

Geologia

3 / 2004

Periodico della SIGEA
Società Italiana di Geologia Ambientale
ISSN 1591-5352



del' Ambiente

Spedizione in abbonamento postale art. 2 comma 20/b Legge 662/96 - Filiale di Roma



Atti del convegno
**"SORGENTI DI INTERESSE
SCIENTIFICO-AMBIENTALE"**



Con il contributo di



PROVINCIA DI PAVIA
Settore Tutela e Valorizzazione Ambientale



TERME DI SALICE

Coordinamento tecnico e scientifico



Geomorphosites I.A.G. Working Group
COFIN 2001-2003



**Università agli
Studi di Genova**



**Dipartimento
POLIS**



**Centro Documentazione
Geositi
Università di Genova**

Con la collaborazione scientifica di

UNIVERSITÀ AGLI STUDI DI PAVIA - Dipartimento Scienze della Terra
UNIVERSITÀ AGLI STUDI DI TORINO - Dipartimento Scienze della Terra
ProGEO (The European Association for the Conservation of the Geological Heritage)

Patrocinio di

REGIONE LOMBARDIA

PROVINCIA DI PAVIA

Settore Tutela e Valorizzazione Ambientale

COMUNITÀ MONTANA OLTREPO PAVESE

Comune di GODIASCO

FEDERTERME

MIUR - CSA

IAH - ASSOCIAZIONE INTERNAZIONALE IDROGEOLOGI

GEAM - ASSOCIAZIONE GEORISORSE E AMBIENTE Politecnico di Torino

APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici)

ROMOLO DI FRANCESCO
GEO&GEO INSTRUMENTS

GIANNI SCALELLA
REGIONE MARCHE - AUTORITÀ DI BACINO
REGIONALE

MATTEO SIENA
GEO&GEO INSTRUMENTS

ANALISI NON CONVENZIONALI DI UN SISTEMA IDROLOGICO.

VALORIZZAZIONE DI ACQUIFERI PER USO TERMALE IN
MONTORIO AL VOMANO (TE)

RIASSUNTO

L'area studiata interessa una porzione del territorio comunale di Montorio al Vomano (TE); in essa sono stati individuati alcuni acquiferi la cui caratterizzazione idrogeologica, le prove di pozzo e le analisi chimico-fisiche permettono di identificarne un uso a fini termali. Le indagini sono state eseguite inizialmente su due pozzi esistenti, la cui perforazione, effettuata per uso irriguo, risale ai primi anni '80. Il primo pozzo, sulfureo (denominato "Sulfureo 1"), ha una profondità di 24 m, un diametro interno di 225 mm ed un condizionamento spinto fino a quota -10 m dal piano di campagna; il secondo pozzo, salato (denominato "Salato 2"), perforato ad una distanza di circa 240 cm dal precedente, misura circa 49 m di profondità, con un diametro interno di 225 mm ed un condizionamento spinto fino alla profondità di circa 13 m dal piano di campagna. Le modalità di prova, necessarie per una caratterizzazione idrogeologica esaustiva degli acquiferi, sono state eseguite con prove di pozzo a gradini e prove di pompaggio a lunga durata. Sono stati inoltre prelevati numerosi campioni di acque durante tali prove successivamente sottoposti ad analisi chimico-fisiche. Lo studio in questione è stato completato con la ricerca e l'analisi di ulteriori pozzi esistenti che fornissero caratteristiche chimico-fisiche idonee ad implementare lo sfruttamento di quelli in oggetto. Tutte le prove eseguite sui vari pozzi sono state sempre precedute da un "gradino di test" svolto utilizzando le pompe ivi presenti; lo scopo di tale prova è stato quello di valutare l'effetto capacità del pozzo, ovvero del tempo necessario per la sollecitazione dell'acquifero e determinazione del passaggio dalle condizioni di deflusso quadratico non lineare ad un deflusso lineare, quindi determinare il tempo di ogni successivo gradino sufficiente ad annullarlo. Tutti i test eseguiti sono stati matematicamente analizzati con algoritmi di calcolo specifici che hanno permesso di valutare l'influenza di diversi fattori che hanno condizionato le prove, quali: punto di reazione dell'acquifero; variazione di portata per sfarfallamento delle pompe; individuazione di eventuali livelli piezometrici critici e relativa fase di svuotamento del pozzo; punto di innesco

dei moti turbolenti; presenza e profondità di eventuali sacche di alimentazione laterale degli acquiferi; ricostruzione delle curve sperimentali e teoriche di utilizzo dei pozzi con relativa valutazione degli effetti di pompaggio in condizioni di futuro esercizio. I risultati ottenuti dalle indagini, in particolare l'assenza di variazioni nel chimismo in funzione dello sfruttamento, consentono di stabilire la possibilità di utilizzare alcuni degli acquiferi individuati per fini termali.

PAROLE CHIAVE:

Sorgenti, sistema acquifero, prove di pozzo, algoritmi di calcolo

ABSTRACT

The studied area interests a portion of the municipality district of Montorio al Vomano (TE); in this area aquifers have been individualized whose hydrogeologic characteriza-

tion, tests of well and the chemical-physics analyses allow to identify a thermal use. Investigations have been made in first on two existing wells, realized in the eighties for irrigation use: the first one, sulphureous (denominated "Sulphureous 1") has a depth of 24 ms with an internal diameter of 225 mms and an inclined conditioning until - 10 ms from terrain; the second well salty, (denominated "Salty 2") drilled to a distance of 240 cms from the previous one, has a depth of 49 ms, with an internal diameter of 225 mms with an inclined conditioning until - 13 ms from the terrain. Test formalities, necessary for an exhaustive hydrogeologic characterization of aquifers, has been performed with step well tests and long duration pumping tests. During these tests numerous water samples have also been gathered, subsequently subjected to chemical-physics analysis. This study has been completed with analysis and research of other existing wells whi-

