

LA RISPOSTA AL POMPAGGIO DI ACQUIFERI VULCANICI: ALCUNI ESEMPI DELLE AREE NAPOLETANA E VITERBESE^(*)

PUMPING RESPONSE OF VOLCANIC AQUIFERS: EXAMPLES FROM THE VOLCANIC AREAS OF NAPLES AND VITERBO^(*)

VINCENZO PISCOPO^(*), ANTONELLA BAIOCCHI^(*), ROSANNA FANTUCCI^(**), FRANCESCA LOTTI^(*)

^(*)University of Tuscia - Department of Ecology and Sustainable Economic Development - Viterbo, Italy - pisco@unitus

^(**)Geologist

RIASSUNTO

Questo lavoro riguarda l'analisi della risposta al pompaggio di pozzi che interessano rocce vulcaniche e vulcanoclastiche. Sono state eseguite prove a portata costante su quattro pozzi di profondità variabile (20-290 m) che interessano la falda di base del Tufo Giallo Napoletano (Napoli), del Peperino, delle vulcaniti del Complesso Vicano (Viterbo) e una falda sospesa del Peperino (Viterbo).

È stata misurata la depressione piezometrica nello stesso pozzo di pompaggio, durante l'emungimento e dopo l'interruzione del pompaggio. Per i pozzi provati la relazione depressione-tempo, simile in emungimento e in risalita, è molto diversa e generalmente evidenzia la non stabilizzazione nel tempo del livello idrico. La risposta immediata e ritardata al pompaggio verificata per alcuni dei pozzi provati è legata a volte allo svuotamento dell'acquifero, altre volte alla sua eterogeneità. In quest'ultimo caso, anche prove di lunga durata possono non garantire una corretta caratterizzazione idraulica e la portata di esercizio considerata ottimale può essere molto diversa da quella realmente compatibile con la salvaguardia della risorsa.

I risultati ottenuti hanno permesso la formulazione di alcune considerazioni per un uso razionale delle risorse idriche sotterranee in relazione all'ambiente idrogeologico considerato.

PAROLE CHIAVE: *Idrogeologia, prove di pompaggio, rocce vulcaniche, portata sostenibile dei pozzi*

INTRODUZIONE

Gli acquiferi molto eterogenei pongono problematiche per la definizione della portata ottimale di esercizio dei pozzi, in relazione alla variabilità della velocità dell'abbassamento piezometrico nel tempo. In questo caso anche prove di emungimento di lunga durata (alcuni giorni o alcune settimane) possono risultare insufficienti per la previsione della risposta dell'acquifero a pompaggi di esercizio

ABSTRACT

Determining the sustainable well yield in heterogeneous aquifers is an arduous task, because of the variability of the time-drawdown relation. The present work deals with the pumping response of wells that penetrate in the volcanic rocks of Naples and Viterbo; in these areas the average aquifer yield is lower than 10 l/s per km².

Four wells have been tested at a constant discharge: P1, 20 m deep, penetrates a leaky aquifer in pyroclastic soils and Neapolitan Yellow Tuff and has been tested at 2.5 l/s for 3200 min; P2, 70 m deep, penetrates a perched aquifer in Peperino (a quartz-latic ignimbrite) and has been tested at 0.3 l/s for 30 min; P3, 170 m deep, penetrates an unconfined aquifer in Peperino and has been tested at 0.9 l/s for 90 min; P4, initially 250 then 290 m deep, penetrates an unconfined aquifer in lavas and tuffs of Vico vulcano and has been tested at 25 l/s for 1410 min and 15 l/s for 1620 min.

Drawdown has been measured during the pumping and residual drawdown during the recovery in the same pumped well. For all wells, the relation time-drawdown has a similar trend both during pumping and recovery without reaching the steady-state. A faster drawdown is instead observed during the pumping period. Transmissivity values, calculated with recovery data, ranges from 7.21×10^{-5} to 1.47×10^{-3} m²/s and are higher than those estimated through pumping data. Results were interpreted according to the heterogeneity of the aquifer, dual porosity of tuffs, well-loss, and aquifer recharge.

These results highlighted a first hydraulic characterization of volcanic rocks and, at the same time, led to some suggestions for the determination of the sustainable well yield.

KEY WORDS: *Hydrogeology, pumping tests, volcanic rocks, sustainable well yield*

INTRODUCTION

Definition of the sustainable well yield is an open issue in heterogeneous aquifers because of the drawdown response variability in the long run. Even long term pumping tests (days or weeks) could be ineffective if year-round pumping have to be forecasted. This topic is particularly critical when low aquifer yields are considered, such as in volcanic aquifers of Central-Southern Italy (average

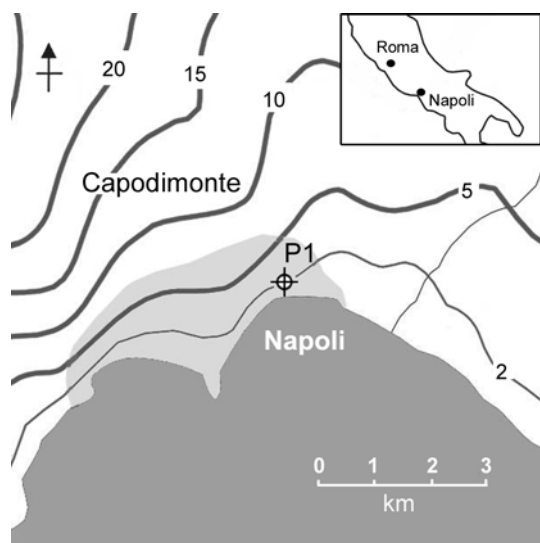
^(*) Lavoro svolto con il contributo dei fondi di ricerca 2002 - Università degli Studi della Tuscia e del PRIN MIUR 2003 - prot. 2003 049442_002
Research grant by University of Tuscia-PRIN MIUR 2003 - prot. 2003 049442_002

ininterrotti per tutto l'anno. Queste problematiche diventano ancora più evidenti se si fa riferimento ad acquiferi caratterizzati da una non elevata resa media in acque sotterranee, quali sono gli acquiferi vulcanici dell'Italia centro-meridionale (resa media generalmente non superiore a 10 l/s x km²; CELICO, 1983; BONI *et alii*, 1986). In queste realtà idrogeologiche, peraltro, ad un diffuso uso delle acque sotterranee per scopi potabili, irrigui, industriali e terapeutici non sempre corrisponde una profonda conoscenza dell'impatto dei pompaggi a lungo termine.

In questa nota viene esaminata la risposta al pompaggio di alcuni pozzi delle aree vulcaniche napoletana e viterbese. La lettura dei risultati delle prove, inquadrati nel contesto geologico e idrogeologico di riferimento, ha permesso di guadagnare informazioni sul comportamento degli acquiferi esaminati e, nello stesso tempo, mediante approcci elementari, introdurre la discussione sulla definizione della portata "sostenibile" dei pozzi.

LINEAMENTI GEOLOGICI E IDROGEOLOGICI

I pozzi esaminati interessano depositi vulcanici e vulcanoclastici dell'area napoletana e viterbese. Il pozzo ricadente nell'area napoletana (P1 in Fig. 1) è ubicato nel centro urbano di Napoli, in prossimità del porto. In quest'area e nel suo intorno sono presenti principalmente i prodotti dell'attività eruttiva dei Campi Flegrei (DI GIROLAMO *et alii*, 1984), sviluppatasi a partire dal Pleistocene Superiore nella depressione strutturale peritirrenica della Piana Campana.



Sulla base delle conoscenze stratigrafiche del sottosuolo dell'area urbana (SCHERILLO & FRANCO, 1960; 1967) e della stratigrafia riconosciuta nel corso della perforazione del pozzo P1 (Fig. 2), nell'area di interesse sono presenti, al di sotto di qualche metro di terreni di riporto, dapprima prodotti piroclastici indifferenziati, costituiti da cineriti, pozzolane e livelli di pomice e paleosuoli, e poi, per alcune decine di metri, la formazione del substrato, il Tufo Giallo Napoletano.

aquifer yield < 10 l/s per km²; CELICO, 1983; BONI *et alii*, 1986). In this hydrogeological environment the exploitation of groundwater resources for multiple usage (drinkable, rural, industrial and hydrothermal) is rarely associated to a detailed knowledge of long term pumping effects.

This work examines some pumping tests conducted in the volcanic areas of Naples and Viterbo. Results led to new information about aquifers behaviour and to an introductory argumentation above "sustainable" well yield.

GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL SETTING

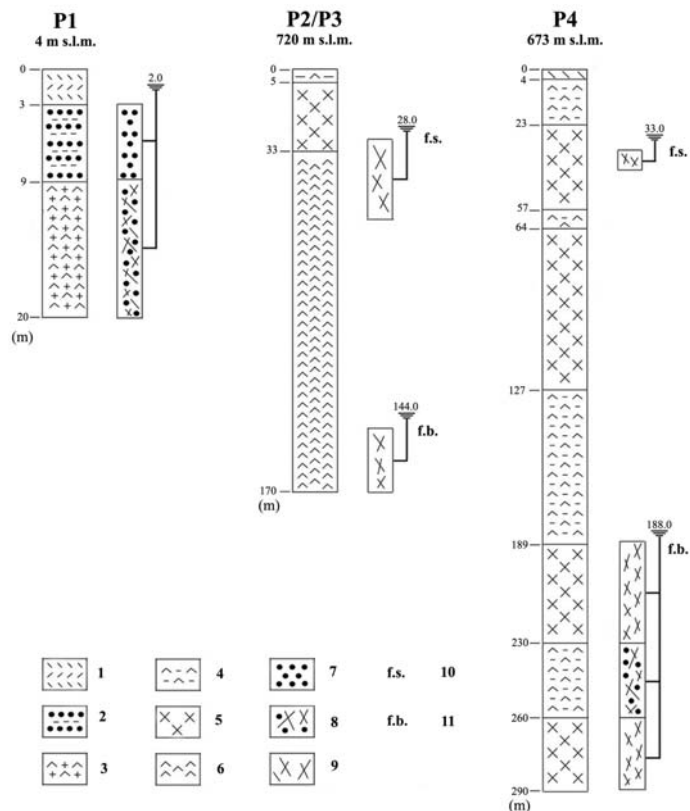
Analysed wells concern the volcanic and vulcanoclastic deposits of Naples and Viterbo areas. The Neapolitan well (P1 in Fig. 1) is located by the harbour, in the urban centre of Naples. This area is characterized by the products of the eruptive activity of the Phlegraean Fields (DI GIROLAMO *et alii*, 1984), which developed in the perityrrhenian structural depression of Campana Plain since Upper Pleistocene.

Fig. 1 - Ubicazione del pozzo P1 e piezometria dell'area (curve isopiezometriche in m s.l.m.; da CELICO *et alii*, 2001)
- Location of P1 well and piezometric contour lines in m asl (from CELICO *et alii*, 2001)

Considering the existing knowledge on the urban area subsoil (SCHERILLO & FRANCO, 1960; 1967) and the stratigraphy of well P1 (Fig. 2), under a few metres of backfill, various loose pyroclastic products (ashes, pumices and paleosols) and the substratum formation Neapolitan Yellow Tuff (for a few tens of metres) can be found in succession. This 12,000 years old formation is composed of an ash matrix with pumice and sco-

Quest'ultima formazione, di circa 12,000 anni di età, è costituita da una matrice cineritica con inclusi pomicei e scoriacei. Si presenta nei primi metri in facies poco coerente e successivamente di aspetto litoide.

Lo schema idrogeologico, ricostruito alla scala del territorio comunale di Napoli (CELICO *et alii*, 2001), evidenzia una notevole articolazione del flusso idrico sotterraneo, riconducibile comunque alla presenza di un'unica falda libera o semiconfinata con morfologia piezometrica che ricalca, nelle grandi linee, quella topografica. L'area portuale è quindi ubicata nella zona di recapito della falda, localmente alimentata dalla ricarica che avviene preferenzialmente nelle zone collinari di Napoli (Fig. 1). In particolare, il sito in cui ricade il pozzo P1 è caratterizzato da una quota piezometrica prossima a 2 m s.l.m. e da un gradiente idraulico di circa 0.7%.



ria. In the first metres it is incoherent and becomes lithoid going deeper.

The hydrogeological scheme, at the Naples municipality scale (CELICO *et alii*, 2001), highlights the presence of a unique unconfined or leaky aquifer with an equipotential surface which mainly follows the topography. The harbour is then located in the discharge area of the aquifer, whose recharge area is in the hills around the town (Fig. 1). Groundwater level nearby well P1 is about 2 m asl and local hydraulic gradient is of 0.7%.

Fig. 2 - Stratigrafia e idrostratigrafia dei pozzi: 1) terreno di riporto; 2) piroclastici sciolte; 3) Tufo Giallo Napoletano; 4) tufi cineritici; 5) lave e scorie; 6) Peperino; 7) acquifero poroso; 8) acquifero poroso e fessurato; 9) acquifero fessurato; 10) falda sospesa; 11) falda di base; 12) profondità livello piezometrico (m).
 - Stratigraphy and hydrostratigraphy of wells: 1) backfill; 2) pyroclastic soils ; 3) Tufo Giallo Napoletano; 4) Tuffs ; 5) lavas and scoriae ; 6) Peperino; 7) porous aquifer; 8) fissured and porous aquifer; 9) fissured aquifer; 10) perched aquifer; 11) basal aquifer; 12) depth of groundwater level (m).

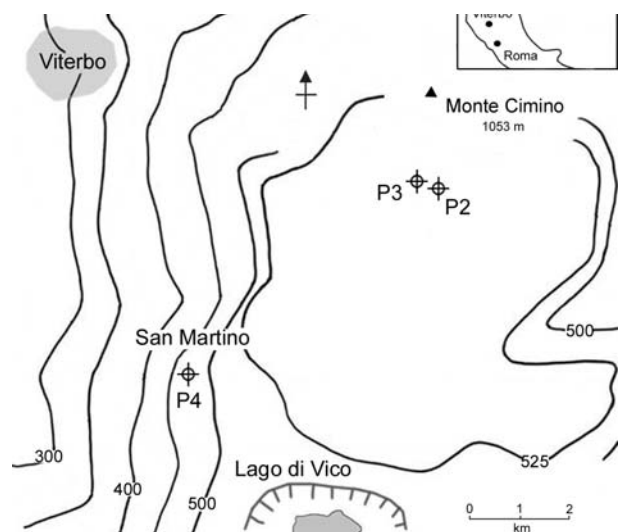
In merito alle caratteristiche idrogeologiche dei litotipi attraversati dal pozzo P1 ed interessati dal cono di depressione provocato dal pompaggio, si individua una permeabilità per porosità molto variabile nell'ambito della coltre di copertura del Tufo Giallo Napoletano, in relazione alla estrema eterogeneità granulometrica dei depositi piroclastici sciolti. Per la formazione tufacea invece, è da prevedere una permeabilità, sebbene relativamente più bassa dei precedenti litotipi, per porosità e per fessurazione, se si fa riferimento alla non trascurabile porosità della matrice della "soft rock" (porosità totale compresa tra 0.4 e 0.6; PELLEGRINO, 1967; OTTAVIANI, 1988) ed al reticolo di

Considering the rocks penetrated by well P1 and involved by the depression cone, a variable primary porosity characterizes the covering products of the tuff, related to the wide range of the grain-size distribution. The Neapolitan Yellow Tuff is instead characterized by dual porosity due to the matrix and the fissures of the soft rock (matrix porosity ranges between 0.4 and 0.6; PELLEGRINO, 1967; OTTAVIANI, 1988). The columnar fissure net is the typical rock fabric, which can be observed along the hill slopes.

Viterbo wells (P2, P3 and P4 in Fig. 3) are located nearby the Mount Cimino and the external edge of the Lake Vico caldera.

fessurazione, principalmente colonnare, rilevabile in affioramento alle pendici delle zone collinari.

I pozzi ricadenti nell'area viterbese (P2, P3 e P4 in Fig. 3) sono ubicati alle pendici del monte Cimino e del bordo esterno della caldera del lago di Vico. In queste aree sono presenti i prodotti dell'attività eruttiva dei Distretti Cimino e Vicano, sviluppatasi, a partire dal Pliocene Superiore, nella fascia strutturalmente depressa compresa tra la costa tirrenica ed il fiume Tevere (BORGHETTI *et alii*, 1981; SOLLEVANTI, 1983). I prodotti del Distretto Cimino (1.35-0.8 Ma) comprendono principalmente lave, in domi e colate, e l'ignimbrite quarzolatitica. I prodotti del distretto vicano, relativamente più recenti dei precedenti (0.8-0.09 Ma), comprendono alternanze di lave, ignimbriti e depositi piroclastici con diverso grado di coesione.



This area is covered by the eruptive products of Cimino and Vico volcanic districts, which started their activities in the Upper Pliocene, spreading over the graben elongated from the Thyrrhenian Coast to the Tiber River (BORGHETTI *et alii*, 1981; SOLLEVANTI, 1983).

