

# Modello numerico idrogeologico - geotermico preliminare del bacino delle Acque Albule (Roma): prospettive future di sfruttamento della risorsa

## *Groundwater – Geothermal preliminary model of the Acque Albule Basin (Rome): future perspectives of geothermal resources exploitation*

Francesco La Vigna, Angela Gnoni

**Riassunto:** Questo lavoro presenta i risultati preliminari derivati dall'applicazione di un modello numerico del flusso e del trasporto di calore, al sistema idrotermale della Piana di Tivoli-Guidonia, nella campagna subito ad Est dell'Urbe. Nell'area in esame, caratterizzata da uno spesso deposito di travertino affiorante, è presente fin dall'epoca romana un'attività estrattiva per la coltivazione di questo importante litotipo che oggi è cavato in approfondimento verticale con l'ausilio di un'importante opera di dewatering.

Da un punto di vista idrogeologico l'acquifero della Piana di Tivoli-Guidonia, situato nel deposito di travertino, riceve la sua ricarica prevalente nei rilievi carbonatici Lucretili e Cornicolani. Questi lo alimentano parzialmente per trabocco laterale, nei settori settentrionali e orientali, e prevalentemente per sifonamento dal basso, nella sua zona centrale, in corrispondenza di discontinuità degli acquicludi pliocenici. Queste acque in risalita

ricevono inoltre un importante contributo in termini di calore e mineralizzazione dando luogo alle note manifestazioni idrotermali delle Acque Albule.


Le simulazioni preliminari del modello riproducono in modo piuttosto fedele la diffusione dei plumes termici rilevati nelle acque dell'acquifero superficiale.

**Abstract:** *This work presents the preliminary results of a groundwater and geothermal model applied to the hydrothermal system of the Tivoli-Guidonia plain, located in the east surroundings of Rome. This area, which is characterized by a thick outcropping travertine deposit, has been an important quarry extraction area since roman age. Today the extraction is in deepening helped by a large dewatering action.*

*By an hydrogeological point of view, the travertine aquifer of the Tivoli-Guidonia Plain, is recharged by lateral discharge in the Lucretili and Cornicolani Mts., and by piping trough important regional faults, located in the basal aquiclude, in the central area of the basin. Piping hydrothermal groundwater is the main contribution on flow in the basin. Preliminary simulations of the groundwater-geothermal model, reproduce quite well the heat and mineralization plumes of groundwater observed in the travertine aquifer.*

**Parole chiave:** modellazione idrogeologica, modellazione trasporto di calore, Modflow2005, Seawat, MT3DMS

**Keywords:** *Groundwater modelling, Heat transport modelling, Modflow2005, Seawat, MT3DMS*

Francesco LA VIGNA   
Roma Capitale  
Dip. Tutela Ambientale - Protezione Civile  
Ufficio Geologia e Idrogeologia Ambientale  
Circonvallazione Ostiense 191 - 00154 Roma  
francesco.lavigna@comune.roma.it

Angela GNONI  
Sapienza Università di Roma  
via Eudossiana 18 - 00184 Roma  
angela.gnoni@uniroma1.it

Ricevuto: 09 agosto 2013 / Accettato: 30 dicembre 2013  
Pubblicato online: 21 febbraio 2014

© Associazione Acque Sotterranee 2013

### Introduzione

La modellazione numerica degli acquiferi, negli ultimi decenni ha costituito, e costituisce tutt'oggi, un importante strumento di lavoro nello studio dei sistemi acquiferi. La diffusione su larga scala di strumenti informatici molto performanti e lo stato di avanzamento e la commercializzazione dei più diffusi codici di simulazione numerica esistenti, con le relative interfacce grafiche, hanno fatto della modellistica numerica idrogeologica una vera e propria disciplina a corredo dell'idrogeologia classica. Questa grande diffusione ed utilizzo della modellistica è stata anche dettata dall'esigenza di studiare il trasporto dei vari tipi di inquinanti nelle falde acquifere. Negli ultimi anni, in seguito al crescente bisogno di energia e alla ricerca di fonti energetiche alternative ai combustibili fossili, la modellistica idrogeologica si è dedicata anche allo studio e alla simulazione del trasporto di calore negli acquiferi. Questo per poter studiare nel dettaglio le risorse geotermiche a bassa entalpia (Buonasorte et al., 2011), il dimensionamento degli impianti di sfruttamento, le modificazioni indotte dagli impianti sulla falda e le zone più idonee

allo sfruttamento. Ad esempio, un grande problema in cui possono incorrere i progettisti di impianti geotermici a bassa entalpia, sia “a circuito chiuso” che del tipo “open loop”, è la cosiddetta “corto-circuitazione termica” (Cultrera, 2012); questo fenomeno impedisce, nei punti di sfruttamento, il ritorno delle condizioni termiche iniziali del sottosuolo comportando nel tempo un surriscaldamento (o raffreddamento) incrementale, che determina il malfunzionamento degli impianti o il loro andare in stallo.

