

L'acquifero nelle ghiaie di base del Tevere: una risorsa geotermica per la città di Roma

The geothermal resources of the city of Rome: the case study of the confined aquifer within the basal conglomerate of the Tiber river alluvional deposits

F. BARBERI*, M.L. CARAPEZZA**,
G. GIORDANO*, A. PENSA*, M. RANALDI*

RIASSUNTO - Significativi risparmi di combustibili fossili e di elettricità e una forte riduzione dell'inquinamento atmosferico possono essere realizzati utilizzando risorse geotermiche di entalpia molto bassa, con temperature anche inferiori a 20 °C, per il riscaldamento invernale e il condizionamento estivo di ambienti. I risultati di questo studio mostrano che l'acquifero contenuto nelle ghiaie di base del Tevere rappresenta una importante risorsa geotermica per la città di Roma per questi tipi di impieghi termici. Il processamento dei dati stratigrafici di 216 pozzi perforati negli anni scorsi nelle alluvioni oloceniche del Tevere hanno consentito di elaborare mappe del tetto, del letto e quindi dello spessore delle ghiaie di base. L'acquifero si incontra a profondità tra 30 e 60 m dal piano di campagna, più alta verso sud, nelle zone dell'EUR e meno a nord di Monte Mario. Questi dati indicano che la risorsa geotermica può essere estratta con pozzi di costo molto limitato. Lo spessore dell'acquifero di base è in genere intorno a 10-15 m, ma cresce a fino a oltre 30-40 m all'altezza della confluenza con l'Aniene, nel tratto nord del fiume e vi sono varie zone con spessori di 15-20 m. La continuità è ottima lungo l'asse del fiume e assicura una buona alimentazione longitudinale, accresciuta da contributi laterali nelle zone dove le ghiaie vengono a contatto con livelli permeabili. L'acquifero è confinato verso il basso dalle argille plioceniche della Formazione di Monte Vaticano e verso l'alto dai depositi limosi impermeabili del Tevere che, impedendo la percolazione verticale delle piogge e dell'acqua del fiume, lo proteggono da fattori inquinanti e da effetti termici stagionali. I parametri chimico-fisici misurati su 17 pozzi, indicano una temperatura (T) dell'acqua che varia tra 16 e 21,6 °C, ma con una prevalenza di valori intorno a 18-19 °C che appaiono ideali per usi termici sia estivi che invernali. Il pH è per lo più neutro o leggermente acido in alcune zone. La conducibilità elettrica è localmente piuttosto elevata con valori fino a o di poco superiori a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. È stato stimato un fabbisogno intorno a 20 l/s di acqua geotermica con T = 17-18 °C per riscaldare e condizionare un grosso condominio di 40.000 m³. L'acquifero di base del Tevere può facilmente fornire tali quantitativi di acqua in vari punti della città, considerato che comunque l'acqua, dopo la sua utilizzazione, dovrà essere reiniettata nell'acquifero di provenienza.

PAROLE CHIAVE: risorse geotermiche di bassa entalpia, acquifero di base nei depositi del Tevere, Roma

ABSTRACT - Significant savings in the fossil fuel and electric energy consumption and a strong reduction of the atmospheric pollution can be obtained by using low enthalpy geothermal resources, with temperature near or even below 20 °C for space indoor heating and conditioning. The results of this study indicate that the aquifer contained in the basal gravels of Tiber river represents an important geothermal resource for this kind of direct heat utilization in the city of Rome. Maps describing the variation along the river course of the top, bed and hence thickness of the base gravels have been obtained by processing the stratigraphic data of 216 wells drilled in the past in the Tiber alluvional deposits. The aquifer top is found at 30-60 m depth from the ground, with larger higher depths being found in the southern EUR zone and the shallower ones in the zone north of Monte Mario. These values indicate that the geothermal water can be easily extracted with low-cost wells. The thickness of the base aquifer is usually around 150 m, but it rises up to 30-40 m in the river northern sector and to 15-30 m in several other zones. There is an excellent continuity of the aquifer along the river course, that ensures a good longitudinal water recharge, that is increased by lateral contribution from zones where gravels are in contact with permeable rocks. The aquifer is confined downward by the Monte Vaticano pliocenic shales and upward by impervious Tiber silt deposits. The latter prevent vertical percolation of rain and river waters and protect the basal aquifer from both pollution and seasonal thermal effects. Physico-chemical parameters measured in 17 wells indicated a water temperature (T) ranging from 16 to 21.6 °C, but usually around 18-19 °C, values that are ideal for direct heat utilization. The pH is mostly neutral and slightly acid in some zones, whereas electrical conductivity is locally rather high with values slightly exceeding 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. It has been estimated that 20 l/s of a geothermal water with a T of 17-18 °C are needed for winter heating and summer cooling of a 40,000 m³ space. The base Tiber basal aquifer can easily provide such a resource in several zones of Rome city considering that the water, after its utilization, will have to be reinjected into the provenance aquifer.

KEY WORDS: low enthalpy geothermal resources, base aquifer in the Tiber deposits, Rome.

* Dipartimento di Scienze Geologiche - Università degli Studi "Roma Tre", Largo San Leonardo Murialdo, 1 - 00146 Roma

** Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione Roma 1, Via di Vigna Murata, 605 - 00143 Roma

1 - INTRODUZIONE

Nelle aree urbane, il riscaldamento invernale e il condizionamento estivo degli ambienti rappresentano uno dei principali consumi di combustibili fossili e di elettricità. Il riscaldamento contribuisce inoltre, in modo significativo, all'inquinamento ambientale a causa degli scarichi di gas dalle caldaie. L'uso a questi fini di risorse geotermiche a bassa o bassissima entalpia presenti nel sottosuolo può essere estremamente competitivo o addirittura vantaggioso rispetto ai sistemi tradizionali soprattutto considerato il costo crescente del petrolio. La città di Roma è un sito ideale per queste applicazioni, sia perché gli studi idrogeologici indicano che nel sottosuolo sono presenti risorse geotermiche (acque calde) anche a profondità di poche decine o centinaia di metri e quindi estraibili a bassi costi (CAPELLI & MAZZA, 2005), sia perché rappresenta, per le sue dimensioni, un bacino di utenti potenziali di dimensioni straordinarie. Queste ragioni hanno indotto l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e il Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università Roma Tre a presentare al Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica (MIUR) un progetto intitolato "Sviluppo e applicazioni di impianti alimentati da risorse geotermiche per il riscaldamento (e il condizionamento) di ambienti nella città di Roma" nell'ambito del programma strategico "Risparmio energetico e microgenerazione distribuita". Il progetto è stato approvato e in questo articolo vengono presentati i primi risultati ottenuti.

È opportuno sottolineare che una ricerca di questo tipo, oltre a perseguire importanti risultati nel campo del risparmio energetico e della riduzione dell'inquinamento dell'aria, offre straordinarie prospettive nel campo industriale (sviluppo degli impianti, pompe di calore, scambiatori termici ecc.) in Italia e all'estero. A causa delle temperature relativamente basse richieste, questo tipo di risorse geotermiche è infatti estremamente diffuso.

Il progetto prevede innanzitutto il censimento della risorsa geotermica disponibile per la città di Roma. Per valutare la risorsa occorre conoscere la distribuzione delle temperature del sottosuolo, accertare la profondità alla quale si trova l'acqua termale e le sue caratteristiche chimiche (acidità, contenuto in sali e in gas). La temperatura della risorsa, insieme con la portata estraibile, sono i parametri base per progettare l'impianto e valutarne l'economicità. La composizione chimica dell'ac-

qua è essenziale per valutare se esistono problemi di corrosione degli impianti, di deposizione dei sali (scaling), di emissione di gas e per valutare se è necessario (acque salate o estratte da un acquifero poco alimentato) o non (acque poco salate) prevedere la reiniezione dell'acqua nel sottosuolo dopo il suo utilizzo termico.

In linea di principio un'applicazione geotermica di questo tipo non richiede necessariamente la presenza nel sottosuolo di acque termali, in quanto si possono utilizzare anche scambiatori di calore infissi direttamente nel sottosuolo caldo impermeabile (RYBACH & GORHAN, 2005). Si è però preferito concentrare l'attenzione prioritaria sulla ricerca di acque poco profonde con temperature di 17-20 °C, ideali per impieghi termici sia invernali che estivi. Una prima valutazione dei dati geologici e idrogeologici della città di Roma ha portato a identificare, come obiettivo primario della ricerca, l'acquifero contenuto nelle ghiaie di base del Tevere. Sono stati quindi raccolti e processati i dati stratigrafici pubblicati relativi a tutti i pozzi d'acqua perforati nel corso degli anni nelle alluvioni del Tevere (VENTRIGLIA, 2001) allo scopo di ricostruire l'andamento di questo livello di ghiaie (profondità del tetto e del letto e quindi lo spessore, quando entrambi i dati erano disponibili). In questo articolo, oltre a fornire qualche informazione generale sulla geotermia e sulle sue applicazioni energetiche, presentiamo i risultati ottenuti, insieme con qualche primo dato termico e chimico.

