

# IMPATTO DELL'ATTIVITÀ AGRICOLA SULLA RISORSA IDRICA NELLA PIANA DEL FUCINO (ITALIA CENTRALE)

## IMPACT OF FARMING ON THE WATER RESOURCES OF THE FUCINO PLAIN (CENTRAL ITALY)

MARCO PETITTA

Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Scienze della Terra - Piazzale Aldo Moro, 5 - 00185 Roma, Italy. E-mail: marco.petitta@uniroma1.it

### RIASSUNTO

Nell'ultimo decennio è stata intrapresa una ricerca sull'idrogeologia della Piana del Fucino e dei massicci circostanti, avente lo scopo di valutare le interferenze tra ciclo idrologico e attività agricole, attraverso l'acquisizione di dati meteorologici, di portata delle sorgenti e dei canali, piezometrici con monitoraggio in continuo, idrochimici estesi a nitrati e pesticidi. Si è in tal modo valutato l'impatto delle attività agricole sia in termini di utilizzo e depauperamento della risorsa idrica sotterranea, che in funzione della distribuzione e dell'aumento del contenuto di fertilizzanti e pesticidi nelle acque. L'aggiornamento dei dati idrogeologici conferma la notevole disponibilità idrica sotterranea, dettagliando i rapporti tra le aree di ricarica e quelle di recapito delle risorse contenute negli acquiferi carbonatici fratturati. Al contempo, in funzione degli accresciuti fabbisogni e prelievi idrici per irrigazione, si è manifestato un evidente squilibrio a scala stagionale, che nei periodi siccitosi determina l'estrema diminuzione dei deflussi, l'abbassamento significativo dei livelli piezometrici e l'aumento proporzionale del contenuto in nitrati e pesticidi. Ciò prefigura scenari futuri di possibile emergenza, nonostante la favorevole limitata vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Vengono infine proposti strumenti operativi finalizzati a una moderna gestione integrata della risorsa idrica, nel rispetto delle esigenze antropiche e della conservazione delle caratteristiche ambientali.

**TERMINI CHIAVE:** *risorsa idrica, agricoltura, bilancio idrologico, nitrati, monitoraggio piezometrico*

### INTRODUZIONE

La Piana del Fucino, a seguito della bonifica ottocentesca dell'omonimo lago, ha assunto una spiccata vocazione agricola, anche in virtù della abbondante disponibilità idrica, dovuta ad un assetto idrogeologico estremamente favorevole, in grado di garantire anche in magra ingenti volumi di acque sorgive. Gli ultimi decenni hanno registrato l'affermazione di colture orticole che, in quanto fortemente idroesigenti, hanno determinato una graduale diminuzione della risorsa idrica disponibile. A seguito dell'occorrenza di limitate ma intense crisi idriche, registrate nel 1990, poi ripetutesi nel 2002 e nel 2008, è stato intrapreso, in collaborazione e con il finanziamento dell'ARSSA (Agenzia Regionale per i Servizi di Sviluppo Agricolo) di Avezzano,

### ABSTRACT

During the last decade an hydrogeological study has been developed in the Fucino Plain (Abruzzo Region, Italy) and in the surrounding carbonate aquifers, with the aim of evaluating the relationships between hydrology and agriculture. Meteorological data, discharges of spring and channels, water table monitoring and hydrogeochemical data, including nitrates and pesticides, have been acquired. Results allowed the evaluation of the agricultural impact on groundwater resources, both for management and overexploitation and for nitrate and pesticide content in waters. Updating of hydrogeological data confirmed the abundant groundwater availability, looking into relationships between recharge and discharge areas of carbonate aquifers. In addition, taking into account the increase of irrigation requirements and withdrawals, a clear seasonal unbalance has been observed. During drought periods this fact causes the dramatic discharge decrease, the sharp lowering of the water table and the related increase of nitrate and pesticide contents. Possible emergencies can be depicted by future scenarios, despite to the limited groundwater vulnerability. New operative instruments are suggested to obtain a modern integrated management of water resource, taking into account human requirements and environmental protection.

**KEY WORDS:** *water resource, agriculture, hydrological budget, nitrates, water table monitoring*

### INTRODUCTION

After the reclamation of Lake Fucino in the 19<sup>th</sup> century, farming became the economic mainstay of the homonymous plain. This activity was favoured, among others, by abundant water supply, as the local hydrogeological setting could supply huge volumes of spring water even in low-flow periods. In the past few decades, however, horticultural crops have become dominant. These crops, which require large amounts of water, have gradually decreased available water resources. Limited but intense water deficits were recorded in 1990, 2002 and 2008. As a result of these deficits, a hydrological and hydrogeological study of water resources in the Fucino Plain (BURRI & PETITTA, 1999; BURRI *et alii*, 2003a; BURRI & PETITTA, 2004; PETITTA

uno studio idrologico e idrogeologico della risorsa idrica nel Fucino (BURRI & PETITTA, 1999; BURRI *et alii*, 2003a; BURRI & PETITTA, 2004; PETITTA *et alii*, 2005), affiancato da analoghe attività di monitoraggio delle pratiche agricole. In questo contesto, per dieci anni sono stati raccolti ed elaborati, riesaminando il contesto idrogeologico, nuovi dati idrologici, idrogeologici e idrochimici (portate di corsi d'acqua e sorgenti, livelli piezometrici nei pozzi, prelievi idrici da parte di enti pubblici e privati, parametri idrodinamici degli acquiferi, chimismo delle acque superficiali e sotterranee, eventuale presenza di composti inquinanti di origine agricola, valutazione della vulnerabilità degli acquiferi), al fine di poter determinare quantitativamente e anche dal punto di vista della qualità, quali conseguenze abbia avuto e possa avere nell'immediato futuro la variazione accertata nelle pratiche agricole della piana.

Questo lavoro espone sinteticamente i risultati della ricerca, con l'ausilio della carta idrogeologica allegata. Il fine ultimo della ricerca è rappresentato dalla proposta di un modello di gestione della risorsa idrica, quale strumento per la futura pianificazione e per la previsione di eventuali eventi negativi (penuria idrica e/o inquinamento delle acque superficiali e sotterranee) che dovessero determinarsi alla luce della nuova situazione idrica e agricola della piana del Fucino.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il bacino idrografico del Fucino si estende per quasi 900 km<sup>2</sup>, includendo la piana del Fucino, ampia circa 200 km<sup>2</sup> corrispondente all'estensione dell'antico lago, i versanti circostanti e la valle del Fiume Giovenco, unico affluente perenne della Piana. L'origine della piana endoreica è connessa all'intensa attività tettonica plio-quadernaria, sin- e post-orogena, che in diversi settori dell'Appennino centrale ha dato origine a bacini continentali estensionali, noti come "conche intramontane". L'assetto tipico di questi bacini appenninici vede la presenza di faglie normali ad alto angolo, a direzione principale NW-SE e E-W, che disarticolano dorsali prevalentemente carbonatiche meso-cenozoiche caratterizzate lungo il loro fronte nordorientale da thrust a direzione NW-SE e NNW-SSE. Le principali faglie dirette, immergenti a S-SW, attive per lunghi periodi e in qualche caso fino ad oggi, hanno creato le condizioni per lo sviluppo dei bacini intramontani, che sono stati a loro volta riempiti nel tempo da successioni continentali di ingente spessore, di natura alluvionale, detritica e lacustre (CAVINATO & DE CELLES, 1999).

Il bacino del Fucino rappresenta la maggiore depressione intramontana appenninica, il cui sviluppo è stato guidato dalle faglie principali a sviluppo E-W sul bordo settentrionale e NW-SE su quello orientale, che hanno condizionato l'evoluzione del bacino consentendo la deposizione dei massimi spessori di sedimenti recenti nel settore nord-orientale, dove superano i 1000 m. L'attività tettonica permane anche attualmente, come testimoniato dal terremoto di Avezzano del secolo scorso (GALADINI & MESSINA, 1999). Le sequenze sedimentarie di riempimento del bacino, alla cui base sono presenti i flysch sin-orogenici, sono state suddivise (CAVINATO *et alii*, 2002) in un'Unità in-

*et alii*, 2005) was undertaken jointly and with financial support of ARSSA (Agenzia Regionale per i Servizi di Sviluppo Agricolo - Regional Agency for Agriculture Development Services) of Avezzano. The study was associated with a survey to monitor farming practices. Thus, for one decade, new hydrological, hydrogeological and hydrochemical data have been gathered and processed and the local hydrogeological setting has been re-investigated. The data included stream and spring discharge, piezometric levels in wells, water abstraction by public and private parties, hydrodynamic parameters of aquifers, chemistry of surface water and groundwater, possible contaminants of agricultural origin, assessment of aquifer vulnerability. The study was aimed at assessing the quantitative and qualitative impact of the observed change in the Fucino Plain's farming practices in the past and in the near future.

This paper, which summarises the findings from the study, is accompanied by a hydrogeological map. The end goal of the study was the proposal of a water resource management model, as a tool for water resource planning and for predicting adverse events (water shortage and/or surface water and groundwater contamination), which may result from the Fucino Plain's new hydrological and agricultural conditions.

## GEOLOGICAL SETTING

The Fucino catchment basin extends for almost 900 km<sup>2</sup>. It comprises: the Fucino Plain, covering about 200 km<sup>2</sup>, i.e. the same surface area of the ancient lake; the surrounding slopes; and the valley of the Giovenco River, the only perennial tributary of the Plain. The origin of this endorheic plain is connected with the intense syn- and post-orogenic tectonic movements that various sectors of the central Apennines experienced in Plio-Quaternary times. This activity created extensional continental basins, known as "intra-montane basins". The typical setting of these Apennine basins consists of mostly NW-SE- and E-W-trending high-angle normal faults, which dislocate dominantly carbonate ridges of Meso-Cenozoic age. The north-eastern faces of these ridges have NW-SE- and NNW-SSE-trending thrusts. The main normal faults, S-SW-dipping and active for long periods and, in some instances, until today, have facilitated the development of the intra-montane basins. Over time, these basins have become filled with thick continental sequences of alluvial, detrital and lacustrine origin (CAVINATO & DE CELLES, 1999).

The Fucino basin is the most important intra-montane depression of the Apennines. Its evolution has been governed by E-W-trending main faults on its northern border and NW-SE-trending main faults on its eastern one. These faults have permitted the deposition of the maximum thickness of recent sediments in the north-eastern sector, where they exceed 1,000 m. The tectonic activity persists today, as witnessed by the Avezzano earthquake in the last century (GALADINI & MESSINA, 1999). The sedimentary sequences, filling the basin and having syn-orogenic flysch at their base, were divided (CAVINATO *et alii*, 2002) into: i) a Lower Unit (Pliocene), whose terms outcrop

feriore (Pliocene), i cui termini affiorano sul bordo nord-orientale del bacino, costituiti prevalentemente da breccie e depositi alluvionali, con subordinati depositi lacustri, e un'Unità superiore (Pliocene superiore-Olocene), costituita da interdigitazioni di depositi lacustri e alluvionali, che al bordo della depressione passano eteropicamente a depositi di conoide a granulometria anche grossolana. La sequenza sedimentaria quaternaria è chiusa da spessi depositi lacustri al centro della Piana (GIRAUDI, 1999), con ai bordi depositi di versante a granulometria variabile.

### ASSETTO IDROGEOLOGICO

I rilievi che bordano la conca riempita da depositi alluvionali sono costituiti prevalentemente da massicci carbonatici meso-cenozoici, intensamente fratturati, contraddistinti da elementi tettonici in grado di influenzare la circolazione idrica sotterranea. Le principali dorsali sono costituite dal Monte Velino e dal rilievo dei Tre Monti a N, dal massiccio del Monte Sirente a NE, dalla struttura di M.Pianecchia ad E, da quella di M.Fontecchio a S e infine dal rilievo di Monte Salviano, che delimita ad W la Piana.

Il dominio carbonatico, rappresentato dai rilievi e costituente il bedrock della piana, caratterizzato da un'elevata permeabilità per fessurazione e carsismo, contiene i principali acquiferi ad elevata infiltrazione efficace (anche superiore a 800 mm/anno; BONI *et alii*, 1986) e risulta suddiviso in diverse unità idrogeologiche, caratterizzate da limiti ben definiti e separate circolazioni idriche sotterranee dirette verso distinti punti di recapito.

Il dominio detritico-alluvionale, costituito dai depositi plio-quaternari di riempimento con permeabilità variabile in funzione della granulometria, ospita una circolazione idrica sotterranea a falde sovrapposte, delimitate da sedimenti a bassa permeabilità; localmente sono presenti falde in pressione, anche a carattere artesiano.

I depositi detritici antichi, sepolti e affioranti ai bordi della piana, rappresentano elementi di raccordo tra gli acquiferi carbonatici e i depositi alluvionali; la loro permeabilità medio-bassa può comunque consentire localmente il travaso sotterraneo dagli acquiferi carbonatici verso i depositi alluvionali fluvio-lacustri. Questi ultimi rappresentano quindi una ben distinta unità idrogeologica (CELICO & CELICO, 1994), caratterizzata da una propria circolazione idrica sotterranea e da proprie caratteristiche di permeabilità.

L'area in studio è stata suddivisa in cinque complessi idrogeologici (vedi carta idrogeologica allegata), aventi le seguenti caratteristiche:

- il complesso dei depositi lacustri attuali, interdigitati in profondità con i depositi del complesso detritico-alluvionale recente, rappresenta un aquitard in grado di confinare le falde contenute nei depositi sottostanti, limitando al contempo l'infiltrazione efficace e quindi l'arrivo in falda di potenziali inquinanti di origine agricola;
- il complesso dei depositi detritico-alluvionali recenti ha una permeabilità variabile, generalmente medio-alta per porosità ed è sede di falde freatiche di limitata estensione e potenzialità; localmente determina un travaso sotterraneo alimentante sorgenti poste al limite con il complesso dei depositi lacustri attuali; in

on the north-eastern border of the basin; this Unit mainly consists of breccias and alluvia, with subordinate lacustrine deposits; and ii) an Upper Unit (upper Pliocene-Holocene), which is made up of interdigitated lacustrine and alluvial deposits; at the border of the depression, these deposits heteropically evolve into alluvial fan deposits, which may even be coarse-grained. The Quaternary sedimentary sequence is closed by thick lacustrine deposits in the centre of the Plain (GIRAUDI, 1999), with talus deposits of variable grain size at its borders.

### HYDROGEOLOGICAL SETTING

The reliefs that border the alluvium-filled basin chiefly consist of intensely fractured carbonate massifs of Meso-Cenozoic age. The tectonic features of these massifs can affect groundwater flow. The main ridges are: Mt. Velino and the Tre Monti relief to the N; the Sirente massif to the NE; Mt. Pianecchia to the E; Mt. Fontecchio to the S; and, finally, Mt. Salviano, which bounds the Plain to the W.

The carbonate domain, which is represented by the reliefs and which makes up the Plain's bedrock, has a high fissuring- and karst-induced permeability. This domain holds the main aquifers with high effective infiltration (even above 800 mm/yr; BONI *et alii*, 1986) and is divided into different hydrogeological units. These units have well-defined boundaries and separate groundwater flowpaths towards distinct discharge areas.

The detrital-alluvial domain is made up of Plio-Quaternary fills with variable permeability, depending on their grain size. This domain hosts a multi-layered aquifer, bounded by low-permeability sediments. Locally, confined aquifers, which may also have an artesian character, occur.

The ancient detrital deposits, both buried and exposed at the borders of the Plain, link the carbonate aquifers with the alluvia. Locally, given their medium-low permeability, these deposits facilitate groundwater overflow from the carbonate aquifers to the fluvio-lacustrine alluvia. Therefore, the latter deposits constitute a separate hydrogeological unit (CELICO & CELICO, 1994) with its own groundwater flowpaths and permeability characteristics.

The investigated area was divided into 5 hydrogeological complexes (see enclosed hydrogeological map), having the following characteristics:

- the complex of present lacustrine deposits, which are interdigitated at depth into the deposits of the recent detrital-alluvial complex; this complex represents an aquitard, which confines the groundwater contained in the underlying deposits, limiting effective infiltration and, thus, possible migration of agricultural contaminants to groundwater;
- the complex of recent detrital-alluvial deposits has variable permeability, which is generally medium-high and induced by porosity; it accommodates unconfined aquifers of limited extent and potential; locally, it permits groundwater overflow to springs that are located at the boundary with the complex of recent lacustrine

area agricola può determinare il veicolamento di potenziali inquinanti verso la falda;

- il complesso dei depositi detritico-alluvionali antichi presenta una permeabilità generalmente medio-bassa, costituendo un aquitard che localmente può contenere localmente falde di limitata estensione e potenzialità, fino a consentirne il travaso verso il complesso dei depositi detritico-alluvionali recenti; l'infiltrazione efficace è limitata e concentrata nelle frazioni a granulometria grossolana;
- il complesso dei depositi arenaceo-marnosi, data la sua bassa permeabilità, separa le diverse strutture idrogeologiche dei rilievi circostanti e costituisce il substrato impermeabile del settore centrale della piana;
- il complesso dei depositi carbonatici è l'aquifero principale che alimenta le principali sorgenti poste alla base dei rilievi; per la sua elevata permeabilità per fratturazione e carsismo determina un'infiltrazione efficace molto alta; vi si attestano i principali prelievi da pozzo, che riducono la portata erogata dalle sorgenti e/o ceduta ai complessi detritico-alluvionali.

La circolazione idrica sotterranea determinata dall'assetto idrogeologico è quindi schematizzabile nel modo seguente (Fig. 1), tenendo in considerazione i risultati di studi precedenti (BONI *et alii*, 1986; CELICO, 1978; CELICO, 1983) e dei rilievi eseguiti nel corso di questo studio (schema 2 della carta idrogeologica allegata):

deposits; in farming areas, this complex may ease the migration of contaminants to groundwater;

- the complex of ancient detrital-alluvial deposits has a generally medium-low permeability; this complex represents an aquitard, which may locally contain aquifers of limited extent and potential and permit groundwater transfer to the complex of recent detrital-alluvial deposits; effective infiltration is low and concentrated in its coarse-grained fractions;
- the complex of arenaceous-marly deposits has low permeability; therefore, it separates the different hydrogeological structures of the surrounding reliefs and represents the impermeable bedrock of the central sector of the Plain;
- the complex of carbonate deposits is the main aquifer, which feeds the principal springs located at the piedmont of the reliefs; given its high permeability due to fracturing and karst, its effective infiltration is high; it is into this aquifer that the main wells have been drilled; water pumping from these wells reduces the discharge delivered by springs and/or flowing to the detrital-alluvial complexes.

Groundwater flow, controlled by the local hydrogeological setting, can thus be schematised as follows (Fig. 1), taking into account results from prior studies (BONI *et alii*, 1986; CELICO, 1978; CELICO, 1983) and surveys conducted as part of this study (diagram 2 in the



Fig. 1 - Schema idrogeologico del bacino del Fucino. 1: complesso dei depositi lacustri attuali a bassa permeabilità; 2: complesso dei depositi detritico-alluvionali recenti a permeabilità variabile; 3: complesso dei depositi detritico-alluvionali antichi a permeabilità medio-bassa; 4: complesso dei depositi arenaceo-marnosi a permeabilità bassa; 5: complesso dei depositi carbonatici ad elevata permeabilità; 6: stazioni termopluviometriche; 7: principali sorgenti; 8: principali sorgenti lineari; 9: principali campi pozzi ad uso irriguo; 10: principali campi pozzi ad uso potabile; 11: direzioni principali del deflusso idrico sotterraneo

- Hydrogeological setting of the Fucino Plain. 1: plain aquifer, corresponding to the agricultural area; 2: fan and detrital deposits connecting carbonate aquifers to the plain aquifer; 3: ancient alluvial deposits (aquitard); 4: terrigenous deposits (regional aquiclude); 5: carbonate aquifers (recharge area of springs); 6: rainfall gauge stations; 7: main springs; 8: main streambed springs; 9: public irrigation wells; 10: drinking water wells; 11: main groundwater flowpaths