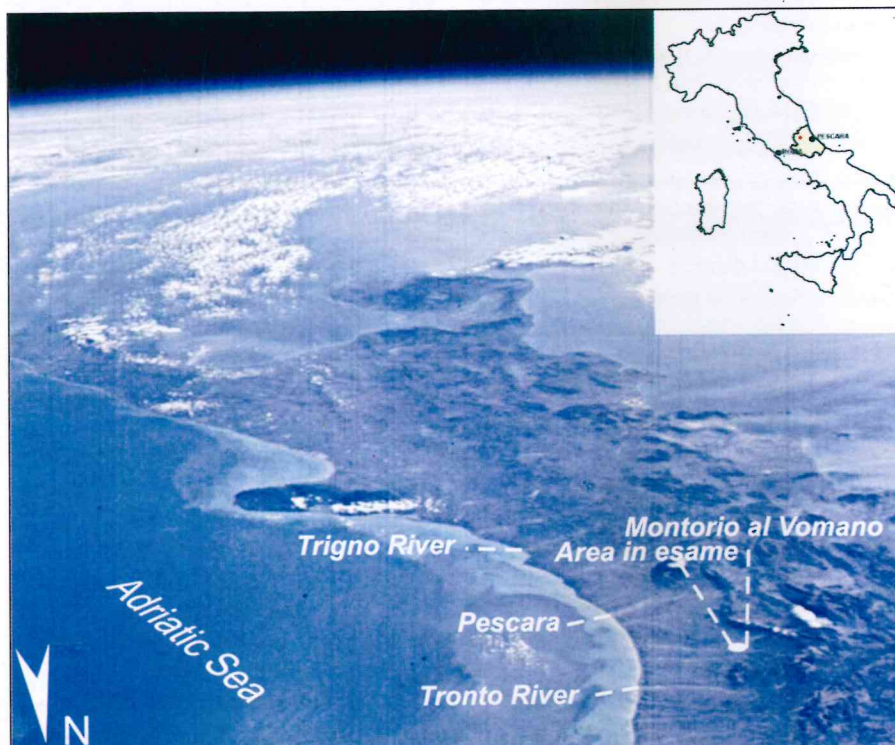


Fig. 1 - Ubicazione dell'area esaminata (NASA - Missione STS 107 Shuttle)

ch could give chemical-physics characteristics suitable to implement the exploitation of those in object. All performed test on the various wells are always been preceded by a "step of test" carried out using the existing pump on the location; the purpose of this test was to evaluate the real capacity of the well, or rather to evaluate the necessary time to stress the aquifer and to determine the passage from the non linear quadratic condition outflow to a linear outflow, therefore to determine the necessary time of every following step to annul it. All tests carried out have been mathematically analysed with specific algorithms of calculation that have allowed to evaluate the influence of several elements that conditioned the tests, as: reaction point of the aquifer, capacity variation for flutter of the pumps; individualization of possible critical piezometric levels and related emptying phase of the well; primer point of turbulent motions; presence and depth of possible side feeding packs of the aquifer; reconstruction of experimental and theoretic curves of use of the wells with related evaluation of the pumping effects under conditions of future exercise. Results obtained by investigations, and precisely the absence of variations in the chemism of the exploitation, allows the use of some individualized aquifer for thermal purpose.

KEY WORDS:

Springs, aquifer system, tests of well, algorithms of calculation

INTRODUZIONE

L'esecuzione di una perforazione per scopi irrigui, sulla piana alluvionale in località Piane di Colvecchio nel Comune di Montorio al Vomano (TE), ha consentito la scoperta casuale di un acquifero tipicamente sulfureo (pozzo "Sulfureo 1") confinato nei litotipi marnosi appartenenti alla Formazione della Laga (*Messiniano*). Pur essendo stato rinvenuto l'acquifero alla profondità di circa 17 m dal piano di campagna, la presenza di acque freatiche contenute nei depositi alluvionali di copertura attraversati e la rapida risalita verso la superficie, fino a circa -6 m, dell'acquifero profondo, fece ipotizzare che il pozzo avesse attraversato un impianto fognante, anche per la presenza del classico odore di uova marce. La perforazione di un secondo pozzo (pozzo "Salato 2") ad una distanza di 240 cm dal precedente fornì elementi del tutto nuovi, a causa del rinvenimento di acqua salata, con una pressione di circa 3,5 Atm, alla profondità di circa 42 m dal piano di campagna. In seguito al rinvenimento di tali acquiferi aventi chimismo diverso, alla fine degli anni '80 fu dato l'avvio ad uno studio sistematico e di dettaglio del territorio al fine di individuare e delimitare una eventuale concessione di sfruttamento. Tali ricerche sono terminate con il rilascio, da parte del Ministero della Sanità a favore della società Salus S.r.l., di una Concessione Mineraria

denominata S.Emidio. In relazione alle conoscenze acquisite derivanti dai precedenti studi nonché da prove di pompaggio preliminari (*gradini di test*), è emersa, per l'acquifero sulfureo, una non corrispondenza del comportamento dello stesso rispetto all'utilizzo delle teorie idrogeologiche classiche, dal momento che il pozzo "Sulfureo 1" è risultato lateralmente limitato e funzionante in condizioni di permeabilità per fratturazione. L'applicazione di una metodologia di analisi non convenzionale per il caso specifico in esame, basata sulla progettazione e realizzazione di un sistema di pompaggio semiautomatico, a gestione elettronica ed implementato con algoritmi di calcolo realizzati "ad hoc" a partire dalle teorie attualmente applicate, ha consentito uno studio dettagliato del funzionamento dell'acquifero "Sulfureo 1" in termini non solo di profondità/volume delle sacche di alimentazione laterale, ma anche di individuazione dei punti di innescio dei moti turbolenti, dei livelli piezometrici critici, fino alla ricostruzione delle curve sperimentali e teoriche di sfruttamento del pozzo in questione. Infine l'utilizzo della metodologia in originale anche per l'analisi del pozzo "Salato 2", costituente invece un acquifero artesianico classico, nonché per gli ulteriori acquiferi scoperti, ha condotto ad una conoscenza idrogeologica dettagliata di un sistema di pozzi che potrebbero essere utilizzati a fini termali.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

