

ANALISI DELLE PORTATE DI SORGENTI CARSICHE DURANTE PERIODI SICCI TOSI

ANALYSIS OF KARST SPRING DISCHARGES DURING DROUGHTS

FRANCESCO FIORILLO^(*) & FRANCESCO M. GUADAGNO^(*)

^(*)Università degli Studi del Sannio - Dipartimento di Studi Geologici ed Ambientali - Via dei Mulini, 59/A - 82100 Benevento, Italy
E-mail: francesco.fiorillo@unisannio.it - Tel. +39 0824 323619

RIASSUNTO

Le portate sorgive di un vasto sistema carsico della Campania sono state analizzate al fine di trovare la relazione con il regime delle piogge durante periodi di siccità. A causa del clima tipicamente Mediterraneo e delle condizioni idrogeologiche degli acquiferi, gli idrogrammi sorgivi sono caratterizzati in genere da un unico colmo durante il periodo aprile-maggio, con trascurabile componente del flusso veloce (*quick flow*). Una ricarica insufficiente causata da scarse piogge determina idrogrammi privi di colmo alle sorgenti, con continuo decremento di portata fino alla ricarica dell'anno idrologico successivo. Questi idrogrammi marcano tipicamente un periodo siccitoso, inducono una riduzione delle portate anche per l'anno idrologico successivo e possono essere indotti anche da più anni consecutivi con piogge sotto la media.

I dati storici indicano come ciascun anno idrologico appare dipendere dal precedente; in particolare, a causa del carattere ciclico che presenta la serie dei totali di pioggia annua e ad un "effetto memoria" presentato dagli acquiferi, le portate sorgive amplificano gli effetti delle scarse piogge e si caratterizzano per essere un indicatore climatico molto importante.

Grazie alla lunghezza delle serie di dati disponibili ed al regime specifico delle sorgenti, un idrogramma primo di colmo può essere previsto fin dall'inverno, fornendo utili informazione al gestore della risorsa idrica. A tal fine, il metodo utilizzato consente di valutare la pioggia in termini probabilistici necessaria per evitare un periodo siccitoso.

TERMINI CHIAVE: sorgenti carsiche, idrogramma, siccità, previsione, Campania

INTRODUZIONE

Sono descritti i recenti studi in corso sulle serie storiche di portata sorgiva di alcune importanti sorgenti carsiche dei M.ti Picentini, Campania, per le quali esistono misure da lungo tempo. La lunghezza delle serie storiche consente di indagare in modo dettagliato su molti aspetti idrogeologici, idrologici e climatici in generale.

Come in altre aree nel mondo, ricerche sulle serie storiche hanno evidenziato una caduta dei totali di pioggia annua di circa 18% nel settore centro-meridionale dell'Italia e del 7% nel settore settentrionale (BUFFONI *et alii*, 2003). Inoltre il numero dei giorni piovosi mostra un trend negativo, mentre l'intensità della pioggia

ABSTRACT

We analysed the spring discharges of a large karst system (Campania, Southern Italy) to determine the relation with periods of poor recharge. Due to the Mediterranean climate and hydrogeological conditions of the aquifers, spring hydrographs corresponding to the system are generally characterised by one annual smoothed peak during spring season and a negligible quick flow component. Insufficient recharge due to poor annual rainfall results in flat spring hydrographs (with no peak) that indicate a continuously decreasing discharge. Flat spring hydrographs reveal a drought, which is characterised by a prolonged shortage of water that induces a reduction in discharge during the following year as well. Droughts also appear to be induced by consecutive years with a rainfall below the average.

The historical data have shown that each hydrological year depends on the previous year because annual rainfall series do not have a random character and aquifers have a "memory effect", which results in spring discharges amplifying the effect of poor rainfall.

Due to a long historical series and the specific karst spring regime, a flat hydrograph can be forecast as early as winter, thereby providing a useful tool for water management. The time-lag between rainfall and spring discharges has been utilised to determine the amount of rainfall required to avoid a drought.

KEY WORDS: karst springs, hydrograph, drought, forecast, Campania (Southern Italy)

INTRODUCTION

Analyses of time series of some karst spring discharges have been carried out to find the relation with rainfall during period of poor recharge. The springs belong to karst system of Picentini mountains, Campania, where the availability of long time series allow to investigate into some hydrogeological, hydrological and climate features.

Like other areas across the globe, research carried out on lengthy historical series has shown an annual drop in rainfall of ~18% in Central-Southern Italy and 7% in Northern Italy (BUFFONI *et alii*, 2003). In addition, in Southern Italy, the actual number of rainy days displays a downward trend, while rainfall intensity presents a positive trend

mostra trend positivo (BRUNETTI *et alii*, 2004). A ciò si somma l'effetto dei trend positivi delle temperature, soprattutto degli ultimi anni, con conseguente incremento delle perdite per evapotraspirazione, riducendo ulteriormente le aliquote d'infiltrazione (DRAGONI & SUKHJA, 2008).

Le sorgenti di altre regioni carsiche italiane (settore Umbro-Marchigiano) mostrano un trend negativo della portata sorgiva durante gli ultimi decenni (CAMBI & DRAGONI, 2000). Casi ben documentati di abbassamento delle falde in aree carsiche sono descritti per l'Europa sud-occidentale (KERTESZ & MIKA, 1999), in Italia meridionale (SIMEONE, 2001), in Texas (LOAICIGA *et alii*, 2000), in Canada (CHEN *et alii*, 2004) ed in Cina (MA *et alii*, 2004).

A differenza di molti centri diffusi sul territorio di previsione di piene e per l'allerta/allarme frane, mancano procedure per la previsione della siccità delle acque sotterranee (*groundwater drought*). Gli studi ad oggi condotti, grazie anche alla disponibilità di lunghe serie di dati idrologici, piogge, temperature e portata sorgiva, consentono di effettuare una previsione dei periodi siccitosi in largo anticipo e possono essere di grande aiuto alla gestione generale della risorsa acqua.

CARATTERI IDROGEOLOGICI E DATI IDROLOGICI

Le sorgenti carsiche sono ubicate lungo il settore settentrionale dei monti Picentini, un vasto sistema carsico della Campania interna, ricoprente un'area di oltre 600 km² (Fig. 1). Morfologicamente l'area è caratterizzata da pendii molto acclivi, ove le zone con angoli del pendio oltre 20° d'inclinazione costituiscono più del 50% dell'intera area. Le zone pianeggianti sono limitate ad alcuni settori sommitali del rilievo, o connesse con depressioni tettono-carsiche.

Il settore nord-orientale è caratterizzato da quote medie maggiori, con il 70% oltre 1000 m s.l.m., fino al M. Cervialto (1809 m s.l.m.), mentre nel settore nord-occidentale, solo il 30% ha quota maggiore di 1000 m s.l.m., fino alla sommità del M. Terminio (1806 m a.s.l.).

(BRUNETTI *et alii*, 2004). Besides, the positive trend of temperature is worldwide recorded, inducing an increasing of the evapotranspiration and a consequent infiltration reduction. These climatic features are known for their tendency to favour run-off and cause a reduction of infiltration (DRAGONI & SUKHJA, 2008).

Other springs of central Italy, in the Umbria-Marche regions, were analysed to evaluate their regime in relation to climatic changes, revealing a negative trend in spring discharge during recent decades (CAMBI AND DRAGONI, 2000).

Well-documented case histories of groundwater lowering in karst areas are described for South-Eastern Europe (KERTESZ & MIKA, 1999), in Southern Italy (SIMEONE, 2001), Texas (LOAICIGA *et alii*, 2000), southern Manitoba in Canada (CHEN *et alii*, 2004) and northern China (MA *et alii*, 2004).

Differently from other hydrological risk (flood, landslides) specific procedures to forecast groundwater droughts are missing in Southern Italy. Thanks to long hydrological time series (rainfall, temperature, spring discharges) this study provides a method to forecast the droughts, a useful tool for the water resource management.

HYDROGEOLOGICAL FEATURES AND HYDROLOGICAL DATA

The karst springs are located along the northern boundary of the Picentini Mountains, a large karst system in the Campania region, southern Italy. Morphologically, these mountains are primarily characterised by a high slope angle, which is greater than 20° for more than 50% of the overall area. Flat zones are limited to endoreic areas and the karst summit landscape. In the north-eastern sector, over 70% of the catchment lies above 1000 m a.s.l., up to Mt. Cervialto (1809 m a.s.l.). In the north-western sector 30% of the catchment lies above 1000 m a.s.l., up to Mt. Terminio (1806 m a.s.l.).

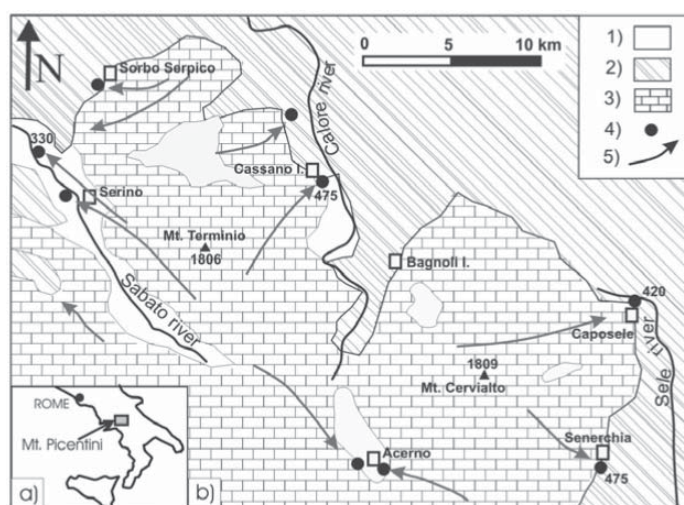


Fig. 1 - (a) Italia meridionale. (b) Schema idrogeologico del settore settentrionale dei Monti Picentini (modificato da CELICO, 1978). 1) depositi detritici, breccie di pendio, piroclastiti, alluvioni e depositi lacustri (Quaternario); 2) complesso argilloso e depositi flyscioidi (Paleogene-Miocene); 3) serie calcareo-dolomitica (Mesozoico); 4) gruppi sorgentizi principali; 5) direzione del flusso della falda

- (a) Southern Italian peninsula. (b) Hydrogeological map of the Northern Picentini Mountains (modified from CELICO, 1978). (1) Slope breccias and debris, pyroclastic, alluvial and lacustrine deposits (Quaternary); (2) argillaceous complex and Flysch sequences (Paleogene-Miocene); (3) calcareous-dolomite series (Mesozoic); (4) main spring; (5) groundwater flow direction

Le rocce affioranti appartengono ad una successione calcareo-dolomitica del Mesozoico, con spessore di oltre 2500 m, molto fratturata e fagliata, frequentemente ridotte a breccia.

Queste rocce sono coperte da depositi piroclastici dell'attività del Somma-Vesuvio, con spessori di alcuni metri lungo i pendii poco inclinati del settore del M.te Terminio a di alcuni decimetri lungo i pendii ripidi e l'intera area del M.te Cervialto. La loro presenza condiziona i processi d'infiltrazione nel substrato carsico.

La serie calcareo-dolomitica è tettonicamente bordata da successioni terrigene, molto meno permeabili, costituite da un complesso argilloso e da sequenze flyschoidi (Fig. 1). Depositi Quaternari, inclusi detriti e breccie di pendio, depositi alluvionali e lacustri, ricoprono il substrato marino (CIVITA, 1969).

Si rimanda agli studi di D'ARGENIO *et alii* (1973) e PAROTTO & PRATURLON (2004) e relative bibliografie per ulteriori dettagli circa i lineamenti geologici dell'area, nonché alla recente cartografia geologica (ISPRA, 2009).

Alcune faglie principali limitano la circolazione idrica sotterranea, suddividendo l'intero sistema carsico dei monti Picentini in varie sottounità (CELICO & CIVITA, 1976; CELICO, 1978; COPPOLA & PESCATORE, 1989; CALCATERRA *et alii*, 1992), come anche ipotizzato in altri acquiferi carbonatici dell'Italia meridionale (CELICO *et alii*, 2006).