- l'unità idrogeologica dei Monti Giano-Nuria-Velino non contribuisce alle risorse idriche del bacino del Fucino, in quanto recapita le sue acque fuori del bacino del Fucino, nella valle del Fiume Velino (Lazio settentrionale), dove i limiti di permeabilità sono posti a quota inferiore (BONI *et alii*, 1986; CELICO, 1983; BONI & PETITTA, 1994; PETITTA, 2009);
  - l'unità idrogeologica dei Tre Monti, pur in assenza di evidenti manifestazioni sorgentizie, risulta drenare verso la piana del Fucino, contribuendo probabilmente tramite travaso sotterraneo all'alimentazione delle falde contenute nella piana stessa; i relativi calcoli di bilancio (CELICO, 1983) indicano una portata potenziale di circa 0.25 m<sup>3</sup>/s che dovrebbe alimentare in sottterraneo la Piana del Fucino; l'emergenza di tali acque andrebbe ricercata in sorgenti lineari concentrate nell'alveo del Canale Allacciante Settentrionale; inoltre, è possibile che le acque travasino direttamente nell'acquifero multifalda della piana, per la presenza in affioramento di sedimenti argillosi lacustri costituenti un limite a flusso nullo;
  - l'unità idrogeologica del Monte Sirente presenta direzioni di deflusso prevalentemente indirizzate esternamente al Fucino, verso la media valle del Fiume Aterno, contribuendo alla portata delle sorgenti di Capo Pescara, nella piana di Sulmona (MASSOLI-NOVELLI *et alii*, 1999); nel settore sudoccidentale, parte della risorsa trova recapito nell'area di Celano, dove alimenta la sorgente di Fonte Grande (nota anche come SS. Martiri), la cui portata media si attesta sui 0.4 m<sup>3</sup>/s; in questo settore, la presenza di depositi detritici a contatto con l'acquifero carbonatico consente il travaso idrico sottterraneo di un'aliquota non trascurabile della risorsa, che attraverso i corpi sedimentari costituenti un acquifero locale, viene recapitata al bordo della piana occupata dai depositi lacustri, nell'area di interdigitazione con le conoidi; i punti di recapito fanno capo a due gruppi sorgivi: quello delle Paludi di Celano (portata media 0.05 m<sup>3</sup>/s) e quello della Stazione di Aielli (portata media 0.1 m<sup>3</sup>/s); le indagini idrogeochimiche hanno confermato il modello di circolazione proposto (BIANCHI FASANI *et alii*, 2008);
  - l'unità idrogeologica di Monte Pianecchia, posta ad est della piana, a sud del corso del fiume Giovenco, la cui potenzialità è stata stimata in quasi 1 m<sup>3</sup>/s (CELICO, 1983), alimenta direttamente le sorgenti del gruppo Restina, la cui emergenza principale presenta una portata media da bibliografia pari ad oltre 0.7 m<sup>3</sup>/s (BONI *et alii*, 1986), che nel periodo di osservazione si sono ridotti in media a 0.33 m<sup>3</sup>/s;
  - l'unità idrogeologica di Monte Fontecchia alimenta le numerose emergenze del fronte di Trasacco, aventi una potenzialità di quasi 4 m<sup>3</sup>/s (CELICO, 1983) e una portata media valutata superiore a 5 m<sup>3</sup>/s (BONI *et alii*, 1986); il limite dell'acquifero carbonatico è posto a diretto contatto, anche per faglia, con i depositi alluvionali-lacustri recenti; ne risulta una frammentazione dei punti di emergenza, localizzati ma anche presenti nell'alveo dei canali, che ricevono di conseguenza contributi copiosi, di portata variabile;
- enclosed hydrogeological map):
- the hydrogeological unit of Mts. Giano-Nuria-Velino does not contribute to the water resources of the Fucino basin, as its groundwater flows outside the basin, into the Velino River valley (northern Lazio), where the permeability boundaries are located at lower elevation (BONI *et alii*, 1986; CELICO, 1983; BONI & PETITTA, 1994; PETITTA, 2009);
  - the hydrogeological unit of Tre Monti, though clearly lacking springs, drains towards the Fucino Plain; overflows from this unit are likely to feed the groundwater contained in the Plain; the related budget computations (CELICO, 1983) indicate a potential discharge of about 0.25 m<sup>3</sup>/s directly through the Fucino Plain; the discharge areas of this groundwater might be the linear springs that are concentrated in the streambed of the "Canale Allacciante Settentrionale" (northern connecting channel); additionally, outcrops of lacustrine clayey sediments (no-discharge boundary) may cause this groundwater to overflow directly into the Plain's multi-layered aquifer;
  - the hydrogeological unit of Mt. Sirente has groundwater flowpaths mainly directed outside the Fucino Plain, towards the middle valley of the Aterno River, contributing to the discharge of the Capo Pescara springs, in the Sulmona plain (MASSOLI-NOVELLI *et alii*, 1999); in the south-western sector, part of the groundwater is discharged into the Celano area, where it supplies the Fonte Grande spring (also known as SS. Martiri spring); the average discharge from this spring is around 0.4 m<sup>3</sup>/s; in this sector, detrital deposits in contact with the carbonate aquifer enable a non-negligible portion of this groundwater to overflow. This water, passing through the sedimentary bodies making up the local aquifer, is discharged at the border of the Plain occupied by the lacustrine deposits, in the area where they interdigitate into the alluvial fans; the discharge areas are two groups of springs: the one of Paludi di Celano (average discharge 0.05 m<sup>3</sup>/s) and the one of Stazione di Aielli (average discharge 0.1 m<sup>3</sup>/s); hydrogeochemical investigations confirm the proposed groundwater model (BIANCHI FASANI *et alii*, 2008);
  - the hydrogeological unit of Mt. Pianecchia (E of the Plain, S of the Giovenco River, estimated potential discharge about 1 m<sup>3</sup>/s - CELICO, 1983) directly supplies the springs of the Restina group; based on the relevant literature (BONI *et alii*, 1986), the main spring of this group has an average discharge of over 0.7 m<sup>3</sup>/s; in the observation period, this value dropped to an average of 0.33 m<sup>3</sup>/s;
  - the hydrogeological unit of Mt. Fontecchia supplies the numerous springs of the Trasacco group, having a potential discharge of nearly 4 m<sup>3</sup>/s (CELICO, 1983) and an estimated average discharge of over 5 m<sup>3</sup>/s (BONI *et alii*, 1986); the carbonate aquifer boundary is in direct contact (also through faulting) with the recent alluvial-lacustrine deposits; consequently, its springs are fragmented, localised but also fed directly by streambed of channels, which

- nel settore occidentale, tra Luco ed Avezzano (dorsale di M. Salviano), non si osservano né sorgenti né travasi in alveo, a testimonianza di un drenaggio sotterraneo indirizzato esternamente al bacino, verso le sorgenti di Posta Fibreno, che drenano le acque sotterranee dell'unità della Marsica Occidentale.

La circolazione idrica sotterranea nella Piana può essere sintetizzata identificando un aquitard superficiale, di estensione corrispondente al vecchio lago Fucino (circa 130 km<sup>2</sup>), costituito dai depositi lacustri argillosi pleistocenici e olocenici, di spessore anche superiore ai 100 m. Ai bordi della piana, sono presenti numerose sorgenti facenti capo alle diverse unità idrogeologiche carbonatiche che circondano la depressione; questi acquiferi carbonatici, soprattutto sul versante settentrionale, possono alimentare i depositi detritici, laddove il contrasto di permeabilità non sia molto elevato, alimentando sorgenti di portata limitata, localizzate al limite con l'aquitard della piana. Al di sotto di quest'ultimo è riconoscibile un acquifero multifalda, con eteropie laterali e verticali a diversa permeabilità, contenente una falda in pressione, che riceve contributi idrici locali sia dagli acquiferi carbonatici circostanti, che dal substrato carbonatico sepolto. Quest'ultimo è generalmente delimitato al tetto dai depositi flyschoidi costituenti l'aquicluda regionale, ma localmente può trovarsi al contatto con i livelli più permeabili del complesso detritico-alluvionale sovrastante, consentendo la loro comunicazione idraulica.

Tale assetto idrogeologico facilita l'utilizzo della risorsa idrica tramite perforazione di pozzi che vadano ad intercettare i livelli acquiferi profondi, sfruttando la risalita per pressione fino a quote prossime al piano campagna. La notevole potenzialità idrica del bacino del Fucino, tradizionalmente considerata inesauribile e la necessità di provvedere alle attività irrigue connesse alle pratiche agricole, ha determinato una crescente pressione in termini di prelievi idrici dalla superficie e dal sottosuolo. Questo ha ovviamente causato una variazione della disponibilità idrica naturalmente erogata dal sistema idrogeologico rendendo necessaria l'elaborazione di un bilancio idrologico "integrato", che tenga conto dei prelievi antropici in atto e previsti. Per questi motivi, non è possibile confrontare i valori delle portate delle sorgenti note da letteratura con quelli attuali, che risentono di un quadro di prelievi profondamente modificato rispetto a quello considerato nelle principali indagini precedenti (BONI *et alii*, 1986; CELICO, 1983).

## IDROLOGIA E DATI CLIMATICI

La necessità di riesaminare i termini del bilancio idrologico includendo il quadro dei prelievi antropici, richiede anche una contemporanea revisione dei dati idrologici e climatici, per verificare ed aggiornare l'effettiva disponibilità idrica in funzione dell'entità degli afflussi.

I dati disponibili riguardano 11 stazioni pluviometriche (SERVIZIO IDROGRAFICO, 1951-1995; ARSSA, 1996-2008) ubicate all'interno del bacino idrografico, di cui 10 attrezzate con termometro (vedi carta idrogeologica allegata). A scala dell'intero bacino idrografico del Fucino, sono state considerate serie di almeno 25 anni per le stazioni pluviometriche e almeno 16 per quelle termometriche (PETITTA & CAPELLI,

consequently receive contributions of variable extent;

- in the western sector, between Luco and Avezzano (Mt. Salviano ridge), no springs or streambed discharge are observed, testifying that groundwater flow is directed outside the basin, towards the Posta Fibreno springs, which drain the groundwater of the western Marsica unit.

The groundwater flow in the Plain may be summarised by identifying a shallow aquitard, covering an area corresponding to the old Lake Fucino (about 130 km<sup>2</sup>) consisting of clayey lacustrine deposits of Pleistocene and Holocene age and having a thickness which may exceed 100 m. The borders of the Plain hold numerous springs, which belong to the various carbonate hydrogeological units surrounding the depression. These carbonate aquifers, especially on the northern side, may supply the detrital deposits (in places where the permeability contrast is not very high) and also the low-discharge springs lying at the boundary with the Plain's aquitard. A multi-layered aquifer may be distinguished beneath this aquitard; the aquifer, which has lateral and vertical heteropie at different permeability, hosts a confined groundwater. This groundwater receives local inputs from both the surrounding carbonate aquifers and the buried carbonate bedrock. The roof of this bedrock is generally bounded by the flyschoid deposits which make up the regional aquicluda. However, the bedrock may locally be in contact with the more permeable levels of the overlying detrital-alluvial complex, thereby permitting their hydraulic communication.

This hydrogeological setting facilitates water withdrawal from wells. The wells intercept the deep groundwater, exploiting its rising under pressure to elevations close to ground level. The considerable water potential of the Fucino basin has been traditionally considered as inexhaustible. However, crop water requirements have caused increasing anthropogenic pressure in terms of surface water and groundwater abstraction. This fact has obviously altered natural water supply from the hydrogeological system, making it necessary to draw up an "integrated" water budget taking into account current and expected water abstraction. Therefore, spring discharge data from the literature cannot be compared with current ones, which reflect abstraction patterns very different from the ones considered in the main prior investigations (BONI *et alii*, 1986; CELICO, 1983).

## HYDROLOGY AND CLIMATE

Revising the water budget to account for abstraction means concurrently revising water and weather data, so as to check and update actual water supply on the basis of inflows.

Data were obtained from 11 rain gauge stations (SERVIZIO IDROGRAFICO, 1951-1995; ARSSA, 1996-2008), located inside the catchment basin. Ten of the stations were equipped with thermometers (see enclosed hydrogeological map). The time series used for the overall Fucino basin covered at least 25 years for rain gauge stations and at least 16 years for temperature gauge stations (PETITTA & CAPELLI, 1994). After building the correlation curves of precipita-

LI, 1994). Una volta calcolate le rette di correlazione di precipitazione e temperatura con l'altitudine, appositamente ricavate per il Fucino, è stata considerata la quota topografica media di ogni topoioto di Thjessen, per minimizzare l'effetto dell'assenza delle stazioni di alta quota. In tal modo si è ottenuto un afflusso medio sul bacino di 988 mm/anno e una temperatura media annua di 9°C. Successivamente è stato applicato il metodo di Thornthwaite (THORNTHWAITE & MATHER, 1957) per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale mensile. Per valutare l'evapotraspirazione reale, i valori di capacità di campo sono stati ricavati da studi precedenti eseguiti sulla piana del Fucino (CHIUCHIARELLI *et alii*, 1994), mentre nelle aree montuose sono stati posti pari a 100 mm. La precipitazione effettiva ottenuta per l'intero bacino, corrispondente al valore di eccedenza idrica, è pari a 440 mm/anno, a fronte di un'evapotraspirazione di 548 mm/anno (PETITTA & CAPELLI, 1994). La distribuzione mensile dell'eccedenza idrica risulta concentrata nel semestre ottobre-marzo, mentre da aprile a settembre non risulta surplus idrico disponibile a scala di bacino (BURRI & PETITTA, 2004).

Per verificare l'eventuale effetto delle attività antropiche sulla disponibilità idrica, l'analisi successiva è stata suddivisa in due periodi distinti: un periodo durante il quale le attività antropiche non influenzavano in modo evidente il regime dei deflussi, che va dal 1921 al 1988; un secondo periodo che comprende gli anni dal 1989 al 2008, considerato rappresentativo di un regime idrologico influenzato dai prelievi per uso antropico. Tale suddivisione è stata applicata anche all'analisi degli afflussi, con lo scopo di verificare eventuali variazioni naturali del ciclo dell'acqua in grado di influenzare i bilanci, indipendentemente dalla pressione antropica.

L'afflusso effettivo medio sul bacino, per il periodo storico fino al 1988, risulta pari a circa 400 milioni di m<sup>3</sup>/anno, corrispondenti a circa 13.5 m<sup>3</sup>/s. Le componenti del bilancio idrologico sono però diversamente distribuite sulla piana e sulle dorsali montuose. Sulla piana (40% del bacino idrografico) la precipitazione media annua è di soli 720 mm/a, la temperatura media di 11°C e l'evapotraspirazione reale con il metodo di Turc è pari a 500 mm/a, mentre l'eccedenza idrica è stata valutata in 220 mm/a. Vista la bassa permeabilità dei depositi affioranti, si può supporre che tale contributo determini prevalentemente ruscellamento, con minimi contributi all'infiltrazione. Sui rilievi carbonatici circostanti (60% del bacino), la precipitazione è pari a 1140 mm/a, la temperatura è di 7.5°C e l'evapotraspirazione reale di soli 465 mm/a, per un surplus idrico di circa 675 mm/a. Considerata trascurabile la componente del ruscellamento sulle dorsali carbonatiche, il valore medio di infiltrazione efficace per gli acquiferi carbonatici (675 mm/a corrispondenti a 11.5 m<sup>3</sup>/s) risulta confrontabile con quello considerato da BONI *et alii* (1986), compreso tra i 550 e gli 800 mm/a in funzione delle litologie considerate. Gli affioramenti di depositi terrigeni sono stati trascurati nei calcoli di bilancio.

I deflussi non sono altrettanto agevolmente determinabili, in quanto le stazioni idrometriche preesistenti non producono informazioni da diversi decenni. I dati disponibili indicano una portata media del Fiume Giovenco in entrata nella piana pari a circa 1.2 m<sup>3</sup>/s, ed un flusso di base, calcolato con il metodo di scomposizione degli idrogrammi delle

tion and temperature with altitude for the Fucino Plain, the average topographic elevation of each Thiessen polygon was calculated in order to minimise the effect of the lack of high-altitude stations. In this way, the average inflow into the basin (988 mm/yr) and the yearly average temperature (9°C) were obtained. Subsequently, use was made of the Thornthwaite method (THORNTHWAITE & MATHER, 1957) to compute the monthly potential evapotranspiration. To assess real evapotranspiration, field capacity values were derived from prior studies on the Fucino Plain (CHIUCHIARELLI *et alii*, 1994). In mountainous areas, these values were set at 100 mm. The effective precipitation obtained for the overall basin (corresponding to its water surplus) was 440 mm/yr vs. an evapotranspiration of 548 mm/yr (PETITTA & CAPELLI, 1994). The monthly distribution of the water surplus was concentrated in the October-March period; no basin-scale water surplus data were available for the April-September period (BURRI & PETITTA, 2004).

To determine the possible impact of human activities on water supply, the subsequent analysis was divided into two periods: one period (1921-1988) during which human activities did not clearly affect discharge; and another period (1989-2008) representing a hydrological regime affected by human activities. This division was also applied in the analysis of inflows, so as to identify natural changes in the water cycle affecting the water budget, regardless of anthropogenic pressure.

In the historical period until 1988, the average effective inflow into the basin is about 400 million m<sup>3</sup>/yr, i.e. about 13.5 m<sup>3</sup>/s. However, the components of the water budget are distributed differently over the Plain and the mountain ridges. Over the Plain (40% of the catchment basin), the yearly average precipitation is as little as 720 mm/yr, the average temperature is 11°C and the real evapotranspiration (obtained with the Turc method) is 500 mm/yr, whereas the water surplus is estimated at 220 mm/yr. Given the low permeability of the outcropping deposits, most of this contribution may be attributed to runoff and a minimum part to infiltration. Over the surrounding carbonate reliefs (60% of the basin), precipitation is 1,140 mm/yr, temperature 7.5°C and real evapotranspiration as low as 465 mm/yr vs. a water surplus of about 675 mm/yr. Assuming negligible runoff over the carbonate ridges, the average effective infiltration into the carbonate aquifers (675 mm/yr, i.e. 11.5 m<sup>3</sup>/s) compares with the one calculated by BONI *et alii* (1986), ranging from 550 to 800 mm/yr, depending on local lithotypes. The water budget computations disregarded outcrops of terrigenous deposits.

Discharge values are not determined as easily, as the existing hydrometric stations have not provided data for many decades. Available data give an average discharge from the Giovenco River to the Plain of about 1.2 m<sup>3</sup>/s and a baseflow of about 0.75 m<sup>3</sup>/s on average. This figure was calculated with the method of decomposition of hydrograms - "portate medie caratteristiche" (typical average discharge, BONI *et alii*, 1993). For the Incile station, at the outlet of the basin (corresponding to the Torlonia tunnel inlet), discharge

“portate medie caratteristiche” (BONI *et alii*, 1993) di circa 0.75 m<sup>3</sup>/s. Per la stazione posta all’Incile, all’uscita del bacino corrispondente all’entrata della galleria Torlonia, il deflusso era storicamente pari in media a 7.7 m<sup>3</sup>/s, mentre il flusso di base si attestava su circa 5 m<sup>3</sup>/s.

L’analisi relativa al periodo più recente (1989-2008) è basata sui dati delle due stazioni considerate rappresentative rispettivamente del regime idrologico della piana (stazione di Fucino Ottomila, localizzata al centro della piana) e di quello dei rilievi carbonatici circostanti (stazione di Villavallelonga, ubicata nell’area montuosa di ricarica della struttura idrogeologica di Monte Fontecchia).

Il regime pluviometrico e la valutazione dell’eccedenza idrica, eseguita con il metodo di Thornthwaite, risultano differenti per le due stazioni e anche rispetto al periodo storico. Nella piana (Fig. 2) la precipitazione media annua (610 mm) è diminuita di oltre il 15% rispetto ai valori del periodo precedente (720 mm). L’evapotraspirazione, a causa di un aumento di temperatura di circa 0.5°C, risulta pari al 70% delle precipitazioni, rispetto al 66% del precedente periodo. Di conseguenza, l’eccedenza idrica risulta decisamente inferiore (180 mm contro i 220 mm medi del passato) e concentrata nel semestre novembre-aprile, con valori medi compresi tra 25 e 30 mm/mese, con l’unica eccezione di dicembre (circa 70 mm).

Nell’area di ricarica degli acquiferi, non si sono osservate variazioni dei parametri meteorologici su lungo periodo. Infatti, l’eccedenza idrica media risulta pari a 760 mm/anno, simile a quella registrata nel periodo precedente, distribuita da ottobre e fino ad aprile, con valori che superano anche i 200 mm/mese in novembre e dicembre (Fig. 3).

In assenza di dati idrometrici aggiornati, l’esame dei deflussi dal bacino del Fucino è stato condotto sulla base delle portate derivate ad uso industriale dalle Cartiere Burgo e poi per uso idroelettrico, pari normalmente al totale delle acque che si immettono nell’emissario Torlonia. Soltanto in coincidenza di eventi piovosi particolarmente intensi, parte dei deflussi vengono indirizzati nel vecchio emissario e non sono

is historically equal to 7.7 m<sup>3</sup>/s on average, whereas baseflow is around 5 m<sup>3</sup>/s.

The analysis for the more recent period (1989-2008) is based on the data of two stations representing the hydrological regime of the Plain (Fucino Ottomila station in the centre of the Plain) and of the surrounding carbonate reliefs (Villavallelonga station in the mountainous recharge area of the hydrogeological structure of Mt. Fontecchia), respectively.

Rainfall and water surplus (computed with the Thornthwaite method) are different for the two stations and also with respect to the historical period. In the Plain (Fig. 2), the yearly average precipitation (610 mm) is down by over 15% from the previous period (720 mm). Owing to a temperature increase of roughly 0.5°C, evapotranspiration accounts for 70% of precipitation, as against 66% in the previous period. As a consequence, the water surplus is definitely lower (180 mm vs. 220 mm on average in the past) and concentrated in the November-April period, with average values of 25 to 30 mm/month and the single exception of December (about 70 mm).

In the aquifer recharge area, no long-term weather changes were recorded. Indeed, the average water surplus is 760 mm/yr, similar to the one of the previous period and distributed from October to April, with values exceeding 200 mm/month in November and December (Fig. 3).

Failing up-to-date hydrometric data, discharge from the Fucino basin was investigated on the basis of water abstraction for industrial uses by the Burgo Paper factory and then for hydro power generation. The water abstracted for these uses is usually equal to the total water flowing into the Torlonia outlet channel. Only upon particularly intense rainfall, part of this discharge is diverted towards the old outlet channel and thus not measurable. These data (available from 1968) highlight two distinct periods: before and after 1988 (Fig. 4).

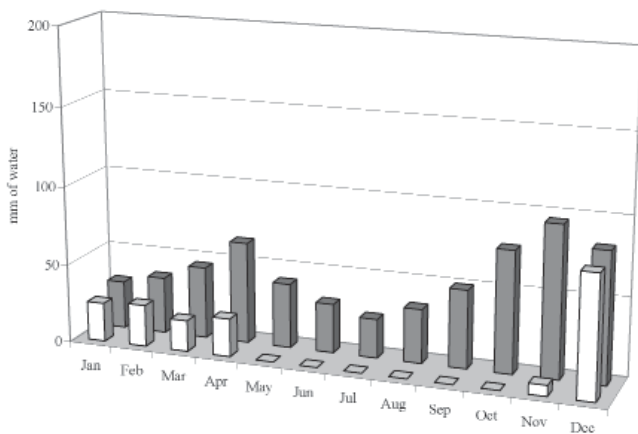


Fig. 2 - Precipitazione (barre grigio scure) ed eccedenza idrica (barre bianche) osservate nel periodo 1989-2006 nella Piana del Fucino (stazione di Fucino Ottomila, quota 650 s.l.m.)

- Rainfall (grey bars) and water surplus (white bars) during 1989-2006 period in the Fucino Plain, Fucino Ottomila site, 650 a.s.l.)

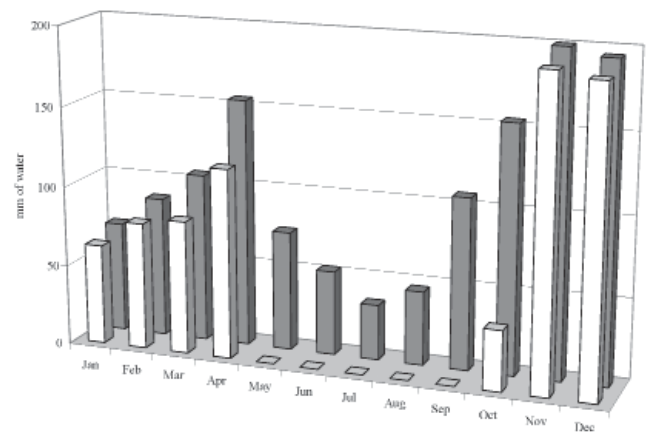


Fig. 3 - Precipitazione (barre grigio scure) ed eccedenza idrica (barre bianche) osservate nel periodo 1989-2006 nell’area di ricarica dell’acquifero (stazione di Villavallelonga, quota 1000 m s.l.m.)

- Rainfall (grey bars) and water surplus (white bars) during 1989-2006 period in the recharge area, Villavallelonga site, 1000 a.s.l.)



