

## ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DEI DATI DI PRECIPITAZIONE E PORTATA PER LA DETERMINAZIONE DELLA PORTATA SOSTENIBILE DI UN POZZO FUNZIONANTE A CARICO COSTANTE

### ANALYSIS OF THE TIME SERIES OF PRECIPITATION AND WELL FLOW DATA TO DETERMINE THE SUSTAINABLE YIELD OF A WELL PUMPED AT CONSTANT HEAD

MARCO COZZOLINO<sup>(\*)</sup>, VINCENZO PISCOPO<sup>(\*)</sup>, ANTONINO SCARELLI<sup>(\*)</sup> & GIANPIETRO SUMMA<sup>(\*\*)</sup>

<sup>(\*)</sup>Università della Tuscia - Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile - Largo Università - 01100 Viterbo, Italy - E-mail: piscopo@unitus.it

<sup>(\*\*)</sup>Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Basilicata - Via della Fisica, 18 C/D - 85100 Potenza, Italy

#### RIASSUNTO

La determinazione della portata di produzione di un pozzo rappresenta uno dei problemi degli studi idrogeologici soprattutto quando la perforazione interessa acquiferi eterogenei, quali quelli fratturati. Il presente studio riporta i risultati delle osservazioni eseguite per tre anni in un pozzo in esercizio e funzionante a livello costante. Il pozzo esaminato interessa rocce fratturate comprendenti calcari cretacei, localmente poco carsificati e con un variabile grado di faturazione.

I dati della portata del pozzo e delle precipitazioni sono stati analizzati attraverso due metodi. Alla serie dei dati di precipitazione e portata dei tre anni di osservazione sono stati applicati i metodi della correlazione incrociata e dell'analisi spettrale al fine di esaminare il ritardo tra l'impulso delle precipitazioni e la risposta della portata del pozzo. Le tre curve di recessione della portata sono state esaminate attraverso i modelli di Maillet e Boussinesq per indagare il volume di immagazzinamento ed i parametri dello svuotamento dell'acquifero drenato dal pozzo.

L'analisi di correlazione e spettrale incrociata tra i valori di portata del pozzo e quelli di precipitazione evidenzia una risposta dell'acquifero alle precipitazioni di circa 30-40 giorni. L'analisi delle curve di recessione della portata conferma che il pozzo a carico costante funziona come una sorgente, pertanto è possibile calcolare il rapporto tra risorse captate e risorse disponibili nel volume di acquifero sollecitato dal pompaggio. L'analisi della portata del pozzo funzionante a carico costante sembra essere un metodo utile per ottenere informazioni sulle caratteristiche dell'acquifero e nello stesso tempo sulla portata sostenibile del pozzo.

**TERMINI CHIAVE:** *acquiferi fratturati, idraulica dei pozzi, portata sostenibile*

#### INTRODUZIONE

La determinazione della portata di produzione di un pozzo rappresenta uno dei problemi degli studi idrogeologici soprattutto quando la perforazione interessa acquiferi eterogenei, quali quelli fratturati (per esempio, MURRAY & SAMI, 1998; VAN TONDER *et alii*, 2001; DEBIECHE *et alii*, 2002). In questo caso è richiesta una dettagliata conoscenza delle caratteristiche dell'acquifero, comprendenti, tra l'altro, la geometria dell'area di influenza del pozzo e le proprietà idrauliche del mezzo. Queste informazioni sono comunemente ricavate da prove

#### ABSTRACT

Determining the yield of a production well remains one of the main challenges in hydrogeological studies. Yield estimates are especially challenging when a borehole taps a heterogeneous aquifer, such as those in fissured media. The present study examines a three-year survey of a continuously exploited well, functioning at constant-head. The studied well penetrates fractured rocks formed by locally poorly-karstified Cretaceous limestones with varying degrees of fracturing.

The well discharge and precipitation data were analysed using two methods. Cross-correlation and cross-spectral functions were applied to the time series of precipitation and well flow data to investigate the lag time between a rainfall impulse and the corresponding discharge response of a well kept at constant head. The three recession curves of well discharge from the monitoring period were analysed with Maillet and Boussinesq models to investigate the storage volume and parameters regarding the depletion of the aquifer.

The cross-correlation and cross-spectral analyses of well discharge and precipitation yield a response time of the aquifer to a precipitation input of approximately 30-40 days. The discharge recession curve analyses verify that a well at constant head behaves similar to a spring, therefore the ratio between the exploited resources and those available in the aquifer can be calculated. It results that analysing the discharge of a well functioning at constant head can be a valuable method for simultaneously obtaining data regarding an aquifer's characteristics and the sustainable yield of a well.

**KEY WORDS:** *fractured aquifers, well hydraulics, sustainable yield*

#### INTRODUCTION

Determining the yield of a production well remains one of the main challenges in hydrogeological studies. Yield estimates are especially challenging when a borehole taps a heterogeneous aquifer, such as those in fissured media (e.g., MURRAY & SAMI, 1998; VAN TONDER *et alii*, 2001; DEBIECHE *et alii*, 2002). To make yield estimates, knowledge of the aquifer's setting is required, including the geometry of the well's influence area and the hydraulic properties of the medium. These parameters are commonly obtained through aquifer

di pompaggio eseguite prima della messa in produzione del pozzo. Quando la captazione dell'acquifero avviene attraverso un singolo pozzo in rocce fratturate, non sempre possono essere sopportati i costi di prove di pompaggio di lunga durata.

In questo contesto ricade il presente studio che riporta i risultati delle osservazioni eseguite per tre anni in un pozzo in esercizio e funzionante a livello costante. L'obiettivo dell'esperimento è quello di analizzare la risposta dell'acquifero e di ricavare informazioni circa la sostenibilità dei prelievi idrici sotterranei nel corso dello stesso pompaggio. Nello stesso tempo le modalità di pompaggio permettono una stabilità della qualità dell'acqua emunta, utilizzata per l'imbottigliamento.

## AREA DI STUDIO

Il pozzo esaminato interessa rocce fratturate ai piedi dei Monti Alburni, un massiccio carbonatico ubicato in Campania. La porzione di acquifero carbonatico interessata dal pozzo è costituita da calcari cretacei, localmente poco carsificati e con un variabile grado di fratturazione, sottoposti a formazioni a bassa permeabilità comprendenti flysch miocenico e depositi quaternari detritici, alluvionali e lacustri (Fig. 1).

L'acquifero carbonatico (trasmissività tra  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s) è stato captato mediante un pozzo profondo 162 m ed equipaggiato con una pompa sommersa controllata da un inverter di frequenza, che permette il funzionamento del pozzo a livello costante e quindi a portata variabile (Fig. 2).

Durante il primo anno di pompaggio a livello costante è risultato che la portata di emungimento ha mostrato una tendenza simile

tests performed before well production commences. When the plan for the aquifer exploitation concerns a single well in fissured media, the cost of these detailed and relatively long pumping tests can be impractical. It is in this context our study applies. Here we report the results of a three-year monitoring survey of a continuously exploited well, functioning at constant-head. The objective of the experiment is to quantitatively analyze the response of an aquifer under pumping conditions and then obtain information regarding the sustainability of groundwater withdrawals during pumping. At the same time the pumping style implies a qualitative stability of the water extracted which is used for the bottling.