2 GENERALITÀ SULLA GEOTERMIA E LE SUE APPLICAZIONI

Il nucleo della Terra, a 6.400 km di profondità, ha una temperatura di circa 5.000 °C. Il calore profondo si diffonde verso la superficie attraverso le rocce del mantello, che subiscono temperature tali da determinarne la fusione parziale. Il nostro Pianeta è quindi avvolto da uno strato profondo di mantello fuso (astenosfera) sul quale galleggiano le parti solide più superficiali dello stesso mantello e della crosta (litosfera). L'astenosfera è sede di movimenti convettivi che rappresentano il motore di tutti i processi geodinamici della Terra, il principale dei quali è la cosiddetta tettonica delle placche litosferiche, causa dell'origine delle fosse oceaniche, delle catene montuose, dei terremoti e dei vulcani.

In ogni punto del nostro pianeta la temperatura cresce con la profondità (gradiente geotermico)





come conseguenza del flusso di calore dal profondo verso la superficie. Il valore medio del gradiente geotermico è di circa 33 °C/km. Vi sono però zone più fredde, dove questo valore è più basso, e zone più calde dove il gradiente geotermico cresce fortemente fino a valori anche 10 volte più elevati. Queste “zone calde” si sviluppano per lo più in corrispondenza di aree vulcaniche attive o recenti, ed anche in zone non vulcaniche (esempio Larderello in Toscana) dove è avvenuta comunque una risalita recente di magma fuso, a temperature tra 800 °C e 1200 °C, fino a profondità di pochi km nella crosta. Questi corpi magmatici producono una forte anomalia termica vicino alla superficie. Il calore è ceduto dal magma alle rocce sovrastanti e da queste all’acqua che circola al loro interno. Pozzi perforati dalla superficie fino alla profondità di acquiferi geotermici consentono di estrarre alla superficie un fluido caldo (vapore secco o miscela di vapore e acqua calda) che può essere convenientemente utilizzato per la generazione di energia elettrica. L’Italia è stata, poco più di un secolo fa, il primo Paese al mondo a produrre elettricità con la geotermia, nel famoso campo geotermico toscano di Larderello (BERTANI *et alii*, 2005).

Per molti anni l’unico interesse industriale dell’uso della geotermia si è rivolto a queste risorse di alta entalpia, con temperature superiori a 150 °C, destinate alla generazione di energia elettrica. Pur essendosi considerevolmente sviluppata nel corso del tempo, fino a raggiungere nel 2005 una potenza elettrica installata totale di circa 8930 MWe (in 24 Paesi), l’energia geotermica contribuisce per una frazione molto modesta, circa 0,4%, alla produzione elettrica mondiale (BERTANI *et alii*, 2005). In molti Paesi di natura vulcanica, in Centro America e in Asia, l’energia geotermica contribuisce in modo più sostanziale al fabbisogno elettrico locale, rappresentando una ricchezza consistente che consente risparmi di combustibile fossile, bassi costi di generazione e energia rinnovabile “pulita”, venendo il fluido utilizzato (acque calde o condensa di vapore) reiniettato in profondità nello stesso acquifero dal quale è stato estratto (IBRAHIM *ET ALII*, 2005; MANIERI, 2005; RODRIGUEZ & HERRERA, 2005). In Italia la potenza geotermoelettrica installata è di 791 MWt, e con una produzione annuale di 5430 GWh/anno (dati 2005; BERTANI 2005).

A parte i tradizionali usi terapeutici, termali e balneari, le risorse geotermiche di bassa entalpia (temperatura compresa tra 20 °C e 90 °C) hanno ricevuto per molti anni un’attenzione modesta ai

fini energetici, nonostante la loro grande diffusione. Usi termici diretti per il riscaldamento di ambienti hanno avuto un avvio pionieristico in Islanda (RAGNARSSON, 2005) e nel bacino di Parigi (LAPLAIGE *et alii*, 2005), due esempi di “district heating” di grosse dimensioni, sviluppati rispettivamente in una zona vulcanica calda e in un bacino sedimentario “freddo”. Negli ultimi decenni le applicazioni geotermiche dirette (riscaldamento ed affrescamento di ambienti, vari usi agricoli ed industriali) sono fortemente cresciute con una capacità di circa 23.000 MWt (esclusi gli usi termali balneologici) (LUND *et alii*, 2005). Il settore più fortemente in espansione è stato quello relativo all’impiego delle pompe di calore con risorse geotermiche del sottosuolo per il riscaldamento/affrescamento di ambienti, che in molti Paesi si è esteso a sfruttare risorse geotermiche di bassissima entalpia ($T < 20$ °C). Nel 2005 le pompe di calore geotermiche hanno raggiunto il 54% della capacità mondiale installata per gli usi non elettrici della geotermia, con un fattore di crescita di oltre il 400% dall’anno 2000. Grandi sviluppi si sono avuti in Cina (ZHENG *et alii*, 2005). In Europa, il Paese con la crescita più sbalorditiva di questi impianti è la Svezia, paese geologicamente “freddo”, dove solo nel 2004 sono state installate 47.000 pompe di calore geotermiche (EHPA, 2004). Circa 275.000 unità residenziali erano nel 2005 riscaldate con queste pompe di calore geotermiche, che sono diventate il mezzo più diffuso per il riscaldamento di edifici residenziali (capacità termica installata totale = 3.840 MWt) (LUND *et alii*, 2005). Sviluppi considerevoli si sono avuti e sono tuttora in corso anche in Svizzera, dove gli impianti geotermici a pompe di calore e scambiatori termici nel suolo hanno un tasso di crescita annuale del 15% e dove nel 2005 già oltre 35.000 impianti di questo tipo erano stati installati, e in Germania (30.000 impianti nel 2005 per 400 MWt). Lo straordinario sviluppo di queste tipologie di impianti dimostra la loro convenienza economica ed essi vengono spesso incentivati anche per i benefici che consentono in termini di risparmio energetico e di riduzione dell’inquinamento atmosferico. Si sta creando in Europa un grande mercato per la geotermia di bassa e bassissima entalpia e, paradossalmente, l’Italia, che è il paese geologicamente più “caldo” di tutta l’Europa, dove quindi le risorse geotermiche del sottosuolo potrebbero essere estratte a costi più bassi e con contenuto entalpico maggiore, è finora rimasta sostanzialmente estranea a questo fervore di inizia-

tive. L'unico esempio di rilievo è il riscaldamento urbano di Ferrara, alimentato da un acquifero profondo 1100-2000 m con una temperatura di 100 °C, messo in evidenza da pozzi di esplorazione petrolifera e che fornisce calore a 2,5 milioni di m³ in edifici pubblici e privati. Nell'area geotermica toscana, il vapore all'uscita delle centrali elettriche (detto "cascame") viene utilizzato per il riscaldamento di uffici e zone residenziali a Castelnuovo V. C., Larderello, Monterotondo Marittimo, Pomarance). Il riscaldamento di singoli edifici, per lo più alberghi, con acque termali naturali, è abbastanza diffuso ai Colli Euganei, Bagni di Romagna e all'isola d'Ischia (BORGHETTI *et alii*, 2005).

Nonostante il gran numero di impianti già realizzati nel mondo, vi sono ancora margini considerevoli di miglioramento tecnologico, di ottimizzazione del rendimento dei cicli termodinamici e di uso ottimale delle risorse. Sono proprio questi gli obiettivi che il progetto di ricerca sulla geotermia di Roma, del quale presentiamo qui i primi risultati, si prefigge di perseguire, sperando di creare le condizioni perché l'industria italiana diventi protagonista del settore e al contempo creando le basi per significativi risultati di risparmio energetico e di riduzione dell'inquinamento ambientale.

3 - L'ACQUIFERO NELLE GHIAIE DI BASE DEL TEVERE: IL PERCHÉ DI UNA SCELTA PRIORITARIA

Nella zona urbana di Roma il livello impermeabile di base, che funge da acquicluda per tutti gli acquiferi contenuti nelle rocce vulcaniche o sedimentarie sovrastanti, è rappresentato dalle argille plioceniche della formazione di Monte Vaticano (CAPELLI *et alii*, questo volume). Dai recenti studi idrogeologici di Capelli e collaboratori (vedi CAPELLI *et alii*, questo volume e riferimenti bibliografici ivi contenuti) emerge che l'area urbana di Roma è interessata dalle seguenti tre principali unità idrogeologiche:

Unità idrogeologica dei Monti Sabatini.