La modellistica del trasporto di calore permette di simulare i periodi di funzionamento degli impianti e il sistema naturale con le sue stagionalità permettendo quindi un corretto dimensionamento e, dove occorre una corretta pianificazione del territorio (Piccinini et al., 2012).

L'obiettivo di questo lavoro è quello di definire uno strumento di gestione che simuli le condizioni naturali del sistema idrotermale di seguito presentato per ipotizzare possibili forme di sfruttamento della risorsa geotermica a bassa entalpia.

### Inquadramento dell'area

La piana delle Acque Albule, vicino la Città di Roma, è un bacino subsidente collocato ai piedi dei primi rilievi appenninici del Lazio, immediatamente a Nord del Vulcano dei Colli Albani (Fig.1). La vicinanza con questo complesso vulcanico

ha favorito lo sviluppo di intense manifestazioni idrotermali presenti (De Filippis et al., 2013, Faccenna et al., 2008), che assieme alla forte subsidenza tettonica sviluppatasi su un importante sistema di faglie trascorrenti orientate N-S, hanno favorito il deposito di un corpo di travertino spesso più di 80 metri. L'attività idrotermale è ancora presente, sebbene in forma non parossistica, come indicato dalla risalita di gas e acque minerali con temperatura e concentrazione salina piuttosto elevate ( $23^{\circ}\text{C}$  –  $3000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Le acque termominerali emergono in diverse sorgenti con portate complessive di diversi  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Molteplici studi hanno largamente descritto nel dettaglio l'idrogeologia di questo settore (Capelli et al., 1987, Carucci et al., 2012, La Vigna et al., 2012) e recentemente sono stati realizzati differenti modelli numerici (Brunetti et al., 2012, La Vigna et al., 2013) che simulano sia l'acquifero dei travertini che quello dei carbonati sottostanti, con l'obiettivo di gestire meglio le risorse idriche. Il presente lavoro deriva dall'implementazione integrativa, per la simulazione del trasporto di calore, di uno di questi modelli precedentemente sviluppati. Questo modello (La Vigna, 2009) era stato realizzato originariamente per il solo flusso, usando il codice di calcolo MODFLOW2005 (Harbaugh, 2005) ed è calibrato con il codice di calcolo UCODE2005 (Poeter et al., 2005, La Vigna et al., 2011).