L'area esaminata si trova nel Comune di Montorio al Vomano (TE); essa ricade nel Bacino della "Formazione della Laga" (Boccaletti et al., 1986) che è qui costituita dai termini della successione appartenenti al membro pre-evaporitico dell'omonimo bacino. Le litologie sono principalmente caratterizzate da un'associazione denominata, "Associazione pelitico-arenacea I", costituita da strati sottili pelitico-arenacei. In alcuni casi sono presenti orizzonti caratterizzati da marne bituminose (così come osservato durante l'esecuzione dei sondaggi) mentre intercalati a varie altezze stratigrafiche si osservano orizzonti arenaceo-pelitici (Centamore et al., 1992). Tale settore dell'Appennino centrale è stato strutturato da successivi fenomeni deformativi che hanno dato origine a pieghe, faglie sia dirette che inverse, e *thrusting* a partire dall'epoca miocenica fino al Pliocene medio e superiore. I notevoli campi di forze indotti dai fenomeni tettonici sono all'origine di fratture e sistemi di fratturazione che tagliano secondo orientazioni preferenziali (N60/65, N80/70, N120/70) le diverse litofacies; la concomitanza di queste con il va-

riabile grado di porosità e permeabilità dei vari litotipi condizionano le modalità di circolazione idrica. Le caratteristiche geomorfologiche vengono identificate dal ripiano alluvionale di III ordine del Fiume Vomano leggermente declinante verso est e verso il *talweg*, ubicato in sinistra idrografica ad una quota di circa 225 m s.l.m.. I depositi alluvionali, visibili in affioramento, risultano poligenici ed eterometrici con tipiche strutture deposizionali tipo assi lunghi ed embriciature; lo spessore, determinato tramite sondaggi nel sito in esame, si attesta intorno agli 8,5 metri. Nell'intorno i versanti risultano variamente acclivi ed interessati da frequenti scarpate di natura poligenica che delimitano valli profondamente incise. Dal punto di vista idrogeologico il complesso della Formazione della Laga, comprende una facies argillosa caratterizzata da una permeabilità ridotta per porosità, una facies più marnosa permeabile per fratturazione ed una facies arenacea permeabile sia per porosità che per fratturazione. Le varie tipologie si interpongono ripetutamente ed in modo piuttosto variabile in relazione alle notevoli variazioni laterali e verticali di facies.

ANALISI IDROGEOLOGICA INTERPRETAZIONI PROVE DI POMPAGGIO

Le prove di pompaggio, necessarie per la caratterizzazione idrodinamica di un acquifero, rappresentano prove in scala reale in grado di valutare le caratteristiche del complesso acquifero - opera di captazione (Celico, 1986). Tali caratteristiche sono: la portata specifica, la produttività del pozzo nonché la tipologia dell'acquifero. Per una corretta esecuzione delle prove (luglio-settembre 2001) sono stati installati 10 piezometri con geometria radiale e distanza progressiva (10÷200 m) rispetto ai pozzi "Sulfureo 1" e "Salato 2", spinti fino alla profondità massima di 18 m (da confrontare con uno spessore massimo dei depositi alluvionali di 8.50 m) affinché permettessero la valutazione dell'estensione laterale dell'acquifero e di eventuali condizioni di miscelazione tra le acque artesiane, sulfuree e salate, e le acque freatiche dolci. Nessuno dei 10 piezometri, attrezzati in fori eseguiti con perforazione a carotaggio continuo, ha intercettato gli acquiferi in questione, da cui, unitamente all'interpretazione delle prove preliminari (*gradini di test*) ed allo studio della stratigrafia, sono state formulate due ipotesi fondamentali che hanno sotteso il proseguo delle prove:

1. Gli acquiferi hanno origine più profonda di quella massima raggiunta dai piezometri;
2. Gli acquiferi sono lateralmente limitati e funzionano in condizioni di permeabilità per fratturazione.



Fig. 2 - Carta geologica schematica, scala 1:5.000 circa

In ogni caso essi hanno permesso di escludere la miscelazione delle acque termali e dolci.

Tutte le prove eseguite sui pozzi sono state sempre precedute da un "gradino di test" svolto utilizzando le pompe ivi presenti (portata $Q_{max} = 0.25$ l/s - prevalenza $H = 40$ m per il pozzo "Sulfureo 1" e $Q_{max} = 1.00$ l/s - prevalenza $H = 50$ m per il pozzo "Salato 2") e collocate per uno sfruttamento agricolo delle acque termali; tale prova ha permesso di valutare l'effetto "capacità del pozzo", ovvero di determinare il livello piezometrico (LP) ed il volume (V) al quale corrispondono lo svuotamento dell'opera e di conseguenza l'inizio della sollecitazione dell'acquifero. Poiché sia LP che V sono da relazionare alla portata emunta (Q), il gradino di test ha consentito di pianificare le successive prove di pompaggio in funzione del tempo (t) necessario per analizzare il funzionamento dell'insieme pozzo-acquifero in termini di perdite di carico. In altri termini è stata ricercata la condizione di annullamento dell'influenza della capacità del pozzo nell'analisi dell'acquifero. Le perdite di carico o abbassamento del livello piezometrico corrispondono alla somma di perdite di carico quadratico-non-lineari e lineari (Castany, 1982). Di conseguenza, l'abbassamento (s), misurato in un'opera, ad un istante t, è la somma delle due componenti (Jacob, 1950):

