

# IDROGEOLOGIA DELLA MEDIA VALLE DEL FIUME VELINO E DELLA PIANA DI S.VITTORINO (RIETI, ITALIA CENTRALE)

## HYDROGEOLOGY OF THE MIDDLE VALLEY OF THE VELINO RIVER AND OF THE S. VITTORINO PLAIN (RIETI, CENTRAL ITALY)

MARCO PETITTA<sup>(\*)</sup>

(\*) Università degli Studi di Roma La Sapienza - Dipartimento di Scienze della Terra - Rome, Italy  
e-mail: marco.petitta@uniroma1.it

### RIASSUNTO

Nel lavoro vengono esposti i risultati di indagini idrogeologiche eseguite tra il 1986 e il 2008 nella media valle del Fiume Velino e nella Piana di S.Vittorino, sede di sorgenti puntuali e lineari per una portata media complessiva superiore ai 26 m<sup>3</sup>/s. Attraverso misure di portata su sorgenti e corsi d'acqua, caratterizzazione chimico-fisica delle acque, analisi idrochimica degli ioni maggiori, rilievi e monitoraggi piezometrici, è stato aggiornato il quadro conoscitivo dei diversi gruppi sorgivi, valutandone la portata di magra ordinaria e quella di magra assoluta, corrispondente a periodi particolarmente siccitosi (1990 e 2008). La variabilità della portata dei singoli gruppi sorgivi a scala pluriennale risulta correlata alla quota di emergenza delle sorgenti. Viene inoltre proposto un modello concettuale della circolazione idrica sotterranea, aggiornato e affinato rispetto alle conoscenze precedenti, che evidenzia come, oltre agli acquiferi carbonatici fratturati che alimentano la falda regionale del sistema idrogeologico dei M.ti Giano-Nuria-Velino, per il recapito della risorsa idrica sotterranea siano fondamentali il ruolo dell'unità idrogeologica M.Paterno-Canetra, attraverso cui avviene un'aliquota significativa del deflusso sotterraneo, e soprattutto quello dell'acquifero multifalda della piana intramontana quaternaria di S.Vittorino, sede di miscelazione tra le acque del circuito carbonatico e fluidi prevalentemente gassosi risalenti dalle principali discontinuità.

**TERMINI CHIAVE:** sorgenti, sorgenti lineari, piane intramontane, miscelazione di circuiti idrici sotterranei, Appennino Centrale

### INTRODUZIONE

La circolazione idrica sotterranea nell'Appennino centrale carbonatico è caratterizzata da estese aree di ricarica corrispondenti alle principali dorsali, dotate di elevata permeabilità per fratturazione e carsismo, in grado quindi di immagazzinare una cospicua aliquota delle precipitazioni, raggiungendo valori di infiltrazione efficace prossimi ai 1000 mm/anno nei rilievi della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese, a fronte di ruscellamento trascurabile (BONI *et alii*, 1986). La fase di ricarica degli acquiferi fratturati è ampiamente condizionata dallo sviluppo del carsismo epigeo e ipogeo, che consente una rapida infiltrazione verso la zona satura.

### ABSTRACT

This paper deals with findings from hydrogeological investigations, which were conducted in the middle valley of the Velino River and in the S. Vittorino Plain from 1986 to 2008. These areas hold linear and localised springs with a total average discharge of over 26 m<sup>3</sup>/s. Measurements of stream and spring discharge, physico-chemical characterisation of waters, hydrochemical analysis of major ions, piezometric and monitoring surveys permitted to update the understanding of the various groups of springs and assess their normal base-flow and their absolute base-flow discharge in particularly dry periods (1990 and 2008). The multi-year variability of discharge from the individual groups of springs proved to be correlated with spring elevation. The paper also proposes a conceptual model of groundwater flow, updated and fine-tuned with respect to previous models. Under the model, the key factors controlling the points of discharge of groundwater are: i) the fractured carbonate aquifers supplying the regional groundwater of the Giano-Nuria-Velino Mts. hydrogeological system; ii) the Mt. Paterno-Canetra hydrogeological unit, through which a substantial portion of groundwater flows and, above all, iii) the multi-layered aquifer of the Quaternary intramontane plain of S. Vittorino, where carbonate groundwater mixes with dominantly gaseous deep fluids rising from the main discontinuities.

**KEY WORDS:** springs, linear springs, intramontane plains, groundwater mixing, central Apennines

### INTRODUCTION

In the carbonate central Apennines, groundwater is supplied by wide recharge areas. These areas, which correspond to the main ridges, are highly permeable due to fracturing and karst processes. Therefore, they can store a sizeable proportion of precipitation, reaching effective infiltration values close to 1,000 mm/yr in the reliefs of the Latium-Abruzzi carbonate platform vs. negligible runoff (BONI *et alii*, 1986). Recharge of the fractured aquifers is largely affected by epigean and hypogean karst forms, which facilitate and accelerate infiltration towards the saturated zone.

Subsurface water flows at fast pace through karst conduits and

Il flusso sotterraneo, caratterizzato da velocità differenti, elevate nei reticoli carsici e nella rete fessurativa e più lente nel reticolo di microfrazioni (ADINOLFI FALCONE *et alii*, 2008), si dirige con gradienti idraulici molto bassi, dell'ordine dello 0.5-1%, verso la periferia delle idrostrutture, in corrispondenza dei limiti di permeabilità posti alla base dei rilievi, dove si verifica, generalmente per motivi tettonici distensivi e/o compressivi, il contatto con litotipi meno permeabili. Questi ultimi sono rappresentati dai sedimenti flyschoidi sinorogenici e dai depositi plio-quadernari di riempimento delle piane intramontane o delle valli fluviali. Mentre i primi svolgono un ruolo di acquicludde, quali limiti a flusso nullo, il rapporto con i sedimenti neogenici continentali risulta più complesso dal punto di vista idrogeologico.

Il ruolo svolto dai depositi alluvionali di riempimento dei bacini intramontani e delle valli fluviali può essere schematizzato in due funzioni principali:

- al contatto con gli acquiferi carbonatici si verifica un limite di permeabilità che ostacola la comunicazione idraulica sotterranea, determinando la presenza di sorgenti basali degli acquiferi regionali; al contempo, l'eterogeneità granulometrica, le eteropie e le interdigitazioni dei depositi recenti, costituiti anche da livelli e strati aventi buona permeabilità (quali detriti e brecce di pendio, conoidi, sabbie e ghiaie fluviali e anche travertini), determina in molte occasioni un travaso idrico sotterraneo dall'acquifero carbonatico, la cui entità può essere significativa; in tal modo, i depositi clastici continentali vengono a rappresentare un acquifero multifalda, sede di circolazione idrica attiva alimentata dai contigui acquiferi carbonatici; il recapito finale di queste acque può essere rappresentato dai corsi d'acqua superficiali, attraverso drenaggio in alveo che determina la presenza di sorgenti lineari, oppure da fronti sorgivi localizzati in corrispondenza dei contatti affioranti tra litologie a diversa permeabilità;
- allo stesso tempo, la recente evoluzione delle aree interne appenniniche, che in funzione della tettonica distensiva ha provocato e ancora oggi determina la rapida deposizione di sequenze deposizionali continentali di spessore elevato (CAVINATO & DE CELLES, 1999), influenza la circolazione idrica sotterranea dei circostanti acquiferi carbonatici fratturati, impedendo o comunque rendendo difficoltoso lo sviluppo di un reticolo carsico evoluto nelle aree di emergenza della falda regionale; infatti, il tasso di sedimentazione, unito all'attività tettonica, tende a variare il livello di base dell'acquifero fratturato, contrariamente a quanto accade di norma nelle regioni carsiche; ne consegue che negli acquiferi carbonatici appenninici il flusso idrico sotterraneo si concentra verso le sorgenti senza presentare una risposta impulsiva al regime stagionale della ricarica, fornendo un'eccezionale stabilità al regime sorgentizio, con portate elevate e costanti.

Inoltre, poiché i limiti di permeabilità tra acquiferi alluvionali recenti e acquiferi carbonatici fratturati sono spesso rappresentati da faglie e sovrascorrimenti in aree ancora tettonicamente attive, le caratteristiche delle acque di falda subiscono spesso variazioni chimico-fisi-

fissure and at slower pace through microfractures (ADINOLFI FALCONE *et alii*, 2008). It moves at very low hydraulic gradients (in the range of 0.5-1%) towards the periphery of aquifers and reaches the permeability boundaries at the foot of the reliefs. Here, it comes into contact with lithotypes that are less permeable, generally as a result of extensional or compressional tectonic features. These lithotypes are made up of synorogenic flyschoid sediments and of Plio-Quaternary deposits, which fill the intramontane plains or fluvial valleys. While the flyschoid sediments (no-flow boundaries) act as aquicludes, the continental deposits have a much more complex hydrogeological relationship with the main carbonate aquifers.

The deposits filling the intramontane basins and the fluvial valleys play a twofold role, which is outlined below:

- At the contact with the carbonate aquifers, these deposits act as a permeability boundary, preventing underground hydraulic communication and giving rise to the basal springs of the regional groundwater. At the same time, grain size heterogeneity, heteropies and interdigitations of recent deposits, which may hold well-permeable levels and layers (e.g. talus debris and breccias, debris cones, fluvial sands and gravels and also travertines), are often responsible for groundwater seepages (even significant) from the carbonate aquifers. In this way, the clastic continental deposits form a multi-layered aquifer with active flow of groundwater, supplied by the adjacent carbonate aquifers. The final discharge areas may be surface streams - via drainage to the streambed giving rise to linear springs - or localised springs near outcrops of contacts between lithotypes of different permeability.
- The recent evolution of internal Apennine areas, associated with extensional tectonic movements, has been causing the fast deposition of very thick continental depositional sequences (CAVINATO & DE CELLES, 1999), affecting groundwater flow in the surrounding fractured carbonate aquifers and hindering the development of an evolved karst network in the spring areas of the regional aquifer. Indeed, sedimentation rate and tectonic activity tend to alter the base level of the fractured aquifer, contrary to what usually happens in karst regions. It follows that, in Apennine carbonate aquifers, groundwater flow is concentrated towards springs, without having an impulsive response to seasonal recharge and making spring discharge outstandingly high and steady.

The permeability boundaries between the recent alluvial aquifers and the fractured carbonate aquifers are represented by faults and thrust faults in still tectonically active areas. Consequently, groundwater often undergoes physico-chemical changes, which are due to the local upward movement of mineralising fluids (dominantly gaseous). Groundwater from the carbonate massifs is subject to these physico-chemical changes upon its movement towards the recent alluvial aquifers. Here, mixing with deep fluids causes groundwater to take on different hydrochemical characteristics. These physico-chemical changes may be progressive or fast and localised, depend-

che dovute alla locale risalita di fluidi prevalentemente gassosi mineralizzanti. Le acque sotterranee provenienti dai massicci carbonatici vengono modificate nella zona di travaso verso gli acquiferi alluvionali recenti, dove per l'influsso dei fluidi profondi si registrano caratteristiche idrochimiche differenti, attraverso miscelazione dei diversi circuiti sotterranei, che determinano variazioni chimico-fisiche graduali oppure repentine e localizzate, in funzione dell'interazione tra l'assetto tettonico e la successione stratigrafica di riempimento delle conche.

In definitiva, le conche e le valli intramontane mostrano caratteristiche idrogeologiche peculiari, in cui i circostanti acquiferi carbonatici ad elevata potenzialità idrica alimentano gruppi sorgivi aventi elevata portata e regime stabile, la cui localizzazione e caratteristiche idrochimiche risultano variabili a seconda dell'effetto della tettonica locale e del grado di permeabilità dei complessi idrogeologici alluvionali e clastici continentali che colmano le depressioni vallive.

La media valle del Fiume Velino e la Piana di S. Vittorino in particolare, ubicate nel Lazio Nord-orientale in provincia di Rieti, rappresentano l'espressione tipica dell'assetto idrogeologico sopra descritto, anche per l'elevatissimo contributo sorgivo, prossimo ai 30 m<sup>3</sup>/s, che emerge in un'area limitatamente estesa. In tal senso, la zona risulta di particolare interesse, nel panorama degli acquiferi carbonatici fratturati e carsici dell'area mediterranea, in cui la tettonica recente gioca un ruolo fondamentale per l'assetto idrogeologico e conseguentemente per la distribuzione della risorsa idrica.

In questo lavoro vengono riassunti i risultati degli studi idrogeologici condotti in questo settore appenninico dal 1986 al 2008, relativi alla misurazione delle portate sorgive e fluviali, delle caratteristiche chimico-fisiche e chimiche delle acque sotterranee e al monitoraggio della superficie piezometrica. Al lavoro viene allegata una precedente carta idrogeologica della Valle del Velino, mai corredata da alcuna nota illustrativa, che riassume i dati raccolti nel periodo 1986-1993 (BONI *et alii*, 1995).

## ASSETTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

L'area di indagine comprende la media valle del fiume Velino, tra Antrodoto e Cittaducale, che include la Piana di S. Vittorino, un'area morfologicamente depressa, identificabile come una conca intramontana, delle dimensioni di circa 4 chilometri di lunghezza per circa 2 chilometri di larghezza, allungata in direzione E-W, compresa tra le quote di fondovalle di 425 e 400 m s.l.m. La valle è bordata dalle catene montuose del Terminillo e dei Monti Reatini in sponda destra del Velino, e quella del M. Giano-M. Nuria a est in sinistra idrografica.

L'area è ubicata nel settore d'incontro tra l'Appennino carbonatico laziale-abruzzese, rappresentato dalla dorsale M. Nuria-M. Giano, e il dominio umbro-marchigiano-sabino, rappresentato dal gruppo montuoso del Terminillo (Fig. 1). I due diversi ambienti geologici sono posti a contatto dalla linea tettonica nota come Olevano-Antrodoto (Ancona-Anzio *auct.*; ACCORDI & CARBONE, 1988; PAROTTO & PRATURLON, 1975), connessa alla tettonica compressiva tardo-miocenica. Lungo questa direttrice l'attività tettonica si sarebbe

ing on the interaction between the tectonic setting and the stratigraphic sequence filling the basins.

Ultimately, the intramontane basins and valleys have distinctive hydrogeological characteristics, where: i) the surrounding carbonate aquifers (with high groundwater potential) supply high- and constant-discharge spring groups, and ii) the location and hydrochemical characteristics of the waters from these spring groups are variable, depending on local tectonics and permeability of the continental clastic and alluvial hydrogeological complexes which fill the valley depressions.

The middle valley of the Velino River and, namely, the S. Vittorino Plain (north-eastern Latium, province of Rieti) are typical of the above-described geological setting. Indeed, their springs, concentrated in a small area, have a high discharge (close to 30 m<sup>3</sup>/s). In this framework, the study area is significantly representative of carbonate fractured aquifers in the Mediterranean area, where recent tectonic directly influences hydrogeological setting and groundwater resource distribution.

The paper summarises the results of hydrogeological studies (measurement of spring and fluvial discharge, physico-chemical and chemical characterisation of groundwater and monitoring of its piezometric surface) conducted in this sector of the Apennines from 1986 to 2008. This volume includes a previously edited hydrogeological map never distributed with explanation notes, resuming results of 1986-93 period (BONI *et alii*, 1995).

## GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL SETTING

The investigated area is the middle valley of the Velino River (between Antrodoto and Cittaducale), which includes the S. Vittorino Plain. This plain is an E-W-elongated, morphologically depressed area, which may be defined as an intramontane basin. It has a length of about 4 km and a width of about 2 km. It lies on the valley floor at an elevation of 425-400 m above sea level (a.s.l.). The valley is bordered by the Terminillo and Reatini mountain chains on the right bank of the Velino River and by the Giano-Nuria mountain chain towards East on its left bank.

The area is at the meeting point between the Latium-Abruzzi carbonate Apennines (Mt. Nuria-Mt. Giano ridge) and the Umbria-Marches-Sabina domain (Mt. Terminillo ridge) (Fig. 1). The two different geological environments are put in contact with each other by the tectonic line known as Olevano-Antrodoto (Ancona-Anzio *auct.*; ACCORDI & CARBONE, 1988; PAROTTO & PRATURLON, 1975), which originates from compressional tectonic movements in the late

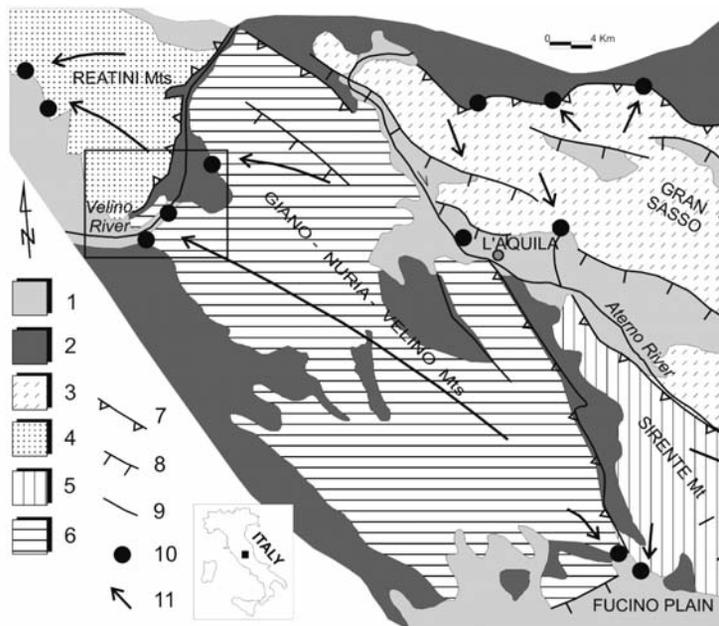


Fig. 1 - Schema idrogeologico regionale. 1) Depositi quaternari; 2) Depositi sinorogenici; 3) Idrostruttura del Gran Sasso; 4) Idrostruttura del M.Sirente; 5) Idrostruttura dei Monti giano-Nuria-Velino; 6) Idrostruttura dei Monti Reatini (M.Terminillo); 7) Sovrascorrimenti; 8) Faglie dirette; 9) Faglie; 10) Principali sorgenti; 11) Direttrici di deflusso idrico sotterraneo. Il riquadro identifica l'area di studio  
 - Regional hydrogeological scheme. 1) Quaternary deposits; 2) Sinorogenic deposits; 3) Gran Sasso Hydrogeological Unit; 4) Sirente Mt. Hydrogeological Unit; 5) Giano-Nuria-Velino Mts. Hydrogeological unit; 6) Reatini Mts. Hydrogeological Unit (Terminillo M.); 7) Thrusts; 8) Extensional faults; 9) Faults; 10) Main springs; 11) Main groundwater flowpaths. The square shows the study area

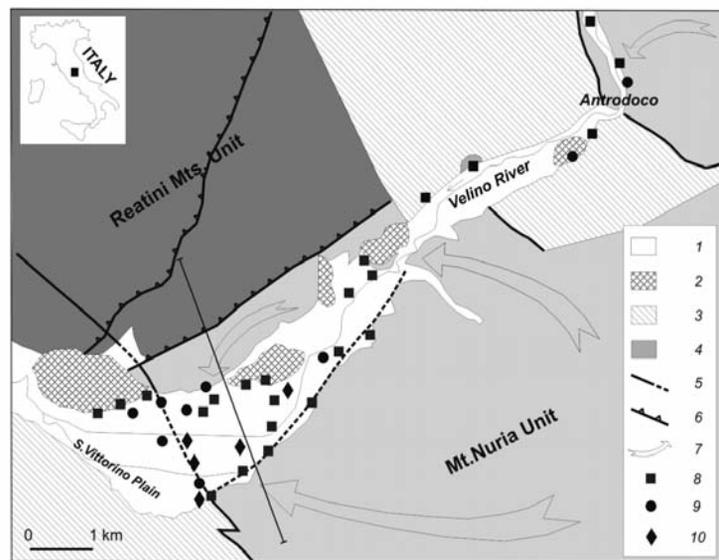


Fig. 2 - Assetto geologico e idrogeologico della zona di studio. 1) Depositi quaternari della Valle del Velino e della Piana di S.Vittorino; 2) Travertini; 3) Depositi sinorogenici a bassa permeabilità; 4) Substrato carbonatico, suddiviso tra l'Unità Idrogeologica dei Monti Reatini (più scuro) e quella del M.Nuria (più chiaro), che include il settore di Canetra-M.Paterno; 5) Principali faglie, sepolte ove tratteggiate; 6) Principali sovrascorrimenti; 7) Principali direttrici di deflusso idrico sotterraneo; 8) Principali sorgenti alimentate dall'acquifero carbonatico; 9) Principali sorgenti mineralizzate; 10) Principali sinkholes. La traccia della sezione si riferisce a Fig. 3  
 - Geological and hydrogeological setting of the study area. 1) Quaternary deposits of Velino Valley and S.Vittorino Plain; 2) Travertines; 3) Flysch acting as aquiclude; 4) Carbonate aquifer; Hydrogeological Unit of M.Nuria, including Canetra-M.Paterno Unit, is in light grey, while Hydrogeological Unit of Reatini Mts. is in dark grey; 5) Main faults, in dashed line where buried; 6) Thrusts; 7) Main groundwater flowpaths; 8) Main springs feeding the carbonate aquifer; 9) Main mineralized springs; 10) Main sinkholes. Section line refers to Fig. 3

svilupata anche in epoche precedenti, durante il processo di separazione del dominio neritico carbonatico dal dominio pelagico (CASTELLARIN *et alii*, 1978).