Le principali sorgenti appartengono a tre gruppi, tra i più importanti in termini di portata e noti col nome del vicino centro urbano: Serino, Cassano e Caposele (Fig. 1).

Il gruppo di Serino è ubicato nella valle del fiume Sabato, lungo il confine nord-occidentale dei monti Picentini, è formato dalle sorgenti Acquaro-Pelosi (377-380 m s.l.m) e la sorgente Urciuoli (330 m s.l.m.). Il massiccio del Terminio-Tuoro costituisce la principale unità carsica che alimenta queste sorgenti (Esposito, 2001), con una portata media di 2.2 m³/s. In epoca romana, la sorgente Urciuoli alimentava l'acquedotto Claudio (I secolo d.C.), fornendo acqua all'area napoletana e flegrea. L'acquedotto è andato poi distrutto e solo nel 1885 la sorgente Urciuoli, e nel 1920 quelle di Acquaro-Pelosi, furono ricaptate per rifornire l'area napoletana secondo un'altro percorso e con un canale a gravità tuttora funzionante (acquedotto di Serino).

Il gruppo sorgivo di Caposele consta di un'unica potente scaturigine, la sorgente Sanità ubicata verso la sommità del bacino del fiume Sele (420 m m.l.s.), lungo il bordo nord-orientale dei monti Picentini. Questa sorgente è alimentata dall'unità del M. Cervialto, con portata media annua di 3.95 m³/s. Per supplire alle gravi carenze idriche della Regione Puglia, questa sorgente fu captata nel 1920 e, attraverso una galleria by-pass nello spartiacque Sele-Ofanto, alimenta l'acquedotto Pugliese.

Il gruppo di Cassano Irpino, ubicato lungo il fiume Calore al bordo settentrionale dei monti Picentini (COPPOLA *et alii*, 1989), è formato dalle sorgenti Bagno della Regina, Peschiera, Pollentina e Prete (473-476 m s.l.m.). Queste sorgenti sono alimentate soprattutto dall'unità Terminio-Tuoro, con media annua di 2.65 m³/s. Nel 1965 anche queste sorgenti furono captate per alimentare la Regione Puglia, e con un canale a gravità furono raccordate a quelle della sorgente Sanità prima

In the area mainly outcrops calcareous and calcareous-dolomite series (Mesozoic), 2500 m thick, interested by karstic processes, fractured, faulted and frequently reduced to breccias. These karstic rocks are mantled by pyroclastic deposits of Somma-Vesuvius activity, with thickness up to several meters along gentle slopes of the Mt. Terminio zone, and few decimetres along steep slopes and entire area of the Mt. Cervialto. These deposits have an important role in the infiltration of water into the karst substratum below.

The calcareous-dolomite series is tectonically bounded by terrigenous and impermeable deposits, constituting complex argillaceous (Paleocene) and flysch sequences (Miocene). Quaternary continental deposits, including slope breccias and debris and alluvial and lacustrine deposits, cover the marine substratum (CIVITA, 1969). Specific geological features of the outcropping areas can be found in D'ARGENIO *et alii* (1973) and PAROTTO & PRATURLON (2004) and related literature, and in the recent geological map (ISPRA, 2009).

Main faults are believed to restrict underground water flow, resulting in some karst sub-units within the Northern sector of the Picentini Mountains (CELICO & CIVITA, 1976; CELICO, 1978; COPPOLA & PESCATORE, 1989; CALCATERRA *et alii*, 1992). This phenomenon has also been observed in other carbonate aquifers of Southern Italy (CELICO *et alii*, 2006).

The analysed karst springs belong to three primary groups known as the Serino, Cassano and Caposele springs (Fig. 1).

The Serino group is located in the valley of the Sabato River, along the north-western boundary of the Picentini Mountains, where the Terminio-Tuoro massif is the primary karst feeder these springs (Esposito, 2001). This group is formed by the Acquaro-Pelosi springs (377-380 m a.s.l.) and the Urciuoli spring (330 m a.s.l.) and has an overall mean annual discharge of 2.2 m³/s. Roman aqueducts (1st century AD) were supplied by these springs, and the Urciuoli spring was tapped again between 1885 and 1888 by the Serino aqueduct, which is comprised of a gravity channel followed by a system of pressured conduits that is used to supply water to the Naples area. Additionally, the Acquaro and Pelosi springs were also re-capped in 1934 by the Serino aqueduct.

The Caposele group is formed by the Sanità spring (420 m a.s.l.), which is located at the head of the Sele river basin along the north-eastern boundary of the Picentini Mountains. This spring, which is primarily fed by the Cervialto karst massif, has a mean annual discharge of 3.96 m³/s. The spring was capped in 1920 by the Pugliese aqueduct, which passes through the Sele-Ofanto divide via a tunnel and supplies the Puglia region with water.

The Cassano group, which is located in the Calore river basin along the northern boundary of the Picentini Mountains (COPPOLA *et alii*, 1989), is formed by the Bagno della Regina, Peschiera, Pollentina and Prete springs (473-476 m a.s.l.). These springs are primarily fed by the Terminio-Tuoro massif, and have an overall mean annual discharge of 2.65 m³/s. In 1965 these springs were capped to

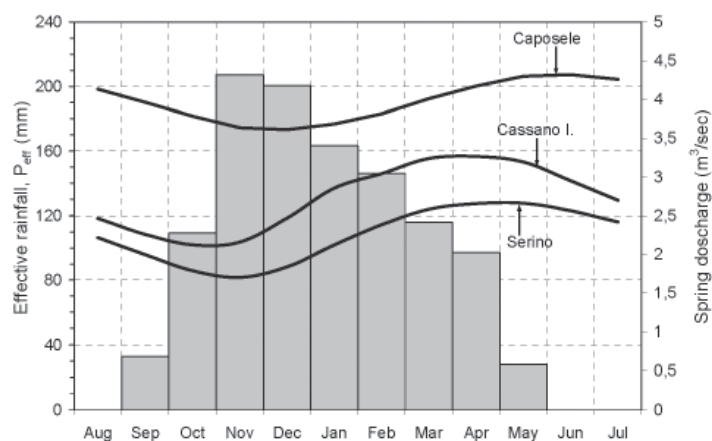


Fig. 2 - Piogge effettive (media delle stazioni di Serino, 351 m s.l.m. e di Montevergine, 1270 m s.l.m.). E' riportata anche la media mensile storica delle portate sorgive di Serino (periodo 1921-2006), Cassano (periodo 1965-2006) e Caposele (periodo 1921-2006)

- Effective rainfall (mean of stations at Serino, 351 m a.s.l. and Montevergine, 1270 m a.s.l.). Mean monthly spring discharges of the Caposele, Cassano and Serino groups are also plotted. Mean rainfall during 1921-2006 (except Cassano spring discharges, 1965-2006)

del by-pass Sele-Ofanto, e quindi immesse nell'acquedotto Pugliese.

Altre sorgenti sono alimentate dal sistema carsico dei Picentini ed i loro dettagli possono essere trovati in BUDETTA *et alii* (1994) e AQUINO *et alii* (2006) con relative bibliografie.

Nell'area è presente un tipico clima mediterraneo, con estate calda e secca e periodo umido dall'autunno alla primavera inclusa. La pioggia mensile ha il massimo in Novembre e minimo in Luglio. L'evapotraspirazione potenziale, calcolata con il metodo di THORNTHWAITE & MATHER (1957) raggiunge il minimo in dicembre-gennaio e massimo in luglio. Le piogge effettive, intese come la differenza tra la pioggia mensile ed evapotraspirazione potenziale, sono in genere nulle nel periodo maggio-settembre, anche se alle quote elevate l'evapotraspirazione potenziale eccede le piogge in un più breve periodo, in genere ridotto a giugno-agosto. La Fig. 2 riporta le piogge medie mensili al netto dell'evapotraspirazione potenziale, calcolata median-do i valori di una stazione di alta e bassa quota. Inoltre, le aliquote di ruscellamento possono considerarsi quasi nulle nell'area carsica in esame per la presenza di terreni in affioramenti altamente permeabili; di conseguenza, la differenza tra le aliquote di pioggia e l'evapotraspirazione (a scala mensile) può considerarsi come l'aliquote delle acque d'infiltrazione. Durante l'inverno le precipitazioni possono essere a carattere nevoso, specialmente sopra i 1000 m s.l.m., costituendo una differente variante dei processi di ricarica.

I dati di portata sorgiva sono disponibili a partire dal 1887, 1920 e 1966, rispettivamente per i gruppi di Serino, Caposele e Cassano Irpino. Alcune brevi interruzioni delle misure limitano per alcuni mesi la continuità delle serie. La Fig. 2 mostra la media mensile storica di ciascun gruppo sorgivo, con massimo di portata (colmo) che si verifica alcuni mesi dopo i massimi di piovosità e minimi durante il periodo più piovoso.

Un esempio di idrogramma sorgivo è mostrato in Fig. 3, dove appare la non influenza dei singoli eventi di pioggia giornalieri sulla portata stessa. L'idrogramma ha una forma smussata, caratterizzato da una assenza o limitata componente di flusso veloce (*quick flow*, ATKINSON, 1977; BONACCI, 1993; GUNN, 1986). Questo tipo di idrogramma può es-

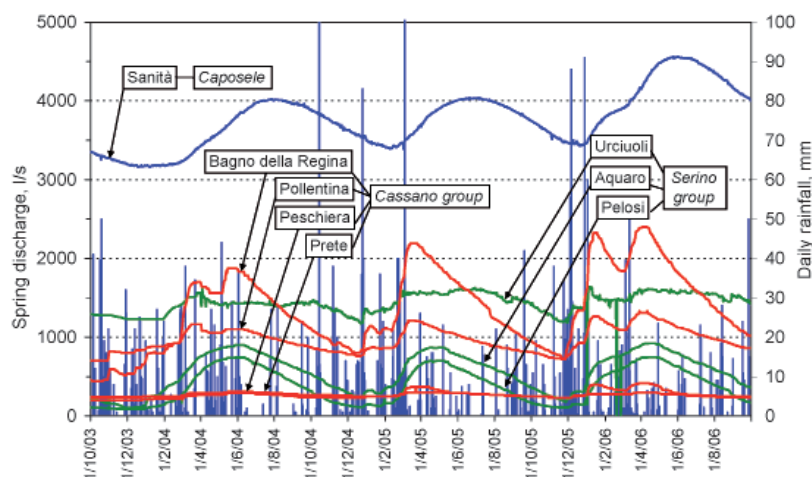
supply the Puglia region with water, and a gravity tunnel was joined to the Pugliese aqueduct.

Several other minor springs that are also fed by the Picentini Mountains (Fig. 2) have been described by BUDETTA *et alii* (1994) and AQUINO *et alii* (2006).

The region is located in an area with a typical Mediterranean climate characterised by dry and warm summers and a wet period that occurs during autumn, winter and spring. The monthly rainfall reaches the maximum during November and the minimum in July. The pattern of potential evapotranspiration computed using the method described by THORNTHWAITE & MATHER (1957) was found to be almost completely opposite to that of rainfall, reaching the maximum in July and the minimum in December-February. Fig. 2 shows the distribution of the monthly rainfall reduced by the amount of evapotranspiration, using data of low and high elevated station. Because rainfall primarily occurs during a non-warm season, its distribution allows a greater infiltration into the aquifer. Besides, runoff can be considered almost null in the analysed karst area, and the difference between monthly rainfall and monthly potential evapotranspiration appears very similar to the amount of effective infiltration. In the highly-elevated zones (above 1000 m a.s.l.) this period is shorter and the precipitation can be snowy during winter (December-February) this may have a significant effect on ground-water aquifer recharge.