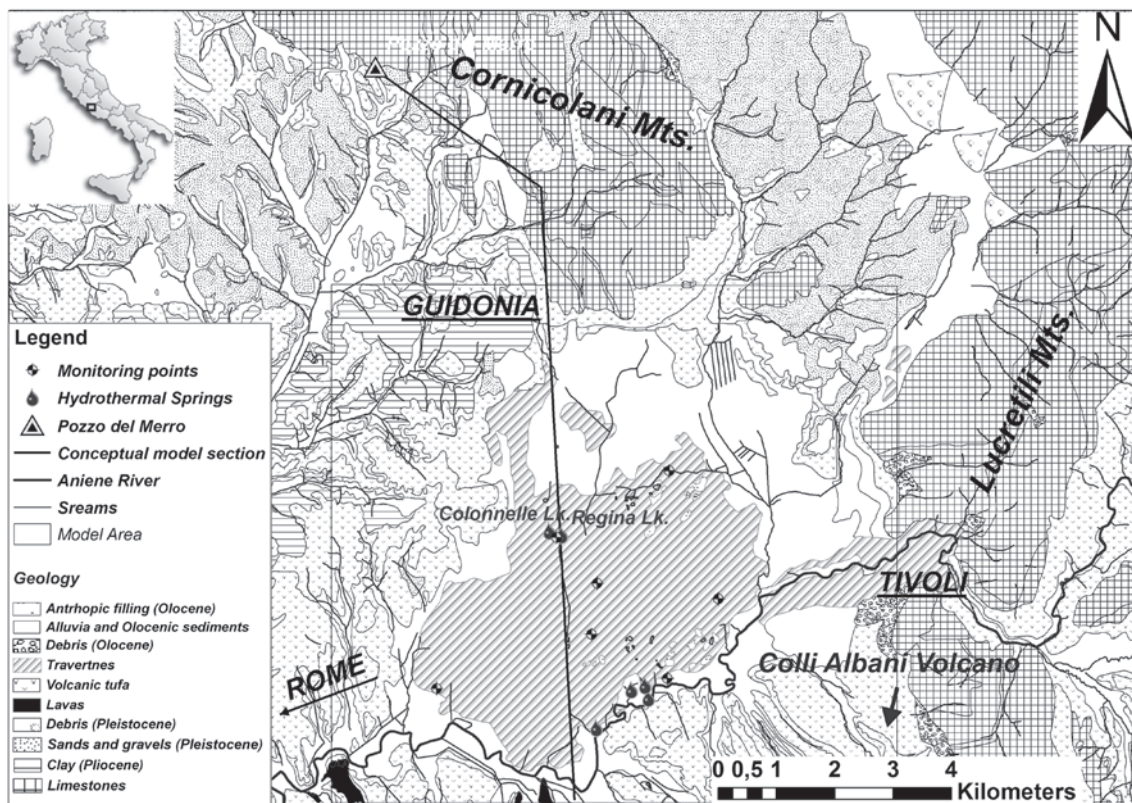


Fig. 1 - La piana delle Acque Albule. Sono evidenziate le principali sorgenti, le località, il fiume Aniene, l'assetto geologico generale e la traccia di sezione concettuale di Fig.2.

Fig. 1 - The Acque Albule plain. Main springs, towns, the Aniene River, the geological setting and the conceptual cross section development of Fig.2 are shown.

### Modello concettuale idrogeologico-geotermico

Il modello idrogeologico concettuale del Bacino delle Acque Albule è stato descritto nel dettaglio da La Vigna et al. (2012). Il sistema è caratterizzato da due principali acquiferi, uno profondo confinato nel substrato carbonatico mesozoico (profondità del tetto variabili ma sempre >200 m) ed un altro freatico nei travertini (spessi fino ad 80 metri circa). Dei sedimenti a bassissima permeabilità argillosi posti tra il substrato carbonatico e i travertini confinano l'acquifero profondo. Localmente, l'acquicluda è interrotto (presumibilmente per ragioni tettoniche) e le acque idrotermali profonde riescono a risalire verso l'acquifero superficiale dei travertini. Un minore contributo di flusso verso l'acquifero superficiale viene dal settore settentrionale della piana per travaso laterale. L'acquifero superficiale è drenato dal Fiume Aniene (affluente di sinistra del Tevere; La Vigna et al., 2010) ed è interessato da una intensa attività di dewatering per permettere alle attività estrattive di approfondire le cave di travertino.

Il modello concettuale di circolazione prevede quindi in sintesi che le acque del serbatoio carbonatico profondo ricaricate nelle aree di affioramento dei Monti Lucretili e Cornicolani, una volta intercettate le faglie al di sotto della piana di Tivoli-Guidonia, ricevano un forte afflusso di fluidi gassosi in risalita che ne modificano il chimismo (Carucci et al., 2012) aumentando la concentrazione di carbonati e la temperatura. Lungo le stesse direttrici tettoniche, un intenso flusso di queste acque risale, verso l'acquifero superficiale, dando luogo alle manifestazioni idrotermali e diffondendosi all'interno delle fratture dei travertini (Fig.2).

### Dati disponibili e metodi

I dati utilizzati per la realizzazione di questo modello sono stati raccolti in anni di rilevamenti sul terreno e durante uno studio recente sull'idrogeologia locale (La Vigna et al., 2012). Si tratta di numerose misure piezometriche, monitoraggi in continuo delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque sotterranee, misure di portata delle sorgenti e delle pompe da dewatering delle attività estrattive. A partire da questi dati puntuali sono state anche prodotte una piezometria e una carta della temperatura degli acquiferi (Fig.3).

Per la modellazione numerica è stato utilizzato il codice di calcolo MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005), il più recente codice alle differenze finite sviluppato dal Servizio Geologico degli Stati Uniti (U.S.G.S.). L'interfaccia grafica utilizzata è stata Groundwater Vistas 5.9 Esi. Il modello in principio è stato implementato e calibrato in stato stazionario e solo per il flusso, mentre successivamente è stato implementato in stato transitorio per simulare il trasporto di calore.

Il modello concettuale è stato tradotto in un modello di circa 100 Km<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 localmente per meglio rappresentare le reali condizioni di continuità idraulica tra gli acquiferi come indicate in Tab.1. Nonostante i travertini e i carbonati presentino permeabilità secondaria, per le finalità dello studio a carattere prevalentemente regionale, si è ritenuto una buona approssimazione l'uso dell'approccio a mezzi porosi equivalenti (Anderson e

