di acqua proveniente dal circuito carsico lucretile-cornicolano si miscela con convogli gassosi e termominerali in pressione che risalgono, provenendo da masse a media entalpia, lungo le faglie distensive e/o trascorrenti che hanno sbloccato la serie meso-cenozoica e pliocenica in questo settore. Questo permette che nell’area corrispondente ai principali motivi tettonici, si manifestino emergenze termominerali; nell’area di Bagni di Tivoli la portata complessiva dei fenomeni sorgivi supera in regime naturale i 2000 l/s.

Più in dettaglio le sorgenti termominerali perenni attualmente presenti nel bacino sono: Sorgente Colonnelle, Sorgente Regina, Sorgenti del Barco, Sorgente “Autostrada”. Le sorgenti del Lago

dell'Inferno e dei Pantani citate in letteratura oggi non sono più visibili perché probabilmente interrato per via dell'urbanizzazione.

Lungo il tracciato dell'acquedotto dell'Acqua Marcia la Sorgente Acquoria viene quasi totalmente captata dall'ACEA lasciando un deflusso residuo di circa 350 l/s.

#### 1.5.5 Inquadramento della destinazione d'uso del territorio

Come già brevemente descritto nello scopo dello studio l'area del bacino delle Acque Albule è interessata da diverse attività antropiche che influenzano e caratterizzano il territorio e le sue risorse.

Il termalismo dell'area, fin dall'epoca romana è stato sfruttato per la realizzazione di impianti termali, e ancora oggi, le “Terme Acque Albule”, richiamano numerosi visitatori per le attività ricreative e curative. Le terme, che qualche decennio fa attingevano l'acqua direttamente dal canale di eduazione del Lago della Regina, oggi estraggono le acque direttamente dal lago tramite un impianto di sollevamento. Se prima le attività erano limitate al solo periodo estivo oggi, anche durante la stagione invernale, in molti usufruiscono delle piscine coperte.

Anche la coltivazione del travertino prosegue ininterrotta dall'epoca romana, ma nel passato, incontrando la falda acquifera superficiale a pochi metri dal piano campagna, l'estrazione non poteva approfondirsi di molto. Il “boom” delle attività estrattive si è avuto nel dopo guerra, anche grazie allo sviluppo di nuove tecnologie per mettere in atto al meglio un opportuno *dewatering* grazie al quale l'estrazione può spingersi per diverse decine di metri al di sotto del piano campagna. Oggi la coltivazione del travertino occupa gran parte dell'area centrale della piana ed è una delle principali attività economiche della zona. Molte aree sono già considerate “esaurite” commercialmente e colmate con materiali di risulta, mentre l'estrazione di materiale “vergine” si sta spostando verso il settore settentrionale della piana. Oltre alle attività estrattive *sensu strictu* vi sono moltissime attività industriali ad esse direttamente collegate come le mole da inerti, i laboratori di taglio e lavorazione dei blocchi. Il settore più a settentrione della piana è occupato per gran parte dall'Aeroporto Militare di Guidonia, mentre spostandosi ad est vi è un'area in cui sono presenti modeste attività agricole e di allevamento.

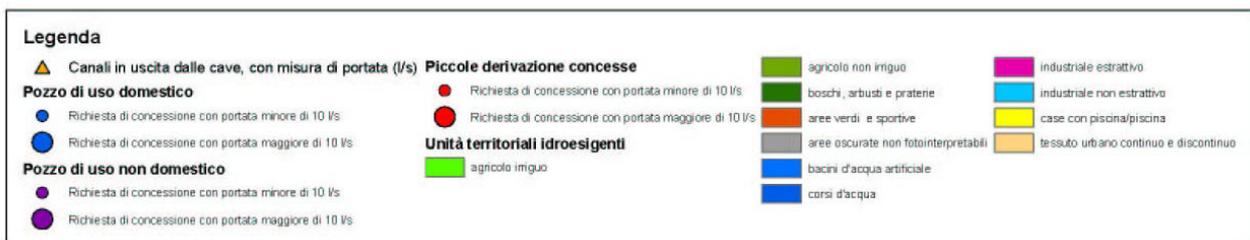
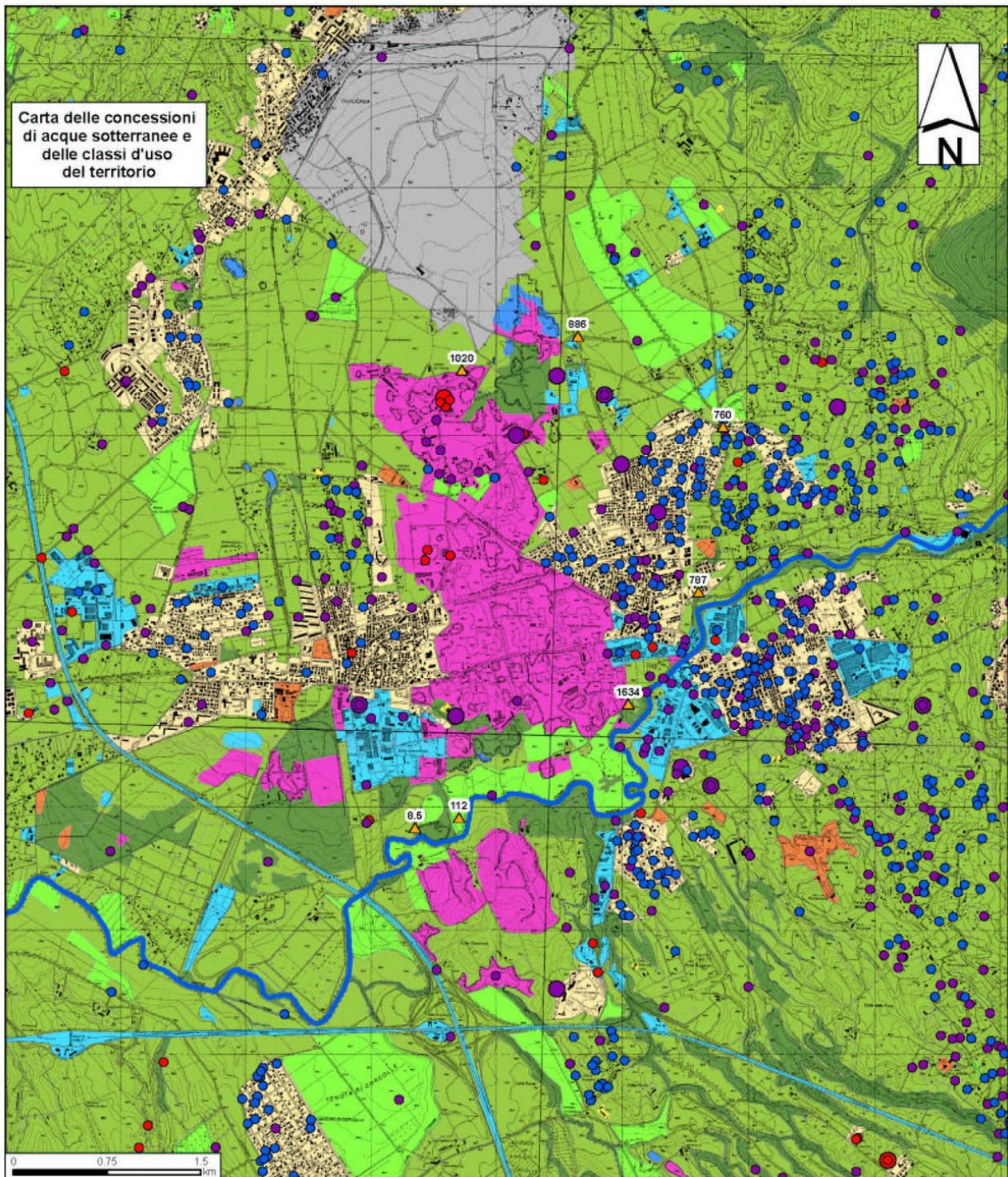


Figura 21 Carta delle concessioni di acque sotterranee dell'area di Tivoli Guidonia e delle classi d'uso del territorio (da Capelli et al. 2006)

## 2 MODELLO CONCETTUALE

Il modello concettuale della Piana delle Acque Albule prevede una geologia caratterizzata da un *bedrock* carbonatico profondo nell'area della piana, che emerge in corrispondenza dei rilievi dei monti Cornicolani e Lucretili, dei terreni sovrastanti argilloso-sabbiosi plio-pleistocenici, e più in superficie terreni di copertura e l'esteso deposito dei travertini alla cui base è presente una coltre conglomeratica discontinua ubicata al margine dei rilievi cornicolani.

Dal punto di vista idrogeologico sono individuate 2 circolazioni preferenziali.

La prima circolazione, profonda, all'interno dei carbonati, viene alimentata nelle zone di ricarica dei monti Cornicolani e Lucretili, alimenta debolmente per travaso i terreni superficiali e resta confinata al di sotto del complesso argilloso sabbioso. Le acque del circuito profondo inoltre, vengono a contatto con fluidi endogeni in risalita presumibilmente lungo le dislocazioni tettoniche che hanno ribassato il bacino, dando luogo ad un riscaldamento e ad una mineralizzazione delle acque.

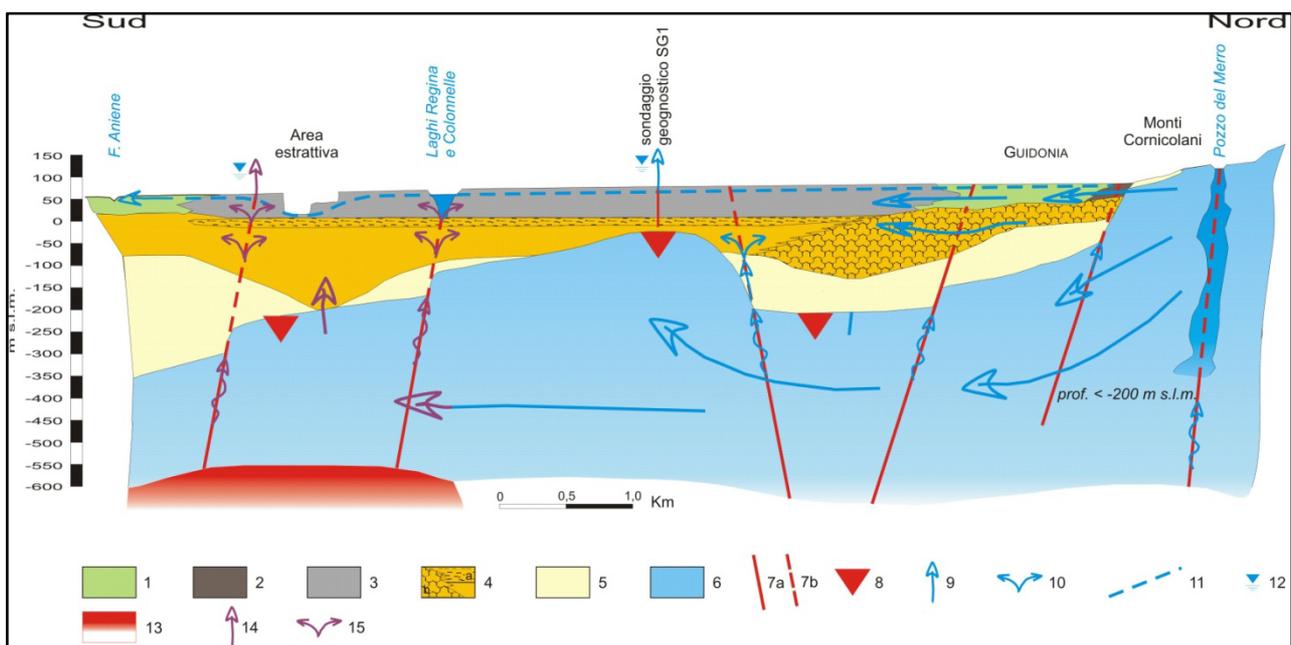


Figura 22 Modello concettuale idrogeologico del bacino delle Acque Albule.

Legenda: 1 - Depositi olocenici; 2 - Detrito di versante; 3 - Travertini; 4 - Depositi pleistocenici, a - prevalentemente pelitici, b - in facies deltizia; 5 - Depositi pliocenici; 6 - Depositi carbonatici; 7a - Faglie presunte; 7b - zone di risalita preferenziale dei fluidi e probabile dislocamento; 8 - Profondità dei carbonati ricavata da indagini geofisiche; 9 - Emergenza della falda confinata; 10 - Travaso della falda confinata all'interno dei depositi quaternari; 11 - Linea piezometrica relativa alla falda superficiale; 12 - Livello piezometrico relativo alla falda confinata (superiore di circa 2 m dal piano campagna); 13 - Fonte di provenienza del termalismo delle Acque Albule; 14 - Risalita della falda confinata termominerale; 15 - Travaso della falda termominerale all'interno dei depositi quaternari.

La seconda circolazione, superficiale, all'interno dei travertini e delle coperture recenti, viene ricaricata dalle precipitazioni e debolmente dal travaso laterale dei carbonati emergenti. La sua maggiore ricarica però, consiste nella risalita dal circuito profondo della falda termo-mineralizzata

che riesce a passare attraverso limitate zone più trasmissive dei sedimenti plio-pleistocenici connesse a stress tettonici e/o a paleo erosioni preferenziali. Questa risalita provoca una miscelazione con le acque superficiali non termalizzate e si manifesta nelle diverse sorgenti idrotermali presenti nella piana come il Lago della Regina e il Lago delle Colonnelle. Altre manifestazioni di idrotermalismo avvengono nei bacini estrattivi sia perché ricadenti essi stessi in zone caratterizzate da risalita, sia perché a causa del forte *dewatering* in atto per l'approfondimento verticale della coltivazione parte delle acque idrotermali viene richiamata nei bacini di cava secondo il forte gradiente instauratosi.

La mancanza di dati circa le reali estensioni e geometrie di questi corpi acquiferi che mettono in comunicazione idraulica le due circolazioni, suggerisce di considerare le zone verticalmente in corrispondenza delle principali manifestazioni idrotermali naturali, quali luoghi di risalita preferenziale delle acque dalla circolazione profonda verso quella di superficie.

## **2.1 Sistema acquifero**

In base a quanto descritto nel modello concettuale sintetico di circolazione, e in base alle caratteristiche acquifere dei terreni coinvolti nello studio la geometria del sistema idrogeologico è stata strutturata apportando le dovute semplificazioni per l'approccio numerico.

Seguendo infatti le linee guida consigliate da Hill e Tiedeman (Hill, et al., 2007) per un corretto processo di modellazione e calibrazione è stato applicato il principio della "parsimonia" (*principle of parsimony*) che prevede di iniziare in maniera molto semplice la modellazione e di aggiungere le complessità in modo graduale.

I corpi acquiferi definiti sono:

- Il complesso delle rocce carbonatiche, che presenta continuità idraulica dalle zone ribassate sotto la piana a quelle affioranti nei rilievi dei Monti Lucretili e Cornicolani
- Il complesso di sedimenti argilloso-sabbiosi a bassa permeabilità che confina la circolazione carbonatica sotto la piana ed emerge ad Ovest del bacino
- Il complesso dei travertini che occupa la porzione superficiale del sistema ed ospita la circolazione libera
- Il complesso delle coperture recenti che comprende le alluvioni del Fiume Aniene, le coperture vulcaniche e i terreni recenti all'interno della piana

Vi sono poi zone (che possono essere viste come un complesso a sé stante) all'interno del complesso dei sedimenti argilloso sabbiosi che permettono il passaggio delle acque dai carbonati profondi ai travertini.

Nel corso dello studio sono state dedotte ed osservate ulteriori capacità idrodinamiche all'interno dei singoli complessi, queste sono state quindi gradualmente inserite aggiungendo dei nuovi complessi. Questi nuovi complessi individuano delle zone ad altissima permeabilità all'interno dei travertini (in corrispondenza di fratture beanti che attraversano gran parte del giacimento) e diverse differenziazioni della permeabilità all'interno dei sedimenti argilloso-sabbiosi, determinando quindi una relativa impermeabilità di questo orizzonte.

In particolare, a ridosso dei Monti Cornicolani, nel settore Nord-Occidentale dell'area, è stata definita una zona che contrariamente al resto del bacino, in forte subsidenza, presenta un alto strutturale e

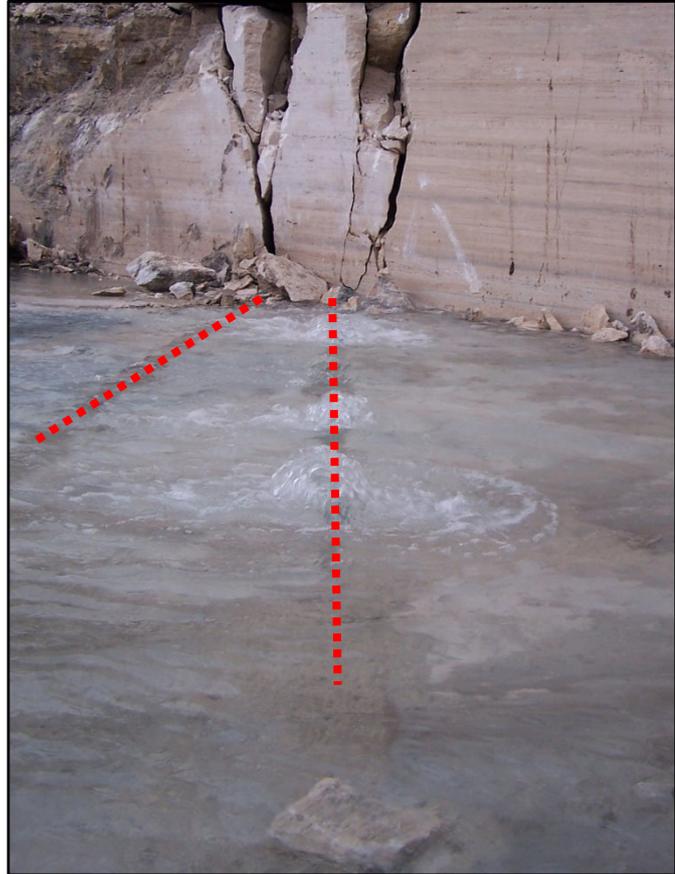


Figura 23 Acqua effluente lungo fratture beanti (in rosso) sul fondo di cava

forma un piccolo bacino sepolto tra il Lago della Regina e i Cornicolani. Questo piccolo bacino

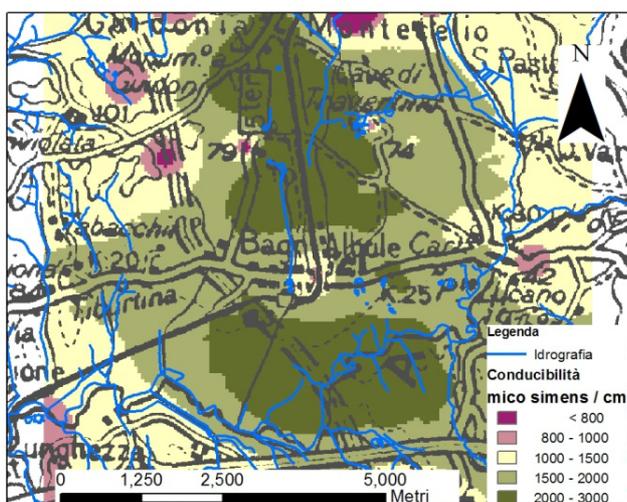


Figura 24 Distribuzione delle conducibilità elettriche nelle acque di falda dei travertini

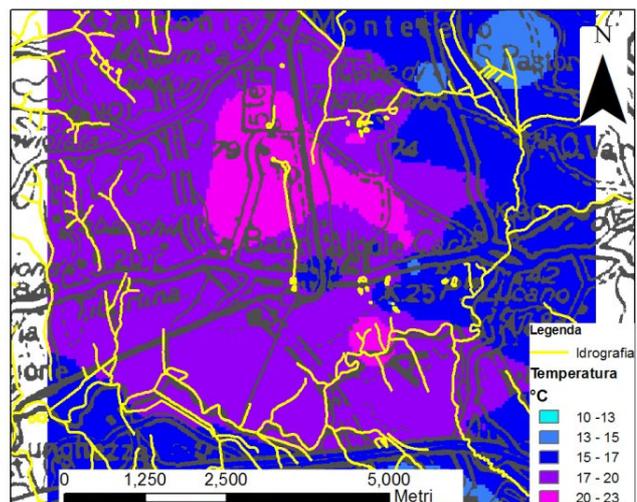


Figura 25 Distribuzione delle temperature nelle acque di falda dei travertini

durante la strutturazione della catena deve aver costituito una “trappola” sedimentaria per i detriti provenienti dai Monti Cornicolani, come confermato anche da recenti sondaggi che hanno intercettato, nell’area, sotto il travertino, delle breccie calcaree angolari in matrice argillo-sabbiosa. Questi sedimenti sicuramente determinano un’alimentazione del sistema superficiale mantenendo in comunicazione idraulica i carbonati sottostanti e i travertini seppure con una permeabilità non molto alta.

L’acquifero confinato rimane in continuità idraulica con i depositi sabbioso-limosi pleistocenici, in corrispondenza di finestre di erosione e/o di discontinuità tettoniche che interessano la serie pliocenica prevalentemente pelitica. Tale fatto comporta che la falda termalizzata dell’acquifero carbonatico in pressione risalga localmente e venga a miscelarsi con la falda dell’acquifero superficiale. Quest’ipotesi viene ulteriormente rafforzata dai dati di temperatura e conducibilità elettrica che si rilevano nei pozzi e in corrispondenza dei fenomeni sorgivi naturali e di fondo cava.

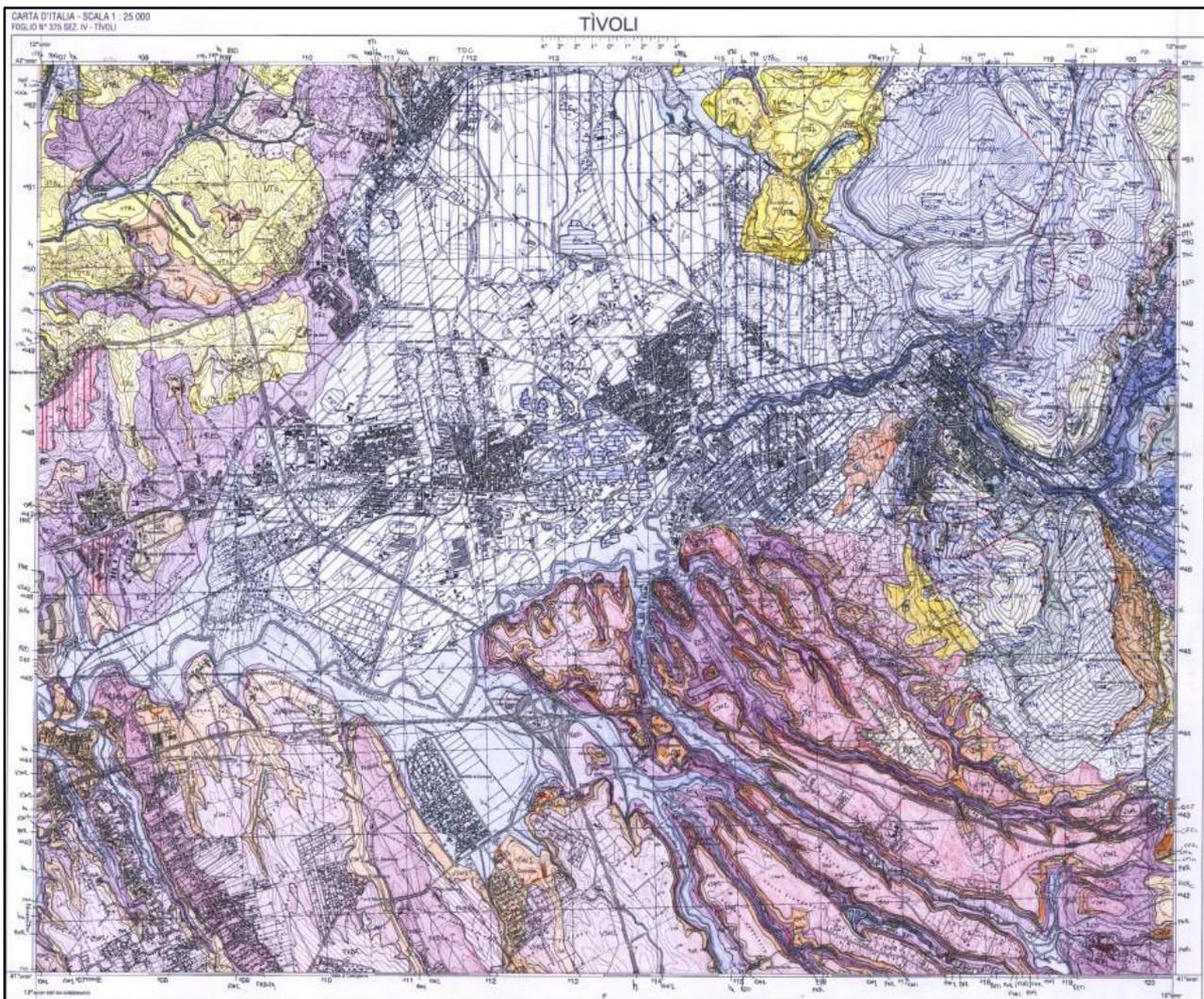


Figura 26 Immagine del Foglio Tivoli del Progetto CARG in scala 1:25.000 (qui in scala non reale) resp. scientifico Prof M. Mattei.

Infatti risulta che la distribuzione areale dei valori più elevati dei suddetti parametri (maggiori di 21°C e di 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) è caratterizzata da una forma pseudo-ellittica, con asse maggiore parallelo al principale sistema di dislocazione tettonica, mentre nelle zone circostanti, dove l'acquifero dei travertini è alimentato prevalentemente dagli apporti zenitali e dei Cornicolani, i valori dei parametri chimico-fisici sono più bassi (Capelli, et al., 2006). La ricostruzione dell'andamento degli acquiferi nelle tre dimensioni propedeutica alla modellazione è stata eseguita attraverso l'interpretazione dei dati geologici a disposizione sia di superficie sia da sondaggi e prove indirette. Per quel che riguarda la geologia di superficie, la cartografia geologica di riferimento dell'area corrisponde al recente lavoro del progetto CARG in scala 1:25.000 foglio TIVOLI.

Per quello che riguarda l'andamento dei terreni nel sottosuolo, sono stati presi in considerazione sia lavori in bibliografia, sia dati di sondaggi geognostici e geoelettrici profondi.

La superficie di base geologica (*bedrock*), corrispondente al tetto dei carbonati ribassati al di sotto

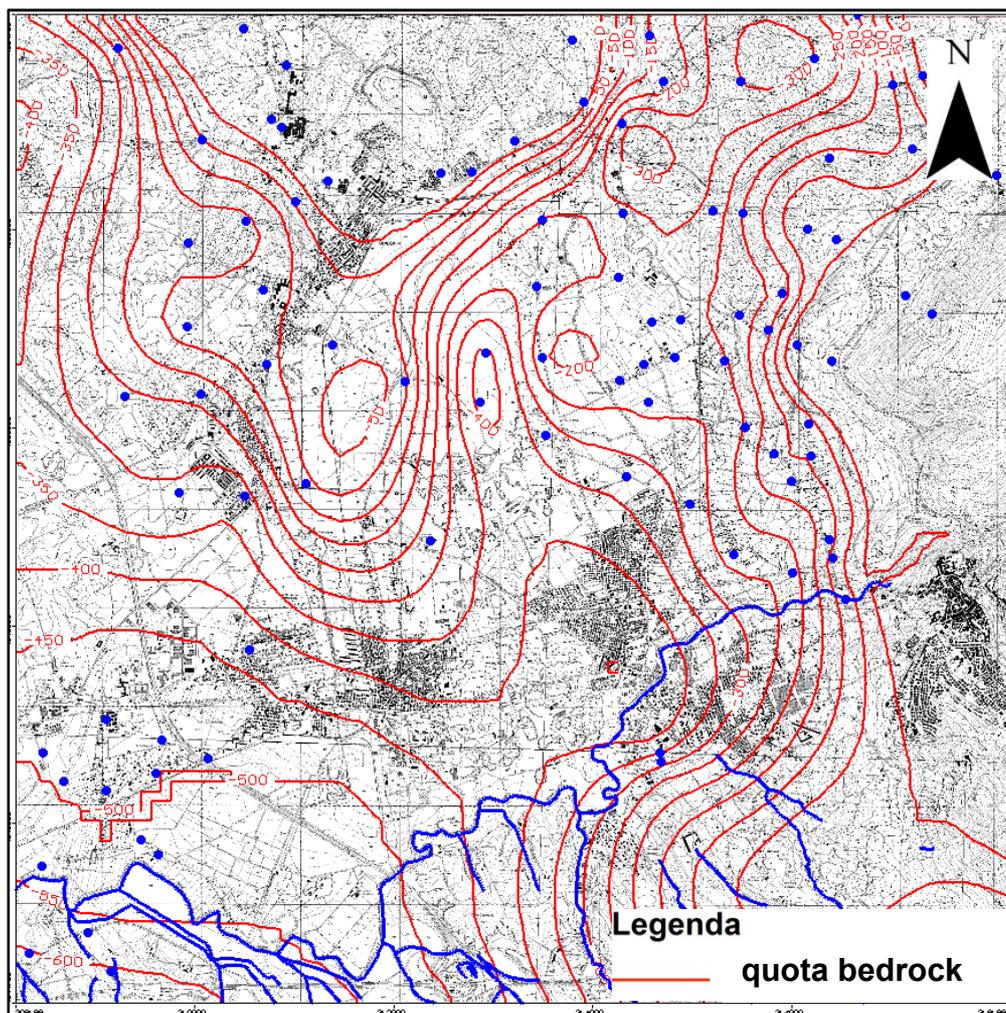


Figura 27 Carta dell'ubicazione dei Sondaggi Elettrici Verticali eseguiti dalla CMP negli anni '70 e andamento della superficie del *bedrock* carbonatico interpolata relativamente all'area del modello.

della piana è stata ricostruita interpolando quasi 300 sondaggi elettrici verticali (SEV) realizzati negli anni '70 dalla CMP (Compagnia Mediterranea Prospezioni) che individuano le quote degli orizzonti resistivi. La superficie è stata interpolata con metodi deterministici (*inverse distance*) tramite sistemi informativi territoriali e comprende un'areale ben più ampio dell'area in esame.

La ricostruzione degli altri orizzonti risulta più carente di dettagli, in quanto sebbene siano presenti dati di moltissimi sondaggi geognostici nell'area, la maggior parte di questi non supera il letto del deposito di travertino. Di conseguenza la superficie ipotizzata corrispondente a questo orizzonte (base dei depositi travertinosi) è il risultato dell'interpretazione di ben pochi punti da sondaggi geognostici e osservazioni eseguite sul fondo delle cave, controllati secondo quanto riportato in lavori precedenti che hanno dedotto gli spessori del deposito (Maxia, 1950) (Faccenna, et al., 1994).

La natura dei terreni posti stratigraficamente sotto i travertini resta, conseguentemente a quello che è stato detto in precedenza, di difficile individuazione.

Alcuni sondaggi riportano subito a contatto con il letto del travertino dei conglomerati ben classati, ma si presume che questi siano di spessore esiguo e non distribuiti uniformemente sotto tutto il deposito.