Spring discharge data are available from 1887, 1920 and 1966, for the Serino, Caposele and Cassano groups, respectively. Generally, a daily frequency of the discharge measurements have been carried out since 1962, whereas previous measurements had a frequency of twice or three times a month. The discharge is measured in the specific canal sections. The data time series is not completely continuous; however, breaks in the data series are generally no longer than few months. Fig. 2 shows the historical monthly mean discharges from the spring groups. In each group of springs, the maximum discharge occurred several months after the maximum rainfall, whereas the

Fig. 3 - Pioggia giornaliera (pluviometro di Serino) e portata sorgiva giornaliera, periodo 1 ottobre 2003 - 30 settembre 2006
 - Daily rainfall (Serino rain gauge) and daily discharge of springs for October 01, 2003 - September 30, 2006



sere associato ad un acquifero carbonatico con circolazione idrica riconducibile ad un sistema dispersivo (CIVITA, 2005). Le sorgenti di Cassano raggiungono per prime il colmo, mentre Caposele appare quella più sfasata rispetto alle precipitazioni. In particolare, Caposele presenta un regime quasi opposto a quello delle precipitazioni (Figg. 2-3).

Durante annate particolarmente siccitose può mancare il caratteristico colmo di portata, con valori decrescenti per tutto l'anno idrologico.

La copertura piroclastica contribuisce a ridurre una veloce infiltrazione dalla superficie in profondità, all'interno del substrato carsico, favorendo una forma smussata dagli idrogrammi sorgivi. Il ruolo della pioggia nel ricaricare in superficie la coltre piroclastica è stato descritto da FIORILLO & WILSON (2004), con lo scopo di investigare la variazione dell'umidità durante l'anno idrologico. Durante la stagione secca, la copertura piroclastica raggiunge il minimo di umidità; a partire da settembre-ottobre, per effetto dell'aumento delle piogge e della diminuzione della evapotraspirazione, l'umidità nella coltre piroclastica aumenta fino alla capacità di campo. Solo a partire da questo stadio le piogge successive possono attraversare la copertura piroclastica, percolare attraverso il substrato carsico, e ricaricare il sistema. La quantità di pioggia necessaria per incrementare l'umidità dal suo valore minimo alla capacità di campo è pari a 240 mm, ma per l'effetto dell'evapotraspirazione questa quantità varia approssimativamente tra 350-450 mm in funzione della distribuzione delle piogge (FIORILLO & WILSON, 2004). Perciò, l'infiltrazione in profondità (percolazione nell'insaturo carsico) è attenuata all'inizio della stagione piovosa, e la stessa cosa si verifica più oltre, verso la fine della stagione umida, quando l'evapotraspirazione aumenta considerevolmente. In aggiunta, le precipitazioni nevose che si verificano durante l'inverno sopra i 1000 m s.l.m. inducono un ritardo dei processi infiltrativi, contribuendo al ritardo dei colmi di portata sorgiva. Attraverso analisi di cross-correlazione tra piogge e portata sorgiva, FIORILLO & DOGLIONI (2010) hanno discusso sui tempi di transito delle acque di infiltrazione nel sistema carsico alimentante la sorgente Torano (Monti del Matese, Campania) e quella di Caposele.

minimum discharge occurred during the wettest period.

Fig. 3 shows examples of spring discharge regimes in which no direct influence of a single rain event (daily rainfall) exists, specially for Caposele spring. Hydrographs describing such springs have a smooth shape characterised by the absence or a very low component of quick flow (ATKINSON, 1977; BONACCI, 1993; GUNN, 1986). This hydrograph can be associated to dispersive karst system flow (CIVITA, 2005). The discharge from the Cassano spring increases first, whereas the Caposele spring discharges increase last. It is interesting to note that the discharge regime of the Caposele spring is almost opposite to that of rainfall (Figg. 2-3).

During droughts, hydrographs can have a continuous decreasing trend during the hydrological year.

Pyroclastic mantle reduces rapid infiltration into the karst system, which may also contribute to the smoothed shape of the spring hydrographs. FIORILLO & WILSON (2004) described the role that rainfall plays in recharging surface and deep aquifer systems covered by pyroclastic deposits in the Campania region investigating the variation in wetness on the pyroclastic mantle. During the dry season (summer), the water content of the pyroclastic cover reaches a minimum, whereas the water content increases to field capacity during autumn. Subsequent storms cause water to percolate into deep layers and recharge the groundwater aquifer. The amount of rainfall required to increase the minimum water content to field capacity is 240 mm. However, when evapotranspiration is considered, this amount reaches approximately 350-450 mm (FIORILLO & WILSON, 2004). Therefore, infiltration is attenuated at the beginning of the rainy season and at the end of the spring season when evapotranspiration increases considerably. In addition, above 1000 m a.s.l., precipitation often occurs like snow during winter, which can also induce a delay in the infiltration processes. Using the cross-correlation between rainfall and spring discharge data series, FIORILLO & DOGLIONI (2010) have discussed on the infiltration time into the karst system feeding the Torano spring (Matese massif, Campania) and that of Caposele.

SERIE IDROLOGICHE E PERIODI SICCTOSI

La serie storica delle portate delle sorgenti di Serino e Caposele sono riportate in Fig. 4, periodo 1920-2006. Le serie presentano un andamento simile tra loro, con anni secchi e umidi ben correlati tra loro, come osservabile in Fig. 5. E' interessante osservare che dopo il 1986 tutte le serie chiaramente mostrano un decremento, raggiungendo i più bassi valori fino al 1993. Durante questo periodo si verificarono notevoli problemi di approvvigionamento idrico in molte regioni dell'Italia meridionale.

Tutti gli idrogrammi raggiungono il valore massimo dopo il terremoto irpino del 23 novembre 1980 (Ms = 6,9), che causò un anomalo incremento della portata (CELICO, 1981; COTECCHIA & SALVEMINI, 1981), con massimo fino a 7.32 m³/s (19 gennaio 1981) e 5.5 m³/s (10 dicembre 1980), rispettivamente per la sorgente di Caposele e quelle di Cassano. Le sorgenti di Serino anche raggiunsero il massimo di portata storica dopo il terremoto irpino con valore di 3.6 m³/s (15 gennaio 1981), sebbene con un apparente e più moderato incremento.

Le piogge annuali effettive registrate al pluviometro di Serino sono mostrate in Fig. 4 ed appaiono ben correlate con i valori di por-

HYDROLOGICAL TIME SERIES AND DROUGHTS

Historical time series corresponding to the Serino and Caposele spring discharge are shown in Fig. 4, 1920-2006 period. Spring discharges show a very similar trend, with drier and wetter years being well correlated between each series (Fig. 5). All the spring hydrographs obtained after 1986 clearly show a decrease in discharge up to 1993. During this period, many water resource management problems occurred in Southern Italy due to the reduced water supply (POLEMIO & CASARANO, 2008).

All of the spring discharges reached their maximum value following the Irpinia earthquakes in November 1980 (Ms = 6,9). This earthquake caused an anomalous increase in spring discharge (CELICO, 1981; COTECCHIA & SALVEMINI, 1981), with maximum values of 7.32 m³/s (19 January 1981), 5.5 m³/s (10 December 1980) and 3.6 m³/s (15 January 1981), being observed for the Caposele, Cassano and Serino springs, respectively.

The annual effective rainfall recorded at the Serino rain gauge, which is shown in Fig. 4, appears to be well correlated with the an-

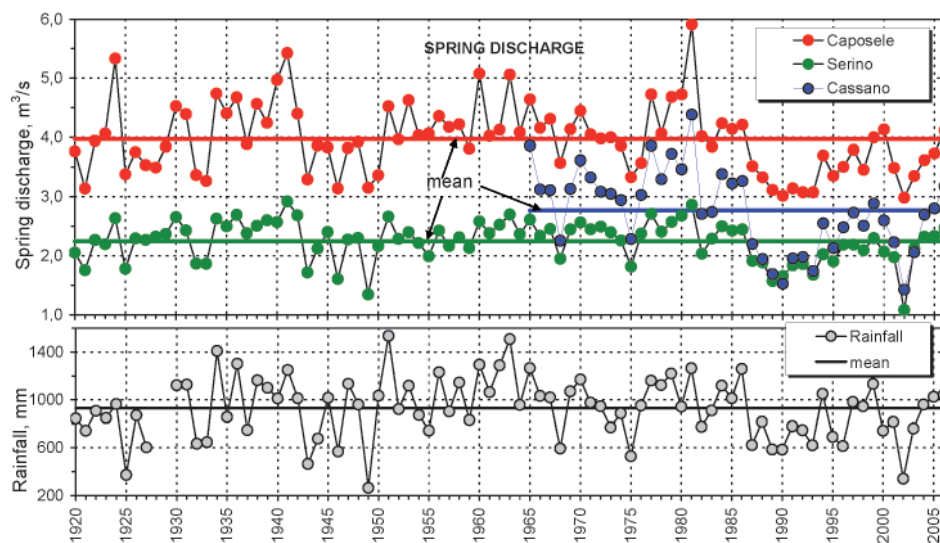


Fig. 4 - Serie delle portate sorgive medie annuali (novembre-ottobre) e delle piogge effettive annuali (settembre-agosto, pluviometro di Serino)
- Annual mean of spring discharge series and annual effective rainfall (September-August) series (Serino rain gauge)

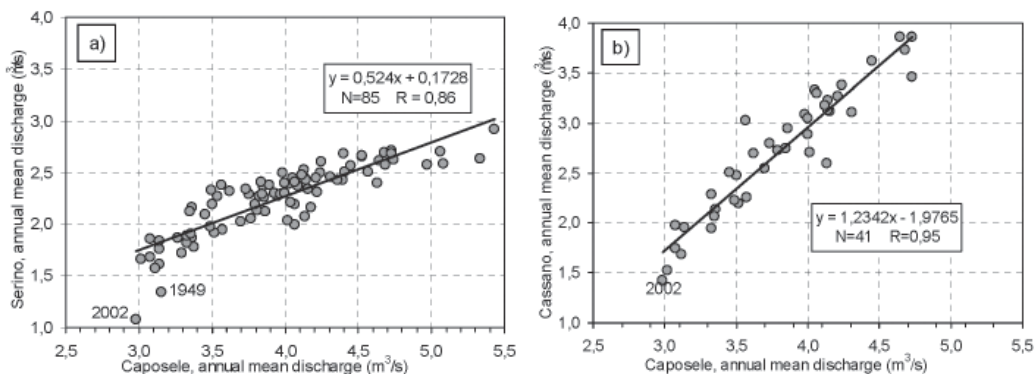
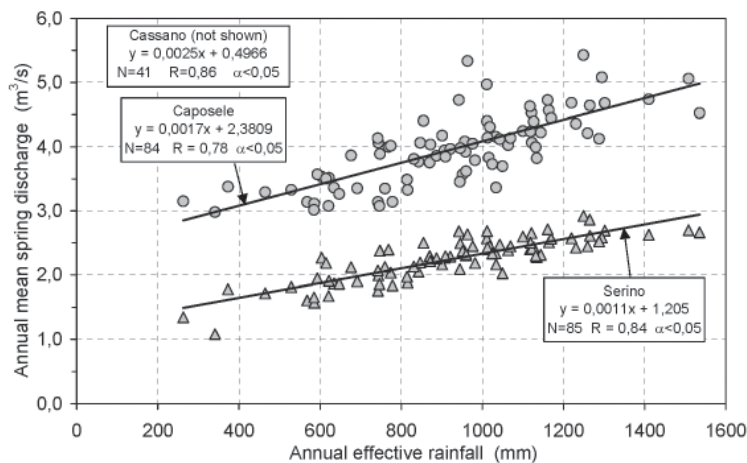


Fig. 5 - Correlazione tra i valori medi annuali di portata sorgiva (FIORILLO, 2009)
- Correlation between annual mean spring discharges (FIORILLO, 2009)

Fig. 6 - Portata sorgive medie annue in relazione con le medie piogge effettive annuali (pluviometro di Serino) (FIORILLO, 2009). Le caratteristiche della correlazione sono indicate analiticamente (equazione; coefficiente di correlazione lineare, R; numero di dati, N; livello di significatività, α) - Annual effective rainfall (September-August, Serino rain gauge) plotted against annual mean spring discharge (November-October) (FIORILLO, 2009). Characteristics of linear regression shown by Fig.s (linear regression equation; R, correlation coefficient; N, number of years; α , significance level)



tata sorgiva media annua (Fig. 6). La buona correlazione trovata con i dati del pluviometro di Serino anche per i dati di portata di Caposele e Cassano deve essere connessa con l'ubicazione favorevole di questo pluviometro (settore occidentale dei monti Picentini) per la registrazione delle piogge di provenienza atlantica, che sono le prevalenti in Campania. Uno studio ha evidenziato anche la buona correlazione tra le portate di Caposele l'Oscillazione del Nord Atlantico, NAO (DE VITA & FABBROCINO, 2006).