## STUDY AREA

The studied well penetrates fractured rocks at the foot of the Alburni Mountains, a carbonate massif located in the Campania Region of Italy. The carbonate aquifer tapped by the well is formed by locally poorly-karstified Cretaceous limestones with varying degrees of fracturing that underlie low-permeability Miocene flysch and Quaternary detritic, alluvial and lacustrine deposits (Fig. 1).

This aquifer (transmissivity from  $10^{-4}$  to  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s) is tapped by a 162-m deep well equipped with a submerged electric pump that is controlled by a variable frequency drive. This permits the well to operate at a constant head and therefore at a variable discharge rate (Fig. 2).

During the first year of pumping with a constant drawdown, the discharge rate trend with time was similar to that of the spring's hy-

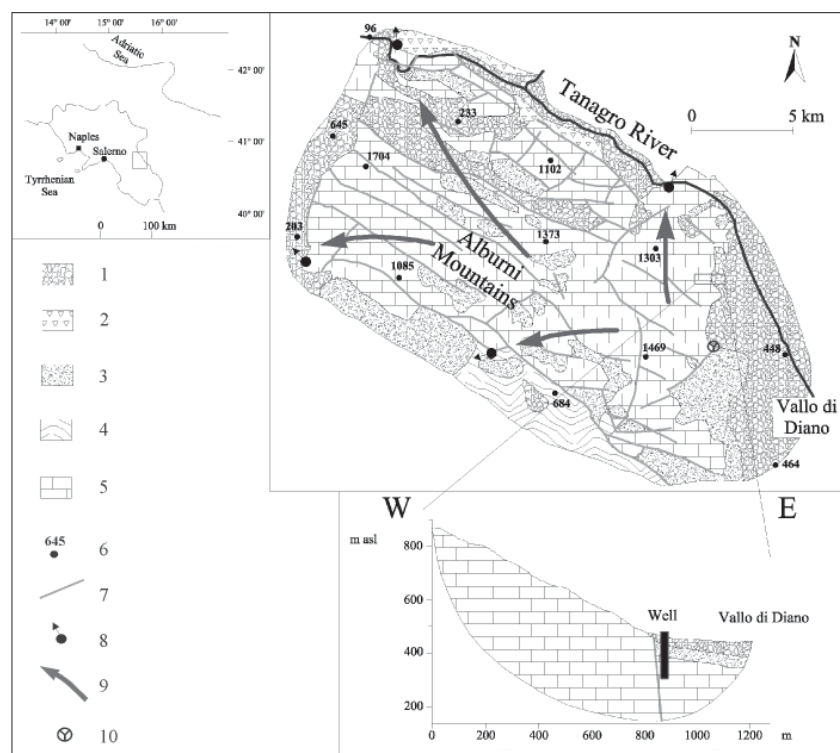


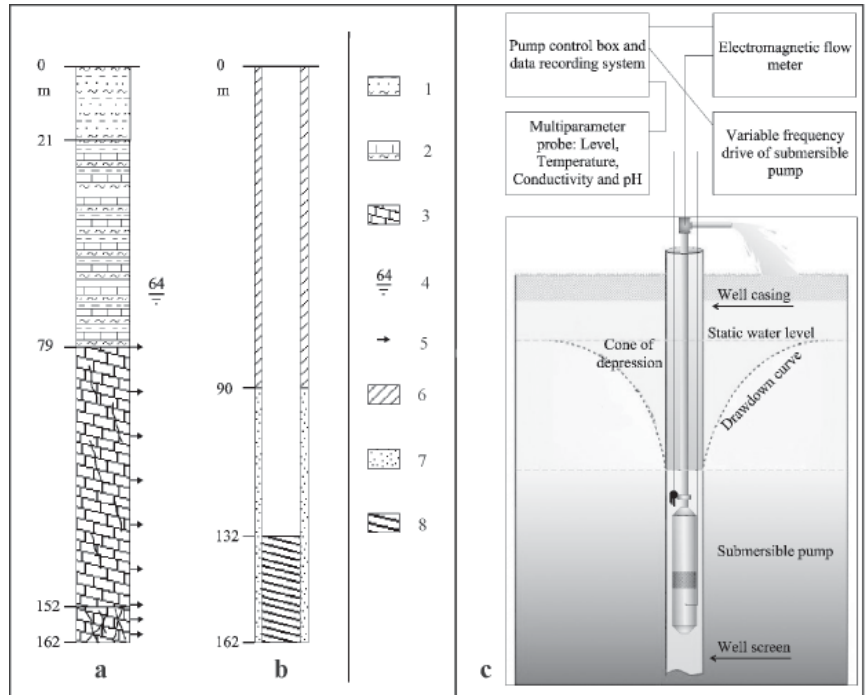
Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio e sezione della zona di ubicazione del pozzo (da PISCOPO & SUMMA, 2007): 1) Depositi quaternari; 2) Sabbie ed argille plio-pleistoceniche; 3) Unità silico-clastiche neogeniche; 4) Unità Sicilidi (Cretaceo - Miocene Inferiore); 5) Rocce carbonatiche (Liassico medio - Eocene Inferiore); 6) Quota (m s.l.m.); 7) Faglia principale; 8) Sorgente principale; 9) Direzione di flusso idrico sotterraneo principale; 10) Stazione pluviometrica di S. Rufo

- Location of the study area and cross-section of the well location (after PISCOPO & SUMMA, 2007): 1) Quaternary deposits; 2) Plio-Pleistocene sands and clays; 3) Silico-clastic Neogenic Units; 4) Sicilide Units (Lower Miocene - Cretaceous); 5) Carbonate rocks (Lower Eocene - Middle Liassic); 6) Altitude (m asl); 7) Main fault; 8) Main spring; 9) Main direction of groundwater flow; 10) Pluviometric station of S. Rufo

**ANALYSIS OF THE TIME SERIES OF PRECIPITATION AND WELL FLOW DATA TO DETERMINE THE SUSTAINABLE YIELD OF A WELL PUMPED AT CONSTANT HEAD**

Fig. 2 - Stratigrafia (a), schema di condizionamento (b) ed equipaggiamento del pozzo (c) (da PISCOPO & SUMMA, 2007): 1) Depositi argillosi e detritici; 2) Flysch argilloso-arenaceo-marnoso; 3) Calcari con diverso grado di fratturazione; 4) Profondità del livello piezometrico (m); 5) Livelli fratturati acquiferi; 6) Cementazione; 7) Drenaggio; 8) Filtro

- Stratigraphy (a), well design (b) and well equipment (c) (after PISCOPO & SUMMA, 2007): 1) Clayey and detrital deposits; 2) Marly-arenaceous-clayey flysch; 3) Limestone with variable degree of fracturing; 4) Depth of groundwater level (m); 5) Water-bearing fractures; 6) Grout; 7) Filter pack; 8) Well screen



a quella dell'idrogramma delle sorgenti. L'esame della curva di recessione della portata, in questo primo anno di pompaggio a livello costante, ha permesso di ricavare l'incidenza del volume di acqua emunta dal pozzo sul volume di acqua immagazzinato dall'acquifero all'inizio del periodo di recessione (PISCOPO & SUMMA, 2007).