Cimino volcanic products (1.35-0.8 My) comprehend lavas, both in domes and flows, and the Peperino, a quartz-latitic ignimbrite. Vico's products, younger than the Cimino's (0.8-0.09 My), include lavas, ignimbrites and pyroclastic deposits with different degrees of cohesion.

Fig. 3 - Ubicazione dei pozzi P2, P3, P4 e piezometria dell'area (curve isopiezometriche in m s.l.m.)
- Location of P2, P3, P4 wells and piezometric contour lines in m asl

La stratigrafia specifica dell'area dove ricadono i pozzi P2 e P3 è stata dedotta dalle evidenze di superficie e dall'esame del "cutting" della perforazione del pozzo P3 (Fig. 2). Si riconosce, al di sotto di una modesta copertura di tufi cineritici, dapprima uno spessore di circa 30 m di lave trachitiche e latitiche, al quale segue, fino alla profondità massima raggiunta dalla perforazione (170 m), l'ignimbrite quarzolatitica ("Peperino").

La stratigrafia specifica dell'area dove ricade il pozzo P4 è stata dedotta correlando la geologia di superficie con i rilievi eseguiti nel corso della perforazione dello stesso pozzo, profondo 290 m (Fig. 2). L'alternanza di lave e prodotti piroclastici è stata interpretata come la parte medio-bassa della successione vicana.

Lo schema idrogeologico ricostruito alla scala dei Distretti Cimino e Vicano (DRAGONI *et alii*, 2002; BAIOCCHI, 2003) evidenzia un acquifero vulcanico eterogeneo, caratterizzato da una falda di base continua e da più falde sospese di interesse locale. La falda di base, ospitata nei complessi lavici e piroclastici, circola secondo un flusso radiale divergente, con alto piezometrico in corrispondenza dei domi del Cimino. I pozzi P2 e P3 ricadono proprio in corrispondenza dell'alto piezometrico e morfologico, dove la falda di base ha una quota di circa 576 m s.l.m. ed

The stratigraphy of well P2 and P3 has been traced according to surface geology and to the P3 cutting examination (Fig. 2). Under a thin layer of tuffs, a 30 m stratum of trachytic and latitic lavas was found, followed by the Peperino up to the bottom of the borehole (170 m).

The local stratigraphy of well P4 has been deduced from surface geology and from data collected during the 290 m drilling (Fig. 2). The alternation of lavas and pyroclastic products has been recognized such as the medium-low part of the Vico volcanic succession.

The hydrogeological scheme of the Cimino and Vico volcanic districts (DRAGONI *et alii*, 2002; BAIOCCHI, 2003) highlights the presence of a heterogeneous volcanic aquifer, characterized by a main basal groundwater flow and several perched water tables. The basal groundwater flow interests lavas and pyroclastic deposits, following a divergent radial net with the Cimino domes as the highest zone. Wells P2 and P3 are located in the recharge area of the volcanic aquifer, where groundwater level is about 576 m asl and local

un gradiente idraulico del 5%. Il pozzo P4 ricade invece ai margini dell'alto piezometrico, dove il flusso idrico sotterraneo è orientato verso Ovest, la falda di base ha una quota di circa 483 m s.l.m. ed un gradiente idraulico del 6% (Fig. 3).

I litotipi attraversati dai pozzi sono caratterizzati da un grado e tipo di permeabilità estremamente variabile (Fig. 2). Le lave e l'ignimbrite quarzolitica presentano una permeabilità prevalentemente per fessurazione, i tufi vicani presentano una permeabilità per porosità e fessurazione, le intercalazioni scoriaee e pomicee sono relativamente più permeabili per porosità.

PROVE DI POMPAGGIO: METODI E RISULTATI

I pozzi considerati non sono stati realizzati propriamente per eseguire prove di pompaggio, anzi in alcuni casi non si conosce esattamente il modo di condizionamento dell'opera. Tuttavia, considerato che l'obiettivo dello studio è proprio quello di esaminare la risposta dei pozzi in rocce vulcaniche e vulcanoclastiche al pompaggio, si ritengono significativi i dati acquisiti in relazione soprattutto alla durata delle prove (generalmente superiore alle 20 ore) ed alla scarsità di riferimenti bibliografici relativi ai litotipi esaminati.

Le prove considerate sono state condotte a portata costante con misure dell'abbassamento piezometrico nello stesso pozzo di pompaggio, durante l'emungimento e la risalita. In qualche caso, è stato possibile eseguire preliminarmente una prova a gradini di portata crescente che ha fornito indicazioni sull'efficienza del pozzo e sulla stabilizzazione o meno del livello idrico, elementi questi utilizzati per definire la successiva portata per la prova di lunga durata. Non sono stati rilevati durante l'emungimento fenomeni indicativi dell'intasamento dei filtri, laddove presenti, o delle fessure delle rocce o in generale di disturbi indotti dalle sollecitazioni idrodinamiche sulla parte solida dell'aquifero, anche quando gli abbassamenti hanno superato il 20% dello spessore saturo iniziale. A posteriori si è avuto conferma di ciò anche dalla contenuta variabilità dei parametri calcolati con gli abbassamenti rilevati durante il pompaggio e quelli relativi alla risalita.

L'elaborazione dei risultati è stata condotta utilizzando l'approssimazione di Cooper-Jacob dell'equazione di Theis per tutti i pozzi provati. Tra i motivi che hanno dettato questa scelta, si ricorda la semplicità di applicazione del metodo e l'affidabilità dello stesso per una prima stima della trasmissività anche per acquiferi che non rispondono pienamente alle condizioni teoriche previste dal metodo (MURRAY & SAMI, 1998). Non si è ritenuto opportuno utilizzare altri metodi più specifici (PRICKETT, 1965; DAGAN, 1967; BOULTON, 1970; STRELTSOVA, 1972; BOULTON, 1973; NEUMAN, 1975) a causa dell'assenza di pozzi di osservazione ed anche perché l'obiettivo principale è stato quello di analizzare la dipendenza dal tempo dell'evoluzione della depressione piezometrica proprio nel pozzo di pompaggio, fenomeno quest'ultimo che condiziona l'utilizzo dei pozzi stessi. Quindi i valori di trasmissività determinati mediante la relazione di Cooper-Jacob non devono essere intesi in valore assoluto, ma piuttosto come indice della velocità di abbassamento piezometrico nel pozzo; inoltre, l'utilizzo della stessa relazione interpretativa per tutti i pozzi provati ha permesso il confron-

ta idraulico del 5%. Well P4 is placed at the side of the recharge area, where groundwater flow goes westward, the hydraulic gradient is 6% and the piezometric level is about 483 m asl (Fig. 3).

The three wells penetrate volcanic rocks with different kinds and degrees of permeability (Fig. 2). Lavas and Peperino permeability is mainly due to fissuration, Vico tuffs permeability is due both to fissuration and porosity, intercalations of scoria and pumice layers have a permeability due to porosity.

PUMPING TESTS: METHODS AND RESULTS

Analysed wells were not constructed in order to be tested and in some cases there are not detailed information about the well design. Anyway, the acquired data can be considered meaningful considering the present purpose (i.e. the analysis of the pumping response of volcanic aquifer) and the length of tests, as quite rare examples can be found in literature.

The pumping tests were conducted at constant rate with the measurements of the drawdown and recovery, in the same pumped well. Some preliminary step-drawdown tests were conducted in order to assess the well efficiency and the reaching (or not) of the steady-state, useful information to define the subsequent constant rate test. During pumping, screens or fractures obstructions have not occurred, nor other kind of disturbs due to the strong perturbations on the solid skeleton of the aquifer, even for a drawdown higher than the 20% of the initial saturated thickness. The absence of interferences has also been confirmed by the small difference between calculated parameters during pumping and recovery.

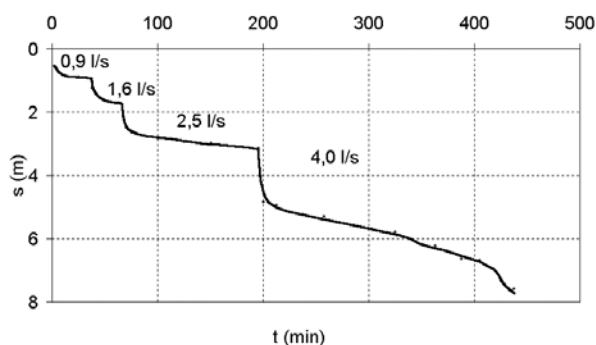
Results have been processed through the Cooper-Jacob method. Among the reasons of this choice, the simplicity of the method and its reliability for a first evaluation of transmissivity, even when the theoretical conditions are not fully respected (MURRAY & SAMI, 1998). More specific methods have not been applied (PRICKETT, 1965; DAGAN, 1967; BOULTON, 1970; STRELTSOVA, 1972; BOULTON, 1973; NEUMAN, 1975) for the absence of observation wells and because the main purpose was to analyse the pumping response in the well itself for its correct usage. Therefore the computed transmissivity was not considered in absolute values, but as an indicator of drawdown velocity in different hydrogeological frameworks. The following case studies are the most significant among all the collected tests.

to della risposta al pompaggio delle differenti situazioni idrogeologiche esaminate. I casi riportati di seguito, distinti per situazione geologica e idrogeologica, sono quelli più significativi tra i più numerosi raccolti.