Alle annate siccitose del 1949 e 2002 sono connesse le basse portate nei medesimi anni (Fig. 4), così come il periodo di piogge 1987-1993, costantemente sotto il valore medio, spiega il conseguente calo delle portate nello stesso periodo. Tali principali periodi siccitosi hanno interessato vaste aree dell'Italia meridionale (POLEMIO & CASARANO, 2008).

I valori più bassi corrispondono in genere ad idrogrammi sorgivi privi di colmo, connessi con una insufficiente ricarica per scarse piogge. Questi idrogrammi, caratterizzati da costante decremento, causano complessivamente un deflusso superiore all'afflusso, con riduzione del volume immagazzinato. Questi idrogrammi sono stati presi come riferimento per definire un periodo siccitoso in aree carsiche (FIORILLO, 2009). Basandosi su questo criterio idrogeologico, un periodo siccitoso ha una durata di un anno, iniziando in autunno e finendo nel successivo autunno (FIORILLO, 2009). Inoltre, alcuni anni consecutivi possono essere caratterizzati da idrogrammi privi di colmo, indicando una tipica siccità con durata pluriennale.

Al fine di valutare il deficit delle piogge responsabile del propagarsi di un periodo siccitoso, si è fatto riferimento all'indice Standard Precipitation Index, SPI (McKee *et alii*, 1993).

Il calcolo dell'indice si basa nella individuazione della funzione di distribuzione Gamma che fitta le piogge cumulate su più mesi di una certa stazione. I parametri della distribuzione Gamma sono stimati per la scala temporale di interesse (1, 3, 6, 12 mesi, etc.) e per ogni mese dell'anno. La probabilità cumulata così trovata, è trasformata nella variabile Z della distribuzione normale standardizzata (media=0 e varianza=1) che coincide con l'indice SPI.

nual mean spring discharge series (Fig. 6). The highest correlation between rainfall and the spring discharge by the Caposele and Cassano springs was also obtained when data from the Serino rain gauge was used. This indicates that this rain gauge is in a useful location (western side of the Picentini Mountains) for the evaluation of the recharge-spring discharge relationship. In addition, the North Atlantic Oscillation (NAO) and Caposele spring discharge also appear to be well correlated (DE VITA & FABBROCINO, 2006).

The two droughts of 1949 and 2002 are explained by the two lowest historical values of annual rainfall (Fig. 4), and the continuous rainfall period 1987-1993 constantly below the mean explain the relative lowering of the spring discharge in the same period. These droughts have hit wide areas of the Southern Italy (POLEMIO & CASARANO, 2008).

Poor annual rainfall was found to reduce the spring discharge; specifically, during any hydrological year, hydrographs characterised by a constant decrease or without a clear flood denote insufficient recharge of the karst system. These flat spring hydrographs can be defined as indicators of drought in a karst environment (FIORILLO, 2009). Based on this hydrogeological criterion, any drought has a duration of about one year, beginning in the autumn and ending in the following autumn. In addition, some consecutive years can be characterized by the presence of a long and almost flat spring hydrograph, which indicates a typical multiyear drought.

To evaluate the deficit of rainfall which induce a drought propagation, the Standard Precipitation Index (SPI) has been used (McKee *et alii*, 1993). Computation of the SPI requires fitting a gamma probability density function to a given frequency distribution of the totals precipitation for a station. The parameter of the gamma distribution are estimated for the station, for the time scale of interest (1, 3, 6, 12 months, etc.), and for each month of the years. Then, the cumulative probability is transformed into the standard normal random variable Z with a mean of zero and a variance of one, which is the value of the SPI.

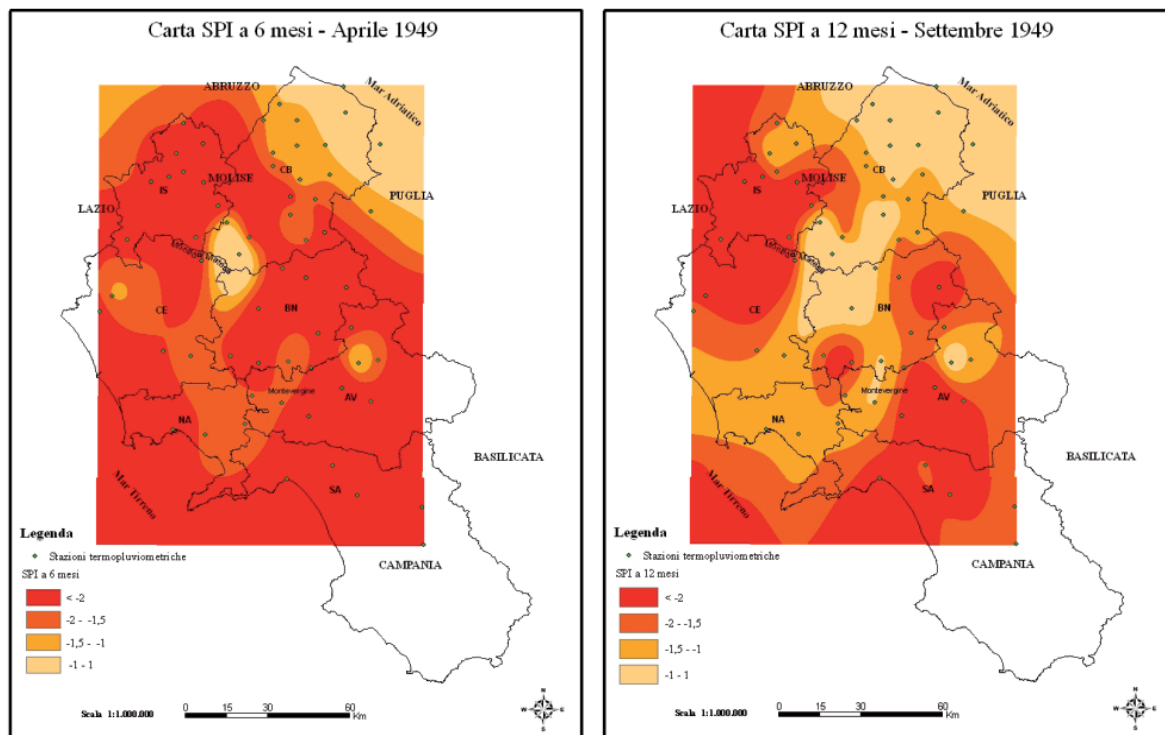


Fig. 7 - Distribuzione spaziale dell'indice SPI (Standard Precipitation Index) in un vasto settore dell'Italia meridionale, durante la siccità del 1949
 - Spatial distribution of the SPI index in a wide area of Southern Italy, during the drought of 1949

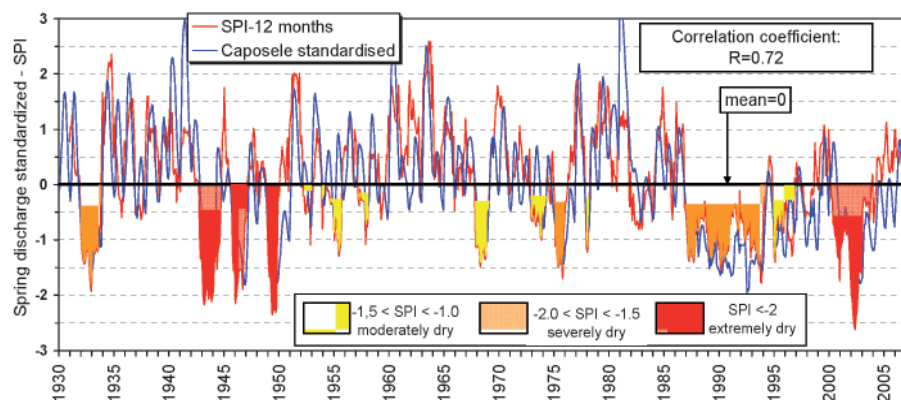


Fig. 8 - Portata media mensile di Caposele e indice SPI12, periodo 1930-2007 (FIORILLO & GUADAGNO, 2010)
 - Caposele monthly mean series and SPI12, period 1930 to 2007 (FIORILLO & GUADAGNO, 2010)

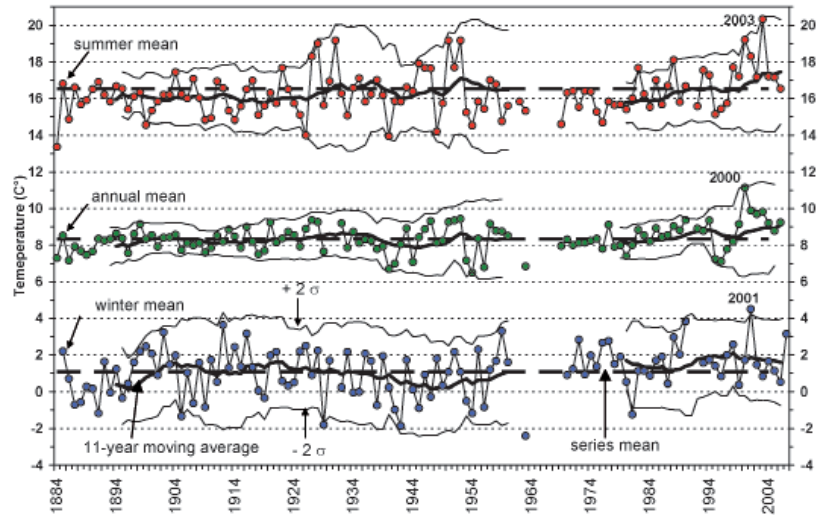
In Fig. 7 sono riportate due mappe dell'andamento dell'indice SPI in occasione del periodo siccitoso del 1949 che causarono idrogrammi primi di colmo a molte sorgenti carsiche della Campania.

La Fig. 8 mostra la buona correlazione tra l'indice SPI₁₂ (calcolato su piogge cumulate a 12 mesi) e la portata sorgiva. I periodi estremamente secchi (SPI ≤ -2) indussero i valori di portata sorgiva più bassi come nel 1943, 1946, 1949 e 2002, mentre il lungo periodo 1987 al 1993, caratterizzato da basse portate, appare con-

Fig. 7 shows the SPI for the 1949 drought occurred in Campania, which induced spring hydrograph typically without flood for many karst spring of Campania.

Fig. 8 shows the similar path of the SPI₁₂ and monthly spring discharge of Caposele; the extremely dry period (SPI ≤ -2) induced the lower spring discharge values of 1943, 1946, 1949 and 2002, whereas the long period of low discharge of 1987 to 1993 appears connected with a severely dry period (-2 < SPI ≤ -1,5). Hydrograph

Fig. 9 - Serie delle temperature medie storiche estive (giugno-agosto), invernali (dicembre-febbraio) e annuali al termometro di Montevergine (1270 m s.l.m), smussate da media mobile a 11 anni. $\pm 2\sigma$ indicano i limiti di confidenza al 95%
 - Temperature series from Montevergine station: winter (December-February), summer (June-September) and annual mean temperature, smoothed by an 11-year moving average. The $\pm 2\sigma$ confidence limit is also shown, indicating the 95% confidence level



nesso con siccità moderata/severa ($-2 < SPI \leq -1.0$). Il confronto tra l'indice SPI a 12 mesi e la serie mensile delle portate sorgive indica come un idrogramma sorgivo privo di colmo possa essere indotto da valori di $SPI < -1.5$.

Al fine di considerare il possibile andamento della temperatura in Campania, è stata analizzata la serie dei valori registrati alla stazione di Montevergine (AV), ubicata a 1270 m s.l.m, all'interno del locale monastero. La serie ha un grande valore scientifico, non solo perché i dati sono stati presi nel tempo con grande cura fin dal 1884, con una interruzione solo durante gli anni '60, ma soprattutto perché il sito non subisce l'inquinamento termico tipico delle aree urbane. In Fig. 9 i dati sono riportati come serie delle medie estive, invernali ed annuali, smussate dalla media mobile a 11 anni con relativi limiti di confidenza del 95%.