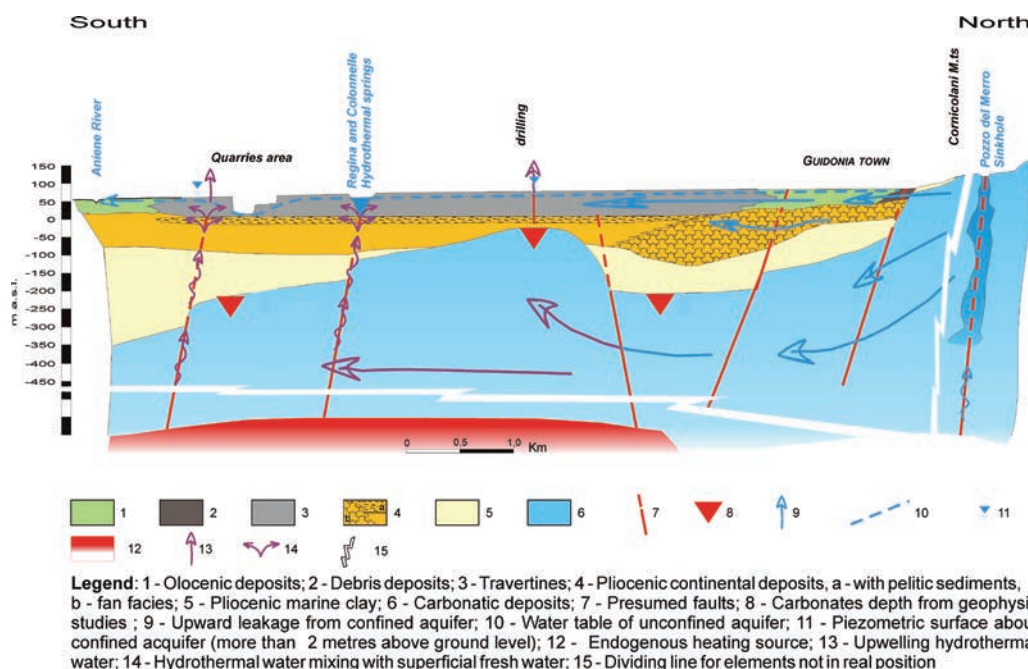


Fig. 2 - Modello concettuale idrogeologico-geotermico del bacino delle Acque Albule (da La Vigna et al. 2012). La traccia di sezione è riportata in Fig.1.

Fig. 2 - Hydrogeological-geothermal conceptual model of the Acque Albule basin (from La Vigna et al., 2012). The development of the conceptual cross section is shown in Fig.1.

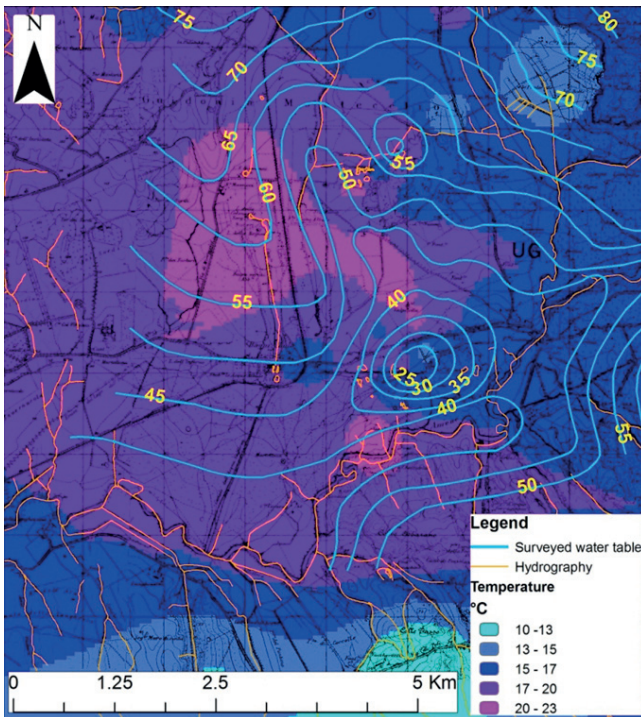


Fig. 3 - Carta piezometrica e del termalismo degli acquiferi della piana delle Acque Albule (da La Vigna et al., 2012).

Fig. 3 - Hydrogeological and thermic map of the Acque Albule plain (from La Vigna et al., 2012).

Tab. 1 - Conducibilità idrauliche del modello di flusso della Piana delle Acque Albule.

Tab. 1 - Hydraulic conductivities of the Acque Albule groundwater flow model.

Zone	Geology	kx (m/s)	ky (m/s)	kz (m/s)
zone1	Carbonates	4,86E-02	4,86E-02	4,86E-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	2,66E-01	2,66E-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

Woessner, 1992, La Vigna et al., 2009).

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, 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 saturate 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.]). Il Fiume Aniene è stato rappresentato con il River Package, le sorgenti presenti con il Drain Package, mentre il Well Package è stato attribuito a tutte le celle corrispondenti alle aree in cui sono presenti le pompe utilizzate per il dewatering dell'area estrattiva. La ricarica sull'area del modello è stata implementata con il Recharge Package, inserendo localmente dei valori negativi

in funzione del prelievo da pozzi sull'acquifero superficiale e l'effettiva differenza con il valore di infiltrazione efficace per ogni cella. Per evidenziare i percorsi delle acque in risalita dal basso, nelle celle del terzo layer sono state inserite le particelle previste utilizzando il Particle Package (Pollok, 1989).