Pozzo P1

Il pozzo P1, profondo 20 m con un diametro di 300 mm, attraversa un acquifero saturo di circa 18 m costituito da piroclastiti sciolte e Tufo Giallo Napoletano (Fig. 2). Il pozzo è condizionato con tubi filtro a fessure verticali e ghiaietto nell'intercapedine tra questi ed il perforo, da 2 m fino a fondo foro.

È stata effettuata una prima prova di pompaggio della durata di circa 7 ore a gradini di portata crescente. I primi tre valori di portata (da 0.9 a 2.5 l/s) hanno evidenziato la pseudo-stabilizzazione dell'abbassamento piezometrico, non è stato così per l'ultimo valore di portata provata (Fig. 4)



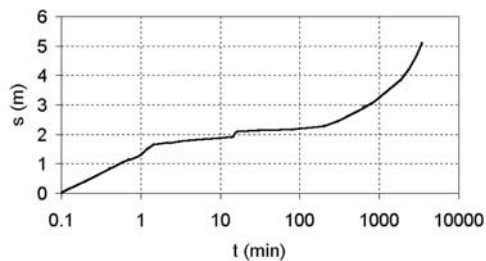
Well P1

Well P1, 20 m deep and with a 300 mm diameter, penetrates loose pyroclastic deposits and Neapolitan Yellow Tuff for a 18 m saturated aquifer thickness (Fig. 2). The well design includes the screen with vertical fissures and artificial gravel pack between 2 and 20 m depth.

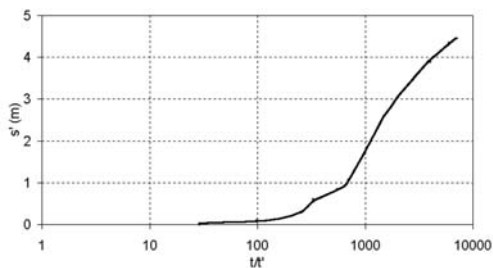
A step-drawdown pumping test was performed for about 7 h; the first three values of discharge (from 0.9 to 2.5 l/s) highlighted the pseudo-steady state of drawdown; it was different for the last value (Fig. 4).

Fig. 4 - Prova a gradini di portata del pozzo P1
- Step-drawdown pumping test of P1 well

Si è deciso quindi di utilizzare il valore di portata di 2.5 l/s come portata della prova di lunga durata, per esaminare la risposta del livello piezometrico del pozzo in condizioni "estreme". La portata è stata mantenuta costante per circa 54 ore, misurando nel pozzo l'abbassamento piezometrico (s) e quello residuo (s') dopo l'interruzione del pompaggio.



(a)



(b)

The discharge of 2.5 l/s was applied to the long term pumping test, in order to examine the head response in extreme conditions. Discharge was held at a constant rate for about 54 h, measuring the drawdown during pumping (s) and the residual drawdown during the recovery (s').

Fig. 5 - Abbassamento (a) e risalita (b) del livello idrico del pozzo P1
- Drawdown (a) and recovery curves (b) in P1 well

In figura 5a, sul grafico s-t in scala semilogaritmica (dove t è il tempo dall'inizio del pompaggio), escludendo i primi 10 min di prova influenzati dall'effetto capacità del pozzo, si nota una debole inclinazione della relazione per i primi 200 min, paragonabile a quella già riscontrata nella prova a gradini alla stessa portata. Successivamente si nota il progressivo e graduale incremento della pendenza della relazione s-t. Se si calcola la trasmissività sulla base della formulazione di Cooper-Jacob per i tre tratti distinguibili dal grafico di figura 5a risultano valori compresi in tre ordini di grandezza (Tab. 1). Anche la risalita del livello idrico dopo il pompaggio, riportata sul grafico s'-t' (dove t' è il tempo dall'interruzione del pompaggio) di figura 5b, mostra la stessa tendenza. In questo caso però i valori di trasmissività calcolabili sui tre tratti risultano generalmente superiori a quelli calcolati con i dati dell'emungimento (Tab. 1).

In the semi-logarithmic plot s-t (Fig. 5a), excluding the first 10 min affected by wellbore storage effect, a slight inclination in the first 200 min can be noticed, similar to the step-drawdown test. Then a progressive and gradual increase of the slope of the s-t relation occurs. Transmissivity values in three orders of magnitude have been obtained (Tab. 1) through Cooper-Jacob method applied to the three segments of the plot in figure 5a. Recovery after pumping shows the same trend on the s'-t' plot of figure 5b, where t' is time from shut down. In this case transmissivity values are higher (Tab. 1).

Pozzo	TA	Q (l/s)	H ₀ (m)	H _f (m)	$\left(\frac{H_0 - H_f}{H_0}\right) \times 100$	Durata (min)	T ₁ (m ² /s)	T ₂ (m ² /s)	T ₃ (m ² /s)	T ₁ ' (m ² /s)	T ₂ ' (m ² /s)	T ₃ ' (m ² /s)
P1	f.b.	2.5	18	13	28%	3200	28.7	2.30	0.977	14.7	3.24	1.66
P2	f. s.	0.3	32	14	56%	29	0.033	0.0148				
P3	f.b.	0.9	26	20	23%	90	0.517			0.721		
P4	f.b.	25.0	60	18	70%	1410	7.04	3.57	1.67	7.04	4.81	3.47
P4	f.b.	15.0	102	77	24%	1620	4.02	2.80	1.44	7.72	6.26	4.82

Tab. 1 - Risultati delle prove di pompaggio TA): tipologia di acquifero; f.b.: falda basale; f.s.: falda sospesa; Q: portata; H₀: spessore saturo di acquifero iniziale; H_f: spessore saturo di acquifero a fine prova; T_n: trasmissività calcolata con l'abbassamento 10⁻⁴; T_n': trasmissività calcolata con la risalita 10⁻⁴)
 - Pumping tests results TA): types of aquifer; f.b.: unconfined or semiconfined aquifer; f.s.: perched aquifer; Q: discharge; H₀: initial saturated thickness; H_f: final saturated thickness; T_n: transmissivity from drawdown curve 10⁻⁴; T_n': transmissivity from recovery curve 10⁻⁴)

Gli stessi dati sono stati riportati sui grafici in scala bilogaritmica s-t (Fig. 6a) e s'-t' (Fig. 6b).

The same data are shown in the bi-logarithmic s-t (Fig. 6a) and s'-t' (Fig. 6b) plots.

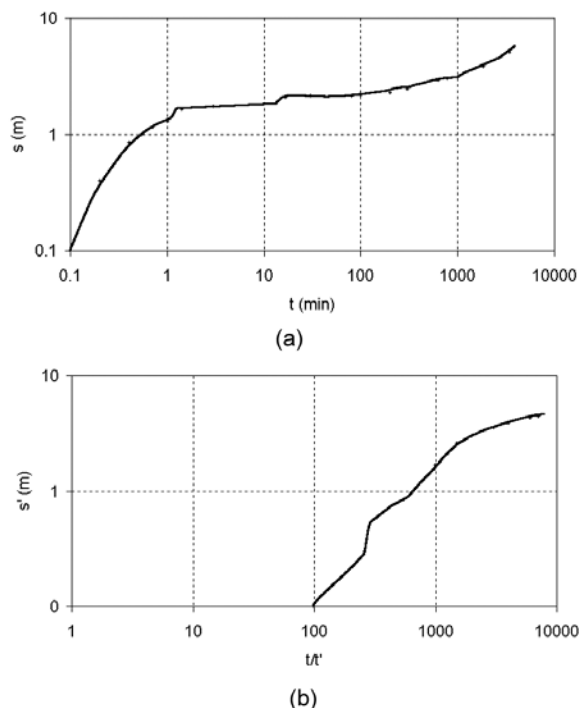


Fig. 6 - Abbassamento (a) e risalita (b) del livello idrico del pozzo P1 sui grafici logaritmici
 - Drawdown (a) and recovery curves (b) in P1 well on log-log plot