La presenza di terreni argilloso-sabbiosi marini, con spessori cospicui, posti tra la serie carbonatica ribassata e i travertini in superficie sembra plausibile sia per la presenza degli affioramenti posti ad Ovest dell'area, sia da studi paleogeografici che individuano nel paleo bacino subsidente un ambiente marino abbastanza profondo.

Data l'insistenza delle strutture carbonatiche sul bacino deposizionale, si presume che periodiche venute di detrito abbiano intercalato la deposizione marina. Dai dati geofisici si pensa che questi

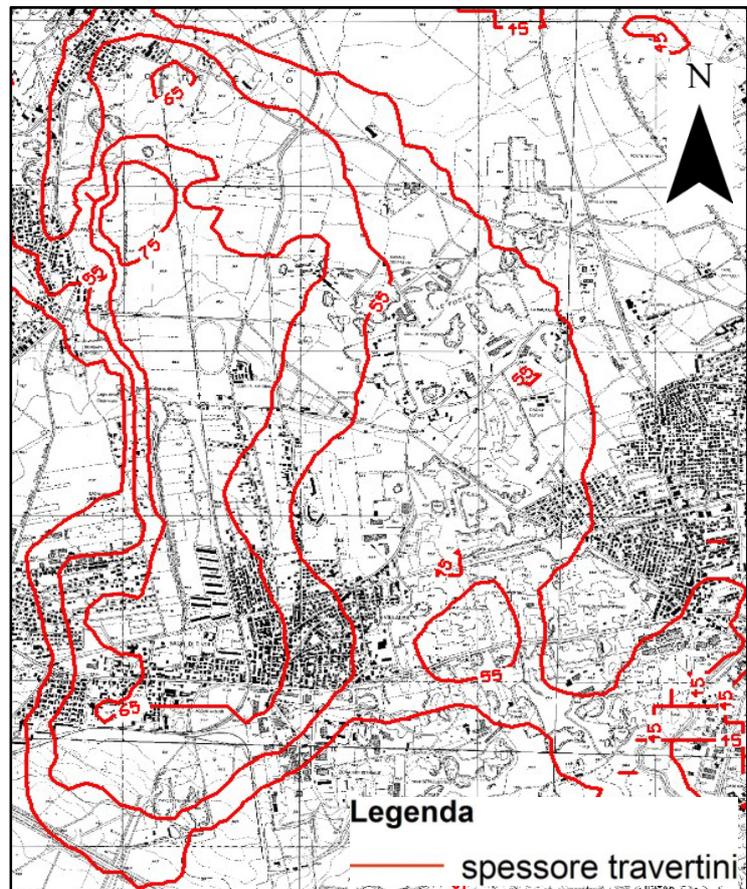


Figura 28 Linee di uguale spessore del deposito di travertino derivate dall'interpretazione di pochi dati di sondaggio e da studi precedenti.

apporti detritici siano più consistenti nel settore nord occidentale della piana, nella zona subito a Nord dei Laghi Regina e Colonnelle, in cui il tetto dei carbonati prima di sprofondare decisamente forma un alto e un relativo piccolo bacino subito sotto i rilievi dei Cornicolani.

## **2.2 Limiti idrogeologici**

Dal punto di vista dei limiti idrogeologici, il modello viene “chiuso” a Sud dall’Aniene e dal Complesso Vulcanico dei Colli Albani, a Nord dai monti Cornicolani, ad Est dai Monti Lucretili e ad Ovest dai bassi rilievi argillosi dell’area di Marco Simone.

Verticalmente l’acquifero superficiale dei Travertini è limitato da sedimenti a bassa permeabilità sottostanti che lo separano (in maniera discontinua) dalla circolazione in pressione nel sistema carbonatico profondo.

## **2.3 Proprietà idrauliche degli acquiferi**

Gli acquiferi del sistema simulato presentano caratteristiche molto diverse.

I carbonati del *bedrock* affioranti nei limiti settentrionali e orientali dell’area di studio presentano prevalentemente permeabilità secondaria a causa delle fratture e del diffuso carsismo. Lo stesso vale per la coltre dei travertini litoidi. Questi ultimi presentano una fratturazione con direzione preferenziale delle fratture circa Nord-Sud ed un andamento pressoché verticale favorendo quindi il deflusso sotterraneo in direzione verticale e meridiana rispetto a quella orizzontale Est-Ovest.

I terreni esistenti tra il *bedrock* e i travertini, i terreni di copertura della placca travertinoso e le alluvioni del Fiume Aniene, hanno caratteristiche fisiche dei mezzi porosi e presentano quindi permeabilità primaria.

La poca disponibilità di dati derivanti da prove di emungimento nei terreni e nelle rocce che caratterizzano l’area, induce ad associare agli stessi dei valori di permeabilità tipici ed ampiamente documentati in bibliografia (Spitz, et al., 1996).

## **2.4 Ricarica, sorgenti e prelievi**

L’area principale di ricarica del sistema idrogeologico delle Acque Albule è da identificare fuori dalla piana in corrispondenza delle emergenze carbonatiche dei Monti Lucretili e Cornicolani (fig. 7) (Capelli, et al., 1987).

Il sistema idrogeologico superficiale della piana è alimentato sia dalla zona di ricarica a monte per sifonamento e limitatamente per travaso, sia per la ricarica zenitale.

Le uscite dal sistema sono sia naturali, e corrispondenti alle sorgenti Regina e Colonnelle, la sorgente Acquoria le sorgenti minori nella piana e il drenaggio da parte del Fiume Aniene, sia indotte da attività antropiche quali i pompaggi di carattere domestico, industriale e minerario (*dewatering* dell'attività estrattiva e pompaggio per le attività termali).

## 2.5 Bilancio idrico

Partendo dai dati riportati nell'inquadramento meteo climatico, sono state aggiornate e approfondite alcune voci del bilancio idrico congiuntamente con un aggiornamento dei dati idrogeologici.

### 2.5.1 Approfondimento dell'idrogeologia e di alcuni termini del bilancio idrico

I punti nodali della caratterizzazione idrogeologica del bacino sono legati all'individuazione delle due circolazioni principali, quella del circuito carbonatico e quella dei travertini.

- Circuito carbonatico – sono stati presi in considerazione gli studi relativi alla ricarica del sistema carbonatico individuata nel settore dei Monti Cornicolani e dei Monti Lucretili (Capelli, et al., 1987) e al collegamento diretto della circolazione profonda di questi settori con i fluidi endogeni in risalita sotto la piana (prove Pozzo del Merro, ACEA 1970 - Fig.16). Sono

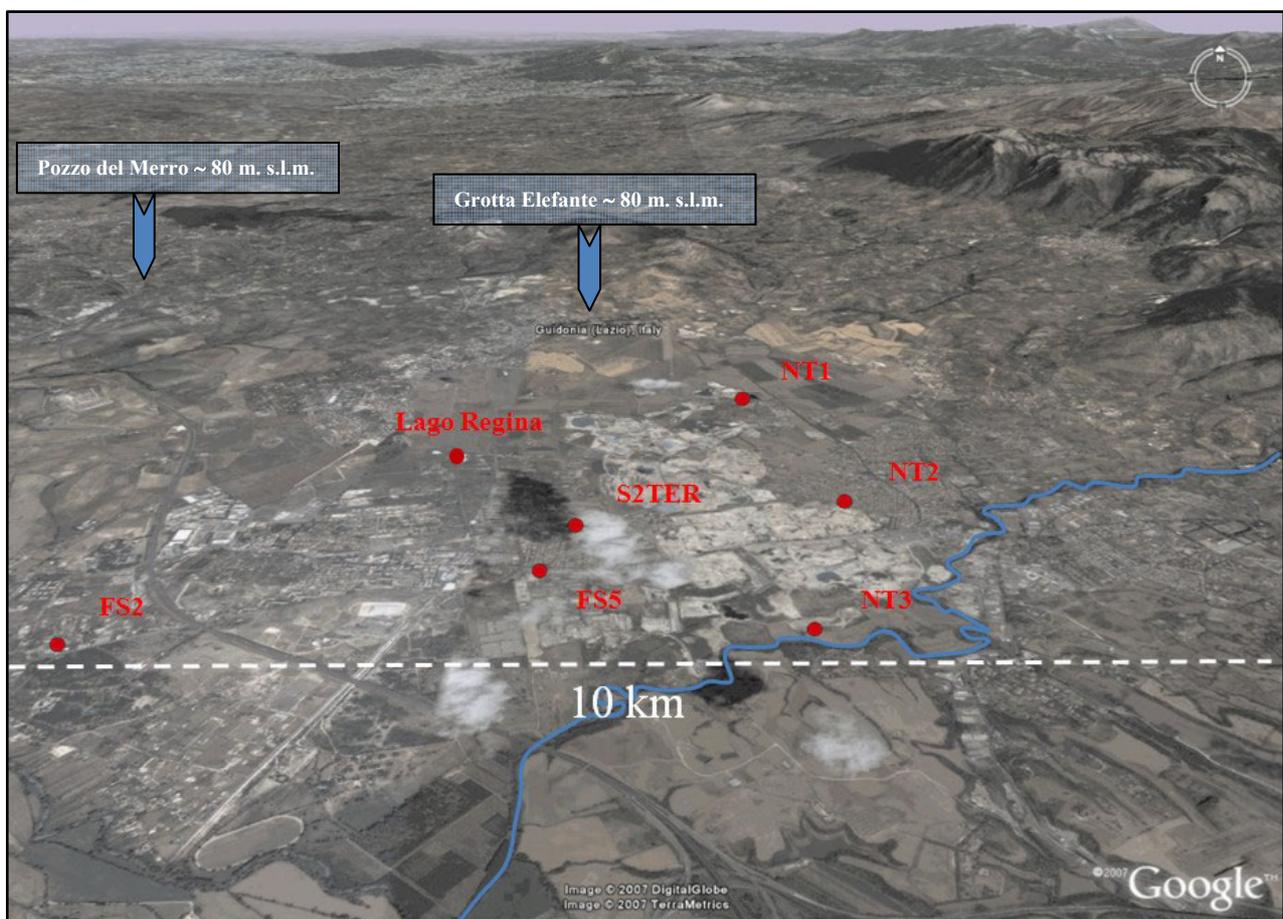


Figura 29 Punti di misura della saturazione dei carbonati (in blu) e rete di monitoraggio della Piana delle Acque Albule. In rosso vengono riportate le posizioni delle 7 sonde e il loro nome (La Vigna, et al., 2007)

stati quindi misurati i livelli saturi relativi ai settori carbonatici più prossimi alla piana e i flussi della sorgente Acquoria. Il carico idraulico nel sistema carbonatico nell'area è di circa **80 m. s.l.m.** e corrisponde alla saturazione della Grotta dell'Elefante (presso Guidonia) e del Pozzo del Merro il cui livello attualmente è sotto monitoraggio continuo da parte della Regione Lazio.

- Circuito dei travertini
  - Rete di Monitoraggio delle Acque Albule

A partire dal 2006 nell'area delle Acque Albule è stata realizzata una rete di monitoraggio dei dati piezometrici utilizzando 7 fori, realizzati precedentemente per indagini geognostiche e attrezzati a piezometro a tubo aperto (Fig.29).

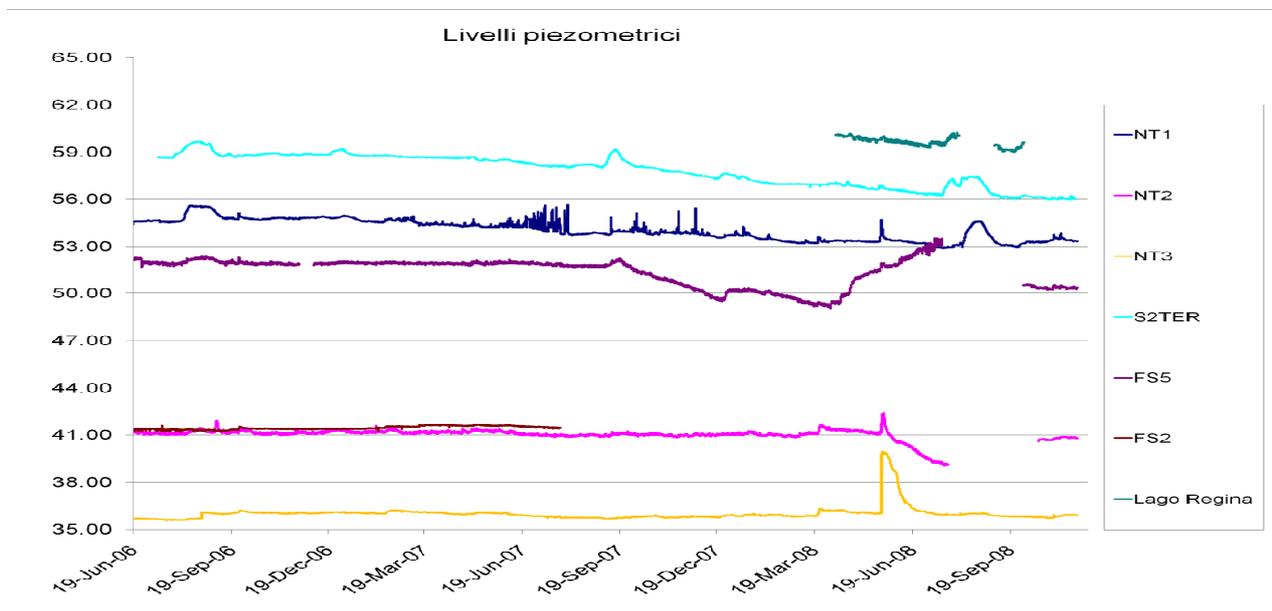


Figura 30 Grafico relativo al confronto delle variazioni piezometriche nelle sonde installate nella Piana delle Acque Albule

Le sonde multi parametriche registrano in continuo i valori di livello, e temperatura (°C) e in alcuni casi la conducibilità elettrica.

Nei grafici vengono mostrati i dati del monitoraggio a confronto (Figg.30,31,32).

Analizzando il grafico relativo alle variazioni dei singoli livelli nei piezometri (Fig.30), si possono

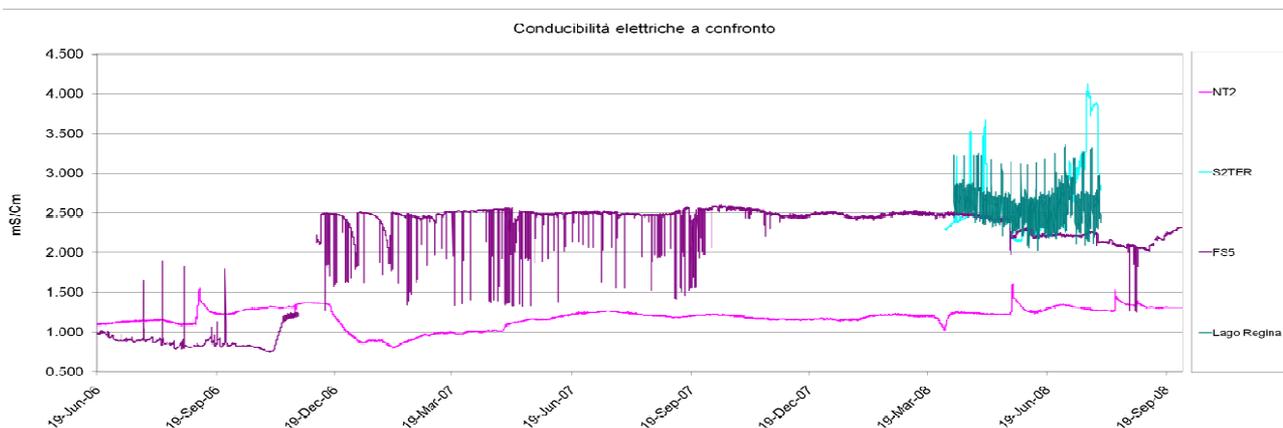


Figura 31 Grafico relativo al confronto delle variazioni di conducibilità elettrica nelle sonde installate nella Piana delle Acque Albule

notare le seguenti peculiarità:

In generale il regime piezometrico dell'area risulta estremamente dinamico, con frequenti oscillazioni dei livelli che a volte subiscono repentine variazioni in tempi molto brevi.

Più nel dettaglio si può notare come i dati delle sonde NT1, FS5 e S2TER presentino più variazioni e grandi oscillazioni in determinati periodi dell'anno, mentre quelli delle sonde FS2, NT2 e NT3

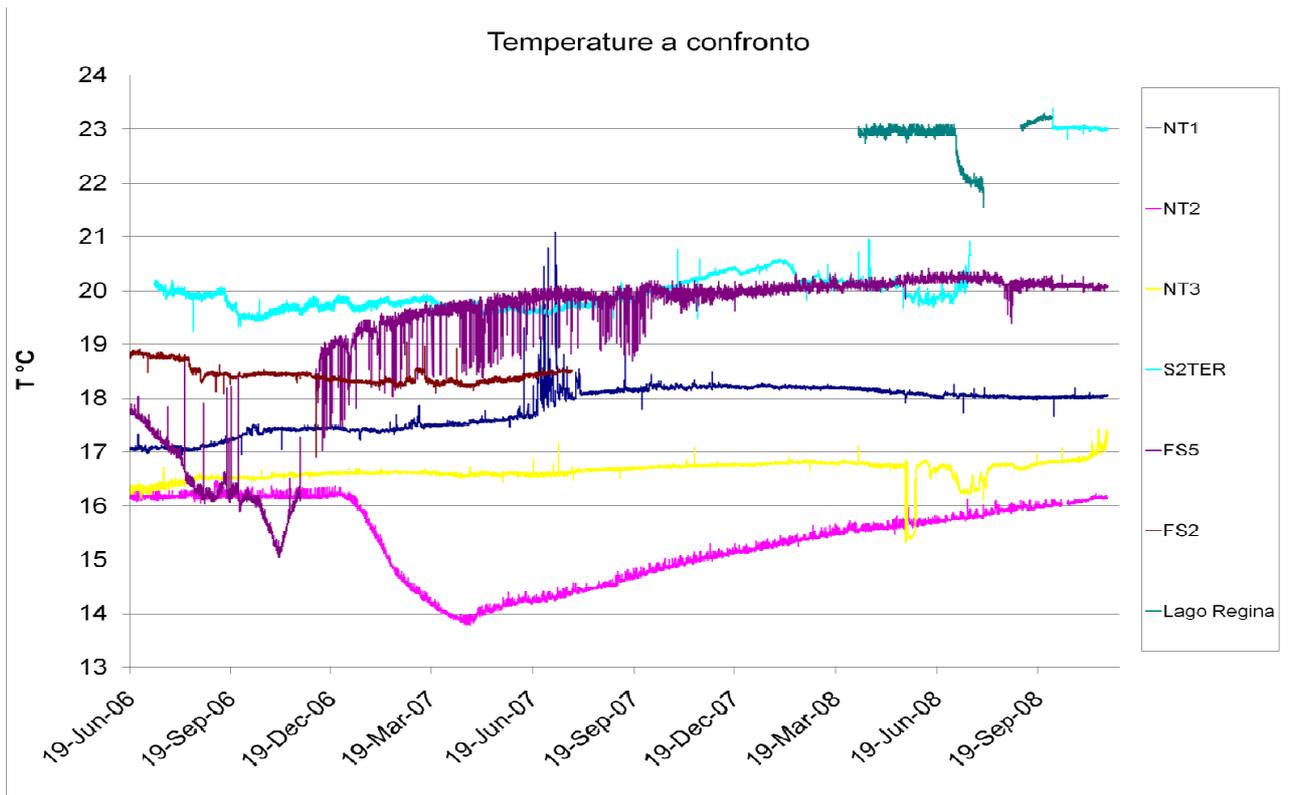


Figura 32 Grafico relativo al confronto delle variazioni di temperatura nelle sonde installate nella Piana delle Acque Albule

presentano variazioni per lo più a carattere “stagionale”. Il Lago della Regina invece mantiene un livello medio pressoché costante (in un periodo di monitoraggio più breve poiché iniziato molto più recentemente rispetto a tutte le altre sonde) con oscillazioni ritmiche positive e negative e una variazione più alta positiva in estate.

Quasi tutte le sonde mostrano un trend negativo negli ultimi due anni.

Per quel che riguarda i parametri chimico-fisici registrati dalle sonde (Figg.31,32), si nota come tendenzialmente le acque superficiali della piana possono essere distinte in “acque termo mineralizzate” e “acque dolci”. Le prime hanno una temperatura vicina o superiore ai 20°C e una conducibilità elettrica che supera i 1800 $\mu$ S/cm, le seconde restano su valori di temperatura e conducibilità più bassi e tipici delle acque non termo-mineralizzate.

○ Campagne di rilevamento idrogeologico

Sono state condotte diverse campagne di rilevamento idrogeologico negli ultimi anni con lo scopo di definire lo scenario piezometrico recente in vari momenti.

Nella campagna più recente realizzata nel mese di febbraio 2008, di cui si possono vedere in carta i punti rilevati, si è voluto associare alle misure piezometriche distribuite nella piana anche la quantificazione dei flussi in gioco nel sistema idrogeologico. Il risultato di questa campagna è la carta delle linee isofreatiche (in cui sono evidenziati i punti di rilevamento) che mostra un evidente

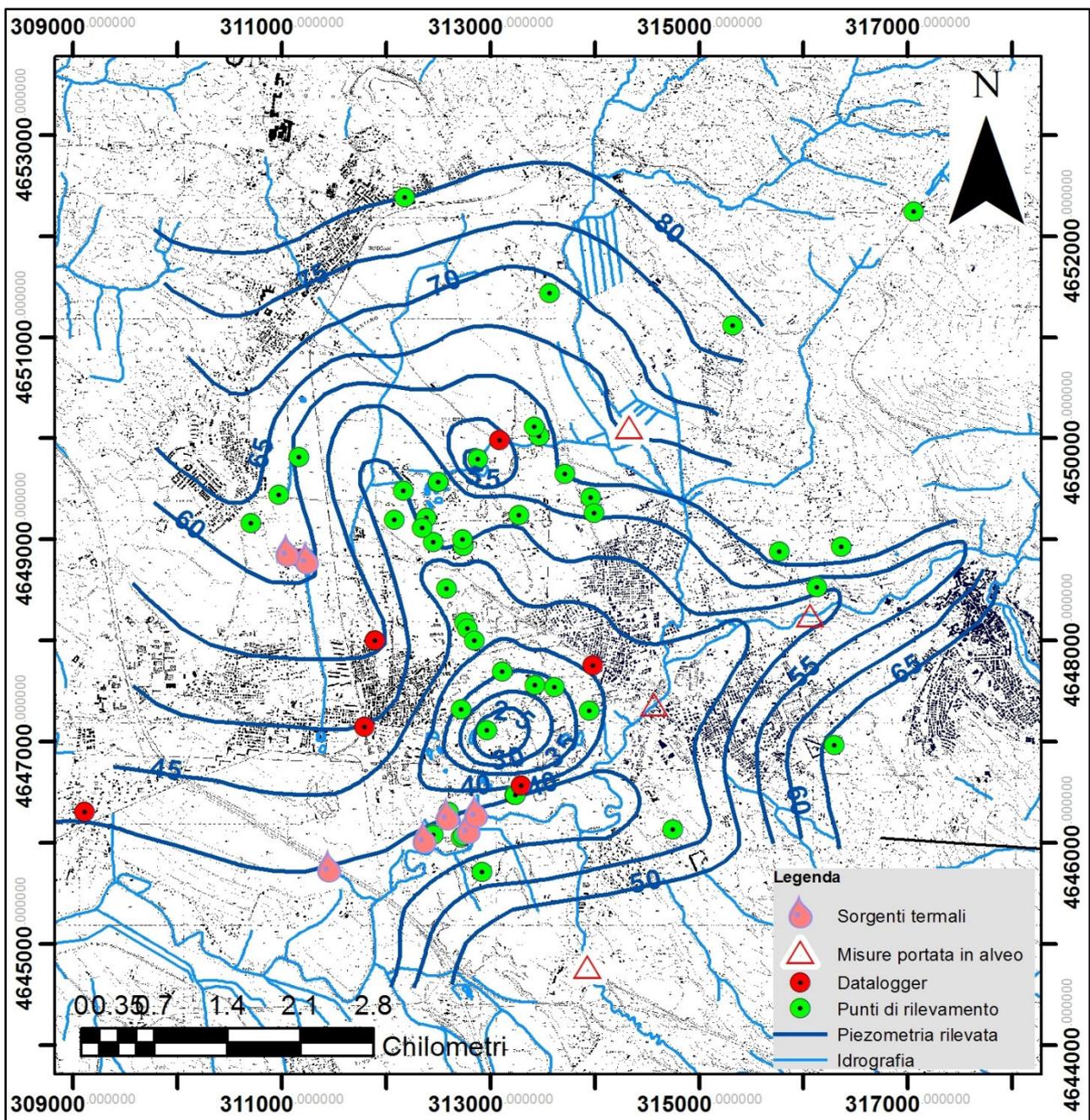


Figura 33 Piezometria rilevata nel mese di febbraio 2008 con i punti di misura e le sonde fisse

depressione in corrispondenza dell'area estrattiva, con una protuberanza del cono di emungimento che va verso Nord Ovest allineandosi con i maggiori punti di prelievo da *dewatering*.

Oltre alle misure delle sorgenti minori presenti nell'area e alle portate in alveo dei pochi fossi presenti, sono state



Figura 34 Misura di portata nei canali aziendali dell'area estrattiva



Figura 35 Misura di portata nei canali collettori in cui vengono convogliate le acque delle singole aziende

misurate le quantità di acqua emunte per generare il *dewatering* nell'area estrattiva nonché la posizione esatta dei punti di prelievo. Le misure sono state effettuate tramite correntometrie nei singoli canali delle aziende estrattive e i quantitativi parziali sono stati poi confrontati con misure fatte nello stesso periodo sempre a mezzo correntometria, nei canali collettori drenanti tutte le acque delle varie aziende.

Le acque emunte misurate ammontano circa a  $4,3 \text{ m}^3/\text{secondo}$  e vengono riversate in due punti nel Fiume Aniene tramite i canali collettori.



Figura 36 Dewatering in atto in alcune cave

Modello numerico del flusso dell'unità termominerale delle Acque Albule (Roma)

	Azienda	Punto di prelievo	Potata misurata l/s	Portata misurata l/min	
Canale Longarina - Valle Pilella	A	1	14.7	882	
	A	2	2.3	138	
	B	1	19.087	1145.22	
	C	1	185.902	11154.12	
	C	2	979.817	58789.02	
	D + E	1	550.936	33056.16	
	D	1	121.813	7308.78	
	F + G	1	58.84	3530.4	
	H	1	22.5	1350	
	G	1	167.68	10060.8	
	I	1	409.316	24558.96	
	L	1	13.472	808.32	
	<b>Tot. Canale Longarina - Valle Pilella</b>			<b>2546.363</b>	<b>152781.78</b>
	Misure Uscita Canale	15-Feb-2008		2824.406	169464.36
		18-Feb-2008		2802.406	168144.36
	20-Feb-2008		2762.625	165757.5	
	6-May-2008		2823.48	169408.8	
Aniene	M	1	22	1320	
Canale Le Fosse	N	1	515.692	30941.52	
	N	2	655.089	39305.34	
	N	3	56.323	3379.38	
	O	1	437.59	26255.4	
	O	2	6.498	389.88	
	I + O	1	41.48	2488.8	
	I + O	2	39.25	2355	
	<b>Tot. Canale Le Fosse</b>			<b>1751.922</b>	<b>105115.32</b>
	Misure Uscita Canale	15-Feb-2008		1832.115	109926.9
		8-May-2008		1891.738	113504.28
TOTALE ATT. ESTRATTIVE	<b>TOT DAI PARZIALI</b>		<b>4320.285</b>	<b>259217.1</b>	
Misure Uscita Canale	15-Feb-2008		<b>4656.521</b>	<b>279391.26</b>	
Misure Uscita Canale	8-May-2008		<b>4715.218</b>	<b>282913.08</b>	

Tabella 2 Portate misurate nelle singole aziende confrontate con le portate misurate nei canali collettori

Sorgente	Data	Portata misurata (l/s)	Note
Acquoria	10-Feb-08	335.91	Esubero dopo captazione
Sorgente Autoatrada	14-Feb-08	57.04	
Sorgente Albero Caduto	20-Feb-08	114.22	Somma di due punti sorgivi
Sorgente Bamboo	28-Feb-08	34.76	

Tabella 3 Portate misurate nelle sorgenti locali

Corso d'Acqua	Data	Portata misurata (l/s)	Note
Aniene	19-May-08	21000.00	A valle di Acquoria
Aniene	19-May-08	16000.00	Ponte Lucano - misura falsata dall'apertura non comunicata della diga acquoria
Aniene	20-May-08	21000.00	Ponte di Lunghezza - misura falsata dall'apertura non comunicata della diga acquoria
Fosso S.Vittorino	07-Feb-08	89.55	
Fosso dei Prati	15-Feb-08	25.26	Precedente all'immissione nel canale Le Fosse

Tabella 4 Portate in alveo misurate nei corsi d'acqua locali

Sono state inoltre eseguite delle misure di portata in alveo seriate lungo l'Aniene tramite uno strumento ad onde acustiche per definire la quantità d'acqua che si presume si infiltri verso la zona del dewatering. La non prevista apertura della diga dell'impianto ENEL di Acquoria (situato a monte della sezione) ha però falsato i risultati. Nonostante non sia stato verificabile sperimentalmente, questa perdita di volume dall'alveo è fortemente presumibile in base alla carta delle temperature sovrapposta alla piezometria rilevata; si nota infatti come un *plume* di acqua fredda si indirizzi dall'Aniene verso il cono di emungimento del *dewatering* (Fig.39).