La calibrazione del modello di flusso è stata effettuata (La Vigna et al, 2011) in parte secondo metodologia "trial & error", in parte tramite l'utilizzo del codice di modellazione inversa UCODE-2005 (Poeter et al., 2005). Anche 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 (Fig.4). I dettagli più approfonditi del processo di calibrazione del modello di flusso delle Acque Albule sono riportati nei lavori di La Vigna (2009) e La Vigna et al. (2011).

Sulla base degli esiti della calibrazione si è deciso di suddividere la placca in due sottozone a conducibilità idraulica

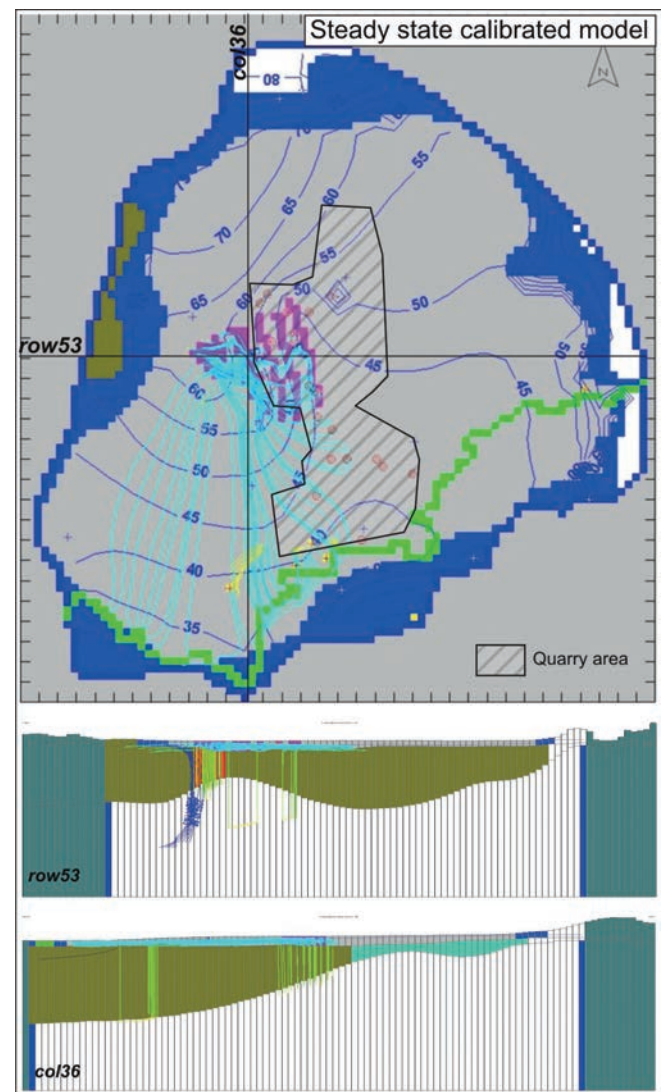


Fig. 4 - Modello del flusso calibrato del bacino delle Acque Albule (modificato da La Vigna, 2009).

Fig. 4 - Groundwater flow calibrated model of the Acque Albule basin (modified from La Vigna, 2009).

differente. Infatti mentre nel settore centrale della piana il travertino presenta fratture beanti sub verticali attraverso cui l'acqua fluisce in modo molto rapido, gli altri settori presentano una fatturazione diffusa con un'orientazione che segue il trend tettonico locale (Faccenna et al., 1994, 2008).

Una volta calibrato il modello per la parte inerente al flusso si è proceduto ad implementare le condizioni al contorno relative al trasporto di calore. Per simulare il trasporto di calore il modello è stato fatto girare in transitorio per 10 anni considerando le condizioni al contorno come stazionarie. Questa scelta non è stata effettuata per simulare un vero e proprio stato transitorio, ma per simulare l'andamento del trasporto di calore nel tempo a parità di condizioni. A questo scopo sono stati utilizzati i moduli MT3DMS (Zheng e Wang, 1999) e SEAWAT (Langevin et al, 2007) accoppiati con MODFLOW2005. Il valore di concentrazione salina (TDS) nel reservoir profondo è stato fissato a 3.6 g/L e la temperatura a 24°C in accordo con le specifiche della facies idrogeochimica (Carucci et al., 2012). Nelle acque del Fiume Aniene la concentrazione salina (TDS) è stata fissata in 0.8 g/L e la temperatura in 15°C (Fig.5). Questi stessi valori di concentrazione e temperatura

attribuiti all'Aniene sono stati implementati come condizione iniziale del modello transitorio. Le caratteristiche termiche delle litologie sono state assegnate integrando le litologie a comportamento termico simile (Fig.6). In particolare sono state individuate tre classi di litologie, una prevalentemente sabbiosa, una prevalentemente argillosa ed una relativa alle rocce carbonatiche (calcarei e travertini) con le specifiche Kd e Bulk Density indicate in Figura 6 .