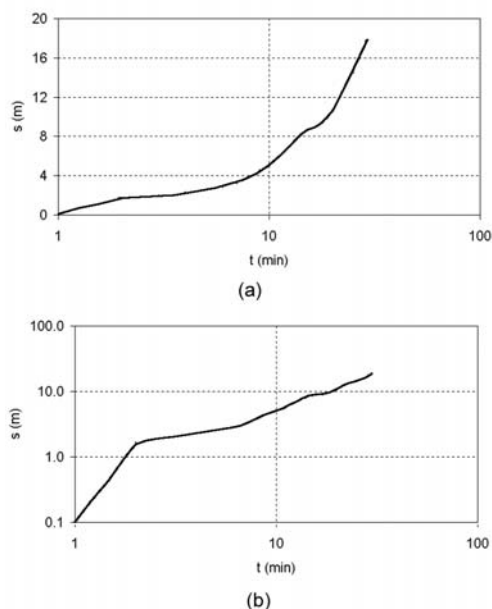
La forma delle relazioni non è riconducibile precisamente a nessuno dei più semplici modelli di risposta dell'abbassamento piezometrico nel tempo, disponibili per acquiferi teorici. Si nota, comunque, una risposta differenziata dell'abbassamento piezometrico, immediata e ritardata. Ciò potrebbe essere ricondotto, così come l'andamento sui grafici semilogaritmici, alla eterogeneità dell'acquifero, considerata la coesistenza di orizzonti permeabili per porosità ed orizzonti permeabili per porosità e fessurazione (pozzo P1 in Fig. 2).

Pozzi P2 e P3

I pozzi P2 e P3 sono ubicati a circa 30 m di distanza.

Il primo pozzo ha una profondità di circa 70 m, un diametro di 300 mm ed è condizionato solo con un tubo cieco fino a 6 m di profondità. Esso intercetta una falda sospesa, presente nell'ambito delle lave e della porzione più superficiale dell'ignimbrite quarzolitica, che si livella a circa 28 m di profondità (Fig. 2).

Il pozzo P3 è profondo 170 m, ha un diametro di 300 mm ed è condizionato rudimentalmente con tubi fessurati in cantiere da 140 m fino a foro. La falda sospesa, incontrata durante la perforazione, è stata isolata; pertanto, il pozzo intercetta solo la falda di base, presente nelle formazioni del substrato fessurato, che si livella a circa 144 m di profondità (Fig. 2).



These trends cannot be exactly recognised in any simple theoretical model, since a early and delayed response of the drawdown occurs. This can be explained by the aquifer heterogeneity, where rocks with primary porosity and dual porosity (well P1 in Fig. 2) coexist.

Wells P2 and P3

Wells P2 and P3 are situated at 30 m from each other.

P2 is 70 m deep, has a 300 mm diameter and is without any screen and is cased up to the depth of 6 m. It penetrates a perched water table (at 28 m of depth), present in lavas and in the most superficial part of the Peperino (Fig. 2).

Well P3 is 170 m deep, has a 300 mm diameter and is roughly screened from 140 m up to the bottom. The perched water table encountered during the drilling was sealed, and the well only intercepts the basal aquifer of the fissured substratum, at a depth of 144 m (Fig. 2).

Fig. 7 - Abbassamento del livello idrico nel pozzo P2
- Drawdown curves in P2 well

Una prova è stata eseguita alla portata costante di 0.3 l/s sul pozzo superficiale P2. Gli abbassamenti (s) misurati nel pozzo sono riportati in figura 7. La ridotta durata della prova è stata imposta dal fatto che, dopo circa 30 min, il battente d'acqua sull'elettropompa risultava inferiore a 10 m. Dal diagramma semilogaritmico (Fig. 7a) e logaritmico (Fig. 7b), si nota un progressivo svuotamento dell'acquifero. La trasmissività calcolabile sui due tratti della relazione s - t (escludendo i primi 7 min di prova) diminuisce nell'ambito di mezzo ordine di grandezza (Tab. 1).

Gli stessi dati sul grafico bilogaritmico s - t mostrano ancora la tendenza allo svuotamento dell'acquifero nelle immediate vicinanze del pozzo.

A test has been performed at a constant rate of 0.3 l/s in the shallow well P2. Measured drawdown (s) is shown in figure 7. After only 30 min, groundwater level was less than 10 m above the submersible pump, thus the test was stopped. A progressive dewatering of the aquifer can be noticed in the semi-logarithmic (Fig. 7a) and bi-logarithmic plot (Fig. 7b). Excluding the first 7 min of the test, calculated transmissivity reduces less than one order of magnitude in the two parts of the s - t relation (Tab. 1).

The same behaviour can be appreciate in the bi-logarithmic plot.

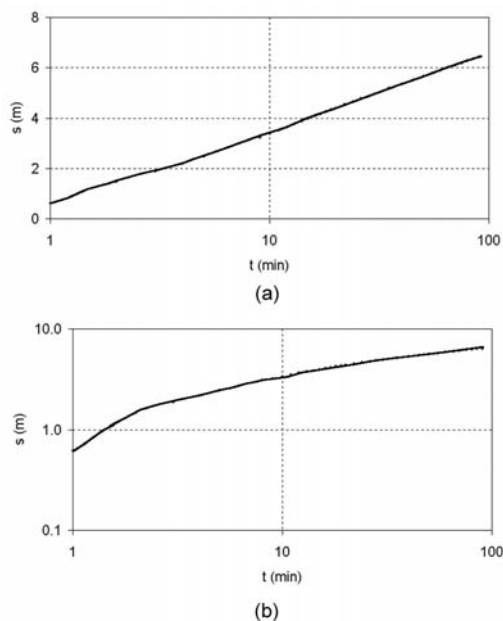


Fig. 8 - Abbassamento del livello idrico nel pozzo P3
- Drawdown curves in P3 well

Il pozzo P3 è stato provato alla portata costante di 0.9 l/s, misurando nel pozzo l'abbassamento (s) e quello residuo (s') dopo il pompaggio. Escludendo i primi 8 min di prova, è evidente un'unica tendenza dell'abbassamento nel tempo dai grafici semilogaritmici (Fig. 8a) ed un andamento confrontabile con la curva di Theis dai grafici bilogaritmici (Fig. 8b). Così come per il pozzo P1, dall'applicazione della relazione di Cooper-Jacob, si calcolano valori di trasmissività relativamente più elevati con gli abbassamenti misurati durante la risalita anziché per l'emungimento (Tab. 1).

In questo caso, non è disponibile la risposta del livello idrico nel pozzo a lungo termine. Tuttavia, nei primi 90 min, si riscontra un andamento omogeneo della depressione che ben corrisponde alla omogeneità litologica e idrogeologica dell'acquifero (Fig. 2), permeabile essenzialmente per fessurazione.

Pozzo P4

Il pozzo P4 è stato realizzato inizialmente fino ad una profondità di 250 m con un diametro dei filtri di 300 mm, isolando una falda sospesa alla profondità di circa 33 m (Fig. 2). Il livello idrico della falda di base, ospitata in lave, scorie e tuffi cineritici, è stata misurata a circa 190 m di profondità. Dopo una prima prova di pompaggio, il pozzo è stato approfondito fino a 290 m e condizionato con tubi filtro di 250 mm a fessure verticali e ghiaietto calibrato da 200 m fino a fondo foro. È stata eseguita una seconda prova partendo da un livello piezometrico di circa 188 m, quindi con uno spessore saturo di acquifero intercettato dal pozzo superiore (circa 100 m) al precedente (circa 60 m) e comprendente ancora lave e scorie e tuffi cineritici (Fig. 2).

Con il pozzo profondo 250 m, è stata eseguita una prova preliminare a gradini di portata crescente della durata di circa 7 ore, che ha evidenziato la pseudo-stabilizzazione del livello per i primi due valori di portata, viceversa per gli ultimi tre gradini di portata è stato registrato un continuo abbassamento nel tempo (Fig. 9).

Well P3 has been tested at a constant rate of 0.9 l/s, measuring drawdown (s) and residual drawdown (s'). Omitting the first 8 min of the test, a linear drawdown is observed in the semi-logarithmic plot (Fig. 8a) and a Theis-like trend can be noticed in the bi-logarithmic plot (Fig. 8b).

Such as for well P1, applying the Cooper-Jacob relation, transmissivity is higher when calculated during recovery (Tab. 1).