Con eccezione del 1980, dopo il 1955 la media invernale oscilla sopra lo 0°C , mentre dopo il 1992 la media mobile a 11 anni è circa 1°C più alta della media assoluta. In particolare, l'inverno 2001 è il più caldo della serie storica e giace sopra il limite di confidenza del 95%.

Dopo il 1998 la media estiva è sempre superiore alla media assoluta e la media mobile raggiunge il massimo della serie storica negli ultimi anni, con oltre 1°C sopra la media. In particolare l'estate del 2000 e del 2003 sono state le più calde della serie storica, prossime al limite di confidenza del 95% (estati calde furono anche registrate durante il 1927, 1928, 1931, 1951 e 1953, ma furono compensate da successivi inverni freddi).

La temperatura media annua è caratterizzata da una più ristretta oscillazione, con valori elevati durante i recenti anni. Dopo il 1987 la media mobile è sempre sopra la media assoluta.

Tutte e tre le serie in Fig. 9 hanno trend positivo, caratterizzato da una pendenza della retta di regressione lineare (non indicata) poco meno di $+1^{\circ}\text{C}/100$ anni.

In Fig. 10 è riportata l'applicazione progressiva del test t alla serie di dati di temperatura invernale di Fig. 9. Si osserva come a partire

without flood are generally induced by $SPI < -1.5$.

To evaluate the temperature trend in Campania, a long series of temperature data from the Mt. Vergine station has been considered, located inside a monastery. Thanks to the monks care, this high-elevated station (1270 m a.s.l.) has been operating since 1884, with only a break occurring for some years during the 1960s. The station is far from any urban area thus data records are not affected by local thermal pollution. Winter, summer and annual mean temperature series have been arranged in Fig.9, smoothed by an 11-year moving average and relative confidence level of 95%. With the exception of 1980, after 1955 mean winter temperature rose above 0°C , while after 1992, the 11-year moving average is about 1°C higher than the mean. In particular, 2001 was the hottest winter in the historical series, lying above the 2σ confidence limit. After 1998, mean summer temperature exceeded the mean and the 11-year moving average reached a maximum value during the last years with more than 1°C above the mean. In particular, the summers of 2000 and 2003 were the hottest in the historical series, lying approximately on the 2σ confidence limit (hot summers were also recorded during 1927, 1928, 1931, 1951 and 1953, but were followed by cold winters).

The annual mean temperature series is characterised by a narrow variation with respect to winter and summer temperatures. Highest values were reached during recent years (2000-2003 period). After 1987, the 11-year moving average has always stayed above the mean. The three series of Fig. 9 have positive trend, characterised by a linear regression coefficient almost of $+1^{\circ}\text{C}/100$ years. This trend has a high significance for the summer and winter series.

Fig. 10 shows the progressive application of the linear least-square fitting the temperature winter mean series. After the seventies, the linear coefficient regression is positive and the significance of the trend is high ($>95\%$) during the last decade.

Based on the regional scale approach, DUCCI & TRANFAGLIA

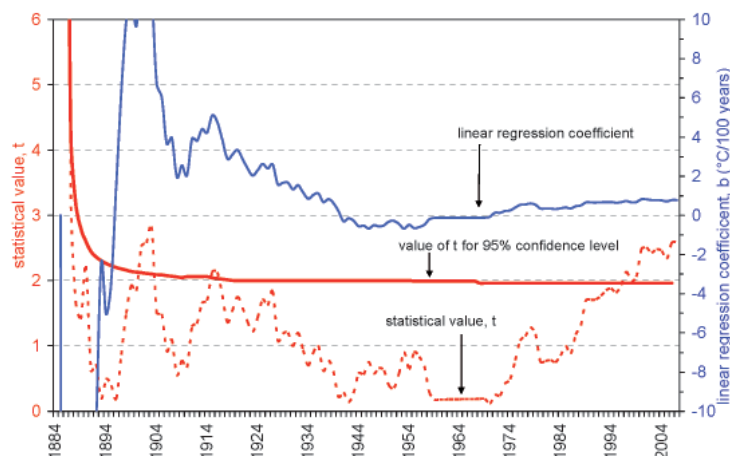


Fig. 10 - Serie delle temperature medie invernali alla stazione di Montevergine: applicazione progressiva del coefficiente di regressione lineare e relativa significatività della correlazione mediante il test t

- Progressive application of linear regression coefficient, b , and relative statistical value, t , computed for the winter mean temperature series of Montevergine station

dagli anni '70, il coefficiente di regressione lineare sia sempre positivo; in particolare, la significatività del trend diventa molto elevata (> 95%) nell'ultimo decennio. Uno studio a scala regionale (DUCCI & TRANFAGLIA, 2008) ha evidenziato il decremento della pioggia annuale e l'aumento della temperatura verificatosi negli ultimi due decenni in Campania. Localmente, FIORILLO & GUADAGNO (2010) hanno evidenziato come la temperatura media annua e le piogge annue siano quasi sempre sopra e sotto il valore medio delle rispettive serie dopo il 1986.

In altre regioni carsiche è stata riscontrata una forte correlazione tra l'abbassamento dei livelli di falda e l'innalzamento delle temperature (Texas, LOAICIGA *et alii*, 2000; Manitoba-Canada, CHEN *et alii*, 2004). In Campania il recente incremento delle temperature medie sembra coincidere con la riduzione delle portate delle sorgenti, suggerendo il loro ruolo di variabile climatica controllante le portate sorgive.

ANALISI IDROLOGICO-STATISTICHE

Le sorgenti carsiche analizzate sono caratterizzate da un predominante flusso di base (*base flow*), con idrogramma che smussa i picchi concentrati delle piogge. La pioggia mensile appare essere una unità temporale conveniente per valutare la ricarica nell'acquifero.

Mediamente, alla fine di dicembre e di febbraio la pioggia effettiva cumulata dall'inizio dell'anno idrologico è circa il 50% e 80% del totale annuo di piogge effettive, rispettivamente.

Il colmo di portata si verifica prevalentemente nel periodo aprile-giugno, con un certo ritardo, quindi, rispetto alla stagione piovosa. A causa di questo particolare regime, la misura della pioggia e della temperatura può essere utilizzata per effettuare una previsione della portata sorgiva durante l'anno idrologico (FIORILLO *et alii*, 2007; FIORILLO, 2009). In particolare, la portata di queste sorgenti può essere prevista alcuni mesi prima, con notevoli vantaggi nella gestione della risorsa.

La possibilità di effettuare una previsione attendibile necessita evidentemente di approfondita analisi della relazione input (piogge) - output (portata sorgiva), possibile solo se si dispone di una lunga serie di dati su cui effettuare un'analisi statistico-idrologica.

(2008) have noted the annual rainfall decreasing and annual mean temperature increasing over the last decades in Campania. Locally, FIORILLO & GUADAGNO (2010) have shown how the annual mean temperature and annual rainfall is generally above and below the mean, respectively, after 1986.

In another karst area (Manitoba, Canada), a strong correlation was found between temperature and groundwater level (LOAICIGA *et alii*, 2000; CHEN *et alii*, 2004). In Campania, this temperature increase coincides with recent attenuation of the spring discharges, suggesting that temperature can be considered as a climate variable controlling spring discharge.

HYDROLOGIC-STATISTICAL ANALYSIS

The karst springs analysed are characterised mainly by base flow, where the peaks of rainfall are completely smoothed in the spring hydrograph. The shape of the hydrograph is connected to long cumulative rainfall and the total monthly rainfall appears to be useful to describe the recharge.

Generally, at the end of December and February, the cumulative rainfall from the beginning of the hydrological year is 50% and 80% of the annual rainfall (in terms of effective rainfall), respectively.

The peak of spring discharge generally occurs in April-June, shifted from rainy season. Due to this regime, rainfall and temperature monitoring can be used to forecast the spring discharge during the hydrological year (FIORILLO *et alii*, 2007; FIORILLO, 2009). In particular, spring discharge can be forecast some months before, a useful tools for the water management.

However, a reliable discharge forecast needs a detailed analysis of the input-output relationship, which is possible if a long historical time series is available.

ANALISI A SCALA ANNUALE

In Fig. 11 è riportata l'autocorrelazione dei valori medi annui della portata sorgiva e della pioggia effettiva annua al fine di verificare l'eventuale legame tra annate consecutive. Per valori di $k=1$, il coefficiente di autocorrelazione, $r(k)$, è 0.68, 0.62, e 0.51 rispettivamente per Cassano, Caposele e Serino; è molto basso (0.23), invece, per la serie delle piogge. Questi risultati indicano che la portata media annuale dipende anche dalla portata media annuale dell'annata precedente per le sorgenti Caposele e Cassano. Per queste sorgenti, la dipendenza si verifica soprattutto dopo periodi siccitosi e può essere osservata in Fig. 12, ove sono mostrate le riduzioni di portata durante le annate successive a quelle siccitose.

L'impoverimento della risorsa acqua causato da una annata siccitosa appare essere indotto anche da annate consecutive con piogge sotto la media, come accaduto nel periodo 1987-1993 (Fig. 4). Durante questo periodo, altre sorgenti dell'Italia centrale (CAMBI & DRAGONI, 2000) furono caratterizzate da abbassamento della portata sorgiva. In questo caso il sistema carsico sembra accumulare un progressivo deficit, e finisce con il comportarsi come durante una annata siccitosa. Inoltre, come mostrato dai dati storici, il deficit idrico accumulatosi nell'acquifero a seguito di una annata siccitosa può avere effetti sulla portata futura per lungo tempo, anche oltre l'annata successiva. La Fig. 13 mostra come

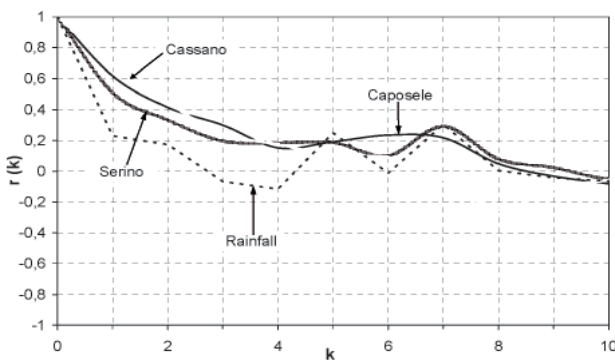


Fig. 11 - Autocorrelazione dei valori di portata sorgiva media annuale e della pioggia annuale (periodo 1965-2006) (FIORILLO, 2009)
 - Correlogram of the annual mean spring discharge series and annual rainfall (period 1965-2006) (FIORILLO, 2009)

ANNUAL SCALE ANALYSIS

Autocorrelation of the annual mean spring discharge and annual effective rainfall series has been conducted to determine if there is any link between consecutive values (Fig. 11). For a value of $k=1$, the coefficient of autocorrelation, $r(k)$, is 0.68, 0.62 and 0.51 for the Cassano, Caposele and Serino springs, respectively, and is very low (0.23) for the rainfall series.

These results indicate that the annual mean spring discharge depends primarily on the previous annual value of the Caposele and Cassano springs. For these springs, the dependence occurs mainly after droughts. This dependence can be seen in Fig. 12, which shows a reduction in discharge in the years following drought.

Depleted water resources also appear to be induced by consecutive years with rainfall below the mean, as occurred between 1987-1993 (Fig. 4). During this period, other springs in central Italy (CAMBI AND DRAGONI, 2000) were also characterised by a lowering of the discharge. This indicates that karst systems can accumulate a progressive deficit of storage, which can result in a prolonged drought. In addition, the effects of a poor annual rainfall have been found for several years in the Caposele and Cassano springs (Fig. 13).