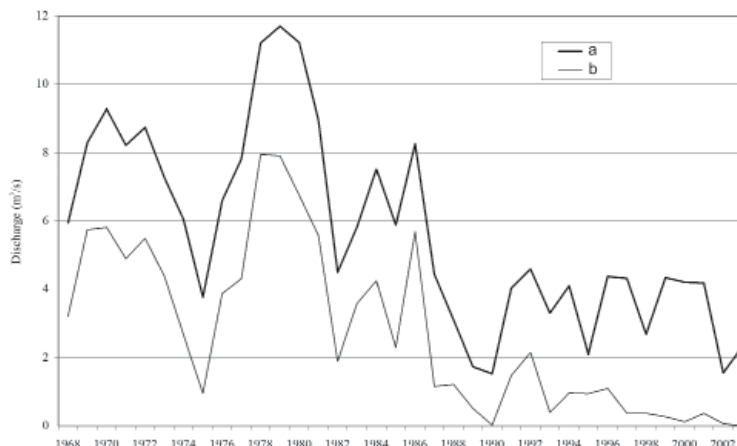


Fig. 4 - Portata annuale in uscita dal bacino del Fucino (in  $m^3/s$ ) dedotta dai dati di produzione idroelettrica; valori annui (linea in alto) e valori del quadrimestre estivo (linea in basso)  
 - Outflow from the Fucino basin (in  $m^3/s$ ) calculated from hydropower data; yearly data (higher line) and summer data (lower line)

quindi misurabili. L'esame di questi dati, disponibili dal 1968, evidenzia chiaramente la suddivisione in due periodi ben distinti, pre- e post-1988 (Fig. 4). Infatti, la portata media derivata fino al 1988 è in media di  $7.6 m^3/s$ , coincidente con quella misurata alla stazione idrometrica nel periodo 1929-40. Nel periodo successivo la portata media risulta pari a  $3.3 m^3/s$ , con minimi inferiori a  $1.5 m^3/s$  e massimi mai superiori a  $4.3 m^3/s$ . Esaminando i dati del solo quadrimestre estivo (da giugno a settembre incluso), emerge che la portata media è diminuita da  $4.4 m^3/s$  (fino al 1988) a soli  $0.9 m^3/s$  (dal 1989) (BURRI & PETITTA, 2004).

Questa osservazione evidenzia che sia pure a fronte di una generale diminuzione, i deflussi risultano fortemente ridotti nel periodo estivo, quando essi sono sostenuti esclusivamente dal flusso di base, cioè dai contributi delle acque sorgive. Di conseguenza, la loro diminuzione può essere determinata da un calo della portata naturalmente erogata oppure da un utilizzo più intenso della risorsa disponibile. Poiché nelle aree di ricarica degli acquiferi carbonatici (stazione di Villavallelonga) non si è osservata una diminuzione significativa dell'infiltrazione efficace nel tempo, anche nel periodo più recente, le variazioni osservate nei deflussi non possono essere attribuite a modifiche naturali della circolazione idrica sotterranea, quanto piuttosto ad interventi antropici, attraverso captazioni e derivazioni più ingenti per maggiori consumi, che data la vocazione agricola della piana non possono che essere connessi alle attività irrigue.

Si può quindi affermare che a partire dalla fine degli anni '80 il regime idrologico del Fucino, con particolare riferimento alla piana, è significativamente variato, soprattutto per cause legate all'utilizzo della risorsa idrica.

#### UTILIZZO DELLA RISORSA IDRICA E RAPPORTI CON IL CICLO AGRICOLO

La verifica delle modifiche della disponibilità idrica del Fucino richiede un attento esame delle utilizzazioni antropiche, sia nel periodo storico che nel lasso di tempo coincidente con le più evidenti variazioni del ciclo idrologico. A questo scopo, è stata eseguita un'indagine approfondita sull'utilizzo delle acque nel bacino, con

Indeed, the average abstraction until 1988 is  $7.6 m^3/s$  on average, matching the one measured at the hydrometric station in the 1929-1940 period. In the subsequent period, the average discharge is  $3.3 m^3/s$ , with minima of less than  $1.5 m^3/s$  and maxima never above  $4.3 m^3/s$ . The data pertaining to the four Summer months only (from June through September) show that average discharge drops from  $4.4 m^3/s$  (until 1988) to as little as  $0.9 m^3/s$  (from 1989) (BURRI & PETITTA, 2004).

This finding infers that, although discharge is generally declining, it declines much more in Summer, when it is only sustained by baseflow, i.e. by the contribution of spring water. Consequently, the decreasing discharge may be due to a decrease in natural discharge or to more intense use of the available resources. No significant drop in effective infiltration vs. time was observed in the recharge areas of carbonate aquifers (Villavallelonga station), even in the more recent period. The change in discharge cannot thus be ascribed to natural changes in groundwater flow, but rather to anthropogenic factors, i.e. to more intense water abstraction and, given the dominance of farming in the Plain, to irrigation.

Hence, it can be stated that, since the late 1980s, the hydrological regime of the Fucino area, namely of the Plain, has changed significantly, especially as a result of water resource use.

#### WATER RESOURCE USE AND RELATIONS WITH THE FARMING CYCLE

Investigating changes in the Fucino basin's water supply requires a careful examination of water abstraction patterns both in historical times and in periods coinciding with the most evident changes in its hydrological cycle. To this end, a thorough investigation was conducted on exploitation of the basin's water, especially

particolare riferimento alla risorsa idrica sotterranea. Precedentemente agli anni '60, i fabbisogni agricoli venivano coperti totalmente dalle acque disponibili nei canali, a meno di limitate captazioni ad uso potabile. A seguito della riforma agricola e della spinta derivante in termini di produttività e competitività dei prodotti del Fucino, l'allora Ente Fucino, in collaborazione con la Cassa per il Mezzogiorno, ha realizzato negli anni '60 più di 200 pozzi, integrando la portata dei canali nel periodo estivo con acque provenienti dal sottosuolo e, in diversi casi, naturalmente effluenti (BURRI & PETITTA, 1999). Le aree più produttive sono ubicate ai margini della piana, dove i pozzi possono intercettare a minime profondità le acque contenute nei carbonati (CELICO & CELICO, 1994).

La successiva regolamentazione dell'uso dei pozzi ha determinato la suddivisione dei compiti tra diversi soggetti istituzionali (vedi carta idrogeologica allegata). Il Consorzio Acquedottistico Marsicano (CAM) gestisce i pozzi ad uso idropotabile, concentrati nell'area di Trasacco, di Venere, di Lecce, a Bussi di Celano e a Rio Pago (a nord della piana), cui si aggiungono altre captazioni di sorgenti, tra cui la più importante è quella della sorgente Fontana Grande di Celano. L'ARSSA (ex Ente Fucino), poi affiancata ed infine sostituita dal Consorzio di Bonifica, ha provveduto alla captazione e distribuzione di acque nei canali esclusivamente durante il periodo estivo, sia per garantire il deflusso nei canali che per gli usi irrigui, attraverso prelievo dai pozzi ed immissione nella rete dei canali, dove i singoli agricoltori utilizzano prevalentemente pompe mobili su trattore in funzione delle esigenze colturali.

Il prelievo per uso potabile è stabile nel corso dell'anno, con un leggero incremento nel periodo estivo, ed è valutabile in 11,4 milioni di m<sup>3</sup>/anno (dati 2003), di cui oltre 4 relativi al quadrimestre estivo. Questi valori erano sensibilmente inferiori prima del 1988 (3 milioni di m<sup>3</sup>/anno di cui 1/3 in estate). Il campo pozzi di Trasacco (W13 nella carta allegata) eroga oltre 9 milioni di m<sup>3</sup>/anno, mentre dagli altri campi pozzi vengono prelevati quantitativi idrici ridotti (1,2 milioni di m<sup>3</sup>/anno a Venere – W10, 0,7 e 0,2 rispettivamente a Lecce – W19 e Bussi - W1).

L'ARSSA ha gradualmente incrementato i prelievi. Dal 1996 al 1999, i volumi erogati sono variati da 390.000 m<sup>3</sup> a 1.710.000 m<sup>3</sup>. Negli anni dal 2000 al 2003, i pozzi gestiti dall'ARSSA nel Fucino meridionale hanno erogato poco più di un milione di m<sup>3</sup>/anno nel primo biennio, passando a oltre 4,5 milioni di m<sup>3</sup>/a nel secondo biennio. Aggiungendo i prelievi eseguiti nel Fucino settentrionale, nel 2003 sono stati superati 6 milioni di m<sup>3</sup>. Di questi, quasi 3 milioni provengono dai pozzi di Trasacco (W14, incluso il prelievo dal pozzo La Punta, W17), circa 1,2 da quelli di Venere (W11), circa 1,5 milioni di m<sup>3</sup>/anno dai pozzi del settore settentrionale (pozzi da W4 a W8) e prelievi meno cospicui dai pozzi di Luco (W12) e di Strada 27 (W18).

Il Consorzio di Bonifica, che in precedenza utilizzava quasi esclusivamente acque superficiali, attraverso una derivazione delle acque del Fiume Giovenco, dalla fine degli anni '90 ha iniziato a prelevare da pozzi, per una portata stimata in 3,3 milioni di m<sup>3</sup> nel quadrimestre

groundwater. Prior to the 1960s, water demand for farming was totally covered by local channels; intake structures were used to a small extent for drinking uses. After the agricultural reform and the impetus given to productivity of the Fucino basin and competitiveness of its products, the then Ente Fucino (Fucino Basin Board) drilled over 200 wells in the 1960s, jointly with the Cassa per il Mezzogiorno (Fund for the South of Italy). By so doing, the Fucino Basin Board integrated discharge from channels in Summer with groundwater and, in many cases, with springs (BURRI & PETITTA, 1999). The most productive areas are located at the margins of the Plain, where shallow wells can intercept the water trapped in the carbonates (CELICO & CELICO, 1994).

Subsequent legislation shared the responsibilities for managing the wells among different institutional entities (see enclosed hydrogeological map). The Consorzio Acquedottistico Marsicano (CAM – Marsica Aqueduct Consortium) manages wells for drinking uses, concentrated in the areas of Trasacco, Venere, Lecce, Bussi di Celano and Rio Pago (north of the Plain), as well as springs, the most important of which is the Fontana Grande di Celano. ARSSA (the former Ente Fucino), initially supported and then supplanted by the Consorzio di Bonifica (Reclamation Consortium), has been exploiting and distributing the water contained in the channels only in Summer. The Consortium has ensured both discharge in the channels and water supply for irrigation, by pumping water from wells and injecting it into the net of the channels. From the channels, the individual farmers withdraw the water necessary to cover crop requirements, mostly with tractor-mounted movable pumps.

Water abstraction for drinking uses is stable over the year, with a slight increase in Summer. It is estimated at 11.4 million m<sup>3</sup>/yr (2003 data), of which over 4 m<sup>3</sup> in the 4 Summer months. These values were much lower before 1988 (3 million m<sup>3</sup>/yr of which 1/3 in Summer). The well field of Trasacco (W13 in the enclosed map) delivers over 9 million m<sup>3</sup>/yr. Limited volumes of water are withdrawn from the other well fields (1,2 million m<sup>3</sup>/yr at Venere – W10, 0,7 and 0,2 in Lecce – W19 and at Bussi - W1).

ARSSA has gradually increased its water abstraction. From 1996 to 1999, the abstracted volumes ranged from 390,000 m<sup>3</sup> to 1,710,000 m<sup>3</sup>. From 2000 to 2003, the wells managed by ARSSA in the southern Fucino basin delivered a little more than one million m<sup>3</sup>/yr in the first two-year period, passing to over 4,5 million m<sup>3</sup>/yr in the second two-year one. By adding the volumes withdrawn from the northern Fucino basin, the figure exceeds 6 million m<sup>3</sup> in 2003. Nearly 3 million m<sup>3</sup> of this figure come from the Trasacco wells (W14, including withdrawal from the La Punta well, W17), approximately 1,2 from the Venere wells (W11), about 1,5 million m<sup>3</sup>/yr from the wells in the northern sector (wells W4 to W8) and lower amounts from the wells of Luco (W12) and Strada 27 (W18).

The Reclamation Consortium initially exploited surface water, almost exclusively from a diversion of the Giovenco River. However, in the late 1990s, it started pumping water from wells. The volumes

estivo 2003, provenienti da prelievi relativamente poco ingenti dalle diverse zone della piana (Bussi – W2, Aielli – W9, Trasacco – W15, Lecce – W20).

In aggiunta a queste componenti istituzionali, le acque sotterranee del Fucino negli ultimi anni vengono utilizzate anche dal Consorzio Industriale di Avezzano, che, oltre alle concessioni di acque superficiali, si stima abbia derivato quasi 6 milioni di m<sup>3</sup>/anno nel 2003, da un campo pozzi nei pressi di Trasacco (W16), distribuiti nell'arco dei 12 mesi.

I singoli proprietari e le aziende agricole operano anche con prelievo diretto tramite pozzi, in parte coincidenti con le vecchie perforazioni eseguite dalla Cassa per il Mezzogiorno, ma più spesso con nuovi pozzi appositamente perforati per integrare la disponibilità idrica, sia per irrigazione che per il lavaggio dei prodotti agricoli lavorati. Aggiungendo i singoli pozzi a servizio delle abitazioni (uso domestico, piccoli orti e giardini privati), il prelievo dei privati assume una rilevanza non trascurabile, ma per la frammentazione delle utenze, la scarsa controllabilità delle portate emunte e il fenomeno comunque diffuso dell'abusivismo, rappresenta un elemento di difficile valutazione.

Sulla base dei soli pozzi privati dotati di regolare concessione ai sensi della normativa vigente, è stata redatta una carta di densità dei pozzi (Schema 7 dell'allegato cartografico), da cui è evidente che le massime concentrazioni di pozzi sono localizzate in corrispondenza dei centri abitati (>20 pozzi/km<sup>2</sup>). All'interno della piana, la densità dei pozzi risulta elevata soltanto nel quadrante sudoccidentale (comune di Luco, tra 5 e 10 pozzi/km<sup>2</sup>), dove la disponibilità idrica naturale è ridotta. Nel resto della piana, la densità si attesta su valori compresi tra 1 e 5 pozzi/km<sup>2</sup> nelle aree prossime ai centri abitati e scende sotto 1 pozzo/km<sup>2</sup> procedendo verso il centro della piana.

Al fine di fornire stime attendibili dei prelievi privati, è stata appositamente realizzata una campagna di indagine nei comuni di Luco, Trasacco e Ortucchio, su quasi il 50% dell'area irrigua della Piana. In quest'area, l'effettiva maggiore disponibilità idrica sotterranea determina un più diffuso ricorso ai prelievi privati da pozzo, per minima soggiacenza della falda e conseguenti costi ridotti per la realizzazione e gestione dei pozzi.

L'indagine eseguita nel 2003 su 265 pozzi (pari al 40% dei pozzi regolarmente denunciati nel Fucino meridionale), ha consentito di valutare in 240 m<sup>3</sup>/a il prelievo per ogni singolo pozzo ad uso domestico, in 400 m<sup>3</sup>/a quello per gli orti e in 675 m<sup>3</sup>/a quello per i prati. I prelievi ad uso irriguo, sebbene più difficili da stimare per l'eterogeneità dei fabbisogni (in parte assolti dalle acque presenti nei canali), sono stati valutati in 15.000 m<sup>3</sup>/a per ogni pozzo. Considerando inoltre i consumi dei pozzi delle aziende agricole per il lavaggio dei prodotti, è stato valutato un prelievo complessivo di circa 2 milioni di m<sup>3</sup>/anno nel Fucino meridionale (Fig. 5). Estrapolando queste stime al resto del Fucino, tenendo in considerazione le tipologie e il numero di pozzi regolarmente denunciati, si stima un prelievo dai pozzi privati di circa 5 milioni di m<sup>3</sup>/anno, di cui 3,5 concentrati nel periodo estivo. In base al numero di pozzi esistenti precedentemente al 1989, si stima

abstracted from different areas of the Plain (Bussi – W2, Aielli – W9, Trasacco – W15, Lecce – W20). In the 4 Summer months of 2003 are estimated at as little as 3.3 million m<sup>3</sup>.

In the past few years, the groundwater of the Fucino basin has not only been used by the above-mentioned institutional entities, but also by the Consorzio Industriale di Avezzano (Industrial Consortium of Avezzano). In addition to exploiting surface water under lease agreements, the Consortium is estimated to have withdrawn almost 6 million m<sup>3</sup>/yr from a well field near Trasacco (W16) in 2003 (in 12 months).

Individual owners and farms also pump water from wells. These wells match in part the old ones drilled by the Fund for the South of Italy. More often, new wells are drilled to integrate water supply for irrigating crops and cleaning agricultural produce after processing. If the wells serving homes (household uses, small orchards and private gardens) are added, water abstraction by private individuals is significant but hardly quantifiable owing to: fragmentation of uses, difficulty of monitoring and controlling the abstracted volumes and illegal water withdrawal.

Based on private wells exploited under lease agreements as per the applicable legislation, a well density map was built (diagram 7 in the enclosed map). The map shows that wells are mostly concentrated in built-up areas (>20 wells/km<sup>2</sup>). Inside the Plain, well density is high only in the south-western quadrant (municipality of Luco, 5 to 10 wells/km<sup>2</sup>), where natural water supply is limited. In the rest of the plain, well density ranges from 1 to 5 wells/km<sup>2</sup> in built-up areas and below 1 well/km<sup>2</sup> towards the centre of the Plain.

To make a reliable estimation of private withdrawal, an investigation was conducted in the municipalities of Luco, Trasacco and Ortucchio, on nearly 50% of the irrigation area of the Plain. Here, thanks to higher availability of groundwater, minimum depth to the water table and consequent low costs for drilling and operating wells, private withdrawal is more widespread.

Based on the investigation carried out on 265 wells in 2003 (40% of the regularly reported wells in the southern Fucino basin), withdrawal from each well was estimated at 240 m<sup>3</sup>/yr for household uses, 400 m<sup>3</sup>/yr for orchards and 675 m<sup>3</sup>/yr for meadows. Withdrawal for irrigation was more difficult to estimate, owing to the heterogeneity of water requirements, in part covered by water flows in the channels. This withdrawal is estimated at 15,000 m<sup>3</sup>/yr per well. Taking also into account the consumption of well water by farms for cleaning their products, the overall withdrawal is estimated at about 2 million m<sup>3</sup>/yr in the southern Fucino basin (Fig. 5). By extrapolating these values to the remaining part of the Fucino basin and considering the types and number of regularly reported wells, withdrawal from private wells is estimated at approximately 5 million m<sup>3</sup>/yr, of which 3.5 concentrated in Summer. Based on the number of wells existing prior to 1989, water withdrawal is estimated to have increased by over 400% with respect to the past.

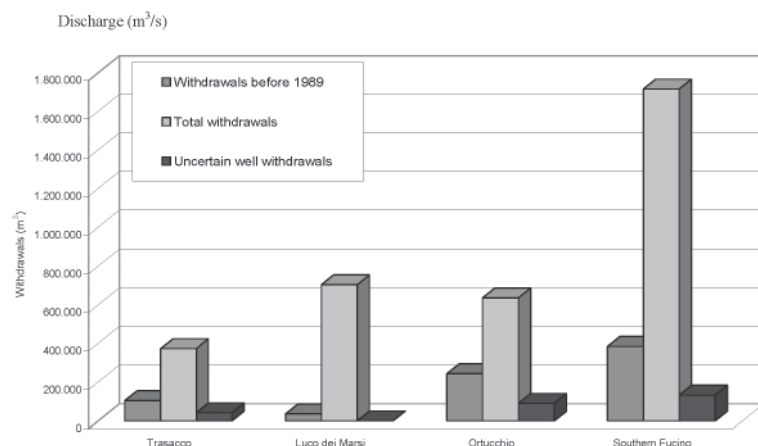


Fig. 5 - Prelievi calcolati dei pozzi privati regolarmente denunciati nei tre comuni di Trasacco, Luco e Ortucchio e relativo riepilogo. Sulla base dei consumi stimati per pozzo e tipologia, vengono calcolati i quantitativi emunti considerando i pozzi preesistenti il 1989 (consumi pre 1989), quelli realizzati a tutto il 2003 (consumi totali) e i pozzi aventi data di realizzazione incerta (pozzi incerti)

- *Withdrawals from official private wells in Trasacco, Luco and Ortucchio municipalities. Data are calculated from estimate discharge related to different uses, considering well drilled before and after 2003, including wells with uncertain drilling period*

che i prelievi siano aumentati di oltre il 400% rispetto al passato.

La diminuzione dei deflussi superficiali nel bacino e il correlato crescente ricorso alla captazione di risorse idriche sotterranee non sono stati quindi determinati dalle variazioni dei fattori meteorologici, quanto piuttosto da un crescente utilizzo delle acque per irrigazione, a causa delle variazioni occorse nella gestione agricola.

A seguito della bonifica del Fucino (BURRI & PETITTA, 1999), l'area agricola veniva prevalentemente destinata alle tre colture tradizionali (grano, patata e barbabietola da zucchero con rotazione triennale). Successivamente, la progressiva meccanizzazione ha favorito le ultime due colture, che negli anni '70 occupavano circa il 70% del territorio della piana. Già a partire dagli anni '80, per cause legate alla produttività e alla ricerca di un maggior profitto, si registra il progressivo aumento delle aree destinate alle colture orticole (principalmente carote e insalata), che passano dal 15% al 35% nel 1988 (BURRI & PETITTA, 1999). Tali colture sono più idroesigenti, ma la disponibilità idrica nella piana era considerata abbondante in virtù dei deflussi sorgivi cospicui.

Negli anni successivi (Fig. 6), le colture orticole, decisamente più redditizie, subiscono un rapido incremento, superando il 50% delle aree agricole e soppiantando le colture tradizionali, tra cui solo la patata mantiene una certa rilevanza (>20%). Allo stesso tempo, la ricerca di una maggiore produttività determina la diffusione della pratica della seconda coltura annuale e, progressivamente, anche della terza coltura stagionale. Ciò ha determinato anche il ricorso abbondante a fertilizzanti e pesticidi in grado di garantire il raccolto e facilitare lo sviluppo della seconda coltura, le cui fasi di crescita coincidono con la siccità estiva, richiedendo quindi quantitativi idrici aggiuntivi, anche in periodi in cui tradizionalmente il ricorso all'irrigazione non era particolarmente pronunciato. A tale quadro va aggiunta la scarsa propensione dei contadini e delle aziende a ricorrere a tecniche irrigue moderne, che consentano il risparmio delle acque, preferendo la classica irrigazione a pioggia.