In this case, the long term response of the well drawdown is not available, anyway during the first 90 min, the trend of drawdown is homogeneous, in agreement with the homogeneity of the rock (Fig. 2).

Well P4

Well P4 was initially 250 m deep with a 300 mm diameter. A perched water table was sealed at a depth of 33 m (Fig. 2) while the basal aquifer was found at 190 m in lavas, scoriae and tuffs. After a first pumping test, the well has been deepened to 290 m and completed with screen and artificial gravel pack from 200 m to the bottom. A second pumping test was performed with an initial groundwater level of 188 m, with an intercepted saturated thickness of about 100 m, higher than the previous (about 60 m) but still penetrating lavas, scoriae and tuffs (Fig. 2).

In the 250 m well, the 7 h preliminary step-drawdown pumping test highlighted the pseudo-steady state just for the first two discharge steps (Fig. 9).

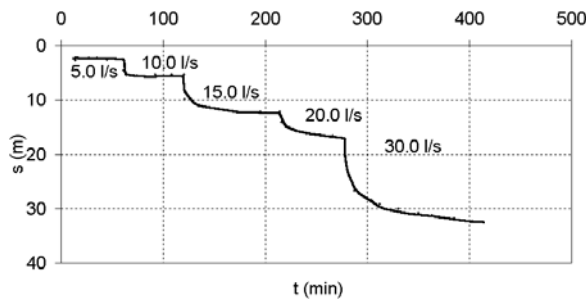


Fig. 9 - Prova a gradini di portata del pozzo P4 (profondità 250 m)
- Step-drawdown pumping test of P4 well (250 m deep)

Successivamente è stato possibile effettuare una prova della durata di circa 23 ore alla portata costante di 25 l/s. Sia i grafici dell'abbassamento, in scala semilogaritmica (Fig. 10a) e bilogaritmica (Fig. 10b), sia quelli della risalita, evidenziano una non omogenea tendenza della depressione piezometrica nel tempo. Si distinguono più tratti sui grafici semilogaritmici, ai quali corrispondono trasmissività comprese tra 7.04 e $1.67 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, per l'emungimento, e valori leggermente più alti, per la risalita (Tab. 1). Anche attraverso il diagramma bilogaritmico, si nota una risposta dell'abbassamento immediata e ritardata, oltre i 200 min di prova.

Afterwards a 23 h pumping test was performed at a 25 l/s constant rate. Both the pumping plots (semi-logarithmic - Fig. 10a - and bi-logarithmic - Fig. 10b) and recovery plots show an heterogeneous response of drawdown. In the semi-logarithmic curve it is possible to distinguish different trends, with transmissivity values included between 7.04 and $1.67 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ during pumping, and higher values during the recovery (Tab. 1). In the bi-logarithmic plot as well, an early and a delayed response, over 200 min, can be observed.

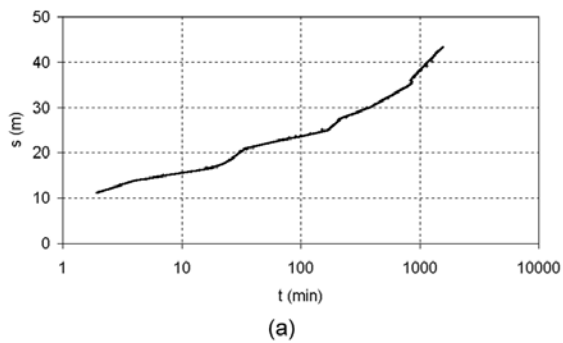
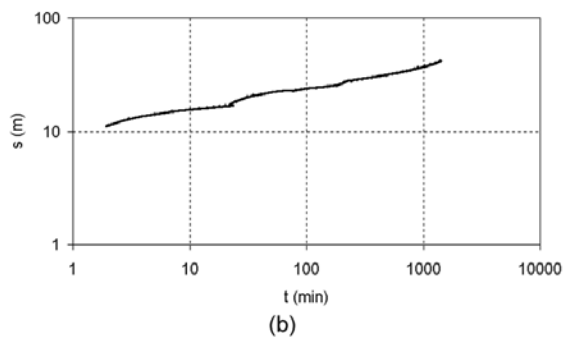


Fig. 10 - Abbassamento del livello idrico nel pozzo P4 (profondità 250 m)
- Drawdown curves in P4 well (250 m deep)



Con il pozzo profondo 290 m, è stato possibile eseguire una prova della durata di circa 27 ore alla portata costante di 15 l/s. Anche in questo caso si riscontra una risposta immediata e ritardata del livello idrico nel pozzo (Fig. 11a e 11b). I diversi tratti sui grafici semilogaritmici permettono di calcolare valori di trasmissività non molto diversi dai precedenti (Tab. 1), quando il pozzo intercettava un più ridotto spessore di acquifero.

In the 290 m depth well, a 27 h test was performed at the constant rate of 15 l/s. Groundwater level response in the well is similar to the previous test (Fig. 11a e 11b). The transmissivity values (Tab. 1) calculated from the different stretches in the semi-logarithmic plots are not much different from the ones of the well with a smaller saturated thickness.

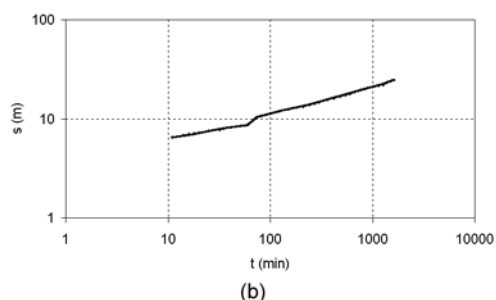
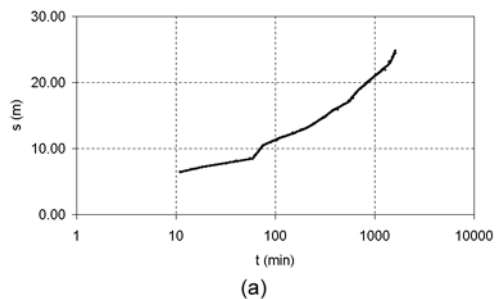


Fig. 11 - Abbassamento del livello idrico nel pozzo P4 (profondità 290 m)
- Drawdown curves in P4 well (290 m deep)

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

I risultati delle prove di pompaggio, interpretati in relazione all'ambiente geologico e idrogeologico di riferimento, permettono alcune considerazioni in merito al comportamento degli acquiferi vulcanici considerati ed alla resa dei pozzi.

È chiaro che i valori di abbassamento rilevati nel pozzo in pompaggio non sono direttamente correlabili con la risposta dell'acquifero, ma piuttosto con la interazione acquifero-pozzo. In tal senso, la trasmissività calcolata (Tab. 1) non è da intendersi in valore assoluto. Tuttavia, se si considerano i valori del parametro in termini relativi (soprattutto quelli calcolati in risalita), valutandoli in funzione della durata del pompaggio e dello spessore e natura dell'acquifero saturo intercettato dai pozzi, si possono evincere alcune caratteristiche idrauliche dei litotipi esaminati.

Una caratteristica comune delle prove (ad eccezione di quella relativa al pozzo P3, che ha avuto una durata limitata) è la tendenza dell'abbassamento piezometrico nel tempo, riconducibile ad una risposta immediata e ritardata dell'acquifero al pompaggio. L'incremento dell'abbassamento nel tempo, che permette di calcolare valori di trasmissività gradualmente decrescenti, in alcuni casi è legato allo svuotamento dell'acquifero (pozzo P2), altre volte è evidente a prescindere dallo spessore di acquifero svuotato. Quest'ultima tendenza si evince, per esempio, dal confronto tra i valori di trasmissività calcolati per il pozzo P1, variabili in tre ordini di grandezza per una riduzione di acquifero saturo del 27% (Tab. 1), e quelli calcolati per il pozzo P2, variabili in meno di mezzo ordine di grandezza per una riduzione di acquifero saturo del 56%.

Quindi la tendenza delle depressioni nel tempo è influenzata anche dall'eterogeneità degli acquiferi esaminati. L'estrema ampiezza del campo della trasmissività determinata per il pozzo P1 potrebbe

DISCUSSION AND RESULTS

Pumping tests results, interpreted in the geological and hydrogeological environment, led to some considerations about the pumping response of the analysed volcanic aquifers.

Drawdown values collected during the pumping are not directly correlated to the aquifer response, but to the aquifer-well interaction. For this reason, calculated transmissivity has not to be considered in its absolute values (Tab. 1). Taking into account relative values (especially those collected during recovery), some hydraulic features of the examined rocks can be evaluated, according to the pumping time and to the aquifer nature and thickness.