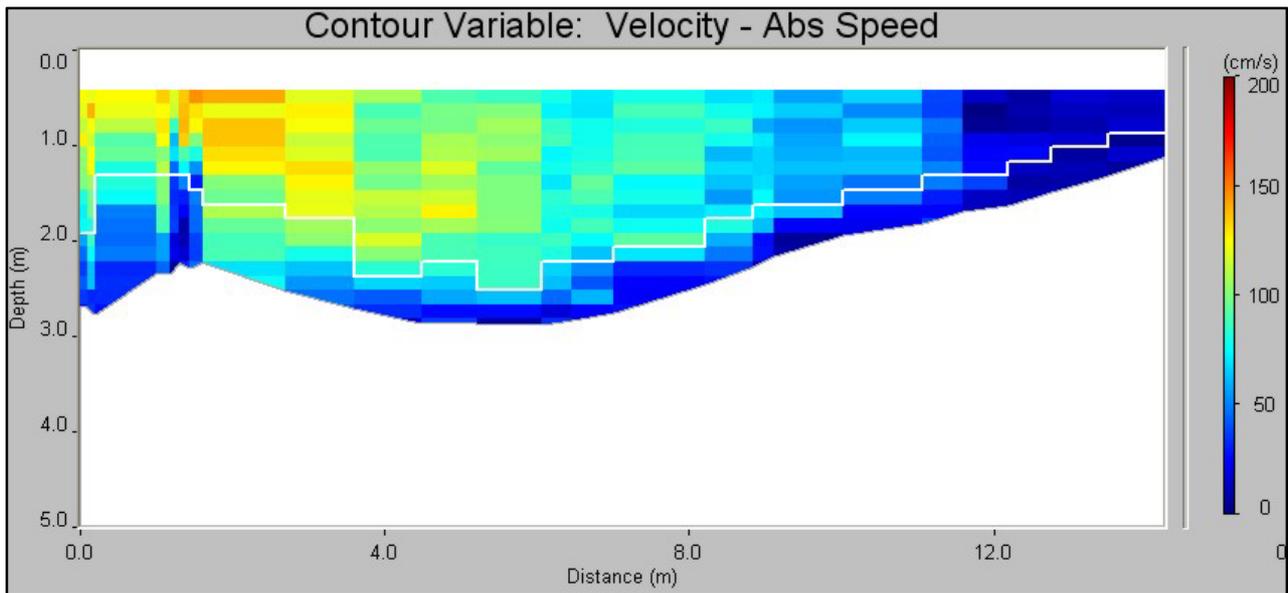


Figura 37 Sezione di misura in Alveo del Fiume Aniene tramite strumento "Son Tek River Surveyor"

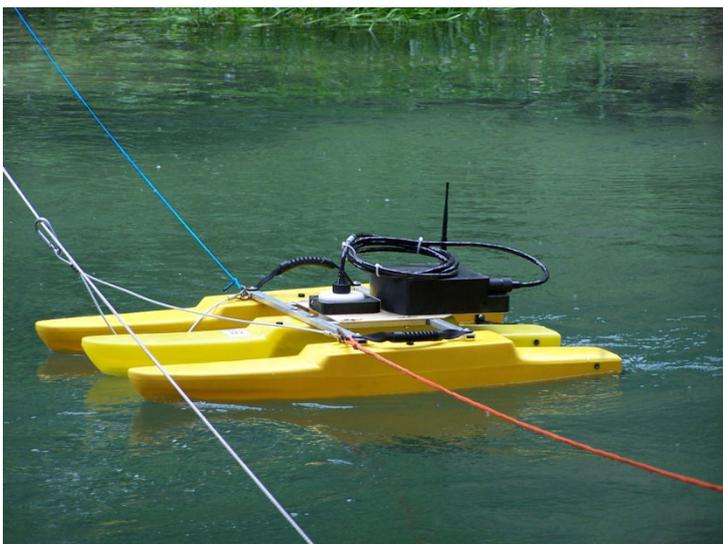


Figura 38 Il River Surveyor durante la misura

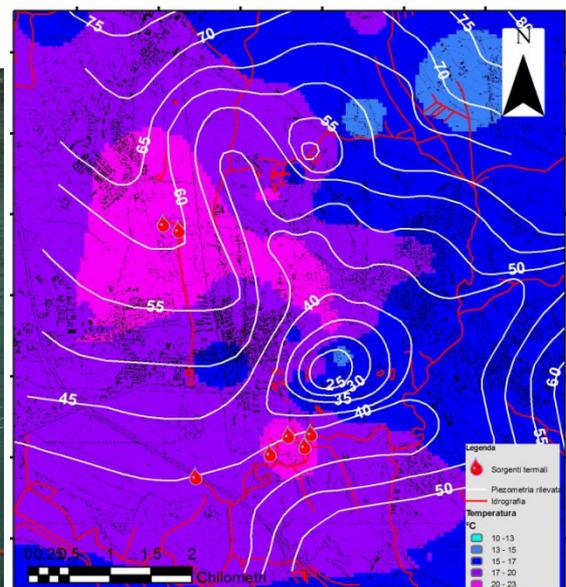


Figura 39 Sovrapposizione delle freattimetrie e delle temperature rilevate; si nota come l'acqua fredda dal corso dell'Aniene venga richiamata verso il grande cono di emungimento

### 3 DESCRIZIONE DEI CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

#### 3.1 Codice di calcolo MODFLOW-2005

MODFLOW-2005 è la nuova versione del modello idrogeologico alle differenze finite comunemente chiamato MODFLOW, sviluppato dall'U.S. Geological Survey (servizio geologico degli Stati Uniti). Il flusso delle acque sotterranee è simulato usando un approccio alle differenze finite e a blocchi centrati.

Il movimento tridimensionale delle acque sotterranee a densità costante e attraverso terreni caratterizzati da permeabilità primaria può essere descritto dall'equazione:

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

dove

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  e  $K_{zz}$  sono i valori di conducibilità idraulica lungo gli assi x, y e z che si assume siano paralleli alle principali direzioni di conducibilità idraulica del sistema (L/T)

$h$  è il carico potenziometrico (L)

$W$  è il flusso per unità di volume rappresentante sorgenti o catture di acqua con  $W < 0.0$  per i flussi in uscita dal sistema idrogeologico e  $W > 0.0$  per i flussi in entrata nel sistema ( $T^{-1}$ )

$S_s$  è l'immagazzinamento specifico ( $T^{-1}$ )

$t$  è il tempo (T)

Questa equazione, assieme con la definizione delle condizioni di flusso e/o dei carico ai limiti di un acquifero, e la definizione di una condizione iniziale, costituisce una rappresentazione matematica di un sistema idrogeologico.

Tranne che per alcuni sistemi molto semplici, però, sono raramente possibili soluzioni analitiche

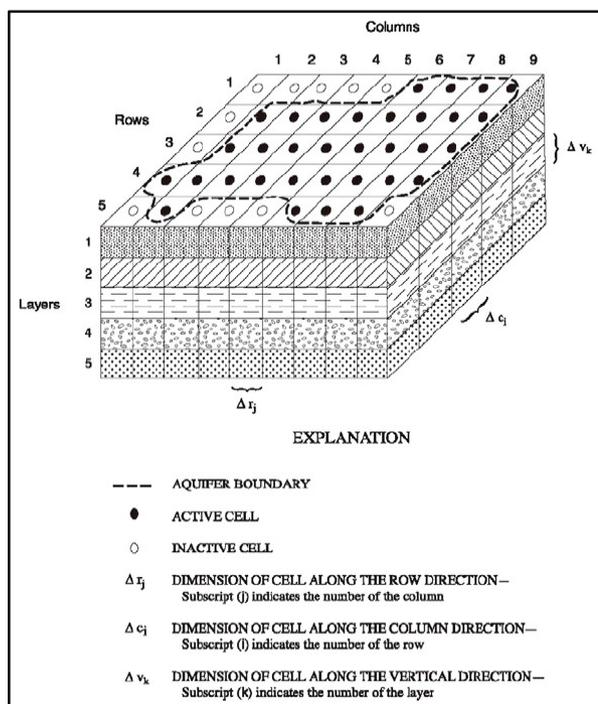


Figura 40 Ipotetico sistema acquifero discretizzato (Harbaugh, 2005)

dell'equazione precedente, così sono stati impiegati diversi metodi numerici per ottenere delle soluzioni approssimate. Uno di questi metodi è l'approccio alle differenze finite in cui il sistema continuo descritto dall'equazione di flusso viene sostituito da un insieme finito di punti discreti nello spazio e nel tempo, e le derivate parziali sono sostituite con valori calcolati dalle differenze di carico in questi punti. Il processo conduce a sistemi di equazioni algebriche differenziali, lineari, simultanee; le loro soluzioni sono i valori di carico in punti e tempi specifici. Questi valori costituiscono un'approssimazione della distribuzione dei carichi in funzione del tempo che sarebbe stata restituita da una soluzione analitica dell'equazione semi differenziale del flusso.

### *3.1.1 Assunzioni*

La rappresentazione di un sistema idrogeologico in MODFLOW avviene secondo una discretizzazione del sistema in un reticolo di blocchi detti "celle", le cui localizzazioni vengono descritte in termini di "righe", "colonne" e "strati" o "*layers*". Viene utilizzato un sistema di indicizzazione  $i, j, k$ , per cui in un sistema caratterizzato da "NROW" (righe), "NCOL" (colonne) e "NLAY" (strati),  $i$  sarà l'indice delle righe,  $j$  sarà l'indice delle colonne e  $k$  sarà l'indice degli strati. Nel formulare le equazioni del modello, gli strati vengono generalmente assunti come corrispondenti all'orizzontalità delle unità idrogeologiche mentre righe e colonne rappresentano due direzioni ortogonali tra loro all'interno degli strati.

In ogni cella è presente un "nodo" in corrispondenza del quale viene attribuito il valore di carico calcolato; possono essere usati molti schemi per localizzare i nodi nelle celle; l'equazione delle differenze finite usa la formulazione "*block-centered*", in cui il nodo è al centro della cella.

Nello sviluppo dell'equazione del flusso, approssimata alle differenze finite, il reticolo in MODFLOW si assume rettangolare orizzontalmente e verticalmente. In realtà sono possibili distorsioni degli strati e quindi delle superfici delle singole celle per meglio simulare le geometrie dei complessi idrogeologici, mentre i lati delle celle restano sempre verticali.

### *3.1.2 Processo di Modellazione*

#### *Preprocessing*

Ai fini della risoluzione dell'equazione generale del flusso nel mezzo saturo è necessario specificare le condizioni al contorno del dominio modellato e, nel caso di simulazioni in stato transitorio, le condizioni iniziali. La definizione dell'area di studio comporta la distinzione tra il dominio del modello e i sistemi idrogeologici ad esso adiacenti. Conseguentemente si individuano

dei limiti, con un ben preciso significato idrogeologico, tra il dominio del modello ed il resto del sistema. Questi limiti sono localizzati ai bordi del modello e in tutti quei punti dove sono presenti influenze esterne sul sistema, quali: fiumi, pozzi, *reservoir* perdenti, etc. I criteri per definire le condizioni idrauliche ai limiti sono legati alla topografia, all'idrologia ed alla geologia dell'area di studio. Questi aspetti possono portare alla individuazione di limiti come strati impermeabili, superfici piezometriche controllate dalle acque superficiali, aree di ricarica o recapito, flussi entranti lungo i bordi pedemontani degli acquiferi, etc. Una volta individuati i limiti, la definizione delle condizioni al contorno nel processo di modellazione consiste nell'assegnare una particolare assunzione matematica che specifica appropriate condizioni idrauliche (generalmente o il carico idraulico o il flusso attraverso il limite) a ciascuno di essi.

La definizione delle condizioni al contorno è necessaria per garantire l'unicità della soluzione e della risposta del modello all'equazione di flusso. Infatti, lo specificare i flussi comporta il calcolo dei carichi idraulici, mentre definire i carichi idraulici implica il calcolo dei flussi in entrata o in uscita non noti. A ciascun limite, per tutta la sua estensione, deve essere assegnata una sola condizione al contorno, che può variare nel tempo. I limiti cui assegnare le condizioni al contorno possono essere distinti in limiti fisici e fittizi. I limiti fisici sono rappresentati matematicamente utilizzando tre tipologie di condizioni al contorno:

- 1) a carico costante,
- 2) a flusso imposto,
- 3) a flusso dipendente dal carico.

La condizione a carico costante o potenziale imposto (condizione di I tipo o di Dirichlet, specified/prescribed head boundary), specificando il carico idraulico, è quella che più influenza la soluzione del modello. Tali limiti individuano una interfaccia tra le

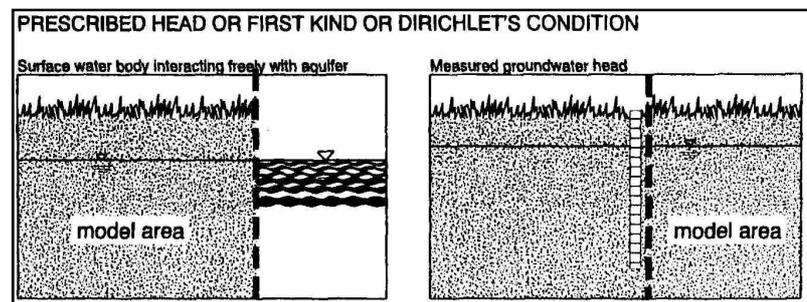


Figura 3 Rappresentazione schematica della condizione del I tipo, o di Dirichelet (da Spitz, et al., 1996)

acque sotterranee ed un corpo idrico, superficiale (come il mare, fiumi, laghi) o sotterraneo (un pozzo con abbassamento fisso) il cui carico idraulico sia conosciuto (Fig. 41).

Le condizioni a flusso imposto (condizione di II tipo o di Neumann, prescribed flux boundary, limiti di ricarica, recharge boundary) definiscono limiti attraverso i quali è specificato il flusso in entrata o in uscita dal modello (superfici di infiltrazione e/o di evaporazione, limiti di ricarica, pozzi aventi una portata costante, etc.; Fig. 42). La condizione di flusso nullo (no-flux

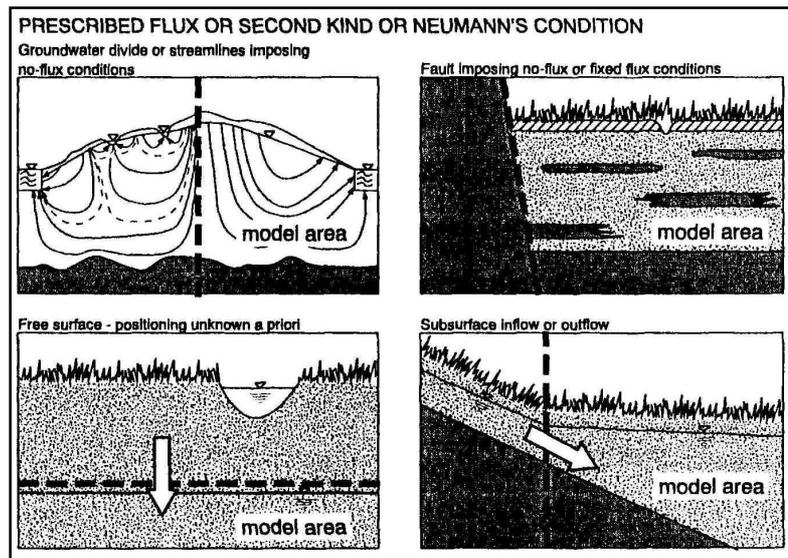


Figura 4 Rappresentazione schematica della condizione del II tipo, o di Neumann (da Spitz, et al., 1996)

boundary), in cui il flusso è uguale a zero, è un tipo speciale di limite a flusso imposto. Tale limite è identificato da linee di flusso, contatti tra unità idrogeologiche permeabili e impermeabili, faglie e spartiacque sotterranei (Fig. 42). Se la posizione del limite nel caso di un contatto geologico è fissa, può non esserlo nel caso di limiti dipendenti dal contesto idrogeologico quali spartiacque sotterranei o linee di flusso. Una volta accertato che tale limite non varia durante la simulazione, spartiacque sotterranei e linee di flusso possono essere rappresentati come limiti a flusso nullo (Spitz, et al., 1996).

La condizione a flusso dipendente dal carico (condizione di III tipo o di Cauchy, head-dependent flow boundary, limite di tipo misto o semipermeabile) è utilizzata per rappresentare la drenanza tra acquiferi e da corpi idrici superficiali, quando gli scambi

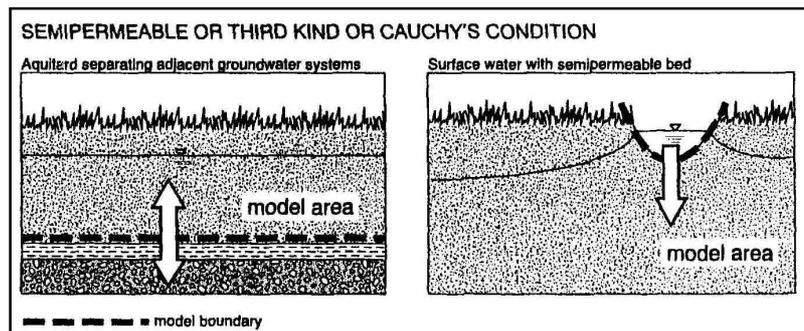


Figura 5 Rappresentazione schematica della condizione del III tipo, o di Cauchy (da Spitz, et al., 1996)

d'acqua tra l'acquifero ed il corpo idrico superficiale dipendono dalla differenza di carico tra le acque superficiali e quelle sotterranee (Spitz, et al., 1996)(Fig. 43). Tali condizioni di flusso si verificano, ad esempio, se il letto di un corso d'acqua si comporta come una membrana semipermeabile tra il corso d'acqua stesso e l'acquifero.

I limiti fittizi sono invece utilizzati in assenza di limiti idrogeologici “reali” e vengono posti allontanandoli arbitrariamente dal centro della griglia, laddove si ritiene che non possano essere raggiunti dalle sollecitazioni idrologiche che caratterizzano il sistema. I limiti fittizi vengono preferibilmente rappresentati tramite condizioni al contorno che non siano di tipo “forte” quali condizioni del III tipo. Nei casi in cui i limiti naturali sono a grande distanza rispetto all’area da modellare, è possibile porre il limite utilizzando una condizione a carico costante estrapolata o reale (Spitz, et al., 1996).

Le condizioni iniziali definiscono la distribuzione delle piezometrie (o nel caso, delle concentrazioni) nell’intero dominio del modello al tempo  $t=0$ . Generalmente si utilizzano valori derivanti da rilevamenti di campagna, ma è possibile supplire alla mancanza di questi basandosi su stime o su risultati ottenuti da simulazioni precedenti. La definizione delle condizioni iniziali può semplificare la soluzione di problemi nello stato stazionario, avendo la funzione di “stima” iniziale dei valori delle piezometrie per i calcoli numerici. Una buona stima delle condizioni iniziali, può ridurre i tempi della simulazione drasticamente. I valori iniziali delle piezometrie possono inoltre essere utilizzati per valutare gli abbassamenti, come misura della differenza tra essi e le piezometrie calcolate. La definizione delle condizioni iniziali nelle simulazioni in stato transitorio è invece di vitale importanza, poiché fornisce la base per il calcolo delle piezometrie nei passi di tempo successivi. Errori presenti nella definizione delle condizioni iniziali si propagheranno nella simulazione dando luogo a soluzioni poco realistiche.

#### *Processing*

Durante questa fase viene risolta l’equazione del flusso in tre dimensioni. Il metodo con cui il codice di calcolo risolve l’equazione può essere scelto individuandolo tra i diversi risolutori disponibili. Per le simulazioni del Modello delle Acque Albule è stato scelto il *Preconditioned Conjugate-Gradient Package*.

Questo risolutore (*solver*) utilizza il calcolo iterativo secondo il metodo a Gradiente Condizionato Preconiugato per risolvere simultaneamente le equazioni prodotte dal modello. Può essere applicato in condizioni di flusso sia lineare che non-lineare. Permette di selezionare un numero massimo di *Outer Iterations* entro il quale se il calcolo non è andato a convergenza ferma la simulazione. Il numero di iterazioni da definire varia a seconda della risoluzione che si vuole raggiungere e del grado di linearità dell’equazione da risolvere.

#### *Postprocessing*

I dati di output derivati dal calcolo del risolutore vengono scritti su file specifici per essere poi visualizzati da interfacce grafiche.

Tutto il processo di calcolo viene sintetizzato invece nel *LIST file*, un file di testo che riporta tutti i dati di input e output del modello, le osservazioni, le fasi di calcolo (iterazioni) e i risultati che vengono confrontati con le osservazioni inserite nella fase di implementazione, fornendo la discrepanza tra l'osservato e il simulato oltre che informazioni circa il bilancio di massa del modello.

Tramite le interfacce grafiche i risultati possono essere visualizzati sia come dati spaziali, visualizzando le linee isofreatiche e potenziometriche, le linee di uguale abbassamento della tavola d'acqua (*drawdown*), sia come grafici riportanti i valori relativi al *fitting* del modello.

In base al confronto tra i dati simulati e osservati in questa fase possono essere inoltre condotte analisi di sensitività dei parametri del modello. Ovvero la simulazione viene fatta girare "perturbando" i dati di input dei parametri osservando cosa cambia nella soluzione finale rispetto alle singole osservazioni e quindi vengono segnalate quelle osservazioni che forniscono più informazioni per la stima dei parametri.

L'analisi di sensitività in questo studio è stata condotta utilizzando il codice UCODE\_2005 (Poeter, et al., 2005).

### 3.1.3 *Limiti*

#### *Approccio al mezzo poroso equivalente*

Come già detto precedentemente il sistema delle Acque Albule è un sistema che in parte presenta permeabilità primaria (coperture recenti, sedimenti argillo-sabbiosi, detriti grossolani a matrice argillo-sabbiosa) e in parte presenta permeabilità secondaria (rocce carbonatiche e travertini).

Uno dei limiti di questo modello è legato a questa differenza, poiché il codice di modellazione MODFLOW-2005 è stato realizzato per simulare il flusso dei soli mezzi a permeabilità primaria. Nonostante questo limite, data la scala di applicazione del modello e la grandezza delle celle (100 metri di lato), l'approccio ad un mezzo poroso equivalente per le litologie in questione può essere considerato un buon compromesso. La presenza della fratturazione nel travertino viene comunque simulata sia dalla presenza di zone a  $k$  molto elevata con direzione preferenziale NNO-SSE (Travertini ad altissima permeabilità - vedi 4.2 "Parametri idraulici") sia dall'anisotropia orizzontale del travertino dovuta alle fratture con medesima direzione (Travertini - vedi 1.5.4 "Inquadramento Geologico").

### *Sistema idrotermale non simulato*

Il termalismo dell'area delle Acque Albule non viene simulato in questo modello. Il codice MODFLOW-2005 infatti non è in grado di simulare il trasporto dei fluidi né la loro densità e di conseguenza il trasporto di calore non può essere simulato.

Dati i bassi gradienti di temperatura, questo limite può ritenersi trascurabile alla scala di approccio del modello.

Con delle particelle (*particles*) inserite sul fondo del terzo *layer* seppure a scopo puramente indicativo si vuole solo mostrare il percorso dell'acqua termo mineralizzata dal circuito profondo a quello superficiale esclusivamente secondo l'andamento del flusso.

### **3.2 Descrizione del Codice di Calibrazione UCODE\_2005**

UCODE\_2005 (Poeter, et al., 2005) è un codice di calcolo sviluppato dall'U.S. Geological Survey che assieme ad altri post processor può essere utilizzato con processi di modellazione esistenti per eseguirne analisi di sensitività, calibrazione, analisi della capacità di predizione e di valutazione dell'incertezza. Può essere utilizzato qualsiasi set di dati, purché il modello abbia dei file di input e output numerici (in formato testo o ASCII), che i numeri di questi file abbiano sufficienti unità, che il modello giri per mezzo di un file eseguibile o uno *script* e che i valori simulati siano funzioni continue dei valori dei parametri.

UCODE è in grado di confrontare le osservazioni e i valori simulati equivalenti.

Un valore simulato equivalente può essere qualsiasi valore simulato scritto nel file di output durante il processo di modellazione o può essere calcolato dai valori simulati da equazioni definite dall'utente. Le quantità possono essere i risultati del modello o variabili dipendenti. Per esempio per i modelli numerici idrogeologici possono essere i carichi, flussi, concentrazione etc. Possono inoltre essere considerate informazioni dirette o prioritarie (*prior information*) su parametri definiti. Vengono calcolati inoltre degli operatori statistici per quantificare il confronto tra osservazioni e valori equivalenti simulati, includendo una funzione obiettivo ponderata ai minimi quadrati. Attraverso le funzioni di analisi di sensitività, questo codice può essere utilizzato per calibrare un modello stimando i parametri che producano la minore differenza tra dati osservati e simulati.

La stima dei parametri avviene secondo la cosiddetta modellazione inversa (*inverse modeling*), ossia un processo che dati i risultati osservati in natura, cerca la soluzione migliore per far sì che il modello costruito simuli risultati il più possibile corrispondenti a quelli osservati.

La stima dei parametri avviene tramite una regressione non lineare: una funzione obiettivo

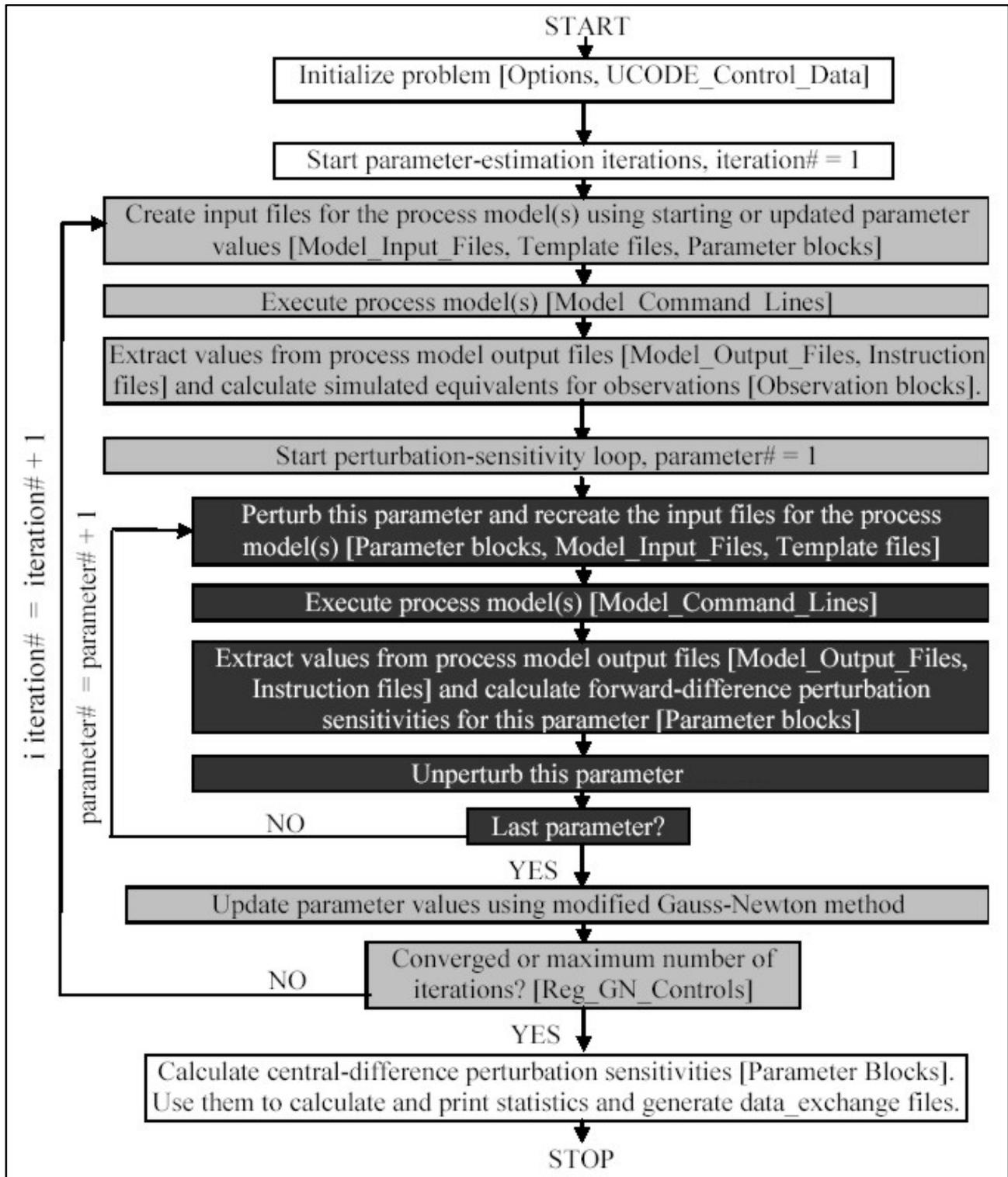


Figura 44 Diagramma di flusso che descrive il processo di stima dei parametri di UCODE\_2005 tramite l'uso delle sensibilità perturbate (Poeter, et al., 2005). I pacchetti di informazioni (*input blocks*) selezionati nel file principale di UCODE\_2005 (*main input file*) e altri file di input sono scritti tra parentesi quadre; “*Parameter Blocks*” rappresenta quattro pacchetti di informazioni usati per definire i parametri, “*Observations Blocks*” rappresenta tre pacchetti di informazioni usate per definire le osservazioni. “*Iteration#*” è il numero dell'iterazione per la stima di parametri, “*Parameter#*” è il numero del parametro. Il colore grigio è usato per dare enfasi ai cicli.

ponderata ai minimi quadrati viene minimizzata rispetto ai valori dei parametri usando un metodo di Gauss-Newton modificato.

I parametri che producono il miglior *fitting* vengono definiti come quelli che producono il valore più basso della funzione obiettivo.

UCODE può essere utilizzato sia in modalità “*sensitivity analysis*” che in modalità “*estimation*”. Dalla prima si ottengono tutte le informazioni circa la sensitività dei parametri che possono essere visualizzate numericamente nei *text files* di *output* o, graficamente, con un apposito *software freeware* dell’*USGS* chiamato *GWChart*.

In base alle informazioni circa la sensitività dei parametri è possibile selezionare quali dei parametri (i più sensitivi) includere nella regressione per essere così stimati e quali dare il ruolo di parametri prioritari (*prior information*) perché si è pressoché sicuri del loro valore. I parametri da stimare possono essere inoltre “costretti” a rimanere in un *range* che l’utente considera ragionevole tramite l’opzione “*constrain*”.

Il prodotto ultimo della regressione di UCODE è un insieme di file con la lista dei parametri modificati in modo da ottenere il minor scarto tra dati osservati e simulati.

Questi valori possono essere presi come tali (in caso di un buon *fitting*) oppure essere considerati come valori iniziali (*start values*) per una nuova regressione per raffinare così la stima.



## 4 COSTRUZIONE DEL MODELLO

### 4.1 Dominio del modello

Il dominio del modello inizialmente è stato definito considerando un quadrato di 10Km di lato con al centro la zona della piana. Il quadrato è stato suddiviso in celle quadre di 100m di lato e organizzato in tre strati (*layers*).

I *layers* corrispondono alla topografia (il DEM della Regione Lazio con celle da 20m) e alle due principali superfici geologiche al centro della piana (letto dei travertini e tetto dei carbonati), mentre lateralmente le due superfici sono state rese “piane” ad una stessa quota per evitare intersezioni o spessori nulli.

Successivamente il dominio attivo del modello è stato limitato alla sola area della piana, comprendendo una piccola porzione di rilievi circostanti.

Rispetto alla totalità delle celle individuate all’inizio (30.000), a seguito della definizione del dominio attivo, le celle attive risultano essere 5.061 su ogni *layer* per un totale di 15.183; il loro spessore è variabile in funzione della distanza verticale tra le superfici nei vari punti (Fig.45).