Nel settore di Antrodoco (Fig. 2), alla base del M.Giano, l'incisione delle Gole del Fiume Velino interessa il basamento affiorante della serie carbonatica di piattaforma, costituito dalle dolomie triassiche e dai calcari dolomitici liassici. Tra Antrodoco e Canetra affiorano i flysch miocenici, depositatisi in una paleodepressione inglobata tra le dorsali in emersione durante la fase orogenetica. All'altezza di Canetra la valle si stringe nuovamente e il corso del fiume incide nuovamente per un breve tratto la successione carbonatica.

L'orogenesi ha prodotto una struttura ad unità tettoniche sovrapposte, che caratterizzano lo sviluppo dell'elemento tettonico

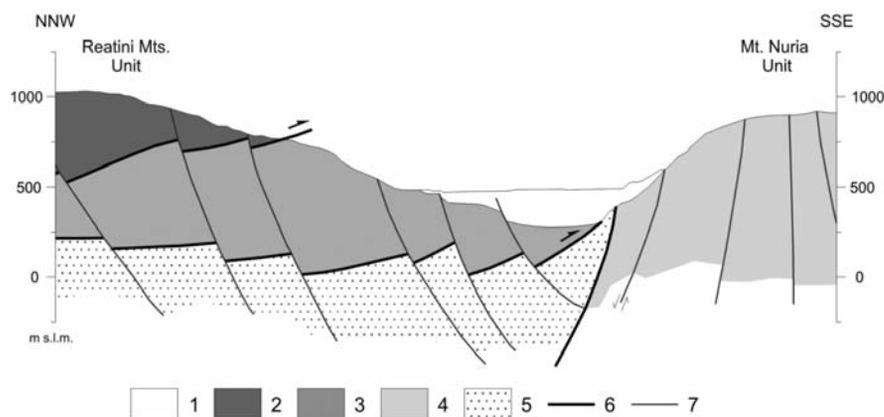
Miocene. Along this line, tectonic activity must have occurred even in recent times, upon separation of the carbonate neritic domain from the pelagic one (CASTELLARIN *et alii*, 1978).

At Antrodoco (at the foot of Mt. Giano) (Fig. 2), the Velino River Gorges cut the outcropping basement of the carbonate platform series, which consists of Triassic dolomites and Liassic dolomitic limestones. Between Antrodoco and Canetra are outcrops of Miocene flysch. The flysch testifies a paleodepression embedded in the emerging ridges during the orogenetic activity. At Canetra, the valley narrows again and the river cuts a short portion of the carbonate sequence again.

Orogenesis produced a structure with superimposed tectonic units, which is typical of the above-mentioned Olevano-Antrodoco

Fig. 3 - Sezione geologica-idrogeologica (modificata da CENTAMORE *et alii*, 2009) attraverso la Piana di S. Vittorino. La traccia della sezione è in Fig. 2. 1) Depositi della Piana di S. Vittorino; 2) Unità tettonica dei M. Reatini-M. Terminillo; 3) Unità tettonica di Canetra-M. Paterno; 4) Unità del M. Nuria; 5) Unità tettonica dei depositi sine pre-orogenici; 6) Sovrascorrimenti principali; 7) Faglie principali

- Geological and hydrogeological section along S. Vittorino Plain (modified from CENTAMORE *et alii*, 2009). Location of the section is shown in Fig. 2. 1) S. Vittorino plain deposits; 2) Mt. Reatini-Mt. Terminillo tectonic unit; 3) Canetra-Paterno tectonic unit; 4) Mt. Nuria tectonic unit; 5) Flysch and pre-orogenetic tectonic unit; 6) Main thrusts; 7) Main faults



Olevano-Antrodoco sopra citato; questa struttura risulta evidente procedendo dal M. Terminillo sul versante sudorientale verso il M. Paterno, fino al contatto con la piana di S. Vittorino (Fig. 3). Lungo il versante del M. Paterno si rinvergono infatti, separate da elementi tettonici compressivi e dislocati da elementi tettonici distensivi, le seguenti unità tettoniche (CAPOTORTI *et alii*, 1995; CENTAMORE *et alii*, 2009; CIOTOLI *et alii*, 2001):

- Unità umbro-marchigiana-sabina di M. Paterno, costituita dalla successione Corniola, Calcari e Marne del Sentino, Scaglia Rossa, Scaglia Cinerea, che appare ampiamente sovrascorsa sia sull'Unità M. Navegna-M. S. Angelo-Micciani sia sull'Unità M. Nuria;
- Unità M. Navegna-M. S. Angelo-Micciani, costituita dal basso verso l'alto da Calcari a Radiolitidi del Cretacico superiore e le formazioni mioceniche: Calcareniti arancioni, Calcareniti a punti rossi, Unità calcareo-marnosa, Marne a Orbulina, Arenarie della Valle del Salto, che appare sovrapposta all'Unità inferiore;
- Unità M. Nuria, più esterna, costituita prevalentemente da facies carbonatiche di piattaforma.

Il thrust basale dell'Unità di M. Paterno, che rappresenta un tratto della linea Olevano-Antrodoco, affiora a N della piana di S. Vittorino (CENTAMORE *et alii*, 2004). Nell'hanging-wall del sovrascorrimento affiorano la Scaglia Rossa e la Scaglia Cinerea in successione rovesciata. Il foot-wall della linea Olevano-Antrodoco è rappresentato dall'Unità di M. Navegna-M. S. Angelo-Micciani; lungo il versante si individuano due o tre sovrascorrimenti minori a basso angolo, con andamento pressoché parallelo a quello del soprastante thrust principale (Fig. 3).

Alle fasi compressive fanno seguito più recenti fasi distensive. L'evoluzione pleistocenica dell'area ha determinato il ribassamento dei carbonati meso-cenozoici nell'area di S. Vittorino, attraverso fasi tettoniche a componente prevalentemente distensiva (FACCENNA *et alii*, 1993), con conseguente riempimento del settore depresso da parte di sedimenti alluvionali, fluvio-lacustri e provenienti dai versanti in rapida erosione. Gli stessi versanti vengono interessati da detensionamenti e deformazioni gravitative profonde (MARTINO *et alii*, 2004), connessi alla circolazione idrica sotterranea negli ammassi fratturati e carsificati (CASINI *et alii*, 2006). La coltre di sedimenti

tettonico line. This structure is visible from the south-eastern side of Mt. Terminillo towards Mt. Paterno, as far as its contact with the S. Vittorino Plain (Fig. 3). Indeed, the Mt. Paterno slopes have evidence of the following tectonic units, which are separated by compressional tectonic features and dislocated by extensional tectonic ones (CAPOTORTI *et alii*, 1995; CENTAMORE *et alii*, 2009; CIOTOLI *et alii*, 2001):

- Umbria-Marches-Sabina Mt. Paterno Unit, including the Corniola, Calcari and Marne del Sentino, Scaglia Rossa and Scaglia Cinerea Units; this unit is largely thrust over the Mt. Navegna-Mt. S. Angelo-Micciani Unit and over the Mt. Nuria one;
- Mt. Navegna-Mt. S. Angelo-Micciani Unit, including (from top down) the Calcari a Radiolitidi, Calcareniti arancioni, Calcareniti a punti rossi, Unità calcareo-marnosa, Marne a Orbulina, Arenarie della Valle del Salto Units; this unit appears to have been thrust over the lower one;
- Mt. Nuria Unit, more external and dominantly consisting of carbonate platform facies.

The basal thrust of the Mt. Paterno Unit, which is one portion of the Olevano-Antrodoco line, is exposed N of the S. Vittorino Plain (CENTAMORE *et alii*, 2004). The Scaglia Rossa and Scaglia Cinerea Units outcrop in reverse sequence in the hanging-wall of the thrust fault. The foot-wall of the Olevano-Antrodoco line is represented by the Mt. Navegna-Mt. S. Angelo-Micciani Unit. Along the slope, two or three minor low-angle thrust faults, nearly parallel to the overlying main thrust fault, may be observed (Fig. 3).

Compressional features are followed by more recent extensional ones. Evolution of the area in the Pleistocene dethrew the Mesozoic carbonates of S. Vittorino via prevalently extensional tectonic processes (FACCENNA *et alii*, 1993). These processes caused the sediments (alluvial, fluvio-lacustrine and from slopes being rapidly eroded) to fill the depressed sector. The slopes experienced stress relief and deep-seated gravitational deformations (MARTINO *et alii*, 2004), associated with groundwater flow within the fractured and karstified rock masses (CASINI *et alii*, 2006). The poorly- or non-cemented sediment cover, overlain by the present Velino River deposits, has variable thickness: minimum along the northern and

recenti scarsamente o affatto cementata, cui si sovrappongono i depositi attuali del fiume Velino, presenta uno spessore variabile, minimo lungo i margini settentrionale e sud-orientale della piana e più elevato verso il centro della depressione. Da prospezioni geofisiche lo spessore massimo dei sedimenti è stato valutato nell'ordine dei 200 m (FACCENNA *et alii*, 1993). Il bedrock è costituito da carbonati del dominio di piattaforma (Fig. 3), anche se nessun sondaggio diretto ha mai raggiunto il tetto dei carbonati al centro della piana.

L'area, oltre a presentare un elevato grado di sismicità, testimonia anche da recentissimi terremoti di medio grado, presenta una tettonica attiva molto evidente, i cui caratteri principali evidenziano il proseguimento di linee tettoniche regionali anche all'interno della piana, secondo direzioni tipiche dell'evoluzione appenninica (FACCENNA *et alii*, 1993). Queste discontinuità, evidenziate da varie metodologie di prospezione, assumono direzioni prevalenti NW-SE e E-W e rappresentano spesso le linee lungo le quali risalgono i fluidi gassosi profondi le cui manifestazioni sono evidenti nella piana (CIOTOLI *et alii*, 2001; PETITTA *et alii*, 2003; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2004).

Elemento distensivo di notevole importanza è rappresentato dalla faglia di Fiamignano a direzione N30°W con immersione SW (CENTAMORE *et alii*, 2009), che nel suo segmento più settentrionale è nota localmente come faglia di Micciani. In corrispondenza di questa faglia vengono messi a contatto i carbonati del M.Nuria con un lembo di flysch miocenico, a cui si appoggiano i depositi pleistocenici più antichi. La faglia attraversa probabilmente la valle del Velino e continua più a N, bordando il versante occidentale del M. Terminillo. Nella piana di S. Vittorino il prolungamento settentrionale della faglia sembra localizzato lungo l'allineamento Lago di Micciani-Lago Nuovo-Lago Tornariccio-S. Vittorino (Fig. 2).

Sul versante meridionale della valle, oltre la faglia affiorano sedimenti fluvio-lacustri pleistocenici di riempimento che caratterizzano il vicino bacino di Rieti e della Valle del Salto (BARBERI & CAVINATO, 1993). Sono distinguibili due unità: la più antica è Villafranchiana, caratterizzata principalmente da conglomerati di spessore complessivo di circa 300-350 m. Quella più recente, Post-Villafranchiana, presenta alternanze di conglomerati e depositi argillosi, di origine fluviale e lacustre, con presenza di livelli torbosi e lenti di travertino.

I travertini affiorano diffusamente al bordo della Piana di S. Vittorino, intorno all'abitato di Caporio e nell'area dell'abitato di Vasche e del Lago di Paterno; lungo la valle sul versante destro sono presenti diversi ordini di terrazzi fluviali, caratterizzati dalla presenza di travertini (CARRARA *et alii*, 1992; SOLIGO *et alii*, 2002); in particolare, nell'area di Canetra è ben riconoscibile un terrazzo posto diverse decine di metri in alto rispetto all'attuale corso del Fiume Velino.

Nel sottosuolo della Piana di S. Vittorino sono presenti sequenze fluviali e lacustri del Fiume Velino fino all'attuale. Il sottosuolo della piana presenta numerose eteropie laterali e verticali dei depositi clastici; la stratigrafia non è conosciuta con sufficiente dettaglio, a meno di aree specifiche dove sono stati eseguiti sondaggi e prospezioni, a diverso titolo e in diversi tempi. Il substrato carbonatico viene ribas-

south-eastern margins of the plain and thicker towards the centre of the depression. Geophysical prospecting indicated that the maximum thickness of the sediments is in the range of 200 m (FACCENNA *et alii*, 1993). The bedrock is composed of platform-domain carbonates (Fig. 2), although no direct borehole has ever reached the roof of the carbonates in the centre of the plain.

The area is highly seismic, as demonstrated even by very recent average-degree earthquakes. In addition, it has a very clear tectonic activity, whose main features suggest that the regional tectonic lines also extend inside the plain and are typically Apennine-trending (FACCENNA *et alii*, 1993). These discontinuities, which were identified with different prospecting methods, have prevalently NW-SE and E-W directions. They often represent the lines along which deep gaseous fluids come to the surface, as clearly visible in the plain (CIOTOLI *et alii*, 2001; PETITTA *et alii*, 2003; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2004).

A major extensional feature is the SW-dipping N30°W Fiamignano fault (CENTAMORE *et alii*, 2009). In its northernmost segment, it is locally known as the Micciani fault. This fault places the Mt. Nuria carbonates in contact with a limb of Miocene flysch, on which more ancient Pleistocene deposits rest. The fault is likely to cross the Velino valley and to continue further N, bordering the western side of Mt. Terminillo. In the S. Vittorino Plain, the northern ramification of the fault appears to lie along the Lago di Micciani-Lago Nuovo-Lago Tornariccio -S. Vittorino alignment (Fig. 2).

The southern slope of the valley has outcrops of the fault and also of fluvio-lacustrine sediments, which fill the nearby Rieti basin and the Valle del Salto valley (BARBERI & CAVINATO, 1993). Two units may be distinguished: the more ancient one, Villafranchian, chiefly consists of conglomerates (overall thickness: about 300-350 m); the more recent one, post-Villafranchian, shows alternations of conglomerates and clayey deposits of fluvial and lacustrine origin, with peat levels and travertine lenses.

Travertines are widely exposed at the edge of the S. Vittorino Plain, near the village of Caporio and inside the built-up areas of Vasche and Lago di Paterno. The right slope of the valley displays various orders of travertine-bearing fluvial terraces (CARRARA *et alii*, 1992; SOLIGO *et alii*, 2002). In particular, a terrace located several tens of meters above the present course of the Velino River may be observed at Canetra.

The subsoil of the S. Vittorino Plain hosts fluvial and lacustrine sequences of the Velino River up to the present time. Numerous lateral heteropies of clastic deposits may be noted. Stratigraphy is not known in sufficient detail, except in specific sites which were investigated at different times and for different purposes by drilling of holes and prospecting. The carbonate bedrock is downthrown beneath the plain by mostly E-W-trending extensional tectonic features. Owing to these features, the Quaternary cover is more than 40 m-thick already a few metres away from the reliefs (as shown by drillholes). Then, the bedrock rapidly reaches a depth of about one

sato al di sotto della piana da elementi tettonici distensivi a direzione prevalente E-W, che determinano spessori di copertura quaternaria superiori ai 40 m già a pochi metri di distanza dai rilievi, come evidenziato da alcuni sondaggi, per raggiungere rapidamente verso il centro della piana profondità dell'ordine del centinaio di metri.

Il quadro idrogeologico di riferimento si avvale delle conoscenze acquisite negli ultimi anni del secolo scorso (CELICO, 1983; BONI *et alii*, 1986; BONI & PETITTA 1994, BONI *et alii*, 1995) e i cui risultati sono sintetizzati nella carta allegata. La media valle del Velino e la Piana di S. Vittorino rappresentano il recapito di importanti acquiferi carbonatici fratturati, comprendenti le dorsali M.Giano-M.Nuria-M.Velino del dominio carbonatico di piattaforma. Altre importanti sorgenti pedemontane sono presenti lungo la valle (anche tramite drenaggio diretto in alveo) e lungo il margine destro, in corrispondenza del limite settentrionale della piana (Fig. 2). La portata totale delle emergenze presenti nella sola piana supera i 20 m<sup>3</sup>/s, che sommati ai contributi presenti nel settore immediatamente a monte, possono raggiungere i 30 m<sup>3</sup>/s.