A common feature (excepting the P3 short test) is the drawdown trend, showing an early and a delayed aquifer response to pumping. The increase of the drawdown-time slope (decrease of transmissivity values) is sometimes linked to the aquifer dewatering (well P2), but some other times it is not affected by the aquifer thickness. This is the case of well P1, whose transmissivity values changed in three orders of magnitude with a saturated thickness reduction of 27% (Tab. 1); while P2 had a 56% saturated thickness reduction and transmissivity remained in the same order of magnitude.

Drawdown-time curve is also influenced by the aquifer heterogeneity. The P1 wide range of transmissivity could be imputed to an early response by the shallowest part of the aquifer (the loose pyroclastic deposits) and a subsequent response by the deepest part (porous and fissured tuffs substratum). On the other hand, the slight transmissivity variation in P4, could show a relatively low heterogeneity, explained by the single kind of permeability due to fissure net. Anyway, if the pumping test of the 250

essere dovuta alla iniziale risposta della porzione più superficiale di acquifero, le piroclastiti sciolte (relativamente più permeabili per porosità), e successivamente a quella della porzione più profonda, il substrato tufaceo, che partecipa alla ricarica del pozzo mediante il flusso nelle fessure e nella matrice porosa. D'altra parte, la variazione della trasmissività in un campo di valori nettamente più ristretto (meno di un ordine di grandezza) per il pozzo P4 sembrerebbe significativa di una relativa minore eterogeneità che si collega bene alla natura dell'acquifero, in questo caso permeabile prevalentemente per fessurazione. Per quest'ultimo pozzo, comunque, l'eterogeneità dell'acquifero è ricavabile dal confronto tra i valori di trasmissività determinati quando il pozzo era profondo 250 m e quelli dopo l'approfondimento (Tab. 1). Non è evidente un guadagno significativo della trasmissività all'aumentare dello spessore di acquifero saturo intercettato dal pozzo e questo significa che le fessure più produttive sono comunque confinate tra 190 e 250 m di profondità.

I risultati delle prove relative all'acquifero vulcanico dei Distretti Cimino e Vicano sono coerenti con la posizione dei pozzi nell'ambito dello schema di circolazione idrica sotterranea (P2, P3 e P4, in Fig. 3). Si ritrovano infatti i valori relativamente più bassi di trasmissività per la falda sospesa intercettata dal pozzo P2, valori relativamente più alti per il pozzo P3, che interessa la falda di base in una zona di alimentazione, e valori ancora più alti per il pozzo P4, che interessa sempre la falda di base ma in una zona più a valle, nel senso del deflusso idrico sotterraneo.

Quanto risulta circa il comportamento degli acquiferi esaminati ha una notevole influenza sulle possibilità di utilizzo dei pozzi, in termini di portata e durata dell'emungimento. Ovviamente la definizione di questi termini non può prescindere dalla valutazione della ricarica degli acquiferi. A questo proposito, per le realtà idrogeologiche esaminate, in bibliografia si ritrovano valori della resa media in acque sotterranee di circa 9 l/s x km² per le vulcaniti dell'Alto Lazio (BONI *et alii*, 1986) e variabili da 7 a 10 l/s x km² per l'area vulcanica napoletana (PISCOPO *et alii*, 2000).

Questi valori di resa media in acque sotterranee, calcolati sulla base di bilanci idrologici medi relativi ad intere strutture idrogeologiche, possono essere utilizzati per avere delle prime indicazioni sui volumi idrici emungibili complessivamente in un anno dai relativi bacini idrogeologici. È più complicato invece valutare l'entità del pompaggio dai singoli pozzi in relazione al comportamento dell'acquifero riscontrato nel corso delle prove. Può capitare infatti che la depressione piezometrica dopo un anno di pompaggio ininterrotto possa mostrare una evoluzione diversa da quella prevista mediante una prova di emungimento anche di alcune settimane di durata, a causa dello svuotamento progressivo dell'acquifero o della presenza di limiti o più in generale della eterogeneità dell'acquifero stesso.

Le possibilità per contenere la depressione piezometrica nel pozzo e nell'acquifero a valori accettabili, in relazione allo spessore saturo intercettato dal pozzo di pompaggio ed alla posizione della captazione nell'ambito del reticolo di flusso, sono essenzialmente

m well is compared to the 290 m one, transmissivity values do not change so much (Tab. 1). Transmissivity does not grow at the increase of the saturated thickness of the well; this means that the most productive fractures are located between 190 and 250 m of depth, leading again to an aquifer heterogeneity.

Pumping tests results in the Cimino and Vico volcanic districts are coherent with the wells placement in the hydrogeological scheme (P2, P3 and P4, in Fig. 3). The lowest transmissivity values were found in the shallow well P2, higher values characterized well P3, situated in a recharge zone of the aquifer, and even higher values were found in P4, situated near a discharge zone of the aquifer.

Examined aquifers behaviour has a strong influence on the management phase; with a preliminary aquifer recharge assessment, it would be possible to define the pumping discharge and time. Considering analogous realities, groundwater yield is of about 9 l/s x km² in Northern Lazio (BONI *et alii*, 1986) and between 7 and 10 l/s x km² in the Neapolitan volcanic area (PISCOPO *et alii*, 2000).

These aquifer yield values have been calculated on the basis of average hydrological balances of entire hydrostructures, and give suggestions about the annual pumping volumes. The volume which can be withdrawn from a single well is more difficult to analyse, even more if the aquifer behaviour is only monitored during the test. The drawdown behaviour after a full year pumping may have a different trend if compared to the one observed during a single test (even weeks long); this is due to the progressive dewatering of the aquifer, to the presence of some boundaries, or simply to the aquifer heterogeneity.

Considering the intercepted saturated thickness and the placement of the well in the flow net, piezometric drawdown in the well and in the aquifer can be limited in two ways: use of a low discharge for a long time or use of an high discharge for a short time. Both cases must be related to the propagation of hydrodynamic perturbation in time and space.

One of the method proposed by MURRAY & SAMI (1998) to define the "sustainable yield" has been applied to the 15 l/s pumping test of well P4. This method, called "drawdown-to-boundary", considers the first inflection in the semi-logarithmic s-t curve. The first inflection is used to specify the drawdown in the well; the sustainable yield is then calculated through the Cooper-Jacob equation. Supposing a usage of well P4 of 365 days per year, transmissivity and drawdown computed at the first inflection point lead to a discharge of about 2 l/s. Storage (S) has small influence on this calculus; it has been set in the range of 10⁻³-10⁻⁴ on the basis of tests carried out with piezometers in this kind of aquifers.

In this first assumption, a volume of about 63,000 m³ can be withdrawn in one year; applying an alternate pumping at the discharge of 15 l/s (one day on, one day off) the volume becomes of

due: utilizzare una ridotta portata per lungo tempo oppure utilizzare una elevata portata per un ridotto tempo. Anche queste soluzioni però devono essere correttamente valutate con riferimento alla propagazione piezometrica nello spazio e nel tempo.

A titolo di esempio, è stato applicato uno dei metodi proposti da MURRAY & SAMI (1998) al pozzo P4 per determinare la portata "sostenibile". Il metodo, denominato "drawdown-to-boundary", tiene conto della prima inflessione della relazione s-t in scala semilogaritmica. Fissato quale abbassamento desiderato nel pozzo proprio quello relativo alla prima inflessione sul grafico semilogaritmico, si determina la portata di esercizio in relazione al tempo di utilizzo del pozzo, mediante la formulazione di Cooper-Jacob. Il metodo è stato applicato al pozzo P4 facendo riferimento ai dati relativi alla prova di 15 l/s. Con i valori di trasmissività e abbassamento al primo flesso, ipotizzando un uso del pozzo per 365 giorni/anno, è stata determinata una portata di circa 2 l/s. Su questa determinazione incide poco il valore del coefficiente di immagazzinamento (S) considerato nel calcolo; in particolare S è stato posto variabile da 10^{-3} a 10^{-4} sulla base dei valori desunti da altre prove eseguite con l'utilizzo di piezometri relative a questi tipi di acquiferi (anche se non precisamente nelle aree investigate).

In questa ipotesi di uso del pozzo, in un anno si estrae dal pozzo un volume idrico di circa 63,000 m³. Ipotizzando invece un pompaggio alternato con la portata di 15 l/s, comprendente un giorno di pompaggio ed uno di ricarica, si solleva in un anno un volume idrico complessivo di circa 236,000 m³. Bisogna notare che le precedenti valutazioni sono basate esclusivamente sui dati rilevati nel corso del pompaggio, senza propagazioni delle relazioni s-t oltre i tempi registrati.