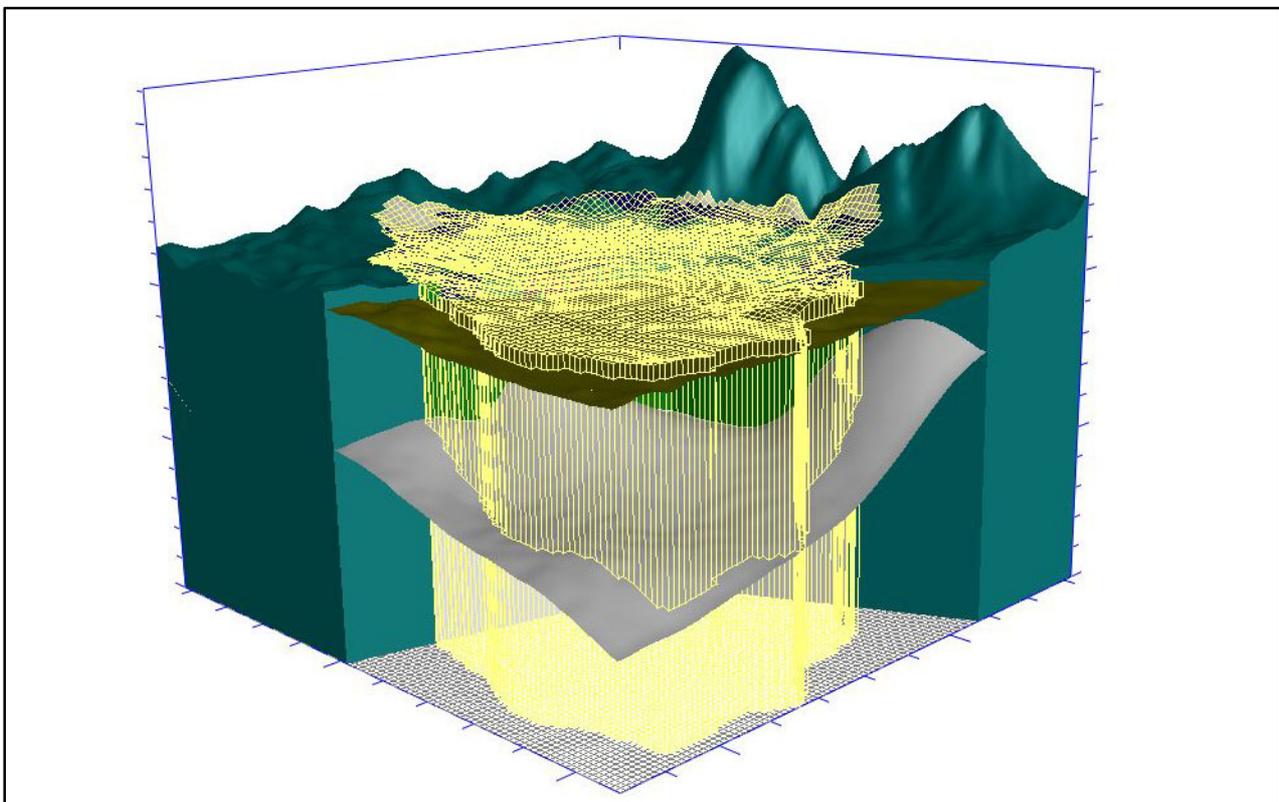


Figura 45 Discretizzazione del modello numerico delle Acque Albule, sono ben visibili i tre strati e in giallo le celle del dominio attivo

## 4.2 Parametri idraulici

I parametri idrodinamici del modello calibrato sono stati assegnati ad 8 zone che riproducono l'andamento della geologia e per ognuna delle quali vengono definiti i valori di conducibilità idraulica "K" sia orizzontali che verticali.

La procedura iniziale di assegnazione de valori di K alle zone, ha visto come grandezze le permeabilità medie che le litologie individuate presentano nell'area.

Il modello iniziale (Fig.46) presentava solo 5 zone di conducibilità idraulica isotrope:

Carbonati	– $K = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s ( $K_x=K_y=K_z$ )
Sedimenti argilloso-sabbiosi	– $K = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s ( $K_x=K_y=K_z$ )
Zone di risalita preferenziale	– $K = 1 \cdot 10^{-2}$ m/s ( $K_x=K_y=K_z$ )
Coperture superficiali	– $K = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s ( $K_x=K_y=K_z$ )
Travertini	– $K = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s ( $K_x=K_y=K_z$ )

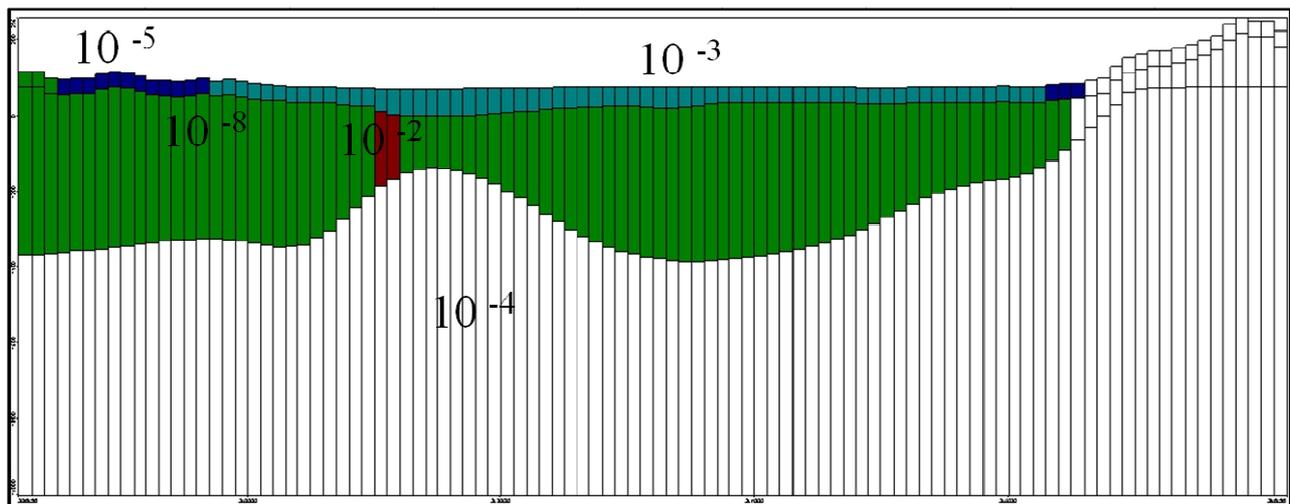


Figura 46 Sezione lungo una riga del Modello iniziale delle Acque Albule. Le zone di diversa conducibilità idraulica sono solo 5

Con il progredire dello studio modellistico, in base all'aggiunta graduale di complessità, effettuata sia in base agli strumenti di calibrazione, sia alle osservazioni dirette sul campo, il numero e la distribuzione delle conducibilità idrauliche del sistema sono state modificate come segue (tab.3):

Carbonati	– $K_x = 4,87 \cdot 10^{-2}$ m/s ( $K_x=K_y=K_z$ )
Sedimenti argilloso-sabbiosi	– $K_x = 2,10 \cdot 10^{-15}$ m/s ( $K_x=K_y=K_z$ )
Sedimenti terrigeni grossolani in matrice argillo-sabbiosa	– $K_x = 1,16 \cdot 10^{-5}$ m/s ( $K_x=K_y \neq K_z$ )
Zone di risalita preferenziale ad alta permeabilità	– $K_x = 2,31 \cdot 10^{-4}$ m/s ( $K_x=K_y=K_z$ )
Zone di risalita preferenziale a media permeabilità	– $K_x = 4,63 \cdot 10^{-5}$ m/s ( $K_x=K_y \neq K_z$ )
Coperture superficiali	– $K_x = 8,10 \cdot 10^{-6}$ m/s ( $K_x=K_y=K_z$ )
Travertini	– $K_x = 8,32 \cdot 10^{-4}$ m/s ( $K_x \neq K_y=K_z$ )

Travertini ad altissima permeabilità

$$- K_x = 2,63 \cdot 10^{-1} \text{ m/s } (K_x = K_y \neq K_z)$$

Come si può notare le conducibilità idrauliche oltre ad essere aumentate da 5 ad 8, sono anche molto cambiate nel loro valore e alcune presentano internamente anisotropie verticali e orizzontali. Come presumibile, le zone che presentano un'anisotropia verticale, sono quasi tutte quelle che contribuiscono all'alimentazione del sistema superficiale verticalmente, mentre per quel che riguarda i "Travertini ad altissima permeabilità", rappresentando zone in cui delle fratture beanti

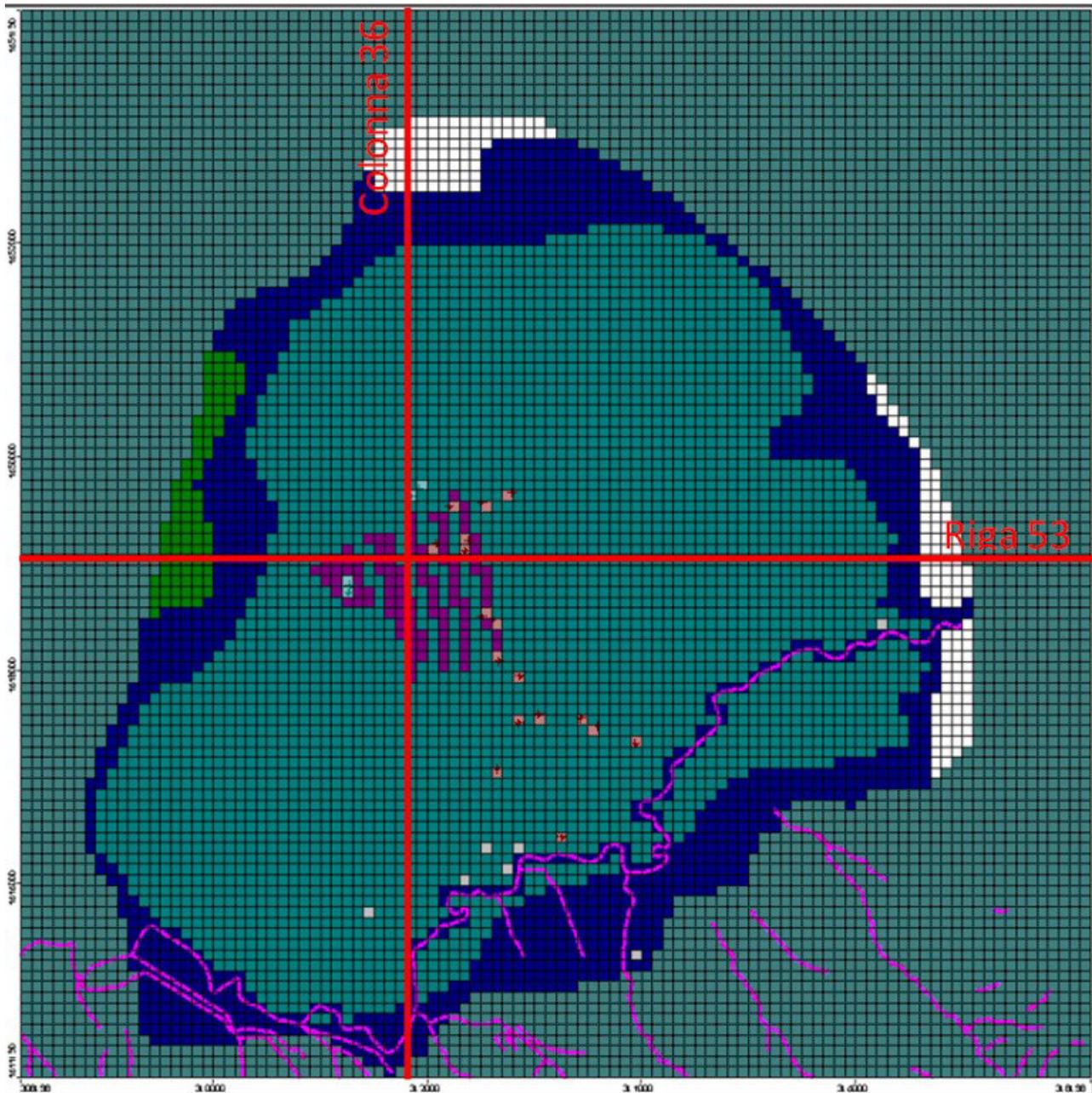


Figura 47 Layer 1 con la distribuzione delle conducibilità idrauliche e le condizioni al contorno. Lungo l'andamento del Fiume Aniene le celle di colore blu indicano il RiverPackage, quelle grigie il Drain Package e i punti rossi le pompe da dewatering rappresentate con il Well Package.

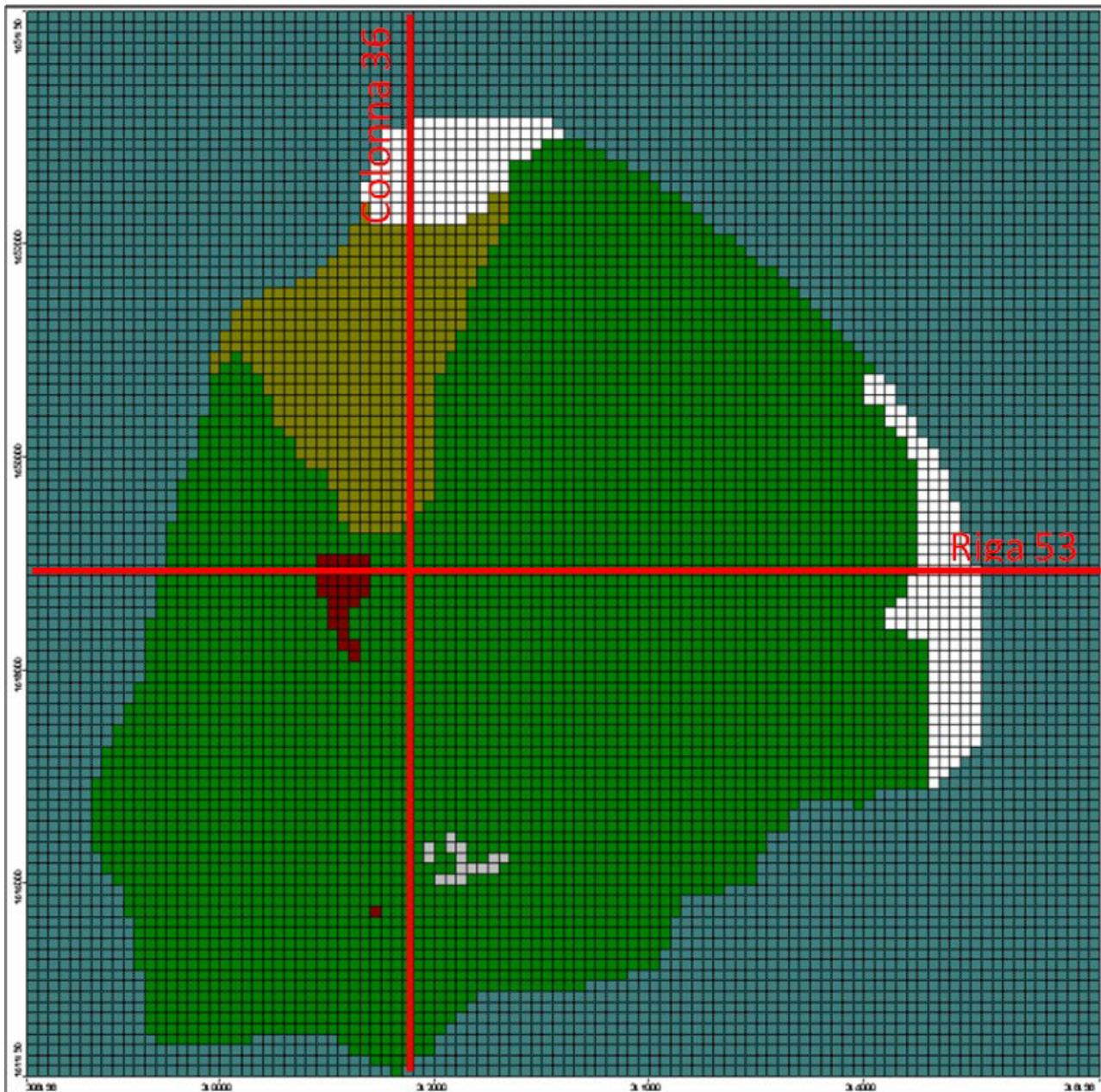


Figura 48 *Layer 2* con la distribuzione delle conducibilità idrauliche

attraversano verticalmente il travertino, la loro anisotropia verticale è parte integrante della loro stessa descrizione fisica.

L'anisotropia orizzontale dei "Travertini" invece è da ricercare nella fratturazione, che avendo un andamento prevalente circa Nord/Sud (Faccenna, et al., 1994) (vedi par. 1.5.4) e un'immersione quasi verticale, favorisce il flusso delle acque sia verticalmente che in direzione meridiana, mentre il flusso in direzione Est-Ovest è più lento. Questo si traduce nel modello in una  $K$  per i travertini maggiore verticalmente e lungo le colonne, e minore lungo le righe.

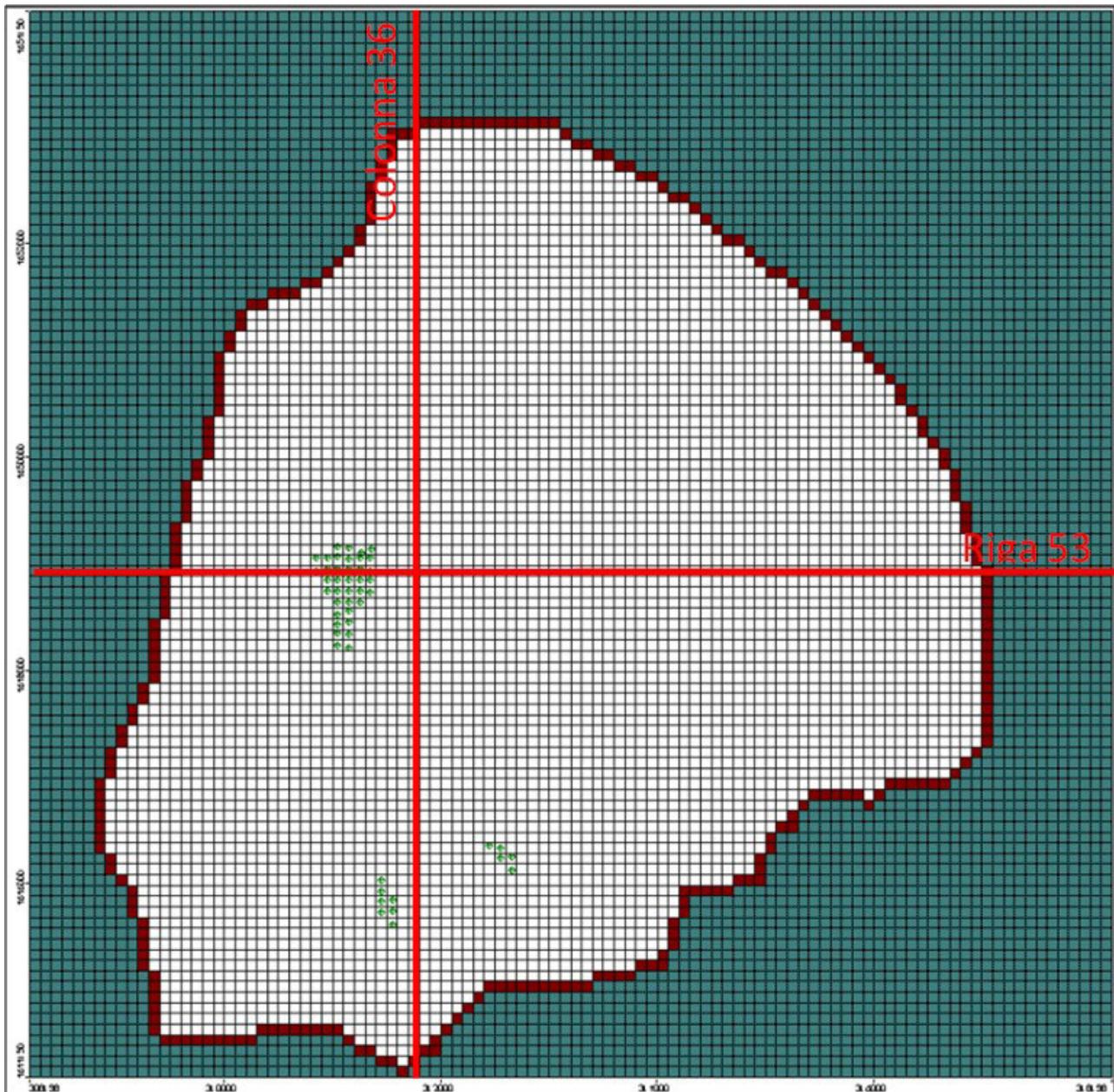


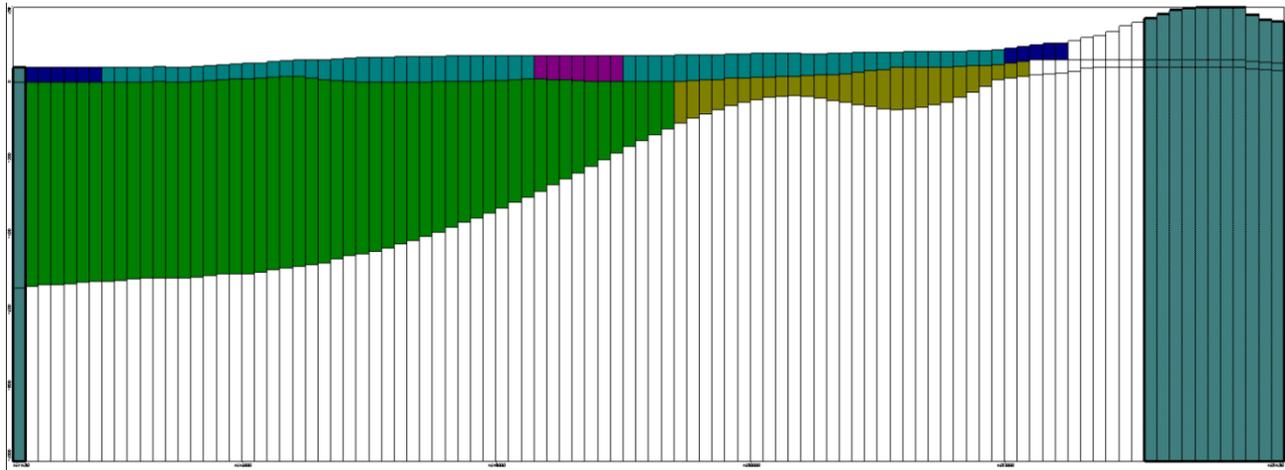
Figura 49 Layer 3 con la distribuzione delle conducibilità idrauliche (per questo strato tutte le celle rappresentano il bedrock carbonatico) e le condizioni al contorno. Sul bordo del dominio attivo di questo strato è applicato un carico costante (constant head) di 80 metri, e sono collocate delle particelle per simulare il percorso delle acque profonde

L'espedito numerico evita di complicare il modello simulando la reale collocazione delle fratture, e costituisce il cosiddetto "approccio al mezzo poroso equivalente" (vedi par. 3.1.3) (Anderson, 1992), poiché il codice di calcolo Modflow è studiato per simulare mezzi caratterizzati da permeabilità primaria, mentre in questo caso la permeabilità è spiccatamente secondaria.

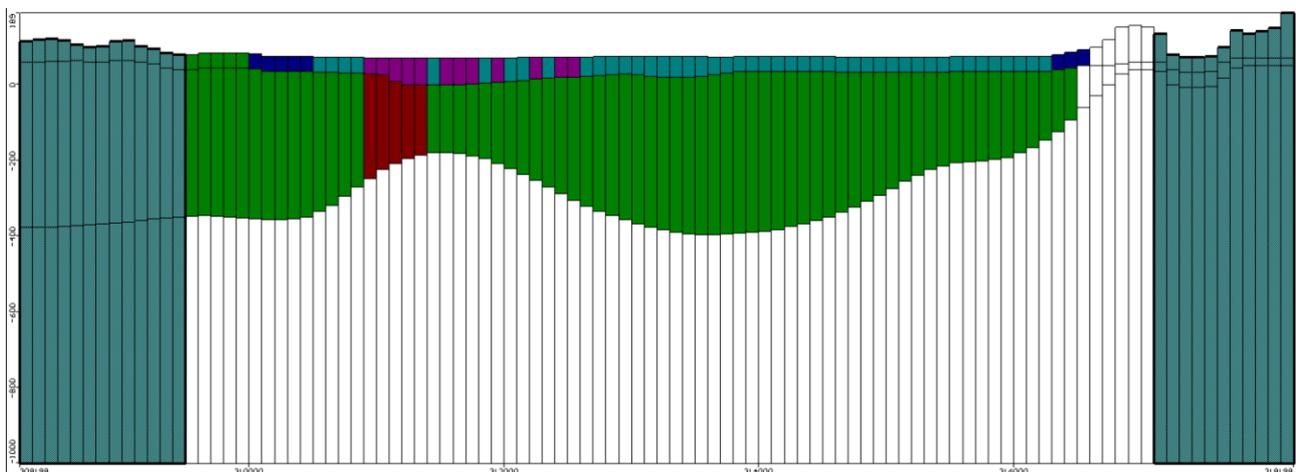
Nelle figure vengono mostrati i tre strati con la distribuzione delle conducibilità idrauliche e la tabella riassuntiva dei valori nelle tre dimensioni.

*Layer 1* – Nel primo strato (Fig.47) si riproduce la geologia di superficie, dai carbonati (in bianco) affioranti sui lembi attivi dei rilievi dei Cornicolani e dei Lucretili, alle coperture recenti (in blu) e ai travertini (in celeste). In fucsia si evidenziano le aree a più alta permeabilità del travertino, mentre ad Ovest emerge un piccolo lembo di sedimenti argilloso-sabbiosi (in verde).

*Layer 2* – Nel secondo strato (Fig.48) predomina il colore verde delle celle a bassa permeabilità dei sedimenti argilloso-sabbiosi che oltre ad essere attraversati dai carbonati a Nord e ad Est, si interrompono in corrispondenza del settore Nord-Occidentale dell'area identificando i sedimenti grossolani in matrice argillo-sabbiosa (colore senape) che rappresentano i detriti sepolti provenienti dai Cornicolani (Fig.50). Vi sono poi delle zone molto ristrette in colore rosso scuro e grigio che rappresentano rispettivamente le zone di risalita preferenziale ad alta e media permeabilità attraverso cui le acque idrotermali risalgono nel sistema superficiale (Fig.51).



**Figura 50** Colonna 36 – La continuità idraulica verticale è consentita associando anche a strati diversi le stesse  $k$  per meglio rappresentare il sistema naturale. Questa sezione va dalle pendici dei Monti Cornicolani alla piana



**Figura 51** Riga 53 - Questa sezione va dalle pendici dei Monti Lucretili alla piana passando per l'area del Lago della Regina

*Layer 3* – Nel terzo strato (Fig.49) sono rappresentati solo i carbonati.

Zone	Geology	hk x (m/s)	hk y (m/s)	hk z (m/s)
zone1	Carbonates	4.87E-02	4.87E-02	4.87E-02
zone2	Sediments	8.10E-06	8.10E-06	8.10E-06
zone3	clays	2.10E-15	2.10E-15	2.10E-15
zone4	travertine	8.32E-04	1.27E-03	1.27E-03
zone5	Faults	2.31E-04	2.31E-04	2.31E-04
zone6	Travert. High	2.63E-01	2.63E-01	1.01E-04
zone7	Clay High	1.16E-05	1.16E-05	5.67E-06
zone8	Faults low	4.63E-05	4.63E-05	6.94E-05

Tabella 5 Distribuzione di conducibilità idraulica nel modello

### 4.3 Ricarica, sorgenti e prelievi

*Recharge package* - E' stata applicata la ricarica (Fig.52) secondo 3 classi principali che sono 435 mm/anno relativamente all'area della piana (colore bianco), 600 mm/anno sul lembo dei Monti Cornicolani (colore blu) e 900 mm/anno sul lembo dei monti Lucretili.

Con tutti gli altri colori vengono visualizzate celle in cui una "ricarica negativa" simula l'uscita dal sistema delle acque pompate da pozzi, i cui dati sono stati estratti dall'archivio concessioni acque sotterranee della Regione Lazio.

*Well package* – Le celle *well* sono state utilizzate per simulare i flussi in uscita dal sistema dovuti al *dewatering* dell'attività estrattiva; ogni cella definita riporta il valore misurato durante la campagna di rilevamento. Le celle *well* sono in tutto 17. Con lo stesso pacchetto sono stati rappresentati due pozzi da 250 l/s ciascuno, realizzati recentemente dalla Regione Lazio per alimentare il Lago della Regina nei periodi di maggiore necessità.

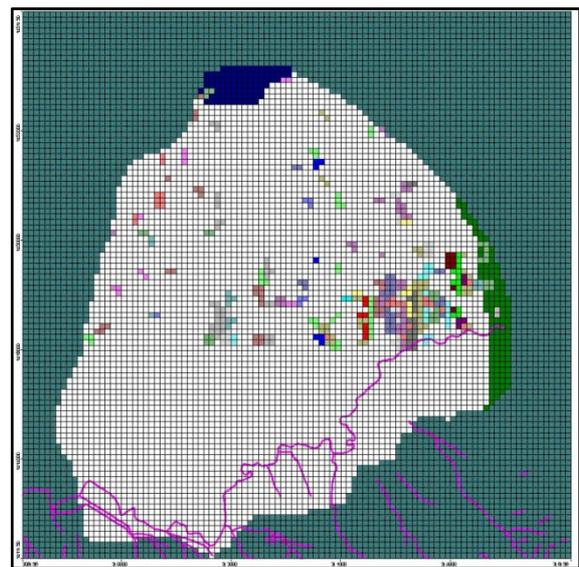


Figura 52 Rappresentazione delle 3 zone di ricarica (bianco, verde e blu) e delle celle con valore di ricarica negativa (altri colori) per simulare i prelievi delle concessioni non industriali

### 4.4 Condizioni iniziali ed al contorno

Le condizioni iniziali (relative solo ai carichi - *initial heads*) sono state inserite facendo produrre al primo modello elementare una piezometria "indisturbata" che prevedesse come punti fissi il carico dell'Aniene, la ricarica dal fondo dei Travertini e la ricarica zenitale.

Le condizioni al contorno vengono descritte di seguito secondo come sono stati applicati i singoli *packages* su ogni *layer*.

*Layer 1* (Fig.47) – Oltre al limite a flusso nullo sul bordo del dominio attivo è stato assegnato:

- *River package* – Il Fiume Aniene è stato simulato con 141 celle *river*. Il fondo d'alveo e il livello idrometrico (*river bottom, river stage*) sono stati reperiti dalle sezioni e dai dati del servizio idrografico della Regione Lazio.
- *Drain package* – Le sorgenti idrotermali minori e quella dell'Acquoria sono state simulate con celle *dreno*.

*Layer 2* – Il secondo strato non presenta particolari condizioni al contorno se non il solo limite a flusso nullo sul bordo del dominio attivo.

*Layer 3* – Oltre al limite a flusso nullo sul bordo del dominio attivo è stato assegnato:

- *Constant head* – è stato applicato un carico costante di 80 metri sulle celle del bordo del dominio attivo. Questo per simulare i carichi all'interno del circuito carbonatico (caratterizzati da gradienti molto bassi) che risultano essere più alti della maggior parte delle quote topografiche superficiali.