**DATI E METODI**

Il presente studio considera tre anni di monitoraggio della portata del pozzo, dettagliando la risposta della portata alle precipitazioni ed esaminando le curve di recessione della portata del pozzo per tre anni di osservazioni. I dati considerati comprendono quelli misurati nel pozzo e le precipitazioni dell'area. I dati del pozzo, monitorati dal marzo 2004 al febbraio 2007, comprendono le misure di portata, livello idrico, conducibilità elettrica, pH e temperatura dell'acqua registrate ad intervalli di 1 min. I dati delle precipitazioni giornaliere dello stesso periodo sono stati ricavati dalla stazione pluviometrica di S. Rufo (Servizio Agrometeorologico della Regione Campania) ubicata a circa 3 km dal pozzo (Fig. 1).

I dati della portata del pozzo e delle precipitazioni sono stati analizzati attraverso due metodi. Alla serie dei dati di precipitazione e portata dei tre anni di osservazione sono stati applicati i metodi della correlazione incrociata e dell'analisi spettrale al fine di esaminare il ritardo tra l'impulso delle precipitazioni e la risposta della portata del pozzo. Le tre curve di recessione della portata sono state esaminate attraverso più modelli per indagare il volume di immagazzinamento ed i parametri dello svuotamento dell'acquifero drenato dal pozzo.

This setup enables us to analyse the recession curve and to determine the influence of the volume of pumped water on the total storage volume of the aquifer at the beginning of the recession (PISCOPO & SUMMA, 2007).

**DATA AND METHODS**

The present study examines a three-year survey of the well discharge that focuses on the aquifer response to rainfall and the recession curves for these years. The data include those measured in the well and for precipitation in the area. The well was monitored from March 2004 to February 2007. Measurements of discharge were acquired at 1-min intervals by an electromagnetic flow meter and registered on a digital recorder. The water level, electrical conductivity, pH and temperature were measured by a multiparameter probe. The daily precipitation data for the same period were obtained from the pluviometric station located in the town of S. Rufo (Agrometeorological Service of Campania Region), which is about 3 km from the well (Fig. 1).

The well discharge and precipitation data were analysed using two methods. Cross-correlation and cross-spectral functions were applied to the time series of precipitation and well flow data to investigate the lag time between a rainfall impulse and the corresponding discharge response of a well kept at constant head. The three recession curves of well discharge from the monitoring period were analysed with additional models to investigate the storage volume and

Il metodo usato per ottenere i coefficienti delle funzioni di correlazione incrociata e dell'analisi spettrale si riferisce a quelli riportati in bibliografia (JENKINS & WATTS, 1968; CHATFIELD, 1975; WEI, 1990) e generalmente applicati alle sorgenti (per esempio, PADILLA & PULIDO-BOSCH, 1995; RAHNEMAEI *et alii*, 2005). Sono state considerate le principali funzioni di interesse idrogeologico e cioè la funzione di correlazione incrociata, lo spettro incrociato, la funzione fase, l'ampiezza incrociata, la funzione coerenza e la funzione guadagno.

L'analogia tra la curva di svuotamento delle sorgenti e la diminuzione della portata del pozzo funzionante a livello costante, risultante durante il primo anno di monitoraggio (PISCOPO & SUMMA, 2007), ha suggerito di approfondire l'esame dei periodi non influenzati dell'idrogramma del pozzo, utilizzando alcuni dei modelli riportati in letteratura (per esempio, TALLAKSEN, 1995; DEWANDEL *et alii*, 2003).

Le tre curve di recessione relative ai tre anni di osservazione sono state confrontate con quelle relative a diversi modelli di svuotamento, determinando quelli che più approssimano i dati misurati e ricavando i relativi parametri idrogeologici. Sono stati poi calcolati il volume di immagazzinamento dell'acquifero all'inizio del periodo di svuotamento ed il volume idrico drenato dal pozzo durante il periodo di svuotamento.

## RISULTATI

I dati misurati nel pozzo (cioè portata, livello idrico, conducibilità elettrica, pH e temperatura dell'acqua) sono stati preliminarmente ripuliti (eliminando alcune irregolarità dovute al cattivo funzionamento della strumentazione di monitoraggio) e raggruppati in valori giornalieri in modo da renderli confrontabili con quelli delle precipitazioni. In Figura 3 sono riportati i valori giornalieri della portata e del livello idrico confrontati con quelli delle precipitazioni. I valori di conducibilità elettrica a 25°C (CE), pH e temperatura dell'acqua (T) non sono stati riportati, considerata la loro ridotta variabilità nel periodo di monitoraggio (CE = 330±20 µ S/cm; pH = 7.5±0.1; T = 11±0.1 °C).

Durante il primo anno di monitoraggio (2004) è stato mantenuto un abbassamento piezometrico costante nel pozzo di 12 m, ad eccezione del periodo iniziale. Durante il secondo ed il terzo anno (2005 e 2006) è stato mantenuto un abbassamento piezometrico di 15 m, a causa di una variata richiesta di produzione. L'idrogramma della portata del pozzo mostra una forma simile a quello di una sorgente con una variazione compresa tra un massimo di circa 5 L/s in aprile-maggio ed un minimo di circa 2 L/s in dicembre (Fig. 3). Considerando l'intervallo di valori della portata, la ridotta trasmissività locale dell'acquifero ( $10^{-4}$ - $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s) ed il ridotto abbassamento piezometrico (12-15 m) in confronto al livello statico disponibile al di sopra del filtro (68 m), si può considerare il flusso laminare. Le precipitazioni nel periodo di monitoraggio hanno mostrato una distribuzione preferenziale nel periodo da dicembre a marzo (Fig. 3) in accordo con il regime pluviometrico dell'area mediterranea.

I dati giornalieri della portata del pozzo e delle precipitazioni di tutto il periodo di monitoraggio sono stati utilizzati per l'analisi bivariata troncata a 200 giorni. La funzione di correlazione incrociata riportata in Figura 4 evidenzia il tempo di risposta della portata all'impulso

parameters regarding the depletion of the aquifer.

We used the methods of JENKINS & WATTS (1968), CHATFIELD (1975) and WEI (1990) to obtain the coefficients for cross-correlation and cross-spectral analysis functions, which were then applied to models of spring flow (e.g., PADILLA & PULIDO-BOSCH, 1995; RAHNEMAEI *et alii*, 2005). We also determined the main functions of hydrogeological importance, which consist of the cross-correlation function, the cross-spectrum function, the phase function, the cross-amplitude function, the coherence function and the gain function.

The relationship between the recession curve of the spring and the corresponding decrease in flow from the well pumped at constant head, for the first year of monitoring (PISCOPO & SUMMA, 2007), was employed to examine the depletion periods of the well hydrographs. For these calculations, we used models available in the literature (e.g., TALLAKSEN, 1995; DEWANDEL *et alii*, 2003).

The recession curves for the three years of monitoring were fitted with solutions for different depletion models, and the recession parameters were obtained from the best-fitting solution. Successively, the total storage volume of the aquifer and the amount of water drained from the well during the recession were calculated.

## RESULTS

The data measured in the well (i.e., flow-rate, water level, electrical conductivity, pH and temperature) were preliminary cleared (removing some irregularities due to the bad functioning of the monitoring instrumentation) and clustered in daily values in order to facilitate comparison with the daily rainfall. In Figure 3, the daily values of the discharge and water level are shown together with the daily rainfall measurements. Electrical conductivity at 25°C (EC), pH and temperature (T) were omitted from the graph due to their insignificant variation during the monitoring period (CE = 330±20 µ S/cm; pH = 7.5±0.1; T = 11±0.1 °C).