**Risultati**

Le simulazioni del modello in stato stazionario del solo flusso mostrano in maniera chiara il grande cono di emungimento messo in opera dalle attività estrattive e il flusso delle acque sotterranee che provengono dalle zone di risalita delle acque profonde e dall'Aniene.

Le particelle impostate nelle celle del terzo strato mostrano il flusso idrotermale che parte dall'acquifero profondo confinato verso il superficiale libero per poi essere richiamate dalla depressione del dewatering (Fig.4).

Lo scenario simulato dopo il decimo anno mostra chiaramente il plume di acque a temperatura maggiore che fuori-

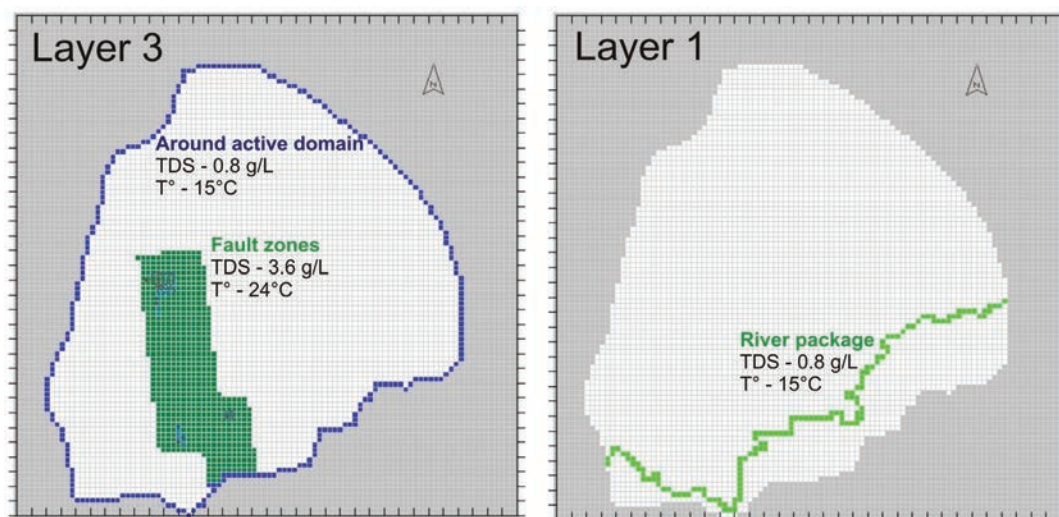


Fig. 5 - Condizioni al contorno del modello idrogeologico-geotermico delle Acque Albule.

Fig. 5 - Boundary conditions of the hydrogeological-geothermal Acque Albule model.

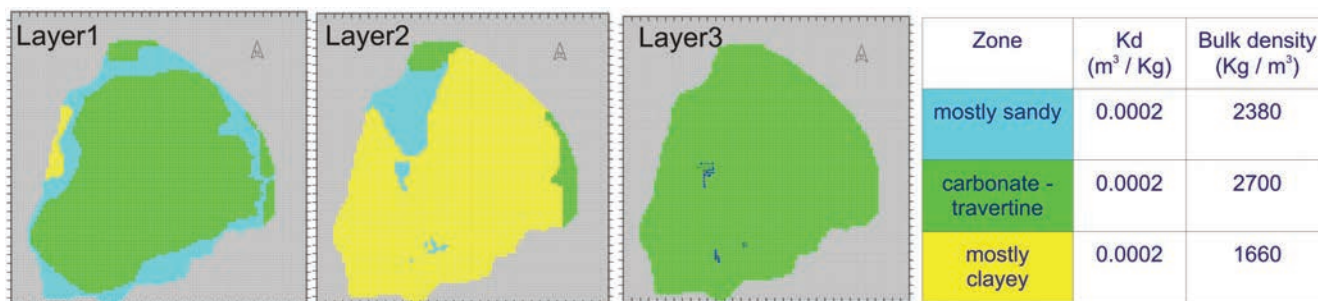


Fig. 6 - Caratteristiche fisiche degli acquiferi per la modellazione geotermica.

Fig. 6 - Physical parameters for the geothermal model.

escono dalle aree sorgive e si distribuiscono secondo le linee di flusso messe in evidenza precedentemente dalle particelle (Fig.7). La distribuzione e l'andamento dei plumes termici è del tutto confrontabile con la carta delle temperature rilevate (La Vigna et al., 2012).