#### 4.5 Selezione dei punti di calibrazione e loro scopo

Le osservazioni inserite nel modello (Fig.53) su cui viene effettuata la calibrazione corrispondono a 13 punti relativi ai carichi (*head observations*) tra cui sono state considerate le sonde della rete di monitoraggio e alcuni punti relativi al rilevamento idrogeologico. Per quello che riguarda i flussi sono stati presi in considerazione i valori corrispondenti alle portate misurate durante la campagna di rilevamento nelle 5 sorgenti inserite nel reticolo come celle *dreno* (*drain observations*). Quasi tutte le osservazioni fanno parte del primo *layer*, e la loro distribuzione ricade sia a ridosso dell'area estrattiva sia in alcune porzioni marginali del

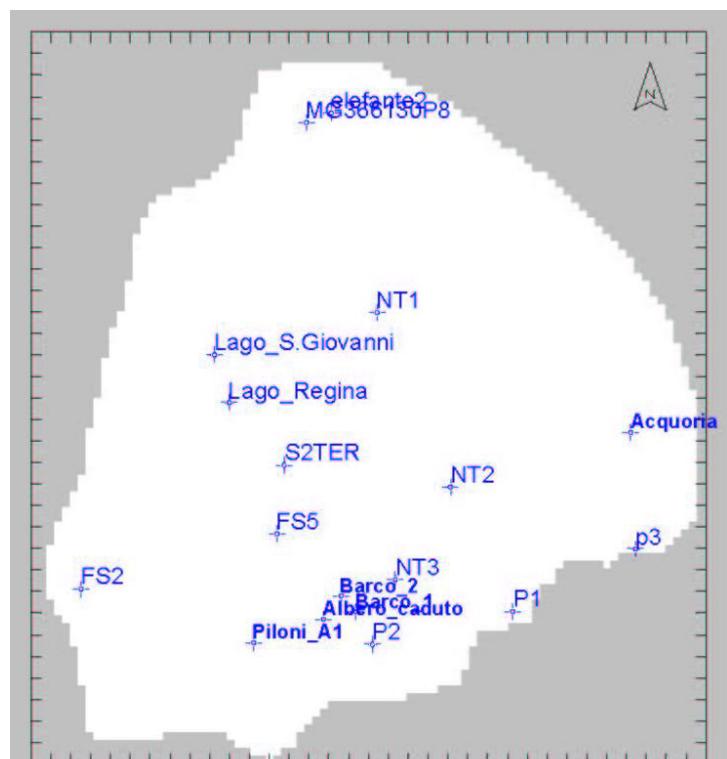


Figura 53 Distribuzione delle osservazioni nel modello. I nomi più scuri indicano le osservazioni di flusso (*drain obs*) mentre le altre sono relative ai carichi (*head obs*)

dominio.

Poiché le misure di flusso delle sorgenti e del dewatering sono state effettuate in una finestra temporale breve ma non istantanea, i valori di carico delle sonde fisse sono stati considerati come quelli relativi al valore medio registrato nella finestra temporale in cui sono state eseguite le misure di flusso.

#### ***4.6 Parametri numerici del risolutore***

Il risolutore utilizzato è il PCG2 secondo i seguenti parametri numerici:

MXITER – 800,

ITER1 – 100,

HCLOSE – 0.01,

RCLOSE – 0.01,

Damp Factor – 1,

IPRPCG – 10,

NPCOND – Cholesky.



## 5 CALIBRAZIONE

Il processo di calibrazione è iniziato dapprima in maniera automatica eseguendo il codice UCODE-2005 fino al raggiungimento di risultati abbastanza soddisfacenti. Successivamente con metodologia *trial & error* si è intervenuti direttamente su alcuni parametri per raggiungere risultati ancora migliori.

Il processo si basa sul confronto dei dati osservati con quelli simulati.

### 5.1 *Analisi quantitativa e qualitativa*

Il processo di calibrazione si è incentrato prevalentemente sull'analisi quantitativa per mezzo del confronto dei dati osservati e simulati attraverso un processo di analisi di sensitività. Dal punto di vista qualitativo generale, è stato controllato che lo schema di circolazione noto venisse riprodotto adeguatamente dal modello, proiettando un campo di moto simile a quello rilevato.

### 5.2 *Analisi di sensitività e processo di calibrazione*

L'analisi di sensitività, che permette di individuare l'importanza di determinate osservazioni di un modello, come detto precedentemente, è stata effettuata tramite UCODE-2005 che produce una serie di file analizzabili graficamente.

Le sensitività vengono definite come le derivate prime dei valori simulati su quelli osservati rispetto ai singoli parametri;

$$\left( \frac{\partial y'_i}{\partial b_j} \right) \Big|_b$$

dove,  $y'_i$  rappresenta un valore simulato che corrisponde ad un'osservazione  $i$ esima o ad un'informazione prioritaria,

$b_j$  rappresenta il  $j$ esimo parametro,

e la notazione indica che le sensitività sono calcolate per i valori dei parametri presenti nel vettore  $b$ .

Generalmente è utile comparare le relative importanze di differenti osservazioni. Un problema che si incontra facendo questa comparazione usando le sensitività è che queste sono nelle unità di misura dei valori simulati divise per le unità di misura dei parametri, che possono variare in modo considerevole. Per esempio, per i modelli di acque sotterranee, i valori simulati possono essere in metri per le misure dei carichi, in metri cubi al giorno per le misure dei flussi e in milligrammi al litro per le misure di concentrazione; i parametri possono essere in metri al giorno per le

conducibilità idrauliche e in millimetri all'anno per la ricarica. La soluzione per poter comparare queste informazioni è quella di scalare le sensitività per ottenere quantità confrontabili. Questo processo in UCODE-2005 produce le cosiddette *dimensionless scaled sensitivities (dss)* che vengono accumulate per ogni parametro per produrre le *composite scaled sensitivities (css)*.

Le *dimensionless scaled sensitivities* possono essere usate in due modi;

- in primo luogo possono essere usate per confrontare l'importanza di differenti osservazioni per la stima di un singolo parametro, ossia osservazioni con grandi valori di *dss* forniranno più informazioni per la stima di un dato parametro rispetto alle osservazioni con valori di *dss* più piccoli.
- In secondo luogo possono essere usate per confrontare l'importanza di differenti parametri nel simulare un dato valore

Le *composite scaled sensitivities* riflettono invece l'ammontare totale delle informazioni desunte dalle osservazioni per la stima di un singolo parametro. Forniscono informazioni circa i parametri singoli, ma non possono essere usate per valutare i casi in cui un set di osservazioni è in grado di stimare ogni parametro in maniera univoca.

Per il modello della Acque Albule il processo di analisi di sensitività è stato condotto su due set di dati.

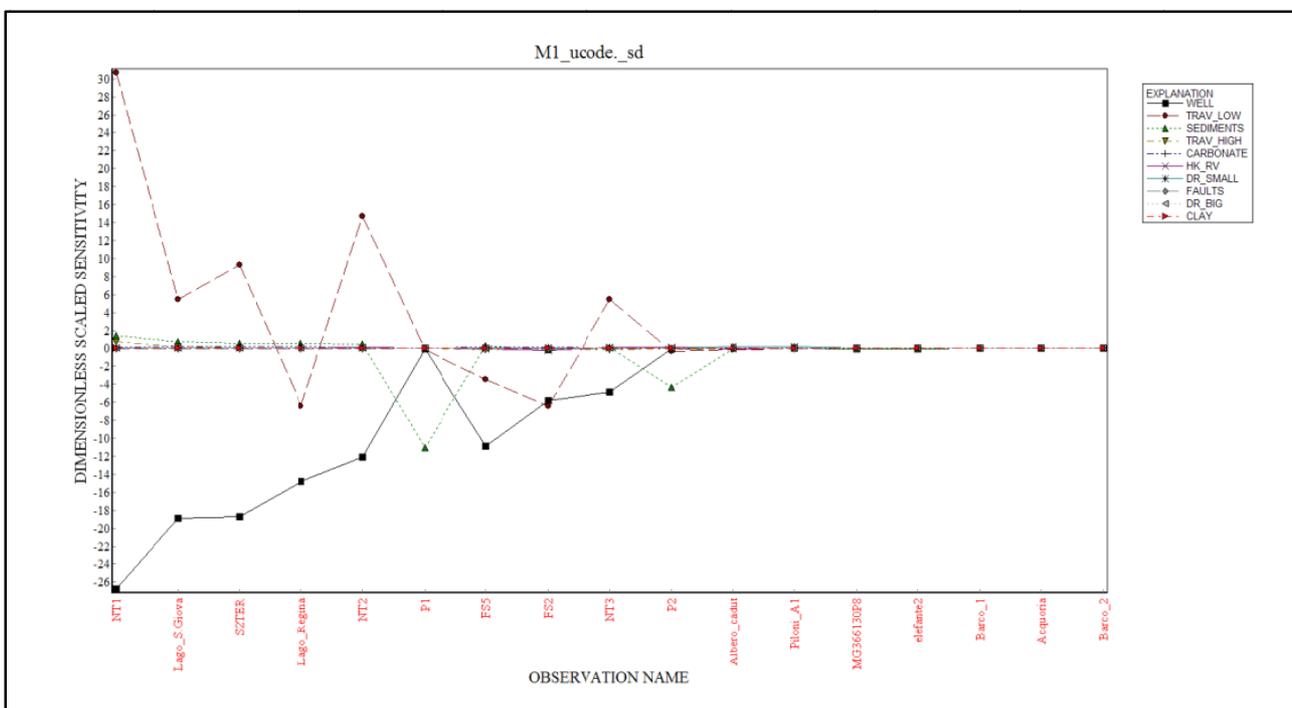


Figura 54 Dimensionless scaled sensitivities (dss) del modello "primordiale". I parametri che influenzano di più le osservazioni sono il parametro WELL, TRAV\_LOW e SEDIMENTS

Il primo set riguardava il modello “primordiale”, molto semplice, in cui i parametri in gioco erano solo 10.

Come è possibile notare dal grafico (Fig.54) delle *dss* rispetto alle osservazioni, le perturbazioni indotte dal processo di analisi di sensitività, producono notevoli variazioni nei risultati rispetto ai parametri *WELL*, *TRAV-LOW* e *SEDIMENTS* che rappresentano rispettivamente i pompaggi da *dewatering*, la *k* dei travertini e delle coperture recenti.

Il grafico delle *css* (Fig.55) mostra ancora più chiaramente che il parametro che influenza di più il *fitting* del modello è il parametro *WELL*, seguito anche qui da *TRAV-LOW* e *SEDIMENTS*, mentre i parametri *TRAV-HIGH* (*k* dei travertini ad altissima permeabilità), *CARBONATE* (*k* dei carbonati), *HK-RV* (conduttanza dei dreni), *DRAIN-SMALL* (portata nei dreni minori), *FAULTS* (*k* delle zone

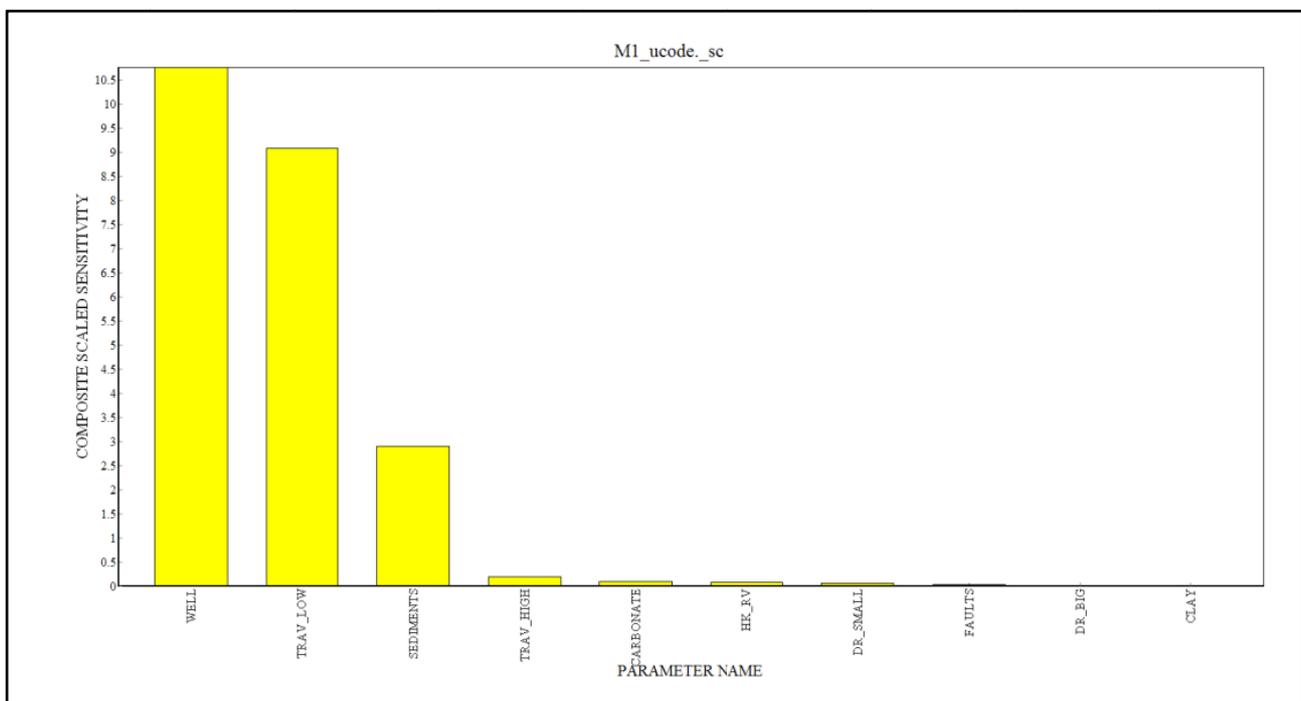


Figura 55 Composite scaled sensitivities (*css*) del modello “primordiale”. Il parametro più sensitivo risulta essere il pompaggio da *dewatering* (*WELL*)

di risalita preferenziale), *DRAIN-BIG* (portata de dreni maggiori) e *CLAY* (*k* dei sedimenti argillo-sabbiosi impermeabili) presentano sensitività molto più basse o sono addirittura insensitivi.

In base a questi risultati si è scelto di intervenire prima ancora che nel modello nella ridefinizione tramite misura diretta (vedi paragrafo 2.5.1) dei quantitativi emunti dal *dewatering* e di tutti i flussi delle sorgenti minori della zona (*drain*).

Successivamente in base a questa ridefinizione dei dati è stato possibile iniziare il processo di calibrazione.

Come detto precedentemente il codice di calcolo UCODE\_2005 è stato utilizzato per calibrare il modello facendolo evolvere dalla versione “primordiale” molto semplice fino a quella attuale più complessa.

In base all'analisi di sensitività condotta sono stati stimati i parametri più sensitivi mentre alcuni, come il pompaggio da *dewatering* (*WELL*) sono stati rimisurati per una migliore definizione.

Il processo di calibrazione, di cui si mostra uno dei tanti grafici (Fig.56) riportante alcune iterazioni

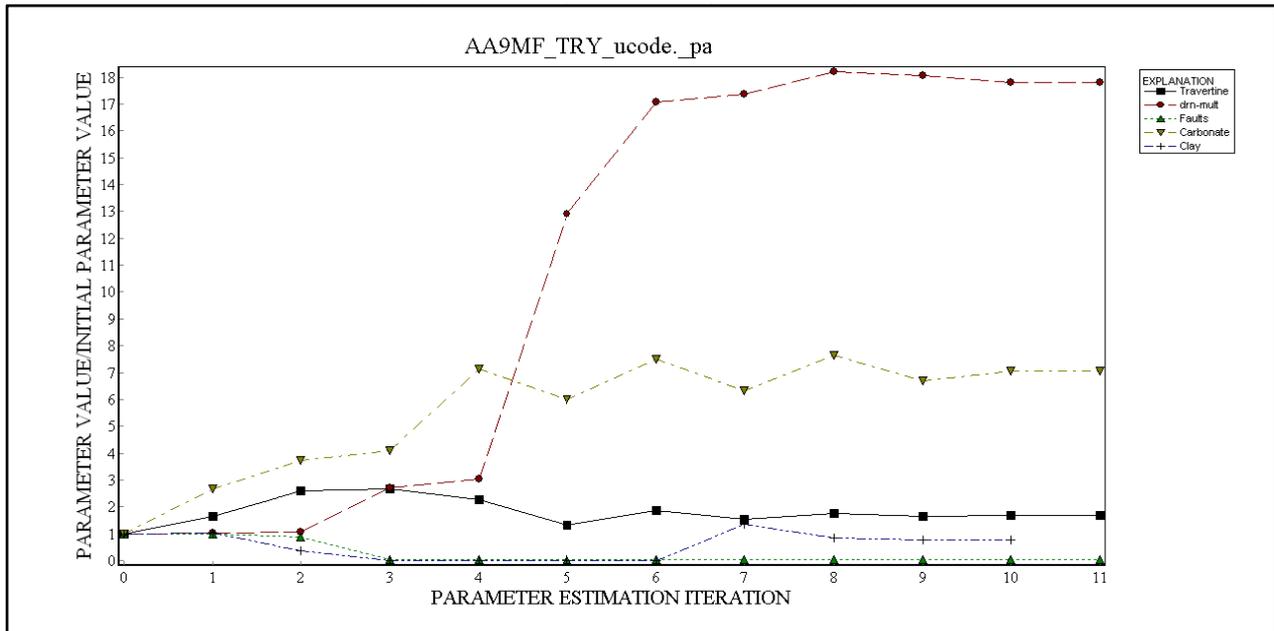


Figura 56 Grafico riportante le iterazioni eseguite da UCODE\_2005 nella stima dei parametri. I parametri coinvolti nella regressione vengono perturbati iterazione dopo iterazione per poi essere proposti come nuovi valori a seconda dello scarto che producono tra il simulato e l'osservato

e le modifiche eseguite sui singoli parametri, ha portato a definire i valori relativi alle diverse conducibilità idrauliche del sistema.

I dati ottenuti dalla calibrazione, poiché non totalmente soddisfacenti sono stati modificati con metodologia *trial & error*, ossia sono stati modificati di piccole entità vedendo come reagiva il modello ai cambiamenti.

I cambiamenti principali che sono stati apportati con questa metodologia sono relativi alla scomposizione delle conducibilità idrauliche nelle tre componenti dimensionali per mettere in luce eventuali anisotropie verticali o orizzontali e alle conduttanze delle celle dreno.

L'anisotropia orizzontale è stata applicata solo ai Travertini con un rapporto di 1,50 tra la *k* lungo le righe e quella lungo le colonne, questo per simulare nel modello l'effetto dovuto alla fratturazione che nell'area ha un andamento prevalente NNO – SSE (tab.3).

I parametri che invece presentano anisotropia verticale sono le Coperture recenti (*SEDIMENTS*) e tutte le zone a risalita preferenziale del secondo *layer*.

Le conduttanze dei dreni sono state assegnate in modo tale che dato il carico calcolato le fuoriuscite dal sistema fossero simili a quelle misurate.

Da una nuova analisi di sensitività condotta su tutti i parametri (Fig.57) che partecipano al modello attuale si può notare come dai 10 parametri iniziali si sia passati a più di 30 e come le sensitività siano cambiate.

### 5.3 Verifica dell'applicazione del modello

Il modello presenta un *fitting* molto positivo (Fig.58 e Tab.6) e come si può vedere dal grafico dei valori osservati su quelli simulati, gli scarti sono davvero molto bassi se si considera la scala di applicazione e la grandezza delle celle.

La verifica del modello prevede che, modificando il set di dati osservati e le relative condizioni al contorno, il modello continui ad avere un buon *fitting*. Questo non è stato possibile osservare poiché, sebbene dal punto di vista piezometrico si hanno misure in continuo su almeno 7 punti, per quello che riguarda i flussi del pompaggio non si è nella stessa condizione e per altri periodi fuori da quello delle misure eseguite si possono solo fare delle ipotesi. Nelle simulazioni del modello lo scenario 4 potrebbe rappresentare una situazione di questo tipo.

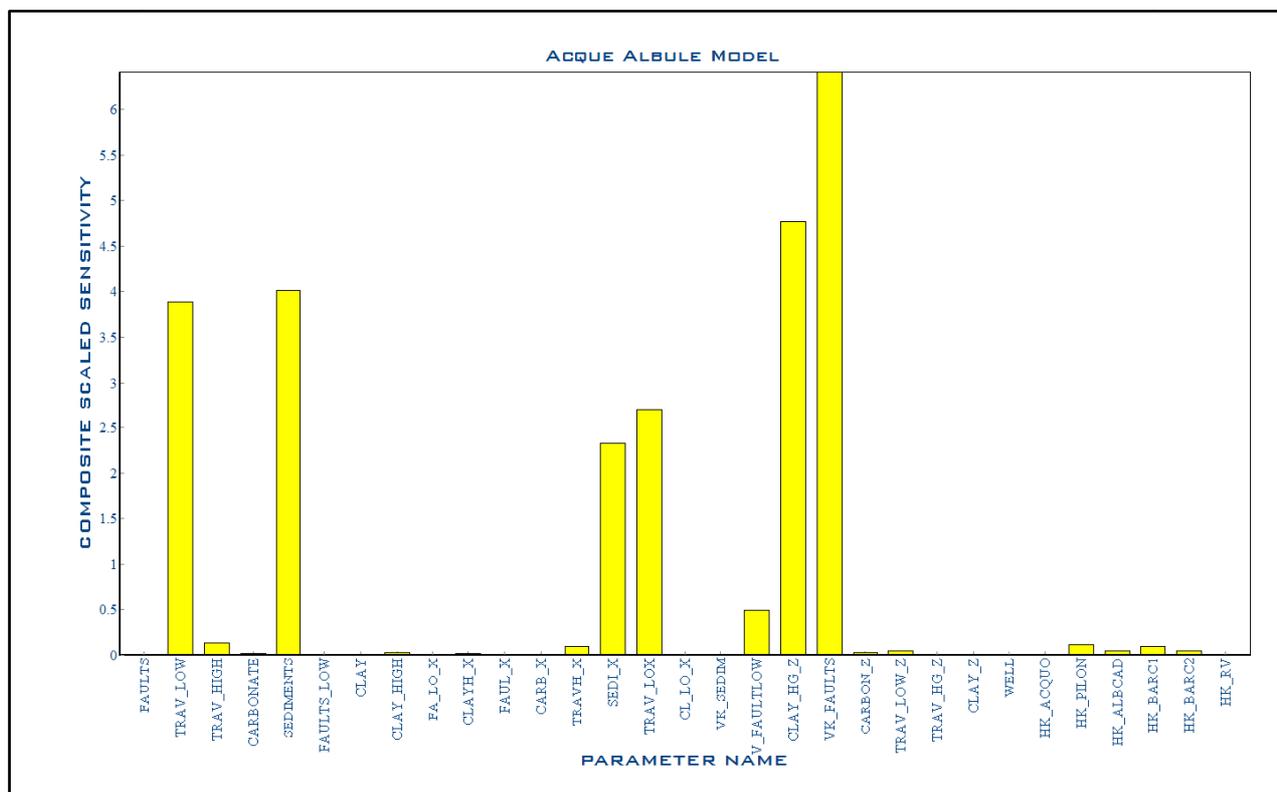


Figura 57 Composite scaled sensitivities del modello calibrato

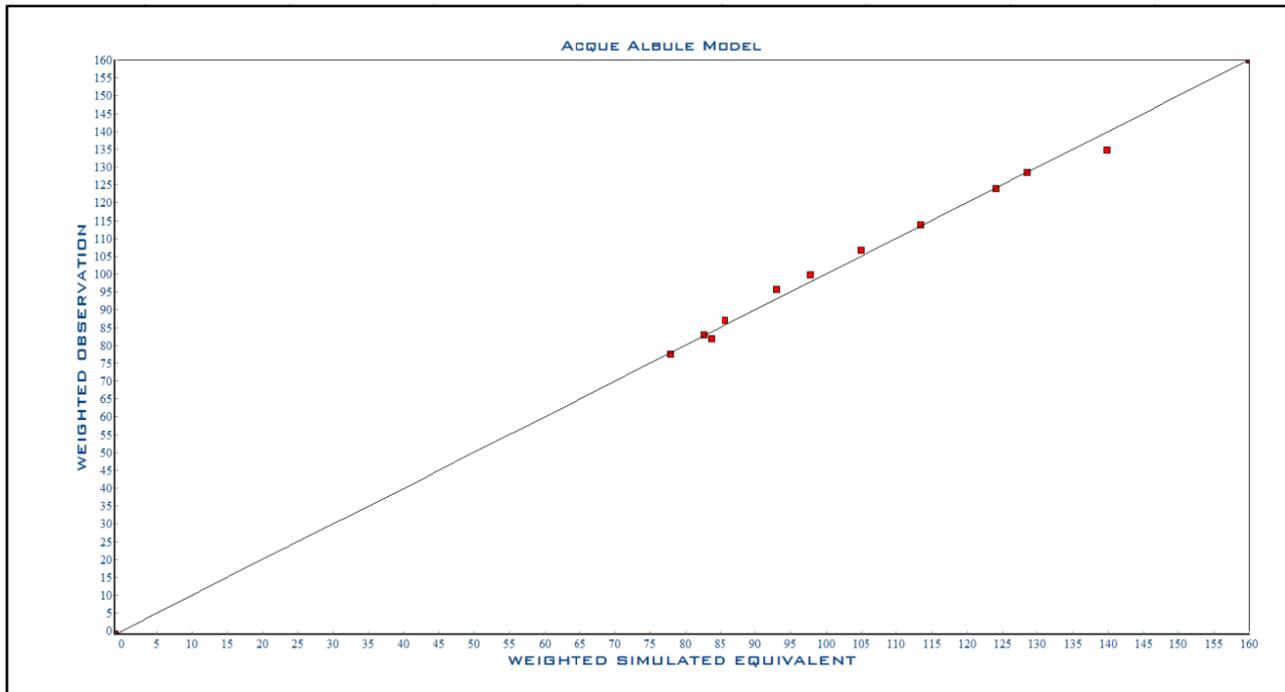


Figura 58 Fitting dei carichi del modello calibrato. I valori si allineano lungo una retta

HEAD OBSERVATIONS			
OBSERVATION NAME	OBSERVED VALUE	SIMULATED VALUE	DIFFERENCE (m)
elefante2	80	79.9977	0.002
MG366130P8	80	79.9972	0.003
NT1	53.3	52.4393	0.861
S2TER	56.9	56.7237	0.176
Lago_S.Giova	64.2	64.2815	-0.082
Lago_Regina	62	61.9833	0.017
FS5	49.9	48.8844	1.016
NT2	40.9	41.8523	-0.952
NT3	38.75	38.9439	-0.194
FS2	41.5	41.3033	0.197
P2	43.5	42.8463	0.654
P1	47.84	46.5185	1.322
P3	67.4	69.8782	-2.478

DRAIN FLOW OBSERVATIONS			
OBSERVATION NAME	OBSERVED VALUE	SIMULATED VALUE	DIFFERENCE (m <sup>3</sup> /day) - (l/s)
Acquoria	-86400	-86403	3.000   0.035
Barco_2	-4924.8	-4932.75	7.945   0.092
Barco_1	-4320	-4321.44	1.435   0.017
Albero_cadut	-5011.2	-5018.65	7.445   0.086
Piloni_A1	-4924.8	-4921.74	-3.063   -0.035

Tabella 6 Differenze tra i dati osservati e quelli simulati dal Modello delle Acque Albule

## 6 SIMULAZIONI

Vengono di seguito proposti e descritti diversi scenari per simulare diverse condizioni naturali e indotte dalla pressione antropica sul sistema. Le stesse simulazioni, in figure più grandi vengono riprodotte in appendice nei Model Simulation Logs.

### 6.1 Scenario 1 di riferimento (di taratura)

Il primo scenario è la “fotografia” che si potrebbe definire attuale del sistema, relativa al periodo in cui sono state effettuate tutte le misure dirette degli emungimenti da dewatering e dei flussi nelle sorgenti oltre che la campagna di rilevamento piezometrico.

In base a queste misure è avvenuta la calibrazione del modello che riproduce abbastanza fedelmente la piezometria rilevata (Fig.60).

L'output mostra chiaramente (Fig.59) la forte depressione indotta dal *dewatering* così come l'alto piezometrico in corrispondenza delle sorgenti termali dei Laghi Regina e Colonnelle.

Il campo di moto mostra come le linee principali di deflusso partano sia nelle zone del debole travaso laterale dai Cornicolani e dai Lucretili, ma soprattutto dall'alto piezometrico delle sorgenti termali, per dirigersi o verso la grande depressione piezometrica da emungimento o verso l'Aniene.

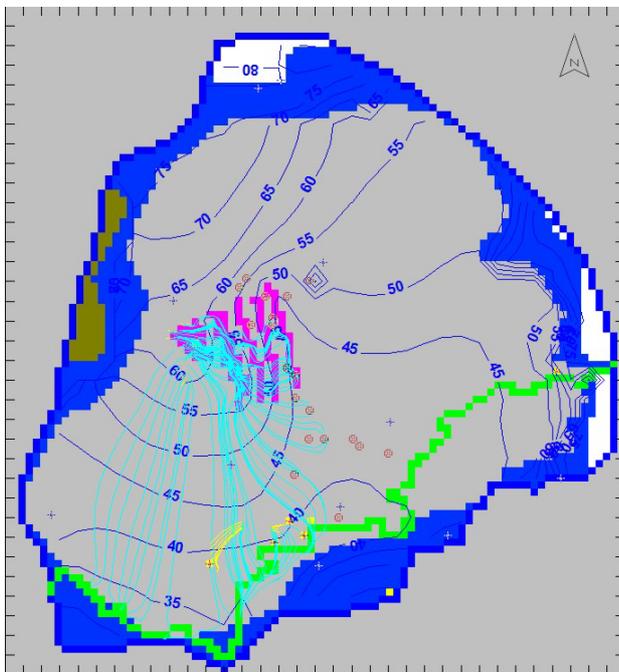


Figura 59 Piezometria dello scenario 1

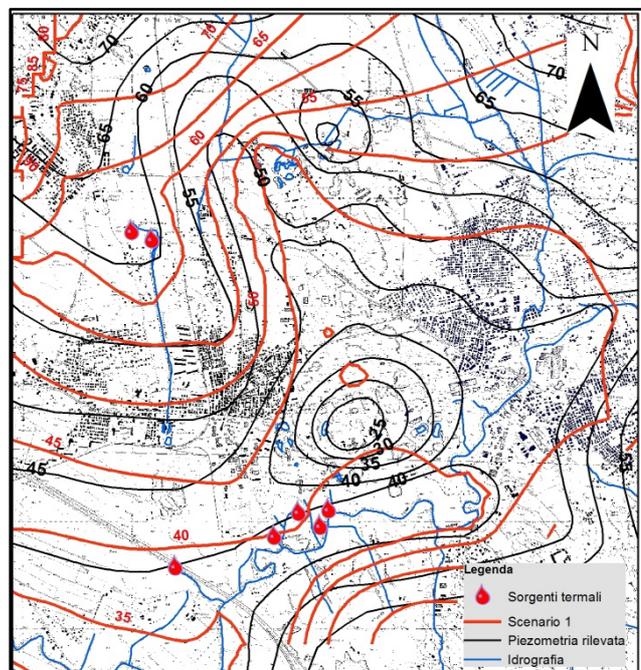


Figura 60 Sovrapposizione piezometria rilevata (in nero) e piezometria calcolata (in rosso)

## 6.2 Scenario2 (scenario indisturbato)

Nel secondo scenario si è voluto simulare una situazione senza stress antropici.

Sono stati quindi spenti i pompaggi del dewatering e tutte le celle a ricarica negativa sono state uguagliate alla ricarica positiva della zona in cui ricadono.

L'output mostra una piezometria con gradienti meno accentuati (Fig.61) e l'alto piezometrico permane nella zona dei laghi termali, ma si estende di molto.

Questa conformazione del campo di moto, rappresenta una situazione pre-antropizzazione o comunque una situazione del tutto naturale. Non ci sono, relativamente a quest'area, piezometrie così antiche da non presentare gli effetti di alcun prelievo, tuttavia il risultato del modello si può confrontare con una carta delle isofreatiche della Provincia di Roma relativa a rilievi degli anni '70 (Fig.62). Sebbene lo sfruttamento delle risorse idriche fosse già in atto all'epoca la piezometria mostra come questo fosse ancora molto limitato e circoscritto al settore orientale del bacino. Dal confronto si nota come sia molto evidente la corrispondenza tra l'alto piezometrico della simulazione e quello della carta oltre che la corrispondenza di alcune isofreatiche.