During the first year of monitoring (2004), a constant drawdown of 12 m was maintained in the well, with the exception of the starting period. During the second and third year (2005 and 2006), a higher constant drawdown of 15 m was maintained in the well because of production requirements. The hydrograph of well discharge exhibits a shape typical of a spring, and varies in flow from a maximum of 5 L/s in April-May to a minimum of 2 L/s in December (Fig. 3). The range of well flow values compared to the regions of low-transmissivity of the aquifer ( $10^{-4}$ - $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s), and the reduced drawdown (12-15 m) of the well compared with the available static water level on the top of screen (68 m), all suggest laminar flow in the aquifer. The precipitation during the monitoring period was dominantly between December to March (Fig. 3) due to the Mediterranean climate in the study area.

The daily well discharge and rainfall data from the monitoring period were used in the bivariate analysis and a truncation point of 200 days was chosen for the calculation. The cross-correlation function, shown in Figure 4, highlights that the discharge response

ANALYSIS OF THE TIME SERIES OF PRECIPITATION AND WELL FLOW DATA TO DETERMINE THE SUSTAINABLE YIELD OF A WELL PUMPED AT CONSTANT HEAD

Fig. 3 - Variazione della portata del pozzo (Q), dell'abbassamento piezometrico ( $\Delta h$ ) e delle precipitazioni durante i tre anni di monitoraggio  
 - Variation in well discharge (Q), drawdown ( $\Delta h$ ) and precipitation during the three years of monitoring

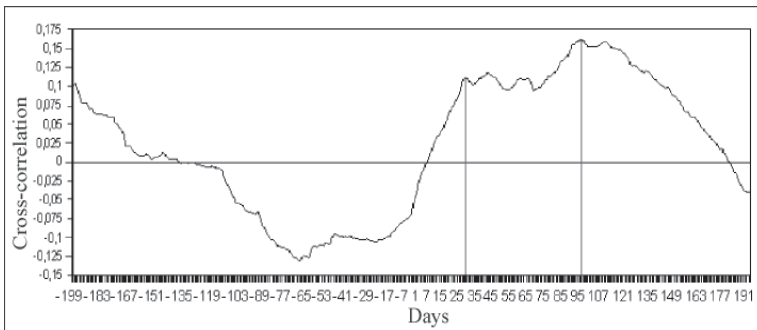
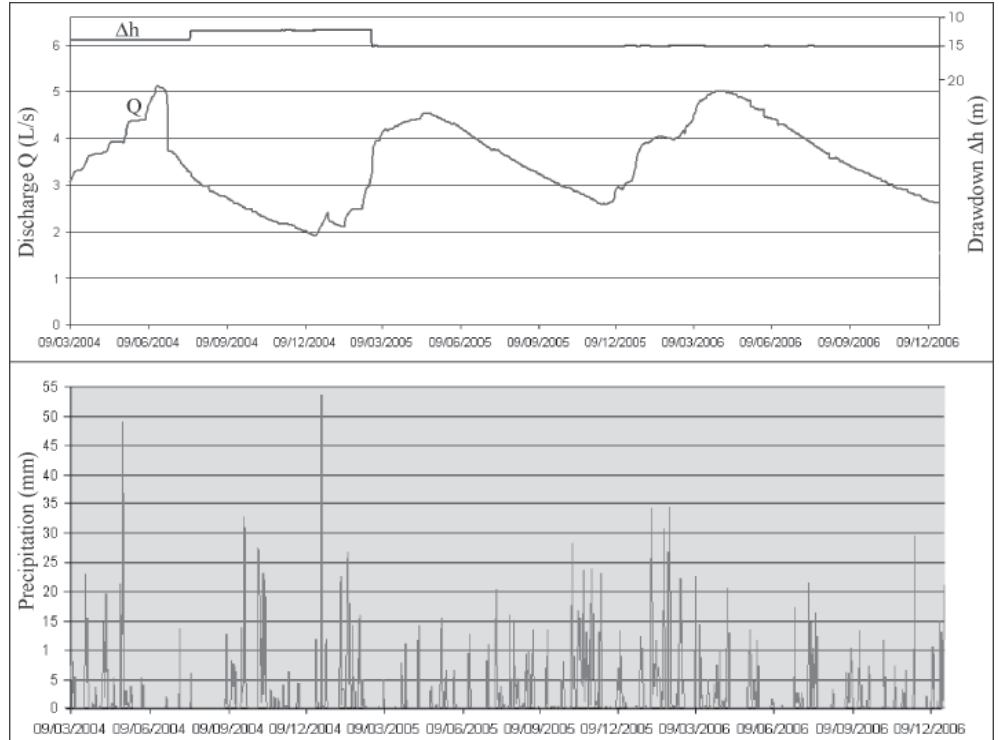


Fig. 4 - Diagramma della funzione correlazione incrociata  
 - Plot of the cross-correlation function

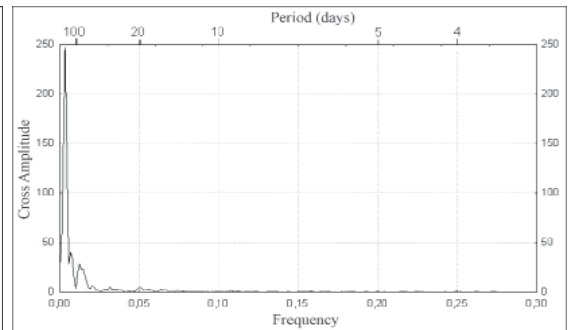


Fig. 5 - Diagramma della funzione di ampiezza incrociata  
 - Plot of the cross-amplitude function

pluviometrico tra 30 e 100 giorni. La funzione di ampiezza incrociata (Fig. 5) tende a zero per la frequenza di 0.07, indicando l'assenza di risposta della portata per tempi inferiori a 15 giorni. La funzione coerenza mostra i più alti valori per frequenze tra 0 e 0.05, ciò significa che esiste consistenza tra le funzioni input e output per il periodo compreso tra 20 e 100 giorni. La funzione guadagno mostra un picco per frequenze comprese tra 0.005 e 0.008 ed una rapida attenuazione (raggiungendo 0 molto velocemente) e nessuna amplificazione per qualsiasi frequenza. Questi elementi evidenziano per l'acquifero in esame l'assenza di un deflusso veloce. Lo spettro di fase mostra una forma

time to rainfall input is between 30 and 100 days. The cross-amplitude function (Fig. 5) approaches zero at the frequency of 0.07, which indicates there is no response in the discharge to rainfall within 15 days. The coherency function shows the highest values for frequencies between 0 and 0.05. Thus there is consistency between the input and output functions over time intervals of 20 to 100 days. The gain function exhibits a peak for frequencies between 0.005 and 0.008, a very strong attenuation (i.e., reaches 0 very quickly) and no amplification for any frequency. These features indicate there is no quickflow in the examined aquifer. The