### Discussione e conclusioni

Questo modello preliminare del trasporto di calore del Bacino delle Acque Albule riproduce una diffusione delle acque termalizzate piuttosto fedele allo scenario di rilevamento. Le aree a maggiore anomalia termica dell'acquifero superficiale vengono evidenziate dai plumes che scaturiscono dalle principali aree soggette a risalita delle acque profonde. Questo è visibile confrontando le Figure 3 e 7 dove, fatta eccezione per un plume che si dirige in direzione Est, le aree caratterizzate da anomalie termiche nei risultati della simulazione (Fig.7) sono piuttosto fedeli a quelle del rilevamento manuale (Fig.3).

La possibile riconversione dell'area estrattiva, una volta esaurito il litotipo, in una area a forte utilizzo delle risorse geotermiche a bassa entalpia, permetterebbe una considerevole riqualificazione urbanistica. La favorevole temperatura delle

acque e la grande quantità di acqua effluente dalle aree sorgive potrebbe inoltre permettere la sperimentazione di nuove tecnologie per lo sfruttamento energetico della risorsa.

Anche oggi, con il presente assetto del sistema di dewatering in atto, essendo le acque emunte coltate in un sistema di tubazioni di grande diametro per poi essere scaricate nell'Aniene, si potrebbe prevedere la sostituzione dei collettori esistenti con collettori dotati di scambiatori termici. Questo permetterebbe di sfruttare, e non disperdere, tutta l'energia termica in carico nelle acque che, come visto, hanno temperature maggiori di 20° durante tutto l'anno.

Prima di un ipotetico utilizzo a scopi previsionali del modello di trasporto di calore, sarà però necessario ultimare la calibrazione numerica in corso di realizzazione. Una volta calibrato, il modello potrà essere quindi implementato per scopi previsionali e quindi per pianificare la distribuzione più idonea di eventuali impianti di geoscambio.

Inoltre il modello realizzato può costituire una base di informazioni ad ampia scala sulla zona divenendo un modello "madre" da cui possono essere realizzati modelli "figli" a scala più dettagliata su ambiti ristretti per scopi specifici.

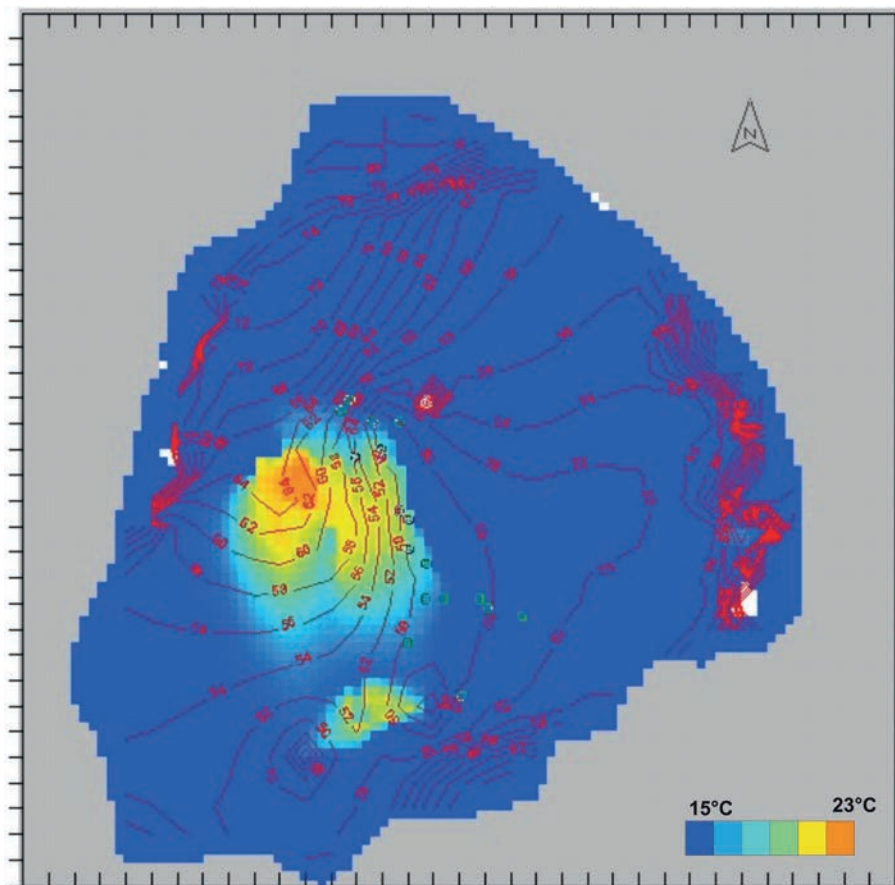


Fig. 7 - Diffusione del plume termico simulata dal modello preliminare idrogeologico geotermico.