Considerando i fabbisogni delle singole classi colturali (Tab. 1) e la loro distribuzione nel corso dell'anno (TUCCERI & RECINELLI, 1996) e partendo dal presupposto che i fabbisogni idrici fino a maggio compreso vengono totalmente coperti dalle precipitazioni, il fabbisogno irriguo estivo risulta aumentato, passando dai 6.4 milioni di m<sup>3</sup> per il

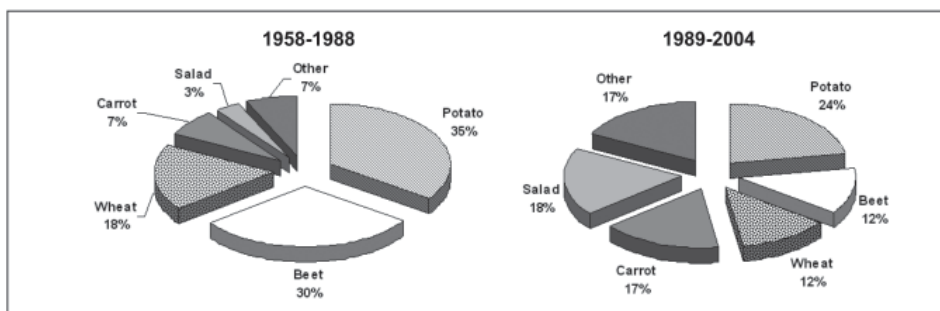
Hence, the causal factor of the decrease of surface discharge in the basin and of the consequent growing abstraction of groundwater is not weather, but the increasing exploitation of water for irrigation due to changes in farming practices.

After the reclamation of Lake Fucino (BURRI & PETITTA, 1999), farmland was chiefly used for 3 traditional crops (wheat, potato and sugar-beet on 3-year rotation). Subsequently, progressive mechanisation favoured potato and sugar-beet crops, which occupied about 70% of the Plain in the 1970s. Since the 1980s, to boost productivity and profits, the land used for horticultural crops (chiefly carrot and salad) has been progressively expanded, passing from 15% to 35% in 1988 (BURRI & PETITTA, 1999). These crops are more water-intensive, but water supply in the Plain was considered to be abundant and sustained by substantial discharge from springs.

In the following years (Fig. 6), the definitely more profitable horticultural crops increased rapidly, covering more than 50% of the farmland and supplanting traditional ones (among which only potato remained significant with >20%). At the same time, the search for greater productivity led to the dissemination of the second yearly crop and, progressively, also of the third seasonal crop. This fact involved, among others, high use of fertilisers and pesticides, which might guarantee the harvest and facilitate the development of the second crops. The growth stages of these crops coincided with the Summer drought, thus requiring additional amounts of water, even in periods during which irrigation was traditionally not particularly intense. The issue was compounded by the low propensity of farmers to resort to modern water-saving irrigation techniques and by their preference for conventional spray irrigation.

Considering the water requirements of the individual classes of crops (Tab. 1) and their distribution over the year (TUCCERI & RECINELLI, 1996) and assuming that these requirements are totally covered by precipitation through May, the Summer irrigation requirements climbs from 6.4 million m<sup>3</sup> before 1958 to about 12 million m<sup>3</sup> in the 1959-1988 period and to about 15 million m<sup>3</sup> at present. The water needed for the second and third crops, to be added to the above figures and not easily quantifiable, is estimated at approxi-

Fig. 6 - Confronto della percentuale delle principali categorie di colture irrigue distinte per i periodi precedente e successivo al 1989  
 - Percentage comparison of main irrigation crops, related to periods before and after 1989



Tab. 1 - Fabbisogno idrico (m<sup>3</sup>/ha) delle principali classi colturali e loro ripartizione mensile

- Water requirements (m<sup>3</sup>/ha) of main crops and their monthly amount

Crop	Water requirements (m <sup>3</sup> /ha)	Total consumptions			
		June	July	August	September
Potatoes	860		350	510	
Sugar Beets	1000		310	490	200
Carrots	650		120	360	170
Salad I	800	120	550	130	
Salad II	1000		310	600	90
Others	1100	50	340	500	210

periodo precedente al 1958 a circa 12 milioni di m<sup>3</sup> relativi al periodo 1959-88, fino agli attuali circa 15 milioni di m<sup>3</sup>, cui va aggiunto il quantitativo richiesto per le seconde e terze colture, non facilmente valutabile e approssimativamente stimato in 3 milioni di m<sup>3</sup>.

Negli ultimi anni i prelievi per irrigazione hanno superato il fabbisogno delle colture, contribuendo a limitare il deficit idrico del suolo, ma anche ad alimentare il processo di evapotraspirazione. Ciò evidenzia un utilizzo non ottimale delle acque di irrigazione, almeno da un'analisi a scala mensile, che ovviamente non può tener conto degli eventi giornalieri e della distribuzione oraria dell'irrigazione.

Relativamente all'uso di composti potenzialmente inquinanti, quali nitrati e pesticidi, tramite interviste ai proprietari dei lotti agricoli, è stato possibile ricostruire un calendario agronomico del Fucino relativo alle principali colture (PACIONI *et alii*, 2007), da cui risulta che i fertilizzanti a base azotata vengono utilizzati in marzo-aprile e soprattutto in novembre, mentre l'uso dei pesticidi è concentrato nei mesi di aprile (diserbanti) e poi diffuso durante l'estate (fungicidi e insetticidi).

**SORGENTI, PIEZOMETRIA E IDRODINAMICA SOTTERRANEA**

Sulla base delle conoscenze acquisite sopra esposte, nel decennio 1998-2008 sono stati condotti appositi rilevamenti idrogeologici sulle portate erogate, sui livelli piezometrici e sulle caratteristiche idrodinamiche degli acquiferi.

Le principali emergenze della piana del Fucino (vedi tabella della carta allegata) sono concentrate nel fronte sorgivo di Trasacco. Le numerose polle sorgive sono state raggruppate in funzione del fosso di riferimento, identificando le sorgenti Molino (che si versano nel fosso 40), Recinto e Strada 36 (fosso 39), le sorgenti del fosso 38 e quelle

mately 3 million m<sup>3</sup>.

In the past few years, water consumption for irrigation has exceeded crop requirements, to limiting the soil water deficit, but also feeding evapotranspiration. This means that, at least on the basis of a monthly analysis (obviously not taking into account daily events and hourly distribution of irrigation), water use for irrigation is not optimal.

With regard to the use of potentially contaminating compounds, e.g. nitrates and pesticides, interviews were conducted among farmland owners. From these interviews, the agronomical calendar for the main crops of the Fucino basin was reconstructed (PACIONI *et alii*, 2007). The calendar shows that nitrogen fertilisers are used in March-April and, above all, in November, whereas pesticides are concentrated in April (herbicides) and in Summer (fungicides and insecticides).

**SPRING, GROUNDWATER TABLE AND HYDRODYNAMIC**

Based on the above-mentioned data, hydrogeological surveys were conducted in the 1998-2008 decade. The surveys were focused on discharge, piezometric levels and hydrodynamic characteristics of aquifers.

The main springs of the Fucino Plain (see table in the enclosed map) are concentrated in the Trasacco spring area. The various springs were grouped on the basis of their reference stream, identifying the springs of Molino (flowing into stream 40), of Recinto and Strada 36 (stream 39) and those of streams 38 and 37. Their

del fosso 37. La loro portata complessiva nel periodo di osservazione si attesta in media sui  $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$ , ma tale valore è notevolmente influenzato nel periodo estivo dalla riduzione di portata determinata dai pompaggi eseguiti nei campi pozzi posti immediatamente a monte delle emergenze. Le portate invernali-primaverili di questo fronte sorgivo, influenzate dai soli prelievi ad uso potabile, sono prossime ai  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ; in estate e all'inizio dell'autunno, immediatamente dopo la sospensione dei pompaggi, la portata non supera in media i  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nel settore orientale, la sorgente principale Restina (Venere) ha portata media superiore ai  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , con massimi primaverili anche di  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$  e minimi estivi di  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'emergenza di Ortucchio, che dà vita all'omonimo laghetto, negli anni di rilevamento è risultata spesso asciutta, con una portata variabile da 0 a  $10 \text{ L/s}$ .

Nel settore settentrionale, la principale emergenza è quella di Fontana Grande di Celano, che eroga in media  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , utilizzati per uso potabile e irriguo. Le vicine sorgenti delle Paludi di Celano hanno una portata media pari a  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$  e massima prossima a  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , mentre quelle del gruppo di Aielli Stazione in media erogano  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , con massimi che arrivano a  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La risorsa idrica complessiva erogata dalle sorgenti che circondano la piana del Fucino nel periodo 2000-05, misurata in 11 sezioni comprensive dei diversi gruppi sorgivi, monitorata a scala stagionale-semestrale (vedi tabella della carta allegata), è risultata compresa tra  $2.5$  e  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , in assenza del condizionamento imposto dai pompaggi estivi per uso irriguo, che riducono la risorsa erogata naturalmente fino a valori prossimi allo zero e comunque inferiori a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nel 2000-01 sono state osservate portate sorgive complessive superiori ai  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , drammaticamente diminuite nel 2002, fino ad un minimo assoluto di  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ . All'inizio della successiva estate 2003, grazie alla notevole potenzialità degli acquiferi carbonatici circostanti, le portate erogate si sono attestate a  $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , per ridursi nuovamente al termine della stagione irrigua a soli  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nel 2004 le portate all'inizio della stagione estiva erano superiori a  $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , così elevate da garantire un residuo di oltre  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  al termine delle attività irrigue, situazione che è rimasta simile nel 2005. La variazione delle portate sorgive su scala pluriennale evidenzia il ruolo rivestito dagli estesi acquiferi carbonatici, che in funzione della ricarica invernale riescono rapidamente (1-2 anni) a compensare eventuali periodi di crisi idrica, quale quello osservato nel 2002-03 e ripetutosi nel 2007-08.

Per meglio comprendere i rapporti tra ricarica degli acquiferi carbonatici, deflusso naturale e prelievo antropico, è stato realizzato un monitoraggio in continuo del livello di falda in alcuni piezometri rappresentativi, dai campi pozzi di Trasacco (W14, dal febbraio 1998 all'agosto 2008), di Venere (W11, dal marzo 1998 al marzo 2004), dal campo pozzi di Lecce (W20, dal maggio 1999 al marzo 2002) e da quello di Bussi di Celano (W2, dal maggio 2004). Inoltre, per valutare il comportamento della falda nelle aree di ricarica, è stato posto sotto osservazione un piezometro profondo ubicato nel cuore del massiccio carbonatico di Monte Fontecchia, presso il cimitero di Collelongo dal luglio 1999 al dicembre 2007.

overall discharge in the observation period is  $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$  on average, but this value is highly affected by the decrease in discharge recorded in Summer owing to pumping from the well fields that are located immediately upstream of springs. The Winter-Spring discharge from this group of springs (affected only by water consumption for drinking) is close to  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . In Summer and early Autumn, right after the suspension of pumping, discharge does not exceed  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  on average.

In the eastern sector, the main spring of Restina (Venere) has an average discharge of more than  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , with Spring maxima of  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$  and Summer minima of  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ . The Ortucchio spring, giving rise to the homonymous small lake, was often dry in the observation years, with a discharge of 0 to  $10 \text{ L/s}$ .

In the northern sector, the main spring is Fontana Grande di Celano, delivering  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$  on average, used for drinking and irrigation. The nearby springs of Paludi di Celano have an average discharge of  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$  and a maximum one of nearly  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , whereas those of the group of Aielli Stazione deliver  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  on average and  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  at the most.

Overall discharge from the springs encircling the Fucino Plain in the 2000-2005 period was monitored in 11 sections (including the different spring groups) on a seasonal and half-year basis (see table in the enclosed map). It was equal to  $2.5$ - $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , failing Summer pumping for irrigation, which reduced natural discharge to zero or less than  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

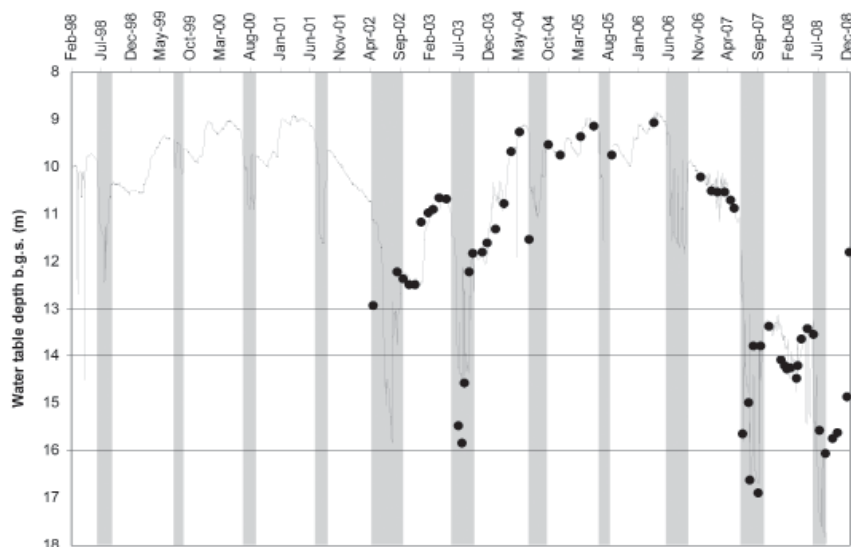
In the 2000-2001 period, overall spring discharge was in excess of  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . This value dramatically dropped to an absolute minimum of  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$  in 2002. At the beginning of the next summer of 2003, thanks to the considerable potential of the surrounding carbonate aquifers, discharge amounted to  $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$  and then went down again to as little as  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  at the end of the irrigation season. In 2004, discharge in early Summer was above  $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , leaving over  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  at the end of the irrigation activities. This situation remained similar in 2005. The multi-year change in spring discharge emphasises the role played by the local large carbonate aquifers. After Winter recharge, these aquifers can rapidly (1-2 years) offset water deficits, e.g. the one recorded in the 2002-2003 period and again in the 2007-2008 one.

To gain greater understanding of the relations between carbonate aquifer recharge, natural discharge and water use, groundwater levels were continuously monitored in some representative piezometers located in the well fields of Trasacco (W14, from February 1998 to August 2008), Venere (W11, from March 1998 to March 2004), Lecce (W20, from May 1999 to March 2002) and Bussi di Celano (W2, from May 2004). Furthermore, to assess groundwater behaviour in recharge areas, a deep piezometer, located in the core of the carbonate massif of Mt. Fontecchia (near the Collelongo cemetery), was monitored from July 1999 to December 2007.

The multi-year monitoring data collected at Trasacco and Venere (whose diagrams are reported in the enclosed hydrogeological map)

Fig. 7 - Livello piezometrico medio giornaliero misurato nel campo pozzi di Trasacco (W14). Le aree retinate rappresentano i periodi di pompaggio. La linea continua rappresenta i valori medi giornalieri misurati automaticamente, i puntini corrispondono ai dati misurati manualmente con freattimetro

- Daily groundwater level measured in the well field of Trasacco (W14). Grid areas correspond to pumping periods. Main line represents monitoring daily values, dots indicate direct measurements



Il monitoraggio pluriennale a Trasacco e Venere (i cui grafici sono riportati nella carta idrogeologica allegata) evidenzia il ciclo stagionale di ricarica ed esaurimento degli acquiferi, fornendo indicazioni anche sul regime delle sorgenti ad essi connesse; inoltre, è ben evidente l'influenza diretta dei pompaggi eseguiti nei campi pozzi adiacenti al punto di monitoraggio, sia in termini di entità degli abbassamenti funzione della portata prelevata che di durata del pompaggio durante la stagione estiva. E' quindi possibile ricostruire a scala pluriennale le variazioni naturali e indotte nelle diverse stagioni irrigue, identificando i periodi siccitosi e quelli più umidi.

Il livello piezometrico a Trasacco (il cui monitoraggio completo è riportato più estesamente in Fig. 7) non è distante dal piano campagna (-10 m in media, corrispondenti a circa 655 m s.l.m.) e gli abbassamenti indotti dai prelievi (i pozzi più vicini prelevano ognuno circa 0.2 m<sup>3</sup>/s nel periodo estivo) sono dell'ordine di 2-3 m, a testimonianza dell'ampiezza del fronte sorgivo, della notevole entità del flusso idrico sotterraneo, nonché dell'elevata trasmissività dell'acquifero, calcolato sulla base di prove di emungimento nell'ordine di 10-1 m<sup>2</sup>/s (BETA STUDIO, 2006). La fase di ricarica si manifesta generalmente tra dicembre e gennaio e normalmente consente il recupero del livello piezometrico dell'anno precedente, fino a -9 m dal piano campagna; i valori piezometrici massimi si raggiungono tra maggio e giugno, quando iniziano i prelievi irrigui. Tale situazione si rivela particolarmente favorevole per le necessità irrigue, in quanto i prelievi si innestano sui massimi livelli piezometrici, corrispondenti alla massima portata delle sorgenti. La fase naturale di esaurimento del serbatoio carbonatico viene mascherata dall'effetto dei prelievi; ciononostante, si può affermare che i prelievi non hanno ripercussioni significative sulla capacità dell'acquifero carbonatico, in quanto quando terminano alla fine dell'estate il sistema naturale risponde riprendendo la fase di esaurimento naturale con gradiente analogo (vedi estati 1998, 1999, 2001, 2004 in Fig. 7).

show the seasonal cycle of aquifer recharge and exhaustion and also the related spring discharge. The data clearly demonstrate the direct influence of pumping from the well fields near the monitoring point, in terms of lowering of groundwater levels vs. withdrawal and duration of pumping in Summer. Therefore, natural and induced variations in the various irrigation seasons were reconstructed at multi-year scale, identifying dry and wet periods.

The piezometric level at Trasacco (whose complete monitoring data are displayed in more detail in Fig. 7) is not far from ground level (-10 m on average, corresponding to about 655 m above sea level, a.s.l.) and the drawdown induced by withdrawal (each of the closest wells withdraws about 0.2 m<sup>3</sup>/s in Summer) is in the range of 2-3 m. This finding testifies the large size of the group of springs, the significant volume of groundwater flow and the high transmissivity of the aquifer, which was calculated to be in the range of 10-1 m<sup>2</sup>/s via abstraction tests (BETA STUDIO, 2006). Recharge from December to January usually permits to recover the piezometric level of the previous year, down to -9 m from ground level. The peak piezometric levels are reached from May to June, when withdrawal for irrigation begins. This situation is particularly favourable for irrigation, as withdrawal takes place upon peak piezometric levels, corresponding to the maximum discharge from springs. The natural exhaustion of the carbonate reservoir is masked by the effect of withdrawal. In spite of this, withdrawal has no significant repercussions on the hydrodynamic of the carbonate aquifer: when withdrawal ends in late Summer, the natural system responds by resuming its natural exhaustion with a similar gradient (see Summers of 1998, 1999, 2001 and 2004 in Fig. 7).

The duration of the Summer pumping depends on groundwater levels at the start of the irrigation season. In effect, when withdrawal starts upon high groundwater levels (depth to the water table of less than 10 m), the pumping period is limited (1998, 1999, 2000,

La durata dei pompaggi estivi risulta funzione del livello della falda all'inizio della stagione irrigua. Infatti, quando i prelievi hanno inizio in corrispondenza livello di falda elevato (soggiacenza inferiore a 10 m), il periodo di pompaggio è limitato (1998, 1999, 2000, 2001 e 2004), mentre quando il livello piezometrico è inferiore (come nel 2002 e 2003), il periodo di prelievo è più prolungato e, come si nota dagli abbassamenti pronunciati, i pompaggi più ingenti. Questo accade perché negli anni in cui il livello di falda è più elevato, la portata erogata naturalmente dalle sorgenti è maggiore e, a parità di fabbisogno irriguo, c'è una minore necessità di ricorrere a prelievi dal sottosuolo; viceversa, in stagioni in cui le sorgenti erogano portate inferiori e i livelli piezometrici sono più bassi, si fa più largo ricorso al prelievo da pozzi per sostenere il fabbisogno agricolo, anche prolungando la stagione dei prelievi.

Il monitoraggio a Trasacco (Fig. 7) ha consentito anche di evidenziare la particolare situazione verificatasi tra il 2001 e il 2002, quando la falda carbonatica non ha manifestato nessuna ricarica invernale-primaverile. Tale situazione si è ripetuta tra il 2007 e il 2008. Il livello piezometrico ha continuato a scendere, dall'inizio della stagione estiva 2001, fino alla successiva stagione irrigua 2002, determinando un abbassamento del livello piezometrico di quasi 1,5 m. Per tale motivo, i prelievi del 2002, particolarmente ingenti, hanno determinato un minimo piezometrico storico di quasi 16 m di soggiacenza in regime dinamico. Quale conseguenza diretta, la successiva stagione invernale 2002-03, pur registrando un incremento piezometrico di oltre 1,5 m nel piezometro monitorato, ha consentito il raggiungimento di un livello piezometrico inferiore a quello medio (soltanto -11 m dal p.c. rispetto ai circa -9 degli anni precedenti). Ciò ha determinato il prolungamento anche della successiva stagione irrigua 2003, che ha richiesto maggiori volumi di pompaggio. Soltanto a seguito del successivo periodo di ricarica 2003-04, quando si è registrato un incremento piezometrico di circa 3 m, si è osservato il recupero totale dei livelli medi, garantendo il regolare svolgimento della stagione irrigua successiva.

La crisi idrica del 2007-08 è stata ancora più pesante. Infatti, l'andamento piezometrico osservato nei periodi invernali e primaverili precedenti è praticamente analogo per le stagioni 2001-02 e 2006-07, durante le quali non si è osservata ricarica dell'acquifero. La stagione estiva dei prelievi ha però determinato in quest'ultimo periodo una depressione piezometrica più ingente, fino a sfiorare nel piezometro monitorato i -17 m dal piano campagna; ciò è dovuto al già segnalato aumento progressivo nel tempo dei prelievi da pozzo ad uso irriguo. Il deficit è ancora più evidente la stagione successiva 2008, perché a differenza di quanto verificatosi nel precedente caso 2001-02, per il secondo anno consecutivo (inverno 2007-08) non si è registrata una ricarica apprezzabile dell'acquifero. In tal modo si è verificata una risalita limitata della falda, e all'inizio della successiva stagione irrigua 2008 il livello misurato a Trasacco era già inferiore a 13 m dal piano campagna. A seguito dei prelievi estivi, si è raggiunta la depressione record di 18 m di profondità della falda nell'area di Tra sacco, mai registrata in precedenza. Gli ultimi dati del monitoraggio evidenziano infine una buona ricarica invernale nel periodo 2008-09, che ancora

2001 and 2004). Conversely, when the piezometric level is lower (like in 2002 and 2003), the withdrawal period is more prolonged and the pumping more intense, as shown by the significant reduction in groundwater levels. This happens because, in years of higher groundwater levels, natural discharge from springs is higher and, water requirements for irrigation remaining equal, groundwater abstraction is less needed. In contrast, in seasons of lower discharge from springs and lower piezometric levels, withdrawal from wells increases to cover crop water requirements and the withdrawal season is protracted.