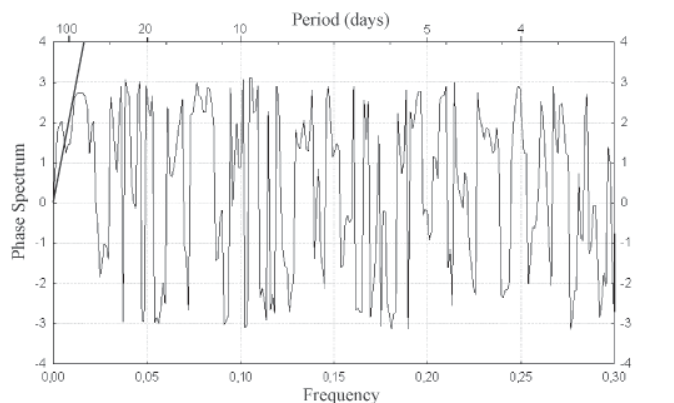


Fig. 6 - Diagramma della funzione fase  
- Plot of the phase function

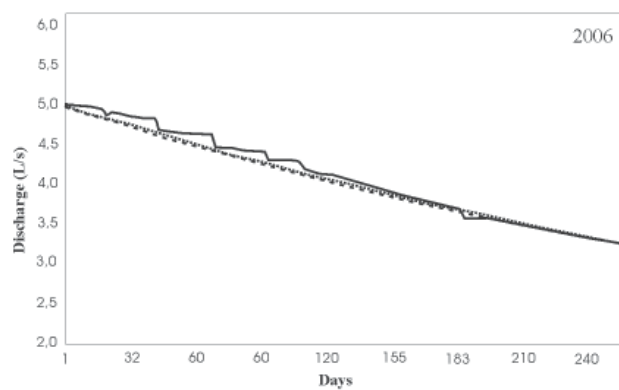
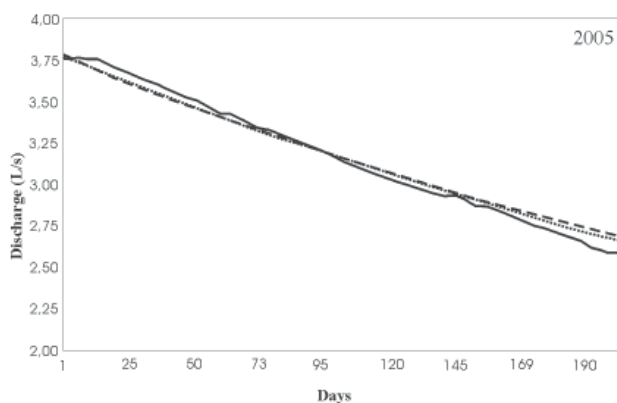
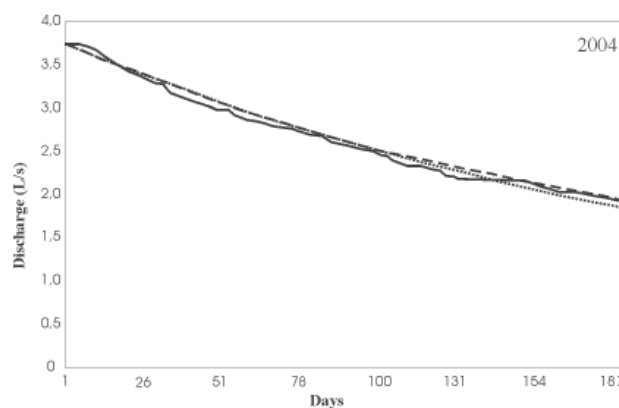


Fig. 7 - Curve di recessione per i tre anni di monitoraggio (linea continua: portate misurate; linea a punti: metodo di Mailliet; linea tratteggiata: metodo di Boussinesq)  
- Recession curves for the three years of monitoring (bold line: measured flows; dotted line: Mailliet method; broken line: Boussinesq method)

regolare solo per le più basse frequenze (Fig. 6). Ciò è connesso con la forte attenuazione del segnale operata dall'acquifero. Sviluppando l'analisi di regressione sui primi dati della curva, si ottiene un valore medio del ritardo compreso tra 30 e 40 giorni (Fig. 6).

Tra i modelli utilizzati per l'interpretazione dei periodi di svuotamento della portata, quelli che hanno mostrato una migliore correlazione con i dati misurati sono risultati il modello esponenziale di Mailliet (1905) ( $Q_t = Q_0^{-\alpha t}$ , dove  $Q_0$  è la portata iniziale,  $Q_t$  è la portata al tempo  $t$  e  $\alpha$  è il coefficiente di recessione) e quello quadratico di Boussinesq (1903) ( $Q_t = [Q_0^{-\alpha t} / (1 + \alpha t)^2]$ ), evidenziando entrambi elevati coefficienti di correlazione ( $R^2 > 0.95$ ) per le tre curve annuali esaminate (Fig. 7).

I valori ricavati dall'applicazione dei due modelli sono riportati in Tabella 1, dove sono specificati: la durata del periodo di recessione della portata ( $t_n$ ); i valori della portata all'inizio ed alla fine del periodo di recessione ed il coefficiente di recessione per il modello di Mailliet (rispettivamente,  $Q_{0M}$ ,  $Q_{inM}$  e  $\alpha_M$ ) e per il modello di Boussinesq (rispettivamente,  $Q_{0B}$ ,  $Q_{inB}$  e  $\alpha_B$ ); i volumi idrici immagazzinati

phase spectrum has a regular shape only for the lowest frequencies due to the strong signal attenuation of the aquifer (Fig. 6). Regression analysis of the first-order curve yields an average input-output delay of 30 to 40 days (Fig. 6).

Multiple models were considered to examine the well discharge during the depletion period. The Mailliet exponential solution (1905) ( $Q_t = Q_0^{-\alpha t}$ , where  $Q_0$  is initial flow rate,  $Q_t$  is flow rate at time  $t$  and  $\alpha$  is the recession coefficient) and Boussinesq quadratic solution (1903) ( $Q_t = [Q_0^{-\alpha t} / (1 + \alpha t)^2]$ ) exhibit the best fit with the observed data. The three annual curves have a high correlation coefficient for both models ( $R^2 > 0.95$ ) (Fig. 7).

The values calculated with these two models are listed in Table 1, in the following order: the length of the recession period ( $t_n$ ); the discharge rate at the beginning and end of the depletion period, and the recession coefficient for the Mailliet model ( $Q_{0M}$ ,  $Q_{inM}$  and  $\alpha_M$ , respectively) and for the Boussinesq model ( $Q_{0B}$ ,  $Q_{inB}$  and  $\alpha_B$ , respectively); the total volume of water stored by the aquifer at the beginning of the

**ANALYSIS OF THE TIME SERIES OF PRECIPITATION AND WELL FLOW DATA TO DETERMINE THE SUSTAINABLE YIELD OF A WELL PUMPED AT CONSTANT HEAD**

Tab. 1 - Parametri ricavati dall'analisi delle curve di recessione della portata del pozzo durante i tre anni di monitoraggio  
- Parameters derived from the analysis of the recession curves for the three years of monitoring