Le principali sorgenti, ubicate sul versante meridionale e sul margine settentrionale della piana di S. Vittorino, sono rappresentate innanzitutto dalle note sorgenti del Peschiera (18 m<sup>3</sup>/s), parzialmente captate per l'approvvigionamento idrico di Roma. Le altre principali emergenze dell'area sono le sorgenti lineari di Antrodoco (circa 2 m<sup>3</sup>/s), la sorgente di Canetra (2 m<sup>3</sup>/s), il gruppo di Canetra (4.5 m<sup>3</sup>/s), quello di Vasche (1.5 m<sup>3</sup>/s), di S. Vittorino (0.5 m<sup>3</sup>/s) e da altre sorgenti minori del Peschiera (0.5 m<sup>3</sup>/s) (vedi carta allegata), cui si affiancano anche sorgenti ad elevata mineralizzazione, anche di portata elevata (Terme di Cotilia, 0.25 m<sup>3</sup>/s).

L'area di alimentazione a scala regionale è rappresentata dall'idrostruttura dei Monti Giano-Nuria-Velino, avente una superficie di circa 1016 km<sup>2</sup>, per una corrispondente infiltrazione efficace pari a 880 mm/anno, rispetto ad una precipitazione media di oltre 1200 mm/anno (BONI *et alii*, 1986; BONI & PETITTA, 1994).

L'idrogeologia della Piana di S. Vittorino è influenzata dalla sovrapposizione di differenti apporti di acque sotterranee e di superficie, ai quali si sommano notevoli apporti gassosi. La situazione naturale è resa ulteriormente complessa da opere idrauliche di contenimento delle piene del fiume Velino e da opere di captazione delle acque sorgive. Fin dal 1700 la piana è stata oggetto di studi atti alla regimazione del fiume Velino ed al progetto di bonifica, che si presentava come un acquitrino soggetto alle continue piene del Velino (MARINELLI, 1995). A seguito dei lavori di bonifica, realizzati a partire dalla fine dell'800, il fiume Velino attraversa la piana in un alveo artificiale, rettificato e pensile, che predispone il fiume all'alimentazione verso il sottostante acquifero alluvionale.

Molte sorgenti della piana presentano caratteristiche idrochimiche particolari (acque solfuree, ferruginose, con leggeri caratteri idrotermali, ecc.), condizionate dal mixing con fluidi prevalentemente gassosi risalenti lungo le discontinuità tettoniche recenti e/o attive (vedi carta allegata; MENOTTI *et alii*, 1999; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2004).

hundred metres towards the centre of the plain.

The reference geological setting is based on knowledge acquired in the late years of the 20th century (CELICO, 1983; BONI *et alii*, 1986; BONI & PETITTA 1994, BONI *et alii*, 1995), whose results are resumed in the enclosed map. The middle valley of the Velino River and the S. Vittorino Plain are the areas of discharge of important fractured carbonate aquifers, which comprise the Giano-Nuria-Velino Mts. ridges, belonging to the carbonate platform domain. Other significant piedmont springs occur along the valley (via direct drainage to the streambed) and along its right margin, near the northern boundary of the plain (Fig. 2). The total discharge from the springs in the plain alone exceeds 20 m<sup>3</sup>/s. If this figure is added to the contributions in the immediately uphill sector, the discharge can reach 30 m<sup>3</sup>/s.

The main springs (on the southern slope and at the northern boundary of the S. Vittorino Plain) include, first of all, the well-known Peschiera springs (18 m<sup>3</sup>/s), exploited in part for drinking water supply to the city of Rome. The other main springs in the area are the linear springs of Antrodoco (about 2 m<sup>3</sup>/s), the spring of Canetra (2 m<sup>3</sup>/s), the spring group of Canetra (4.5 m<sup>3</sup>/s), the one of Vasche (1.5 m<sup>3</sup>/s) and the one of S. Vittorino (0.5 m<sup>3</sup>/s) and other minor Peschiera springs (0.5 m<sup>3</sup>/s) (see enclosed map). These springs add to other highly mineralised and, at times, high-discharge springs (Terme di Cotilia, 0.25 m<sup>3</sup>/s).

The regional recharge area is the Giano-Nuria-Velino Mts. aquifer, with a surface area of about 1,016 km<sup>2</sup>, effective infiltration of 880 mm/yr vs. average precipitation of over 1,200 mm/year (BONI *et alii*, 1986; BONI & PETITTA, 1994).

The hydrogeology of the S. Vittorino Plain results from a combination of groundwater and surface water flows and of major gas inputs. The spring water intake structures and the Velino River flood control works complicate the natural situation. Since 1700, the plain has been the focus of studies aimed at regulating the Velino River flow and at reclaiming what had become a marshland subject to continuing floods (MARINELLI, 1995). Reclamation works started towards the end of the 19th century. As a result of these works, the Velino River crosses the plain in a perched and artificially rectilinear streambed, which favours flow towards the underlying alluvial aquifer.

Many springs in the plain have particular hydrochemical characteristics (sulphurous water, ferruginous water with slightly hydrothermal characters, etc.), which depend on mixing with dominantly gaseous fluids rising along recent and/or active tectonic discontinuities (see enclosed map; MENOTTI *et alii*, 1999; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2004).

Hence, the entire middle valley of the Velino River has an active groundwater flow giving rise to localised piedmont springs, which are often associated with drainage to the streambed. The minimum depth to the water table in the alluvial-detrital deposits, the complex hydrodynamics of subsurface water discharge and the aggressiveness

Tutta la media valle del Fiume Velino è quindi sede di un'attiva circolazione sotterranea che dà origine a sorgenti pedemontane localizzate, accompagnate spesso da drenaggio in alveo. La presenza della falda contenuta nei depositi alluvionali-detrutici con soggiacenza minima, la complessa idrodinamica del deflusso sotterraneo e l'aggressività delle acque in alcuni settori (DALL'AGLIO & CAMPANILE, 1996), costituiscono elementi fondamentali anche per lo sviluppo di fenomeni di sprofondamento noti come "sinkhole" (BERSANI *et alii*, 2000; CAPELLI *et alii*, 2000; SALVATI & SASOWSKY 2002; CENTAMORE *et alii*, 2004).

### INDAGINI IDROGEOLOGICHE NEL PERIODO 1986-2008

A partire dal 1986 sono state realizzate numerose campagne di misura della portata fluviale e delle sorgenti, con relativa misurazione dei principali parametri chimico-fisici (pH, temperatura, conducibilità elettrica) nell'area esaminata. Le campagne di misura hanno avuto luogo generalmente nel periodo estivo, al fine di valutare il contributo delle acque sotterranee al deflusso fluviale in assenza di acque di ruscellamento superficiale. La sostanziale stabilità del regime sorgentizio consente di attribuire comunque alle misure sulle sorgenti eseguite in estate una buona rappresentatività della portata media. Le campagne di misura sintetizzate nel presente lavoro sono relative ai seguenti periodi, con i rispettivi riferimenti:

- agosto e settembre 1986 (BONI & PETITTA, 1994; carta allegata);
- agosto 1987 (BONI & PETITTA, 1994; carta allegata);
- agosto 1990 (carta allegata);
- giugno 1993 (carta allegata);
- gennaio ed agosto 2000 (BONI & PETITTA, 2001);
- luglio 2001 (BONI & PETITTA, 2001);
- marzo 2007;
- agosto 2008.

Tutti i risultati ottenuti fino al 1993 sono riassunti nella cartografia idrogeologica allegata. I successivi dati, oggetto di relazioni tecniche e tesi di laurea inedite, sono riassunti in Tabella 1.

Le misure di portata riguardano sia l'alveo fluviale del Velino e dei suoi affluenti, tra la zona a monte di Antrodoco e l'abitato di Cittaducale, che le principali sorgenti della valle con portata superiore a 50 L/s. Sulle sorgenti di portata inferiore a 50 L/s sono state eseguite le determinazioni dei parametri chimico-fisici e soltanto sporadicamente la misura diretta della portata con idromulinello; nella maggior parte dei casi la portata è stata stimata con metodi speditivi o misurata con secchi tarati.

L'ubicazione delle misure di portata fluviali e sulle sorgenti è riportata in Fig. 4. Il regime del Fiume Velino in assenza di contributi diretti di acque di ruscellamento è espressione del contributo delle acque sotterranee al deflusso di base. La disponibilità di dati rilevati in anni diversi in sezioni fluviali e sorgenti corrispondenti, ha consentito di valutare anche la variabilità pluriennale delle portate. In particolare, sulla base delle precipitazioni osservate in Italia centrale

of waters in some sectors (DALL'AGLIO & CAMPANILE, 1996) play a crucial role, also in developing collapse phenomena, known as sinkholes (BERSANI *et alii*, 2000; CAPELLI *et alii*, 2000; SALVATI & SASOWSKY 2002; CENTAMORE *et alii*, 2004).

### HYDROGEOLOGICAL SURVEYS FROM 1986 TO 2008

Since 1986, numerous surveys have been conducted in the study area to measure stream and spring discharge, as well as the related main physico-chemical parameters (pH, temperature, electrical conductivity). The surveys usually took place in Summer, in order to assess groundwater contribution to fluvial discharge, failing surface runoff. As the springs have fairly stable discharge, the values measured in Summer well represent their average discharge. The surveys summarised in this paper were performed in the following periods:

- August and September 1986 (BONI & PETITTA, 1994; see enclosed map);
- August 1987 (BONI & PETITTA, 1994; see enclosed map);
- August 1990 (see enclosed map);
- June 1993 (see enclosed map);
- January and August 2000 (BONI & PETITTA, 2001);
- July 2001 (BONI & PETITTA, 2001);
- March 2007;
- August 2008.

All the results obtained until 1993 are only reported in the hydrogeological maps (BONI *et alii*, 1995) enclosed to this paper. Subsequent data, covered by technical reports and unpublished degree theses, are shown in Table 1.

The discharge data concern: i) the streambeds of both the Velino River and its tributaries, between the area upstream of Antrodoco and the town of Cittaducale, and ii) the main springs of the valley with a discharge exceeding 50 L/s. As regards springs with a discharge of less than 50 L/s, physico-chemical parameters were determined and direct discharge measurements were carried out only sporadically with a water flow probe. In most of the cases, discharge was estimated with expeditive methods or measured with calibrated pails.

Fig. 4 shows the points where discharge from the streams and main springs was measured. Failing direct contribution from runoff, the Velino River discharge expresses the contribution of groundwater to basal discharge. Multi-year discharge variability was determined from available data, which were collected in the corresponding river sections and springs over the years. In particular, the precipitation recorded in central Italy in the study period suggests that the 1990 and 2007-2008 periods were particularly dry in comparison with higher-inflow periods (1986-1987 and 2000-2001), with direct reper-

ID	Elevation (m asl)	01/2000	08/2000	09/2001	11/2002	03/ 2007	08/2008	Mean discharge (L/s)
13	505	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	95	n.m.	124
14	504	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	10	n.m.	37
15	500	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	20	n.m.	25
16	500	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	250	n.m.	772
17	490	n.m.	n.m.	620	490	260	n.m.	611
18	470	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	345	n.m.	705
19	460	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	330	n.m.	800
21	450	n.m.	n.m.	n.m.	1290	825	n.m.	1678
22	442	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	1255	n.m.	1035
24	440	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	10	n.m.	10
25	434	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	105	n.m.	278
26	434	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	530	n.m.	595
27	430	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	1860	n.m.	4100
28	428	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	2240	n.m.	5618
29	430	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	425	n.m.	500
30	428	100	100	60	n.m.	n.m.	n.m.	98
31	430	6315	6595	n.m.	4690	6000	4810	5740
32	420	970	1045	n.m.	n.m.	n.m.	451	1372
33	410	450	420	n.m.	n.m.	n.m.	225	319
34	408	1340	1430	n.m.	1295	n.m.	746	1584
35	405	1320	1200	n.m.	n.m.	n.m.	562	1536
36	402	1340	1200	n.m.	n.m.	n.m.	188	1377
37	408	480	360	410	n.m.	n.m.	442	414
38	405	615	500	565	n.m.	n.m.	512	543
39	405	230	245	240	n.m.	n.m.	228	236
40	404	1440	1380	1500	n.m.	n.m.	771	1285
41	405	150	130	165	n.m.	n.m.	104	166
42	404	400	420	375	n.m.	n.m.	132	310
43	403	965	1605	n.m.	n.m.	n.m.	808	1574
44	405	n.m.	n.m.	n.m.	7865	n.m.	5470	8190
45	400	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	7435	9834

Tab. 1 - Risultati delle misure di portata sui corsi d'acqua e le sorgenti. La sigla si riferisce alle sezioni di misura riportate nella carta allegata, dove sono riportati tutti i dati fino al 1993. La portata media è stata calcolata sull'insieme delle misure pre- e post-1995 (n.m. = non misurata)

- Results of discharge surveys on rivers and springs. ID refers to measurement locations in the enclosed map, here data collected in 1986-2003 period are shown. Mean discharge has been obtained respect to the entire dataset pre- and post-1995 (n.m. = not measured)

nel periodo di studio, si possono identificare i periodi 1990 e 2007-08 come particolarmente siccitosi, rispetto ai periodi più ricchi in afflussi (1986-87 e 2000-01), con dirette conseguenze sulla ricarica degli acquiferi e quindi della portata erogata.

A monte di Antrodoco, il Velino è completamente asciutto, sia per la dispersione in subalveo dei contributi provenienti dall'alto bacino, che per la presenza di bacini di ritenuta e derivazione ad uso idroelettrico. Nell'attraversamento delle Gole del Velino a monte di Antrodoco, numerose sorgenti prevalentemente lineari alimentano il deflusso fluviale. A valle di Antrodoco le portate tendono a diminuire gradualmente, soprattutto negli anni più siccitosi. Nella zona di Canetra si osservano numerosi contributi sorgivi, tanto da consentire un ulteriore prelievo per uso idroelettrico e conseguente rilascio minimo nel Velino a valle dello sbarramento. Nella piana di S.Vittorino il Velino scorre pensile e rettificato, mentre i reticoli idrografici in destra idrografica (Canali di Cotilia e S.Vittorino) e soprattutto in sinistra idrografica (Fiume Peschiera) raccolgono le acque copiose provenienti dalle sorgenti, ubicate sia ai bordi della piana stessa che al suo interno, oltre a presentare localmente degli incrementi diretti in alveo. Poco a monte di Cittaducale (località Caporio) tutte le acque superficiali confluiscono nel Velino, che viene ulteriormente derivato per produzione idroelettrica, alla chiusura dell'area di studio.

Il chimismo delle acque sorgive e sotterranee è stato oggetto di apposite campagne di analisi degli ioni maggiori tra il 2001 e il 2005,

cussions on groundwater recharge and discharge.

Upstream of Antrodoco, the Velino River is completely dry. This is due both to sub-streambed dispersion of flows from the upper basin and to river diversion and storage basins for hydro power generation. In crossing the Velino River Gorges uphill of Antrodoco, many (pre-vaillingly linear) springs feed fluvial discharge. Downhill of Antrodoco, discharge tends to diminish gradually, especially in the driest years. At Canetra, spring discharge is so high as to permit additional water withdrawal for hydro power generation and to ensure the minimum in-stream flow in the Velino River, downstream of the dam. In the S. Vittorino Plain, the Velino River runs in a perched and artificially rectilinear streambed. In contrast, the catchment areas on its right bank (Cotilia and S. Vittorino Channels) and, especially, on its left bank (Peschiera River) gather the abundant waters from the springs (inside the plain or at its boundaries) and locally drain directly to the streambed. A little uphill of Cittaducale (at Caporio), all the surface waters flow into the Velino River, whose terminal section in the study area is further diverted for hydro power generation.

Surveys were conducted between 2001 and 2005 to investigate chemical composition and major ions in local groundwater and water from some spring groups of particular relevance in the local hydrogeological setting: in 2001, 10 spring waters were analysed; in 2003, waters from some sinkholes of the plain were analysed and 3 springs were monthly monitored; in 2005, the survey was focused on 13

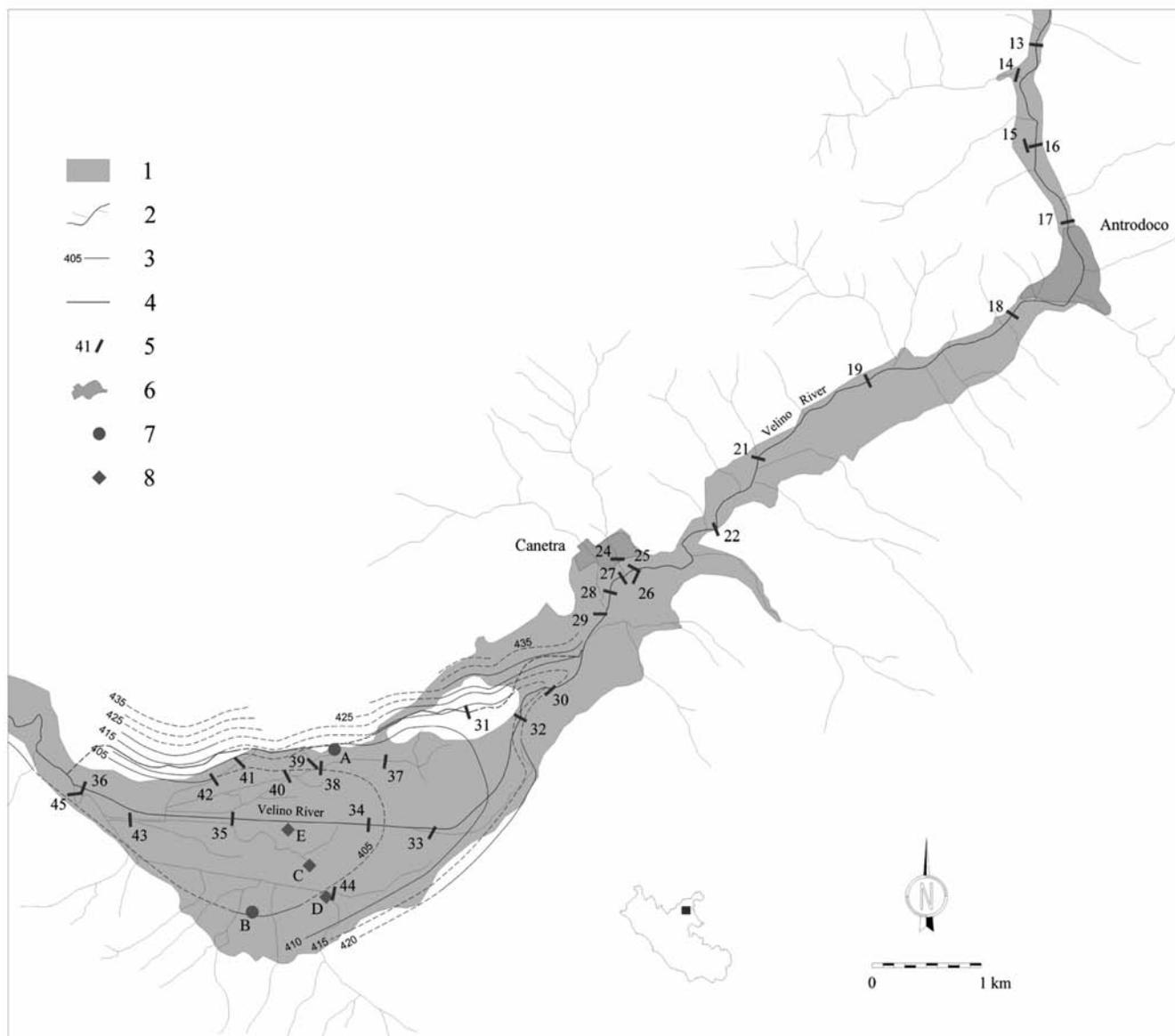


Fig. 4 - Schema idrologico e sezioni di misura fluviale e delle sorgenti. La sigla si riferisce alle sezioni di misura riportate nella carta allegata. Le portate misurate sono riassunte in Tabella 1. 1) Depositi quaternari della Valle del Velino e della piana di S.Vittorino; 2) Reticolo idrografico; 3) Isopieza con quota di riferimento in m s.l.m.; 4) Canale di derivazione ENEL (tratteggiato ove sotterraneo); 5) Sezione di misura e relativa sigla; 6) Principali centri abitati; 7) Pozzi monitorati (A e B sono riferiti alla Fig. 6); 8) Sinkholes (C, D ed E si riferiscono ai log chimico-fisici di Fig. 12)