The monitoring survey at Trasacco (Fig. 7) also evidenced the particular situation which occurred between 2001 and 2002, when the carbonate aquifer did not show any Winter-Spring recharge. This crisis occurred again between 2007 and 2008. The piezometric level continued to fall from the start of the Summer season of 2001 to the next irrigation season of 2002, with a drawdown of the piezometric level of nearly 1.5 m. This is the reason why the particularly high withdrawal of 2002 caused an all-time piezometric low of almost 16 m (depth to the water table under dynamic conditions). As a direct consequence of this, in the subsequent 2002-2003 Winter, the piezometric level was lower than average (only -11 m from ground level vs. about -9 m in previous years), even if the monitored piezometer measured an increase of the piezometric level of over 1.5 m. This prolonged also the next irrigation season of 2003, which required higher pumping volumes. It was only after the subsequent 2003-2004 recharge period (piezometric level up by roughly 3 m) that the average levels were totally recovered, thereby ensuring a regular pattern of the following irrigation season.

The water deficit of 2007-2008 was even heavier. The water table values of the previous Spring and Winter periods are practically similar for the 2001-2002 and 2006-2007 seasons, during which no aquifer recharge was observed. Nevertheless, in the 2007-2008 period, the Summer withdrawal caused a more severe water table drawdown, reaching -17 m from ground level in the monitored piezometer. This is due to the previously described progressive growth of withdrawal from wells for irrigation. The deficit is even more evident in the subsequent 2008 season. Indeed, unlike in the previous 2001-2002 period, no appreciable recharge was recorded in the aquifer for the second year in a row (2007-2008 Winter). This fact limited the rising of groundwater and, at the start of the next irrigation season in 2008, the level measured at Trasacco was already lower than 13 m from ground level. After the Summer withdrawal, the water table at Trasacco reached an all-time low of 18 m. The latest monitoring data show a good Winter recharge in the 2008-2009 period, which once again averted another water crisis.

The Venere piezometer, though expressing a different recharge area and operating for a shorter time, shows similar patterns vs. time. Hence, the mechanism of aquifer and spring recharge and exhaustion is thought to be very similar in the two hydrogeological units of Mt. Fontecchia and Mt. Pianecchia. At Venere, the depth to the water



una volta ha scongiurato l'ennesima crisi idrica.

Il piezometro di Venere, pur essendo espressione di una differente area di ricarica e avendo funzionato per un periodo più breve, presenta analoghi andamenti temporali. Si può quindi ipotizzare un meccanismo di ricarica e di esaurimento degli acquiferi e delle sorgenti molto simile per le due unità idrogeologiche di Monte Fontecchia e Monte Pianecchia. La soggiacenza della falda a Venere è in media 44 m dal piano campagna corrispondenti a circa 664 m s.l.m.. Il ciclo di ricarica avviene con le medesime modalità (inizio in dicembre e massimi all'inizio di giugno), sempre in condizioni favorevoli per i prelievi irrigui. La risposta in termini di abbassamenti indotti dai pompaggi è simile a quella di Trasacco, con diminuzioni dell'ordine di 1-2 m; si osserva la stessa relazione tra livello piezometrico all'inizio dei pompaggi e durata dei prelievi. Infine, l'andamento pluriennale è speculare a quello di Trasacco, con assenza di ricarica tra il 2001 e il 2002 e risalita dei livelli nelle successive stagioni primaverili 2003 e 2004, con ritorno ai valori iniziali del 1999-2000 durante il 2004.

Le osservazioni ai piezometri di Lecce e di Bussi si sono protratte per periodi più brevi e non sono estremamente significative, a causa dell'interferenza di diverse utenze presenti nel campo pozzi e nelle zone immediatamente limitrofe. In linea generale, confermano il quadro desunto dagli altri due punti di monitoraggio sopra descritti.

Il piezometro di Collelongo, ubicato all'interno dell'acquifero carbonatico di Monte Fontecchia, è espressione del comportamento della falda in area di ricarica e presenta notevoli differenze con gli altri (Fig. 8). La soggiacenza è molto elevata, pari a circa 140 m in media, per una quota piezometrica media di circa 770 m s.l.m.. Data la distanza di 8 km circa dal fronte sorgivo di Trasacco, è stato calcolato un gradiente idraulico medio pari al 1.4%, leggermente superiore ai gradienti normalmente osservati negli acquiferi carbonatici centro-appenninici. Il regime piezometrico osservato presenta una fase di ricarica caratterizzata da

table is 44 m from ground level on average, i.e. about 664 m a.s.l. Recharge takes place in the same way (start in December and peak in early June), always under favourable conditions for irrigation. The response in term of pumping-induced groundwater drawdown is similar to the one of Trasacco, with reductions of 1 to 2 m; the same relation is observed between the piezometric level at the start of pumping and duration of withdrawal. Finally, the multi-year pattern is the same as the one at Trasacco, with no recharge between 2001 and 2002, the rising of groundwater levels in the subsequent Springs of 2003 and 2004 and the return to the initial values of 1999-2000 in 2004.

The data collected by the Lecce and Bussi piezometers cover shorter periods. They are not very significant owing to the interference of multiple water uses in the well fields and in the immediately neighbouring areas. In general, these data confirm the picture inferred from the above-described two monitoring points.

The Collelongo piezometer, installed inside the carbonate aquifer of Mt. Fontecchia, expresses groundwater behaviour in recharge areas. Its values are very different from those recorded by the other piezometers (Fig. 8). The depth to the water table is very high, i.e. roughly 140 m on average, with an average piezometric elevation of about 770 m a.s.l. As this piezometer lies at a distance of about 8 km from the Trasacco group of springs, the average hydraulic gradient was calculated to be 1.4%, slightly above the gradients normally observed in the carbonate aquifers of the central Apennines. Here, recharge pulses cause instantaneously a rise of the water table (usually from November to December), thanks to the prompt response of the aquifer to the inflow of infiltration water, supposedly moving rapidly down through a net of fractures and/or karst conduits. This impulsive recharge is regularly followed by constant-gradient recharge under a dual permeability model: as a result of infiltration, the larger net of fractures/karst conduits reacts rapidly, whereas the net of microfrac-

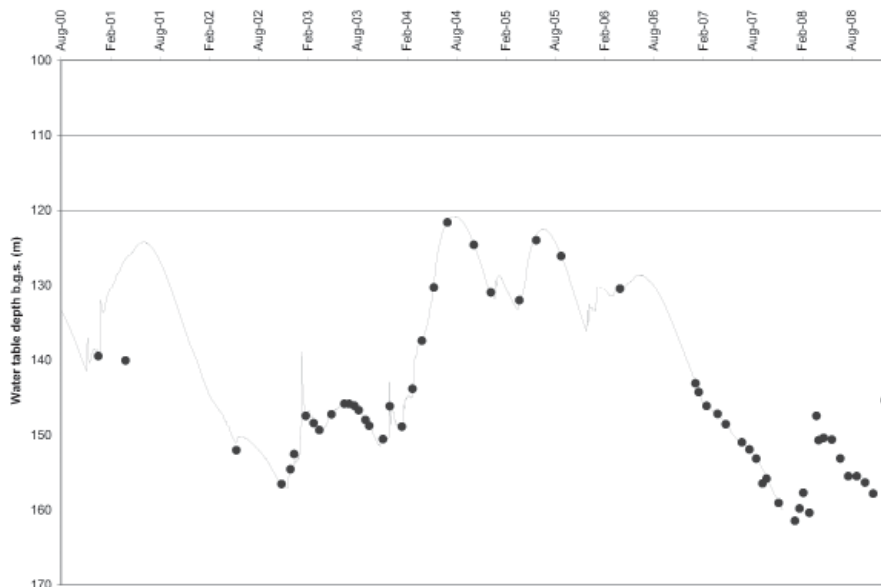


Fig. 8 - Livello piezometrico medio giornaliero misurato nel piezometro di Collelongo (periodo 2001-2008). La linea continua rappresenta i valori medi giornalieri misurati automaticamente, i puntini corrispondono ai dati misurati manualmente con freattometro  
 - Daily groundwater level measured in the Collelongo piezometer (2001-2008). Main line represents monitoring daily values, dots indicate direct measurements

una risalita istantanea e impulsiva, registrata di norma tra novembre e dicembre, connessa ad una risposta rapida dell'arrivo di acqua di infiltrazione, probabilmente attribuibile alla presenza di una rete di fratture e/o possibili canali carsici, in grado di recapitare rapidamente le acque di infiltrazione. Questa fase impulsiva è poi seguita regolarmente da una ricarica a gradiente costante, secondo un modello a doppia permeabilità: a seguito dell'infiltrazione, la rete di fratture/carsismo più ampia reagisce rapidamente, mentre la rete di microfratture dell'acquifero carbonatico ha tempi di movimento dell'acqua più lenti. Il massimo piezometrico si registra in giugno-luglio, cui fa seguito la fase di esaurimento fino al successivo impulso di ricarica. Gli andamenti osservati tra il 2000 e il 2008 presentano notevoli similitudini con quanto registrato a Trasacco, anche per i periodi critici, sebbene con oscillazioni di ordini di grandezza differenti, a conferma della loro appartenenza allo stesso sistema idrogeologico, corrispondente all'unità del Monte Fontecchia.

Confrontando i due grafici, rappresentativi del medesimo acquifero carbonatico, si possono formulare alcune considerazioni sull'idrodinamica del sistema. Le oscillazioni annuali di 20-30 m a Collelongo si traducono in oscillazioni di soli 2-3 m a Trasacco, con diretta influenza sul regime sorgivo. La trasmissione della ricarica dalla zona di alimentazione a quella di recapito risulta praticamente istantanea in termini di pressione, mentre i prelievi a valle non influenzano i livelli nella zona di ricarica, a conferma dell'elevata potenzialità dell'acquifero carbonatico.

Considerando il gradiente idraulico osservato tra i due piezometri (1.4%), la trasmissività dell'acquifero ottenuta con prove di emungimento (0.1 m<sup>2</sup>/s) e la lunghezza del fronte sorgivo di Trasacco di circa 2.5 km, si può calcolare una potenzialità dell'acquifero di circa 3.5 m<sup>3</sup>/s, che corrisponde alla somma della portata erogata dalle sorgenti del gruppo (2.5 m<sup>3</sup>/s), cui va aggiunta la portata prelevata in media dai pozzi (intorno a 1 m<sup>3</sup>/s, incluso il prelievo idropotabile).

Nell'ambito della struttura carbonatica di Monte Fontecchia, i dati disponibili consentono di proporre un modello idrodinamico af-

tures in the carbonate aquifer has slower groundwater movements. The piezometric peak is recorded in June-July and followed by exhaustion until the next recharge pulse. The trends observed from 2000 to 2008 are very similar to those of Trasacco, even in critical periods, albeit with fluctuations of a different order of magnitude, confirming that the Collelongo and Trasacco groundwater belongs to the same hydrogeological system, i.e. the unit of Mt. Fontecchia.

By comparing the two diagrams representing the same carbonate aquifer, some considerations may be made about the hydrodynamics of the system. Yearly fluctuations amount to 20-30 m at Collelongo and to as little as 2-3 m at Trasacco. This has a direct impact on discharge from springs. The transmission of recharge from the recharge area to the discharge one is practically instantaneous in terms of pressure, whereas downstream withdrawal does not affect levels in the recharge area, substantiating the high potential of the carbonate aquifer.

Considering the hydraulic gradient observed between the two piezometers (1.4%), the transmissivity of the aquifer obtained from abstraction tests (0.1 m<sup>2</sup>/s) and the length of the Trasacco group of springs (about 2.5 km), the aquifer potential is calculated to be equal to about 3.5 m<sup>3</sup>/s, corresponding to the sum of the discharge delivered by the springs of the group (2.5 m<sup>3</sup>/s) and of the average withdrawal from wells (around 1 m<sup>3</sup>/s, including withdrawal for drinking uses).

Available data on the carbonate structure of Mt. Fontecchia suggest an inflow-outflow hydrodynamic model of black-box type, based on the analysis of correlations between effective precipitation at the Villavallelonga station and piezometric levels at Collelongo and between the piezometric levels of Collelongo and those of Trasacco.

The monthly-cumulated water surplus determined at Villavallelonga correlates with the piezometric level measured at Colle-

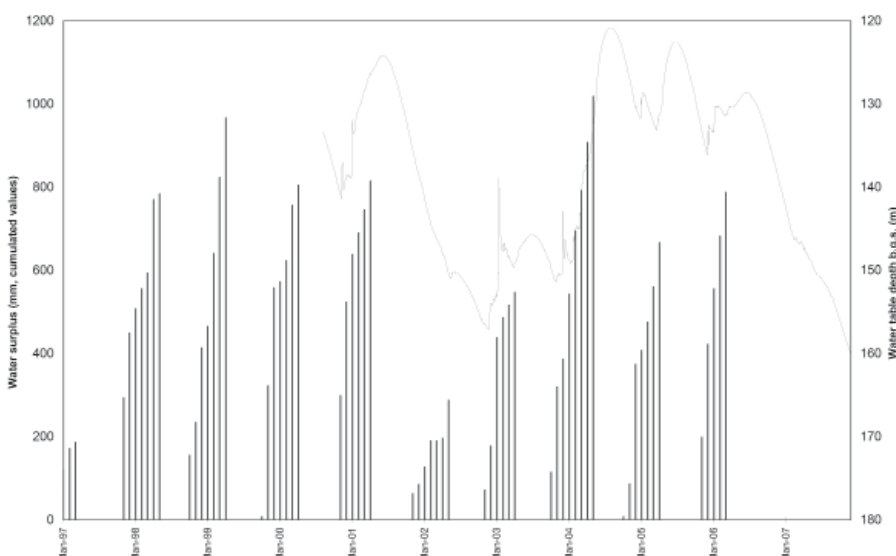
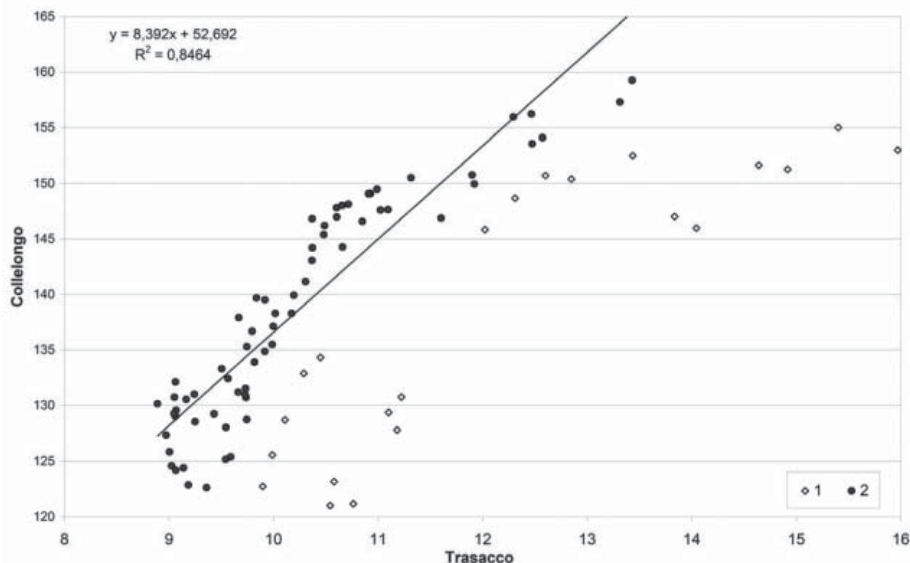


Fig. 9 - Correlazione tra eccedenza idrica (stazione di Villavallelonga) e livello piezometrico (piezometro di Collelongo) a scala mensile. L'eccedenza idrica mensile è cumulata per evidenziare la correlazione tra i due parametri  
- Correlation between water surplus (Villavallelonga site) and groundwater level (Collelongo piezometer). Monthly water surplus is cumulated to highlight the relationship

Fig. 10 - Correlazione tra livelli piezometrici medi mensili registrati nelle aree di ricarica (piezometro di Collelongo) e nelle aree delle sorgenti (piezometro di Trasacco). 1) periodo di pompaggio, non considerato per la correlazione; 2) dati naturali  
 - Correlation between monthly groundwater levels in the recharge area (Collelongo piezometer) and discharge area (Trasacco W14). 1) data from pumping period, not used for correlation; 2) natural data, used for correlation



flussi-deflussi di tipo black-box, attraverso l'analisi delle correlazioni esistenti tra precipitazioni effettive alla stazione di Villavallelonga e livelli piezometrici registrati a Collelongo, nonché le relazioni tra i livelli piezometrici di Collelongo e quelli di Trasacco.

L'eccedenza idrica cumulata a scala mensile calcolata a Villavallelonga risulta correlabile al livello piezometrico registrato a Collelongo (Fig. 9) per i periodi di comune disponibilità di dati. Si osserva un elevato coefficiente di correlazione (0.85), indice di una stretta dipendenza dei livelli piezometrici dall'entità della ricarica, con un tempo di ritardo non superiore al mese, stimato quale tempo medio di percolazione delle acque di infiltrazione nel mezzo non saturo. La correlazione è più evidente in concomitanza dell'assenza di ricarica nell'inverno 2001-02 (Fig. 9), quando il livello piezometrico osservato a Collelongo nel periodo ha continuato a diminuire fino al maggio 2002, a conferma della stretta relazione esistente nelle aree di ricarica tra eccedenza idrica e livelli piezometrici.

Un grado di correlazione significativo è stato registrato tra i livelli piezometrici medi mensili osservati a Collelongo e quelli registrati a Trasacco, nella zona di recapito della risorsa idrica sotterranea (Fig. 10). Anche in questo caso, la dipendenza tra i due parametri testimonia la diretta connessione della falda tra la zona di ricarica e quella di recapito. Poiché a Trasacco i livelli piezometrici sono influenzati in estate dai prelievi e quindi tali periodi non possono essere considerati rappresentativi del ciclo idrodinamico naturale, la correlazione tra i livelli dei due piezometri considerati, eseguita sui soli dati corrispondenti ai periodi non influenzati è di circa 0.86 (Fig. 10), confermando la validità del modello proposto.

Infine sono stati confrontati i livelli piezometrici misurati a Trasacco anche durante le fasi di pompaggio con le portate erogate dallo stesso gruppo sorgivo, sulla base dei dati disponibili (Fig. 11). Si nota una correlazione diretta evidente, che consente di rapportare le portate sorgive

lungo (Fig. 9) in periods of availability of data for both. The correlation coefficient is high (0.85), inferring that piezometric levels are highly dependent on the extent of recharge, with a maximum lag of one month. This lag is estimated as the average time taken by infiltration water to percolate into the unsaturated medium. The correlation is more evident upon conditions of no recharge in the 2001-2002 Winter (Fig. 9). In this period, the piezometric level at Collelongo continued to fall until May 2002, validating the close correlation between water surplus and piezometric levels in recharge areas.

A significant correlation was observed between monthly average piezometric levels at Collelongo and at Trasacco, in the groundwater discharge area (Fig. 10). Also in this case, the dependence between the two parameters demonstrates the direct connection of the investigated groundwater between the recharge area and the discharge area. The piezometric levels of Trasacco are affected by withdrawal in Summer; therefore, this period cannot be considered to represent the natural hydrodynamic cycle. Consequently, the correlation between the levels of the two monitored piezometers, which was established only on the data pertaining to the unaffected periods, is about 0.86 (Fig. 10), which corroborates the proposed model.

Finally, based on available data, the piezometric levels of Trasacco (measured also in pumping periods) were compared with the discharge from the same group of springs (Fig. 11). A direct correlation clearly appears between spring discharge and piezometric levels, when the depth to the water table is less than about 11 m. Below this value, the correlation between the two parameters is no longer linear. The pair of values in this field (depth to the water table of more than 11 m and discharge of less than 0.5 m<sup>3</sup>/s) corresponds to observation periods that are affected by pumping for irrigation

ai valori piezometrici, quando la soggiacenza è inferiore agli 11 m circa. Al di sotto di tale valore, il rapporto tra i due parametri non è più lineare. Le coppie di valori presenti in questo campo (soggiacenza superiore a 11 m e portate inferiori a 0.5 m<sup>3</sup>/s) corrispondono a periodi di osservazione influenzati dal pompaggio in atto per le pratiche irrigue estive. L'influenza delle attività antropiche rispetto al ciclo naturale altera quindi i rapporti tra le due grandezze in esame, validando ulteriormente il modello proposto. In altre parole, in assenza di prelievi da pozzo, la relazione tra portata delle sorgenti e livello piezometrico misurato a Trasacco è diretta; quando subentrano gli emungimenti, il livello piezometrico osservato è ovviamente influenzato da questo secondo parametro e la relazione con le portate erogate dalle sorgenti è di tipo quadratico.

In conclusione, non solo i dati dei monitoraggi piezometrici disponibili consentono di correlare i processi di ricarica e deflusso dell'Unità idrogeologica di Monte Fontecchia, ma sulla base del modello idrodinamico proposto, è possibile prevedere sulla base delle precipitazioni nell'area di ricarica, dei livelli piezometrici registrati nel cuore dell'acquifero, e di quelli misurati nell'area di recapito, quale possa essere la disponibilità idrica sotterranea delle risorse rinnovabili per gli anni a venire, nonché quale sia l'impatto dei possibili prelievi sulla portata erogata naturalmente dalle sorgenti. Sulla base di queste considerazioni, sono stati sviluppati ulteriori modelli più approfonditi su base statistica e stocastica (MELLINI *et alii*, 2007) per l'ottimizzazione della gestione idrica a fini agricoli nella piana del Fucino (PETITTA & BURRI, 2006).

A scala dell'intera piana, l'andamento della superficie piezometrica (vedi schema 1 della carta allegata) è stato ricostruito sulla base di due campagne (una in fase di massimo piezometrico in marzo e una in fase di minimo in dicembre) condotte nel 2002 su circa 80 pozzi, concentrati nelle aree bordiere della piana. La redazione delle curve isopieze è stata completata nei settori dove i dati erano carenti, attraverso una ricostruzione del livello piezometrico basata su dati bibliografici (precedenti rilevamenti e informazioni desunte dalle schede di autodenucia dei proprietari dei pozzi). Ulteriori misure di controllo, realizzate tra il 2004 e il 2006, unite ai risultati del monitoraggio piezometrico, hanno confermato i dati pregressi. In molti settori, la falda assume carattere freatico, ma all'interno della piana, in corrispondenza dell'affioramento dei depositi a bassa permeabilità di origine lacustre, si presenta in pressione, con potenziali piezometrici localmente anche superiori alla quota topografica, come accade ad esempio in gran parte del settore settentrionale.