$$s_{(t)} = BQ + CQ^2 \quad [1]$$

Il primo termine della seconda parte dell'equazione (BQ) è il risultato di due effetti (Castany, 1982): l'influenza dell'acquifero, dove il deflusso laminare caratteristico è di regime transitorio, e l'influenza della parte captante del pozzo (rimaneggiamento del serbatoio, filtro ed eventuale massa filtrante). L'aliquota quadratica è caratteristica dell'attrezzatura tecnica dell'opera di captazione (diametro del tubaggio e filtro). L'analisi dell'equazione [1] consente di trarre le seguenti considerazioni: 1) per portate molto piccole la componente quadratica tende ad annullarsi:

$$s_{(t)} = BQ \quad [2]$$

2) per portate molto grandi, quindi superiori alla velocità critica (v_c), scompare l'aliquota pertinente alle condizioni di deflusso lineare:

$$s_{(t)} = CQ^2 \quad [3]$$

laddove la v_c è corrispondente ad una portata critica (Q_c) che stabilisce il limite di passaggio da condizioni di deflusso laminare a condizioni di deflusso turbolento.

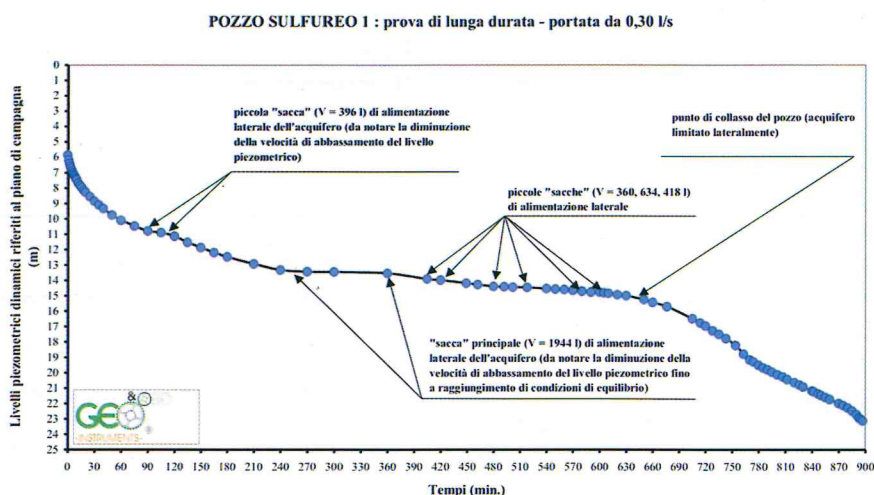


Fig. 3 - Pozzo "Sulfureo 1" - Abbassamenti piezometrici in funzione del tempo di pompaggio (LP → t) relativi alla prova di lunga durata; la curva mostra chiaramente la posizione delle sacche di alimentazione laterale dell'acquifero e il punto di inizio del collasso del pozzo.

POZZO SULFUREO 1 : Derivata prima vs livello dinamico - portata da 0,30 l/s

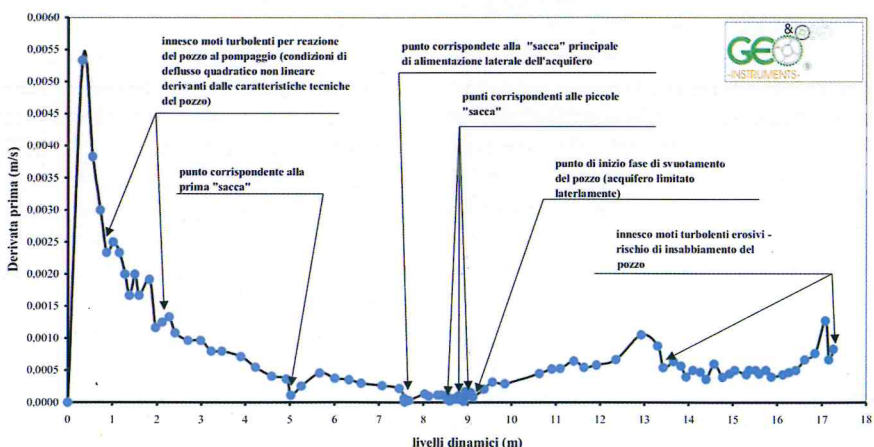


Fig. 4 - Pozzo "Sulfureo 1" - abbassamenti piezometrici in funzione del tempo di pompaggio (LP → t) relativi alla prova di lunga durata; la curva mostra chiaramente la posizione delle sacche di alimentazione laterale dell'acquifero e il punto di inizio del collasso del pozzo.

Il passaggio tra le due condizioni limite è fornito dall'equazione di Reynolds:

$$R = \frac{v \cdot d \cdot \rho_w}{\mu} \quad [4]$$

la quale esprime condizioni di flusso turbolento per $R > 100$ e condizioni di flusso laminare per $R < 1+10$. Da un'analisi comparata delle equazioni 1+4 emergono i seguenti fattori:

a) per portate molto piccole prevalgono condizioni laminari tali da poter essere analizzate a partire dalla legge di Darcy:

$$Q = v \cdot A \quad [5]$$

da cui, essendo v la velocità funzione della permeabilità (k) e del gradiente idraulico (i):

$$v = k \cdot i \quad [6]$$

si ottiene che la portata emunta è:

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad [7]$$

b) le perdite di carico in un pozzo risultano, in condizioni generiche, essere funzione sia di moti turbolenti che di moti laminari (Castany, 1982; Celico, 1986), laddove l'incognita è rappresentata dalla determinazione della v_c mediante costruzione di un grafico $Q_i \rightarrow s_i$ (Q_i = portate relative ai singoli gradini; s_i = abbassamenti pertinenti ad ogni portata); c) le prove possono essere eseguite sia in condizioni di moto turbolento ($Q > Q_c$) che di moto laminare ($Q < Q_c$); nel primo caso, ai flussi quadratici corrispondenti allo svuotamento dell'opera seguono flussi quadratici legati ai moti turbolenti e flussi quadratici legati all'insabbiamento del pozzo; nel secondo caso, ai flussi quadratici per svuotamento seguono flussi lineari ed infine eventuali flussi quadratici per insabbiamento (Castany, 1982; Celico, 1986). Alla luce di quanto sopra esposto, considerate le difficoltà intrinseche di un'analisi completa del flusso nelle varie fasi di pompaggio, per l'esecuzione di tutte le prove è stata messa a punto una metodologia che ha comportato la progettazione ed esecuzione di un sistema semiautomatico, consentente quindi l'inserimento dell'utilizzatore in ogni fase e comprendente: una pompa avente portata max di 3,2 l/s e prevalenza di 50 m connessa ad un regolatore di portata; un sensore di pressione collegato ad una centralina di acquisizione gestita da un software di basso livello; un compu-

ter portatile; un software gestionale dei dati appositamente scritto. L'aspetto saliente del software è consistito nella implementazione di una procedura automatica di gestione dei dati, con costruzione in tempo reale dei grafici relativi agli abbassamenti del livello piezometrico in funzione delle portate e del tem-

po, alle risalite dello stesso nonché all'applicazione della derivata prima alle curve $s \rightarrow t$, che può essere sintetizzata come segue:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad [8]$$

POZZO SOLFUREO 1 : Curve di sfruttamento del pozzo

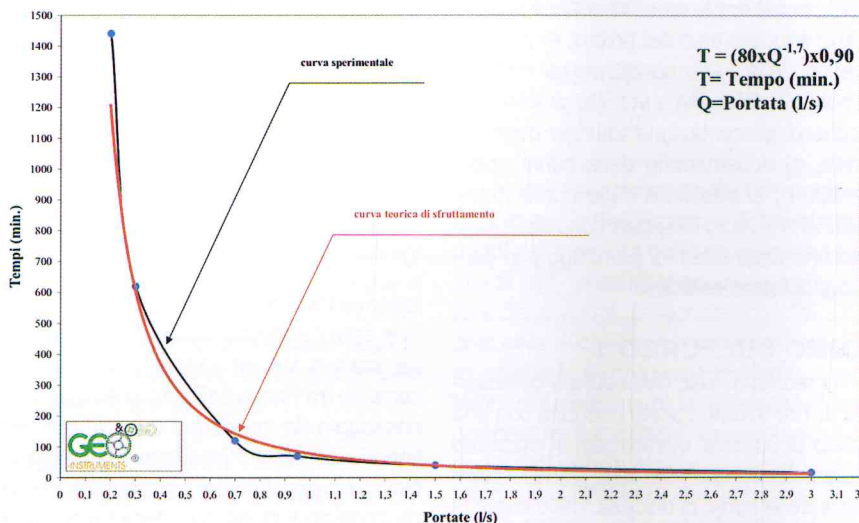


Fig. 5 - Curve sperimentali e teoriche (curve $T \rightarrow Q$) di sfruttamento del pozzo.

POZZO SALATO 2 : Curve di sfruttamento del pozzo

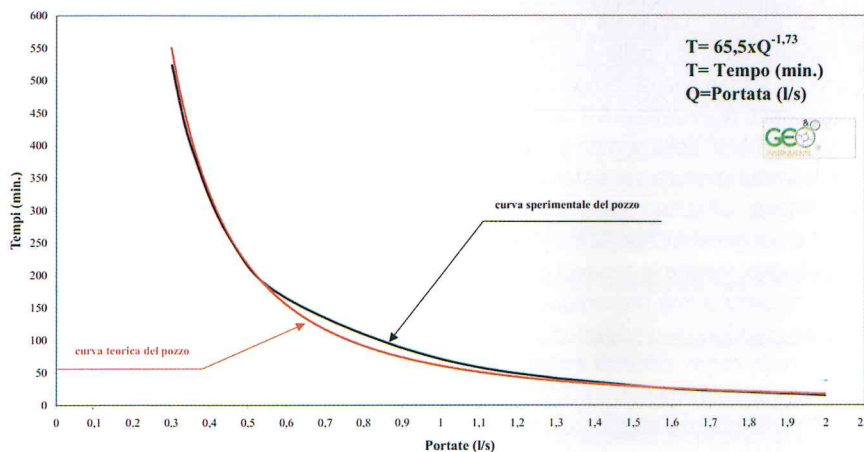


Fig. 6 - Curve sperimentali e teoriche (curve $T \rightarrow Q$) di sfruttamento del pozzo.

Curva caratteristica del pozzo salato 2

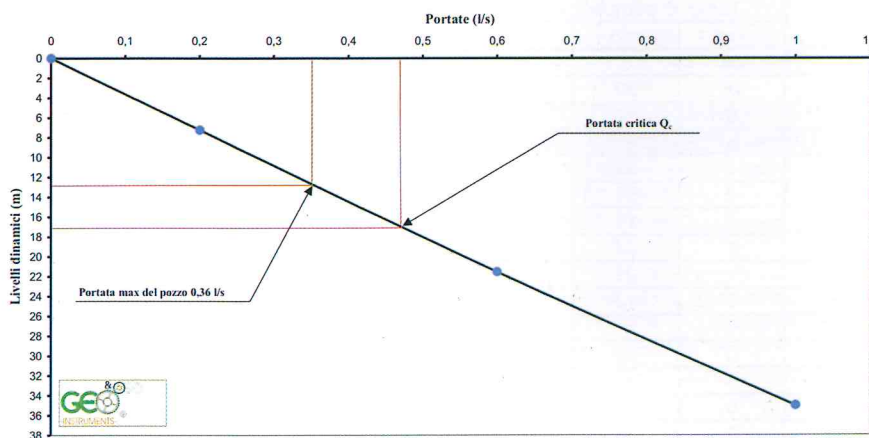


Fig. 7 - Grafico $LP \rightarrow Q$ relativo ad un acquifero tipicamente artesiano con esistenza di una portata critica.