- Hydrological scheme and discharge measurement sites. ID refers to measurement locations of the enclosed map. Discharge data are in Table 1. 1) Quaternary deposits of Velino Valley and S.Vittorino Plain; 2) River network; 3) Isohyetometric lines with reference elevation in m a.s.l.; 4) Diversion hydro power channel (dashed where underground); 5) Measurement sites and related ID; 6) Main urban areas; 7) Monitored wells (A and B refer to Fig. 6); 8) Sinkholes (C, D and E refer to Fig. 12)

relativamente ad alcuni gruppi sorgivi di particolare rilevanza nel contesto idrogeologico. In particolare, nel 2001 sono state analizzate 10 acque sorgive, nel 2003 le acque di alcuni sinkholes della piana, oltre al monitoraggio su base mensile di tre sorgenti, nel 2005 si sono considerate 13 sorgenti. Una sintesi dei dati chimici è illustrata in Figura 5. Nel 2003 nei principali sinkholes della piana sono stati eseguiti anche alcuni log verticali di conducibilità elettrica, pH e temperatura. Le acque sono prevalentemente di natura bicarbonato-calcica,

springs. Figure 5 outlines the chemical data. In 2003, some vertical logs of electrical conductivity, pH and temperature were performed in the main sinkholes of the plain. Most of the waters proved to be of the bicarbonate-calcium type, confirming that their recharge aquifers are of a carbonate nature. The contents of magnesium and, above all, sulphates in these waters change locally, depending on their interaction with dolomites and other deep formations.

With regard to groundwater, piezometric levels were measured

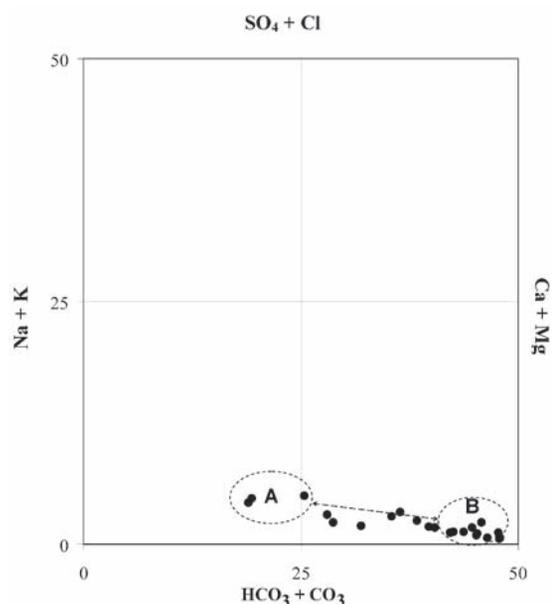


Fig. 5 - Diagramma di classificazione delle acque sorgive della zona di studio. Il gruppo A identifica l'end-member costituito prevalentemente dai fluidi gassosi mineralizzanti al contatto con le acque sotterranee; il gruppo B rappresenta le acque sotterranee provenienti dall'acquifero carbonatico regionale. E' evidente il processo di miscelazione continuo tra i due estremi idrochimici

- Classification chart of groundwater in the study area. Group A shows the end-member related mainly to the deep gaseous fluids which mineralise groundwater; B group identifies groundwater fed by regional carbonate aquifer. The mixing process is transitional between the two above mentioned hydrochemical extremes

a conferma della natura carbonatica degli acquiferi di alimentazione, con differenziazioni locali relative al contenuto in Magnesio, dovuto alla circolazione a contatto con le dolomie, e soprattutto ai Solfati, principali indicatori dell'interazione con i circuiti profondi.

In merito alle acque sotterranee, sono stati misurati tra il 2000 e il 2003 i livelli piezometrici di circa 25 pozzi ubicati nella Piana di S.Vittorino e in zone limitrofe, che hanno consentito la ricostruzione dell'andamento piezometrico della falda dell'acquifero alluvionale, a conferma dell'alimentazione dai rilievi circostanti (Fig. 4). Due di questi pozzi sono stato oggetto di monitoraggio nel tempo del livello piezometrico (Fig. 6): il primo si riferisce all'acquifero carbonatico nei pressi delle Terme di Cotilia e presenta una notevole stabilità di livello, ad eccezione dei periodi in cui si risente dei prelievi eseguiti in pozzi limitrofi, il secondo è relativo alla falda più superficiale della piana e presenta variazioni direttamente correlabili agli eventi di precipitazione.

### SORGENTI DELLA VALLE DEL VELINO E DELLA PIANA DI S.VITTORINO

I risultati delle indagini condotte hanno permesso di identificare tutti i gruppi sorgivi, puntuali e lineari (Fig. 7), e di caratterizzarli dal punto di vista del regime di portata e della sua variabilità anche su base pluriennale, come riassunto in Tabella 2.

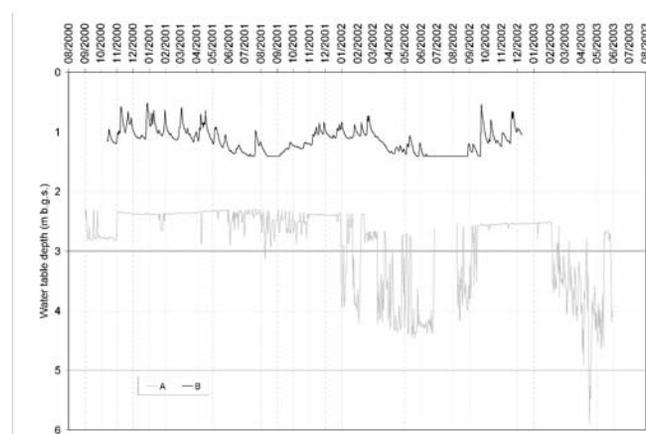


Fig. 6 - Monitoraggio del livello piezometrico tra il 2000 e il 2003. Confronto dei livelli registrati nell'acquifero basale carbonatico (zona Terme di Cotilia, A) con quelli relativi alla falda superficiale della piana (zona Tornariccio, B). La localizzazione dei pozzi è indicata in Fig. 4

- Water table monitoring in 2000-03 period. Comparison between water table recorded in the regional carbonate aquifer (Terme di Cotilia area, A) and in the shallow aquifer of the S.Vittorino Plain (Tornariccio area, B). Well location is shown in Fig. 4

in about 25 wells in the S. Vittorino Plain and neighbouring areas, in the period from 2000 to 2003. The collected data made it possible to model the piezometric levels of alluvial groundwater and thus to validate its recharge from the surrounding reliefs (Fig. 4). The piezometric level in two of these wells was monitored over time (Fig. 6). The first well corresponds to the carbonate aquifer lying near the Terme di Cotilia; its level is very stable, except in periods of water withdrawal from nearby wells. The second well corresponds to the shallower groundwater of the plain, whose level varies with precipitation.

### SPRINGS IN THE VELINO RIVER VALLEY AND S. VITTORINO PLAIN

The results of investigations permitted to identify all the groups of springs, both localised and linear (Fig. 7), and to characterise them in terms of discharge and discharge variability, also on a multi-year basis. Table 2 resumes discharge variability of the springs.

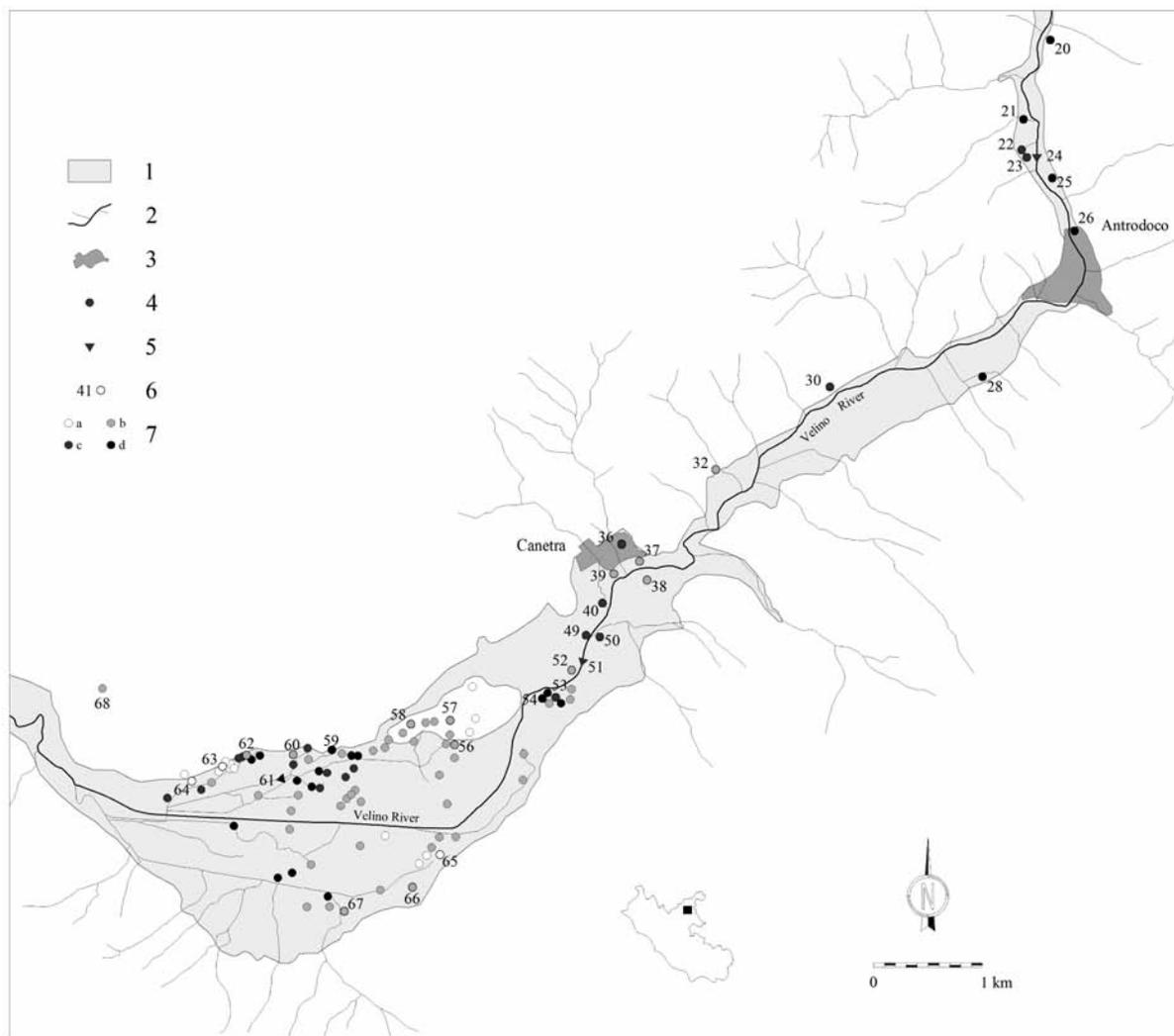


Fig. 7 - Sorgenti classificate per portata e caratteristiche chimico-fisiche. Le portate delle sorgenti sono riassunte in Tabella 2. 1) Depositi quaternari della Valle del Velino e della piana di S.Vittorino; 2) Reticolo fluviale; 3) Principali centri abitati; 4) Sorgenti localizzate; 5) Sorgenti lineari; 6) Sigla di riferimento delle sorgenti (vedi carta allegata e Tabella 2); 7) Classi di salinità delle acque sorgive: a) inferiore a 200 mg/L; b) tra 200 e 400 mg/L; c) tra 400 e 800 mg/L; d) superiore a 800 mg/L

- Springs classified by discharge and physico-chemical characteristics. Spring discharges are shown in Table 2. 1) Quaternary deposits of Velino Valley and S. Vittorino Plain; 2) River network; 3) Main urban areas; 4) Springs; 5) Linear springs; 6) Springs ID from (from Boni et al, 1995, see enclosed map and Table 2); 7) Salinity classes of the springs: a) less than 200 mg/L; b) between 200 and 400 mg/L; c) between 400 and 800 mg/L; d) higher than 800 mg/L

A monte di Antrodoco, lungo il Fiume Velino si verifica il drenaggio della struttura del M. Giano, per l'affioramento delle dolomie basali a minore permeabilità rispetto ai calcari di piattaforma. Poiché a monte il fiume Velino in assenza di precipitazioni si presenta totalmente asciutto, la portata fluviale, al netto dei contributi dei fossi minori laterali, corrisponde alla portata delle sorgenti, prevalentemente lineari, presenti in questo tratto. La storica sorgente intermittente dell'Acqua Cascinese, legata ad un reticolo carsico evoluto, dopo il 1987 è risultata sempre asciutta durante le campagne di misura, ad eccezione di qualche settimana primaverile in anni sporadici. La sua portata risulta quindi variabile tra 600 e 0 L/s. Anche le sorgenti Pratagranti (40 L/s di portata di magra ordinaria, asciutte in

Drainage from Mt. Giano takes place uphill of Antrodoco, along the Velino River, owing to outcrops of basal dolomites which are less permeable than the platform limestones. Failing precipitation, the Velino River may become completely dry uphill. Thus, fluvial discharge, net of the contributions from lateral minor ditches, corresponds to discharge from the (mostly linear) springs located in the area. After 1987, the historically intermittent spring of Acqua Cascinese, originating from an evolved karst network, demonstrated to be always dry during the surveys, except in some Spring weeks of sporadic years. Therefore, its discharge ranges from 600 to 0 L/s. In the past decade, also the Pratagranti springs on the left bank (40 L/s under normal base-flow conditions and dry under extreme base-flow conditions) completely disappeared in the

Tab. 2 - Elenco delle principali sorgenti misurate: portata minima, media e massima del periodo di osservazione (1986-2008). La sigla si riferisce alle sorgenti nella carta allegata. \*) Portata misurata in alveo, esclusa la derivazione ACEA stimata in 9000 L/s  
 - *Main measured springs: minimum, mean and maximum discharges in the entire study period are shown (1986-2008). ID refers to measurement locations of the enclosed map. \*) Stream measured discharge, which does not include ACEA withdrawal for drinking purpose (estimation value: 9000 L/s)*

ID	Elevation (m asl)	Spring Name	Min. discharge (L/s)	Mean discharge (L/s)	Max. discharge (L/s)
20	507	Acqua cascinese	0.0	170	360
21	505	Acqua del Paradiso		30	
22	500	Pratagrandi I	0.0	25	40
23	500	Pratagrandi II		5.0	
24	510-495	Fiume Velino (Antrodoco)	0.0	600	900
25	493	Sorgente Cesanelli		1.0	
26	490	Terme di Antrodoco	1.0	1.7	2.4
28	490	Acqua Puzza	2.0	6.3	12
30	455	Le Fontanelle	230	480	750
32	455	Ponte Alto	0.0	25	50
36	440	Canetra	1110	1690	2220
37	434	Acque destra Canetra	105	278	350
38	434	Acque sinistra Canetra	530	595	690
39	432	Acque della Stazione Canetra	0.0	300	600
40	430	Sorgente Laghetti	425	500	560
49	430	Sorgente Acqua Risciana		10	
50	428	Gruppo Ciarello		15	
51	450-425	Fiume Velino (Canetra)	2000	2700	3000
52	430	Acqua del Casello	5.0	23	70
53	428	San Erasmo I	60	98	110
54	423	S.Erasmo 2	15	33	80
56	410	Gruppo Case Paterno	35	61	100
57	420	Molino Paterno	50	100	170
58	410	Sorgente San Nicola	50	60	80
59	407	Terme Cotilia	150	250	320
60	407	Sorgente Pergine	1.0	1.7	3.0
61	410-405	Fosso acque Cotilia	600	900	1100
62	405	San Vittorino	104	166	240
63	404	Polle di San Vittorino	40	142	250
64	404	Ortali	100	150	180
65	415	Rivoli Peschiera	120	300	450
66	410	Peschiera *	6080	8950	10200
67	409	Molino Micciani	100	240	500
68	475	Cesoni	10	38	90

magra estrema), in sinistra idrografica, nell'ultimo decennio sono praticamente scomparse nel periodo estivo. Il drenaggio in alveo risulta molto variabile, in funzione dell'oscillazione pluriennale della superficie piezometrica, facilmente identificabile in funzione della quota di inizio del drenaggio nell'alveo del Velino. Il contributo complessivo della sorgente lineare è passato da oltre 1000 L/s nel 1986 a circa 500 L/s negli anni 2000-01, scendendo a soli 300 L/s nel 2007, con un minimo storico nel 1990 e nel 2008 inferiore ai 50 L/s.

Nel tratto successivo, tra Antrodoco e Borgovelino, al netto di alcune sorgentine locali, si è osservata una tendenza alla diminuzione della portata per infiltrazione nei sedimenti del letto, fino al prosciugamento totale osservato nel 1990 e nel 2008.

In destra idrografica, subito a valle di Borgovelino, il fiume riceve il contributo della sorgente Le Fontanelle, di portata media pari a 500 L/s, oscillante in fase di magra tra 750 e 230 L/s. Poco più a valle, quando sui versanti riaffiora la dorsale carbonatica, inizia di nuovo il drenaggio in alveo, tra Ponte e Canetra. Complessivamente, si è osservata una sorgente lineare di portata compresa tra 400 e 700 L/s fino alla stretta di Canetra.