Affiora per lo più in destra del Tevere ed è costituita dai depositi vulcanici provenienti dal complesso eruttivo distretto vulcanico dei Monti Sabatini situato a NW di Roma. A causa dello spessore modesto dei depositi e della loro discontinuità, il drenaggio verso la città di questa unità non è molto consistente. Da osservare inoltre che

la presenza dell'alto strutturale di Monte Mario, a bassissima permeabilità, devia il flusso idrico verso SW e verso NE.

Unità idrogeologica dei Colli Albani. Si estende sul lato sinistro del Tevere e rappresenta il substrato geologico per buona parte del Comune di Roma. Poiché le argille plioceniche sono in questa zona assai depresse, gli acquiferi hanno elevati spessori e drenano verso i corsi d'acqua principali (fiumi Tevere e Aniene) senza ostacoli rilevanti. La falda idrica Albana alimenta numerosi corsi d'acqua perenni, anche di portata sostenuta. Quelli con portata pari o superiore a 200 l/s sono il Fosso delle Mole (770 l/s), il Fosso dello Statuario (396 l/s) il Fosso della Magliana (200 l/s) e il Fosso della Cecchignola (200 l/s). CAPELLI *et alii* (questo volume) stimano che questa falda ceda 4-5 m³/s di acqua ai fiumi Tevere e Aniene.

Unità idrogeologica dei depositi alluvionali del Tevere.

La valle del Tevere è incisa nel complesso impermeabile delle argille plioceniche di Monte Vaticano. I depositi alluvionali recenti e attuali sono costituiti da serie essenzialmente limose, ma con potenti livelli sabbiosi e ghiaiosi. Le ghiaie principali si trovano alla base della serie alluvionale, subito sopra le argille plioceniche, e ospitano un'importante falda idrica confinata e con notevole continuità laterale. La ricarica avviene lateralmente, dalle unità idrogeologiche incise dal fiume, o longitudinalmente lungo il corso del fiume (vedi prossimo capitolo). La ricarica verticale per infiltrazione dell'acqua del fiume o delle piogge è invece trascurabile per la presenza di strati impermeabili di argille e limi (CAPELLI *et alii*, questo volume).

Emerge da questa breve rassegna, che sia l'unità idrogeologica dei Colli Albani, sia quella dei depositi alluvionali recenti del fiume Tevere, offrono interessanti prospettive per progetti geotermici nella città di Roma, che utilizzino acque del sottosuolo di bassa o bassissima entalpia. Anche il basamento argilloso pliocenico può essere considerato per scambiatori termici diretti. Tuttavia, la nostra scelta prioritaria è ricaduta sull'acquifero contenuto nelle ghiaie di base del Tevere, essenzialmente per la sua notevole continuità laterale e per il suo carattere confinato che, se da una parte riduce la ricarica della falda impedendo l'infiltrazione verticale di acque meteoriche o fluviali, dall'altra ne assicura il mantenimento di





condizioni termiche stabili, non direttamente influenzate dalle variazioni meteorologiche e rappresenta una potenziale protezione da fattori inquinanti superficiali. Infine, la valle del Tevere attraversa tutta la città e comprende al suo interno numerose aree di prossima espansione edilizia che rappresentano, in linea di principio, siti ideali per progetti geotermici esecutivi. Un altro fattore per la scelta prioritaria di questo acquifero è che il suo tetto, come vedremo dai risultati di questo studio, si trova tra -30 e -50-60 m dalla superficie, una profondità che consente di estrarre la risorsa con pozzi di costo molto limitato. La ricarica laterale relativamente modesta dell'acquifero non rappresenta un problema, perché in progetti di questo tipo si dovrà comunque prevedere la reiniezione dell'acqua utilizzata negli impianti termici, nell'acquifero dal quale è stata estratta.

4 - PROFONDITÀ E SPESSORE DELLE GHIAIE DI BASE DEL TEVERE

4.1 - METODOLOGIA

Per valutare le potenzialità dell'acquifero contenuto nelle ghiaie di base del Tevere è stato necessario ricostruirne la geometria in tre dimensioni, alla quale si devono poi legare i dati termici e idrogeologici circa termalità, produttività e trasmissività. A tal fine sono stati raccolti e processati dati e informazioni di natura stratigrafica riguardanti la valle del Tevere in area urbana. La principale banca dati di riferimento è la ricca raccolta di dati di sondaggio di VENTRIGLIA (2001), pubblicata dall'Amministrazione Provinciale di Roma. È stata inoltre consultata la "Carta della superficie di letto delle alluvioni recenti" relativa al centro storico di Roma (MARRA & ROSA, 1995), mentre il limite delle alluvioni in superficie è stato desunto dalla Carta Geologica del Comune di Roma (FUNICIELLO & GIORDANO, questo volume).

Dalla banca dati di VENTRIGLIA (2001) sono stati scelti i pozzi ubicati esclusivamente all'interno del tratto urbano della piana alluvionale del Tevere, tra Castel Giubileo e l'EUR. Nell'area così definita ricadono 308 pozzi, ma non è stato possibile utilizzarli tutti. Infatti molti di questi, precisamente 92, si sono dovuti escludere perché la descrizione stratigrafica è mancante o è stata ritenuta inattendibile, come nei casi in cui non c'è corrispondenza tra ubicazione nella valle alluvio-

nale e stratigrafia, che indica depositi di altra natura e quindi un probabile errore nell'ubicazione.

Poiché l'obiettivo dello studio è concentrato sul livello delle ghiaie di base, le varie litologie presenti nelle alluvioni più superficiali (alternanze di argilla, limo, sabbia e piccole lenti di ghiaia) non sono state considerate.

I complessivi 216 pozzi validati sono indicati nelle Tavole A e B fuori testo (vedi allegato) con codici di colore differente che indicano:

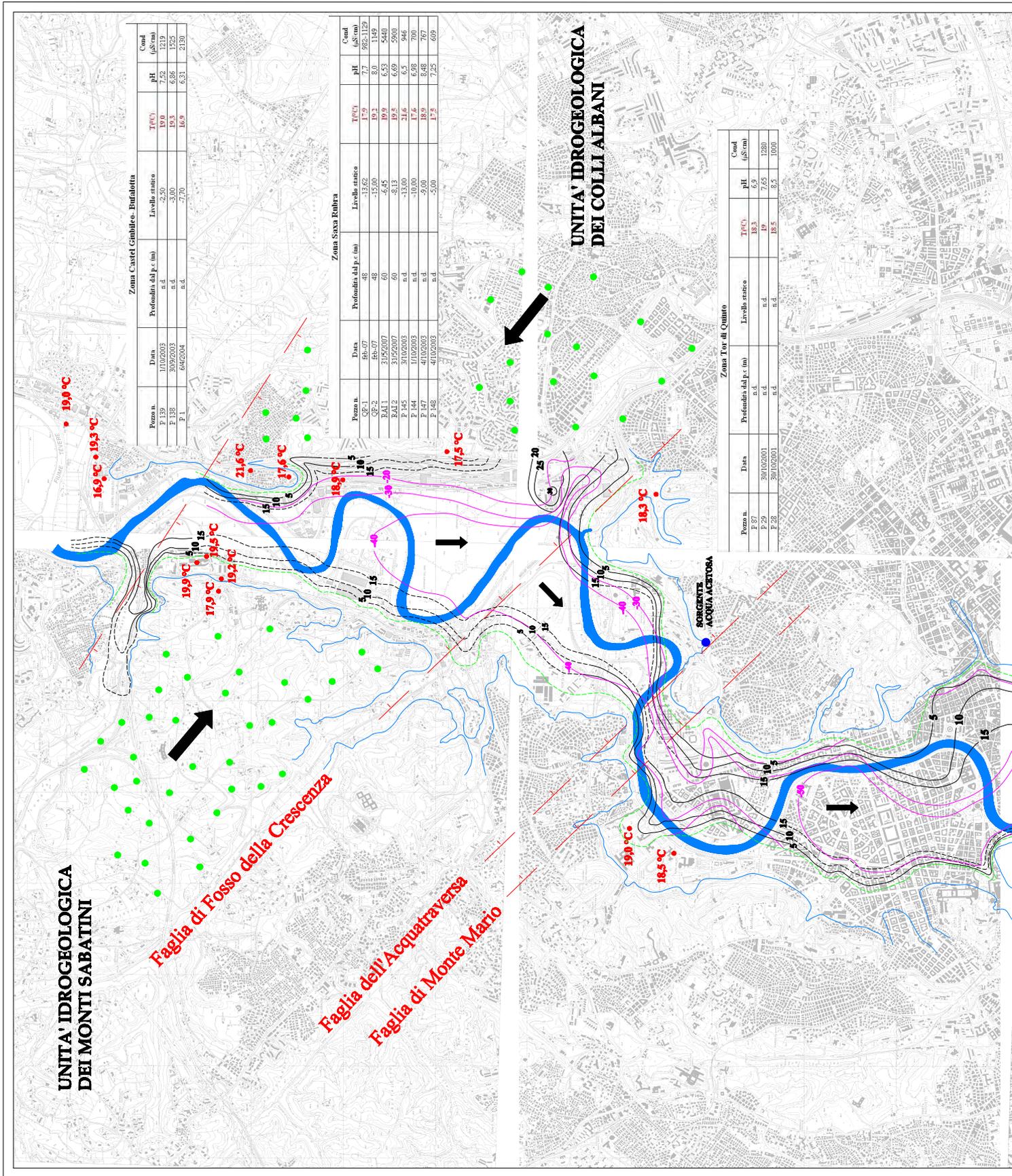
- pozzi con "stratigrafia completa", che attraversano tutte le alluvioni fino al *bedrock* e presentano il livello delle ghiaie di base (codice blu in carta);
- pozzi che attraversano le alluvioni del Tevere ed intercettano le ghiaie di base, senza però attraversarle completamente (codice azzurro in carta); ovviamente servono solo per definire il tetto delle ghiaie ma non il loro spessore;
- pozzi poco profondi che non raggiungono né il *bedrock* né le ghiaie di base (codice verde in carta); sostanzialmente inutili ai fini del presente studio;
- pozzi che attraversano le alluvioni fino al *bedrock* senza intercettare le ghiaie alla base; costituiscono i punti di spessore nullo dove le ghiaie non sono presenti; danno informazioni utili sulla geometria delle sponde laterali del paleovalve del Tevere (codice giallo in carta);
- pozzi poco profondi che non raggiungono né il *bedrock* né le ghiaie di base (codice verde in carta).