Le isopieze risultanti presentano uno spiccato andamento centripeto, con potenziale decrescente verso il centro della piana, dove per

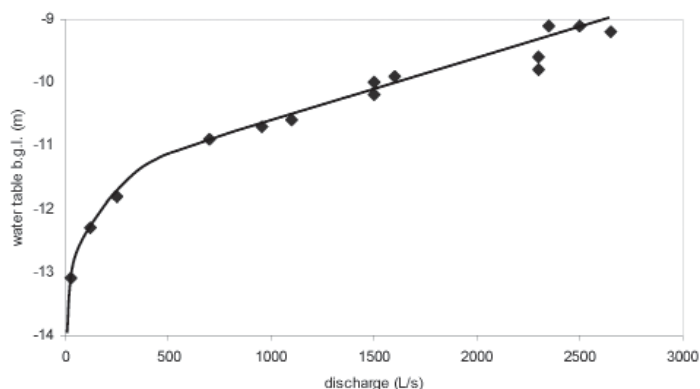
Fig. 11 - Rapporto tra livello piezometrico giornaliero misurato a Trasacco e concomitanti misure di portata delle sorgenti dello stesso gruppo. Il primo tratto della curva di correlazione e il corrispondente campo retinato corrispondono a valori piezometrici e di portata influenzati dal pompaggio ad uso irriguo  
- Comparison between daily groundwater level measured at Trasacco and discharge of the spring of Trasacco group. First part of the correlation curve and related grey area identify water level and discharge values affected by irrigation pumping

in Summer. Hence, the anthropogenic impact on the natural cycle alters the relations between the two investigated quantities, further validating the proposed model. In other words, failing withdrawal from wells, spring discharge and piezometric levels at Trasacco are directly related; when withdrawal begins, the piezometric level is obviously affected by this second parameter and the relation with spring discharge is of quadratic type.

In conclusion, available piezometric monitoring data correlate recharge and discharge in the hydrogeological unit of Mt. Fontecchia. Moreover, under the proposed hydrodynamic model, data on precipitation in the recharge area, piezometric levels in the core of the aquifer and in the discharge area may help predict the renewable groundwater resources available in the coming years, as well as the impact of withdrawal on natural discharge from springs. Based on these considerations, more detailed statistical and stochastic models were built (MELLINI *et alii*, 2007) with a view to optimising the management of water resources for farming uses in the Fucino Plain (PETITTA & BURRI, 2006).

The pattern of the piezometric surface (see diagram 1 in the enclosed map) was reconstructed for the overall Plain on the basis of two surveys (one upon the piezometric peak in March and one upon the piezometric low in December). The surveys were conducted in 2002 on about 80 wells, concentrated in the bordering areas of the Plain. Isopiestic curves were completed for the sectors with missing data, reconstructing the piezometric level from literature data (prior surveys and data inferred from well owners' self-reports). Additional validation measures were taken in the period going from 2004 to 2006. These measures, coupled with the piezometric monitoring results, confirmed the prior data. In many sectors, groundwater appears to be unconfined, but inside the Plain, near outcrops of low-permeability deposits of lacustrine origin, groundwater is confined, with potential piezometric levels which may locally exceed the topographic elevation, as it happens for instance in the most part of the northern sector.

The resulting isopleths have a marked centripetal pattern, whose potential diminishes towards the centre of the Plain, where the water table was not reconstructed owing to lack of data. In the



carezza di dati non è stata possibile la ricostruzione. Nel settore nord-occidentale (tra Avezzano e Paterno) la falda presenta un gradiente idraulico pari a 1,5%, per presenza di sedimenti a minore permeabilità. Nel settore settentrionale l'andamento della superficie piezometrica risente della presenza dell'ampia conoide di Celano, presentando una concavità verso monte tipica delle falde freatiche pedemontane. Il gradiente idraulico è decisamente inferiore, avvicinandosi all'1%. Nel settore nordorientale (tra Celano e S.Benedetto), la falda converge regolarmente verso il centro della piana, con gradienti leggermente inferiori a 1%. Nel settore meridionale, i gradienti sono simili presso Trasacco e Ortucchio, mentre sono più elevati in corrispondenza del fronte sorgivo di Trasacco, dove si registrano decise diminuzioni di potenziale piezometrico dovute al contatto tra l'acquifero carbonatico e i depositi a bassa permeabilità del bacino lacustre. Sul bordo occidentale della piana non è stata possibile alcuna ricostruzione dell'andamento della superficie piezometrica per carezza di dati.

**BILANCIO IDROLOGICO INTEGRATO**

Sulla base dei dati disponibili e delle misure eseguite, è stato redatto un bilancio idrico integrato della piana, mirato ad evidenziare il ruolo delle pratiche agricole e delle conseguenti attività irrigue (BURRI & PETITTA, 2004). In particolare, sono stati considerati come afflussi l'eccedenza idrica, gli apporti del Fiume Giovenco e la portata delle sorgenti; alla disponibilità idrica così calcolata, è stato sottratto il valore dei prelievi effettuati a vario titolo nella Piana (prelievi idropotabili, prelievi irrigui pubblici e prelievi privati); come termine di confronto sono stati valutati i deflussi dalla piana attraverso l'emissario sotterraneo. Nel bilancio è stato considerato anche il fabbisogno irriguo delle colture, che viene soddisfatto in modo variabile dall'eccedenza idrica (nei periodi piovosi), dalle portate naturali delle sorgenti, dei prelievi privati e dei prelievi irrigui pubblici (Tab. 2).

north-western sector (between Avezzano and Paterno), groundwater has a hydraulic gradient of 1.5% owing to the occurrence of lower-permeability sediments. In the northern sector, the pattern of the piezometric surface reflects the presence of the wide alluvial fan of Celano, as the curve has an upgradient concavity typical of piedmont unconfined groundwater. The hydraulic gradient is definitely lower, close to 1%. In the north-eastern sector (between Celano and S. Benedetto), groundwater regularly converges towards the centre of the Plain, with gradients a little lower than 1%. In the southern sector, gradients are similar near Trasacco and Ortucchio, whilst they are higher at the Trasacco group of springs, where the potential piezometric level sharply decreases owing to the contact between the carbonate aquifer and the low-permeability deposits of the lacustrine basin. On the western border of the Plain, the pattern of the piezometric surface could not be reconstructed owing to lack of data.

**INTEGRATED WATER BUDGET**

Based on available and ad-hoc collected data, an integrated water budget for the Fucino Plain was drawn up. The budget was aimed at highlighting the role of farming and irrigation (BURRI & PETITTA, 2004). In particular, water surplus, contributions by the Giovenco River and discharge from springs were considered as inflows. Water withdrawal for various uses (drinking, withdrawal for irrigation by public entities and withdrawal by private individuals) was subtracted from the water supply so calculated. The outflows from the Plain, through the subsurface outlet channel, were determined as a term of comparison. The budget also considered water requirements for crop irrigation, which are covered to a variable extent by water surplus (in rainy periods), natural discharge from springs, private withdrawal and public withdrawal for irrigation (Tab. 2).

Tab. 2 - Bilancio idrico integrato per la Piana del Fucino (da BURRI & PETITTA, 2004). Valori (in milioni di m<sup>3</sup>) riferiti alla media del periodo indicato. P: precipitazione; E: evapotraspirazione. Il periodo Estivo include i mesi di giugno, luglio, agosto e settembre (periodo irriguo). La disponibilità idrica è costituita dalla somma dell'eccedenza idrica, degli apporti e dal contributo delle sorgenti. Il deflusso sorgivo e i prelievi agricoli privati sono i termini più difficili da valutare. I dati medi annuali non sono calcolati esattamente per lo stesso periodo, determinando alcune discrepanze tra i valori. I dati estivi appartengono al periodo 1989-2003, ma le componenti del bilancio influenzate dalle attività antropiche non sono totalmente note e risultano variabili nel tempo

Water (millions of m <sup>3</sup> )	Yearly average		Summer average	
	Before 1988	1989-2003	Before 1988	1989-2003
Water Surplus (P - E)	60	35	0	0
Inflow (Giovenco River)	35	15	5	3
Springs	170	75	50	22
<b>Water availability</b>	<b>265</b>	<b>125</b>	<b>55</b>	<b>25</b>
Withdrawals for human and industrial use	3	10	1	4
Public agricultural withdrawals	0	5	0	5
Private agricultural withdrawals	0	5	0	3.5
Crop water requirements	12	15	9	12
<b>Outflow from the Plain</b>	<b>250</b>	<b>100</b>	<b>45</b>	<b>7</b>

- Integrated water budget for Fucino Plain (modified from BURRI & PETITTA, 2004). Values in millions of m<sup>3</sup> refer to the period mean. P: rainfall; E: evapotranspiration. Summer time includes June, July, August and September (irrigation period). Water availability includes water surplus, inflows and spring discharge. Spring discharge and private irrigation withdrawals are known with high uncertainty. Mean yearly values are not calculated on the same period, which causes some discrepancies. Summer data refer to 1989-2003 period, but budget terms due to human activities are not completely known and they change with time

Alcuni elementi del bilancio risultano sufficientemente noti (precipitazione e evapotraspirazione, prelievi ad uso potabile, industriale e agricolo, portate in entrata e in uscita dal bacino), mentre per altri si può fornire una stima attendibile (portata attuale del Giovenco, fabbisogni agricoli, prelievi dai pozzi privati); altri ancora invece sono noti soltanto con misure sporadiche, con particolare riferimento alle portate erogate dalle sorgenti.

Nella Piana l'infiltrazione è trascurabile e il ruscellamento può essere stimato su lungo periodo pari a 200 mm/anno, concentrati nel semestre invernale, che contribuiscono alla disponibilità idrica della piana del Fucino. Il fiume Giovenco, unico corso d'acqua perenne che raggiunge la piana, ha una portata variabile stagionalmente e soprattutto nel tempo. Il principale apporto idrico proviene dalle acque sorgive, in passato prossimo a 6 m<sup>3</sup>/s ed attualmente notevolmente inferiore. Alla disponibilità idrica della piana a fini agricoli contribuiscono anche le acque provenienti dai pozzi ARSSA e Consorzio di Bonifica, nonché quelle provenienti dai prelievi privati.

Nel periodo estivo i prelievi irrigui, che rappresentano una voce determinante nel bilancio idrologico integrato, vanno a coprire i fabbisogni delle colture, ma contribuiscono all'evapotraspirazione e anche localmente all'infiltrazione, laddove la falda presenti bassa soggiacenza e i terreni abbiano una discreta permeabilità. Quest'ultimo processo, sebbene non assuma particolare rilevanza dal punto di vista quantitativo, può influenzare la qualità delle acque, facilitando l'immissione nel sottosuolo di composti potenzialmente inquinanti, nella fattispecie costituiti da nitrati e pesticidi (PACIONI *et alii*, 2009; PETITTA *et alii*, 2009).

La disponibilità idrica della piana del Fucino precedentemente al 1989 (Tab. 2) è stata valutata in 265 milioni di m<sup>3</sup>/anno, dati dalla somma di 60 milioni di m<sup>3</sup> di eccedenza idrica (200 mm/anno sui circa 300 km<sup>2</sup> di affioramento dei terreni plio-pleistocenici), 35 milioni di m<sup>3</sup> provenienti dal Fiume Giovenco e circa 170 milioni di m<sup>3</sup>/anno erogati dalle sorgenti (stima media a partire da 5.5 m<sup>3</sup>/s). Le acque prelevate erano costituite soltanto dai prelievi ad uso idropotabile (3 milioni di m<sup>3</sup>) e dal prelievo per soddisfare i fabbisogni irrigui (12 milioni di m<sup>3</sup> su base annua, in buona parte compensati dall'eccedenza idrica nelle stagioni non estive). La portata in uscita dalla piana risultava quindi pari a circa 250 milioni di m<sup>3</sup>/anno, praticamente coincidenti con la portata media registrata di 7.7 m<sup>3</sup>/s, per un sostanziale pareggio di bilancio (scarto inferiore al 3%) (BURRI & PETITTA, 2004).

Nel periodo successivo al 1988 (media 1989-2003), la disponibilità idrica si è più che dimezzata (Tab. 2), in quanto l'eccedenza idrica è diminuita a soli 35 milioni di m<sup>3</sup> e la portata media del Giovenco a solo 0.5 m<sup>3</sup>/s, corrispondenti a circa 15 milioni di m<sup>3</sup> (-57%). Una stima attendibile delle portate sorgive può essere riferita ai periodi non affetti da prelievi irrigui (vedi tabella delle misure di portata in alveo e tabella delle sorgenti nella carta allegata). La portata media erogata dalle sorgenti non supera i 2.5 m<sup>3</sup>/s, considerando massimi primaverili di circa 3.6 m<sup>3</sup>/s, medie invernali intorno ai 2-2.7 m<sup>3</sup>/s e minime estive e autunnali inferiori a 1 m<sup>3</sup>/s. Sulla base di questa stima, il contributo medio annuo delle sorgenti negli ultimi quindici anni è di circa 75 milioni di

Some items of the budget were sufficiently known (precipitation and evapotranspiration, withdrawal for drinking, industrial and agricultural uses, inflows into and outflows from the basin). For other items, a reliable estimation was made (current discharge of the Giovenco River, farming requirements, withdrawal from private wells). Conversely, other items (especially discharge from springs) were based on sporadic measurements.

In the Plain, infiltration is negligible and long-term runoff may be estimated at 200 mm/yr, concentrated in the six Winter months and contributing to water supply in the Fucino Plain. The Giovenco River, the only perennial stream reaching the Plain, has discharge which is seasonally and, above all, temporally variable. The main contribution comes from springs, whose discharge was close to 6 m<sup>3</sup>/s in the past and is much lower now. The Plain's water supply for farming also receives the contribution of the wells of ARSSA and of the Reclamation Consortium, as well as of private intake structures.

In Summer, withdrawal for irrigation (a key item in the integrated water budget) covers crop requirements, but contributes to evapotranspiration and locally also to infiltration, in places where the depth to the water table is low and the soils have reasonable permeability. Although this process is not particularly important in quantitative terms, it may affect water quality, facilitating the migration of potentially contaminating compounds, namely nitrates and pesticides, into the subsoil (PACIONI *et alii*, 2009; PETITTA *et alii*, 2009).

Prior to 1989 (Tab. 2), water supply in the Fucino Plain was calculated to be 265 million m<sup>3</sup>/yr. This figure is given by the sum of 60 million m<sup>3</sup> of water surplus (200 mm/yr on about 300 km<sup>2</sup> of outcropping soils of Plio-Pleistocene age), 35 million m<sup>3</sup> from the Giovenco River and about 170 million m<sup>3</sup>/yr from springs (average estimation starting from 5.5 m<sup>3</sup>/s). The abstracted water was only used for drinking (3 million m<sup>3</sup>) and irrigation (12 million m<sup>3</sup> on a yearly basis, mostly offset by water surplus in non-Summer seasons). The outflows from the Plain were thus equal to roughly 250 million m<sup>3</sup>/yr, practically matching the recorded average discharge of 7.7 m<sup>3</sup>/s and thus balancing the budget (deviation of less than 3%) (BURRI & PETITTA, 2004).

After 1988 (1989-2003 average), water supply was more than halved (Tab. 2), as the water surplus dropped to as a little as 35 million m<sup>3</sup> and the average discharge of the Giovenco River to 0.5 m<sup>3</sup>/s only, i.e. about 15 million m<sup>3</sup> (-57%). A reliable estimation of discharge from springs was made for the periods unaffected by withdrawal for irrigation (see table of in-stream discharge and table of springs in the enclosed map). The average discharge from springs does not exceed 2.5 m<sup>3</sup>/s, considering maxima of about 3.6 m<sup>3</sup>/s in Spring, averages of approximately 2-2.7 m<sup>3</sup>/s in Winter and minima of less than 1 m<sup>3</sup>/s in Summer and Autumn. Based on this estimation, the yearly average contribution of springs in the past 15 years amounts to roughly 75 million m<sup>3</sup> (down by 57% from the past). Water abstraction (having an upward trend) may be estimated at 20

m<sup>3</sup> (registrando una diminuzione del 57% rispetto al passato). I prelievi idrici, tendenzialmente in aumento, in media negli ultimi venti anni sono stimabili in 20 milioni di m<sup>3</sup>, di cui la metà ad uso irriguo; la metà di questi prelievi, uniti all'eccedenza idrica, vanno a soddisfare i fabbisogni irrigui, valutati in 15 milioni di m<sup>3</sup>/anno. La portata in uscita dal bacino è in media pari a 100 milioni di m<sup>3</sup> (3.3 m<sup>3</sup>/s di portata turbinata all'emisario), corrispondente alla differenza tra disponibilità idrica e prelievi.

Dal bilancio a scala annuale (Tab. 2), emerge un dimezzamento praticamente equivalente della disponibilità idrica (-55%) e delle uscite dalla piana (-60%) tra i due periodi esaminati. Risultano determinanti per la carenza idrica le differenze imputabili al ciclo naturale (minore eccedenza idrica, minore portata in entrata dai corsi d'acqua e cospicua diminuzione della portata delle sorgenti), oltre a quelle connesse alle attività antropiche (aumento dei prelievi da pozzo), che incidono indirettamente anche sulle portate sorgive. Il loro decremento dipende dall'aumento dei prelievi da pozzo ragionevolmente nella stessa misura della loro entità (quindi per circa 20 milioni di m<sup>3</sup> in media); ne consegue che la restante aliquota mancante (circa 80 milioni di m<sup>3</sup>/s) dovrebbe essere causata da variazioni naturali dell'alimentazione degli acquiferi, rispetto al periodo storico, che comunque non risulta evidente dai dati climatici.

In conclusione, l'analisi del bilancio annuale, pur evidenziando una forte diminuzione delle portate in ingresso e in uscita, non mostra squilibri sostanziali. La notevole disponibilità idrica della piana, sostenuta soprattutto dal contributo delle portate delle sorgenti alimentate dagli acquiferi carbonatici circostanti, è in grado di supplire al notevole aumento di prelievi verificatosi negli ultimi anni. In altre parole, i pur cospicui aumenti di prelievi idrici sotterranei vengono compensati dalla ricarica degli adiacenti acquiferi carbonatici.

L'esame dello stesso bilancio a scala stagionale, relativo al quadriestrate giugno-settembre, mostra invece un quadro meno positivo (Tab. 2). Nel periodo pre-1988 la disponibilità idrica era di soli 55 milioni di m<sup>3</sup>, garantita dalle portate sorgive. Considerati i prelievi ad uso potabile e i fabbisogni irrigui pre-1988 (circa 10 milioni di m<sup>3</sup>), il bilancio resta in sostanziale equilibrio anche per il periodo estivo, dato che la portata in uscita dalla piana era di 45 milioni di m<sup>3</sup> (circa 3 m<sup>3</sup>/s).

Negli ultimi venti anni compaiono squilibri evidenti. La disponibilità idrica della piana in media non supera i 25 milioni di m<sup>3</sup> in periodo estivo, viste le portate estremamente ridotte delle sorgenti e del Gioenco. D'altro canto, i prelievi risultano incrementati (in media 4 milioni di m<sup>3</sup> ad uso potabile e industriale, circa 9 milioni di m<sup>3</sup> per uso irriguo inclusi i pozzi privati). Anche il fabbisogno idrico per le colture è maggiore e in tale periodo è ad esclusivo carico di prelievi e portate sorgive. La disponibilità idrica risultante è inferiore a 10 milioni di m<sup>3</sup>, confrontabile con i deflussi estivi dal bacino, in media pari a 7 milioni di m<sup>3</sup>/anno. Negli ultimi anni la disponibilità idrica residua in estate viene praticamente totalmente utilizzata, soprattutto tramite prelievi da pozzo, per soddisfare il fabbisogno idrico dell'agricoltura, determinando l'azzeramento del deflusso dalla piana.

La variabilità stagionale della disponibilità idrica non ha comunque determinato deficit di bilancio fino al 2002, quando invece ad un

million m<sup>3</sup> on average (of which half for irrigation) in the past two decades. Half of this figure and the water surplus cover the requirements for irrigation, i.e. 15 million m<sup>3</sup>/yr. The outflows from the basin are on average equal to 100 million m<sup>3</sup> (3.3 m<sup>3</sup>/s of discharge turbinated at the outlet channel), corresponding to the difference between water supply and consumption.

The yearly budget (Tab. 2) shows a practically equivalent halving of water supply (-55%) and of outflows from the Plain (-60%) between the two investigated periods. The water deficit reflects, above all, the impact of differences in the natural cycle (lower water surplus, lower inflows from streams and substantial decrease of discharge from springs) and in anthropogenic pressure (increased withdrawal from wells), which indirectly affect discharge from springs, too. The decrease of this discharge depends on the increase of withdrawal from wells (of the same order of magnitude, i.e. about 20 million m<sup>3</sup> on average). It follows that the missing aliquot (about 80 million m<sup>3</sup>) is caused by natural changes in aquifer recharge with respect to the historical period, which however are not clearly shown by climate data.

In conclusion, even with a sharp decrease of inflows and outflows, the water budget does not show signs of major imbalances. The considerable water supply of the Plain, sustained above all by discharge from springs (supplied by the surrounding carbonate aquifers), can offset the substantial increase in withdrawal which has occurred in the past few years. In other words, even if groundwater withdrawal has grown considerably, this growth has been counterbalanced by recharge in the adjacent carbonate aquifers.

By contrast, the seasonal (June-September) water budget provides a less positive picture (Tab. 2). Before 1988, water supply was only 55 million m<sup>3</sup> and ensured by discharge from springs. Considering water abstraction for drinking and irrigation before 1988 (about 10 million m<sup>3</sup>), the budget was practically in equilibrium, even in Summer, because outflows from the Plain were 45 million m<sup>3</sup> (about 3 m<sup>3</sup>/s).

Deficits appeared in the past two decades. Water supply in the Plain does not exceed 25 million m<sup>3</sup> on average in Summer, given the extremely low discharge from springs and from the Gioenco River. Water abstraction increases (on average 4 million m<sup>3</sup> for drinking and industrial uses, about 9 million m<sup>3</sup> for irrigation, including private wells). Also crop water requirements are higher and covered in this period by withdrawal and discharge from springs. The resulting water supply is below 10 million m<sup>3</sup>, which compares with outflows from the basin in Summer (on average 7 million m<sup>3</sup>/yr). For the past few years, the water remaining available in Summer is totally used (especially through pumping from wells) to cover water requirements for farming, thereby zeroing outflows from the Plain.