Il gruppo sorgivo di Canetra comprende la sorgente omonima situata nel paese, la cui portata media nel periodo di osservazione è stata di 1700 L/s, con magra ordinaria (1986) di 2200 L/s e magra estrema (1990) di soli 1100 L/s. Le altre sorgenti misurate, poste ai bordi del corso d'acqua, sono le Acque di Destra (280 L/s di portata media, massima 350, minima 100 L/s), le Acque di Sinistra aventi

Summer period. Drainage to the streambed is very variable, depending on multi-year variations of the piezometric level; the latter is easily identifiable on the basis of the elevation at which drainage to the Velino streambed starts. The overall contribution from the linear spring passed from over 1,000 L/s in 1986 to about 500 L/s in the 2000-2001 period, dropping to as little as 300 L/s in 2007, to an all-time minimum in 1990 and to less than 50 L/s in 2008.

In the area extending between Antrodoco and Borgovelino, discharge (net of the contribution from some small local springs) tends to decrease owing to infiltration into streambed sediments, until disappearing completely in 1990 and 2008.

On the right bank, just downstream of Borgovelino, the river receives inputs from the Le Fontanelle spring, which has a discharge of 500 L/s on average and ranging between 750 and 230 L/s in minimum-flow periods. Further downhill, where the carbonate ridge is exposed again on the slopes, drainage to the streambed (Ponte-Canetra area) starts again. A linear spring with a discharge of 400 to 700 L/s was observed as far as the Canetra strait.

The Canetra spring group includes the homonymous spring located in the village (in the observation period, average discharge of 1,700 L/s, normal base-flow discharge (1986) of 2,200 L/s and extreme base-flow discharge (1990) of as little as 1,100 L/s). The other measured springs, lying at the borders of the river, are: Acque di Destra (average discharge 280 L/s, max discharge 350, min discharge 100 L/s); Acque di Sinistra with a more constant discharge (600 L/s on

portata più stabile (600 L/s in media, 700 di massima e 500 di minima), le Acque della Stazione, di difficile misurazione, circa 600 L/s, e infine i Laghetti, 500 L/s di media e oscillazioni massime di 100 L/s. Oltre a queste sorgenti, anche il Velino si comporta da sorgente lineare, erogando un contributo sorgivo che nel corso degli anni è stato valutato, al netto delle sorgenti sopra citate, pari in media a 1000 L/s, ma con una variabilità anche del 50%, stimata in base alla portata totale del corso d'acqua e quindi affetta da una certa incertezza. Complessivamente, la portata di tutto il gruppo di Canetra è stata misurata sulla derivazione del Canale Enel di Vasche, cui va sommato il rilascio a valle dello sbarramento omonimo. La portata complessiva del gruppo sorgivo di Canetra è risultata in media di 6 m<sup>3</sup>/s, con massimi di 7.2 e minimi di 4.5 m<sup>3</sup>/s.

Nell'attraversamento della Piana di S.Vittorino, dopo aver ricevuto in sinistra idrografica il gruppo delle acque solfuree di S.Erasmo (in media 100 L/s) e i primi contributi del gruppo del Peschiera (Rivoli Peschiera, circa 320 L/s variabili tra 450 e 120 L/s), il Fiume Velino scorre pensile nella piana, alimentandone la circolazione sotterranea più superficiale, con contributi variabili in funzione della portata fluviale. Si sono registrati decrementi di portata medi di 200 L/s in circa 2 km di corso fluviale, ma queste perdite sono decisamente più ingenti nelle fasi di magra estrema, quando la falda della piana ha una maggiore soggiacenza e la portata fluviale è inferiore: in particolare, nel 2008 si è osservato un decremento di oltre 500 L/s sui circa 800 di deflusso nel Velino all'inizio del tratto pensile.

In sinistra idrografica, le Sorgenti del Peschiera danno vita al fiume omonimo, che riceve le sorgenti poste poco a monte delle captazioni, quelle del Molino Micciani e quelle di altri fossi drenanti in quel settore della Piana di S.Vittorino. La portata complessivamente misurata a valle delle captazioni ACEA è risultata in media di 8.2 m<sup>3</sup>/s, che sommati alla stima di circa 9 m<sup>3</sup>/s derivati per l'approvvigionamento potabile di Roma, forniscono una portata media superiore ai 17 m<sup>3</sup>/s. Va evidenziato che la portata di magra ordinaria si attestava sui 10 m<sup>3</sup>/s nel 1986-87, ma che la stessa è scesa in fase di magra estrema (1990 e 2008) a soli 6 m<sup>3</sup>/s, sempre al netto del prelievo ACEA.

In destra idrografica, l'asse di drenaggio superficiale è rappresentato dal Fosso di Cotilia, che riceve a monte delle sorgenti delle Terme omonime (240 L/s in media, con minimi di 150 L/s) il gruppo sorgivo di Case Paterno, comprensivo di un evidente drenaggio in alveo. La maggiore sorgente puntuale del gruppo è Molino Paterno (circa 100 L/s in media), mentre il contributo complessivo è di 550 L/s in media, con variazioni non superiori al 10% su lungo periodo.

Il gruppo di S.Vittorino e Ortali è composto da numerose sorgenti, tra cui quella della chiesa di S.Vittorino, avente portata media pari a 170 L/s (massima 240 L/s e magra estrema di 100 L/s nel 2008). La portata totale dell'emissario di questo gruppo sorgivo non è facilmente misurabile, ma è stata valutata nell'ordine dei 500 L/s in media. Queste acque si immettono nel canale delle Acque di Cotilia, che a sua volta si comporta da sorgente lineare attraversando la piana

average, 700 max and 500 min); Acque della Stazione with a hardly measurable discharge (about 600 L/s) and, finally, Laghetti (500 L/s on average and maximum oscillations of 100 L/s). Over and above these springs, also the Velino River acts as a linear spring, supplying 1,000 L/s on average; this contribution was calculated over the years, after deducting the contribution from the above-mentioned springs. However, based on total discharge of the river, this figure is estimated to have a variability of up to 50% and thus biased by some uncertainty. Discharge from the overall Canetra spring group was also measured on Enel's diversion channel at Vasche; this contribution is to be added to the water released downstream of the homonymous dam. The total discharge of the Canetra spring group proved to be 6 m<sup>3</sup>/s on average with a maximum of 7.2 and a minimum of 4.5 m<sup>3</sup>/s.

On the left bank, the Velino River receives the sulphurous waters of the S. Erasmo spring group (on average 100 L/s) and the first contributions of the Peschiera one (Rivoli Peschiera, about 320 L/s, variable from 450 to 120 L/s). Then, the river crosses the S. Vittorino Plain in a perched streambed, giving variable contributions (depending on its discharge) to the shallower subsurface water. In an about 2 km-long section of the river, discharge was recorded to decrease by 200 L/s. However, these losses are much more significant in extreme minimum-flow periods, when the water table of the plain is deeper and the fluvial discharge is lower. In particular, in 2008, discharge of the Velino River dropped by more than 500 L/s vs. about 800 L/s at the start of its perched section.

On the left bank, the Peschiera Springs give rise to the homonymous river, which receives the waters from the springs placed a little upstream of their intake structures, i.e. those of Molino Micciani and of other minor streambed springs draining into that sector of the S. Vittorino Plain. The overall discharge measured downstream of ACEA's intake structures was 8.2 m<sup>3</sup>/s on average. If this figure is added to about 9 m<sup>3</sup>/s, i.e. the estimated withdrawal for drinking water supply to the city of Rome, then the average discharge exceeds 17 m<sup>3</sup>/s. It is worth noting that discharge was roughly 10 m<sup>3</sup>/s under normal base-flow conditions (1986-1987), but that it dropped under extreme base-flow conditions (1990 and 2008) to as little as 6 m<sup>3</sup>/s (net of ACEA's withdrawal).

On the right bank, surface drainage is represented by the Fosso di Cotilia stream. Uphill of the Terme di Cotilia (240 L/s on average, with minima of 150 L/s), this stream receives the waters from the Case Paterno spring group, which also clearly is a linear spring. The chief localised spring of the group is Molino Paterno (about 100 L/s on average). Overall discharge is 550 L/s on average, with long-term variations not exceeding 10%.

The S. Vittorino and Ortali group consists of numerous springs, including the one of the S. Vittorino church, with an average discharge of 170 L/s (max 240 L/s and extreme minimum-flow discharge of 100 L/s in 2008). The total discharge of the outlet stream of this group is hardly measurable but estimated to lie in the range of 500 L/s on average. These waters flow into the Acque di Cotilia chan-

di S. Vittorino. Infatti, sommando i contributi di Case Paterno, Terme di Cotilia e S. Vittorino-Ortali, si ottengono circa 1300 L/s, valore inferiore a quello misurato sul corso d'acqua in prossimità del Velino, dove esso presenta una portata media di 1600 L/s, con massimi di 2000 e minimi storici di 1200 L/s.

Un ultimo ulteriore incremento in alveo potrebbe avvenire nel tratto terminale di questo canale, quando attraverso un by-pass idraulico, le acque vengono convogliate sotto l'alveo del Velino rettificato e pensile, per confluire poco a valle in sinistra idrografica, con il Fiume Peschiera, la cui portata risulta incrementata dell'equivalente del contributo del Canale Cotilia-S. Vittorino, raggiungendo in media i 10 m<sup>3</sup>/s.

In definitiva, all'uscita della Piana di S. Vittorino, dove le acque vengono quasi totalmente derivate per scopi idroelettrici alla centrale di Cotilia-Caporio, il contributo sorgivo complessivo delle sorgenti tra Antrodoco e Cittaducale è dato dalla somma del Canale Enel di Canetra, della portata del Velino e di quella del Peschiera che ha ricevuto le acque di Cotilia-S. Vittorino. Si ottiene in questo modo una portata media di circa 17 m<sup>3</sup>/s, che sommati alla derivazione ACEA di circa 9 m<sup>3</sup>/s, attestano il contributo sorgivo della valle del Velino in circa 26 m<sup>3</sup>/s. Nel corso degli anni di osservazione, tale portata ha presentato una variabilità compresa tra i circa 30 m<sup>3</sup>/s del 1986 e i 21-22 m<sup>3</sup>/s del 1990 e 2008, che interessa soprattutto le portate dei gruppi sorgivi posti alle quote più elevate (Antrodoco e Canetra).

## MODELLO DI CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA

Sulla base dei numerosi dati idrologici acquisiti, considerando le informazioni sul chimismo delle acque e quelle piezometriche, viene proposto un modello della circolazione idrica sotterranea che, a partire da quanto ipotizzato da autori precedenti (BONI *et alii*, 1986; BONI *et alii*, 1995; CELICO, 1983), analizza con maggior dettaglio i rapporti tra aree di ricarica, zone di recapito e contributi profondi.

A scala regionale, le sorgenti della media valle del Velino e della Piana di S. Vittorino prendono alimentazione dal sistema idrogeologico dei Monti Giano-Nuria-Velino; alla ricarica della falda regionale contribuisce anche la dorsale del M. Paterno-Canetra, posta in destra idrografica del Velino, per il settore sottostante il thrust principale della linea tettonica Olevano-Antrodoco. Questa rappresenta un limite di permeabilità a flusso nullo che separa la circolazione della dorsale del M. Terminillo, diretta verso ovest verso le sorgenti di S. Susanna, da quella drenata dalla valle del Velino. La dorsale di M. Paterno-Canetra alimenta alla sua base sorgenti di portata superiore alla sua estensione (soltanto 4 km<sup>2</sup>); data la continuità stratigrafica e idrogeologica con i complessi di piattaforma carbonatica costituenti il M. Nuria sul versante opposto, si deduce l'esistenza di una comunicazione idraulica tra il sistema idrogeologico maggiore e questa unità idrogeologica minore. Le due aree di alimentazione vengono a contatto in corrispondenza della stretta morfologica di Canetra,

nel, which in turn acts as a linear spring, crossing the S. Vittorino Plain. Indeed, summing the contributions of Case Paterno, Terme di Cotilia and S. Vittorino-Ortali yields about 1,300 L/s, i.e. a value lower than the one measured in the stream near the Velino River, where the average discharge is 1,600 L/s, with maxima of 2,000 and historical minima of 1,200 L/s.

A last and additional inflow to the streambed may take place in the terminal section of this channel. Through a hydraulic by-pass, waters are conveyed beneath the perched and artificially linear streambed of the Velino River and then flow a little downstream on the left bank into the Peschiera River. As a result, the discharge of the Peschiera River is increased by the contribution of the Cotilia-S. Vittorino channel, reaching 10 m<sup>3</sup>/s on average.

At the outlet of the S. Vittorino Plain, waters are almost completely exploited for hydro power generation in the Cotilia-Caporio power plant. So, the overall contribution of the springs lying between Antrodoco and Cittaducale is given by the sum of the discharge of Enel's channel at Canetra, the discharge of the Velino River and the discharge of the Peschiera River (which has received the waters of Cotilia-S. Vittorino). The resulting average discharge amounts to roughly 17 m<sup>3</sup>/s. Adding this figure to ACEA's withdrawal (about 9 m<sup>3</sup>/s) gives the contribution of the Velino valley springs: approximately 26 m<sup>3</sup>/s. Over the years of observation, this discharge had a variability of about 30 m<sup>3</sup>/s in 1986 to 21-22 m<sup>3</sup>/s in 1990 and 2008, especially in the most elevated spring groups (Antrodoco and Canetra).

## GROUNDWATER FLOW MODEL

A groundwater flow model was built on the basis of the numerous hydrological, water chemistry and piezometric data collected during the study. The model, relying on previous assumptions (BONI *et alii*, 1986; BONI *et alii*, 1995; CELICO, 1983), makes an in-depth analysis of the relationships between recharge areas, discharge areas and deep contributions.

At regional scale, the springs of the middle valley of the Velino River and of the S. Vittorino Plain are recharged by the Giano-Nuria-Velino Mts. hydrogeological system. Contributions to regional groundwater recharge also come from the Mt. Paterno-Canetra ridge (right bank of the Velino River), namely from the sector underlying the main thrust of the Olevano-Antrodoco tectonic line. This line represents a no-flow permeability boundary, which separates the water flowing in the Mt. Terminillo ridge (towards W, i.e. towards the S. Susanna springs) from the water drained by the Velino valley. The piedmont area of the Mt. Paterno-Canetra ridge supplies springs whose discharge is higher than the one justified by its surface area (4 km<sup>2</sup> only). The stratigraphic and hydrogeological continuity of this ridge with the carbonate platform complexes of Mt. Nuria (on the opposite side) infers a hydraulic communication between the major hydrogeological system and this minor hydrogeological unit. The two recharge areas come into contact with each other at the morphological strait of Canetra, as described in detail in the following para-

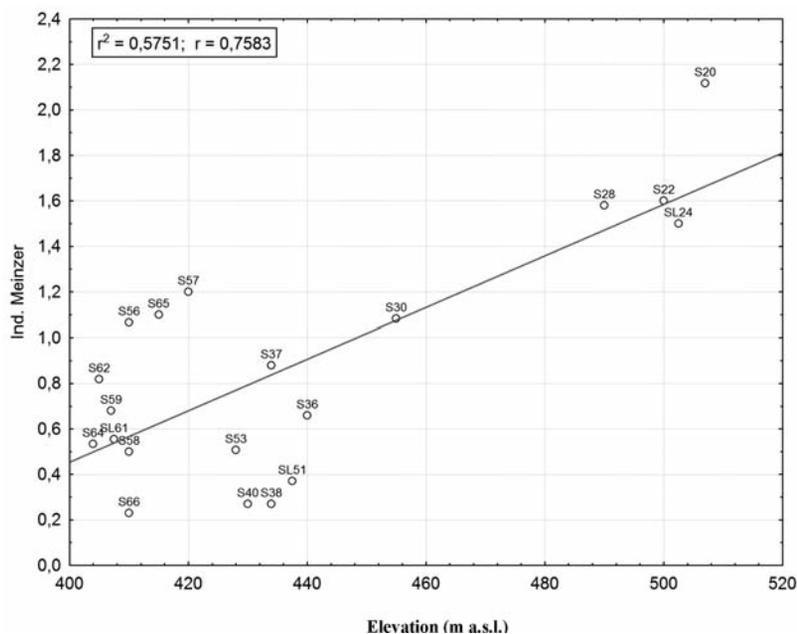


Fig. 8 - Correlazione tra quota delle emergenze e variabilità della loro portata su base pluriennale, calcolata con l'Indice di Meinzer. Le sigle si riferiscono alla Tabella 2 e alla Figura 7

- *Correlation between elevation and discharge variability of the springs on long-time series, calculated by the Meinzer Index. ID refers to Table 2 and Fig. 7*

come dettagliatamente illustrato in seguito.

Tutte le acque sotterranee infiltratesi nel sistema idrogeologico dei Monti Giano-Nuria-Velino vengono drenate nella valle del Velino, ad eccezione delle sorgenti di Rio Pago, nei pressi di Celano (L'Aquila), attualmente captate per uso idropotabile tramite un campo pozzi. L'area di alimentazione di tutto il sistema idrogeologico si estende complessivamente per circa 1016 km<sup>2</sup>, cui si aggiungono i circa 4 km<sup>2</sup> della piccola unità di M.Paterno-Canetra. La portata complessiva delle sorgenti alimentata da queste strutture è stata valutata in base alle campagne di misura eseguite nel periodo 1986-2008; considerata la variabilità a scala pluriennale e la disponibilità di dati relativi a periodi di massima magra, la portata risulta in media pari a 26 m<sup>3</sup>/s in periodo estivo, con minimi valutabili in circa 22 m<sup>3</sup>/s per anni particolarmente siccitosi.

L'appartenenza di tutto il gruppo sorgivo della media valle del Velino ad un'unica area di alimentazione è confermata dal regime sorgivo delle diverse emergenze, in funzione della loro localizzazione lungo la valle e della loro quota di emergenza. Infatti, in un unico sistema idrogeologico, il deflusso sorgivo presenta minore portata media e variabilità maggiore nelle sorgenti poste a quota più elevata, mentre le zone di recapito poste a quote inferiori hanno generalmente un regime più stabile, oltre a portate più cospicue (Fig. 8). L'oscillazione su base pluriennale della quota di saturazione dell'aquifero, in funzione della variabilità della ricarica, determina infatti variazioni più ingenti di deflusso nelle emergenze poste a quota maggiore, fino a provocarne in casi estremi il loro prosciugamento, come accade per le sorgenti lineari di Antrodoco. Procedendo verso valle, le sorgenti poste a quote intermedie (zona di Canetra) hanno una minore variabilità, ma sono comunque soggette a riduzioni della portata erogata in anni particolarmente siccitosi. Il recapito ultimo della

graphs.