Year	2004	2005	2006
$t_n$ (days)	187	207	259
$Q_{0M}$ (L/s)	3.73	3.78	5.00
$Q_{inM}$ (L/s)	2.21	2.64	2.59
$\alpha_M$ (day <sup>-1</sup> )	$2.80 \times 10^{-3}$	$1.73 \times 10^{-3}$	$2.54 \times 10^{-3}$
$V_{0M}$ (m <sup>3</sup> )	$1.15 \times 10^5$	$1.89 \times 10^5$	$1.70 \times 10^5$
$V_{sM}$ (m <sup>3</sup> )	$0.47 \times 10^5$	$0.57 \times 10^5$	$0.82 \times 10^5$
$V_{sM}/V_{0M}$ (%)	41	30	48
$Q_{0B}$ (L/s)	3.73	3.78	4.99
$Q_{inB}$ (L/s)	2.27	2.66	2.68
$\alpha_B$ (day <sup>-1</sup> )	$1.50 \times 10^{-3}$	$9.28 \times 10^{-4}$	$1.11 \times 10^{-3}$
$V_{0B}$ (m <sup>3</sup> )	$2.15 \times 10^5$	$3.52 \times 10^5$	$3.06 \times 10^5$
$V_{sB}$ (m <sup>3</sup> )	$0.47 \times 10^5$	$0.57 \times 10^5$	$0.82 \times 10^5$
$V_{sB}/V_{0B}$ (%)	22	16	27

dell'acquifero drenato dal pozzo all'inizio del periodo di svuotamento ( $V_0$ ), il volume idrico emunto dal pozzo durante il periodo di recessione ( $V_s$ ) e la percentuale di svuotamento dell'immagazzinamento durante il periodo di recessione ( $V_s/V_0$ ), sia per il modello di Maillet (rispettivamente,  $V_{0M}$ ,  $V_{sM}$  e  $V_{sM}/V_{0M}$ ) sia per il modello di Boussinesq (rispettivamente,  $V_{0B}$ ,  $V_{sB}$  e  $V_{sB}/V_{0B}$ ). I risultati mostrati in Tabella 1 evidenziano per i due modelli considerati valori di  $\alpha$  contenuti in un ridotto intervallo, valori confrontabili di  $V_s$  a prescindere dal modello utilizzato e valori nettamente differenti di  $V_0$  tra il modello di Maillet e quello di Boussinesq. Conseguentemente anche la percentuale del volume idrico svuotato ( $V_s/V_0$ ), rispetto a quello immagazzinato all'inizio del periodo di recessione, è significativamente differente a seconda che si consideri il modello di Maillet o quello di Boussinesq.

**DISCUSSIONE**

I risultati dell'analisi di correlazione e spettrale incrociata e della recessione della portata del pozzo funzionante a carico costante, monitorato per tre anni idrologici, permettono di ricavare informazioni sul comportamento dell'acquifero. Nello stesso tempo, è possibile avere indicazioni per la determinazione della portata sostenibile del pozzo.

L'analisi di correlazione e spettrale incrociata tra i valori di portata del pozzo e quelli di precipitazione evidenzia una risposta dell'acquifero alle precipitazioni di circa 30-40 giorni. Questi tempi sono indicativi di un acquifero fratturato ma poco carsificato. Ciò è in accordo con il relativo basso valore di trasmissività desunto dalle prove di pompaggio eseguite prima della messa in esercizio del pozzo. Risulta infatti un valore di trasmissività compreso tra  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s (PISCOPO & SUMMA, 2007), più basso di quelli riscontrati nella porzione carsificata del massiccio carbonatico (fino a  $10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s) (BOLOGNINI *et alii*, 1994).

L'analisi delle curve di recessione della portata conferma che il pozzo a carico costante funziona come una sorgente con adattamento della curva di recessione sia al modello esponenziale di Maillet sia a quello quadratico di Boussinesq. L'adattamento a questi modelli dell'intera curva della portata in periodo non influenzato dalle precipitazioni, avendo ritrovato un solo valore del coefficiente di recessione, è indicativo di una diretta proporzionalità tra flusso e gradiente idraulico. Pertanto il pozzo, anche se attestato in rocce carbonatiche fratturate, interessa un acquifero che si comporta essenzialmente come un sistema darciano.

recession period ( $V_0$ ), the volume of water drained from the well during the recession period ( $V_s$ ), and the percentage of the water drained relative to the original volume stored by the aquifer ( $V_s/V_0$ ), both for the Maillet model ( $V_{0M}$ ,  $V_{sM}$  and  $V_{sM}/V_{0M}$ , respectively) and for the Boussinesq model ( $V_{0B}$ ,  $V_{sB}$  and  $V_{sB}/V_{0B}$ , respectively). Table 1 highlights several important results including, the reduced range of values for  $\alpha$  for each model considered, the values of  $V_s$  calculated independently with each model and the extremely different values of  $V_0$  output by the Maillet model relative to the Boussinesq model. Therefore, the percentage of water drained relative to the original volume stored ( $V_s/V_0$ ), compared with the volume of water stored at beginning of the recession period, is quite different if one considers the Maillet model versus the Boussinesq model.

**DISCUSSION**

The results of the cross-correlation and cross-spectral analyses, in addition to results from the recession curve analyses of discharge for a well functioning at constant head for three years, enable us to determine the behaviour of the aquifer and to acquire information regarding the sustainable well yield.

The cross-correlation and cross-spectral analyses of well discharge and precipitation yield a response time of the aquifer to a precipitation input of approximately 30-40 days. This response time can be attributed to a fractured aquifer poorly karstified. This interpretation agrees with the relative low transmissivity of the aquifer recorded in pumping tests performed before well production started. The recorded transmissivity values of  $10^{-4}$  to  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s (PISCOPO & SUMMA, 2007) are lower than those found in the karstified zones of a carbonate aquifer (up to  $10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s) (BOLOGNINI *et alii*, 1994).

The discharge recession curve analyses verify that a well at constant head behaves similar to a spring. The recession curves fit the Maillet exponential model, as well as the Boussinesq quadratic model. The singular value of the recession coefficient demonstrates the excellent fit between these models and the entirety of the recession curve, and indicates a direct proportionality between flow and hydraulic gradient. Therefore, even if the well penetrates fractured carbonate rocks, the behaviour of the aquifer still corresponds to a Darcian system.

La differenza di valori dei parametri risultanti dall'applicazione del modello di Maillet e quello di Boussinesq, in particolare i parametri  $\alpha$  e  $V_0$ , è riconducibile al fatto che l'equazione di Boussinesq è una soluzione analitica esatta dell'equazione della diffusione per un mezzo poroso, mentre la soluzione di Maillet è una soluzione approssimata corrispondente ad una funzione matematica senza significato idrodinamico (DEWANDEL *et alii*, 2003). Invece la differenza riscontrata tra i valori di  $Q_0$  per i tre periodi di svuotamento è da ricondurre alla variazione della ricarica, così come riscontrato in altri casi per le sorgenti (per esempio, AMIT *et alii*, 2002).

Dall'analisi delle curve di recessione della portata si ricavano anche elementi circa la definizione della portata di produzione sostenibile del pozzo. Innanzitutto, considerato che l'idrogramma della portata del pozzo funzionante a carico costante è del tutto simile a quello di una sorgente, dall'analisi dei valori di portata è possibile esaminare il rapporto tra risorse captate e risorse disponibili nel volume di acquifero sollecitato dal pompaggio. Nel caso esaminato, fissato il valore dell'abbassamento costante nel pozzo, sono state calcolate aliquote di svuotamento dei volumi immagazzinati all'inizio della recessione comprese tra il 30 ed il 50% assumendo il modello di Maillet. Ciò significa che solo una parte delle risorse dell'acquifero sollecitato dal pozzo è stata emunta e, soprattutto, si è avuta conoscenza delle quantità idriche sotterranee ancora disponibili alla fine del periodo di recessione. Queste conoscenze, invece, non sono generalmente disponibili quando si emunge a portata costante se non attraverso un più oneroso sistema di monitoraggio, giustificabile solo in presenza di opere di captazione particolarmente impegnative (per esempio, un campo-pozzi) e non in presenza di captazione mediante singoli pozzi diffusi sul territorio in acquiferi a basso rendimento.