The sequence of annual rainfall values presented in Fig. 4 re-

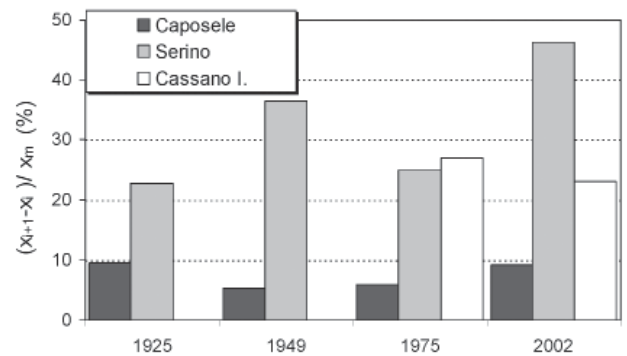


Fig. 12 - Differenza tra valori consecutivi di portata media annuale ($x_{i+1} - x_i$) normalizzati rispetto alla media (x_m), per alcuni principali periodi siccitosi della serie storica ((1925 e 1949 solo per le sorgenti di Serino Caposele) (FIORILLO, 2009)
 - Difference of consecutive annual mean spring discharge values ($x_{i+1} - x_i$) normalised with regard to the mean (x_m) for the main droughts in the historical series (1925 and 1949 only for Serino and Caposele springs) (FIORILLO, 2009)

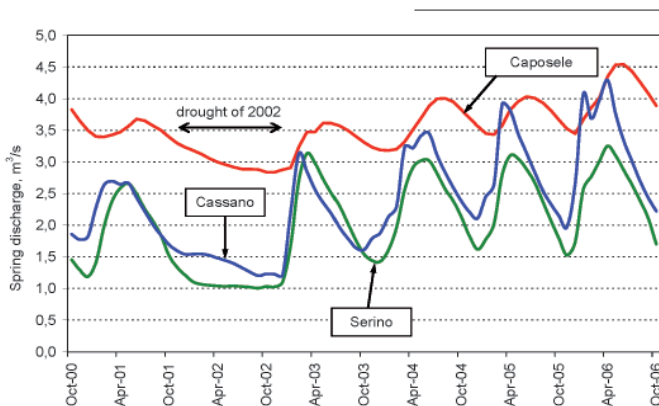


Fig. 13 - Portata sorgiva del periodo ottobre 2000 - ottobre 2006. Gli idrogrammi sorgivi di Cassano Irpino e Caposele presentano un effetto memoria della magra del 2002
 - Spring discharges for the period of October 2000 to October 2006. Caposele and Cassano spring hydrographs show the memory effect of the 2002 drought

l'idrogramma sorgivo delle sorgenti di Cassano Irpino e Caposele abbia un effetto memoria dopo la magra eccezionale del 2002, caratterizzato dalla difficoltà di recupero se confrontato con l'idrogramma di Serino.

La sequenza dei totali annui di pioggia di Fig. 4 evidenzia come vi sia una tendenza delle annate magre ad associarsi insieme, così come per quelle umide. Questo comportamento è noto in letteratura come Joseph effect (MANDELBROT & WALLIS, 1969) ed appare essere presente quindi nelle serie qui descritte. Ciò indica soprattutto che la distribuzione temporale delle annate di magra non sia di tipo random (HUDSON & HAZEN, 1964).

Per esaltare questa caratteristica sono state costruite due distinte distribuzioni dei valori di pioggia annuali: quella costituita dall'insieme degli anni successivi alle annate più secche e quella costituita dall'insieme degli anni che succedono alle annate più umide.

La loro distribuzione è mostrata in Fig. 14a; si osserva come un generico valore della pioggia annuale, successivo ad una annata magra, è minore di quello successivo ad una annata umida.

Lo stesso trattamento dei dati effettuato sui valori di portata sorgiva (Figg. 14b and 14c) mostra che il carattere riscontrato nella serie di piogge annuali è trasferito nella serie di portata sorgiva. In particolare, questo carattere appare essere amplificato per i valori di portata della sorgente di Caposele (Fig. 14b), che mostra le due distribuzioni più "spaziate" rispetto a quelle di Serino (Fig. 14c).

veals a tendency for dry years to "bunch" together. Similarly, wet years show a tendency to bunch together in what is known as the Joseph effect (MANDELBROT & WALLIS, 1968), which also appears to be present in the time series evaluated for this study. This characteristic indicates that the sequence of values of poor annual rainfall is not random (HUDSON & HAZEN, 1964).

To demonstrate this phenomenon, the highest and lowest values of annual effective rainfall were extracted from the series. Next, the years following each of these values were selected and arrayed in two groups. As shown in Fig. 14a, the annual rainfall following a year with poor annual rainfall tends to be lower than in the year following a wet year. When the same analysis was used to evaluate the annual mean spring discharges a similar trend appeared (Fig. 14b and 14c). This phenomenon seems to be amplified for the Caposele spring discharge series (Fig. 14b), where the distributions are more "spaced" than the Serino spring discharge series (Fig. 14c).

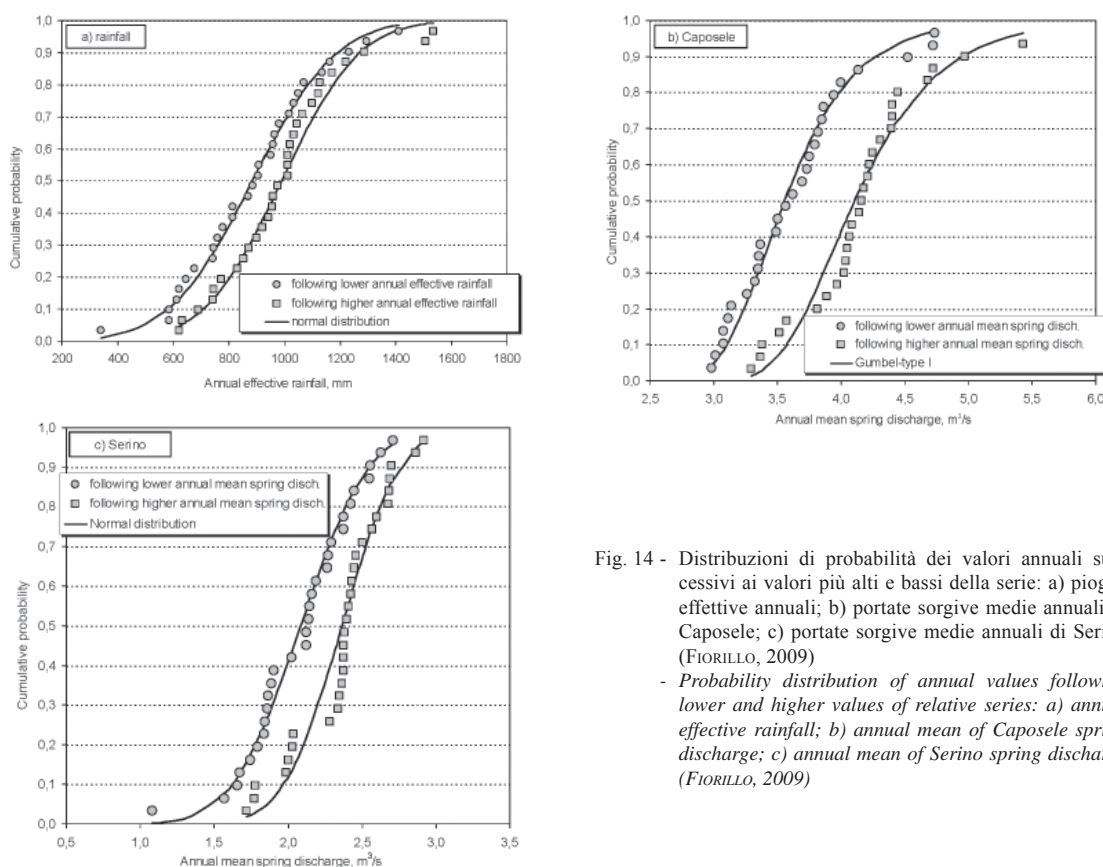


Fig. 14 - Distribuzioni di probabilità dei valori annuali successivi ai valori più alti e bassi della serie: a) piogge effettive annuali; b) portate sorgive medie annuali di Caposele; c) portate sorgive medie annuali di Serino (FIORILLO, 2009)
 - Probability distribution of annual values following lower and higher values of relative series: a) annual effective rainfall; b) annual mean of Caposele spring discharge; c) annual mean of Serino spring discharge (FIORILLO, 2009)

ANALISI A SCALA MENSILE

Di seguito si analizza la relazione piogge-portate all'interno di ciascun anno idrologico.

A causa dell'incremento dell'evapotraspirazione e del decremento delle piogge verso la stagione estiva, le piogge effettive dopo il mese di Aprile sono in genere trascurabili nel processo di ricarica. Pertanto, le piogge capaci di ricaricare il sistema carsico si verificano principalmente fino a marzo-aprile, mentre le piogge successive, fino a settembre-ottobre, generalmente non ricaricano l'acquifero.

Per esaltare il carattere mediterraneo dell'area, FIORILLO *et alii* (2007) hanno fatto uso del seguente indice di pioggia effettiva cumulata:

$$\Delta_i = (P_i - E_p) - (P_m - E_p) + \Delta_{(i-1)} \quad (1)$$

con P_i pioggia mensile; E_p evapotraspirazione potenziale mensile calcolata con il metodo di TORTHWAITE & MATHER (1957). La differenza $(P_m - E_p)$ è la pioggia effettiva media mensile e $\Delta_{(i-1)}$ è il valore assunto dall'indice nel mese precedente. Per pioggia minore dell'evapotraspirazione potenziale, le differenze nell'equazione assumono il valore zero. In pratica il computo inizia con il mese di agosto e termina con il mese di luglio. Pertanto, l'indice viene determinato per ciascun anno idrologico, durante il quale assume un carattere cumulativo e variabile: se la pioggia effettiva cumulata è minore della media, l'indice Δ_i è negativo e costituisce il deficit di pioggia effettiva rispetto al valore medio. Se la pioggia effettiva cumulata è maggiore della media, l'indice Δ_i è positivo e costituisce il surplus di pioggia rispetto alla media. A partire dalla primavera (marzo-aprile), per effetto del generale calo delle precipitazioni ed aumento delle temperature, l'indice tende a rimanere costante.

La Fig. 15a mostra l'andamento dell'indice Δ_i per alcune annate al pluviometro di Serino. L'asse destro delle ordinate riporta l'indice standardizzato per la deviazione standard (Δ_i/σ) che fornisce la probabilità di occorrenza, una utile indicazione circa la magnitudo della siccità. In Fig. 15b, sono state riportate le piogge effettive cumulate per

MONTHLY SCALE ANALYSIS

In this section, the relationship rainfall-spring discharge inside each hydrological year is investigated.

The combined effect of increasing evapotranspiration and decreasing rainfall towards the summer season results in the effective rainfall after April being negligible. Therefore the rainfall that occurs up to March-April of each hydrological year recharges karst aquifers, and subsequent rainfall, up to September-October, generally does not recharge the aquifers.

To highlight the characteristics of rainfall in a Mediterranean climate, FIORILLO *et alii* (2007) introduced the cumulative effective rainfall index:

where P_i is the monthly rainfall, P_m is the mean monthly rainfall and E_p is the monthly potential evapotranspiration; when $P < E$, $P - E = 0$ is fixed.