Nonetheless, the seasonal variability of water supply did not cause budget deficits until 2002, when adverse climate was compounded by withdrawal, which sharply increased with respect to the past. This en-

quadro climatico negativo si è sovrapposto l'effetto dei prelievi antropici, notevolmente aumentati rispetto al passato. Ciò ha determinato, per la prima volta, un disavanzo di bilancio negativo prossimo a 20 milioni di m<sup>3</sup> (BURRI & PETITTA, 2004), ad indicare un prelievo dalla falda superiore alla rinnovabilità naturale.

Tale situazione dimostra come, allo stato attuale, la disponibilità idrica della piana possa non risultare sufficiente per le mutate esigenze agricole, almeno in periodi particolarmente siccitosi, la cui occorrenza è stata di 4 volte nell'ultimo ventennio.

Una stagione con ricarica degli acquiferi carbonatici limitata o assente determina direttamente una crisi del sistema acqua-agricoltura del Fucino nel periodo immediatamente successivo. La notevole potenzialità degli acquiferi consente al sistema falda-piana di riequilibrare rapidamente il bilancio, ma questi squilibri non possono essere trascurati, se si intende garantire una buona gestione delle attività agricole e del ciclo idrologico del Fucino.

Inoltre, queste situazioni di squilibrio possono determinare un aumento del carico inquinante nelle acque superficiali, con seri rischi anche per i suoli e, in prospettiva, per le acque sotterranee (PETITTA *et alii*, 2009; PACIONI *et alii* 2007).

### STIMA DELLA VULNERABILITÀ DEGLI ACQUIFERI ALL'INQUINAMENTO

Nel corso della ricerca è stata realizzata una carta della vulnerabilità intrinseca (schema 3 della carta allegata) per i complessi idrogeologici permeabili per porosità, utilizzando una metodologia speditiva non parametrica, in virtù dei limitati dati disponibili e reperibili (BURRI *et alii*, 2003b). Si è adottato il "metodo delle aree omogenee", proposto dal CNR-GNDCI (come in FERRARA, 1990), basato sui fattori che condizionano direttamente l'infiltrazione nel sottosuolo e l'idrodinamica della falda. Sono stati presi in considerazione la permeabilità orizzontale e verticale dei complessi idrogeologici affioranti e presenti in profondità, la soggiacenza della falda e l'eventuale presenza di coperture superficiali a bassa permeabilità in grado di garantire l'isolamento di falde sottostanti, sia freatiche che in pressione.

Ad ognuno dei complessi idrogeologici porosi individuati è stato assegnato un grado di permeabilità relativo. Sulla base della carta delle isopieze, sono state distinte le aree con soggiacenza inferiore a 5 m, compresa tra 5 e 10, compresa tra 10 e 20 e infine superiore a 20 m. Per le falde artesiane, è stata considerata come soggiacenza la quota del tetto della falda. È stata infine considerata la presenza di litologie a bassa permeabilità affioranti o presenti nella zona non satura, distinguendo tra tetto dell'acquifero affiorante, posto a profondità inferiore o superiore a 10 m dal piano campagna e presenza al tetto di depositi a bassa permeabilità.

La distribuzione territoriale in cinque classi di vulnerabilità evidenzia una porzione centrale della piana a bassa vulnerabilità, corrispondente al limite dei depositi lacustri. Sui bordi della piana, si concentrano aree a vulnerabilità da alta ad elevata, dove affiorano le conoidi alluvionali (S.Pelino, Celano, Pescina-S.Benedetto, Lec-

tailed, for the first time, a water deficit of nearly 20 million m<sup>3</sup> (BURRI & PETITTA, 2004), suggesting that groundwater abstraction exceeded natural renewability.

This situation demonstrates that, at present, the water supply of the Plain may not be sufficient to meet the changed requirements for farming, at least in particularly dry periods, which occurred 4 times in the last two decades.

A season with zero or low carbonate aquifer recharge may trigger a crisis of the Fucino's water-farming system in the immediately following period. The considerable potential of aquifers allows the groundwater-plain system to rapidly rebalance the budget. However, these deficits cannot be neglected, if farming and the hydrological cycle in the Fucino basin are to be well managed.

Furthermore, these deficits may enhance the contaminating load of surface water, with serious risks also to soils and, ultimately, to groundwater (PETITTA *et alii*, 2009; PACIONI *et alii* 2007).

### ESTIMATED AQUIFER VULNERABILITY TO CONTAMINATION

During the study, an intrinsic vulnerability map (diagram 3 in the enclosed map) was built for hydrogeological complexes with porosity-induced permeability. Use was made of a fast non-parametric method, given the limited data which were available or obtainable (BURRI *et alii*, 2003b). The "metodo delle aree omogenee" (method of homogeneous areas) proposed by CNR-GNDCI (FERRARA, 1990) was adopted. This method is based on factors which have a direct impact on infiltration into the subsoil and on groundwater hydrodynamics. Consideration was given to: horizontal and vertical permeability of the outcropping and deep hydrogeological complexes, depth to the water table and possible occurrence of low-permeability shallow covers capable of isolating the underlying confined and unconfined aquifers.

A relative permeability degree was assigned to each of the identified porous hydrogeological complexes. Based on the map of isopleths, the following areas were distinguished according to their depth to the water table: less than 5 m, from 5 to 10 m, from 10 to 20 m and, finally, of more than 20 m. For artesian aquifers, the elevation of the aquifer bottom was assumed to be the depth to the water table. Finally, account was taken of low-permeability lithotypes outcropping or occurring in the unsaturated zone, distinguishing between the bottom of the outcropping aquifer, at a depth below or above 10 m from ground level, and the occurrence of low-permeability deposits at the bottom.

The spatial distribution into 5 vulnerability classes shows a central portion of the Plain with low vulnerability, corresponding to the boundary of the lacustrine deposits. Areas with high to very high vulnerability are concentrated at the borders of the Plain, where alluvial



ce e Trasacco-Vallelonga). Un grado di vulnerabilità medio è stato calcolato per i territori compresi tra Pescina e la piana del Fucino, alla zona di Luco e a quella occidentale (Incile). Le aree con grado di vulnerabilità estremamente elevato sono molto ridotte per estensione, risultando concentrate nella stretta fascia pedemontana di Trasacco e nella zona di Lecce dei Marsi, in prossimità dei campi pozzi.

Il territorio fucense presenta quindi un grado di permeabilità intrinseca non elevato, eccetto nelle aree dove la falda freatica ha una soggiacenza minima, che peraltro corrispondono generalmente a zone dove più intenso è l'utilizzo della risorsa idrica sotterranea, sia per scopi potabili che irrigui. A tale proposito diviene quindi fondamentale valutare lo stato di esposizione al potenziale inquinamento delle aree con vulnerabilità maggiore, in quanto gli eventuali inquinanti che dovessero raggiungere la falda potrebbero facilmente essere intercettati dall'abbondante e diffuso prelievo idrico sotterraneo. Analizzando i centri di pericolo, risulta evidente che l'uso di fertilizzanti e pesticidi ai fini agricoli rappresenta la principale sorgente potenzialmente inquinante diffusa sul territorio. Per questi motivi, la ricerca ha preso in considerazione la problematica della qualità delle acque in funzione di queste due classi di inquinanti.

## CHIMISMO E QUALITÀ DELLE ACQUE

Le acque sotterranee del Fucino presentano un'analoga matrice bicarbonato-calcica senza particolari differenziazioni, a meno di minime variazioni del chimismo, osservate in prossimità delle zone di recapito delle acque sotterranee, che indicano locali interazioni con i depositi di copertura detritico-alluvionali.

Le acque sorgive (vedi tabella nella carta allegata) presentano valori di pH (compresi tra 7,4 e 7,9) tipici di acque alcaline di ambiente carbonatico. La temperatura alla sorgente è compresa tra 9,4 e 10,7 per il fronte sorgivo di Trasacco e la sorgente di Ortucchio. Un valore inferiore (8,8°C) si è registrato soltanto a Fontana Grande, dove le acque emergono direttamente dall'acquifero carbonatico del Monte Sirente. Temperature più elevate si sono registrate alle Paludi di Celano (12,5°C), a conferma di una circolazione più superficiale nei depositi di conoide alluvionale, e alla sorgente Restina di Venere. I valori di conducibilità elettrica sono molto simili tra loro e risultano compresi tra i 450  $\mu\text{S}/\text{cm}$  di Fontana Grande, i 480-540  $\mu\text{S}/\text{cm}$  del gruppo di Trasacco e Venere, fino ai 580  $\mu\text{S}/\text{cm}$  di Ortucchio e ai 570-636  $\mu\text{S}/\text{cm}$  delle sorgenti di Paludi Celano e Aielli Stazione, dove si manifesta una sicura interazione con termini alluvionali-terrigeni affioranti.

fans are exposed (S.Pelino, Celano, Pescina-S. Benedetto, Lecce and Trasacco-Vallelonga). An average vulnerability degree was calculated for the areas extending between Pescina and the Fucino Plain, those of Luco and those of the northern sector (Incile). The areas with an extremely high vulnerability degree have a very limited extent, as they are concentrated in the narrow piedmont belt of Trasacco and at Lecce dei Marsi, near the well fields.

The Fucino area has not a high intrinsic permeability degree, except in zones where the unconfined groundwater has a minimum depth, i.e. generally the zones where groundwater is more intensely exploited for drinking and irrigation.

Therefore, assessing the exposure of the more vulnerable areas to contamination was considered as a crucial step in the study. Indeed, any contaminant reaching the aquifer might easily migrate to groundwater, which is largely exploited in the investigated area. The analysis of hazard points showed that the use of fertilizers and pesticides for farming was the main potentially contaminating source of the area. As a result, the study was extended to water quality with respect to these two classes of contaminants.

## WATER CHEMISTRY AND QUALITY

Most of the Fucino's groundwater is calcium-bicarbonate rich: Minimum chemistry variations are observed near groundwater discharge areas, indicating local interactions with detrital-alluvial deposits.

Spring water (see table in the enclosed map) has pH values (7.4 to 7.9) that are typical of alkaline waters of carbonate origin. Spring water temperature is 9.4 to 10.7 at Trasacco and at Ortucchio. A lower value (8.8°C) was recorded only at Fontana Grande, where water directly emerges from the Mt. Sirente carbonate aquifer. Higher temperatures were measured at Paludi di Celano (12.5°C), confirming a more shallow groundwater flow in the alluvial fan deposits, and at Restina di Venere. Electrical conductivity values are very similar between them, ranging from 450  $\mu\text{S}/\text{cm}$  at Fontana Grande, 480-540  $\mu\text{S}/\text{cm}$  at Trasacco and Venere, to 580  $\mu\text{S}/\text{cm}$  at Ortucchio and 570-636  $\mu\text{S}/\text{cm}$  at Paludi di Celano and Aielli Stazione, where groundwater certainly interacts with the outcropping alluvial-terrigeneous terms.

Groundwater is of calcium-bicarbonate type (Tab. 3), with slight differences permitting its discrimination into groups. The chemical

Tab. 3 - Chimismo (ioni maggiori) delle principali sorgenti e pozzi del Fucino. Le sigle si riferiscono al diagramma di reazione percentuale riportato nella carta allegata. I campionamenti sono stati eseguiti nel luglio 2002  
- Chemical data (major ions) of main springs and wells of the Fucino Plain. Labels refer to percentage reaction diagram in the annexed map. Data from July 2002 sampling

Sampling sites	#	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$
Spring Fonte Grande	S1	177,00	2,00	1,80	1,60	0,60	47,80	7,40
Spring Molini Trasacco	S4	183,06	3,00	3,90	2,12	1,04	45,78	10,87
Spring Restina Venere	S11	164,75	4,70	4,10	3,06	0,94	46,17	7,95
Artesian well st.12	W4	176,96	3,60	6,70	1,54	0,50	59,03	4,35
Artesian well str.13	W5	183,06	2,90	6,30	2,63	2,23	50,00	9,72
Well ARSSA Venere	W11	213,57	5,90	4,80	3,72	1,29	64,47	7,70
Well Luco st.44	W12	183,06	5,91	2,87	5,57	2,28	42,76	11,32
Well ARSSA Trasacco	W14	164,75	3,36	2,75	2,02	0,37	43,94	9,62
Well La Punta	W17	158,65	3,70	2,44	2,04	0,38	63,21	6,41
Well str.27 Ortucchio	W18	176,96	3,00	2,30	2,00	0,70	37,56	12,44

Le acque sotterranee sono bicarbonato-calciche (Tab. 3), con leggere differenze che consentono di distinguerle in gruppi, i cui caratteri chimici sono ereditati con tutta probabilità interazione con le rocce presenti in prossimità delle zone di emergenza (LETTA & MASI, 1997). La sorgente Fontana Grande con il suo chimismo esclusivamente bicarbonato-calcico, può rappresentare l'end-member degli acquiferi carbonatici. Molto simili sono le acque di sorgenti e pozzi di Trasacco, che presentano un minimo contenuto in solfati, attribuibile a risalita di fluidi mineralizzanti profondi ricchi in H<sub>2</sub>S (CIOTOLI *et alii*, 1998).

Le acque di sorgenti e pozzi dell'area di Venere mostrano una relativa abbondanza di termini alcalini, che diviene più significativa in alcuni pozzi artesiani del settore settentrionale (come ad esempio W12), attribuibile all'interazione con termini terrigeni e/o detritico-alluvionali, che diviene evidente nelle acque circolanti nella conoide detritica di Celano (BIANCHI FASANI *et alii*, 2008), leggermente arricchite in ione sodio e potassio.

Grazie alla notevole disponibilità idrica e alla limitata permeabilità dei terreni, il bacino del Fucino non ha sofferto in passato di problemi di inquinamento delle acque, anche a fronte di un uso massiccio di fertilizzanti e pesticidi, ben oltre la media nazionale: negli anni '90 (BURRI & PETITTA, 1999) l'uso di tali composti si attestava sui 35 kg/ha, rispetto alla media nazionale di 12.8 kg/ha e ai soli 9.9 kg/ha del resto dell'Abruzzo. Le recenti variazioni nelle pratiche colturali, unite alla diminuzione della disponibilità idrica sopra citata, hanno richiesto un monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee, per la verifica della capacità di assorbimento e diluizione di queste classi di inquinanti, attraverso campionamento ed analisi di acque superficiali (canali) e di acque sotterranee (pozzi e sorgenti), sia per i composti azotati e fertilizzanti in genere che per i pesticidi.

Dal 2001 al 2006 sono state eseguite indagini sui nitrati. Nella stagione 2001-02 sono state eseguite analisi del contenuto in ione ammonio, nitrati, nitriti e ione fosfato su oltre 100 punti nella piana del Fucino, in tre campagne successive (ottobre 2001, febbraio 2002, maggio 2002), rispettivamente per 52, 89 e 96 punti d'acqua (PETITTA *et alii*, 2005). Sulla base dei risultati ottenuti (riassunti negli schemi 4, 5 e 6 della carta idrogeologica allegata), la campagna 2003-04 ha riguardato 35 punti tra i più significativi campionati stagionalmente (dicembre 2003, aprile 2004, giugno 2004 e settembre 2004) (BURRI *et alii*, 2008); infine, nel 2005 sono state eseguite altre due campagne

characters of these groups are most likely to derive from interaction with the rocks located in the spring areas (LETTA & MASI, 1997). The Fontana Grande spring, whose water is calcium-bicarbonate only, may represent the end-member of the carbonate aquifers. Very similar are the waters of the Trasacco springs and wells, which have minimum sulphate contents, ascribable to the rising of deep, H<sub>2</sub>S-rich, mineralising fluids (CIOTOLI *et alii*, 1998).

The water of the Venere springs and wells has relative abundance of alkaline terms, which becomes more significant in some artesian wells of the northern sector (e.g. W12). This alkalinity may be due to groundwater interaction with terrigenous and/or detrital-alluvial terms. Alkalinity is more marked in the water flowing in the alluvial fan of Celano (BIANCHI FASANI *et alii*, 2008), which is slightly enriched in sodium and potassium ions.

Thanks to its abundant water supply and limited soil permeability, the Fucino basin did not suffer from water contamination in the past, in spite of massive use of fertilisers and pesticides, well above the national average. In the 1990s (BURRI & PETITTA, 1999), the use of these compounds amounted to 35 kg/ha vs. a national average of 12.8 kg/ha and only 9.9 kg/ha in the remaining part of Abruzzi. Recent changes in farming practices, worsened by decreasing water supply - as pointed out above - required the monitoring of surface water and groundwater. This activity had the purpose of verifying the capability of absorption and dilution of these classes of contaminants and was conducted by sampling and analysing surface water (channels) and groundwater (wells and springs) to detect nitrogen compounds and fertilisers in general, as well as pesticides.

From 2001 to 2006, nitrate investigations were conducted. In the 2001-2002 season, ammonium ion, nitrate, nitrite and phosphate ion analyses were carried out on over 100 points in the Fucino Plain. Three successive surveys were conducted (October 2001, February 2002, May 2002) on 52, 89 and 96 water points, respectively (PETITTA *et alii*, 2005). Based on results (summarised in diagrams 4, 5 and 6 in the enclosed hydrogeological map), the 2003-2004 survey was concentrated on 35 points, the most significant among those seasonally sampled (December 2003, April 2004, June 2004 and September 2004) (BURRI *et alii*, 2008). Finally, in 2005, two other surveys (November and December 2005) covered more than 20 points (PETITTA *et alii*, 2009). Their results

compound	value (mg/L)	1° sampling (October 2001)	2° sampling (February 2002)	3° sampling (May 2002)	4° sampling (November 2005)	5° sampling (December 2005)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	max	13	96	35	68	158
	average	0.5	7.2	2.8	7.5	18.5
	min	<1	<1	<1	0.97	1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	max	11.2	35	15.5	0.32	0.34
	average	0.6	2.0	3.9	4.5	4.9
	min	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	max	n.m.	20	10	n.m.	n.m.
	average	n.m.	2.0	2.0	n.m.	n.m.
	min	n.m.	<1	<1	n.m.	n.m.

Tab. 4 - Riassunto delle concentrazioni ioniche riscontrati nelle acque della Piana del Fucino nell'arco delle campagne condotte nel 2001-2002 (totale campioni: 237) e quelle condotte nel 2005 (totale campioni: 55); n.m.= non misurato  
 - Summing up of nitrate concentration in the waters of Fucino Plain during 2001-02 (237 samples) and 2005 (55 samples) surveys; n.m. = not measured

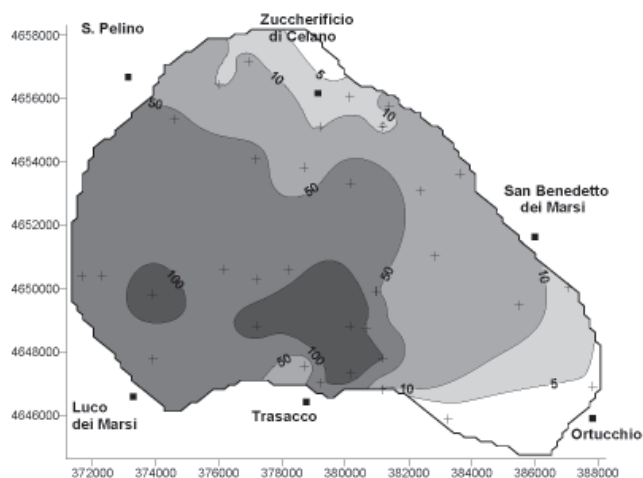


Fig. 12 - Concentrazione dello ione nitrato (in mg/L) nella campagna di dicembre 2003. Le coordinate sono espresse in metri. Le croci rappresentano i punti di campionamento  
 - Concentration of nitrates (in mg/L) during December 2003 survey. Coordinates are in meters. Crosses correspond to sampling sites

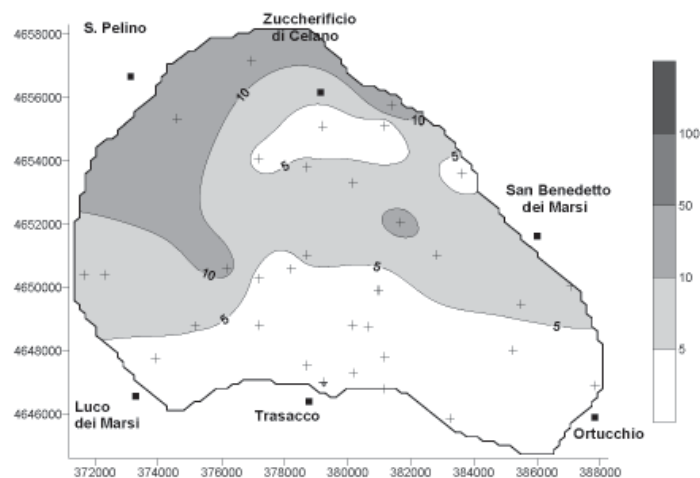


Fig. 13 - Concentrazione dello ione nitrato (in mg/L) nella campagna di settembre 2004. Le coordinate sono espresse in metri. Le croci rappresentano i punti di campionamento  
 - Concentration of nitrates (in mg/L) during September 2004 survey. Coordinates are in meters. Crosses correspond to sampling sites

(novembre e dicembre 2005) su oltre 20 punti (PETITTA *et alii*, 2009).

I dati evidenziano una variabilità stagionale dei parametri analizzati, con valori massimi in inverno-primavera, sia in valore assoluto che in media (Tab. 4). Le acque superficiali mostrano ovviamente maggiori concentrazioni, mentre nelle acque dei pozzi e delle sorgenti sono comunque presenti concentrazioni minime, a conferma della bassa permeabilità dei terreni affioranti, che favorisce quindi il fenomeno del ruscellamento o al massimo della circolazione idrica all'interno dei suoli.

La variazione stagionale osservata è relazionabile alle attività agricole e all'effetto di diluizione esercitato dalle acque di ruscellamento superficiale: gli alti valori osservati in inverno coincidono con le fasi di fertilizzazione (Fig. 12), mentre in primavera l'abbondanza di acque superficiali tende a diluire le concentrazioni; alla fine dell'estate, i valori scendono ai minimi in assenza di fertilizzazione e con scarsa presenza di acqua (Fig. 13).