4.2 - CARTA DELLA SUPERFICIE DI LETTO DELLE ALLUVIONI RECENTI

Dall'analisi della carta di letto delle alluvioni (vedi Tavola A, in allegato), si evince che a nord di Monte Mario le isobate del letto delle ghiaie non scendono al di sotto del valore di -50 m dal livello del mare e lungo i fossi (Fosso della Lungara, della Crescenza, etc.) non scendono sotto il valore di -30 m sotto il livello del mare. L'approfondimento delle quote di letto sembra abbastanza simmetrico lungo i due margini della paleo-valle alluvionale, anche se il margine sinistro sembra degradare più dolcemente rispetto al destro più acclive.

E' da notare che nel settore a NE dell'alto di Monte Mario, le alluvioni non sono confinate lateralmente e verso il basso dalle argille di Monte Vaticano (MAV), ma dai conglomerati di Fosso della Crescenza (FCZ).

All'altezza della collina Fleming-Ponte Milvio, vi è una strozzatura della valle alluvionale e le iso-



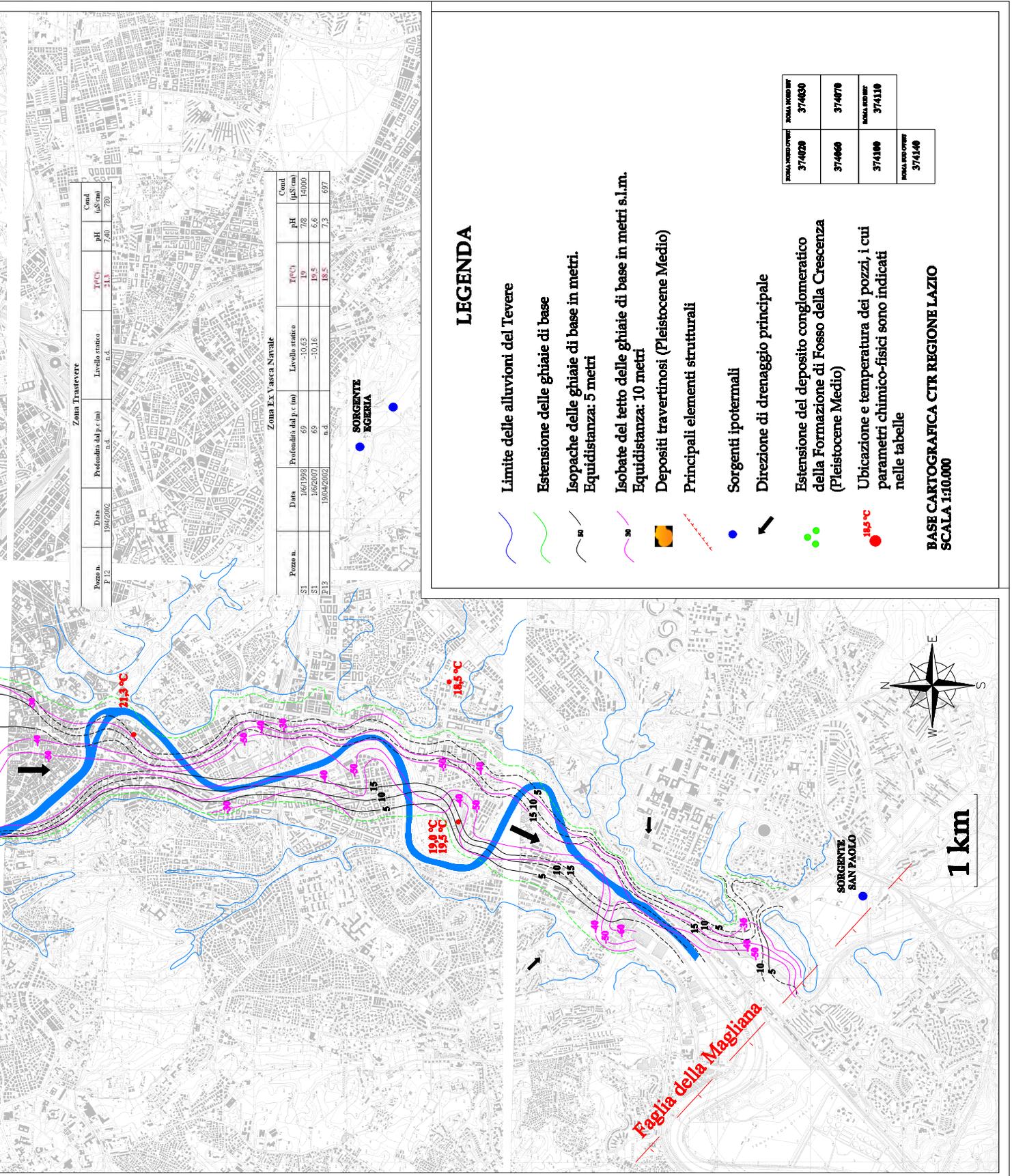


Fig. 1 - Profondità del tetto, spessore e caratteristiche chimico-fisiche dell'acquifero nelle ghiaie di base del Tevere.
- Depth, thickness and physico-chemical characteristics of the Tiber river basal gravel aquifer.

bate si infittiscono delineando margini d'approfondimento molto acclivi. Quest'area corrisponde all'intersezione con la faglia bordiera principale dell'alto di Monte Mario (faglia dell'Acqua Traversa), dove sono presenti i depositi travertinosi ed i sedimenti fluoritiferi appartenenti alla formazione di Valle Giulia (VGU), ad indicare la risalita di fluidi profondi lungo questa discontinuità tettonica, ancor oggi testimoniati dalle sorgenti dell'Acqua Acetosa presso Monte Antenne.

A partire da questa zona verso sud le alluvioni sono confinate dalle argille di MAV.

In corrispondenza di Monte Mario, le isobate si approfondiscono arrivando a valori di -60 m sotto il livello del mare.

Andando verso sud, i margini delle alluvioni tornano rettilinei e il gradiente delle isobate si fa più forte lungo il margine destro, mentre il sinistro presenta un ripiano tra le quote -40 m e -50 m, all'altezza di Castel Sant'Angelo.

Proseguendo verso sud, in direzione del quartiere dell'EUR, le isobate si approfondiscono ulteriormente arrivando a quota -70 m sotto il livello del mare; il margine destro scende molto più dolcemente, mentre il sinistro ha una pendenza maggiore ed è caratterizzato dalla presenza di paleofossi oggi interrati e percorsi occupati da Via delle Terme di Caracalla, dalla Circonvallazione Ostiense, da Via Giustiniano Imperatore e dal centro sportivo Tre Fontane.