Il vantaggio nell'utilizzo del calcolo differenziale applicato a funzioni ad una variabile (Δs), consiste nella possibilità di poter scindere le componenti derivanti dai vari flussi nonché di ottenere ulteriori informazioni scaturenti dall'analisi comparata con gli altri grafici, quali: a) punto di reazione dell'acquifero; b) volume della "capacità di pozzo"; c) variazione di portata per sfarfallamento delle pompe; d) individuazione di eventuali livelli piezometrici critici e relativa fase di svuotamento del pozzo; e) punto di innesco delle varie condizioni di moto; f) presenza, profondità e volume di eventuali sacche di alimentazione laterale degli acquiferi; g) ricostruzione delle curve sperimentali; h) costruzione delle curve matematiche di utilizzo dei pozzi con relativa valutazione degli effetti di pompaggio in condizioni di futuro esercizio.

POZZO SOLFUREO 1

Il gradino di test, della durata complessiva di 120 minuti, è stato eseguito con una portata di 0,25 l/s, ovvero pari al massimo valore della pompa esistente. L'analisi comparata delle curve di discesa, delle curve di risalita e delle loro derivate prime, ha permesso di evidenziare l'esistenza di un acquifero con caratteristiche peculiari, dal momento che esso attinge ad un sistema multifalda a "sacche" confinate nella diffusa fratturazione tettonica delle marne grigio-azzurre. La stessa analisi comparata ha anche permesso di evidenziare il verificarsi di tre "sfarfallamenti" della pompa e di eseguire una corretta taratura del sistema gestionale affinché, utilizzato nelle successive prove di emungimento, agisse in tempo reale. In dettaglio, mentre le curve di discesa e relativa derivata prima presentano una distribuzione random di variazioni di portata e velocità, nelle curve, originali e derivate, di risalita tali variazioni risultano mancanti, potendo di conseguenza escludere una eventuale presenza di sacche, quest'ultime nel contempo rilevate in altre e ben fisse posizioni nello spazio. Con particolare riferi-

mento alle sacche, esse sono facilmente evidenziabili da una variazione negativa (appiattimento) della pendenza della curva $LP \rightarrow t$ sia in fase di discesa che di risalita. La loro posizione risulta inoltre evidenziata dallo studio delle derivate prime, poiché si ha [9]:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \rightarrow 0 \text{ per } \Delta s \rightarrow 0$$

Inoltre, dai grafici è stato anche possibile calcolare il volume delle sacche (V_s) ed il volume (V_o) di svuotamento dell'opera o capacità del pozzo:

$$V_{s/o} = Q \cdot \Delta t \quad [10]$$

laddove Δt rappresenta la finestra temporale delle condizioni di cui all'equazione [9] nel caso di V_s , ed il lasso di tempo intercorrente tra l'inizio della prova ed il punto di passaggio da condizioni quadratiche-non lineari a condizioni lineari per il calcolo di V_o . Nel caso specifico del passaggio tra le varie condizioni di moto la derivata prima ha fornito ulteriori strumenti di valutazione diretta, scaturente da una immediata percezione visiva dell'andamento dei grafici; di fatti mentre ad un moto turbolento corrisponde una continua oscillazione di velocità, ad un moto lineare corrisponde una variazione negativa quasi costante della pendenza della curva. Successivamente al gradino di test è stata eseguita una prova di emungimento con portata:

$$Q_n = 0,25 \cdot 6 = 1,5 \frac{l}{s} \quad [11]$$

poiché, valendo in generale la regola di una progressione $n = 2, 3, 4, \dots$, si è cercato di raggiungere le condizioni di "collasso" dei pozzi e quindi il range di variazione delle portate relative alle successive prove. Le principali informazioni dedotte da tale prova

derivano dall'aver raggiunto il "punto di collasso" dopo 62 minuti dall'inizio prova, con un relativo volume emunto di 5,58 metri cubi. L'esecuzione di successive prove a diversa portata ($Q = 0,30, 0,55, 0,70, 0,95$ l/s) hanno confermato le ipotesi evinte dalla prova di test nonché la validità del sistema di gestione ed interpretazione dei dati. Inoltre è emerso un elemento importante riguardo la portata di esercizio, che costituisce, nell'ambito di prove di pompaggio, l'obiettivo da raggiungere. In effetti, l'esistenza di sacche di volume limitato, che rappresentano gran parte dell'alimentazione del pozzo solfureo, impediscono di fatto uno sfruttamento dello stesso secondo il principio dell'emungimento illimitato, se non con portate economicamente svantaggiose ($Q < 0,10$ l/s). Focalizzando l'attenzione sulla prova condotta con $Q = 0,30$ l/s (figg. 3 e 4), i risultati possono essere riassunti come segue:

1. il volume di svuotamento dell'opera (capacità del pozzo) è pari a 0,48 m³;
2. la sacca principale è ubicata ad una profondità di -13,60 m dal piano di campagna, con un volume di 1,94 m³;
3. altre sacche sono ubicate rispettivamente alle profondità di -11; -14; -14,4; -14,8 m dal p.c. con volumi di 0,39; 0,36; 0,63 e 0,41 m³;
4. il punto di inizio collasso del pozzo è ubicato a -15,20 m dal p.c. ovvero ad una profondità di poco superiore all'ultima sacca.