This index splits the cumulative effective rainfall into two primary groups: (i) negative values of Δ_i , which define the deficit of effective rainfall with respect to the mean, and (ii) positive values of Δ_i , which define the surplus of effective rainfall with respect to the mean. Fig. 15a shows the trend of the index Δ_i for some hydrological years, Serino rain gauge. The right-hand axis of Fig. 15a presents the index Δ_i standardised by the standard deviation, Δ_i/σ , which gives the relative (cumulative) probability. This value is a useful measure of the magnitude of a drought in terms of rainfall data. In Fig. 15b, the cumulative effective rainfall for some hydrological years have been plotted. The lower paths are associated with poor rainfall, which causes a weak rising or a continuous decreasing of spring discharge during the hydrological years. During these years, recharge is unable to exceed the discharge from the aquifer. This results in a poor aquifer response, which is reflected as a flat spring hydrograph. For the Caposele spring, these years have been delimited empirically by threshold lines, with values below $\Delta_i = -260$ mm producing flat hy-

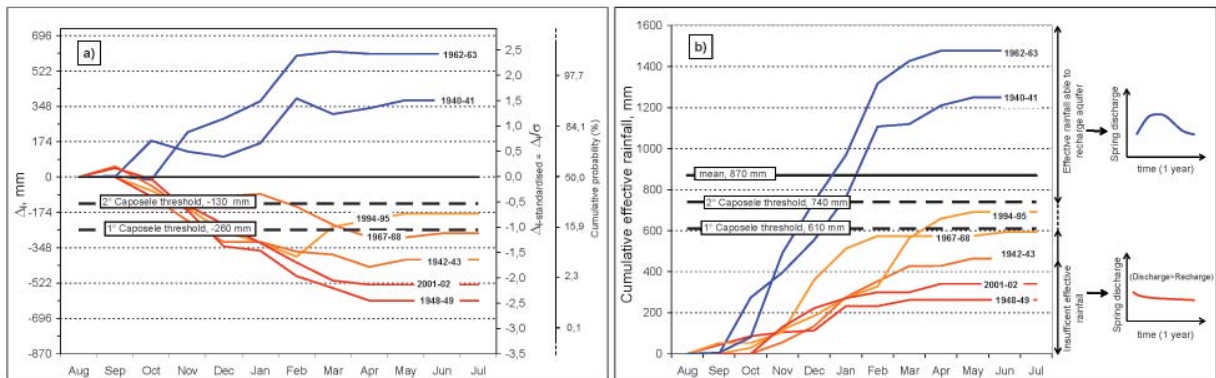


Fig. 15 - (a) Andamento dell'indice Δ_i per alcuni anni idrologici. Gli andamenti sotto le soglie danno luogo ad idrogrammi privi di colmo. L'asse destro è normalizzato con la deviazione standard, σ , e fornisce la probabilità cumulata per una distribuzione normale. (b) Andamento della pioggia cumulata per alcuni anni mostrati in Fig. 15a. Alla fine di ciascun anno, $P_{eff} = \sigma + 870$ mm
 - (a) Trend of the index Δ_i for some hydrological years. The path below the threshold limit results in flat spring hydrographs. The right-hand axis is normalised by the standard deviation, σ , and gives the cumulative probability for normal distribution. (b) trend of the cumulative effective rainfall for the same years shown in Fig. 15a. At the end of each hydrological year, $P_{eff} = \sigma + 870$ mm

Fig. 16 - Pioggia effettiva cumulata necessaria per superare le soglie della sorgente di Caposele definite in Fig. 15, per probabilità di 0.5 e 0.75. Sono riportate l'annata media e quelle siccitose del 1948-49 e 2001-2002 (FIORILLO, 2009)

- Cumulative effective rainfall required to exceed thresholds for the Caposele spring defined in Fig. 15 with a probability of 0.5 and 0.75. The paths corresponding to the annual mean and droughts of 1948-49 and 2001-02 are also shown (FIORILLO, 2009)

alcune annate mostrate in Fig. 15a. Bassi valori di pioggia cumulata determinano un blando picco di portata alle sorgenti o l'assenza dello stesso e continuo decremento delle portate per tutto l'anno idrologico. Durante le annate di magra la ricarica risulta insufficiente ed il sistema carsico fornisce nel complesso volumi in uscita (portate) superiori alle entrate (ricarica). Per la sorgente di Caposele, gli idrogrammi sorgivi di magra sono stati individuati da una soglia, $\Delta_i = -260$ mm, al di sotto della quale le scarse piogge cumulate causano idrogrammi decrescenti. Viceversa, gli idrogrammi con colmo sono stati individuati dalla soglia $\Delta_i = -130$ mm, al di sopra della quale le piogge cumulate sono capaci di causare un colmo di portata nella stagione primaverile.

Valori di $-260 < \Delta_i < -130$ mm producono idrogrammi dall'andamento incerto. Tuttavia, è stato osservato che se la pioggia dell'anno antecedente è stata sotto la media, il sistema carsico tende a produrre idrogrammi decrescenti, mentre se la pioggia dell'anno antecedente è stata sopra la media le sorgenti mostreranno un colmo di portata.

Per le sorgenti di Serino, la soglia è stata individuata sulla base degli unici idrogrammi decrescenti, quelli del 1948-49 e 2001-02 (FIORILLO *et alii*, 2007). In questo caso, essendo le sorgenti meno influenzate dalle condizioni idrologiche dell'anno antecedente, un'unica soglia pari a $\Delta_i = -420$ mm può essere utilizzata per differenziare gli idrogrammi con e senza colmo.

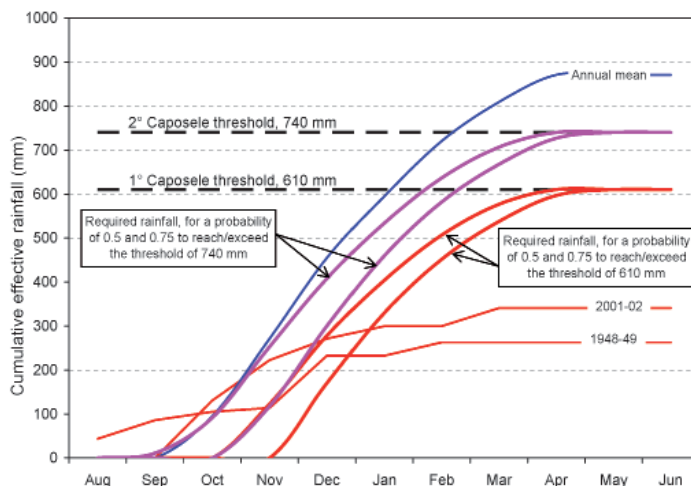
Il comportamento delle sorgenti di Cassano è simile a quello di Caposele; comunque la più corta serie di dati a disposizione non consente di individuare con la stessa cura le soglie, che non sono state riportate in Fig. 15.

La relazione tra pioggia e idrogramma sorgivo potrebbe essere migliorata attraverso un approccio a scala di bacino ed il supporto dei GIS, ma necessita di dati storici di stazioni in quota, non sempre disponibili.

PREVISIONE PROBABILISTICA DELLE PORTATE SORGIVE DURANTE I PERIODI SICCTOSI

Un idrogramma privo di colmo della sorgente di Caposele può essere considerato come un indicatore di siccità per l'intera area carsica dei Monti Picentini, come analizzato da FIORILLO (2009). Al fine di evitare un periodo siccitoso, la pioggia cumulata deve raggiungere o eccedere la soglia indicata in Fig. 16 (610 mm oppure 740 mm in funzione dell'annata antecedente).

Per le sorgenti considerate, lo sfasamento temporale che esiste tra gli input (le piogge) e gli output (le portate) dal sistema carsico, consente di prevedere un possibile idrogramma privo di colmo attraverso il monitoraggio della pioggia e temperature e calcolando la pioggia



drographs and values above the threshold of $\Delta_i = -130$ mm producing hydrographs that indicate flooding. In addition, values between -260 and -130 mm produce an uncertain type of hydrograph; however, it has been observed that if the annual rainfall of the previous years is below the mean the system tends to produce a flat hydrograph, whereas if the annual rainfall of the previous year is above the mean, the spring hydrograph will reflect flooding.

The threshold of the Serino springs, $\Delta_i = -420$ mm, was delimited using the droughts that occurred in 2001-02 and 1948-49 (FIORILLO *et alii*, 2007). Because the role of rainfall in previous years appears negligible for Serino springs, one threshold value can be used to differentiate between flooding and a flat hydrograph.

The behaviour of Cassano springs is similar to that of Caposele spring; however, the shorter hydrological series in this case does not allow these thresholds to be accurately determined, therefore they are not reported in the graph provided in Fig. 15.

Relationship between rainfall and spring discharge could be improved by a basin-scale approach and GIS support, but historical data of the high elevation station are needed, which are generally missing.

SPRING DISCHARGE FORECAST DURING DROUGHTS

A flat hydrograph produced by the Caposele spring can be considered to be an indicator of drought for the entire karst system of the Picentini mountain (FIORILLO, 2009). Thus, to avoid a drought, the cumulative rainfall has to reach or exceeds the threshold given in Fig. 16 (740 mm or 610 mm in function of the value of the previous year).

The shift between rainfall and aquifer response allows flat spring hydrographs to be forecast by monitoring rainfall, and then computing the amount of rainfall required to avoid a flat spring hydrograph (FIORILLO *et alii*, 2007; FIORILLO, 2009).

During any hydrological year, the expected rainfall up to the

richiesta per raggiungere/eccedere le suddette soglie.

Durante una qualsiasi annata, la pioggia attesa fino alla fine della stagione piovosa (Giugno) dipende dalla lunghezza del periodo considerato. Per una certa probabilità prefissata, questa quantità di pioggia cumulata diminuisce da settembre a giugno e può essere valutata attraverso una analisi idrologico-statistica.

In tal modo è possibile valutare la pioggia cumulata per diversi valori di probabilità prefissati (FIORILLO, 2009).

I quantitativi di pioggia corrispondenti ad una probabilità di 0.75 e 0.50, per raggiungere/superare le soglie della sorgente di Caposele (610 e 740 mm) sono riportate in Fig. 16. Più è elevata la probabilità e maggiori sono i quantitativi di pioggia richiesti. La pioggia effettiva media annuale raggiunge il valore di 870 mm in Aprile, dopodiché rimane costante.

Il diagramma può essere molto utile per prevedere la presenza o meno di un colmo di portata alle sorgenti, monitorando la pioggia e la temperatura e controllando che essa non sia minore di quella corrispondente ad una probabilità prefissata. Minore è il rischio che si intende accettare, maggiore deve essere la probabilità prefissata. Questo modello evidenzia come gli idrogrammi sorgivi decrescenti del 1949 e 2002 potevano essere previsti con largo anticipo, basandosi sulla pioggia caduta fino a gennaio, in quanto la probabilità della pioggia raggiungere/superare anche la soglia più bassa era minore di 0.5.

Queste procedure possono essere messe a punto per ogni specifico livello di probabilità, e appaiono utili per tutti quei sistemi caratterizzati da un ritardo delle portate rispetto alle piogge.

CONCLUSIONI

Il regime delle sorgenti carsiche analizzate appare strettamente connesso con quello climatico, controllato dalle condizioni idrogeologiche dell'acquifero. Gli idrogrammi sorgivi riflettono principalmente la pioggia cumulata dall'inizio dell'anno idrologico, e una stretta relazione esiste tra piogge annue e portata sorgiva media annua (Fig. 6).

Gli idrogrammi sorgivi privi di colmo marcano le annate siccitose. Durante tali annate, l'incremento delle portate sorgive atteso con l'autunno-inverno non si verifica e la portata diminuisce fino al successivo autunno. In questi anni lo scarico complessivo supera la ricarica causando una diminuzione dell'immagazzinamento; inoltre, il deficit di immagazzinamento riduce la portata durante il successivo anno idrologico. Pertanto, questo comportamento dell'acquifero indica un "effetto memoria" della antecedente annata siccitosa, più evidente per la più potenti sorgenti, come quella di Caposele.

A causa del continuo adattamento del volume immagazzinato nell'acquifero carbonatico ai trend climatici, due o più annate consecutive di piogge sotto i valori medi possono causare un progressivo svuotamento dell'acquifero; in questi casi, nonostante la pioggia annuale possa essere poco sotto i valori medi, l'idrogramma sorgivo potrà non presentare un colmo, proprio come verificatosi nel periodo 1987-1993.

Gli idrogrammi privi di colmo possono essere previsti fin dalla stagione invernale, fornendo un utile informazione per la gestione della risorsa acqua. Laddove sono disponibili lunghe serie storiche,

end of the rainy season (June) depends on the length of the considered period. For a fixed probability, this amount of cumulative rainfall diminishes over time (from September to June) and can be evaluated by statistical analysis of the historical series. In this way, it is possible to evaluate the cumulative rainfall for different fixed probability values (FIORILLO, 2009).