Nella zona a sud dell'EUR, le isobate sono tratteggiate perché presunte; non sono stati infatti reperiti nella banca dati di VENTRIGLIA (2001) son-

daggi abbastanza profondi da intercettare il basamento argilloso pliocenico.

Ovviamente la carta della superficie di letto delle ghiaie di base rappresenta anche il tetto del basamento delle argille plioceniche. La carta indica pertanto la profondità alla quale si trova, nel tratto della valle del Tevere che attraversa la città, il substrato argilloso. È questo il livello più adatto per eventuali scambiatori termici, in quanto la sua impermeabilità lo mette al riparo da infiltrazioni di acque superficiali e dai conseguenti effetti termici e di corrosione chimica degli impianti, che potrebbero avvenire negli orizzonti più superficiali, permeabili e non confinati. Informazioni sulla profondità delle argille, al di fuori della valle alluvionale del Tevere, si possono trovare in MARRA & ROSA (1995).

4.3 - CARTA DELLA SUPERFICIE DI TETTO DELLE GHIAIE DI BASE

Al fine di costruire la carta dello spessore delle ghiaie di base, si è resa necessaria, a partire dalla medesima banca dati (VENTRIGLIA, 2001), la costruzione della carta di tetto del deposito (Tavola B in allegato e fig. 1), della quale si fornisce una sintetica descrizione.

Nella zona a nord di Monte Mario, tra il Fosso della Lungara e il Fosso della Crescenza, le isobate di tetto delle ghiaie di base non scendono a valori più profondi di -30 m s.l.m. In prossimità del Fosso della Crescenza le isobate si approfondiscono fino a toccare valori di -40 m s.l.m.

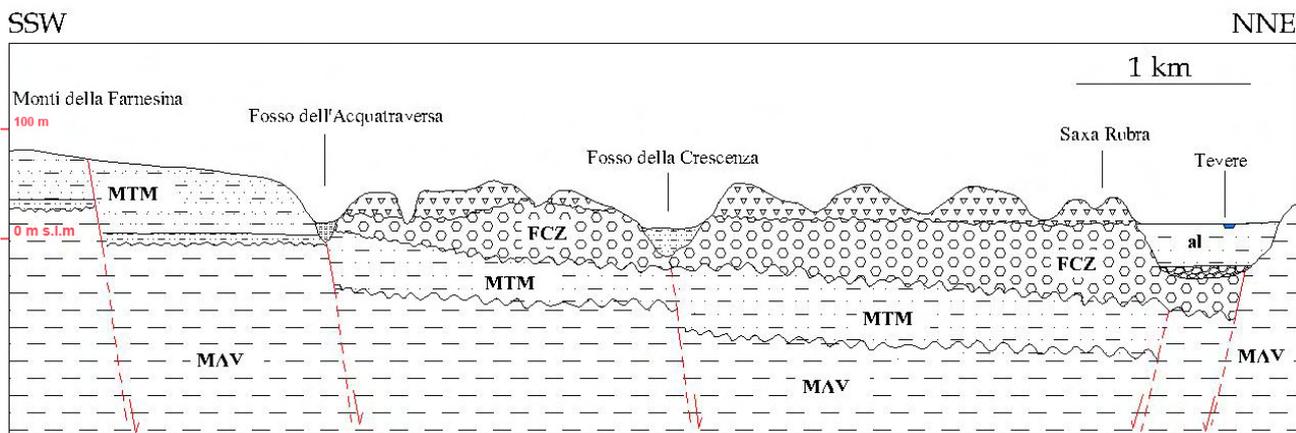


Fig. 2 - Profilo SSW-NNE dai Monti della Farnesina a Castel Giubileo (per la descrizione litologica si veda il testo) (quote s.l.m.; Legenda: MVA = argille della formazione di Monte Vaticano; MTM = sabbie e limi della formazione di Monte Mario; VULC = depositi vulcanici; FCZ = ghiaie della formazione di Fosso della Crescenza; al = alluvioni oloceniche del Tevere).

- Geological SSW-NNE cross-section, from Monti della Farnesina to Castel Giubileo.



Come per le isobate di letto, in corrispondenza della collina Fleming-Ponte Milvio, le isobate di tetto si avvicinano molto.

Continuando verso sud, le isobate si riallargano mantenendo lo stesso gradiente di discesa e toccando quote di -50 m s.l.m.

In corrispondenza di Castel Sant'Angelo le isobate si riavvicinano nuovamente.

Procedendo ulteriormente verso sud, le isobate di tetto del margine destro sono spostate verso il centro del deposito alluvionale con un andamento sinuoso. Tale andamento presenta due "pianori", uno a quota più elevata ($a \sim -35$ m) e l'altro a quota inferiore ($a \sim -40$ m) che indicano la presenza di "terrazzamenti" da un lato del paleoalveo, e un'incisione maggiore dall'altro.

Nella zona dell'EUR le isobate del tetto si approfondiscono ulteriormente fino a valori di -60 m s.l.m.

4.4 - CARTA DELLO SPESSORE DELLE GHIAIE DI BASE

Una volta costruite le due carte della base e del tetto delle ghiaie di base è stato possibile ottenere la carta dello spessore del deposito (Tavola C in allegato e Fig. 1). Dalla carta si può notare che nella zona a nord di Monte Mario lo spessore delle ghiaie non supera i 15 m; l'incremento di tale spessore avviene in maniera abbastanza dolce da entrambi i fianchi.

Procedendo verso sud, nella zona di confluenza con l'Aniene, lo spessore aumenta notevolmente arrivando a valori anche superiore a 30 m. Questo aumento è probabilmente dovuto all'ulteriore apporto sedimentario da parte dell'affluente. Proseguendo ulteriormente verso sud, gli spessori si mantengono costanti intorno ai 15 m, con un aumento abbastanza uniforme dai margini verso il centro del deposito della valle alluvionale.

4.5 ANDAMENTO SOTTO LA CITTÀ DI ROMA DELL'ACQUIFERO CONTENUTO NELLE GHIAIE DI BASE DEL TEVERE

Come descritto nei paragrafi precedenti, l'acquifero che ha sede nelle ghiaie di base delle alluvioni del Tevere al di sotto del suolo romano, presenta una notevole continuità, ma anche notevoli diversità di assetto idrogeologico tra la zona a nord delle faglie bordiere dell'alto di Monte Mario e la zona a sud.

Il corpo alluvionale olocenico della valle

Tiberina sutura, all'altezza della collina Fleming-Ponte Milvio, i sistemi di faglie bordiere con andamento NW-SE, di cui i più importanti sono la faglia dell'Acqua Traversa e la faglia del Fosso della Crescenza (figg. 1 e 2). Nella zona a nord, il basamento argilloso pliocenico (MAV) non affiora perché ribassato, mentre sono in affioramento terreni fluvio-lacustri, come le ghiaie e le sabbie che costituiscono la formazione di Fosso della Crescenza, coperte parzialmente dalla coltre delle vulcaniti.

In quest'area, la formazione di Fosso della Crescenza (FCZ) è confinata all'interno del graben ad andamento NW-SE, formatosi al momento del sollevamento dell'alto di Monte Mario, che ha costituito un ostacolo per il corso del fiume, costretto a deviare verso SE (PAROTTO, questo volume; FUNICIELLO & GIORDANO, questo volume).

Dal punto di vista idrogeologico, proprio per la presenza di queste litologie conglomeratico-sabbiose associate a FCZ, questa zona rappresenta un'area di ricarica importante per le falde al di sotto della città di Roma. In quest'area infatti convergono gli assi di drenaggio principali che alimentano il sottosuolo romano: dai Sabatini a NW e dai Colli Albani a SE. Queste acque si infiltrano nei sedimenti a più alta permeabilità (FCZ) e confluiscono per contatto idraulico nelle ghiaie di base delle alluvioni del Tevere. Ne consegue che in questa zona l'acquifero delle ghiaie di base in esame non è confinato lateralmente in quanto in contatto con le ghiaie di FCZ (fig. 3).

Nella zona a sud del sistema di faglie di Monte Mario la situazione è completamente diversa; infatti qui le argille della formazione di Monte Vaticano sono presenti con continuità al di sotto della coltre vulcanica e dei sedimenti delle formazioni quaternarie.

Le ghiaie di base delle alluvioni recenti sono quindi delimitate sia verso il basso che lateralmente dalle argille della formazione di Monte Vaticano e verso l'alto dai restanti sedimenti alluvionali di natura limoso-argillosa (fig. 4). Per tale motivo, in questa zona, l'acquifero delle ghiaie risulta confinato e la sola via di ricarica in questa porzione di falda è da nord lungo l'asse delle ghiaie di base; i sovraccati terreni vulcanici e i sedimenti più grossolani che costituiscono le alluvioni recenti ricaricano infatti solo blandamente la zona.