All the subsurface water infiltrating into the Giano-Nuria-Velino Mts. hydrogeological system is drained to the Velino valley, except for the Rio Pago springs, near Celano (L'Aquila); these springs are currently exploited for drinking water uses through a well field. The recharge area of the entire hydrogeological system covers an overall surface of about 1,016 km<sup>2</sup>, which adds to the about 4 km<sup>2</sup> of the small Mt. Paterno-Canetra unit. The overall discharge of the springs supplied by these aquifer systems was determined on the basis of surveys conducted in the 1986-2008 period. Considering multi-year variability and availability of maximum low-flow data, the average discharge is equal to 26 m<sup>3</sup>/s in Summer, with minima of about 22 m<sup>3</sup>/s in particularly dry years.

The discharge of the springs, their location along the valley and their elevation confirm that a single recharge area feeds the spring group of the middle valley of the Velino River. Indeed, in a single hydrogeological system, discharge is smaller on average and more variable in the more elevated springs. Conversely, the less elevated discharge areas generally have more constant and more substantial discharge (Fig. 8). In effect, depending on variability of recharge, the multi-year variability of the aquifer saturation elevation induces more significant discharge variations in the springs located at higher elevation, which may become dry under extreme circumstances, as it happens for the Antrodoco linear springs. Proceeding downhill, the springs located at intermediate elevations (Canetra) have lower variability. Nevertheless, in particularly dry years, their discharge may decline. The final discharge area of the regional groundwater, i.e. the Peschiera Springs, has more constant discharge and multi-year minima which are not very different from average ones. The assessment of discharge, especially of linear spring discharge, on a multi-year

falda regionale, rappresentato dalle Sorgenti del Peschiera, ha un regime più regolare e portate minime pluriennali non molto differenti dalla portata media. L'esame delle portate a scala pluriennale, in particolare modo nel caso delle sorgenti lineari, supporta questo modello interpretativo, in quanto è possibile non solo misurare la portata erogata ma anche verificare la variazione delle quote di inizio del drenaggio in alveo, che negli anni più sfavorevoli sono inferiori a quelle degli altri periodi.

Seguendo il corso del Fiume Velino da monte verso valle, il recapito delle acque sotterranee dell'idrostruttura così configurata può essere distinto in tre settori, aventi caratteristiche diverse tra loro: sorgenti lineari di Antrodoco, gruppo sorgivo di Canetra e sorgenti della Piana di S. Vittorino. Le tre aree sono tra loro separate da zone in cui le emergenze sono più rade od assenti, per motivi geologici ben identificabili (Fig. 2): l'affioramento dei flysch a bassa permeabilità tra Antrodoco e Canetra e l'ampliamento della valle tra Canetra e la Piana di S. Vittorino, con aumento dello spessore dei depositi di subalveo e presenza di depositi a permeabilità medio-bassa sui versanti, costituenti i terrazzi fluviali. La risalita di fluidi gassosi dalle principali discontinuità rende più complesso il modello di circolazione idrica, variando localmente le caratteristiche chimico-fisiche delle emergenze.

L'area sorgiva di Antrodoco è caratterizzata dalla presenza dello sfioro della falda di base, per la presenza delle dolomie aventi minore permeabilità, che affiorano lungo le Gole del Velino e nell'incisione fluviale. In tal modo, la falda regionale viene intercettata dal corso d'acqua e le acque di infiltrazione della dorsale del M. Giano trovano recapito nella sorgente lineare. Oltre al contributo diretto in alveo, sono presenti sorgenti minori ai bordi della valle, con portata media di una decina di litri al secondo, e le emergenze mineralizzate del gruppo delle Terme di Antrodoco, legate alla risalita di fluidi gassosi lungo le discontinuità legate alla faglia diretta principale che, in corrispondenza del centro abitato omonimo, ribassa la serie carbonatica a sud, determinando l'affioramento dei termini miocenici silicoclastici (Fig. 2). Da questo punto del fondovalle, la falda regionale non può affiorare, essendo tamponata al tetto dai flysch, e risultando quindi in pressione. Fa eccezione la sorgente Le Fontanelle, ubicata in corrispondenza di un piccolo affioramento di calcari neogenici, a testimonianza di una circolazione idrica contenuta nei carbonati fratturati complessivamente unitaria lungo la valle, in grado di contribuire al deflusso in corrispondenza del loro affioramento. Le sorgenti lineari di Antrodoco, pur trovando alimentazione dal rilievo del M. Giano, non possono essere considerate isolate dal deflusso regionale, in quanto in fase di magra estrema la loro portata risulta inferiore all'area di alimentazione. In altre parole, la ricarica del settore del M. Giano non viene esclusivamente drenata dalle sorgenti lineari di Antrodoco, ma travasa per connessione idraulica verso il M. Nuria; di conseguenza, in anni particolarmente siccitosi le emergenze lungo il Velino drenano soltanto parzialmente le acque provenienti da M. Giano, per la diminuzione del livello di saturazione a scala regionale.

La stessa falda regionale torna a contribuire al deflusso diretto

basis supports this interpretation model, which permits not only to measure discharge, but also to identify variations in the elevations at which drainage to the streambed starts. These elevations are lower in the most adverse years than in the other periods.

Following the Velino River course from upstream to downstream, the discharge area of the subsurface water from the above-described aquifer system may be distinguished into three sectors with different characteristics: linear springs of Antrodoco, spring group of Canetra and springs of the S. Vittorino Plain. The three areas are separated by zones where springs are sparser or altogether missing owing to well-identifiable geological features (Fig. 2): outcrops of the low-permeability flysch between Antrodoco and Canetra; enlargement of the valley between Canetra and the S. Vittorino Plain; increased thickness of deposits under the streambed; and occurrence of average-low-permeability deposits on the slopes which make up the fluvial terraces. The rising of gaseous fluids from the main discontinuities make the groundwater flow model more complex and alters the physico-chemical characteristics of the spring waters.

The spring area of Antrodoco receives the overflow of the basal groundwater, owing to the occurrence of dolomites, which have lower permeability and which outcrop along the Velino Gorges and the fluvial incision. Thus, the regional groundwater is intercepted by the river and the infiltration waters of the Mt. Giano ridge find their discharge area in the linear spring. In addition to the direct contribution to the streambed, there are minor springs at the borders of the valley with an average discharge of about ten litres per second and the mineralised springs of the Terme di Antrodoco. The water from the latter springs is affected by the rising of gaseous fluids along the discontinuities created by the local main normal fault. Indeed, at Antrodoco, this fault downthrows the carbonate series southwards, exposing siliciclastic terms of Miocene age (Fig. 2). From this point of the valley floor, the regional groundwater cannot outcrop, since the aquifer is plugged and confined by the flysch lying at its roof and thus under pressure. An exception is the Fontanelle spring, lying near a small outcrop of Neogene limestones. This spring testifies that groundwater flow within the fractured carbonates is fairly continuous along the valley, contributing to discharge at their outcrop points. The Antrodoco linear springs, though recharged by Mt. Giano, cannot be considered to be isolated from the regional discharge, since their discharge under extreme base-flow conditions is smaller than justified by their recharge area. In other words, the recharge water from the Mt. Giano sector is not drained only by the Antrodoco linear springs, but transferred by hydraulic communication towards Mt. Nuria. As a consequence, in particularly dry years, the springs along the Velino River drain the waters from Mt. Giano only in part, owing to the decrease of the saturation level at regional scale.

The same regional groundwater contributes again to direct discharge of the Velino River a little upstream of Canetra. Here, the exposed carbonate sequence of Mt. Nuria is cut by a morphological strait of the same river, with consequent direct contribution to the

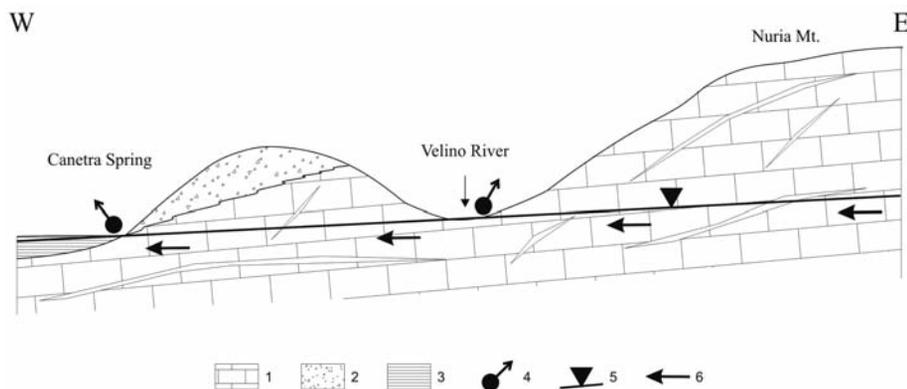


Fig. 9 - Schema di alimentazione (non in scala) della Sorgente Canetra (n° 36 in Fig. 7) nella zona della Stretta di Canetra. 1) Acquifero carbonatico; 2) Travertini; 3) Depositi quaternari; 4) Principali sorgenti; 5) Traccia della superficie piezometrica; 6) Direzione del deflusso sotterraneo

- Sketch (not to scale) of the groundwater flowpath of Canetra spring (n° 36 in Fig. 7) and Stretta di Canetra linear spring. 1) Carbonate regional aquifer; 2) Travertines; 3) Quaternary deposits; 4) Main springs; 5) Water table; 6) Direction of groundwater flowpath

del Fiume Velino poco a monte di Canetra, dove l'affioramento della successione carbonatica del M. Nuria viene inciso in una stretta morfologica dal Velino stesso, con conseguente contributo diretto in alveo della sorgente lineare denominata Stretta di Canetra. Va ribadito che in questa zona la successione carbonatica laziale-abruzzese affiora per un breve tratto anche in destra idrografica, poco a monte di Canetra. La falda regionale alimenta in corrispondenza di Canetra tutto il gruppo sorgivo omonimo, costituito oltre che dalla sorgente principale in corrispondenza del paese ( $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ), anche da diffusi drenaggi in alveo sia in destra che in sinistra idrografica, che si raccolgono in una serie di canali confluenti nel Velino immediatamente a valle. Le sorgenti poste in sinistra idrografica sono facilmente attribuibili al drenaggio da parte della base del M. Nuria, ma secondo il modello qui proposto anche le emergenze in destra idrografica vengono alimentate dallo stesso settore. In funzione dell'assetto geologico della zona di Canetra, si può escludere un contributo dalle dorsali costituenti il versante destro della valle, per la presenza della linea Olevano-Antrdoco lungo il versante. Considerate anche le caratteristiche chimiche delle acque sorgive, riconducibili ad una circolazione esclusiva nei depositi carbonatici di piattaforma, data la similitudine con le acque del Peschiera, si può ipotizzare lo schema di circolazione di seguito illustrato (Fig. 9).

La falda regionale che satura la base del M. Nuria viene intercettata dal Fiume Velino a monte di Canetra, a quota superiore a quella della sorgente principale omonima in destra idrografica. Il corso d'acqua rappresenta quindi lo sfioro della falda regionale, drenandola soltanto parzialmente; a quote inferiori immediatamente il deflusso sotterraneo, solo in parte intercettato dal Velino, trova recapito anche in destra idrografica, in corrispondenza degli affioramenti dei carbonati di piattaforma (Fig. 9). Le acque sotterranee emergono alle sorgenti di Canetra, in corrispondenza del limite di permeabilità costituito dal contatto dei carbonati in destra idrografica con i termini a minore permeabilità corrispondenti alle alluvioni della valle del Velino. Si osserva quindi l'emergenza della falda regionale del M. Nuria in corrispondenza non solo delle sorgenti di Canetra, ma anche in sorgenti lineari e localizzate poste più a valle, anche in destra idrografica (Fig. 9). Da questo punto, la circolazione idrica regionale non interessa più soltanto la principale area

streambed by the linear spring called Stretta di Canetra. It should be reiterated that a small sector of the Latium-Abruzzi carbonate sequence also outcrops in this area, on the right bank of the river, slightly uphill of Canetra. Here, the regional groundwater supplies the entire homonymous spring group, which includes not only the main spring of the village ( $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ), but also diffuse linear springs on the left and right banks of the river. These waters are collected by a number of channels reaching the Velino River immediately downstream. The left-bank springs may easily be associated with drainage from the base of Mt. Nuria. However, under the model proposed here, also the right-bank springs are supplied by the same sector. Given the geological setting of the Canetra area, water input from the ridges making up the left slope of the valley (with the Olevano-Antrdoco line) may be excluded. Considering the chemical properties of the spring waters (circulating only within the carbonate platform deposits) and their similarity to the Peschiera waters, the following groundwater flowpaths may be assumed (Fig. 9).

The regional groundwater saturating the base of Mt. Nuria is intercepted by the Velino River upstream of Canetra, at an elevation higher than the one of the homonymous main spring on its left bank. Therefore, the Velino River represents the overflow of the regional groundwater, as it drains it only in part (Fig. 9). At immediately lower elevations, the groundwater flow (partially intercepted by the Velino River) finds its discharge area also on the left bank, near the carbonate platform outcrops. The groundwater is discharged by the Canetra springs, at the permeability boundary between the right-bank carbonates and the less permeable alluvia of the Velino valley. Thus, the regional groundwater of Mt. Nuria outcrops not only at the Canetra springs but also at the linear and localised springs located more downslope and also on the left bank (Fig. 9). From here, the regional groundwater moves not only through the main recharge area of the Giano-Nuria-Velino ridges, but also through the Mt. Paterno-Canetra relief, and the Velino River separates a fairly common regional groundwater flow only at the surface.

A short section of the Velino River continues to drain the regional groundwater. However, increasing thickness of the alluvial deposits and dominance of poorly permeable sediments inside them

di alimentazione delle dorsali del Giano-Nuria-Velino, ma include anche il rilievo di M. Paterno-Canetra, con il fiume Velino a separare soltanto in superficie un deflusso regionale complessivamente unitario.

Il Velino continua per un breve tratto ad essere drenante nei confronti della falda regionale, ma l'aumento dello spessore dei depositi alluvionali e la prevalenza dei sedimenti a bassa permeabilità al loro interno, dovuta alla presenza delle sequenze di sedimentazione palustre-lacustre della Piana di S. Vittorino, causa il termine del drenaggio nell'alveo fluviale, che attraversa la piana stessa nell'alveo artificialmente rettilineo e pensile. Si verifica in questo modo l'infiltrazione dal letto del Velino verso la Piana sottostante, registrato dalle misure seriate di portata fluviale, per un decremento di portata in media di 200 L/s, anch'esso soggetto a variabilità in funzione della portata fluviale.

In corrispondenza della Piana di S. Vittorino la circolazione idrica sotterranea è ormai distinta sui due versanti: in sinistra idrografica il drenaggio è diretto verso il recapito ultimo della falda regionale, costituito dal gruppo delle Sorgenti del Peschiera, che oltre all'emergenza principale captata comprende anche sorgenti localizzate sul bordo della piana e incrementi in alveo di qualche centinaio di litri, attribuibili alla locale presenza di depositi detritici più grossolani nella sequenza alluvionale. Sul versante destro della valle, il limite di permeabilità tra i carbonati e la piana è caratterizzato da numerosi elementi tettonici, che oltre a ribassare i carbonati, influenzano la localizzazione e le caratteristiche chimico-fisiche delle emergenze (PETITTA *et alii*, 2003). Queste si localizzano sul bordo settentrionale, tra Case Paterno, Terme di Cotilia, S. Vittorino e Ortali, procedendo da est verso ovest, erogando una portata superiore di un'ordine di grandezza rispetto alla possibile alimentazione esclusiva da parte dell'unità idrogeologica di M. Paterno-Canetra. Tale evidenza supporta il modello di una circolazione unitaria proveniente dalla dorsale del M. Nuria, con comunicazione idraulica nel settore di Canetra.

Le emergenze in questo settore sono diffuse anche all'interno della piana stessa, con prevalenza nel settore settentrionale in destra idrografica, e si esplicano prevalentemente con un drenaggio nell'alveo degli emissari delle principali sorgenti, costituiti dal Fosso di Cotilia e dal Canale di S. Vittorino, alla cui confluenza, a ridosso del Velino, si misurano portate superiori a 1.5 m<sup>3</sup>/s. Il drenaggio interno alla piana è espressione di una circolazione idrica sotterranea che non viene impedita all'interno dei depositi fluvio-lacustri, costituiti da alternanze ed eteropie di limi, argille, sabbie e depositi più grossolani in prossimità dei versanti, oltre a lenti e strati di travertino aventi una buona permeabilità (Fig. 10). Alla base della sequenza continentale sono presenti i carbonati, appartenenti alle diverse unità tettoniche riconosciute, che contengono la falda regionale in pressione. Le numerose e anche ingenti dislocazioni che interessano il substrato carbonatico non garantiscono in confinamento verso l'alto della falda regionale da parte dei termini marnosi presenti nella successione e conseguentemente le acque tendono a saturare i depositi alluvionali, concentrando il flusso attivo negli orizzonti a maggiore permeabilità. Inoltre, dai rilievi carbonatici è presente localmente un travaso diretto verso i

(owing to the S. Vittorino Plain palustrine-lacustrine sedimentary sequences) put an end to drainage to the streambed and the Velino River crosses the plain in an artificially rectilinear and perched channel. Water thus infiltrates from the Velino streambed to the underlying Plain. This assumption is corroborated by measurements of fluvial discharge, which proved to decrease by 200 L/s on average. However, the extent of this decrease varies with fluvial discharge.

In the S. Vittorino Plain, the groundwater flow divides between the two slopes. On the left bank, drainage is towards the final discharge area of the regional groundwater. This area consists of the group of the Peschiera Springs, which includes not only the currently exploited main spring, but also localised springs at the edge of the plain and inflows to the streambed (some hundreds of litres) due to the local occurrence of coarser deposits in the alluvial sequence. On the right slope of the valley, the permeability boundary between the carbonates and the plain displays numerous tectonic features. These features downthrow the carbonates and affect the location and physico-chemical composition of the springs (PETITTA *et alii*, 2003). These springs lie at the northern edge, between Case Paterno, Terme di Cotilia, S. Vittorino and Ortali, proceeding from East to West. They deliver a flow of one order of magnitude higher than possible recharge by the hydrogeological unit of Mt. Paterno-Canetra alone. This finding validates the model of a common groundwater flow from the Mt. Nuria ridge with hydraulic communication in the Canetra sector.