Anche se il sistema di pompaggio a carico costante non può essere sempre proposto, considerato che la richiesta più frequente è di una portata costante nel tempo, il sistema a portata variabile potrebbe essere adottato almeno in fase preliminare all'esercizio definitivo. In questa fase si può determinare l'intervallo di portata sostenibile, basato sul rapporto tra volume delle risorse svuotate nel periodo di recessione e volume iniziale di immagazzinamento, scegliendo un opportuno livello piezometrico costante in funzione dell'efficienza del pozzo e dello spessore saturo di acquifero intercettato dal pozzo. Individuati i valori di portata massima e minima che permettono uno svuotamento controllato del volume immagazzinato all'inizio del periodo di svuotamento, si potrebbe utilizzare il pozzo con una portata costante pari al valore medio di quelli ritrovati attraverso il collaudo a portata variabile.

## CONCLUSIONI

L'analisi della portata del pozzo funzionante a carico costante sembra essere un metodo utile per ottenere informazioni sulle caratteristiche dell'acquifero e nello stesso tempo sulla portata sostenibile del pozzo. I dati acquisiti nel corso di più anni di monitoraggio della portata del pozzo insieme a quelli relativi alle precipitazioni possono essere trattati attraverso l'analisi di correlazione e spettrale incrociata

The difference in the parameter values calculated with the Maillet versus the Boussinesq model ( $\alpha$  and  $V_0$  particularly) could relate to the fact that the Boussinesq formula is an exact solution of the diffusion equation in porous media, whereas the Maillet formula is an approximate solution, corresponding to a mathematical function with no hydrodynamic significance (DEWANDEL *et alii*, 2003). The difference in the initial discharge values ( $Q_0$ ) for the three depletion periods may be the result of the well recharge changing from year to year, as documented in prior studies of springs (e.g., AMIT *et alii*, 2002).

The discharge recession curves analyses also enables to determine suggested values for the sustainable yield of the well. First, the similarity of the discharge trend of the well functioning at constant head and the spring hydrograph implies the ratio between the exploited resources and those available in the aquifer can be calculated by analysing the discharge trend during the depletion period. Once the drawdown of the well was constant, the percentage of the original volume emptied from the well in this study was between 30 and 50%, as calculated by Maillet model. This suggests only a fraction of the total groundwater resources available were withdrawn from the well and, above all, it is possible to calculate the volume of water still available at the end of the depletion period. However, this information is not available if the pumping is conducted at constant rate, except when a more onerous monitoring system is in place, such as those warranted for binding tapping work at a well field. Thus this study is especially useful when this type of extensive monitoring is not possible, for example when the pumping occurs through single wells scattered over a large area or concerns aquifers with low yields.

Although pumping at constant head is not practical in the common case where a constant discharge rate is required, this technique of constant head pumping can, at minimum, be used during the preliminary production phase of a well. During this preliminary phase, the range of sustainable yields can be determined using the ratio between the resources emptied during the depletion period and the original volume of water stored before depletion and by selecting an appropriate piezometric level, based on the efficiency of the well and the thickness of the available saturated aquifer. The well can then be used at a constant flow rate, equal to the average values determined during the test period at variable discharge and based on the maximum and minimum discharge values that allow a controlled emptying of the original volume of water stored.

## CONCLUSIONS

Here we demonstrate that analysing the discharge of a well functioning at constant head can be a valuable method for simultaneously obtaining data regarding an aquifer's characteristics and the sustainable yield of a well. Data acquired during multiple years of well discharge monitoring, together with precipitation data, can be processed with cross-correlation and cross-spectral analyses in or-



**ANALYSIS OF THE TIME SERIES OF PRECIPITATION AND WELL FLOW DATA TO DETERMINE THE SUSTAINABLE YIELD OF A WELL PUMPED AT CONSTANT HEAD**

al fine di individuare il tempo di risposta della portata del pozzo all'input delle precipitazioni e per differenziare flusso veloce da quello lento. Pertanto può essere qualitativamente individuato il tipo dominante di circolazione negli acquiferi fratturati in accordo con le caratteristiche geologiche e climatiche locali. L'applicazione dell'analisi della curva di recessione a più anni di monitoraggio della portata del pozzo permette di determinare il modo di svuotamento dell'acquifero e il volume idrico immagazzinato nell'acquifero alimentante il pozzo all'inizio dello svuotamento. Queste conoscenze permettono una riduzione dell'impatto del prelievo idrico sulla locale potenzialità dell'acquifero, controllando il livello piezometrico costante in relazione ai parametri idrogeologici ed allo spessore saturo di acquifero disponibile. Inoltre, è possibile calibrare i prelievi idrici durante i periodi di svuotamento in funzione delle variazioni annuali della ricarica, valutando il volume idrico immagazzinato all'inizio dello svuotamento.

La variazione di portata del pozzo durante il periodo di svuotamento può essere usata per determinare il valore di portata sostenibile considerando una percentuale del volume immagazzinato dall'acquifero. Questa portata sostenibile ha un significato annuale essendo influenzata dalla ricarica precedente il periodo di svuotamento. Un pompaggio a carico costante può essere usato preliminarmente alla fase di esercizio per la determinazione della portata sostenibile di un pozzo anche quando è richiesta una portata costante.

**SIMBOLI**

CE	conducibilità elettrica [ $R^{-1}L^{-1}$ ]
Q	portata del pozzo [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_0$	portata all'inizio del periodo di recessione [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_t$	portata al tempo t durante la recessione [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_{0B}$	valore della portata all'inizio del periodo di recessione per il modello di Boussinesq [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_{0M}$	valore della portata all'inizio del periodo di recessione per il modello di Maillet [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_{inB}$	valore della portata alla fine del periodo di recessione per il modello di Boussinesq [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_{inM}$	valore della portata alla fine del periodo di recessione per il modello di Maillet [ $L^3T^{-1}$ ]
T	temperatura dell'acqua [ $\Theta$ ]
t	tempo dall'inizio della recessione [T]
$t_n$	durata del periodo di recessione [T]
$V_0$	volume idrico immagazzinato dell'acquifero all'inizio del periodo di svuotamento [ $L^3$ ]
$V_{0B}$	volume idrico immagazzinato dell'acquifero all'inizio del periodo di svuotamento per il modello di Boussinesq [ $L^3$ ]
$V_{0M}$	volume idrico immagazzinato dell'acquifero all'inizio del periodo di svuotamento per il modello di Maillet [ $L^3$ ]
$V_s$	volume idrico emunto dal pozzo durante il periodo di recessione [ $L^3$ ]
$V_{sB}$	volume idrico emunto dal pozzo durante il periodo di recessione per il modello di Boussinesq [ $L^3$ ]

der to identify the delay in the response of the well flow to precipitation input and to differentiate quickflow and baseflow. Therefore, the type of dominant circulation in fractured aquifers can be qualitatively determined using the local geological and climate conditions. The application of recession curve analysis to multiple years of well discharge data enables us to determine the extent of aquifer depletion and the original volume of water stored in the aquifer that feeds the well. By controlling pumping at constant head as function of the hydrogeological parameters and the thickness of the available saturated aquifer, one can minimize the impact of extraction on the aquifer's local yield. Furthermore, by evaluating the volume of water stored by the aquifer at beginning of the depletion, it is possible to calibrate the withdrawal during the depletion periods as function of the annual variations in recharge.