L'analisi del grafico $Q \rightarrow s$ ha di fatto confermato l'esistenza di un acquifero confinato (artesiano); nel contempo l'inesistenza di una portata di esercizio illimitata, economicamente sfruttabile, ha reso necessario procedere con metodologie non-standard, tali da richiedere l'aggiunta di un nuovo modulo al software di gestione appositamente scritto. Tale metodologia è passata attraverso la creazione della "curva di sfruttamento del pozzo" (fig. 8), in funzione dei tempi e delle portate relative alle prove eseguite; da tale curva, tenuto conto del raggiungimento delle condizioni di collasso per portate $Q > 0,10$ l/s, è stata matematicamente derivata una "curva teorica di sfruttamento del pozzo", di equazione:

$$T = (0,8 \cdot Q^{-1,7}) \cdot 0,90 \quad [12]$$

laddove Q rappresenta la portata di emungimento e T il tempo "finito"; il fattore 0,90 costituisce un coefficiente di sicurezza e quindi di salvaguardia del pozzo da possibili inneschi di moti turbolenti. Dalla combinazione dei dati di Q e T infine è stato possibile calcolare il volume emunto (fig. 6), per un abbassamento di sicurezza del livello piezometrico di 8 m ed un tempo massimo

Portate (l/s)	Tempi di pompaggio max			Metri cubi emunti	Max depress. livello piez. (m)	Tempi di risalita (h)
	ore	min	sec			
0,1	60	8	0	21,6	8	24
0,2	18	30	0	13,3	8	24
0,3	9	17	0	10,0	8	24
0,4	5	41	0	8,2	8	24
0,5	3	53	0	7,0	8	24
0,6	2	51	0	6,2	8	24
0,7	2	11	0	5,5	8	24
0,8	1	44	0	5,0	8	24
0,9	1	25	0	4,6	8	24
1	1	12	0	4,3	8	24
1,1	1	1	0	4,0	8	24
1,2	0	52	0	3,8	8	24
1,3	0	45	0	3,6	8	24
1,4	0	40	0	3,4	8	24
1,5	0	36	0	3,2	8	24

Fig. 8 - Tabella di utilizzo del pozzo ricavata dall'applicazione delle curva sperimentali e teoriche.

di recupero di 24 ore; dallo studio della tabella è emersa l'esistenza di una portata ottimale compresa nel range $0,30 \pm 0,40$ l/s, al quale corrispondono tempi (T) di circa 9 e 6 h e volumi emungibili di 10 e 8.2 m^3 . Lo studio del pozzo "Solfureo 1" è stato infine completato con le analisi chimico-fisiche delle acque, su campioni prelevati ad inizio e fine test che hanno mostrato variazioni trascurabili del chimismo, costituente un acquifero Solfureo-Clorico-Sodico secondo il diagramma di Shoeller (Shoeller, 1962).

POZZO SALATO 2

Il secondo pozzo analizzato, caratterizzato da un chimismo Salso-Magnesiaco-Calcico, rientra nella teoria canonica degli acquiferi confinati, mancando di fatto le sacche laterali di alimentazione e presentando nel contempo una portata di esercizio illimitata. Il gradino di test, della durata di 90' e con portata di 1.00 l/s, ha permesso di individuare il punto di reazione dell'acquifero dopo circa 4' dall'inizio della prova, ad una profondità di -5,28 m dal livello statico (-12,73 m dal piano di campagna) e con un volume di svuotamento dell'opera pari 0.24 metri cubi. Sono stati successivamente eseguiti quattro gradini di pozzo (dopo la necessaria sostituzione della pompa esistente con il sistema semiautomatico precedentemente descritto) con portate rispettivamente di 0.20 l/s (t = 30 h), 0.45 l/s (t = 7 h), 0.60 l/s (t = 2.5 h), 1.00 l/s (t = 4 h) con un abbassamento massimo del livello piezometrico di 44 m e nessuna individuazione di un eventuale livello critico. I dati misurati e calcolati hanno quindi permesso la ricostruzione della curva caratteristica del pozzo e di individuare la portata critica ($Q_c = 0.46$ l/s) e quella massima di esercizio ($Q_e = 0.36$ l/s). Infine è stata eseguita una prova di pompaggio a lunga durata (portata 0.20 l/s protratta per 30 ore) ed in condizioni di elevato coefficiente di sicurezza, dalla quale è emerso quanto segue:

- A) stabilizzazione del livello piezometrico dinamico dopo 1400' (23.3 h) ad una profondità di -18,40 m dal livello statico e -26,60 m dal piano di campagna;
- B) esistenza di un acquifero perfettamente artesiano, non limitato per i tempi di pompaggio eseguiti;
- C) mancanza di collegamento idraulico con il pozzo "Solfureo 1";
- D) necessità di tempi di risalita superiori alle 48 ore.

Anche per tale acquifero è stata infine calcolata la curva matematica caratteristica del pozzo (funzione sia della geometria che dell'idrodinamica) dalla quale è stata successivamente ricavata la tabella $Q \rightarrow t$ con le medesime caratteristiche di quella relativa al pozzo "Solfureo 1".

Le analisi delle acque sono state eseguite con la finalità di individuare gli ele-

menti chimici e fisici secondo la metodica di riferimento: I.R.S.A. 1994; CNR; Standard methods APHA. I campioni sono stati prelevati e trasportati con le modalità esplicitate nelle normative di riferimento, previa stabilizzazione in situ mediante acetato di piombo ed acetato di zinco, al fine di ottenere la precipitazione dei solfuri. Inoltre gli stessi sono stati conservati a temperature (4°C) inferiori a quelle di pozzo (circa 15°C), come specificato dalla normativa vigente. Infine la temperatura dell'acqua e dell'aria è stata misurata in situ prima, durante e dopo le varie prove di gradino e di pompaggio. Tali analisi hanno evidenziato la presenza di solfuri con tenori pari a 35 mg/l riferito al pozzo "Solfureo 1", il quale non mostra variazioni nel chimismo in funzione dello sfruttamento. L'acquifero relativo al Pozzo 2, con una salinità pari a circa 50 volte quella marina, mostra invece variazioni nella concentrazione degli ioni calcio e magnesio in funzione dello sfruttamento (pompaggio).