Altre riflessioni possono essere fatte sulle differenze che ci sono tra i dati osservati oggi e quelli simulati in questo scenario relativamente ai punti di osservazione. Il Lago della Regina in questa simulazione risale di circa 6 metri rispetto alla posizione attuale, quasi fino al piano campagna e la cella dreno posizionata in sua corrispondenza per simulare il canale emissario, oggi non più attivo, emette circa 800 litri al secondo.

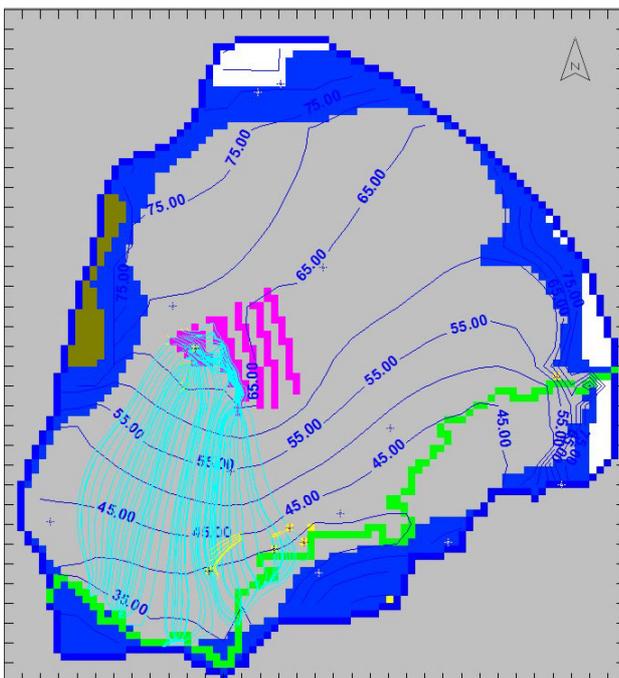


Figura 61 Piezometria dello scenario 2. Senza stress indotti da alcun pompaggio industriale e domestico

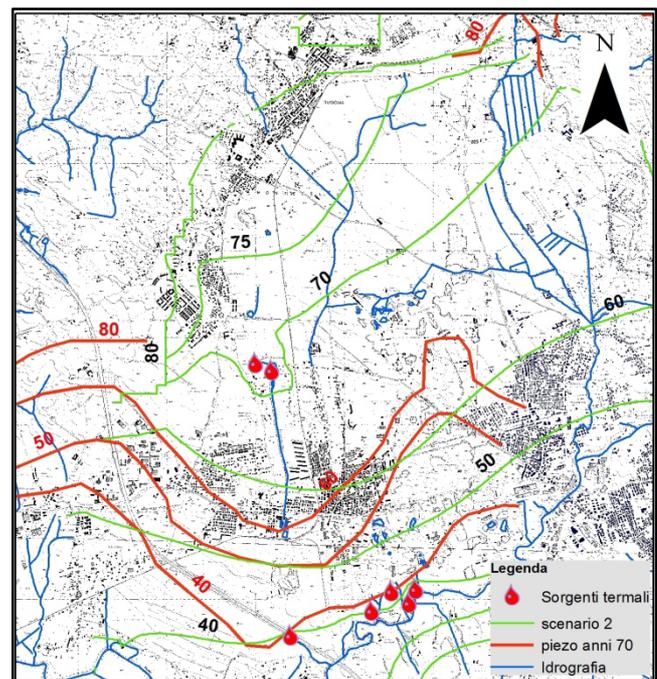


Figura 62 Sovrapposizione Piezometria ACEA relativa agli anni '70 (in rosso) e simulazione scenario 2 (in verde)

### 6.3 Scenario3 (forte siccità)

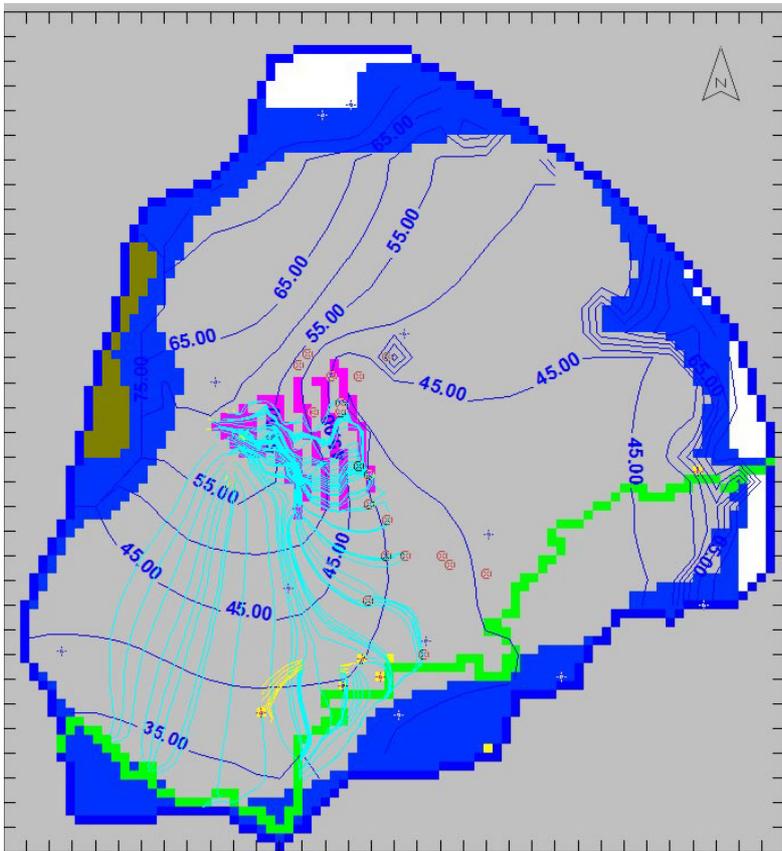


Figura 63 Piezometria relativa al quarto scenario, in cui si simula una condizione di estrema siccità del tutto simile a quella verificatasi nel 2000

In questo scenario si è voluto simulare una condizione molto critica, in cui pur rimanendo le stesse condizioni di prelievo, viene drasticamente ridotta la ricarica (di circa il 70%).

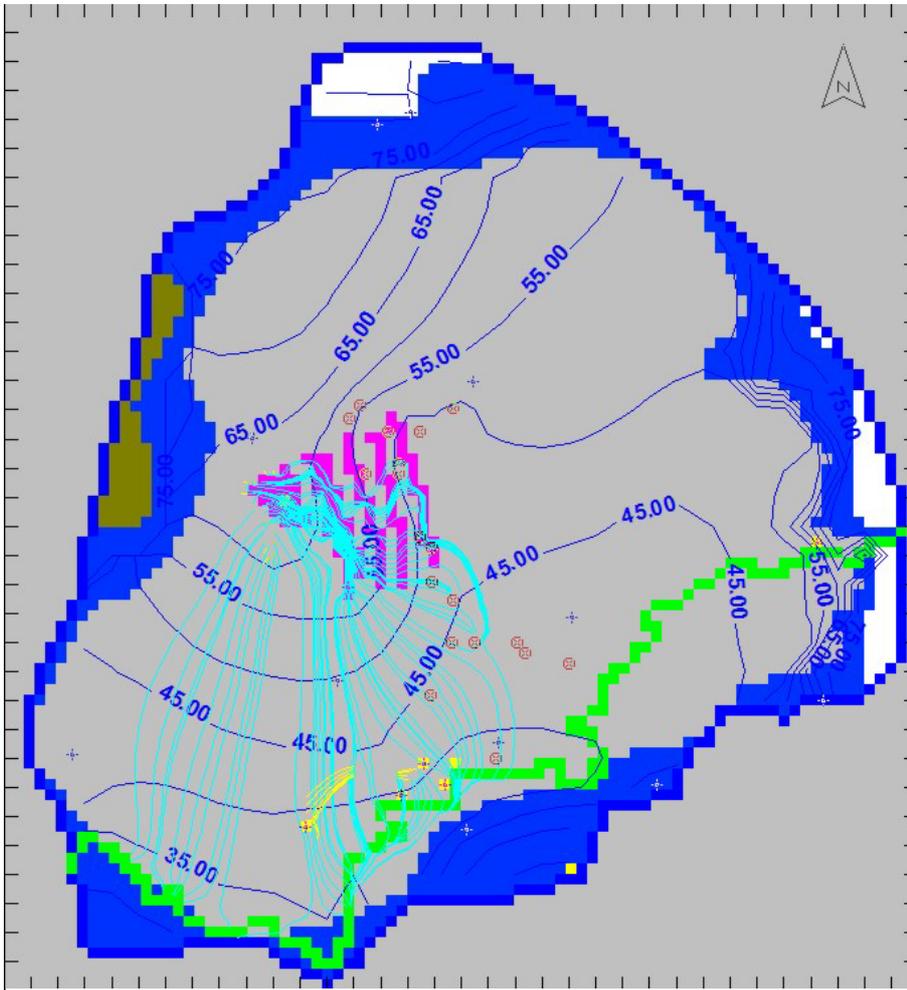
Questa condizione potrebbe essere simile a quella verificatasi nel 2000 in cui vi fu un brusco calo di precipitazioni, e un conseguente abbassamento dei livelli saturi, sia nel circuito carbonatico che in quello superficiale.

Poiché la ricarica zenitale inserita nel modello non riproduce i reali quantitativi di ricarica che concorrono alla saturazione del sistema carbonatico lucretile e

cornicolano (ben più ampio dei piccoli lembi del dominio attivo nel modello), per riprodurre questa condizione viene modificato assieme al valore di ricarica anche quello relativo al carico costante impostato sul terzo layer. Le diminuzioni di livello registrate in quegli anni nelle cavità carsiche (Pozzo del Merro) furono di circa 3-4 metri, di conseguenza il *constant head* da 80 metri viene portato a 76, mentre la ricarica zenitale sulla piana da 435 mm/anno viene abbassata a circa 120 mm/anno (vedi paragrafo 1.5.2).

Il modello produce una situazione in cui chiaramente vi sono abbassamenti più marcati (Fig.63). Il livello prossimo al Lago della Regina si abbassa di più di 2 metri (come in corrispondenza della siccità del 2000) così come quello in prossimità del Lago S.Giovanni. Tutte le altre osservazioni rispetto allo scenario di taratura mostrano un abbassamento.

#### 6.4 Scenario4 (estate)



Nel periodo estivo (mese di agosto), solitamente, le attività estrattive diminuiscono l'entità del *dewatering* senza interromperla, per risparmiare energia e per un rapido svuotamento dei bacini alla ripresa delle attività.

Questo processo non è sempre attuato e soprattutto non è attuato da tutti e nello stesso momento. C'è infatti chi interrompe totalmente i pompaggi e chi non varia di nulla le quantità, ma quello che si è notato su

Figura 64 Piezometria calcolata per lo scenario 4, con pompaggi da *dewatering* ridotti del 30%

alcuni dei fori sotto monitoraggio mostra che durante il mese di agosto si ha un innalzamento della piezometria anche di un metro (vedi grafici paragrafo 2.5.1).

Poiché non è possibile conoscere questo dato con assoluta certezza si è voluto simulare uno scenario ipotizzato, in cui i pompaggi sono stati diminuiti del 30% portandoli da 4300 a circa 300 l/s, mentre sono stati "accesi" i due pozzi che la Regione Lazio ha realizzato recentemente per alimentare il Lago della Regina così come un pozzo in iniezione (+500 l/s) nella cella corrispondente alla posizione del Lago e uno in prelievo (-500 l/s) (per simulare il prelievo delle terme).

L'*output* (Fig.64) mostra un generale innalzamento della piezometria e, in alcuni dei fori, l'innalzamento corrisponde abbastanza fedelmente ai valori registrati dalle sonde in estate.

Il livello prossimo al Lago della Regina, nonostante la forte diminuzione del pompaggio sale di soli 80 cm.

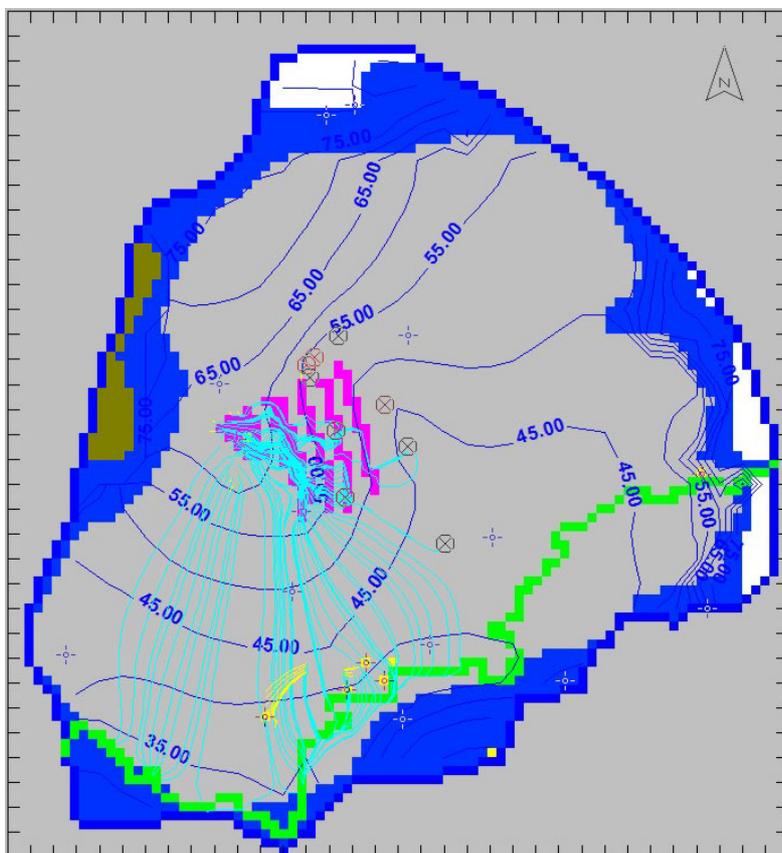
### 6.5 Scenario5 (proposta di scenario a “risparmio energetico”)

Con questo scenario si è voluto proporre un'organizzazione differente del pompaggio per determinare gli stessi abbassamenti con un consumo energetico minore. Attualmente infatti nell'area estrattiva non esiste un piano di *dewatering* concordato tra le varie aziende estrattrici, ma ogni realtà abbassa la falda acquifera secondo i propri scopi.

Questo comporta oltre che un grande dispendio energetico anche evidenti problemi di gestione; nei casi in cui aziende limitrofe cambiano il loro regime di emungimento, influenzano direttamente il livello della falda nei bacini estrattivi limitrofi.

In questa versione del modello (Fig.65) sono stati eliminati i 17 punti di prelievo rilevati e seguendo l'andamento della piezometria sono state pianificate le posizioni ideali per nuove pompe da *dewatering*. Oltre alle 7 nuove postazioni sono stati considerati nella rete di pompaggio anche i due pozzi profondi realizzati di recente dalla Regione Lazio per alimentare, con circa 250 l/s ciascuno, il Lago della Regina.

Con metodologia *trial and error* è stato modificato il regime delle singole pompe per realizzare un abbassamento più o meno corrispondente all'attuale con un minor pompaggio. Il miglior risultato



che viene mostrato ha prodotto un campo di moto e delle altezze piezometriche quasi identiche con un emungimento minore del 18% circa. Se si considera che all'interno di questo valore è compreso anche il pompaggio relativo ai due pozzi della Regione, l'emungimento totale per il solo *dewatering* risulta minore del 30% rispetto ai quantitativi attuali. Dal modello inoltre risulta che lo sviluppo del sistema di *dewatering* in questo modo innalzerebbe il livello prossimo al Lago della Regina di più di mezzo metro così come quello prossimo al Lago S. Giovanni.

Figura 65 Scenario “a risparmio energetico”, riorganizzando il *dewatering* in maniera più razionale si ottiene una piezometria simile a quella di taratura (scenario 1) pur pompando il 30 % in meno



## 7 SINTESI

### 7.1 Considerazioni conclusive

In sistemi complessi come quello della Piana delle Acque Albule, in cui vi sono numerose concause che influenzano le acque sotterranee, una corretta gestione della risorsa può portare a numerosi benefici ambientali ed economici.

Come si è visto dagli scenari simulati dal modello, il campo di moto della falda acquifera resta sempre con una conformazione simile, ossia con l'alto piezometrico dei Laghi Regina e Colonnelle, e un'area depressa in corrispondenza dell'area estrattiva del Travertino. In particolare, fatta eccezione per lo scenario indisturbato (scenario 2), la depressione piezometrica indotta dal *dewatering* può essere considerata un elemento costante dal punto di vista idrogeologico. Anche quando il pompaggio diminuisce (scenario 4) le quote relative all'alto piezometrico in corrispondenza dei laghi risalgono di poco (solo 80 cm) mentre nel caso di una forte diminuzione della ricarica zenitale e dal basso (scenario 3) per via di una forte siccità, i laghi si abbassano di circa 2 metri. Questo mette in luce (chiaramente in base all'implementazione fatta secondo il modello concettuale) come il sistema sia molto più sensibile alla ricarica dal basso rispetto agli eventi superficiali. Anche l'analisi di sensitività fornisce un dato indiretto relativamente a questo; infatti il parametro più sensitivo (vedi cap. 5) è VK\_FAULTS che rappresenta la  $k$  verticale delle zone a risalita preferenziale che, in base al carico idraulico nel sistema carbonatico (nel modello imposto, ma in natura dipendente dalla ricarica) alimentano dal basso l'acquifero superficiale.

Lo scenario a "risparmio energetico" è un interessante proposta che potrebbe davvero portare ad un uso più sostenibile della risorsa idrica; in primo luogo perché verrebbe emunta una minor quantità d'acqua (circa il 18% in meno), in secondo perché vi sarebbe un grande risparmio economico. Questo sia perché la manutenzione di soli 7 grandi punti di prelievo comporta un minor dispendio rispetto a quella necessaria per la manutenzione dei 17 attuali, sia perché si dovrebbe pompare meno acqua in totale, sia perché un sistema di gestione consorziale potrebbe controllare il problema *dewatering* centralizzando la gestione e suddividendo le spese per parcelle in base all'entità delle aziende estrattive.

La potenza di uno strumento di gestione come questo realizzato sta nel poter prevedere le conseguenze di eventuali scelte e quindi nel poter pianificare con più coscienza gli interventi sul territorio, ma come si è visto anche in questo caso specifico la facilità con cui si possono simulare diversi scenari e la grande qualità grafica delle recenti interfacce non possono prescindere dalle qualità dei dati di input; di conseguenza la qualità del rilevamento dei dati e l'attività di campagna

assumono ancora più importanza per il raggiungimento degli obiettivi. Uno studio modellistico ha bisogno di diversi set di dati distribuiti nel tempo e la presenza di dati registrati in continuo in diverse posizioni nella rete di monitoraggio, ha aiutato a comprendere meglio il sistema, sebbene a causa delle difficoltà ambientali non è stato possibile ripetere le misure parziali e totali dei pompaggi da *dewatering*.

Questo modello come si è detto è sicuramente migliorabile per quel che riguarda la densità di dati, la grandezza delle celle, le approssimazioni circa il mezzo poroso equivalente ed il sistema idrotermale non simulato; tuttavia, a questo stadio di calibrazione, può senza dubbio essere usato per lo scopo per cui è stato realizzato, ossia come mezzo per capire meglio il funzionamento del sistema e quindi gestire la risorsa idrica in modo più consapevole.

Le prospettive future di studio su questo modello sono la suddivisione del dominio in celle più piccole per omogeneizzare i risultati delle simulazioni (in seguito ad un infittimento dei dati misurati) e la simulazione del trasporto di calore tramite sistemi densità-dipendenti (MT3D Heat – FEFLOW).

## **7.2 Interfacce e software di simulazione a confronto**

Nel corso della modellazione è stato possibile usufruire di tre diversi software per effettuare le simulazioni, di conseguenza lo stesso *data set* è stato creato per ognuno di questi ed è quindi possibile riportarne alcune differenze peculiari.

### **7.2.1 Software open source USGS**

Il principale aspetto positivo del software *open source* dell'USGS sta nel fatto che è assolutamente gratuito, scaricabile da chiunque, ed è in grado di girare su normali calcolatori. Inoltre le migliorie dei vari pacchetti e software sono in costante aggiornamento e capita spesso che nuove versioni escano a distanza di pochi giorni l'una dall'altra.

Chi lavora alla realizzazione dei codici e dei software risponde volentieri a richieste di aiuto o segnalazioni di errori nei programmi, provvedendo molto rapidamente alle correzioni.

Sul sito inoltre sono presenti tutte le documentazioni dei codici, gli esercizi e file di esempio.

Di contro, l'approccio con questi software soprattutto all'inizio può risultare davvero ostico perché basato su linguaggi di programmazione.

Non ci sono interfacce grafiche che permettono di costruire il proprio modello in poche mosse e tutto è visualizzato numericamente.

Le uniche interfacce esistenti sono MFI, GWChart e Model Viewer.

MFI è un programma che schematizza il modello, creando tutti i pacchetti (*packages*) con facili inserimenti dei valori in finestre e tabelle; permette di far girare la simulazione di MODFLOW-2005 direttamente dai propri menù e anche di far girare UCODE\_2005, sia per l'analisi di sensitività che per la stima dei parametri. Se il modello converge, i risultati possono essere visualizzati, oltre che nei file di testo prodotti dalla simulazione, anche tramite l'interfaccia Model Viewer.

Model Viewer è un visualizzatore dell'output molto elementare; permette infatti di visualizzare il dominio attivo del modello, gli strati e le sezioni, le condizioni al contorno e i risultati come carichi, abbassamenti o concentrazioni. Non permette la visualizzazione di immagini (come mappe etc.) né di file vettoriali (.shp, .dxf etc.) e non visualizza isolinee dei risultati ma solo fasce di colore.

I risultati del *fitting* e di UCODE invece vengono visualizzati tramite il programma GWChart che legge i file di testo creati dalla simulazione e li trasforma in grafici (vedi paragrafo 5.2).

#### 7.2.2 Ground Water Vistas V. 5

Ground Water Vistas, prodotto da ESI è un'interfaccia di facile utilizzo, che permette di creare la discretizzazione del proprio modello in poche mosse, vedendo direttamente la griglia su una finestra di lavoro. Permette inoltre di aggiungere file .shp, .dxf, file di testo x,y,z e immagini proiettando il modello in un sistema di coordinate definito dall'utente.

Le procedure di immissione dati e di simulazione per quanto semplici non sono di immediata comprensione e sono leggermente macchinose.

Supporta MODFLOW-2005 con tutte le sue funzioni e tutte le versioni precedenti di MODFLOW, e produce gli stessi file di testo di MODFLOW, che possono essere quindi copiati.

I lati negativi sono senza dubbio il costo molto elevato del software e degli aggiornamenti e il rendering grafico che è molto scadente.

#### 7.2.3 Visual Modflow V.4.2

Visual Modflow è sicuramente l'interfaccia grafica di più immediato utilizzo. Ha una grafica sia dell'area di lavoro sia dell'output molto più efficace e una visualizzazione 3D di facile gestione. Di sicuro è l'interfaccia più “*user friendly*” tra quelle descritte e quella organizzata con più logica. Prevede infatti una fase di *pre-processing* detta “input” in cui viene descritto il modello e inserite tutte le caratteristiche e le condizioni al contorno, una di *processing* detta “run” in cui si impostano le modalità di simulazione, il solver etc., e una di *post-processing* detta “output” che mostra i risultati della simulazione.

Possono essere inserite più immagini contemporaneamente riferite all'area del modello, superfici per rappresentare gli strati, *shape file* per visualizzare particolari elementi del modello e tutto può essere riferito ad un sistema di coordinate definito.

I lati negativi di Visual Modflow 4.2 sono il costo molto elevato di software e aggiornamenti, la non inclusione ad oggi del codice MODFLOW-2005 (viene fornito solo con MODFLOW-2000) e la non compatibilità dei file di testo creati con gli altri software. L'assenza di MODFLOW-2005 in particolare non permette di inserire osservazioni di flusso ma solo di carico.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Accordi G. e Carbone F.** Lithofacies map of Latium-Abruzzi and neighbouring areas, Scale 1:250.000 [Rivista] // P.F. Geodinamica / a cura di C.N.R.. - Roma : [s.n.], 1985.
- Anderson M.P., Woessner, W.W.** Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport. [Libro]. - San Diego, US. : Academic Press, Inc., 1992.
- Bayer P. [et al.]** Geothermal modelling using MT3DHEAT [Articolo] // Geophysical research Abstracts. - 2008. - A12119 : Vol. 10.
- Boni C.F., Bono P. e Capelli G.** Schema idrogeologico dell'Italia centrale [Rivista] // Memorie della Società Geologica Italiana. - Roma : [s.n.], 1986. - Vol. 35. - p. 991-1012. - 2 carte f.t..
- Bredehoeft J. e Hall P.** Ground-water models [Rivista] // Ground Water. - 1995. - 4 : Vol. 33. - p. 530-531.
- Capelli G. [et al.]** Modalità di ricarica e assetto strutturale dell'acquifero delle sorgenti Capore - S. Angelo (Monti Lucretili - Sabina Meridionale) [Rivista] // Geologica Romana. - Roma : [s.n.], 1987. - 26. - p. 419-447.
- Capelli G. e Mazza R.** Indagini geologiche, strutturali, stratigrafiche e idrogeologiche nell'area di Tivoli Terme (RM) e Villalba di Guidonia (RM) [Rapporto] : Convenzione di ricerca - Relazione Finale / Scienze Geologiche ; Università degli Studi RomaTRE. - Roma : [s.n.], 2006. - Gruppo di lavoro di Idrogeologia - Inedito.
- Capelli G. e Mazza R.** Studi idrogeologici per la definizione degli strumenti operativi del piano stralcio per l'uso compatibile delle risorse idriche sotterranee nell'ambito dei sistemi acquiferi prospicienti i territori vulcanici laziali [Rapporto] : Convenzione di Ricerca / Autorità di Bacino Nazionale del Fiume Tevere, Autorità dei Bacini Regionali del Lazio, Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università degli Studi RomaTRE. - Roma : [s.n.], 2005.
- Cavinato G. P., Salvini F. e Tozzi M.** Evoluzione Strutturale del settore centrale della linea Olevano-Antrodoco [Rivista] // Memorie della Società Geologica Italiana. - Roma : [s.n.], 1986. - Vol. 35. - p. 225-228.
- Chiocchini M., Manganeli V. e Pannunzi L.** Ricerche geologiche sul mesozoico della Sabina (Lazio). II: I Monti Cornicolani [Rivista] // Bollettino del Servizio Geologico d'Italia. - Roma : [s.n.], 1980. - Vol. 100. - p. 235-265.

- Cosentino D. e Parotto M.** Assetto strutturale dei Monti Lucretili settentrionali (Sabina); nuovi dati e schema tettonico preliminare [Rivista] // *Geologica Romana*. - 1986. - p. 123-124.
- Cosentino D., Cipollari P. e Pasquali V.** The Jurassic pelagic carbonate platform of the Cornicolani Mts. (Central Apennines) [Sezione di libro] // *Mapping Geology in Italy*. - Firenze : S.E.L.C.A., 2004.
- De Rita D., Funicciello R. e Parotto M.** Carta Geologica del Complesso Vulcanico dei Colli Albani (Vulcano Laziale). - Roma : CNR. - Scala 1:50.000.
- Di Filippo M. [et al.]** Lazio, studio delle strutture tettoniche profonde e superficiali mediante il confronto di dati gravimetrici e sismologici (sintesi preliminare) [Atti di convegno] // 73° Congresso della Società Geologica Italiana. - Roma : [s.n.], 1986. - p. 123-124.
- Faccenna C. [et al.]** Late Pleistocene Strike-Slip tectonics in the Acque Albule basin (Tivoli – Latium) [Sezione di libro] // *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*. - Roma : Istituto Poligrafico e Zecca dello, 1994. - Vol. XLIX.
- Faccenna C.** Indagini geologiche, strutturali, stratigrafiche e idrogeologiche nell'area di Tivoli Terme (RM) e Villalba di Guidonia (RM) [Rapporto] : Convenzione di ricerca - Relazione Finale / Scienze Geologiche ; Università degli Studi RomaTRE. - Roma : [s.n.], 2006. - Gruppo di lavoro di Geologia Strutturale - Inedito.
- Funicciello R. e Parotto M.** Il substrato sedimentario dell'area dei Colli Albani: considerazioni geodinamiche e paleogeografiche sul margine tirrenico dell'Appennino Centrale [Articolo] // *Geologica Romana*. - Roma : [s.n.], 1978. - Vol. 17. - p. 233-2287.
- Gasparini C. [et al.]** Recent seismicity of the "Acque Albule travertine basin" [Articolo] // *Annals of Geophysics*. - 2002. - 45.
- Hill Mary C. e Tiedeman Claire R.** Effective Groundwater Model Calibration [Libro]. - Hoboken : Wiley, 2007.
- La Vigna F. [et al.]** Development of a modern hydrogeological monitoring network in urban contest – The case of Acque Albule Plain; Central Italy; Latium Region; Rome [Articolo] // *Geophysical research Abstracts*. - 2007. - 1124 : Vol. 9.
- La Vigna F. [et al.]** Italian Web Sinkhole database [Online]. - 2007. - <http://host.uniroma3.it/laboratori/idrogeologia/iwsd>.
-

- Mattei M., Montone P. e Salvini F.** Analisi strutturale dei rilievi del margine appenninico intorno a Tivoli (Roma) [Rivista] // Memorie della Società Geologica Italiana. - Roma : [s.n.], 1986. - Vol. 35. - p. 579-589.
- Maxia C.** Il Bacino delle Acque Albule [Rivista] // Contributi di Scienze Geologiche. - [s.l.] : Università di Roma, 1950. - p. 20-27.
- Maxia C.** La geologia dei Monti Cornicolani (Lazio) [Rivista] // Pubbl. Ist. Pal. e Geol.. - [s.l.] : Università di Roma, 1954. - 11.
- Maxia C.** Un interessante sondaggio nel travertino di Bagni di Tivoli (Acque Albule, fra Tivoli e Roma) [Rivista] // Contributi di Scienze Geologiche. - [s.l.] : Università di Roma, 1950. - p. 20-22.
- McDonald M. e Harbaugh A.** A Three Dimensional Finite Difference Ground Water Flow Model [Sezione di libro] // Techniques of Water Resources Investigations Modeling. - Denver : U.S. Geological Survey, 1988. - Vol. 6 .
- Parotto M.** Appenin Central [Sezione di libro] // Gèologie d'Europe / aut. libro VV. AA.. - Parigi : [s.n.], 1980. - Vol. 26° Congresso Internazionale di Geologia.
- Poeter E.P. [et al.]** UCODE\_2005 and Six Other Computer Codes for Universal Sensitivity Anlaysis, Calibration and Uncertainty Evaluation [Sezione di libro] // U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6. - 2005. - Vol. A11.
- Pollock D.W.** Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.s. Geological Survey modular three dimensional finite difference groundwater model [Sezione di libro] // U.S. Geological Survey Openfile Report. - 1989.
- Spitz K. e Moreno J.** A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling [Libro]. - [s.l.] : John Wiley & Sons, 1996.
- Tsang C. F.** The Modeling Process and Model Validation [Articolo] // Ground Water. - 1991. - Vol. 29. - p. 825-831.
- Zheng C. e Wang P. P.** MT3DMS, A modular Three-Dimensional Multi-Species Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater System [Rapporto] : Documentation and User's Guide / Engineer Research and Development Center Contract . - Vicksburg, MS : U.S. Army , 1999. - SERDP-99-1.