Gli elementi strutturali che hanno governato la dislocazione e la sedimentazione della valle del Tevere, hanno anche generato depositi travertino-



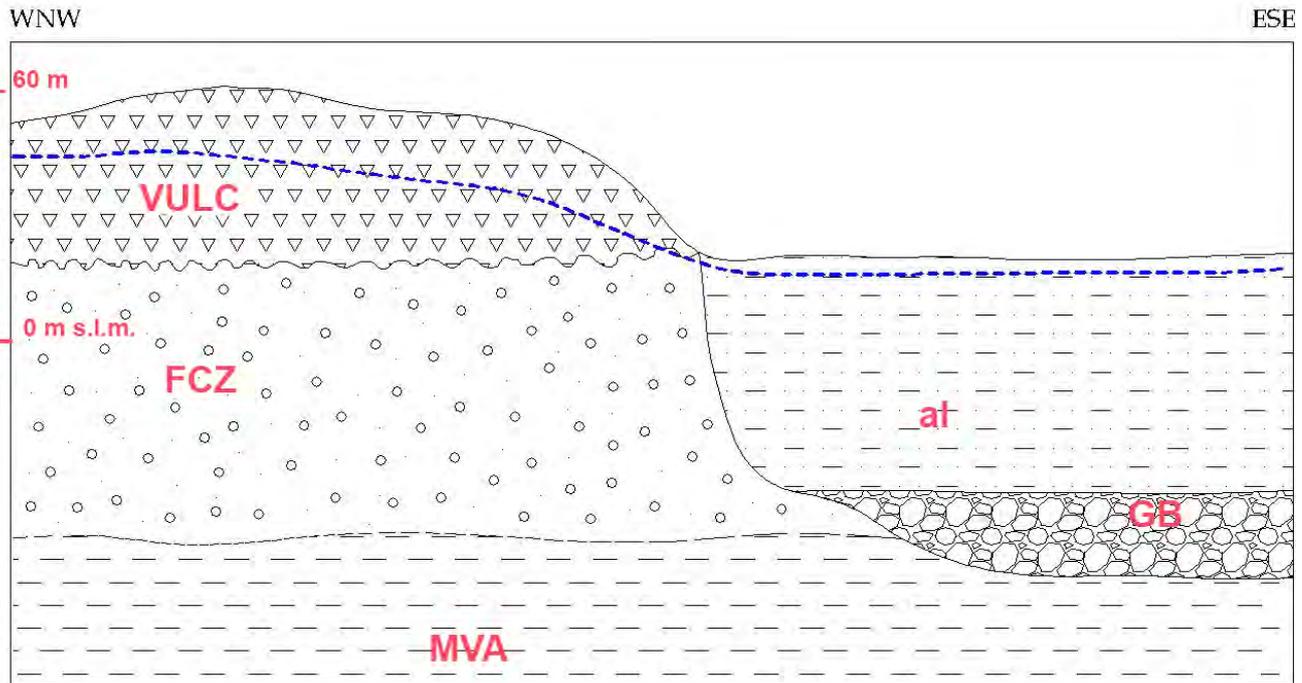


Fig. 3 - Profilo schematico dell'assetto stratigrafico e idrogeologico della zona a nord della faglia di Monte Mario (quote s.l.m.; la scala delle lunghezze è approssimativa ed indica circa 3 km; Legenda: MVA = argille della formazione di Monte Vaticano; VULC = depositi vulcanici; al = alluvioni oloceniche del Tevere; GB = Ghiaie di base; la linea tratteggiata azzurra indica la superficie della falda libera e le frecce le linee di deflusso rispetto al profilo).
 - Stratigraphic and hydrogeologic setting of of the Tiber river valley inside Rome, north of the Monte Mario fault (elevations, m a.s.l.)

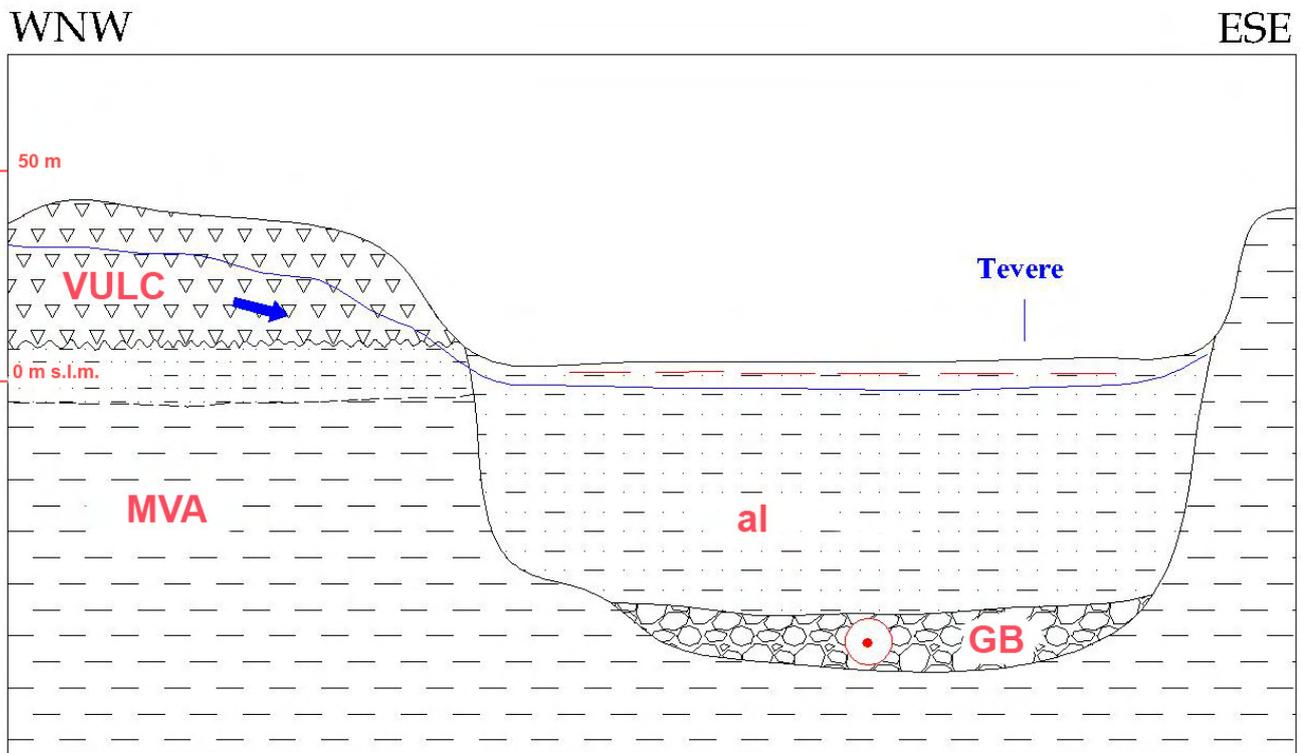


Fig. 4 - Profilo schematico dell'assetto stratigrafico e idrogeologico della zona a sud della faglia di Monte Mario. (quote s.l.m.; la scala delle lunghezze è approssimativa ed indica circa 3 km; Legenda: MVA = argille della formazione di Monte Vaticano; VULC = depositi vulcanici; al = alluvioni oloceniche del Tevere; GB = Ghiaie di base; la linea tratteggiata azzurra indica la superficie della falda libera e le frecce le linee di deflusso rispetto al profilo).
 - Stratigraphic and hydrogeologic setting of the the Tiber river valley inside Rome, south of the Monte Mario fault (elevations, m a.s.l.)





si, presenti sia nella zona nord nei pressi di Valle Giulia che a sud al Torrino, che testimoniano la fuoriuscita di fluidi termali che sono risaliti e risalgono in superficie lungo le discontinuità tettoniche (fig.1 e Tavola C in appendice allegato fuori testo). Evidenze attuali di queste risalite sono le sorgenti termali dell'Acqua Acetosa nei pressi del quartiere Parioli (zona nord, in corrispondenza della faglia dell'Acqua Traversa) e dell'Acqua di San Paolo (zona sud, in corrispondenza della faglia della Magliana con direzione NW-SE ed immersione verso SW).

La presenza di risorgenze termali è piuttosto diffusa nella campagna romana; l'intera zona di Tivoli a NE di Roma è famosa per le sue piscine termali e per le cave di travertino; nella zona di Cesano, proseguimento verso NW della dorsale di Monte Mario, ad W di Roma, pozzi geotermici perforati dall'ENEL hanno messo in evidenza la presenza di fluidi profondi ad elevata termalità e salinità; a Pomezia, a SE di Roma, è famosa la zona della Solforata con forte emissione di CO₂ e H₂S; sempre a sud-est, nella zona di Cava dei Selci (Ciampino-Marino) vi sono forti manifestazioni gassose di CO₂ e H₂S (CARAPEZZA *et alii*, 2005).