The variation in the discharge rate of the well during the depletion period and the percentage of the water pumped relative to the total volume stored by the aquifer can be used to determine the value of the sustainable yield. This sustainable yield has annual significance because it takes into account the recharge during preceding the depletion period. Thus a temporary pumping exercise at constant head can be used to determine the sustainable yield of a well even when a constant rate is requested.

**NOTATION**

EC	electrical conductivity [ $R^{-1}L^{-1}$ ]
Q	well discharge [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_0$	discharge at the beginning of the depletion period [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_t$	discharge at time t during the depletion period [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_{0B}$	discharge rate at the beginning of the depletion period for the Boussinesq model [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_{0M}$	discharge rate at the beginning of the depletion period for the Maillet model [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_{inB}$	discharge rate at the end of the depletion period for the Boussinesq model [ $L^3T^{-1}$ ]
$Q_{inM}$	discharge rate at the end of the depletion period for the Maillet model [ $L^3T^{-1}$ ]
T	water temperature [ $\Theta$ ]
t	time from the beginning of the depletion period [T]
$t_n$	length of the recession period [T]
$V_0$	total volume of water stored by the aquifer at the beginning of the recession period [ $L^3$ ]
$V_{0B}$	total volume of water stored by the aquifer at the beginning of the recession period for the Boussinesq model [ $L^3$ ]
$V_{0M}$	total volume of water stored by the aquifer at the beginning of the recession period for the Maillet model [ $L^3$ ]
$V_s$	volume of water drained from the well during the recession period [ $L^3$ ]
$V_{sB}$	volume of water drained from the well during the recession period for the Boussinesq model [ $L^3$ ]

**ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DEI DATI DI PRECIPITAZIONE E PORTATA PER LA DETERMINAZIONE DELLA PORTATA SOSTENIBILE DI UN POZZO FUNZIONANTE A CARICO COSTANTE**

$V_{sM}$	volume idrico emunto dal pozzo durante il periodo di recessione per il modello di Maillet [L <sup>3</sup> ]	$V_{sM}$	volume of water drained from the well during the recession period for the Maillet model [L <sup>3</sup> ]
$V_s/V_0$	percentuale di svuotamento dell'immagazzinamento durante il periodo di recessione [adimensionale]	$V_s/V_0$	percentage of the water drained relative to the original volume stored by the aquifer [dimensionless]
$V_{sB}/V_{0B}$	percentuale di svuotamento dell'immagazzinamento durante il periodo di recessione per il modello di Boussinesq [adimensionale]	$V_{sB}/V_{0B}$	percentage of the water drained relative to the original volume stored by the aquifer for the Boussinesq model [dimensionless]
$V_{sM}/V_{0M}$	percentuale di svuotamento dell'immagazzinamento durante il periodo di recessione per il modello di Maillet [adimensionale]	$V_{sM}/V_{0M}$	percentage of the water drained relative to the original volume stored by the aquifer for the Boussinesq model [dimensionless]
$\alpha$	coefficiente di recessione [T <sup>-1</sup> ]	$\alpha$	recession coefficient [T <sup>-1</sup> ]
$\alpha_B$	coefficiente di recessione per il modello di Boussinesq [T <sup>-1</sup> ]	$\alpha_B$	recession coefficient for the Boussinesq model [T <sup>-1</sup> ]
$\alpha_M$	coefficiente di recessione per il modello di Maillet [T <sup>-1</sup> ]	$\alpha_M$	recession coefficient for the Maillet model [T <sup>-1</sup> ]
$\Delta h$	abbassamento piezometrico [L]	$\Delta h$	drawdown [L]

### RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato condotto con il contributo del PRIN 2008 - prot. 2008YYZKEE\_002.

Gli autori desiderano ringraziare la Futurella S.p.A., nella persona del Sig. Nicola Del Negro, per la disponibilità offerta per l'esperimento. Gli autori ringraziano anche i revisori, Lucio Di Matteo e Maurizio Polemio, per gli utili e costruttivi commenti.

### OPERE CITATE / REFERENCES

- AMIT H., LYAKHOVSKY V., KATZ A., STARINSKY A. & BURG A. (2002) - *Interpretation of spring recession curves*. Ground Water, **40**: 543-551.
- BOLOGNINI M., CELICO P., TESCIONE M. & AQUINO S. (1994) - *La produttività di pozzi in acquiferi molto carsificati: l'esempio dei monti Alburni (SA)*. Geologica Romana, **30**: 671-686.
- BOUSSINESQ J. (1903) - *Sur un mode simple d'écoulement des nappes d'eau d'infiltration à lit horizontal, avec rebord vertical tout autour lorsqu'une partie de ce rebord est enlevée depuis la surface jusqu'au fond*. C. R. Acad. Sci., **137**: 5-11.
- CHATFIELD C. (1975) - *The analysis of Time Series: Theory and Practice*. Chapman & Hall, London.
- DEBIECHE T.H., GUGLIELMI Y. & MUDRY J. (2002) - *Modeling the hydraulic behavior of a fissured-karstic aquifer in exploitation conditions*. Journal of Hydrology, **257**: 247-255.
- DEWANDEL B., LACHASSAGNE P., BAKALOWICZ M., WHENG PH. & AL-MALKI A. (2003) - *Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer*. Journal of Hydrology, **274**: 248-269.
- JENKINS G.M. & WATTS D.G. (1968) - *Spectral analysis and its applications*. Holden Day, San Francisco, CA.
- MAILLET E. (1905) - *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*. Librairie Sci., A. Hermann, Paris.
- MURRAY E.C. & SAMI K. (1998) - *Evaluating sustainable boreholes yields for fractured rock aquifers: some South African solutions*. In: BRAHANA ET ALII. (eds) *Gambling with groundwater*, AIH, St. Paul, MN, 25-32.
- PADILLA A. & PULIDO-BOSCH A. (1995) - *Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis*. Journal of Hydrology, **168**: 73-89.
- PISCOPO V. & SUMMA G. (2007) - *Experiment of pumping at constant-head: an alternative possibility to the sustainable yield of a well*. Hydrogeology Journal, **15**: 679-687.
- RAHNEMAEI M., ZARE M., NEMATOLLAHI A.R. & SEDGHI H. (2005) - *Application of spectral analysis of daily water level and spring discharge hydrographs data for comparing physical characteristics of karstic aquifers*. Journal of Hydrology, **311**: 105-116.
- TALLAKSEN L.M. (1995) - *A review of baseflow recession analysis*. Journal of Hydrology, **165**: 349-370.
- VAN TONDER G.J., BOTHA J.F., CHIANG W.H., KUNSTMANN H. & XU Y. (2001) - *Estimation of the sustainable yield of boreholes in fractured rock formation*. Journal of Hydrology, **241**: 70-90.
- WEI W.W.S. (1990) - *Time series analysis: univariate and multivariate methods*. Addison-Wesley, Reading, MA.

### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out with a contribution under PRIN 2008 - prot. 2008YYZKEE\_002.

The authors would like to thank the Futurella S.p.A., in the person of Mr Nicola Del Negro, for the opportunity to conduct the experiment. The authors are grateful to the reviewers, Lucio Di Matteo and Maurizio Polemio, for their helpful and constructive comments.

*Received July 2009 - Accepted May 2010*