## **Ringraziamenti**

*Grazie al mio Tutore Giuseppe Capelli che ha avuto fiducia in me e mi ha seguito in questo percorso di Dottorato.*

*Grazie a Rudy Rossetto, cotutore di questo lavoro e primo “maestro” di modellistica idrogeologica che ho avuto.*

*Grazie a Mary C. Hill, cotutrice di questo lavoro, per i suoi preziosi consigli su come calibrare il mio modello, per le numerose ore dedicatemi a Boulder (USA) e a Praga e per il prezioso sostegno a distanza che ancora mi da.*

*Grazie a Roberto Mazza, cotutore di questo lavoro, per aver creduto in me fin dai tempi della laurea e per il sostegno “umano” che mi ha sempre dato in questi anni.*

*Grazie a tutto il laboratorio per l'aiuto prestatomi e per aver sopportato la mia assenza e il mio nervosismo nei giorni più duri.*

*Grazie al Prof. Francani del Politecnico di Milano e al Prof. Beretta dell'Università di Milano, per aver accettato di fare da revisori al mio lavoro e per i preziosissimi commenti e consigli dati.*

*Grazie a Leonardo e Alberto, ragazzi del mio gruppo scout, che mi hanno accompagnato nei rilevamenti.*

*Grazie infine a mia moglie Anna Maria, instancabile compagna che ha sempre fiducia in me e che mi ha spronato ad andare avanti anche quando ero molto stanco e pessimista, che ha sopportato i miei nervosismi e le ore passate a casa sul pc, anche durante le vacanze e i fine settimana.*

*Grazie a quanti in un modo o nell'altro hanno reso il mio lavoro più semplice e piacevole.*



## APPENDICE

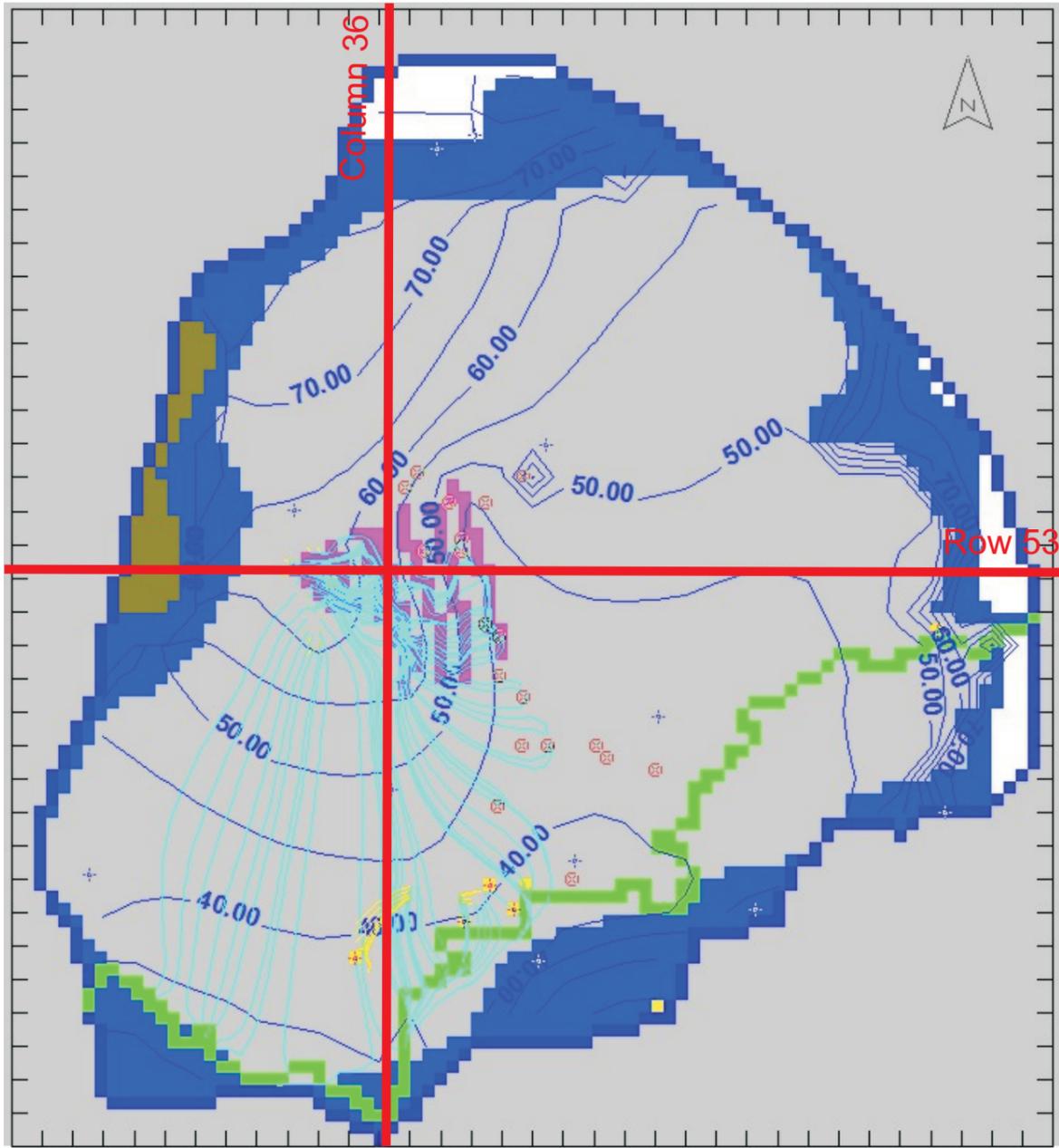
***MODEL SIMULATION LOGS***

### Model Simulation Log

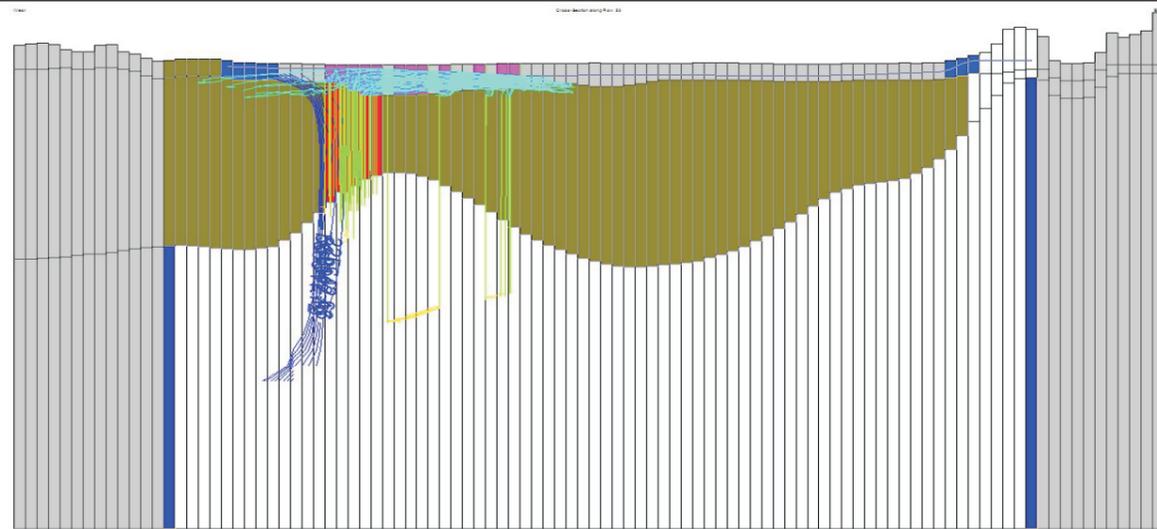
NOME MODELLO	Acque Albule
DATA	10/12/2008
SIMULAZIONE N° - NOME SCENARIO	1 - Taratura, Febbraio 2008
CODICE DI SIMULAZIONE E VERSIONE	MODFLOW-2005
INTERFACCIA DI SIMULAZIONE E VERSIONE	VisualModflow 4.3 - GW Vistas 5
OBBIETTIVO DELLA SIMULAZIONE	Simulazione del flusso
NOMI DEL FILES DI INPUT	AA_05
NOTE SUI FILES DI INPUT	Scenario di taratura
NOMI DEI FILES DI OUTPUT	AA_05

#### COMMENTI SUI RISULTATI

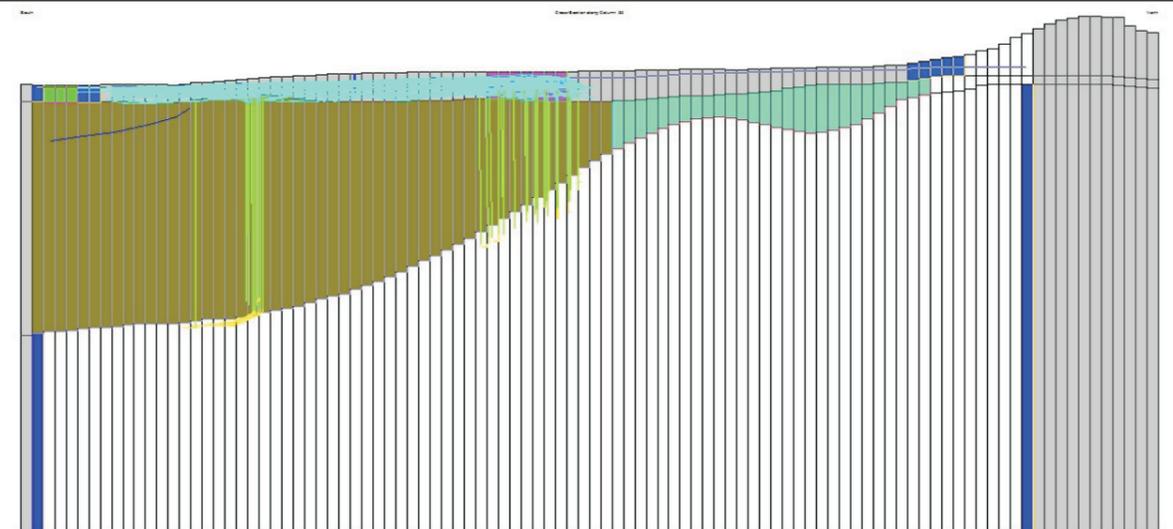
Questo scenario è la "fotografia" che si potrebbe definire attuale del sistema, relativa al periodo in cui sono state effettuate tutte le misure dirette degli emungimenti da dewatering e dei flussi nelle sorgenti oltre che la campagna di rilevamento piezometrico. In base a queste misure è avvenuta la calibrazione del modello che riproduce abbastanza fedelmente la piezometria rilevata (fig.35). L'output mostra chiaramente la forte depressione indotta dal dewatering così come l'alto piezometrico in corrispondenza delle sorgenti termali dei Laghi Regina e Colonnelle. Il campo di moto mostra come le linee principali di deflusso partano sia nelle zone del debole travaso laterale dai Cornicolani e dai Lucretili, ma soprattutto dall'alto piezometrico delle sorgenti termali, per dirigersi o verso la grande depressione piezometrica da emungimento o verso l'Aniene.



Layer 1



Row 53

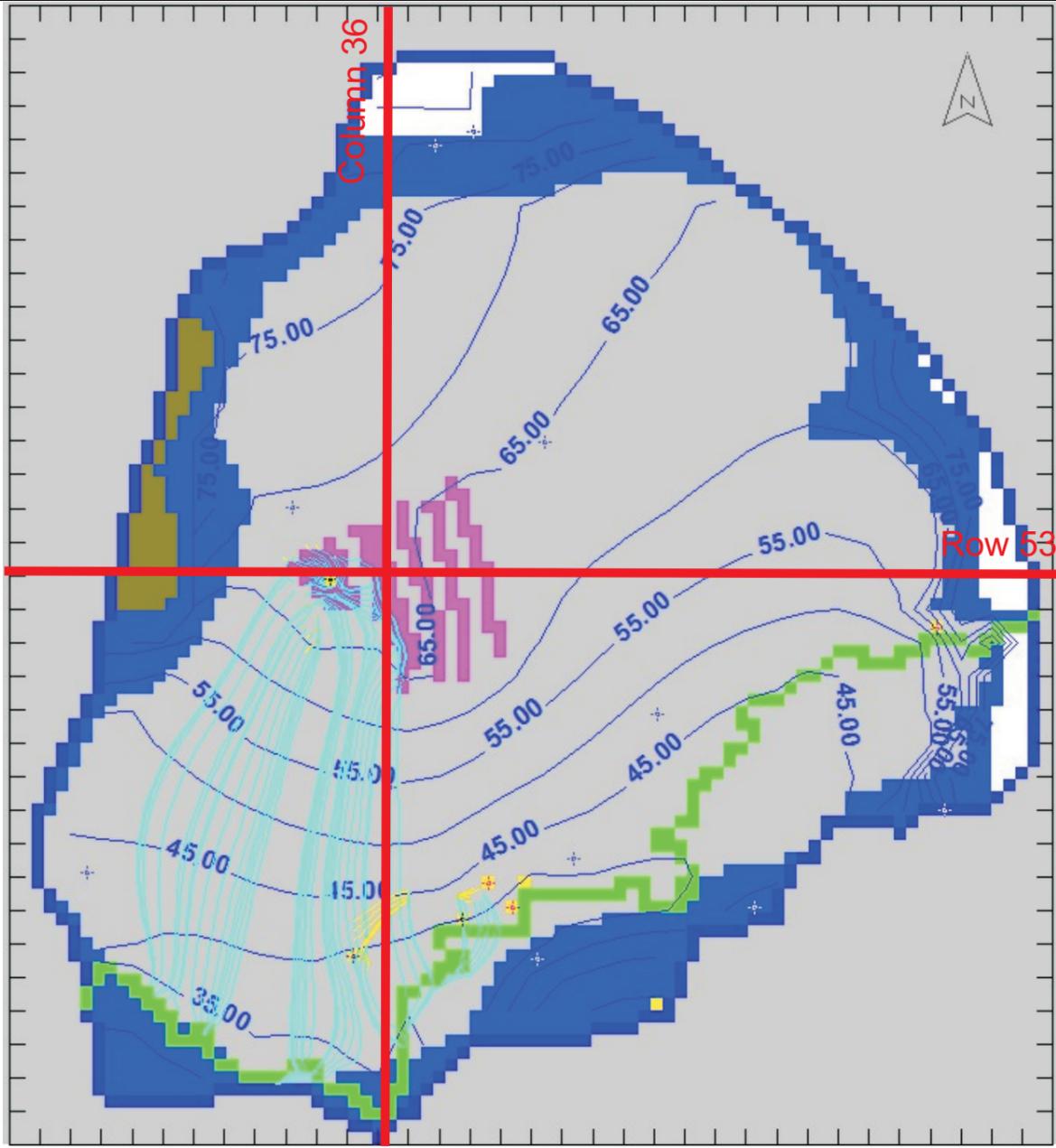


Column 36

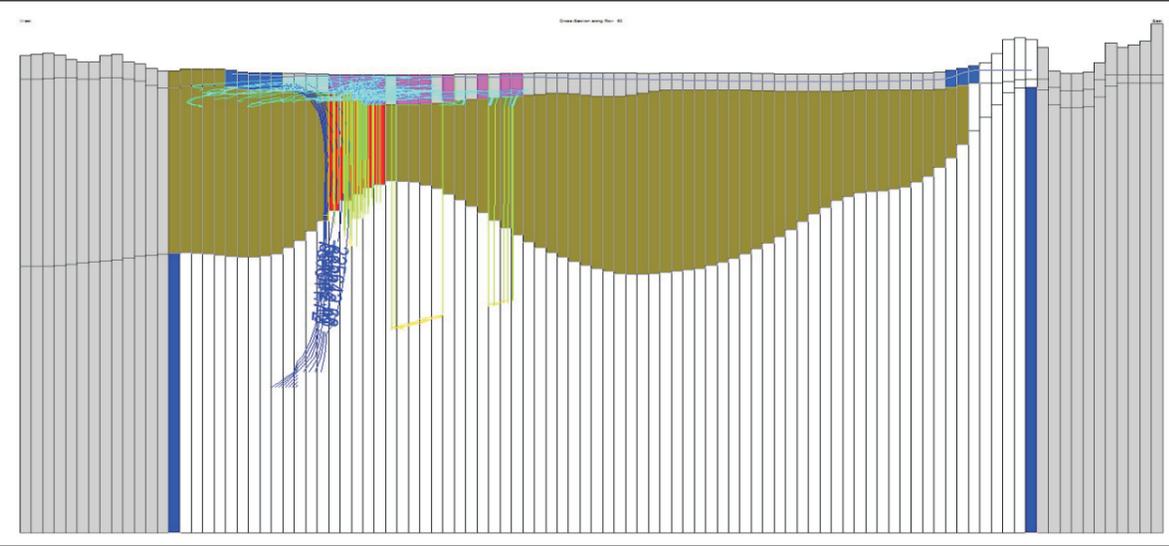
### Model Simulation Log

NOME MODELLO	Acque Albule
DATA	10/12/2008
SIMULAZIONE N° - NOME SCENARIO	2 - Indisturbato
CODICE DI SIMULAZIONE E VERSIONE	MODFLOW-2005
INTERFACCIA DI SIMULAZIONE E VERSIONE	VisualModflow 4.3 - GW Vistas 5
OBBIETTIVO DELLA SIMULAZIONE	Simulazione del flusso
NOMI DEL FILES DI INPUT	AA_05_2
NOTE SUI FILES DI INPUT	Tolti i "disturbi" antropici
NOMI DEI FILES DI OUTPUT	AA_05_2
COMMENTI SUI RISULTATI	

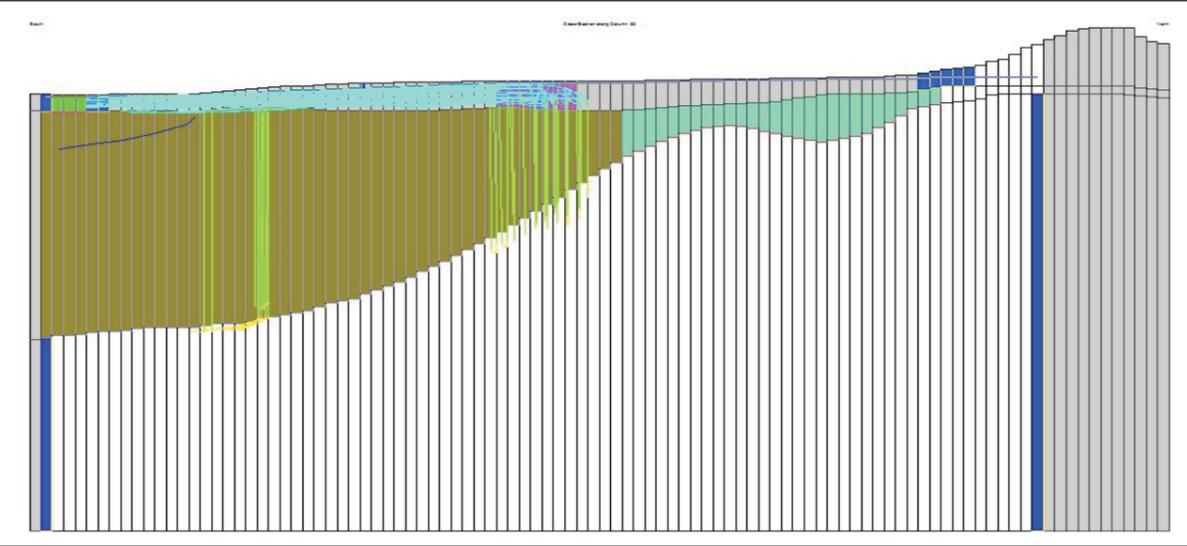
IN questo scenario si è voluto simulare una situazione senza stress antropici. Sono stati quindi spenti i pompaggi del dewatering e tutte le celle a ricarica negativa sono state uguagliate alla ricarica positiva della zona in cui ricadono. L'output mostra una piezometria con gradienti meno accentuati e l'alto piezometrico permane nella zona dei laghi termali, ma si estende di molto. Questa conformazione del campo di moto rappresenta una situazione pre-antropizzazione o comunque una situazione del tutto naturale. Non ci sono, relativamente a quest'area, piezometrie così antiche da non presentare gli effetti di alcun prelievo, tuttavia il risultato del modello si può confrontare con una carta delle isofreatiche della Provincia di Roma relativa a rilievi degli anni '70 (fig.37). Sebbene lo sfruttamento delle risorse idriche fosse già in atto all'epoca la piezometria mostra come questo fosse ancora molto limitato e circoscritto al settore orientale del bacino. Dal confronto si nota come sia molto evidente la corrispondenza tra l'alto piezometrico del modello e quello della carta. Altre riflessioni possono essere fatte sulle differenze che ci sono tra i dati osservati oggi e quelli simulati in questo scenario relativamente ai punti di osservazione. Il Lago della Regina in questa simulazione risale di circa 6 metri rispetto alla posizione attuale, quasi fino al piano campagna e la cella dreno posizionata in sua corrispondenza per simulare il canale emissario, oggi non più attivo, emette circa 800 litri al secondo.



Layer 1



Row 53



Column 36

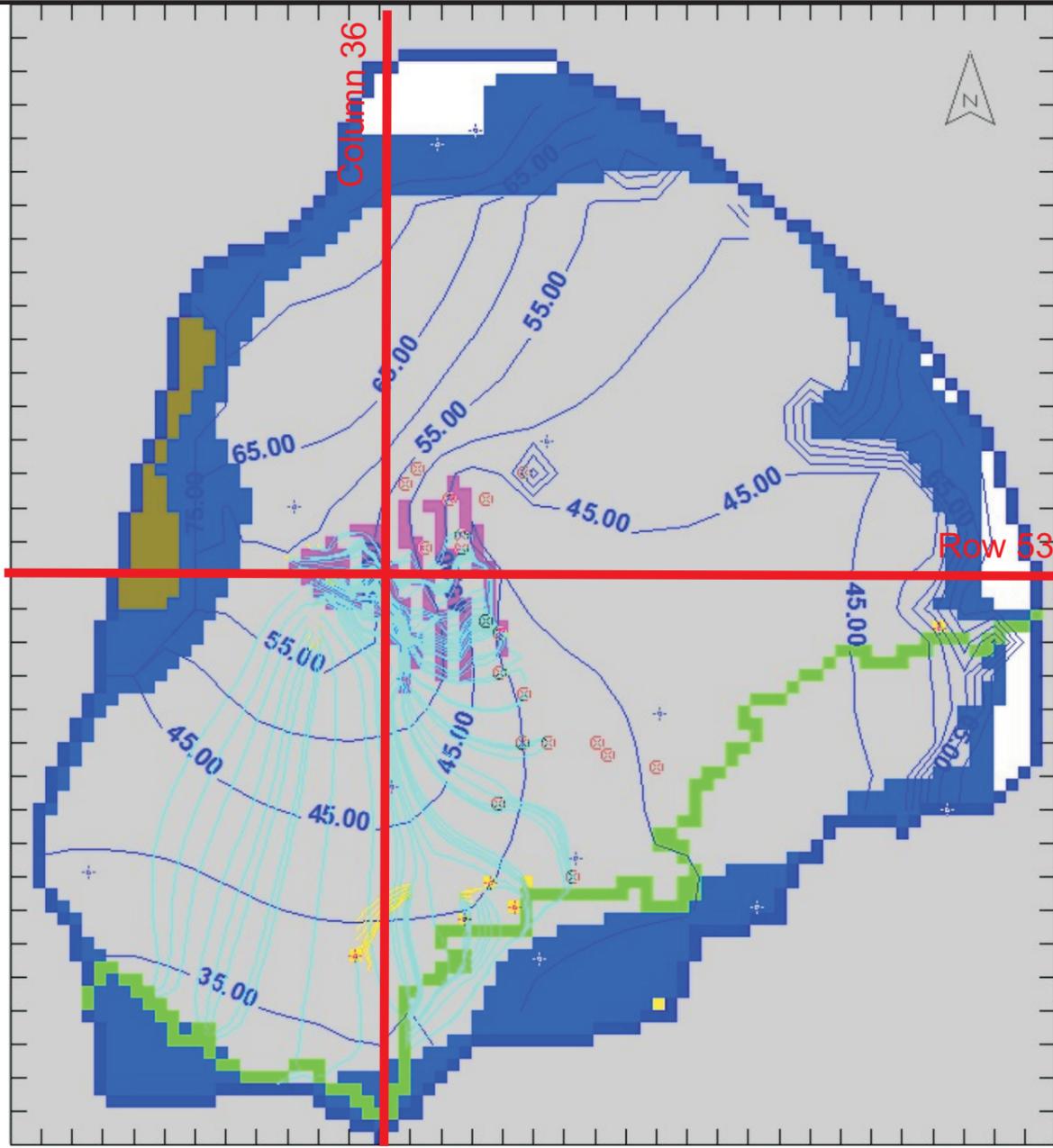
### Model Simulation Log

NOME MODELLO	Acque Albule
DATA	10/12/2008
SIMULAZIONE N° - NOME SCENARIO	3 - Forte siccità
CODICE DI SIMULAZIONE E VERSIONE	MODFLOW-2005
INTERFACCIA DI SIMULAZIONE E VERSIONE	VisualModflow 4.3 - GW Vistas 5
OBBIETTIVO DELLA SIMULAZIONE	Simulazione del flusso
NOMI DEL FILES DI INPUT	AA_05_3
NOTE SUI FILES DI INPUT	Diminuzione ricarica 70%
NOMI DEI FILES DI OUTPUT	AA_05_3
COMMENTI SUI RISULTATI	

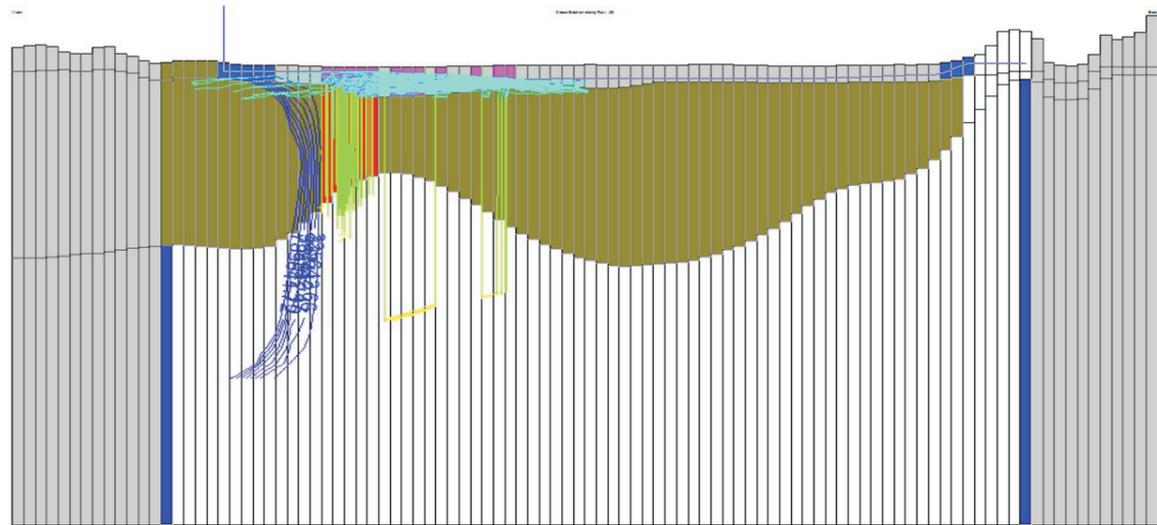
In questo scenario si è voluto simulare una condizione molto critica, in cui pur rimanendo le stesse condizioni di prelievo, viene drasticamente ridotta la ricarica (di circa il 70%). Questa condizione potrebbe essere simile a quella verificatasi nel 2000 in cui vi fu un brusco calo di precipitazioni, e un conseguente abbassamento dei livelli saturi, sia nel circuito carbonatico che in quello superficiale.

Poiché la ricarica zenitale inserita nel modello non riproduce i reali quantitativi di ricarica che concorrono alla saturazione del sistema carbonatico lucretile e cornicolano (ben più ampio dei piccoli lembi del dominio attivo nel modello), per riprodurre questa condizione viene modificato assieme al valore di ricarica anche quello relativo al carico costante impostato sul terzo layer. Le diminuzioni di livello registrate in quegli anni nelle cavità carsiche (Pozzo del Merro) furono di circa 3-4 metri, di conseguenza il constant head da 80 metri viene portato a 76, mentre la ricarica zenitale sulla piana da 435 mm/anno viene abbassata a circa 120 mm/anno.

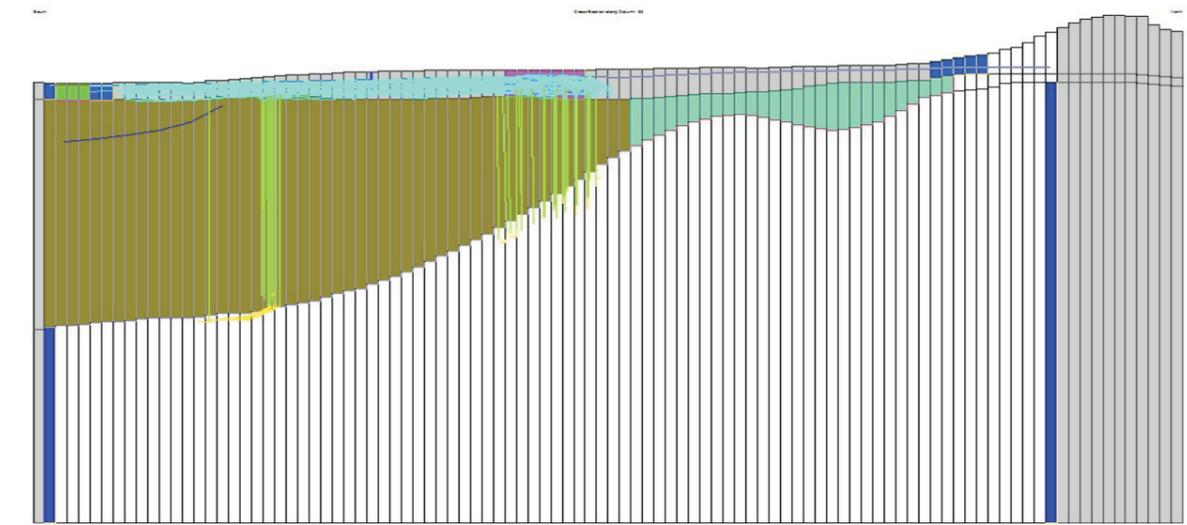
Il modello produce una situazione in cui chiaramente vi sono abbassamenti più marcati. Il Lago della Regina si abbassa di più di 2 metri (come in corrispondenza della siccità del 2000) così come il Lago S.Giovanni. Tutte le altre osservazioni rispetto allo scenario di taratura mostrano un abbassamento.