CONCLUSIONI

La scoperta casuale, avvenuta nei primi anni '80, di due acquiferi a chimismo diverso, Solfureo-Clorico-Sodico (pozzo "Solfureo 1") e Salso-Magnesiaco-Calcico (pozzo "Salato 2"), ubicati a breve distanza e diversa profondità, ha consentito nel periodo luglio-settembre 2001 di eseguire un'analisi non convenzionale a partire dalle ricerche esistenti e concluse con il rilascio di una Concessione Mineraria Ministeriale di sfruttamento denominata S. Emidio. In effetti, mentre il pozzo "Salato 2" costituisce un acquifero artesiano classico, il pozzo "Solfureo 1" ha mostrato una non corrispondenza nel comportamento rispetto all'utilizzo delle teorie idrogeologiche classiche, risultando, sulla scorta dei dati esistenti e di prove preliminari, lateralmente limitato e funzionante in condizioni di permeabilità per fratturazione mediante sacche di alimentazione confinate nei litotipi marnosi della Formazione della Laga e ricche di livelli bituminosi. Per la soluzione del caso specifico è stato di conseguenza progettato un sistema di pompaggio semiautomatico, costituito da un complesso sensore di pressione/pompa/regolatore di portata, controllato in tempo reale da una centralina dotata di un software di basso livello connessa con un Personal Computer portatile. L'implementazione del sistema con un software gestionale basato su nuovi algoritmi di calcolo, ha consentito di conseguenza lo studio dettagliato del funzionamento idrogeologico del complesso opera/acquifero in termini non solo di profondità/volume delle sacche di alimentazione laterale, ma anche di individuazione dei punti di innesco dei moti turbolenti, dei livelli piezometrici critici e relativa fase di svuota-

mento del pozzo, fino alla ricostruzione delle curve sperimentali e teoriche di sfruttamento del pozzo in questione. L'aspetto saliente del sistema progettato è consistito nell'analisi dei dati sperimentali mediante l'utilizzo del calcolo differenziale applicato a funzioni ad una variabile, dal momento che, ad esempio, la posizione delle sacche di alimentazione è stata sistematicamente evidenziata per la seguente condizione matematica dettata dall'equazione [9]:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \rightarrow 0 \text{ per } \Delta s \rightarrow 0$$

Inoltre tale metodologia ha consentito anche: a) l'individuazione di tre sfarfallamenti della pompa nelle prove iniziali (gradini di test), permettendo una corretta taratura del sistema gestionale affinché, utilizzato nelle successive prove di emungimento, agisse in tempo reale mediante il regolatore di pressione; b) la possibilità di poter scindere le componenti derivanti dai flussi quadratici e da quelli lineari in condizioni di moto sia turbolento che laminare. Infine l'applicazione della metodologia proposta anche al pozzo "Salato 2", nonché agli ulteriori pozzi scoperti, ha consentito di valutare la capacità di analisi del sistema gestionale anche degli acquiferi artesiani classici, conducendo infine ad una conoscenza idrogeologica dettagliata di un sistema di pozzi che potrebbero essere utilizzati per fini terminali.

BIBLIOGRAFIA

- CASTANY G. (1985) - IDROGEOLOGIA, PRINCIPI E METODI. DARIO FLACCIOVIO EDITORE.
- CELICO P. (1986) - PROSPEZIONI IDROGEOLOGICHE. VOL 1-2 CASA EDITRICE LIGUORI.
- CENTAMORE E., CANTALAMESSA G., MICARELLI A., POTETTI M., BERTI D., BIGI S., MORELLI C., RIDOLFI M. (1992) - STRATIGRAFIA E ANALISI DI FACIES DEI DEPOSITI DEL MIOCENE E DEL PLOCIENE INFERIORE DELL'AVANFOSSA MARCHIGIANO-ABRUZZESE E DELLE AVANFOSSA LIMITROFE. STUDI GEOLOGICI CAMERTI.
- DESIDERIO G., NANNI T. E RUSI S. (2003) - LA PIANURA DEL FIUME VOMANO (ABRUZZO): IDROGEOLOGIA, ANTROPICIZZAZIONE E SUOI EFFETTI SUL DEPAUPERAMENTO DELLA FALDA. BOLL. SOC. GEOL. IT., 122, 421 - 434, 12 FF., 1 TAB.
- FARABOLLINI P. E NISIO S. (1997) - EVOLUZIONE GEOMORFOLOGIA QUATERNARIA DEL BACINO DEL FIUME VOMANO (ABRUZZO). IL QUATERNARIO, 10 (1), 101 - 104.
- JACOB C.E. (1950) - FLOW OF ROUND WATER. IN ROUSE. ENGINEERING HYDRAULICS.
- LEE C. E FARMER I. (1993) - FLUID FLOW IN DISCONTINUOUS ROCKS. CHAPMAN E HALL EDS., LONDON.
- SCHOELLER H. (1962) - LES EAUX SOUTERRAINES. EYROLLES, PARIS.
- MINISTERO DELLA SANITA' (DECRETO 13 GENNAIO 1993) - "METODI DI ANALISI PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MICROBIOLOGICHE E DI COMPOSIZIONE DELLE ACQUE MINERALI NATURALI E MODALITÀ PER I RELATIVI PRELEVAMENTI DEI CAMPIONI".
- NORMATIVA CEE n° 80/778 - DECRETO 24.05.1988, n° 236 - "VALUTAZIONE DELLE AREE DI SALVAGUARDIA DELLE RISORSE IDRICHE" (G.U. 30.06.1988).
- LEGGE DEL 5 GENNAIO 1994, n° 36 (LEGGE "GALLI") - "DISPOSIZIONI IN MATERIA DI RISORSE IDRICHE". (G.U. 19.01.1994).