Springs also occur inside the plain, especially in its northern sector, on the right bank. The main springs mostly discharge to the streambeds of their outlet streams (Fosso di Cotilia and Canale di S. Vittorino). At the junction of these streams (near the Velino River), the measured discharge exceeds 1.5 m<sup>3</sup>/s. Drainage inside the plain is the expression of a groundwater flow inside the fluvio-lacustrine deposits, which are made up of alternating and heteropic silts, clays, sands and coarser deposits near slopes, as well as of travertine layers and lenses with good permeability (Fig. 10). At the base of the continental sequence lie the carbonates, which belong to the various tectonic units and contain the regional confined aquifer. Owing to numerous and major dislocations of the carbonate bedrock, the regional aquifer cannot be confined upwards by the marly terms of the sequence. Consequently, water tends to saturate the alluvia and concentrate its flow in the most permeable horizons. Additionally, at local level, it may flow directly from the carbonate reliefs towards the most permeable levels of the plain. Consequently, groundwater has an active flow not only in the bedrock, but also and extensively in the well-permeable sediments of the plain. Thus, the regional groundwater outcrops in the beds of the streams furrowing the plain, even at very shallow depth, giving rise to diffuse linear springs. Conversely, drainage to the streambed is hindered in areas where the silty-clayey deposits outcrop.

Tectonic discontinuities make the groundwater flow model more complex. Mineralising fluids (containing especially CO<sub>2</sub> and

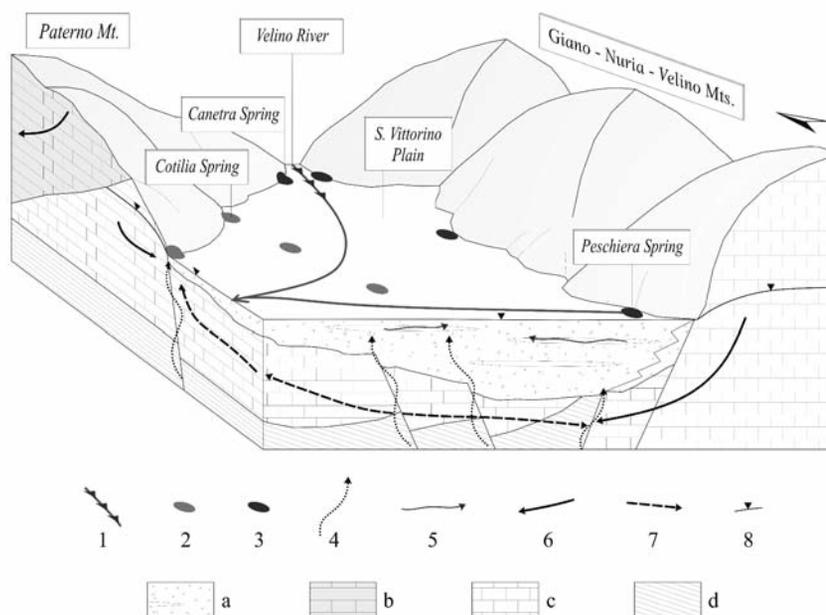


Fig. 10 - Schema della circolazione idrica sotterranea nella Piana di S.Vittorino (non in scala). 1) Corsi d'acqua (le frecce identificano la sorgente lineare); 2) Principali sorgenti mineralizzate; 3) Principali sorgenti alimentate dall'acquifero carbonatico; 4) Risalita di fluidi gassosi profondi; 5) Circolazione idrica sotterranea nei sedimenti a maggiore permeabilità della Piana; 6) Principali linee di deflusso sotterraneo dall'acquifero carbonatico; 7) Deflusso idrico profondo nel substrato carbonatico della Piana; 8) Traccia della superficie piezometrica; a) acquifero della Piana di S.Vittorino; b) acquifero carbonatico dei Monti Reatini; c) acquifero carbonatico regionale del M.Nuria, che include l'unità idrogeologica Canetra-M. Paterno; d) Depositi sinorogenici a bassa permeabilità

- Sketch (not to scale) of groundwater circulation in the S.Vittorino Plain. 1) Rivers (arrows identify linear springs); 2) Main mineralized springs; 3) Main spring fed by regional carbonate aquifer; 4) Deep gaseous up-lift; 5) Groundwater flowpaths in the high-permeability levels into the Plain; 6) Groundwater flowpaths of the carbonate aquifer; 7) Groundwater flowpaths in the buried carbonate bedrock of the Plain; 8) Water table; a) S.Vittorino plain aquifer; b) Reatini Mt. carbonate aquifer; c) Regional carbonate aquifer of Nuria Mt., including hydrogeological unit of Canetra-Paterno Mt.; d) Sinorogenic deposits having low permeability

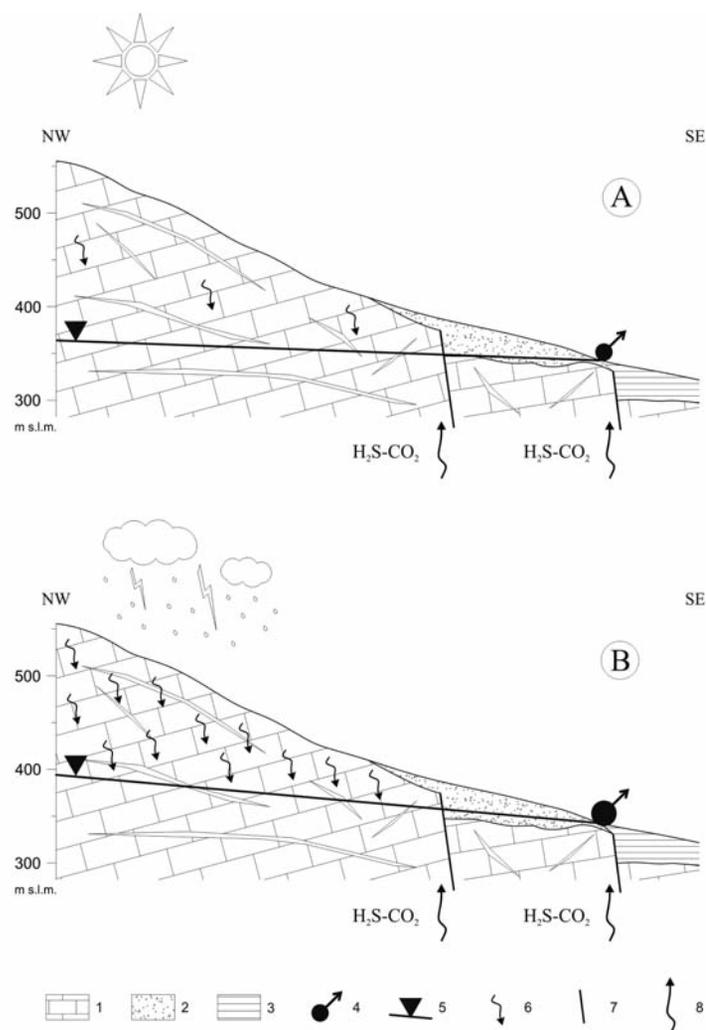
livelli più permeabili della piana. Conseguentemente, nella piana si verifica circolazione idrica non solo nel substrato, ma anche diffusamente nei sedimenti a buona permeabilità presenti. Ciò determina l'affioramento della falda regionale negli alvei dei corsi d'acqua che solcano la piana stessa anche a profondità molto ridotte, comportando la presenza di sorgenti lineari diffuse. Il drenaggio in alveo risulta invece impedito nelle zone di affioramento dei depositi limoso-argillosi.

Un ulteriore elemento che rende più complesso il modello di circolazione idrica sotterranea è costituito dalle discontinuità tettoniche lungo le quali avviene la risalita di fluidi mineralizzanti, con particolare riferimento alla  $CO_2$  e ad  $H_2S$ . Senza entrare nel merito della genesi e dell'evoluzione di tali fluidi (ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2004), in questa sede si intende soltanto evidenziarne il ruolo nella differenziazione delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque sotterranee e nella ubicazione di alcuni gruppi sorgivi. La principale conseguenza idrogeologica della risalita dei fluidi lungo le discontinuità è la mineralizzazione di alcune emergenze e gruppi sorgivi localizzati in corrispondenza di tali discontinuità, dove avviene una miscelazione tra i contributi profondi e la falda regionale proveniente dall'acquifero carbonatico. Tali mineralizzazioni possono interessare sia sorgenti localizzate di portata minima (dell'ordine del litro al secondo), sia emergenze di maggiore importanza, quali le Terme di Cotilia (oltre 200 L/s

$H_2S$ ) rise along these discontinuities. Without entering into details about the origin and evolution of these fluids (ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2004), they unquestionably play a key role in differentiating the physico-chemical composition of subsurface water and the location of some groups of springs. The main hydrogeological consequence of the upward movement of fluids along discontinuities is mineralisation of some nearby springs and spring groups. Indeed, these discontinuities mark the point of mixing between deep subsurface water and regional groundwater from the carbonate aquifer. Mineralisation may occur both in localised springs with very low discharge (in the range of one litre per second) and more important springs, such as the Terme di Cotilia springs (average discharge: over 200 L/s) and the S. Erasmo seeps (total discharge: about 100 L/s). This effect is manifest in the localised springs close to the main tectonic lines, which thus represent hot spots of mineralising fluid influence. In some cases, this also happens inside the plain, suggesting that these weakness lines in the bedrock may also extend to recent covers. More generally, all the springs inside and at the margins of the S. Vittorino Plain have signs of water mixing, albeit less marked. This means that deep fluids mix with the groundwater contained in the most permeable levels and thus that the direct contributions from the carbonate aquifer may be discriminated from

Fig. 11 - Schema della variabilità idrochimica in funzione della ricarica nella zona di Molino Paterno (n°57 in Tabella 2). A: fase di esaurimento della sorgente; B: fase di ricarica. La differenza di ricarica stagionale, a parità di contributo dei fluidi profondi, determina, oltre alle variazioni di portata, un differente contenuto in solfati nelle acque sorgive. 1) Acquifero carbonatico; 2) Depositi detritici di versante e travertinosi dei terrazzi fluviali; 3) Depositi alluvionali di fondovalle; 4) Sorgente Molino Paterno; 5) Traccia della superficie piezometrica; 6) Infiltrazione efficace dovuta alla ricarica dell'acquifero; 7) Principali faglie; 8) Risalita dei fluidi gassosi lungo le discontinuità

- *Schema of hydrochemical variation due to recharge/exhaustion cycle for Molino Paterno spring (Mt. Paterno Unit, n°57 in Table 2). A) Recharge stage; B) Exhaustion stage. Differences of recharge period are shown, affecting not only spring discharge, but sulphate contents too. 1) Carbonate regional aquifer; 2) Detrital fan and travertines of river terraces; 3) Alluvial deposits; 4) Molino Paterno spring; 5) Water table; 6) Infiltration due to the aquifer recharge; 7) Main faults; 8) Gaseous deep fluids up-lift along discontinuities*



di portata media) e le polle di S. Erasmo (circa 100 L/s complessivi). Questo effetto risulta molto evidente sulle sorgenti localizzate in corrispondenza delle principali linee tettoniche, a rappresentare degli hot-spot dell'influenza dei fluidi mineralizzanti. In alcuni casi ciò avviene anche all'interno della piana, indicando che tali linee di debolezza presenti nel substrato possono interessare anche le coperture recenti. Più in generale, tutte le sorgenti poste nella piana di S. Vittorino e ai suoi margini evidenziano fenomeni di mixing, anche se meno marcato, ad indicare una diffusione nei livelli più permeabili dei fluidi di origine profonda mescolati all'acqua di falda in essi contenuta, consentendo di distinguere i contributi diretti dall'acquifero carbonatico da quelli relativi alla circolazione nella piana. Si possono distinguere, dal punto di vista idrochimico, le acque del circuito carbonatico (Gruppo B in Fig. 5) rappresentate dalle Sorgenti del Peschiera e dal gruppo di Canetra da quelle del circuito della piana, sempre alimentate dall'acquifero carbonatico regionale, ma influenzate gradualmente dall'effetto dei fluidi prevalentemente gassosi circolanti nell'acquifero multifalda della piana (Gruppo A in Fig. 5): ciò è particolarmente evidente nelle

the flows in the plain. Hydrochemically, the water from the carbonate aquifer (Peschiera springs and Canetra spring group) may be distinguished from the one of the plain, which is also recharged by the regional carbonate aquifer (B group in Fig. 5) but gradually affected by the dominantly gaseous fluids circulating in the multi-layered aquifer of the plain (A group in Fig. 5). This is particularly evident in sulphurous springs, such as those of the Terme di Cotilia, and in some ferruginous minor springs. But increasing sulphate content is observed also in other springs, such as those of S. Vittorino and Molino Paterno. In the latter cases, mixing of the two groundwaters is demonstrated by seasonal variations in sulphate contents, respect to the stability of other ions (Fig. 11). In periods of maximum piezometric level, discharge from the regional carbonate aquifer is higher, with a more diluting effect on the deep groundwater, which is considered to be constant over time. In periods of minimum flow, sulphate concentrations are higher owing to a smaller contribution by the carbonate aquifer, influence of deep groundwater remaining equal.

sorgenti solfuree quali Terme di Cotilia e in alcune sorgenti minori di tipo ferruginoso, ma l'aumento del contenuto in solfati è identificabile anche sulle altre sorgenti, quali S. Vittorino e Molino Paterno. In questi ultimi casi, la miscelazione tra i due circuiti è dimostrata dalle variazioni stagionali della concentrazione in solfati (Fig. 11): durante la fase di massimo piezometrico, la portata proveniente dall'acquifero carbonatico regionale è maggiore, provocando una maggiore diluizione del contributo profondo, considerato stabile nel tempo; in fase di magra, le concentrazioni dei solfati sono più elevati, tenuto conto del minore contributo dell'acquifero carbonatico, a parità di influenza del circuito profondo.

Infine, il mixing dei due circuiti idrici sotterranei può rappresentare il motore principale dell'evoluzione dei fenomeni di sinkhole osservati nella piana, la cui occorrenza è maggiore in corrispondenza delle principali discontinuità o della loro proiezione in superficie (CAPELLI *et alii*, 2000). Le modificazioni delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque dovute all'arrivo dei gas mineralizzanti agiscono direttamente sull'aggressività delle acque di falda nei confronti del carbonato di calcio; le acque sature rispetto alla calcite provenienti dall'acquifero carbonatico vedono modificato il loro equilibrio e provocano dissoluzione dei termini carbonatici (SALVATI & SASOWSKY, 2002), che costituiscono i costituenti fondamentali dei sedimenti a maggiore granulometria e dei travertini presenti nella sequenza di riempimento della piana; in tal modo si costituiscono cavità, anche a ridotta profondità, in grado di ampliarsi fino allo sprofondamento del tetto costituito da termini coesivi argillosi. Le acque sotterranee della piana presentano secondo questo modello non solo una miscelazione generale in senso orizzontale, con presenza di hot-spot a maggiore mineralizzazione in corrispondenza delle principali discontinuità, ma anche una stratificazione orizzontale, con acque maggiormente mineralizzate nei livelli più permeabili, come osservato nei log chimico-fisici eseguiti nei principali sinkholes (Fig. 12).

## CONCLUSIONI

La media valle del Fiume Velino è sede di gruppi sorgivi di portata molto elevata, per un totale di oltre 26 m<sup>3</sup>/s di magra ordinaria, tra sorgenti puntuali e lineari, alimentate dal sistema idrogeologico dei Monti Giano-Nuria-Velino. Il flusso idrico sotterraneo si dirige verso la valle, nel settore compreso tra Antrodoco e la Piana di S. Vittorino, dove i limiti di permeabilità dell'acquifero carbonatico si trovano alle quote topografiche più basse. All'alimentazione contribuisce anche l'unità idrogeologica minore di M.Paterno-Canetra, che si trova in continuità idraulica con il sistema idrogeologico citato, nonostante si trovi dall'altro lato della valle del Velino. In particolare, questa unità svolge il ruolo di trasferimento e destinazione finale di una buona aliquota del flusso idrico sotterraneo del sistema idrogeologico principale (sorgenti del gruppo Canetra, Case Paterno, Terme Cotilia, S. Vittorino). Considerando un'area complessiva di ricarica di circa 1020 km<sup>2</sup>, è stata calcolata un'infiltrazione efficace con il metodo diretto (BONI *et alii*, 1986) di circa 900 mm/anno, in

Finally, mixing of the two groundwaters may be the key factor controlling the sinkhole phenomena observed in the plain. In effect, sinkholes are more frequent near the main discontinuities or their outcrops (CAPELLI *et alii*, 2000). The change in the physico-chemical composition of waters due to their interaction with mineralising fluids has a direct impact on aggressiveness on calcium carbonate. Calcite-saturated waters from the carbonate aquifer change their equilibrium, thus dissolving the carbonate terms (SALVATI & SASOWSKY, 2002). These terms are the fundamental constituents of the more coarse-grained sediments and travertines in the sequence which fills the plain. Hence, cavities develop even at shallow depth and extend until their roof, consisting of coeval clayey terms, collapses. Under this model, the groundwaters of the plain are generally supposed not only to mix horizontally (with higher-mineralization hot spots near the main discontinuities), but also to stratify horizontally, with more mineralised waters in the most permeable levels, as evidenced by physico-chemical logs in the main sinkholes (Fig. 12).