*Fig. 7 - Simulated heat diffusion in groundwater of the preliminary hydrogeological-geothermal model.*

**BIBLIOGRAFIA**

- Anderson, M.P., Woessner, W.W. (1992) – Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, Inc., San Diego: US.
- Brunetti E., Jones J.P., Petitta M., Rudolph D.L. (2012). Assessing the impact of large-scale dewatering on fault-controlled aquifer systems: a case study in the Acque Albule basin (Tivoli, central Italy).
- Buonasorte G., Cataldi R., Franci T., Grassi W., Manzella A., Meccheri M., Passaleva G. (2011). Previsioni di crescita della Geotermia in Italia fino al 2030. Per un nuovo manifesto della geotermia italiana. UGI, Pacini Editore, Ospedaletto-Pisa.
- Capelli G., Cosentino D., Messina P., Raffi R. & Ventura G. (1987) – Modalità di ricarica e assetto strutturale dell'acquifero delle sorgenti Capore – S. Angelo (Monti Lucretili – Sabina Meridionale). *Geologica Romana*, Vol.26 (419-447).
- Carucci V., Petitta M., Aravena R. (2012). Interaction between shallow and deep aquifers in the Tivoli Plain (central Italy) enhanced by groundwater extraction: a multi-isotope approach and geochemical modeling. *Applied Geochemistry* 27:266-280.
- Cultrera M. (2012). Corto circuito termico nei sistemi di geoscambio a circuito aperto. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater* 3/130:85-86.
- De Filippis L., Anzalone E., Billi A., Faccenna C., Poncia P.P., Sella P. (2013). The origin and growth of a recently-active fissure ridge travertine over a seismic fault, Tivoli, Italy. *Geomorphology* 195, 13–26, Elsevier.
- Faccenna, C., Soligo, M., Billi, A., De Filippis, L., Funicello, R., Rossetti, C., Tuccimei, P. (2008). Late Pleistocene depositional cycles of the Lapis Tiburtinus travertine (Tivoli, Central Italy): Possible influence of climate and fault activity”, *Global and Planetary Change* 60 299-308, Elsevier.
- Faccenna C., Funicello R., Montone P., Parotto M. & Voltaggio M. (1994) – Late Pleistocene Strike-Slip tectonics in the Acque Albule-basin (Tivoli – Latium). *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*, Vol. XLIX, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- Harbaugh A.V. (2005) – MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model - the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.
- Langevin C.D., Thorne Jr D.T., Dausman A.M., Sukop M.C., Guo W. (2007). SEAWAT version 4: a computer program for simulation of multi-species solute and heat transport: US Geological Survey Techniques and Methods Book 6. Chapter A22, 39.
- La Vigna F., Mazza R., Capelli G. (2013) Le risorse idriche nei travertini della piana di Tivoli-Guidonia. La modellazione numerica come strumento di gestione degli acquiferi. *Rend. Online Soc. Geol. It.* 27: 77-85. DOI: 10.3301/ROL.2013.21
- La Vigna F., Mazza R., Capelli G. (2012) Detecting the flow relationships between deep and shallow aquifers in an exploited groundwater system, using long-term monitoring data and quantitative hydrogeology: the AcqueAlbule basin case (Rome - Italy). *Hydrological Processes*, Wiley, DOI:10.1002/hyp.9494.
- La Vigna F., Rossetto R., Mazza R., Capelli G. (2011). Can we calibrate a complex groundwater model just by running an automatic calibration code? A case study from Italy: The AcqueAlbule Plain model (Rome). *IAHS Publication* 341.
- La Vigna F., Ciadamidaro S., Mazza R., Mancini L. (2010). Water quality and relationship between superficial and ground water in Rome (Aniene river basin, central Italy). *Environ Earth Sci.* DOI 10.1007/s12665-009-0267-2
- La Vigna F. (2009). Modello numerico del flusso dell'unità idrogeologica termominerale delle Acque Albule, Tesi di Dottorato, XXI° Ciclo. Università degli Studi RomaTRE. <http://hdl.handle.net/2307/434>
- La Vigna F., Teoli P., Mazza R., Rossetto R. (2009). Approccio al mezzo poroso equivalente nella simulazione dei sistemi idrogeologici fratturati – il caso della Piana delle Acque Albule, Roma. In *Atti del 3° Congresso Nazionale AIGA*. Centro di Geotecnologie, S. Giovanni Valdarno
- Piccinini L, Vincenzi V., Pontin A., Tonet F. (2012). Modello di trasporto di calore per il dimensionamento di un sistema di geoscambio a circuito aperto. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater* 3/130:67-79
- Poeter, E.P., Hill, M.C., Banta, E.R., Mehl, S., Christensen, S. (2005) – UCODE\_2005 and Six Other Computer Codes for Universal Sensitivity Analysis, Calibration and Uncertainty Evaluation. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods* 6-A11
- Pollock, D.W., 1989. Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three dimensional finite difference groundwater model. U.S. Geological Survey Openfile Report.
- Zheng, C., & Wang, P. P. (1999). MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. ALABAMA UNIV UNIVERSITY.