La scelta dell'uno e dell'altro tipo di utilizzo sarà dettata dalla pressione di emungimento già presente sul bacino di alimentazione, dall'uso previsto della risorsa e dalle possibilità reali di estendere i vincoli delle aree di salvaguardia nell'intorno del pozzo. Per quest'ultimo aspetto, ovviamente necessitano misure della propagazione della depressione piezometrica nell'intorno del pozzo; è chiaro però che il pompaggio alternato con una portata elevata coinvolge un volume di acquifero nettamente più limitato rispetto al pompaggio ininterrotto per tutto l'anno con portate ridotte, essendo il raggio d'azione fortemente dipendente dal coefficiente di immagazzinamento e dalla durata del pompaggio stesso.

CONCLUSIONI

Dalle esperienze riportate si ricavano due tipi di informazioni, le prime riguardano il comportamento idro-geologico delle rocce vulcaniche e le seconde riguardano le possibilità per la definizione della portata di esercizio dei pozzi. Per quanto concerne gli aspetti francamente più idrogeologici risulta:

- * una notevole eterogeneità degli acquiferi esaminati, che ben si accorda con la varietà dei prodotti vulcanici interessati dalle sollecitazioni idrodinamiche;

about 236,000 m³. This statements are only based on the pumping test, without any further time propagation of the s-t relation on tested period.

The choice between the two usage assumptions will have to keep into consideration the existing withdrawal rate from pumping pressure on groundwater basin, the resource usage and the actual feasibility of extending the protection area around the well. In the last case, measures of the piezometric drawdown propagation are needed around the well; it can be easily perceived that alternate pumping at a high discharge involves a limited volume of aquifer if compared to the year-round pumping at low discharges, being the depression cone strongly dependent on storage and pumping time.

CONCLUSIONS

Two kinds of information can be gained from the reported case-studies: the hydrogeological behaviour of volcanic rocks and the opportunity of defining well yield. Concerning the hydrogeological aspects, the following results have been achieved:

- * a considerable heterogeneity of the examined aquifers, in agreement with the variety of the volcanic products under the hydrodynamic solicitations;

* una ridotta trasmissività degli acquiferi esaminati, se paragonata con quella degli acquiferi alluvionali e carbonatici dell'Italia centro-meridionale;

* l'interpretazione della specifica risposta al pompaggio degli acquiferi deve essere strettamente legata al contesto geologico e idrogeologico di riferimento, in quanto la stessa tendenza abbassamento piezometrico - tempo può essere associata a diverse cause, quali lo svuotamento dell'acquifero, la porosità duale delle rocce, l'eterogeneità idraulica del volume interessato dal cono di depressione, la presenza di limiti, ecc.

In termini applicativi, quando in seguito al pompaggio non è evidente la stabilizzazione nel tempo della depressione piezometrica (anche per modeste portate, qualche litro al secondo), l'interpretazione dei risultati delle prove condotte permette le seguenti considerazioni:

* per definire le modalità di esercizio dei pozzi, bisogna individuare la portata ed il tempo di emungimento "sostenibile";

* portata e tempo di emungimento in esercizio non possono essere definiti unicamente sulla base di prove di pompaggio anche di lunga durata, ma è necessario considerare il risultato delle prove nel più ampio contesto idrogeologico di riferimento, valutando, tra l'altro, l'entità della ricarica e la posizione del pozzo nel reticolo di flusso dell'acquifero;

* la risposta ritardata al pompaggio, frequentemente verificata negli acquiferi considerati, implica che non è facile prevedere l'andamento della depressione piezometrica nel tempo, oltre quello effettivamente deducibile dai dati misurati.

* a reduced transmissivity of the analysed aquifers, if compared to the ones of the Central-Southern Italy alluvial and carbonate aquifers;

* the explanation of the pumping response must be interpreted according to the geological and hydrogeological setting, since drawdown-time trend can be linked to different causes, such as the aquifer dewatering, the dual porosity of rocks, the hydraulic heterogeneity of the volume affected by the depression cone, the presence of boundaries, etc.

For practical purposes, if drawdown does not reach the steady-state condition (even for small discharges), the interpretation of tests results allows the following affirmations:

* sustainable well yield and time must be specified in order to define the correct usage of the well;

* rate and time of pumping cannot be only defined on the basis of pumping tests, but the whole hydrogeological setting must be considered in addition to the amount of recharge and to the well placement in the aquifer flow net;

* delayed pumping response, often found in the studied aquifers, implies that it is not easy to forecast the drawdown-time trend further than tested period.

OPERE CITATE/REFERENCES

- BAIOCCHI A. (2003) - *Lineamenti idrogeologici e problematiche di vulnerabilità all'inquinamento delle acque sotterranee del settore settentrionale del Distretto Cimino*. Tesi di laurea in Scienze Ambientali, Università degli Studi della Tuscia.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia Centrale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**: 991-1012.
- BORGHETTI G., SBRANA A. & SOLLEVANTI F. (1981) - *Vulcano tettonica dei Monti Cimini e rapporti cronologici tra vulcanismo Cimino e Vicano*. Rend. Soc. Geol. It., **4**: 254-274.
- BOULTON N. S. (1970) - *Analysis of data from pumping tests in unconfined anisotropic aquifers*. J. Hydrol., **10**, 369.
- BOULTON N. S. (1973) - *The influence of delayed drainage on data from pumping tests in unconfined aquifers*. J. Hydrol., **19**: 157-169.
- CELICO F., ESPOSITO L & MANCUSO M. (2001) - *Complessità idrodinamica e idrochimica dell'area urbana di Napoli: scenari interpretativi*. Geologia Tecnica & Ambientale, **2**: 35-54.
- CELICO P. (1983) - *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionale, Abruzzo, Molise e Campania)*. Quad. della Cassa per il Mezzogiorno, 4 (2), Roma.
- COOPER H.H. & JACOB G.E. (1946) - *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarising well field history*. Am. Geophys. Union Trans., **27**: 256-534.
- DI GIROLAMO P., GHIARA M.R., LIRER L., MUNNO R., ROLANDI G. & STANZIONE D. (1984) - *Vulcanologia e petrologia dei Campi Flegrei*. Boll. Soc. Geol. It., **103**: 349-413.
- DAGAN G. A. (1967) - *A method of determining the permeability and effective porosity of unconfined anisotropic aquifers*. Water Resour. Res., **3** (4): 1059-1071.
- DRAGONI W., LOTTI F., PISCOPO V. & SIBI A. (2002) - *Bilancio idrogeologico del lago di Vico (Lazio - Italia)*. Proc. Residence Time in Lakes: Science, Management, Education, 29 settembre - 3 ottobre 2002, Bolsena (in stampa).

PUMPING RESPONSE OF VOLCANIC AQUIFERS: EXAMPLES FROM THE VOLCANIC AREAS OF NAPLES AND VITERBO

- MURRAY E. C. & SAMI K. (1998) - *Evaluating sustainable borehole yields for fractured rock aquifers. Some South Africa solution*. In: "Gambling with groundwater", Las Vegas, Nevada, 25-31.
- NEUMAN S.P. (1975) - *Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response*. Water Resour. Res., **2** (2): 329-342.
- OTTAVIANI M. (1988) - *Proprietà geotecniche di tufi vulcanici italiani*. Rivista Italiana di Geotecnica, **3**: 173-178.
- PELLEGRINO A. (1967) - *Proprietà fisico-meccaniche dei terreni vulcanici del Napoletano*. Atti dell'VIII Convegno di Geotecnica, Cagliari 1967, 113-149.
- PISCOPO V., FORMICA F. & ALLOCCA V. (2000) - *Sustainable management of groundwater in Neapolitan volcanic areas, Italy*. In: "Groundwater: Past Achievements and Future Challenges", Balkema, Rotterdam, 1011-1016.
- PRICKETT T. A. (1965) - *Type-curve solution to aquifer tests under water-table conditions*. Ground Water, **3** (3): 5-14.
- SCHERILLO A. & FRANCO E. (1960) - *Rilevamento stratigrafico del territorio comunale di Napoli*. Boll. Soc. Nat. in Napoli, **69**: 252-262.
- SCHERILLO A. & FRANCO E. (1967) - *Introduzione alla carta stratigrafica del suolo di Napoli*. Atti Acc. Pont., 16, Napoli.
- SOLLEVANTI F. (1983) - *Geologic, volcanologic and tectonic setting of the Vico-Cimino area, Italy*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **17**: 203-217.
- STRELTSOVA T. D. (1972) - *Unsteady radial flow in an unconfined aquifer*. Water Resour. Res., **8** (4): 1059-1066.