## CONCLUSIONS

The middle valley of the Velino River hosts groups of springs with very high discharge (total discharge under normal base-flow conditions: over 26 m<sup>3</sup>/s). These groups include localised and linear springs, which are supplied by the Giano-Nuria-Velino Mts. hydrogeological system. Groundwater moves downhill towards the area extending between Antrodoco and the S. Vittorino Plain. Here, the permeability boundaries of the carbonate aquifer lie at the lowest topographic elevations. Recharge is also provided by the minor Mt. Paterno-Canetra hydrogeological unit, which is in hydraulic continuity with the above-mentioned hydrogeological system, despite the fact that it lies on the other side of the Velino valley. In particular, this unit transfers a significant portion of groundwater from the main hydrogeological system to its final destination (Canetra, Case Paterno, Terme Cotilia, S. Vittorino springs). Considering an overall recharge area of 1,020 km<sup>2</sup>, the directly calculated (BONI *et alii*, 1986) effective infiltration is equal to roughly 900 mm/year, in line

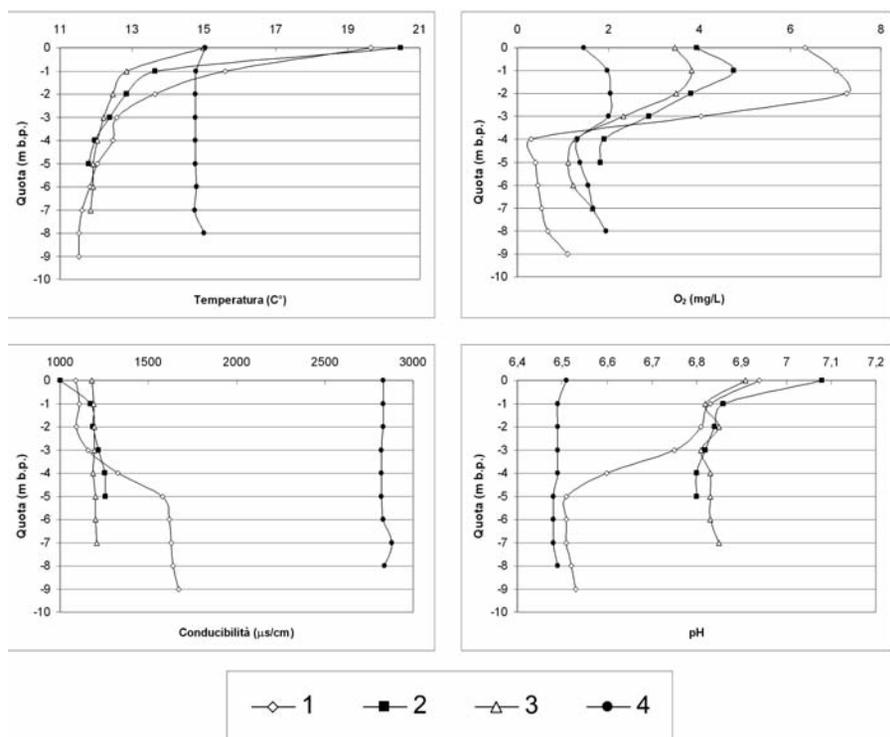


Fig. 12 - Log chimico-fisici nei principali sinkholes e in un pozzo della Piana di S.Vittorino. La localizzazione è riportata in Fig. 4. 1) Sinkhole Lago Rotondo (C in Fig. 4); 2) Sinkhole Bruschini (D in Fig. 4); 3) Sinkhole dell'argine (E in Fig.4); 4) Pozzo delle Terme di Cotilia (A in Fig. 4)

- Physical-chemical logs in sinkholes and a well of the S.Vittorino Plain. Location is shown in Fig. 4. 1) Sinkhole "Rotondo Lake" (C in Fig. 4); 2) Bruschini Sinkhole (D in Fig. 4); 3) Sinkhole close to the Velino River (E in Fig. 4); 4) Terme di cotilia well (A in Fig. 4)

conformità con quanto definito dagli Autori precedenti citati.

Le modalità di emergenza delle acque sorgive sono condizionate sia dall'incisione del Fiume Velino nel substrato fino alla sua quota di saturazione (sorgenti lineari di Antrodoco e Canetra), che dal contatto con i depositi quaternari di riempimento della valle del Velino e della piana intramontana di S. Vittorino, che determinano la localizzazione di sorgenti puntuali anche di rilevante portata (gruppo di Canetra), ma permettono anche il travaso della risorsa idrica sotterranea all'interno dell'acquifero multifalda della piana, dove il flusso si concentra negli orizzonti a maggiore granulometria e permeabilità. Il livello di base del sistema idrogeologico di alimentazione è rappresentato dalle Sorgenti del Peschiera, che con 17 m<sup>3</sup>/s di portata media, parzialmente captati per l'approvvigionamento idrico di Roma, erogano oltre il 65% delle risorse rinnovabili.

Il regime di portata delle sorgenti non presenta grande variabilità su scala stagionale, per le modalità di recapito, l'assenza di un reticolo carsico evoluto e l'ampiezza dell'area di ricarica che modula le variazioni stagionali dell'infiltrazione efficace. Le indagini, svolte in periodo di magra ordinaria e durante fasi particolarmente siccitose, hanno evidenziato una variabilità pluriennale molto marcata per i gruppi sorgivi posti a quote più elevate (sorgenti lineari di Antrodoco e di Canetra, quote comprese tra 475 e 435 m s.l.m.) e viceversa maggiore stabilità per le sorgenti localizzate in prossimità del livello di base, costituito dalla Piana di S. Vittorino (circa 405 m s.l.m.) (Fig. 8). Ciò conferma la presenza di una circolazione idrica a scala regionale continua in tutto l'acquifero, che trova recapiti differenti per situazioni geologico-strutturali locali.

with the reports by the above-cited authors.

Location of springs depends on both the Velino River incision into the bedrock, down to its saturation elevation (linear springs of Antrodoco and Canetra), and on their contact with the Quaternary deposits which fill the Velino valley and the S. Vittorino intramontane basin. These factors are responsible for localised springs (Canetra group), even with significant discharge, but also permit groundwater to travel inside the multi-layered aquifer of the plain and to concentrate in the more coarse-grained and more permeable horizons. The base level of the recharging hydrogeological system is represented by the Peschiera springs. These springs, which have an average discharge of 17 m<sup>3</sup>/s and are partially tapped for water supply to the city of Rome, deliver over 65% of renewable resources.

Spring discharge does not change significantly in the various seasons owing to: mode of discharge, absence of an evolved karst network and width of the recharge area, which modulates seasonal changes in effective infiltration. The investigations conducted in normal base-flow and particularly dry periods showed that the spring groups at higher elevation (linear springs of Antrodoco and Canetra, at 475-435 m a.s.l.) have highly variable discharge over the years (Fig. 8). By contrast, the springs near the base level, i.e. the S. Vittorino Plain (at about 405 m a.s.l.), have more constant discharge. This confirms that, at regional scale, water flows continuously throughout the aquifer and finds different discharge points, depending on local geological and structural features.

The groundwater circulating in the multi-layered aquifer of the

La circolazione nell'acquifero multifalda della piana di S. Vittorino, alimentato dai travasi degli acquiferi carbonatici presenti sui due lati della valle, è condizionato dalla risalita di fluidi mineralizzanti prevalentemente gassosi, che modificano le caratteristiche chimico-fisiche delle acque sotterranee, determinando l'emergenza di acque ad elevata mineralizzazione in settori dove è evidente l'influenza della tettonica recente, che ha disarticolato il substrato carbonatico sotto la Piana stessa; inoltre, le variazioni di chimismo interessano più diffusamente tutto l'acquifero multifalda, evidenziando un mixing tra le acque provenienti direttamente dalle aree di ricarica carbonatiche e quelle con circolazione prevalente nella piana. Inoltre il miscelamento dei circuiti idrici sotterranei rinnova la capacità di dissoluzione delle acque circolanti nei livelli più permeabili di natura carbonatica, favorendo lo sviluppo dei fenomeni di sinkholes diffusi nella Piana di S. Vittorino.

I risultati ottenuti dalle ricerche eseguite hanno confermato le ipotesi di circolazione proposte dagli autori precedenti (BONI *et alii*, 1986; BONI & PETITTA, 1994; BONI *et alii*, 1995; CELICO, 1983), consentendo una più dettagliata definizione delle modalità di recapito dell'esteso sistema idrogeologico dei Monti Giano-Nuria-Velino, attraverso la distinzione in tre aree di recapito con distinte caratteristiche (AnTRODoco, Canetra e Piana di S. Vittorino). Il caso in esame è rappresentativo dei rapporti tra acquiferi carbonatici e depositi alluvionali e intramontani plio-quadernari in Appennino Centrale, con particolare riferimento al duplice ruolo giocato da questi ultimi nella destinazione delle ingenti risorse rinnovabili presenti nei primi. La granulometria variabile dei depositi delle piane intramontane determina infatti dei limiti di permeabilità che consentono l'emergenza di buona parte della risorsa idrica proveniente dai rilievi carbonatici, ma anche il suo parziale travaso e conseguente saturazione dei depositi quadernari, a loro volta interagenti con la rete idrografica superficiale. Il contesto geologico-strutturale e soprattutto la tettonica distensiva recente influenzano ulteriormente l'assetto idrogeologico, determinando la localizzazione dei punti di emergenza e l'eventuale mixing con fluidi di provenienza profonda in grado di modificare le caratteristiche idrochimiche delle acque sorgive e sotterranee.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

Diversi colleghi hanno collaborato ai rilievi nel corso degli anni: oltre al Prof. Carlo Boni, grazie al quale ho iniziato ad occuparmi di Idrogeologia proprio nella Valle del Fiume Velino, si intende ringraziare Giuseppe Capelli, Marco Tallini, Maurizio Barbieri, Paola Tuccimei e il tecnico Giosy Benedetti. Le attività sono state svolte con la collaborazione di numerosi studenti, tra cui Francesco Cocco, Cristina Crisciotti, Gianluca Bianchi Fasani, Marcello Cesarini, Alessandro Uzzo, Francesco Del Monaco, Giancarlo Mondello, Vito Cicconi, Isabella Quattrocchi e Marica Capocasale. Per la parte grafica si segnala il supporto di Alessandro Lacchini e Valentina Marinelli.

#### OPERE CITATE/REFERENCES

ACCORDI G. & CARBONE F. (Ed.) (1988) - *Carta delle litofacies del Lazio-Abruzzo ed aree limitrofe*. C.N.R., Prog. Fin. Geod., Quaderni Ric. Scient., **114** (5).

S. Vittorino Plain is recharged by inflows from the carbonate aquifers lying on the two sides of the valley and affected by the upward movement of dominantly gaseous mineralising fluids. These fluids change the physico-chemical composition of the groundwaters and give rise to highly mineralised springs in areas of clear influence of recent tectonic movements, which dismembered the carbonate bedrock beneath the plain. Moreover, water chemistry variations are recorded throughout the multi-layered aquifer, suggesting that the waters coming directly from carbonate recharge areas interchange with those mostly circulating in the plain. This mixing enhances the dissolution capability of the groundwater flowing in the most permeable carbonate levels, inducing diffuse sinkholes in the plain.

The findings from the above research substantiated the groundwater flow assumptions proposed by the previous authors (BONI *et alii*, 1986; BONI & PETITTA, 1994; BONI *et alii*, 1995; CELICO, 1983), giving greater insight into the mode of discharge of the wide hydrogeological system of the Giano-Nuria-Velino Mts. Indeed, three discharge areas with distinct characteristics (AnTRODoco, Canetra and S. Vittorino Plain) were identified. The case study exemplifies the relationships between the carbonate aquifers and alluvial and intramontane deposits of Plio-Quaternary age in the central Apennines. It also sheds more light on the twofold role that these deposits play in controlling the points of discharge of the huge renewable resources contained in such aquifers. Indeed, grain size variations in the deposits of the intramontane plains create permeability boundaries. These boundaries allow most of the water coming from the carbonate reliefs to come to the surface, but also to travel in part and thus saturate the Quaternary deposits, which interact in turn with the surface catchment area. The geological-structural setting and, above all, the recent extensional tectonic activity have further affected the hydrogeological environment, determining the location of springs and the possible mixing of groundwaters and spring waters with deep fluids capable of altering their hydrochemical properties.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

Several colleagues have collaborated to the surveys along time: apart from Prof. Carlo Boni, who introduced me to Hydrogeology and to Velino River Valley in particular, I would like to thank Giuseppe Capelli, Marco Tallini, Maurizio Barbieri, Paola Tuccimei and the technician Giosy Benedetti. Data are collected with the collaboration of several students: Francesco Cocco, Cristina Crisciotti, Gianluca Bianchi Fasani, Marcello Cesarini, Alessandro Uzzo, Francesco Del Monaco, Giancarlo Mondello, Vito Cicconi, Isabella Quattrocchi and Marica Capocasale. The graphical support is due to Alessandro Lacchini and Valentina Marinelli.

## HYDROGEOLOGY OF THE MIDDLE VALLEY OF THE VELINO RIVER AND OF THE S. VITTORINO PLAIN (RIETI, CENTRAL ITALY)

- ADINOLFI FALCONE R., FALGIANI A., PARISSÉ B., PETITTA M., SPIZZICO M., TALLINI M. (2008) *Chemical and isotopic ( $^{18}O$ ‰,  $^2H$ ‰,  $^{13}C$ ‰,  $^{222}Rn$ ) multi-tracing for groundwater conceptual model of carbonate aquifer (Gran Sasso INFN underground laboratory - central Italy)*. Journal of Hydrology, **357**: 368-388.
- ANNUNZIATELLIS A., BEAUBIEN S.E., CIOTOLI G., LOMBARDI S., NISIO S., NOLASCO F. (2004) - *Studio dei parametri geologici e geochimici per la comprensione dei meccanismi genetici degli sprofondamenti nella Piana di S.Vittorino (RI)*. Atti 1° Seminario sullo Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio, Roma maggio 2004, 63-81.
- BARBERI R. & CAVINATO G.P. (1993) - *Analisi sedimentologica ed evoluzione paleogeografica del settore meridionale del bacino di Rieti*. Studi Geologici Camerti, volume speciale **1992/1**: 39-53.
- BERSANI P., BIAGI P.F., FERRANTI C. & PIOTTI A. (2000) *Gli sprofondamenti della Piana di S.Vittorino (Rieti)*. Il Tevere, 39-48.
- BONI, C., BONO, P. & CAPELLI, G. (1986) *Schema Idrogeologico dell'Italia centrale, scale 1/500.000*. Mem. Soc. Geol.It. **35**: 991-1012.
- BONI C., CAPELLI G. & PETITTA M. (1995) - *Carta idrogeologica della alta e media valle del fiume Velino* - Univ. "La Sapienza", Com. Mont. Velino VI zona.
- BONI C. & PETITTA M. (1994) - *Sorgenti lineari e valutazione dell'infiltrazione efficace in alcuni bacini dell'Italia Centrale*. Quad. Geol. Appl., **1/94**: 99-113.
- BONI C. & PETITTA M. (2001) - *Studio idrogeologico dell'area compresa tra il Fiume Velino e le pendici di M.Paterno, nel comune di Castel S. Angelo (Ri)*. Relazione Tecnica, Regione Lazio, Dipartimento di Scienze della Terra Università "La Sapienza".
- CAPELLI G., SALVATI R. & PETITTA M. (2000) - *Relationships between catastrophic subsidence hazards and groundwater in the Velino Valley (Central Italy)*. Proceedings Sixth Int. Symposium on Land Subsidence. Ravenna, September 2000, **1**: 123-135.
- CAPOTORTI F., FUMANTI F. & MARIOTTI G. (1995) - *Evoluzione tettonico-sedimentaria e strutturazione del settore di piattaforma carbonatica laziale-abruzzese nell'alta valle del F. Velino*. Studi Geologici Camerti, vol.spec.**1995/2**: 101-112.
- CARRARA C., BRUNAMONTE F., FERRELLI L., LORENZONI L., MARGHERITI L., MICETTI A.M., RAGLIONE M., ROSATI M. & SERVA L. (1992) - *I terrazzi della medio-bassa valle del Fiume Velino*. Studi Geologici Camerti, **1992/1**: 97-102.
- CASINI S., MARTINO S., PETITTA M. & PRESTININZI A. (2006) - *A physical analogue model to analyse interactions between tensile stresses and dissolution in carbonate slopes*. Hydrogeology Journal, **14**: 1387-1402.
- CASTELLARIN A., COLACICCHI R. & PRATURLON A. (1978) - *Fasi distensive, trascorrenze e sovrascorrimenti lungo la "Linea Ancona-Anzio", dal Lias al Pliocene*. Geol. Romana **17**: 161-189.
- CAVINATO G.P. & DE CELLES P.G. (1999) - *Extensional basins in the tectonically bimodal central Apennines fold-thrust belt, Italy : response to corner flow above a subducting slab in retrograde motion*. Geology, **27**: 956-959.
- CELICO P. (1983) - *Schema idrogeologico dell'Appennino carbonatico centro-meridionale*. Memorie e Note dell'Istituto di Geologia Applicata, Napoli, XIV
- CENTAMORE E., NISIO S. & ROSSI D. (2004) - *Aspetti geologico-strutturali in relazione alla formazione della "Sinkhole Plain" di S.Vittorino*. Atti 1° Seminario sullo Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio, Roma maggio 2004, 285-297
- CENTAMORE E., NISIO S. & ROSSI D. (2009) - *The San Vittorino sinkhole plain: relationships between bedrock structure, sinking processes, seismic events and hydrothermal springs*. Italian Journal of Geosciences, **126**.
- CIOTOLI G., DI FILIPPO M., NISIO S. & ROMAGNOLI C. (2001) - *La piana di S.Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, geomorfologici, geofisici e geochimici*. Proceedings VI° Congresso Giovani Ricercatori Geologia Applicata. Mem.Soc.Geol.It. **56**: 297-308.
- DALL'AGLIO M. & CAMPANILE, R. (1996) - *Rinaturalizzazione del bacino del Fiume Tevere alla luce dei peculiari caratteri geochimici del suo bacino. Caratterizzazione geochimica delle acque del bacino del Fiume Velino*. 4° Seminario Int. Association for Environmental Design "Rinaturalizzazione fluviale". Roma, March 1996, 78-97.
- FACCENNA C., FLORINDO F., FUNICIELLO R. & LOMBARDI, S. (1993) - *Tectonic setting and sinkhole features: case histories from western Central Italy*. Quaternary Proceedings, **3**: 47-56.
- MARINELLI R. (1995) - *Terra fluttuante: la bonifica della piana di S.Vittorino di Cittaducale*, in "Le Terre Contese", Comune di Borgovelino, 15-114
- MARTINO S., PRESTININZI A., SCARASCIA MUGNOZZA G. (2004) - *Geological evolutionary model of a gravity-induced slope deformation in the carbonate Central Apennines (Italy)*. Q J Eng Geol Hydrogeol **37**:31-47.
- MENOTTI R.M., MILLESIMI F. & PETITTA M. (1999) - *La piana di S.Vittorino (Rieti) tra dissesto idrogeologico, valenze ambientali e sviluppo antropico*. Accademia Nazionale dei Lincei, "Il rischio idrogeologico e la difesa del suolo", ottobre 1998, Roma, Atti dei Convegni Lincei **154**: 327-333.
- PAROTTO M. & PRATURLON A. (1975) - *Geological summary of the Central Apennines*. In: OGNIBEN L., PAROTTO M. & PRATURLON A. (Eds.) - Structural Model of Italy. Quad. Ric. Scient., **90**: 257-311.
- PETITTA M., TALLINI M., BENEDETTI G. & DEL MONACO F. (2003) - *Fracture pattern influence on groundwater discharge along the tectonic border of kars aquifers (Velino Valley, Central Italy)*. Proceedings Groundwater in fractured rocks, Int. Congress of IAH, Prague, 85-86.
- SALVATI R. & SASOWSKY I.D. (2002) - *Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge*. Journal of Hydrology, **264**: 1-12.
- SOLIGO M., TUCCIMEI P., BARBERI R., DELITALA M.C., MICCADEI E & TADDEUCCI A. (2002) - *U/Th dating of freshwater travertine from Middle Velino Valley (Central Italy): paleoclimatic and geological implications*. Palaeo3, **184** (1-2), August 2002, 147-161 Elsevier Science B.V.

Received January 2009 - Accepted March 2009