The cumulative rainfall required to reach the threshold defined for the Caposele spring (610 and 740 mm), with a probability of 0.75 and 0.5, has been plotted in Fig. 16. The higher the probability, the more the rainfall is required. The annual mean effective rainfall reaches 870 mm in April and then remains constant. Several years in which rainfall below the thresholds occurred were also plotted. This model revealed that the flat hydrographs observed in 1949 and 2002 could be predicted based on the amount of rainfall that had fallen up to January, because that level of rainfall reduced the probability of rainfall exceeding the threshold to less than 0.5.

These procedures can be performed at specific probability levels and appear to be suitable for any system characterized by a time lag between rainfall and spring discharge.

CONCLUSIONS

Karst spring regimes appear to be strictly connected to climate regime and controlled by the geological and hydrogeological features of the aquifer. Hydrographs of karst springs primarily reflect the amount of cumulative rainfall that has occurred from the beginning of the rainy season, and a strict correlation between annual rainfall and annual mean spring discharges exists. Flat spring hydrographs, with no flooding during the spring season, define droughts in the analysed karst environments.

During drought years, the expected increase in spring discharge in autumn does not occur and flow diminishes until the following autumn. As consequence, a deep aquifer emptying is produced, and the resulting deficit of storage reduces discharge during the following year. This aquifer behaviour indicates the presence of a memory effect, and appears to be higher for springs characterised by highest discharge, such as the Caposele spring.

Due to continuous adaptation of the water volume storage into the karst aquifer to the long term climate trend, two or more consecutive years with rainfall below the mean can cause a progressive emptying of the aquifers. In such cases, flat spring hydrographs are also produced, as occurred during the 1987-1993 period

Flat spring hydrographs can be forecast from the winter season, providing a useful tool for water management. In addition, if a long historical series is available, the analyses presented here may be ex-

le analisi qui effettuate appaiono estensibili anche ad altri acquiferi caratterizzati da idrogrammi sorgivi a prevalente flusso di base.

Le analisi effettuate sulla serie di piogge annuali mostrano che ogni anno idrologico appare dipendere dal precedente; in particolare, a causa del carattere ciclico della serie dei valori annuali di pioggia e del comportamento dell'acquifero descritto, le portate sorgive amplificano l'effetto indotto dalle scarse piogge.

Il trend negativo delle piogge annuali (BRUNETTI *et alii*, 2002; 2004) e positivo delle temperature, quest'ultimo registrato in quasi tutte le regioni del mondo, suggerisce che i quantitativi idrici immagazzinati negli acquiferi potrebbero diminuire; di conseguenza, i periodi siccitosi caratterizzati da idrogrammi privi di colmo potrebbero essere più frequenti che in passato.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano gli enti ARIN S.p.A. e Aquedotto Pugliese S.p.A. per la gentile concessione dei dati di portata sorgiva, il Settore Programmazione Interventi di Protezione Civile sul Territorio-Regione Campania per i dati termo-pluviometrici forniti.

OPERE CITATE / REFERENCES

- AQUINO S., ALLOCCA V., ESPOSITO L. & CELICO P. (2006) - *Risorse Idriche della provincia di Avellino*. Arti Grafiche Cinque s.r.l., Avellino. 120 pp.
- ATKINSON T.C. (1977) - *Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in Mendip Hills, Somerset (Great Britain)*. J. Hydrology; **35**: 93-100.
- BONACCI O. (1993) - *Karst spring hydrographs as indicators of karst aquifers*. Hydrological Sciences Journal; **38**: 51-62.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T. & NAVARRA A. (2002) - *Drought and extreme events in regional daily Italian precipitation series*. Int. J. CLIM; **22**: 543-558.
- BRUNETTI M., BUFFONI L., MANGIANTI F., MAUGERI M. & NANNI T., (2004) - *Temperature, precipitation and extreme events during last century in Italy*. Global and Planetary Change, **40**: 141-149.
- BUDETTA P., CELICO P., CORNIELLO A., DE RISO R., DUCCI D. & NICOTERA P. (1994) - *Carta Idrogeologica della Campania 1:200.000*. Proc. of IV Geoengineering Int. Congress "Soil and Groundwater Protection", 10-11 March, Torino-Italy, 565-585.
- BUFFONI L., BRUNETTI M., MANGIANTI F., MAUGERI M., MONTI F. & NANNI T. (2003) - *Ricostruzione del Clima Italiano negli ultimi 130 anni e scenari per il XXI secolo*. Workshop "CLIMAGRI - Cambiamenti Climatici e Agricoltura", January, 16th-17th 2003, Cagliari (Italy), 7-14.
- CALCATERRA D., DUCCI D. & SANTO A. (1992) - *Aspetti geomeccanici ed idrogeologici nel settore sud-orientale del M.te Terminio (Appennino Meridionale)*. Geologica Romana, Rome; **30**: 125-134.
- CAMBI C. & DRAGONI W. (2000) - *Groundwater, recharge variability and climatic changes: some consideration out of the modelling of an apenninic spring*. Hydrogeology; **4**: 11 - 25.
- CELICO F., PETRELLA M. & CELICO P. (2006) - *Hydrogeological behaviour of some fault zones in a carbonate aquifer of Southern Italy: an experimentally based model*. Terra Nova, **18** (5) : 308-313.
- CELICO P. (1978) - *Schema idrogeologico dell'Appennino carbonatico centro-meridionale*. Memorie e Note Istituto di Geologia Applicata, Napoli; **14**: 1-43.
- CELICO P. (1981) - *Relazioni tra l'idrodinamica sotterranea e terremoti in Irpinia (Campania)*. Rend. Soc. Geol. It., **4**: 103-108.
- CELICO P. & CIVITA M. (1976) - *Sulla tettonica del massiccio del Cervilto (Campania) e le implicazioni idrogeologiche ad essa connesse*. Boll. Soc. Natur., 85, Naples.
- CHEN Z., GRASBY S.E. & OSADETZ K.G. (2004) - *Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada*. J. Hydrology; **290**: 43-62.
- CIVITA M. (1969) - *Idrogeologia del massiccio del Terminio-Tuoro (Campania)*. Memorie e Note Istituto di Geologia Applicata, Università di Napoli, Italy.
- CIVITA M. (2005) - *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano. 794 pp.
- COPPOLA L., COTECCHIA V., LATTANZIO M., SALVEMINI A., TADOLINI T. & VENTRELLA NA (1989) - *Il gruppo di sorgenti di Cassano Irpino: regime idrologico ed analisi strutturale del bacino di alimentazione*. Geologia Applicata e Idrogeologia, **XXIV**: 227-260.
- COPPOLA L. & PESCATORE T. (1989) - *Lineamenti di neotettonica dei Monti Terminio-Tuoro, Cervialto, e Marzano (Appennino meridionale)*. Boll. Soc. Geol. It., 108, Rome.
- COTECCHIA V. & SALVEMINI A. (1981) - *Correlazione tra eventi sismici e variazioni di portate alle sorgenti di Caposele e Cassano Irpino, con particolare riferimento al sisma del 23 novembre 1980*. Geologia Applicata e Idrogeologia, **XVI**: 167-192.
- D'ARGENIO A., PESCATORE T. & SCANDONE P. (1973) - *Schema geologico dell'Appennino Meridionale (Campania e Lucania)*. Accademia Nazionale dei Lincei, Rome;

tendable to other aquifers that produce spring hydrographs characterised by a predominant slow flow component.

Annual scale analysis has shown that each hydrological year is connected to the preceding one. In particular, due to cyclic character of the annual rainfall values and to the "inertia" of the aquifer, spring discharges amplify the effects of the poor rainfall.

The role of the negative trend in annual rainfall in Italy (BRUNETTI *et alii*, 2002), together with the changing distribution of daily precipitation (BRUNETTI *et alii*, 2004) and positive trend of temperature recorded almost worldwide, suggest that future storage in the aquifers could diminish, and droughts characterised by a flat spring hydrograph could be more frequent than in the past.

ANALYSIS OF KARST SPRING DISCHARGES DURING DROUGHTS

183: 49-72.

- DE VITA P. & FABBROCINO S. (2005) - *L'oscillazione del Nord Atlantico e la variabilità pluriennale delle risorse idriche sotterranee negli acquiferi carbonatici dell'Italia meridionale*. *Giornale di Geologia Applicata*, **2**: 357-362.
- DRAGONI W & SUKHIIA BS (2008) - *Climate change and groundwater: a short review*. Geological Society, London, Special Publications 2008, **288**: 1-12.
- D. DUCCI & G. TRANFAGLIA (2008) - *Effects of climate change on groundwater resources in Campania (southern Italy)*. Geological Society, London, Special Publications 2008, vol. **288**: 25-38.
- ESPOSITO L. (2001) - *Delimitazione ragionata delle aree di salvaguardia delle sorgenti di Serino (Campania)*. *Geologia Tecnica ed Ambientale*, Rome **1**: 1-14.
- FIORILLO F. (2009) - *Spring hydrographs as indicators of droughts in karst environment*. *J. Hydrology*, 10.1016/j.jhydrol.2009.04.034 .
- FIORILLO F. & GUADAGNO F.M. (2010) - *Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI*. *Water Resources Management*, **24**: 1867-1884.
- FIORILLO F. & DOGLIONI A. (2010) - *The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy)*. *Hydrogeology J.*, **18**: 1881-1895.
- FIORILLO F., ESPOSITO L. & GUADAGNO F.M. (2007) - *Analyses and forecast of water resources in an ultra-centenarian spring discharge series from Serino (Southern Italy)*. *J. Hydrology*; **336**: 125- 138.
- FIORILLO F., ESPOSITO L. & VENTAFRIDA G. (2008) - *La previsione delle magre della sorgente Sanità di Caposele (AV), alimentante l'Acquedotto Pugliese*. Atti del convegno VII Giornata Mondiale dell'Acqua "La crisi dei sistemi idrici: approvvigionamento agro-industriale e civile", 22 marzo 2007, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma.
- FIORILLO F. & WILSON R.C. (2004) - *Rainfall induced debris flows in pyroclastic deposits, Campania (southern Italy)*. *Eng. Geology*; **75**: 263-289.
- GUNN J. (1986) - *A conceptual model for conduit flow dominated karst aquifers*. In "Karst water resources", GÜNAY G. & JOHNSON A.I. eds., Proc. Ankara Symp., July 1985, 587-596. IAHS Publ. n.161.
- HUDSON H.E. & HAZEN R. (1964) - *Droughts and low streamflow*. In "Handbook of Applied Hydrology", section 18; Ven Te Chow, editor-in-Chief; New York: McGraw-Hill Book Company.
- ISPRA (2009) - *Geological map of Italy, 1:50.000 scale, Foglio n. 450 "S. Angelo dei Lombardi"*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Roma.
- KERTESZ A. & MIKA J. (1999) - *Aridification-Climate Change in South-Eastern Europe*. *Phys.Chem.Earth (A)*; **24 (10)**: 913-920.
- LOAICIGA H.A., MAIDMENT D.R. & VALDES J.B. (2000) - *Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA*. *J. Hydrology*; **227**: 173-194.
- Ma T., Wang Y. & Guo Q. (2004). *Response of carbonate aquifer to climate change in northern China: a case study at the Shentou karst springs*. *J. Hydrology*; **297**: 274-284.
- MANDELBROT B.B. & WALLIS J.R. (1968) - *Noah, Joseph, and Operational Hydrology*. *Water Resources Research*, **4 (5)**: 909-918.
- McKEE T.B., DOESKEN N.J. & KLEIST J. (1993) - *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston; 179-184.
- PAROTTO M. & PRATURLON A. (2004) - *The southern Apennine Arc. Special Volume of the Italian Geological Society*, 32° Int. Geol. Conf., Florence, CRESCENTI U., D'OFFIZI S., MERLINO S., SACCHI L. eds; pp. 34-58.
- POLEMIO M & CASARANO D (2008) - *Climate change, drought and groundwater availability in Southern Italy*. Geological Society, London, Special Publications 2008, **288**: 39-51.
- SIMEONE V. (2001) - *Variazioni climatiche e rischi di depauperamento delle falde e di desertificazione in provincia di Taranto*. *Geologia Tecnica ed Ambientale*, **2**: 23-32.
- THORNTHWAITE C.W. & MATHER J.R. (1957) - *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Publication in climatology 10, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey.

Received July 2009 - Accepted January 2010