Tutte queste manifestazioni termali si trovano in corrispondenza di discontinuità strutturali regionali che interessano il basamento carbonatico che ospita il principale acquifero profondo e che può ospitare significativi quantitativi di CO₂ (CARAPEZZA *et alii*, 2005).

5 - CARATTERI CHIMICO-FISICI DELL'ACQUIFERO CONTENUTO NELLE GHIAIE DI BASE DEL TEVERE

Se i dati dei numerosi pozzi perforati nelle alluvioni del Tevere, contenuti nella raccolta di VENTRIGLIA (2001), sono stati sufficienti per ricostruire l'andamento (profondità del tetto e spessore) delle ghiaie di base del Tevere, purtroppo essi mancano di qualsiasi informazione relativa ai parametri chimico-fisici dell'acquifero (temperatura, pH, conducibilità elettrica). Per avere queste informazioni, essenziali ai fini geotermici, è pertanto necessario eseguire misure specifiche sui pozzi, compito difficile perché non sempre questi pozzi sono ancora accessibili e occorre comunque reperirli sul terreno e ottenere l'autorizzazione del proprietario. Inoltre possono esservi ostacoli, quali un diametro troppo piccolo o la presenza di pompe

sommerse, per l'impiego delle sonde multiparametriche che si utilizzano per queste indagini. Per questi motivi, le informazioni finora raccolte sono ancora piuttosto limitate, essendo relative solo a 17 pozzi distribuiti tra la zona a nord di Monte Mario e quella dell'ex Vasca Navale. L'ubicazione di questi pozzi e i valori di temperatura sono indicati nella Tavola C (in allegato) e nella Fig. 1 (cf. CAPELLI *et alii*, questo volume). I dati chimico-fisici sono riportati nella Tabella 1 e vengono di seguito brevemente commentati.

5.1 - ZONE DI SAXA RUBRA E DI CASTEL GIUBILEO-BUFALOTTA

Come già esposto nel capitolo precedente, in questa zona, che è situata nella parte nord della città di Roma, l'acquifero delle ghiaie di base del Tevere non è confinato lateralmente perché a contatto con le ghiaie permeabili della formazione di Fosso della Crescenza (FCZ in fig. 3) che ne rappresentano la zona di principale ricarica idrica. In una parte di queste zone affiorano le vulcaniti del Complesso dei Monti Sabatini (D. VULC in Fig. 3) al di sopra dei depositi alluvionali del FCZ.

Anche l'acquifero contenuto nelle FCZ rappresenta pertanto una potenziale risorsa geotermica di bassa entalpia per questa zona di Roma.

Nella zona di Saxa Rubra sono stati misurati i parametri chimico-fisici dell'acquifero nelle ghiaie raggiunto da quattro vecchi pozzi, due situati nella zona di Quarto Peperino (QP in Tabella 1) dove è in corso un grosso progetto di edilizia privata e gli altri due all'interno del complesso della RAI. Non sono disponibili dati stratigrafici, ma le ghiaie FCZ si incontrano in questa zona ad una profondità di circa 40 m da piano campagna e hanno uno spessore notevole, di circa 40 m, che dovrebbe assicurare una buona produttività dell'acquifero. Il livello statico è tra 14 e 15 m di profondità a Quarto Peperino e tra 6 e 8 m nella sede RAI. La temperatura varia da 17,9 a 19,9 °C; il pH è neutro nei pozzi QP e un po' acido alla RAI, dove i valori di conducibilità elettrica sono sensibilmente superiori (5440-5900 μS/cm) (vedi Tabella 1). Sono disponibili i parametri chimico-fisici per altri quattro pozzi sempre nella zona di Saxa Rubra e per altri tre pozzi ubicati un po' più a nord, nella zona di Castel Giubileo-Bufalotta. Come si vede dai dati della Tabella 1, la temperatura varia da 16,9 a 21,6 °C e uno dei tre pozzi più a nord ha pH un po' più basso e conducibilità elettrica leggermente più alta.

5.2 - ZONA DI TOR DI QUINTO

In questa zona i pozzi sono vicini al limite delle alluvioni del Tevere. L'acquifero ha una temperatura tra 18,3 e 19,0 °C, pH neutro e bassa conducibilità elettrica (Tabella 1).

5.3 - ZONA DI TRASTEVERE

I dati chimico-fisici sono disponibili per un solo pozzo. L'acquifero di base, che ha qui profondità del tetto intorno a -30 m s.l.m. e piccolo spessore (5 m), ha una temperatura tra le più alte misurate (21,3 °C), pH circa neutro e conducibilità elettrica bassa (Tabella 1).

5.4 - ZONA DELL'EX VASCA NAVALE

Nel giugno 1998 il Dipartimento di Scienze Geologiche (DSG) dell'Università degli Studi "Roma Tre" ha fatto perforare in questa zona due pozzi a scopo geognostico e idrogeologico. Nel giugno 2007 sono state eseguite nuove misure di parametri chimico-fisici in uno solo di questi pozzi (S1 in Tabella 1), essendo l'altro (S2) risultato profondamente inquinato, soprattutto da nafta evidentemente sversatasi da qualche vicino serbatoio. Analogo forte inquinamento antropico è stato riscontrato in un pozzo geognostico perforato nel 2007 nel cortile del DSG, i cui dati possono quindi servire solo a scopo stratigrafico. In questa zona le ghiaie di base si trovano ad una profondità di 53-58 m dal piano di campagna, che ha una quota di circa 12 m s.l.m., e hanno uno spessore di circa 10 m. La circolazione idrica è confinata, verso il basso e lateralmente dalle argille della formazione di Monte Vaticano e verso l'alto da un grosso livello di argille e limi, potente 25-30 m. Al di sopra vi è la falda freatica, contenuta in sabbie e non isolata idraulicamente, che è fortemente esposta agli agenti inquinanti. Il livello statico si mantiene negli ultimi 10 anni intorno a -10/-11 m; era invece molto più vicino alla superficie (-3/-5 m) negli anni '30 e questo indica sia la natura in origine pressurizzata della falda di base, sia il suo forte sfruttamento nei decenni scorsi. La temperatura dell'acquifero di base è di 19-19,5 °C, ideale per impieghi energetici sia invernali che estivi. Il confronto tra le misure fisico-chimiche eseguite a otto anni di distanza (vedi Tabella 1) mostra valori costanti di temperatura, una lieve diminuzione del pH e una forte riduzione della conducibilità elettrica, che mantie-

ne tuttavia valori superiori a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Risulta evidente che i pozzi da perforare per l'eventuale sfruttamento geotermico dovranno isolare perfettamente, con *casing* adeguatamente cementato, tutto il tratto di sezione litologica al di sopra delle ghiaie di base, in modo da evitare inquinamenti termici e chimici.

6 - CONSIDERAZIONI FINALI

La temperatura atmosferica media (secolare) della città di Roma è di 16 °C. Il massimo valore medio annuale degli ultimi anni è di 17,1 °C. La temperatura media dei mesi invernali è stata nel 2006 di 8,6 °C (minimo mensile in gennaio: 6,7 °C) e quella dei mesi estivi di 24,3 °C (massimo mensile in luglio: 26,9 °C). Questi dati, registrati dall'Osservatorio del Collegio Romano, indicano che pur essendo il clima di Roma mite, vi è un'escursione termica estate-inverno di circa 20 °C e un'esigenza di riscaldamento per almeno cinque mesi invernali (novembre-marzo) e di condizionamento per almeno due mesi estivi (luglio e agosto) che comportano forti consumi energetici. I risultati di questo studio indicano che questi consumi potrebbero essere sensibilmente ridotti se venisse utilizzata la risorsa geotermica di bassa entalpia contenuta nell'acquifero delle ghiaie di base del Tevere. Questo acquifero si incontra a profondità facilmente accessibili da pozzi a basso costo e al tempo stesso sufficienti a sottrarlo all'influenza delle variazioni climatiche stagionali. Infatti lungo tutta l'asta del fiume la profondità delle ghiaie di base non scende mai al di sotto di 60 m dal piano di campagna (massima profondità riscontrata nella zona dell'EUR). A nord di Monte Mario, lungo i Fossi della Lungara e della Crescenza e all'altezza di Castel Sant'Angelo, il tetto delle ghiaie si trova a soli 30-40 m di profondità. I massimi spessori dell'acquifero (30-40 m) si trovano nella zona di confluenza dell'Aniene (ghiaie del Fosso della Crescenza); altrove lo spessore è comunemente intorno ai 15 m, ma in alcune zone sale a oltre 20 m e appare ovunque idoneo ad assicurare una produttività sufficiente della risorsa. La continuità è ottima lungo il corso del fiume e questo dovrebbe assicurare un'alimentazione sufficiente, arricchita da contributi laterali, delle ghiaie del Fosso della Crescenza a nord e dall'acquifero delle vulcaniti Albane nella parte centro-meridionale.