Layer 1



Row 53



Column 36

### Model Simulation Log

NOME MODELLO	Acque Albule
DATA	10/12/2008
SIMULAZIONE N° - NOME SCENARIO	4 - Periodo estivo
CODICE DI SIMULAZIONE E VERSIONE	MODFLOW-2005
INTERFACCIA DI SIMULAZIONE E VERSIONE	VisualModflow 4.3 - GW Vistas 5
OBBIETTIVO DELLA SIMULAZIONE	Simulazione del flusso
NOMI DEL FILES DI INPUT	AA_05_4
NOTE SUI FILES DI INPUT	Diminuzione prelievi dewatering30%
NOMI DEI FILES DI OUTPUT	AA_05_4
COMMENTI SUI RISULTATI	

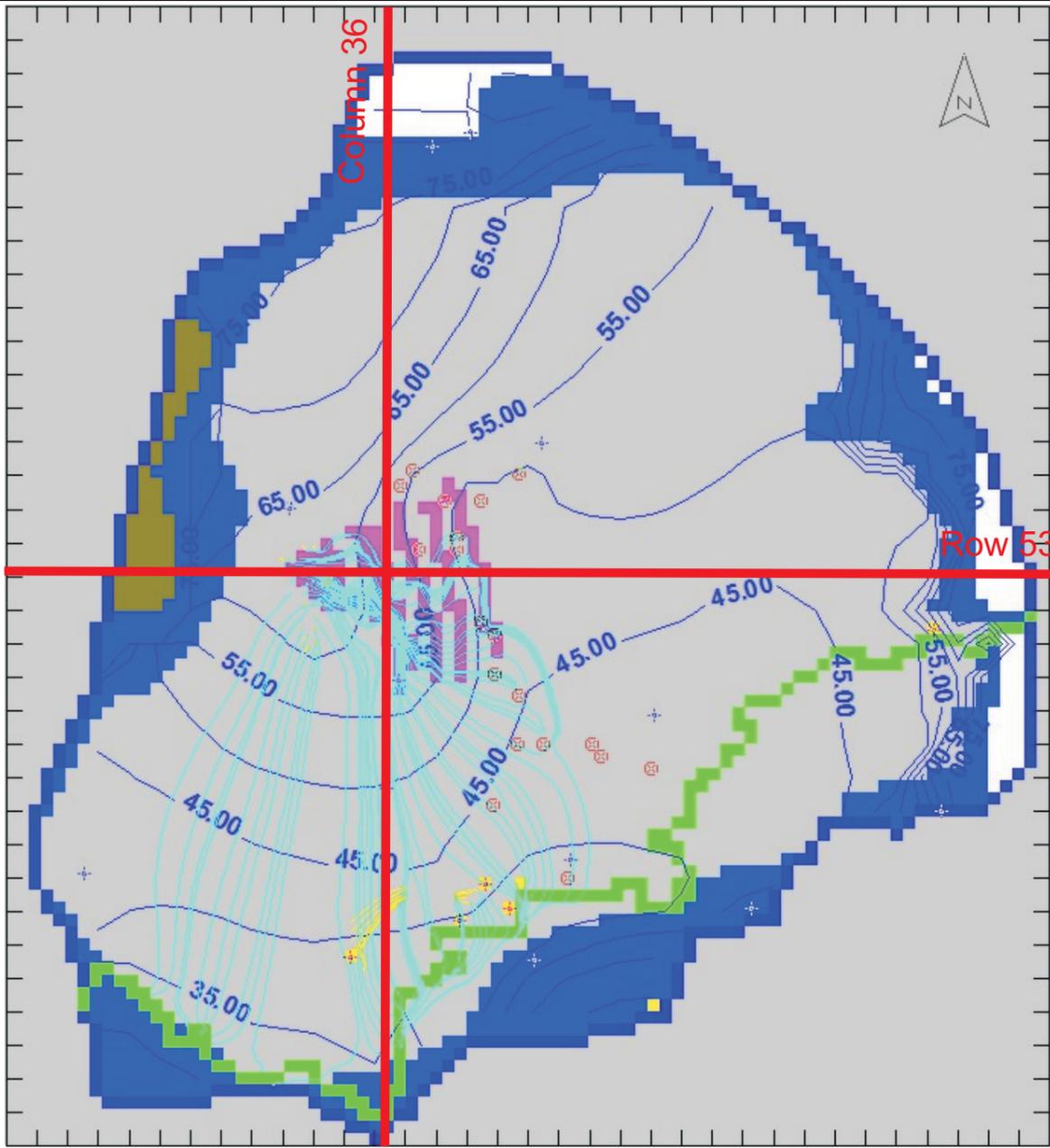
Nel periodo estivo (mese di agosto), solitamente, le attività estrattive diminuiscono l'entità del dewatering senza interromperla, per risparmiare energia e per un rapido svuotamento dei bacini alla ripresa delle attività.

Questo processo non è sempre attuato e soprattutto non è attuato da tutti e nello stesso momento. C'è infatti chi interrompe totalmente i pompaggi e chi non varia di nulla le quantità, ma quello che si è notato su alcuni dei fori sotto monitoraggio mostra che durante il mese di agosto si ha un innalzamento della piezometria anche di un metro (vedi grafici).

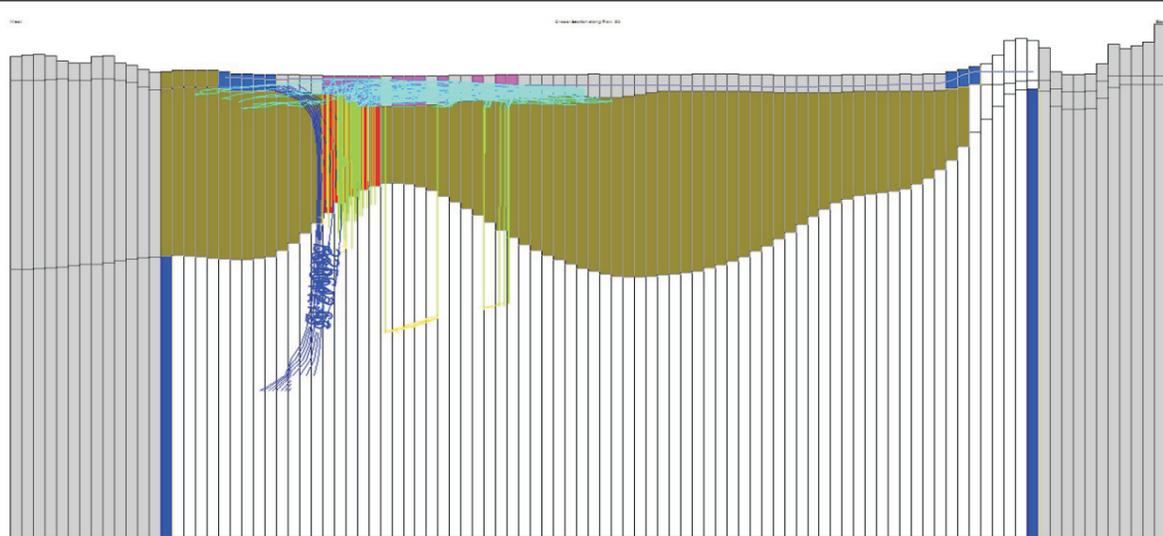
Poiché non è possibile conoscere questo dato con assoluta certezza si è voluto simulare uno scenario ipotizzato, in cui i pompaggi sono stati diminuiti del 30% portandoli da 4300 a circa 3000 l/s, mentre sono stati "accesi" i due pozzi che la Regione Lazio ha realizzato recentemente per alimentare il Lago della Regina così come un pozzo in iniezione (+500 l/s) nella cella corrispondente alla posizione del Lago e uno in prelievo (-500 l/s) (per simulare il prelievo delle terme).

L'output mostra un generale innalzamento della piezometria e in alcuni dei fori l'innalzamento corrisponde abbastanza fedelmente ai valori registrati dalle sonde in estate.

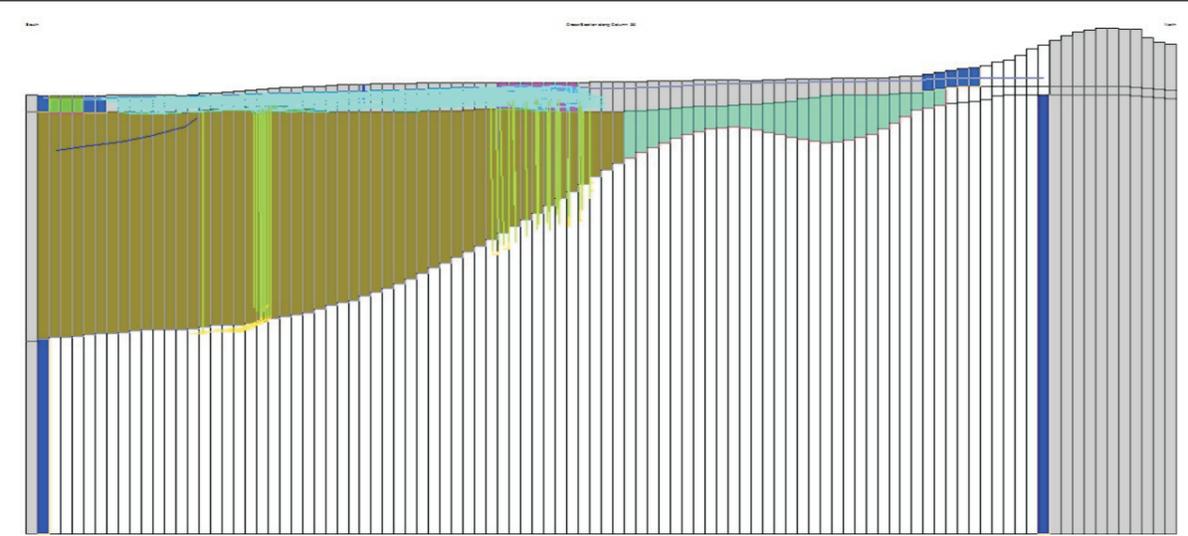
Il livello del Lago della Regina, nonostante la forte diminuzione del pompaggio sale di soli 80 cm.



Layer 1



Row 53



Column 36

### Model Simulation Log

NOME MODELLO	Acque Albule
DATA	10/12/2008
SIMULAZIONE N° - NOME SCENARIO	5 - Risparmio energetico
CODICE DI SIMULAZIONE E VERSIONE	MODFLOW-2005
INTERFACCIA DI SIMULAZIONE E VERSIONE	Visual Modflow 4.3 - GW Vistas 5
OBBIETTIVO DELLA SIMULAZIONE	Simulazione del flusso
NOMI DEL FILES DI INPUT	AA_05_5
NOTE SUI FILES DI INPUT	Riorganizzazione dewatering
NOMI DEI FILES DI OUTPUT	AA_05_5

#### COMMENTI SUI RISULTATI

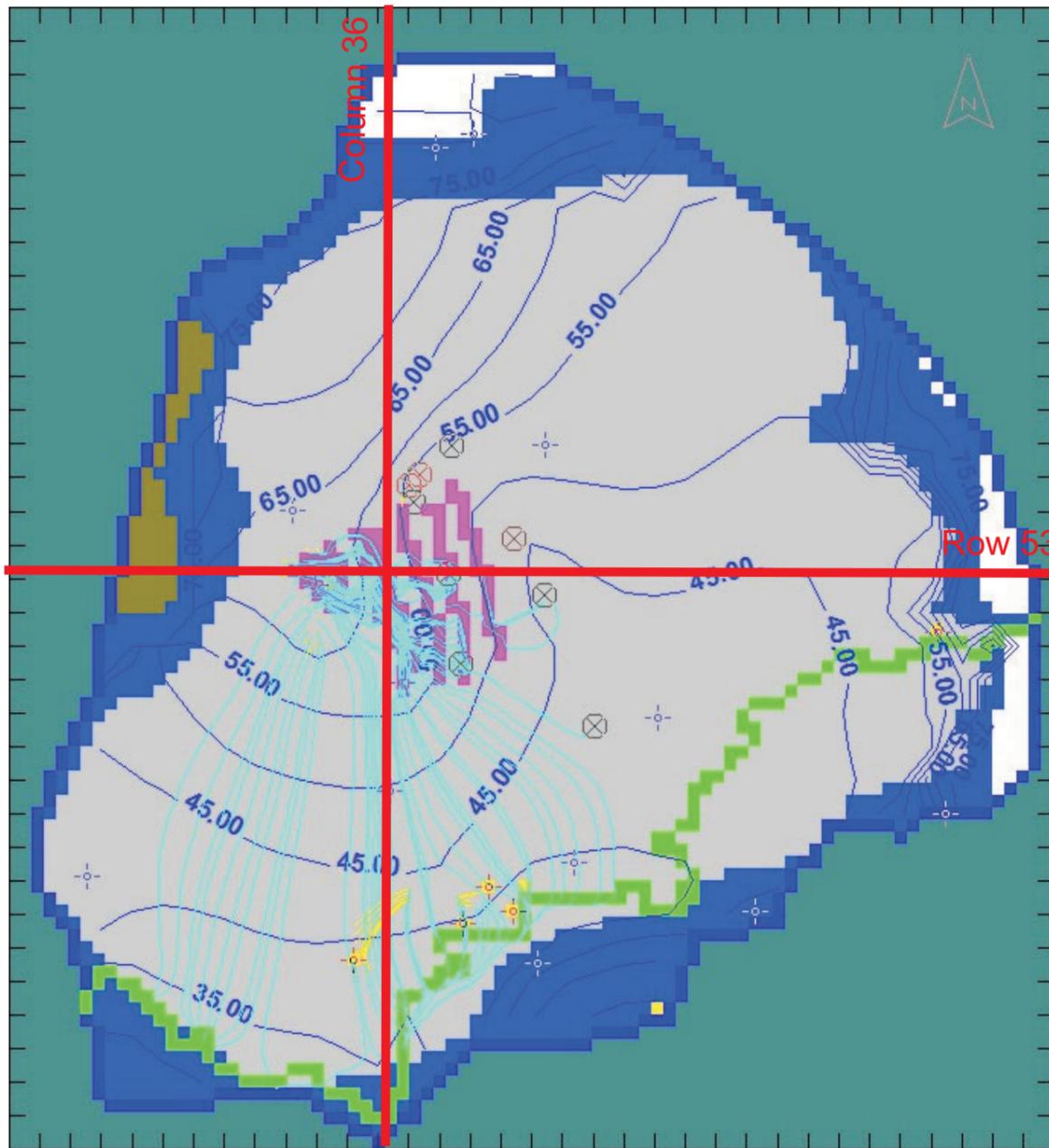
Con questo scenario si è voluto proporre un'organizzazione differente del pompaggio per determinare gli stessi abbassamenti con un consumo energetico minore. Attualmente infatti nell'area estrattiva non esiste un piano di dewatering concordato tra le varie aziende estrattrici, ma ogni realtà abbassa la falda acquifera secondo i propri scopi.

Questo comporta oltre che un grande dispendio energetico anche evidenti problemi di gestione; nei casi in cui aziende limitrofe cambiano il loro regime di emungimento, influenzano direttamente il livello della falda nei bacini estrattivi limitrofi.

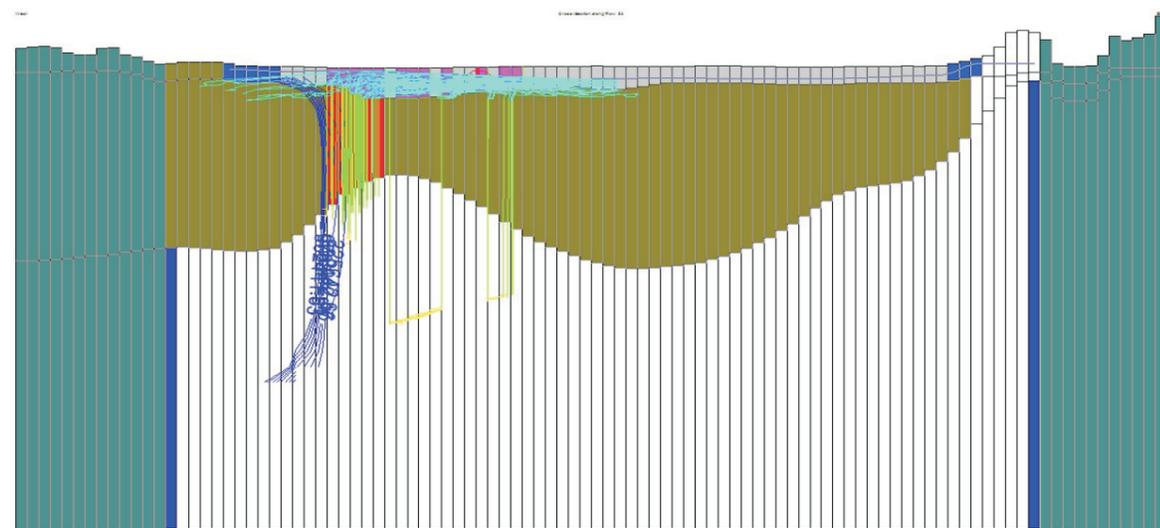
In questa versione del modello (fig.40) sono stati eliminati i 17 punti di prelievo rilevati e seguendo l'andamento della piezometria sono state pianificate le posizioni ideali per nuove pompe da dewatering. Oltre alle 7 nuove postazioni sono stati considerati nella rete di pompaggio anche i due pozzi profondi realizzati di recente dalla Regione Lazio per alimentare, con circa 250 l/s ciascuno, il Lago della Regina.

Con metodologia trial and error è stato modificato il regime delle singole pompe per realizzare un abbassamento più o meno corrispondente all'attuale con un minor pompaggio. Il miglior risultato che viene mostrato ha prodotto un campo di moto e delle altezze piezometriche quasi identiche con un emungimento minore del 18% circa.

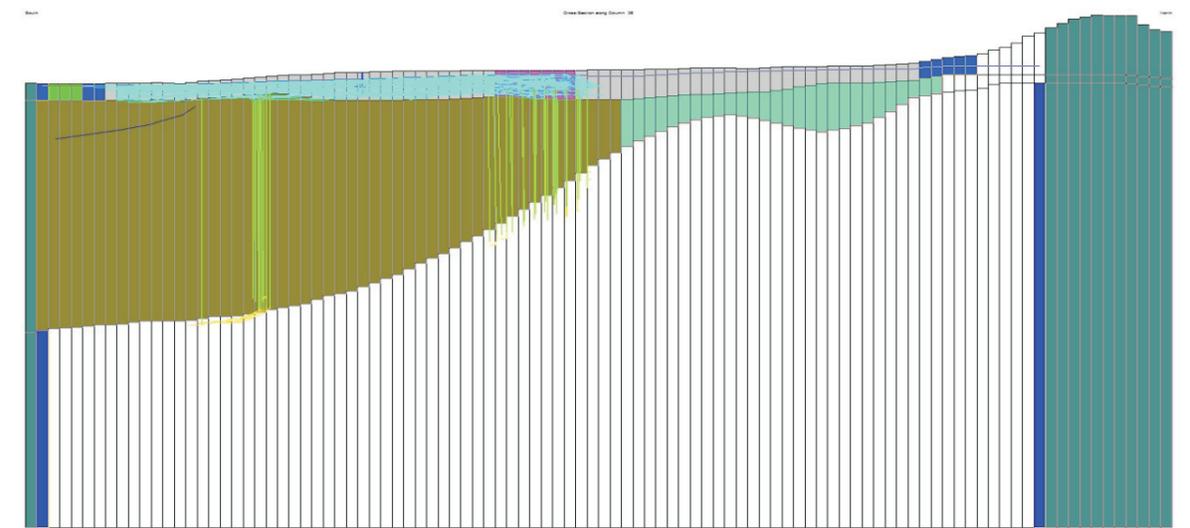
Se si considera che all'interno di questo valore è compreso anche il pompaggio relativo ai due pozzi della Regione, l'emungimento totale per il solo dewatering risulta minore del 30% rispetto ai quantitativi attuali. Dal modello inoltre risulta che lo sviluppo del sistema di dewatering in questo modo innalzerebbe il livello del Lago della Regina di più di mezzo metro così come il Lago S. Giovanni.



Layer 1



Row 53



Column 36

***NORME TECNICHE***



## Standard Guide for Documenting a Ground-Water Flow Model Application<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 5718; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This guide covers suggested components to be included in documenting and archival of numerical ground-water flow model applications. Model documentation includes a written and graphical presentation of model assumptions and objectives, the conceptual model, code description, model construction, model calibration, predictive simulations, and conclusions. Model archival refers to a file or set of files (in both written and digital format) that contains logs of significant model simulations (that is, calibration, sensitivity and prediction simulations), supplemental calculations, model documentation, a copy of the model source code(s) or executable file(s) used, or both, and input and output data sets for significant model simulations.

1.2 This guide presents the major steps in preparing the documentation and archival for a ground-water flow model application. Additional information on ground-water model documentation can be found in EPA-500-B-92-006.<sup>2</sup>

1.3 This guide is specifically written for saturated, isothermal, ground-water flow model applications. The elements presented for documentation and archival are relevant and applicable to a wide range of modeled processes (in and out of the realm of ground-water flow) and can be tailored for those applications.

1.4 This guide is not intended to be all inclusive. Each model application is unique and may require supplementary documentation and archival.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.6 *This guide offers an organized collection of information or a series of options and does not recommend a specific*

*course of action. This document cannot replace education or experience and should be used in conjunction with professional judgment. Not all aspects of this guide may be applicable in all circumstances. This ASTM standard is not intended to represent or replace the standard of care by which the adequacy of a given professional service must be judged, nor should this document be applied without consideration of a project's many unique aspects. The word "Standard" in the title of this document means only that the document has been approved through the ASTM consensus process.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:<sup>3</sup>

D 653 Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids

D 5447 Guide for Application of a Ground-Water Flow Model to a Site-Specific Problem

D 5490 Guide for Comparing Ground-Water Flow Model Simulations to Site-Specific Information

D 5609 Guide for Defining Boundary Conditions in Ground-Water Flow Modeling

D 5610 Guide for Defining Initial Conditions in Ground-Water Flow Modeling

D 5611 Guide for Conducting a Sensitivity Analysis for a Ground-Water Flow Model Application

E 978 Practice for Evaluating Mathematical Models for the Environmental Fate of Chemicals<sup>4</sup>

### 3. Terminology

#### 3.1 Definitions:

3.1.1 *application verification*—using a set of parameter values and boundary conditions from a calibrated model to approximate acceptably a second set of field data measured under similar hydrologic conditions.

3.1.1.1 *Discussion*—Application verification is to be distinguished from code verification, which refers to software testing, comparison to analytical solutions, and comparison

<sup>1</sup> This guide is under the jurisdiction of ASTM Committee D18 on Soil and Rock and is the direct responsibility of Subcommittee D18.21 on Ground Water and Vadose Zone Investigations.

Current edition approved July 1, 2006. Published August 2006. Originally approved in 1995. Last previous edition approved in 2000 as D 5718 – 95 (2000).

<sup>2</sup> *Ground-Water Modeling Compendium*, USEPA, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA-500-B-92-006, NTIS No. PB93207504. Available from the Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 20402.

<sup>3</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

<sup>4</sup> Withdrawn.

with other similar codes to demonstrate that the code represents its mathematical foundation.

3.1.2 *boundary condition*—a mathematical expression of a state of the physical system which constrains the equations of the mathematical model.

3.1.3 *calibration (model application)*—the process of refining the model representation of the hydrogeologic framework, hydraulic properties, and boundary conditions to achieve a desired degree of correspondence between the model simulation and observations of the ground-water flow system.

3.1.4 *calibration targets*—measured, observed calculated or estimated hydraulic head or ground-water flow rates which the model must reproduce, at least approximately, to be considered calibrated.

3.1.5 *conceptual model*—an interpretation or working description of the characteristics and dynamics of the physical system.

3.1.6 *computer code (computer program)*—the assembly of numerical techniques, bookkeeping, and control language that represents the model from acceptance of input data and instructions to delivery of output.

3.1.7 *ground-water flow model*—application of a mathematical model to represent a site-specific ground-water flow system.

3.1.8 *mathematical model*—(a) mathematical equations expressing the physical system and including simplifying assumptions; (b) the representation of a physical system by mathematical expressions from which the behavior of the system can be deduced with known accuracy.

3.1.9 *simulation log*—a log used to document (in terms of input data, code used, simulation purpose and results) of individual model simulations. (See [Appendix X1](#).)

3.2 For definitions of other terms used in this guide, see Terminology [D 653](#).

#### 4. Significance and Use

4.1 Ground-water flow models are tools frequently applied for the analysis of hydrogeologic systems. Due to the significance of many decisions based upon modeling results, quality assurance measures need to be applied to model applications. Complete model documentation is a mechanism to ensure the quality of the effort.

4.2 Several federal and state agencies have developed policies regarding model documentation. This guide provides consistency amongst current policies, and should be used as a framework for model documentation.

#### 5. Model Documentation

5.1 Model documentation includes written and graphical presentations of model assumptions and objectives, the conceptual model, code description, model construction, model calibration, predictive simulations, and conclusions.

5.2 *Introduction*—Present the modeling objectives, the function the model will serve, and a brief general setting of the model area. Identify the individuals involved with the modeling effort and their roles.

5.2.1 *Modeling Objectives*—Clearly state the modeling objectives, the purpose and goals of the study, and the applicability of the model as part of the study. Discuss what types of predictions are to be made with the model.

5.2.2 *Model Function*—Describe how the model was used to satisfy the purpose and goals of the study.

5.2.3 *General Setting*—Include a general setting of relevant information on the regional characteristics of topography, geology, hydrology, and land use. Present a regional map with the study area defined.

5.3 *Conceptual Model*—Present the conceptual model as a site-specific interpretation (based on collected data) of the characteristics and dynamics of the physical system being studied. Include discussion on the aquifer system (both geologic and hydrologic aspects), hydrologic boundaries, hydraulic properties, sources and sinks, and a water budget. The level of detail in this interpretation should be consistent with the available data. Present and discuss data set origins, strengths, deficiencies and their effects on the conceptual model.

5.3.1 *Aquifer System*—Present an interpretation of the geologic and hydrologic characteristics of the aquifer system. Where appropriate, present hydrogeologic cross-sections and structural contour and potentiometric surface maps to illustrate data and interpretations.

5.3.2 *Hydrologic Boundaries*—Discuss the hydrologic boundaries that exist and their type(s) for the aquifer system.

5.3.3 *Hydraulic Properties*—Present known hydraulic properties of the aquifer system, such as hydraulic conductivity, transmissivity, storativity, and porosity. If these parameters vary spatially, present the interpretation in map form.

5.3.4 *Sources and Sinks*—Present details on the location (if a point source or sink), and the relative magnitude of the source(s) or sink(s). If the source or sink is areal in extent, present information as to the variability or distribution.

5.3.5 *Water Budget*—Present a water budget (either qualitative or quantitative, depending on the study objectives) that interprets how water is entering the aquifer system, how it moves through the aquifer system, and how it exits the aquifer system.

5.4 *Computer Code Description*—Present a description of the code used and discuss the selection criteria for the code. If a custom or altered code is used, list the vendor name, any enhancements to the code, and how the code was tested. Present the simplifying assumptions inherent to the code, the limitations to the code, and the governing equations that the code solves.

5.4.1 *Assumptions*—Describe the assumptions built into the code, and justify the use of the code based on the study objectives and the conceptual model.

5.4.2 *Limitations*—Describe the limitations to the code, and the adequacy of its use based on study objectives and the conceptual model interpretation.

5.4.3 *Solution Techniques*—Describe the solution technique(s) used by the code.

5.4.4 *Effects on Model*—Describe how the assumptions and limitations of the code affect model construction, and their impact (positive or negative) on model results.

5.5 *Model Construction*—Define the model domain. Define initial conditions, boundary conditions, and hydraulic conditions, and the validity of their selection. Discuss any simplifying assumptions made to the conceptual model. Discussion should reference how the conceptual model is compatible with the modeling objectives and function. See Guide [D 5610](#).

5.5.1 *Model Domain*—Present the model domain as an overlay on a topographic map of appropriate scale. Model grid spacing or element size should be discussed and justified based on model objectives and the conceptual model. Preprocessing and postprocessing of model data must be thoroughly documented, including any computer codes used. If the model construction is three-dimensional, describe how the layering is constructed into the model, and justify the layering based on the conceptual model.

5.5.2 *Hydraulic Parameters*—Present hydraulic parameters assigned throughout the model area. If parameter values vary spatially in the model, present this distribution in map form. Refer to the conceptual model.

5.5.3 *Sources and Sinks*—Present sources and sinks, their respective stress rates, and how they are incorporated in the model.

5.5.4 *Boundary Conditions*—Present in map form boundary conditions constructed into the model. Describe the types of boundaries, and justify their use based on the conceptual model. See Guide [D 5609](#).

5.5.5 *Selection of Calibration Targets and Goals*—Present the calibration targets and the goals of the calibration and justify them based on the accuracy of the data used to construct the model and the study objectives.

5.5.6 *Numerical Parameters*—Present selection of any numerical parameters used in the solution technique (that is, closure criterion, acceleration, seed factor).

5.6 *Calibration*—Present and discuss model calibration procedures. Present the results of the calibration simulation in map form and compare to hydraulic head and flow data. Discuss comparison of calibration simulations to site-specific information using qualitative and quantitative techniques (see Guide [D 5490](#)). Discuss sensitivity analyses and the model verification. Discuss and present the simulation's overall water budget and mass balance. Discuss additional insight gained from the calibration regarding the conceptual model. Justify any changes made to the conceptual model. Document any preprocessing or post-processing algorithms, and any parameters these algorithms use for processing.

5.6.1 *Qualitative/Quantitative Analysis*—Describe the type of analyses used to compare calibration to site-specific data and present their results. See Guide [D 5490](#).

5.6.2 *Sensitivity Analysis*—Present the goals of the sensitivity analysis. Document the procedures used and the results of the sensitivity analysis, and their effects on the model. Focus should be made on those parameters least well defined and most critical to the model. Justify the range of the sensitivity

analyses based on the accuracy of the data. Provide the results of the sensitivity analysis in tabular or graphic form. See Guide [D 5611](#).

5.6.3 *Model Application Verification*—Model application verification goals should be presented and discussed. Results of the verification should be presented in map form. Residuals should be presented and their significance discussed. Discuss and present the simulation's overall water budget and mass balance.

5.7 *Predictive Simulations*—Describe any predictive simulations and how they relate to the study objectives. Detail and justify the changes made to permit the calibrated model to simulate these predictions. Present results of any predictive simulations in graphical form.

5.8 *Summary and Conclusions*—Summarize the modeling effort and draw conclusions related to the study objectives. Discuss uncertainties inherent to the model and their effects on conclusions derived from the model.

5.9 *References*—Provide references for data, computer codes, and modeling procedures used as part of the modeling effort.

## 6. Model Archive

6.1 Maintain a model archive consisting of sufficient information generated during the modeling effort that a post-modeling audit could be adequately performed by a third party and such that future reuse of the model is possible. Components of the archive include the copies of the original data used to construct the model, simulation logs, a copy of computer codes used in the effort, a copy of the report documentation, and copies of model input and output (hard copy or digital format, or both, as appropriate) for the final calibration simulation and predictive simulations explored.

6.2 *Simulation Logs*—Archive a paper copy of the simulation log for each significant model simulation, that including the modeler's name, the simulation date, the project name/number, the simulation number, the code used (and version), the purpose of the run, the input file names, comments on the input data, the output file names, and comments on the results. An example is presented in [Appendix X1](#).

6.3 *Computer Code*—Archive a digital copy of the executable code and if possible a copy of the source code for computer codes used in preprocessing, simulating and postprocessing. Include documentation or references for computer codes used.

6.4 *Model Documentation*—Archive a paper copy of model documentation.

6.5 *Input and Output*—At a minimum, archive model input and output for the calibration simulation, the model verification simulation, sensitivity analyses and predictive simulations.

## 7. Keywords

7.1 archival; documentation; ground-water model; simulation



 **D 5718 – 95 (2006)**

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or [service@astm.org](mailto:service@astm.org) (e-mail); or through the ASTM website ([www.astm.org](http://www.astm.org)).*