Le misure di temperatura, pH e conducibilità



elettrica devono essere estese per poter ottenere mappe termiche e chimico-fisiche più dettagliate dell'acquifero nelle ghiaie di base. Comunque le misure eseguite in 17 pozzi indicano temperature comunemente intorno a 19 °C, con variazione da 16,9 a 21,6 °C, pH da neutro a leggermente acido e conducibilità elettrica localmente elevata (variazione da 480 a 5900 $\mu\text{S}/\text{cm}$; vedi Tabella 1). Queste temperature si prestano perfettamente per impieghi termici sia di riscaldamento invernale che di condizionamento estivo di ambienti.

I dati disponibili indicano che anche l'acidità e il carico di sali disciolti dell'acquifero sono compatibili con usi termici diretti. Andrà indagata la causa dell'elevata conducibilità elettrica misurata in alcuni pozzi delle zone dell'ex Vasca Navale e di Saxa Rubra, accertando in particolare se è dovuta a fattori naturali o a fattori antropici connessi ad un non adeguato isolamento ("casing") degli acquiferi sovrastanti. Da notare, infine, che nessuno dei pozzi finora misurati si trova in corrispondenza del tratto di Tevere interessato dalle faglie di Monte Mario e dell'Acqua Traversa (fig. 1) dove gli estesi depositi di travertino fanno supporre una risalita di fluidi caldi che potrebbero aver innalzato anche la temperatura dell'acquifero di base nei depositi alluvionali olocenici del Tevere.

In collaborazione con ACEA si è stimato un fabbisogno intorno a 20 l/s di acqua geotermica con temperatura di 17-18 °C per un condominio di 40.000 m³, una risorsa che potrebbe essere facilmente fornita dall'acquifero di base delle alluvioni del Tevere in varie zone della città.

Nell'utilizzazione a fini geotermici di quest'acquifero sarà comunque indispensabile prevedere la reiniezione del fluido estratto dopo il suo uso, sia

per non impoverire la risorsa per estrazione eccessiva rispetto alla ricarica naturale, sia per motivi ambientali, sia infine per evitare fenomeni di subsidenza o comunque di instabilità nei sovrastanti depositi alluvionali sciolti sui quali è costruita buona parte della città.

Le informazioni raccolte sono sufficienti per passare a studi di fattibilità concreti su progetti geotermici reali, che devono comprendere le seguenti indagini:

Perforazione, in ogni sito da sviluppare, di almeno due pozzi sui quali eseguire prolungate prove di emungimento e di reiniezione, studiando la risposta idraulica e termica dell'acquifero.

Campionatura e caratterizzazione chimica del fluido; monitoraggio prolungato dei parametri chimico-fisici dell'acquifero.

Elaborazione di un modello che simuli la risposta dell'acquifero a prolungate operazioni di estrazione/reiniezione dell'acqua, al fine di valutare la portata massima estraibile e l'ubicazione ottimale dei pozzi di produzione e di quelli di reiniezione; nel contempo si dovrà ovviamente conoscere il fabbisogno della risorsa che dipende dal progetto tecnico di utilizzo per il riscaldamento e l'affrescamento.

Questi dati devono essere raccolti e gli impianti industriali progettati e realizzati, prima di avere in funzione a Roma il primo impianto di uso diretto del calore di fluidi geotermici a bassa entalpia. Tuttavia i risultati di questo studio dicono chiaramente che questi utilizzi sono possibili, perché è già stata identificata una prima importante risorsa a profondità economicamente accessibili e con una termalità che si presta bene a questi usi.

RINGRAZIAMENTI

Questo studio è stato realizzato nell'ambito del Progetto FIRB del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica "Sviluppo e applicazioni di impianti alimentati da risorse geotermiche per il riscaldamento (e il condizionamento) di ambienti nella città di Roma". Il Laboratorio di Idrogeologia dell'Università Roma Tre (Prof. G. CAPELLI e collaboratori) ha messo a disposizione i dati sui pozzi d'acqua contenuti nella propria banca dati. Molte interessanti discussioni si sono avute con l'ACEA (dott.ri MESSINA e CAMPANA), che ha aderito con interesse all'idea avanzata da DSG-Roma Tre e INGV di promuovere nella città di Roma progetti esecutivi per l'uso diretto del calore geotermico.

BIBLIOGRAFIA

- BERTANI R. (2005) - *World geothermal power generation in the period 2001-2005*. Geothermics, **34**: p. 651-690.
- BERTANI R., BERTINI G., CAPPETTI G., FIORELISI A. & MAROCCO B. M. (2005) - *An update of the Larderello-Travale/Radicondoli deep geothermal system*. In: "Proceedings of the 2005 Geothermal Congress", Antalya, Turkey.
- BORGHETTI G., CAPPETTI G., CARELLA R. & SOMMARUGA C. (2005). *Direct uses of geothermal energy in Italy, 2002-2004 update report*. In "Proceedings of the 2005 Geothermal Congress", Antalya, Turkey.

- CAPELLI G. & MAZZA R. (2005). *Schema idrogeologico della città di Roma – gestione della risorsa idrica e del rischio idrogeologico*. In: Atti del convegno “La IV Dimensione-Lo spazio sotterraneo di Roma “ Geologia dell’ambiente -periodico trimestrale della SIGEA (Società Italiana di Geologia Ambientale), Anno XIII n° 4 (supplemento), Roma, pp. 47 -58.
- CAPELLI G., MAZZA R. & TAVIANI S. (2008) – *Acque sotterranee nella città di Roma*. Memorie descrittive della Carta Geologica d’Italia. (questo volume).
- CARAPEZZA M. L., Barberi F., TARCHINI L., CAVARRA L. & GRANIERI D. (2005) - *Le emissioni gassose dell’area vulcanica dei Colli Albani*. In: Nuovi dati sull’attività recente del cratere del lago Albano e sul degassamento dei Colli Albani, Atti Acc. Naz. Lincei **218**: pp. 229-242.
- EHPA (2004) - *European Heat Pump Association, sales figures, Nov. 2004* (Arne Logdberg, Swedish Heat Pump Association) in svedese.
- FUNICIELLO R. & GIORDANO G. (2008) - *La nuova carta geologica di Roma*. Memorie descrittive della Carta Geologica d’Italia. (questo volume).
- IBRAHIM R. F., FAUZI A. & SURYADARMA (2005) - *The progress of geothermal energy resources activities in Indonesia*. In: “Proceedings of the 2005 Geothermal Congress”, Antalya, Turkey.
- LAPLAIGE P., JAUDIN F., DESPLAN A. & DEMANGE J. (2005) – *The French geothermal experience: review and perspectives*. In “Proceedings of the 2005 Geothermal Congress”, Antalya, Turkey.
- LUND J.W., FREESTON D. H. & BOYD T. L. (2005) - *Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review*. Geothermics, **34**: pp. 691-727.
- MAINIERI A. (2005) - *Costa Rica country update report*. In: “Proceedings of the 2005 Geothermal Congress”, Antalya, Turkey.
- MARRA F. & ROSA C. (1995) - *Stratigrafia e assetto geologico dell’area romana*. Memorie Descrittive della Carta Geologica d’Italia, L, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, p. 31-112
- PAROTTO M. (2008) – *La geologia di Roma: testimonianze riconoscibili e ricostruzioni paleogeografiche*. (questo volume).
- RAGNARSSON A. (2005) - *Geothermal development in Iceland 2000-2004*. In: “Proceedings of the 2005 Geothermal Congress”, Antalya, Turkey.
- RODRIGUEZ J. A. & HERRERA A. (2005) - *El Salvador country update*. In: “Proceedings of the 2005 Geothermal Congress”, Antalya, Turkey.
- RYBACH L. & GORHAN H. L. (2005) – *Country update for Switzerland*. In: “Proceedings of the 2005 Geothermal Congress”, Antalya, Turkey.
- VENTRIGLIA U. (2001) – *Geologia del territorio del Comune di Roma*. Amministrazione Provinciale di Roma, Servizio Geologico, Difesa del Suolo.
- ZHENG K., ZHANG Z., ZHU H. & LIU S. (2005) – *Process and prospects of industrialized development of geothermal resources in China – Country update report for 2000 – 2004*. In: “Proceedings of the 2005 Geothermal Congress”, Antalya, Turkey.