La distribuzione spaziale dei parametri analizzati è influenzata dall'assetto idrogeologico (Figg. 12 e 13 e schema 5 della carta idrogeologica allegata): nelle aree dove la falda superficiale freatica poggia su sedimenti a bassa permeabilità e dove non vi è una abbondante disponibilità idrica, la concentrazione di nitrati è più elevata, indipendentemente dal periodo di osservazione. Laddove invece il contributo di acque sotterranee provenienti dagli acquiferi carbonatici è consistente (settore meridionale e orientale, nei pressi delle principali sorgenti), queste acque svolgono il ruolo di diluizione del carico potenzialmente inquinante presente sul territorio e la concentrazione dei nitrati è soltanto di qualche mg/L.

Le concentrazioni di ione ammonio sono risultate poco variabili stagionalmente e si sono attestate in media su 1 mg/L; i nitriti sono presenti in concentrazioni sempre inferiori al mg/L. La distribuzio-

are are outlined in Tab. 4.

The data stress the seasonal variability of the investigated parameters, with maximum values in Winter-Spring both in absolute terms and on average (Tab. 4). As is obvious, surface water has the highest concentrations, whereas well and spring water has minimum values; this fact confirms the low permeability of the outcropping soils, which promotes runoff or groundwater flow inside the soils. The observed seasonal variation is related to farming and to the dilution effect of surface runoff water: the high values observed in Winter coincide with fertilisation stages (Fig. 12) whereas, in Spring, abundance of surface water tends to dilute concentrations. At the end of Summer, without fertilisation and with poor water supply, values drop to a minimum (Fig. 13).

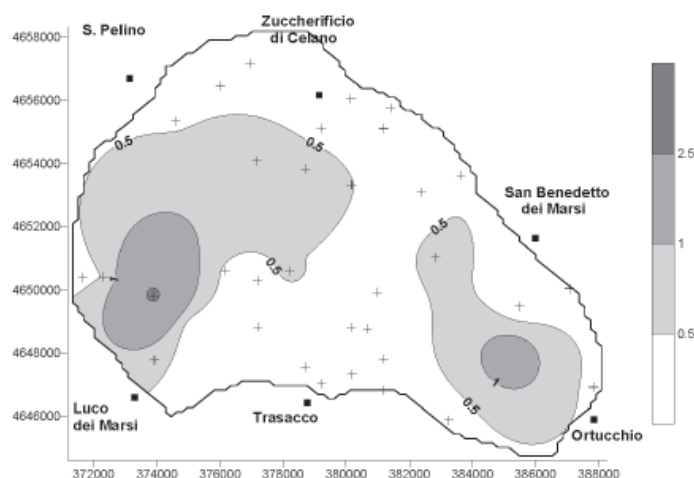
The hydrogeological setting governs the spatial distribution of the investigated parameters (Figs. 12 and 13 and diagram 5 in the enclosed hydrogeological map): in places where the shallow unconfined aquifer rests on low-permeability sediments and water supply is poor, nitrate concentration is higher, whatever the observation period. Conversely, in places where the contribution of groundwater from carbonate aquifers is significant (southern and eastern sectors, near the main springs), this groundwater dilutes the potentially contaminating load of the area and nitrate concentration is as little as some mg/L.

Ammonium ion contents are poorly variable on a seasonal basis and equal to 1 mg/L on average. Nitrites are always below 1 mg/L. The ammonium ion distribution (diagram 6 in the enclosed hydrogeological map) has high values only near the built-up areas of Avezzano and Trasacco, signalling possible anthropogenic contamination at the individual sampling points. The ammonium ion may also have a geo-

Pesticide (in µg/L)		6/2004	9/2004	4/2006	6/2006	9/2006
Linuron	max	2.81	0.07	11.0	13.13	0.17
	average	0.43	0.04	1	1.72	0.1
	min	0.03	0.03	0.21	0.3	0.07
	occurrence	86%	20%	85%	100%	44%
Dycloran	max	0.65	0.14	2.33	--	0.56
	average	0.15	0.05	0.46	0.08	0.08
	min	0.02	0.02	0.03	--	0.06
	occurrence	17%	34%	35%	5%	38%
Carbaryl	max	--	0.40	n.t.	n.t.	-
	average	0.04	0.13	n.t.	n.t.	0.16
	min	--	0.04	n.t.	n.t.	-
	occurrence	3%	12%	-	-	3%

Tab. 5 - Riassunto delle concentrazioni dei principali pesticidi riscontrati nelle acque della Piana del Fucino nell'arco delle campagne condotte nel 2004 (totale campioni: 70) e quelle condotte nel 2006 (totale campioni: 43); n.t.= non trovato  
 - Summing up of pesticide concentration in the waters of Fucino Plain during 2004 (70 samples) and 2006 (43 samples) surveys; n.t.=not found

Fig. 14 - Concentrazione del linuron (in µg/L) nella campagna di giugno 2004. Le coordinate sono espresse in metri. Le croci rappresentano i punti di campionamento  
 - Concentration of linuron (in µg/L) during June 2004 survey. Coordinates are in meters. Crosses correspond to sampling sites



ne dello ione ammonio (schema 6 della carta idrogeologica allegata) presenta valori elevati soltanto in prossimità dei centri abitati di Avezzano e Trasacco, a possibile indizio di inquinamento di origine antropica, in corrispondenza di singoli punti di prelievo. Non si può escludere una sua origine geologica, con provenienza da depositi organici presenti nella sequenza dei depositi lacustri e alluvionali della piana.

Le indagini più recenti (2005-06), integrate da analisi isotopiche dei nitrati, hanno consentito di ricostruire il ciclo dei nitrati nelle acque della piana (PETITTA *et alii*, 2009). Le acque provenienti dagli acquiferi carbonatici hanno un contenuto in nitrati molto basso, mentre la falda freatica della piana presenta maggiori concentrazioni. Le acque superficiali mostrano invece variazioni stagionali e spaziali dei nitrati, con picchi durante la stagione invernale piovosa. L'acquifero freatico superficiale gioca un ruolo fondamentale, fornendo nitrati alle acque superficiali drenate dai canali anche in assenza di uso dei fertilizzanti. In base al contenuto isotopico, è stata riconosciuta una seconda fonte di azoto, oltre a quello proveniente dai fertilizzanti: nell'acquifero superficiale, soprattutto nelle zone a bassa permeabilità, si possono verificare episodi di denitrificazione. In assenza di utilizzo dei fertilizzanti, le acque superficiali possono comunque ricevere nitrati dall'acquifero superficiale, che drena verso i canali al termine del periodo estivo dopo la sospensione dei pompaggi. Questa situazione particolare, sebbene le concentrazioni osservate restino in media molto basse (<10 mg/L), tende a diffondersi, mostrando hot-spot non trascurabili, a causa della diminuzione dei deflussi e dell'aumento dei fabbisogni irrigui, rappresentando un rischio reale per il futuro della qualità delle acque del Fucino.

Il contenuto in pesticidi (Tab. 5) è stato analizzato sia nelle ac-

logical origin, i.e. from the organic deposits lying in the sequence of the Plain's lacustrine and alluvial deposits.

More recent investigations (2005-2006), supported by nitrate isotope analyses, made it possible to reconstruct the nitrate cycle in the Plain's water (PETITTA *et alii*, 2009). The water from carbonate aquifers has a very low nitrate content, whereas the Plain's unconfined groundwater has higher concentrations. On the contrary, surface water shows seasonal and spatial variations of nitrates, with peaks during the rainy season in Winter. The shallow unconfined aquifer plays a critical role, supplying nitrates to the surface water drained by the channels, even when fertilisers are not used. Based on isotope contents, a second source of nitrogen was detected in addition to fertilisers: in the shallow aquifer, especially in low-permeability zones, denitrification episodes may occur. When no fertilisers are used, surface water may anyway receive nitrates from the shallow aquifer, which drains towards the channels at the end of the Summer period, after the suspension of pumping. Although the detected concentrations remain very low on average (<10 mg/L), these contaminants tend to propagate, showing significant hot spots. Hence, under conditions of declining discharge and growing water requirements for irrigation, this contamination threatens the future quality of the Fucino basin's water.

Pesticide contents (Tab. 5) were analysed in surface water and

que superficiali che sotterranee nel 2004 (RUGGIERI *et alii*, 2005) con quattro campagne a cadenza stagionale su 35 siti, corrispondenti alle analoghe relative ai nitrati, e successivamente nel 2006 (PACIONI *et alii*, 2009), in tre campagne a cadenza stagionale su circa 20 siti scelti tra i precedenti. Nelle prime due campagne del 2004 (invernale e primaverile) non è stata riscontrata traccia di pesticidi nelle acque, sia superficiali che sotterranee. La campagna estiva (fine giugno 2004) ha evidenziato invece una larga diffusione del principio attivo Linuron e una sporadica presenza del Dicloran. Durante la campagna di settembre, il Linuron è stato identificato soltanto in 7 campioni, mentre il Dicloran è risultato più diffuso e ha fatto la sua comparsa anche il Carbaryl. Particolarmente significativo risulta il ritrovamento di pesticidi anche all'interno di sorgenti e pozzi, sia durante la campagna di Giugno che di Settembre (max 0,37 µg/L). L'elaborazione spaziale del dato relativo alla diffusione del Linuron in estate (Fig. 14) non ha evidenziato particolari trend geografici, ma soltanto due hot-spots ben localizzati (valori superiori a 1 µg/L).

La concentrazione di pesticida rinvenuta nei campionamenti stagionali del 2006 (Tab. 5) è di gran lunga superiore rispetto a quelli del 2004. Linuron e Dicloran sono stati ritrovati in numerosi campioni della campagna primaverile, anche se è evidente una maggiore diffusione e concentrazione di Linuron. Durante il successivo campionamento di giugno è stato rinvenuto Linuron in tutti i campioni, comprese le acque sotterranee. Nella campagna autunnale sono stati trovati Linuron e Dicloran in modo diffuso, anche se in concentrazioni modeste; nessun principio attivo è risultato presente nelle acque dei canali campionate a gennaio.

La presenza diffusa di Linuron coincide con l'applicazione di diserbanti nella Piana ad aprile, mentre il diffondersi della pratica della seconda coltura stagionale che prevede una nuova applicazione di diserbanti in giugno giustificerebbe l'abbondanza di Linuron in questo periodo. La principale fonte di contaminazione delle acque superficiali è da attribuirsi al processo di scorrimento superficiale, che segue gli eventi piovosi e gli interventi di irrigazione avvenuti dopo l'applicazione dei pesticidi. L'aumento della domanda idrica all'interno della piana e i numerosi canali presenti, quando in estate il prelievo dai pozzi diventa particolarmente intenso, possono innescare fenomeni di drenanza di acqua dai canali, contenenti significative concentrazioni di pesticida, verso la falda freatica immediatamente sottostante. Successivamente la riduzione dei pompaggi per uso irriguo permetterebbe il normale ripristino della circolazione idrica della falda verso i canali (PACIONI *et alii*, 2009).

Anche per i pesticidi è stato possibile quindi verificare una correlazione tra presenza dei composti considerati e ciclo agronomico. Se finora la loro diffusione nelle acque superficiali e sotterranee è stata minima, grazie alla bassa permeabilità dei suoli della piana e all'abbondanza della risorsa idrica disponibile, il loro ritrovamento evidenzia l'esistenza di un reale rischio di inquinamento, soprattutto se inquadrato nel contesto di una progressiva diminuzione della disponibilità idrica e variazione delle pratiche colturali.

groundwater in 2004 (RUGGIERI *et alii*, 2005). Four seasonal surveys, similar to the nitrate ones, were conducted on 35 sites. Pesticide contents were also analysed in 2006 (PACIONI *et alii*, 2009). This time, 3 seasonal surveys were conducted on about 20 sites, selected among the previous ones. In the first 2 surveys of 2004 (Winter and Spring), no pesticides were found in both surface water and groundwater. Conversely, the Summer survey (end of June 2004) indicated the large diffusion of the active principle Linuron and the sporadic presence of Dicloran. During the September survey, Linuron was identified only in 7 samples, whilst Dicloran proved to be more diffuse and also Carbaryl appeared. It is worth noting that pesticides were detected inside springs and wells during both the June and September surveys (max 0.37 µg/L). Spatial processing of the data on Linuron contamination in Summer (Fig. 14) did not suggest any particular geographic trend, but only two hot spots (values above 1 µg/L).

The pesticides found in the seasonal sampling surveys of 2006 (Tab. 5) were by far higher than in 2004. Linuron and Dicloran were detected in numerous samples of the Spring survey, even if Linuron was clearly more diffuse and concentrated. During the following June survey, Linuron was traced in all the samples, including those of groundwater. In the Autumn survey, Linuron and Dicloran were diffuse, albeit in moderate amounts. No active principle was found in the water of the channels sampled in January.

The diffusion of Linuron matches the application of herbicides in the Plain in April, while the practice of the second seasonal crop (with a new application of herbicides in June) may justify the abundance of Linuron in this period. The main source of surface water contamination is likely to be surface runoff, which follows rainfall and irrigation after pesticide application. In Summer, growing water demand and occurrence of numerous channels in the Plain - especially when withdrawal from wells is more intense - may trigger leakage of water (with high pesticide contents) from the channels to the immediately underlying unconfined groundwater. Afterwards, the reduction of pumping for irrigation is supposed to restore the normal groundwater flow towards the channels (PACIONI *et alii*, 2009).

Therefore, a correlation was also found between pesticides and agronomic cycle. While pesticide contents in surface water and groundwater have been minimum so far, thanks to the low-permeability soils and the abundant water supply in the Plain, their detection suggests an actual risk of contamination, especially in view of the progressive decline of water supply and of changing agricultural practices.

## CONCLUSIONI

Lo studio della risorsa idrica del Fucino, eseguito tra il 1998 e il 2008, finalizzato alla valutazione dell'eventuale impatto delle attività agricole e irrigue sullo stato quantitativo e qualitativo delle acque superficiali e sotterranee, è stato condotto prendendo in considerazione gli elementi a disposizione per allestire un bilancio idrico "integrato", comprensivo delle attività antropiche interagenti con il ciclo delle acque, mettendo a confronto i dati precedenti con quelli misurati negli ultimi venti anni. Ne è emerso che le modificazioni delle pratiche colturali nella piana del Fucino hanno determinato una maggiore idroesigenza ai fini irrigui ed un conseguente aumento del fabbisogno e delle utilizzazioni idriche, basate prevalentemente su prelievi crescenti dal sottosuolo. Questi ultimi a loro volta hanno innescato una drastica diminuzione della portata naturalmente erogata dalle sorgenti, alimentate dagli acquiferi carbonatici circostanti.

Tale situazione risulta in rapida evoluzione e, anche se la notevole potenzialità idrica degli acquiferi carbonatici alimentanti le sorgenti della piana è ampiamente in grado di recuperare durante la successiva stagione piovosa gli ingenti prelievi estivi dal sottosuolo, in anni particolarmente siccitosi si va diffondendo uno squilibrio evidente tra disponibilità e fabbisogni. La pressione antropica in termini quantitativi sulle risorse idriche non accenna a diminuire e ciò comporta la necessità di monitorare il sistema acqua-uomo-agricoltura nel Fucino, al fine di evitare che episodici squilibri possano trasformarsi in emergenze ricorrenti.

Contemporaneamente, la riduzione dei deflussi superficiali e il costante uso di fertilizzanti e pesticidi rende realistico il rischio di inquinamento delle acque superficiali e sotterranee, nonostante la favorevole limitata vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento sia in grado di preservare la risorsa idrica sotterranea. Le campagne di monitoraggio sui nitrati e i pesticidi hanno fornito elementi circostanziati sulle caratteristiche del ciclo di questi composti inquinanti, evidenziandone la dipendenza dalle pratiche agricole e una diversa distribuzione dei composti con variabilità stagionale e spaziale. La generale capacità di protezione del sistema naturale osservata consente attualmente di mantenere basse le concentrazioni degli inquinanti, ma in funzione del mutato quadro idrologico, anche in questo campo aumentano i segnali non positivi.

I risultati ottenuti hanno portato all'elaborazione di modelli concettuali quantitativi della circolazione idrica sotterranea e del ciclo dei potenziali inquinanti. In particolare, il modello idrodinamico che correla la fase di ricarica con livelli piezometrici e portata delle sorgenti, rappresenta uno strumento previsionale operativo, mentre la conoscenza del ciclo di nitrati e pesticidi garantisce la possibilità di operare per ridurre il rischio di inquinamento.

In conclusione, lo studio ha condotto all'elaborazione di strumenti operativi atti a ridisegnare i rapporti tra attività agricola e risorsa idrica sotterranea, al fine di contribuire ad una moderna gestione integrata della risorsa idrica del Fucino a fini agricoli, nel rispetto delle esigenze antropiche e della conservazione delle caratteristiche ambientali dell'area.

## CONCLUSIONS

Between 1998 and 2008, a study was conducted on the water resources of the Fucino basin. The study was expected to assess the impact of farming and irrigation on quantity and quality of the local surface water and groundwater. The study took into consideration available data to draw up an "integrated" water budget, including human activities interacting with the water cycle, and it compared prior data with data measured in the past two decades. The study demonstrated that changes in farming practices in the Fucino Plain have increased water requirements for crop irrigation and thus water demand. This demand is mostly covered by groundwater abstraction. This fact has sharply decreased the natural discharge of springs, which are supplied by the surrounding carbonate aquifers.

This situation is rapidly evolving. Even if the considerable water potential of the carbonate aquifers feeding the Plain's springs can largely offset substantial groundwater withdrawal in Summer through recharge in the following rainy season, clear imbalances between supply and demand arise in particularly dry years. Quantitative anthropogenic pressure on water resources does not show signs of decrease. The need thus arises for monitoring the water-man-farming system in the Fucino basin to prevent occasional imbalances from turning into repeated emergencies.

At the same time, the reduction of surface discharge and the constant use of fertilisers and pesticides make the risk of surface water and groundwater contamination realistic, despite the fact that the low vulnerability of aquifers to contamination can safeguard groundwater resources. Nitrate and pesticide monitoring surveys gave details on the cycle of these contaminants, indicating that they depend on farming practices and that their distribution has both seasonal and spatial variability. The general protection currently offered by the natural system can hold down contaminant concentrations. However, the changing hydrological regime launches negative signals also in this field.

The results of the study helped build quantitative conceptual models of groundwater flow and of the potential contaminant cycle. In particular, the hydrodynamic model, which correlates recharge with piezometric levels and discharge from springs, represents an operational forecasting tool, while the improved understanding of the nitrate and pesticide cycle makes it possible to mitigate the risk of contamination.

In conclusion, the study produced operational tools to redesign the relationship between farming and groundwater, so as to contribute to modern integrated management of the Fucino's water resources for farming, while meeting human requirements and safeguarding the environment.

## RINGRAZIAMENTI

Lavoro svolto nell'ambito del programma di ricerca "Acqua e Agricoltura nel Fucino", responsabile scientifico Prof. Ezio Burri, Dipartimento Scienze Ambientali, Università dell'Aquila, finanziato dall'ARSSA di Avezzano (resp. Ing. Franco Ciofani). Il presente lavoro rielabora e aggiorna quanto contenuto nella "Memoria illustrativa della Carta Idrogeologica del Fucino" e relativa carta idrogeologica, stampata a tiratura limitata dall'ARSSA; a tal proposito, si ringrazia il Prof. Pietro Celico, Dipartimento Scienze della Terra, Università di Napoli "Federico II" per la revisione scientifica del relativo manoscritto. Si ringraziano inoltre il Prof. Maurizio Barbieri dell'Università "La Sapienza" di Roma per le analisi chimiche, il Prof. Pietro Mazzeo dell'Università dell'Aquila per le analisi sui pesticidi e il Prof. Ramon Aravena dell'Università di Waterloo (Canada) per le analisi isotopiche dei nitrati. Infine un ringraziamento va a tutti gli studenti che hanno contribuito negli anni con le tesi di laurea e di dottorato: Andrea Del Bon, Andrea Marchetti, Eva Pacioni, Mauro Roma, Fabio Galli, Valentina Marinelli, Luca D'Andrea, Luca Rosiello, Andrea Luciani, Annalisa Aimola, Maria Curtacci, Domenico Fracchiolla, Gabriele Gatti e Adriana Rossi.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Research program "Water and agriculture in the Fucino Plain", director Prof. Ezio Burri, Environmental Science Department, University of L'Aquila, funded by ARSSA, Avezzano (Ing. Franco Ciofani). This paper rearranges and improves results contained in "Memoria illustrativa della Carta Idrogeologica del Fucino", printed in limited copies by ARSSA; for the scientific review of this version, thanks go to Prof. Pietro Celico, Università di Napoli "Federico II". Thanks go to Prof. Maurizio Barbieri, University of Rome "La Sapienza" for chemical analyses, to Prof. Pietro Mazzeo, University of L'Aquila, for pesticide analyses and Prof. Ramon Aravena, University of Waterloo (Canada) for nitrate isotope analyses. Finally, I would thank to all students and PhD students who contribute to this research along the years: Andrea Del Bon, Andrea Marchetti, Eva Pacioni, Mauro Roma, Fabio Galli, Valentina Marinelli, Luca D'Andrea, Luca Rosiello, Andrea Luciani, Annalisa Aimola, Maria Curtacci, Domenico Fracchiolla, Gabriele Gatti and Adriana Rossi.

## OPERE CITATE / REFERENCES

- A.R.S.S.A. AVEZZANO (1996-2008) - *Dati inediti meteorologici, idrologici e idrodinamici*.
- BIANCHI FASANI G., CAVINATO G.P., PETITTA M., SCARASCIA MUGNOZZA G. & VOLTAGGIO M. (2008) - *The geological model of Celano town area for seismic microzonation activities*. *Soil Dyn Earthq Eng*, **28**: 978-985.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. *Mem Soc Geol It.*, **35**: 991-1012.
- 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., PREZIOSI E. & SERENI M. (1993) - *Genesi e regime delle acque continentali del Lazio*. Collana monografica del C.N.R., 78 pp., 40 tav., con schema idrogeologico allegato, CNR, Roma
- BURRI E., DEL BON A. & PETITTA M. (2003a) - *La gestione della risorsa idrica nella piana del Fucino (Abruzzo) tra esigenze antropiche e squilibri ambientali*. *Atti dei Convegni Lincei*, **192**: 79-87.
- BURRI E., DEL BON A., MARCHETTI A. & PETITTA M. (2003b) - *Uso delle risorse idriche di natura carsica ed agricoltura: il caso del Fucino (Abruzzo - Italia centrale)*. *Atti del Convegno Nazionale "L'ambiente carsico e l'uomo"*, 189-199.
- BURRI E., PACIONI E. & PETITTA M. (2008) - *Nitrati e Pesticidi nelle acque del bacino del Fucino in funzione della disponibilità della risorsa idrica e dell'attività agricola*. *Atti dei convegni Lincei* **232**: 97-111.
- BURRI E. & PETITTA M. (1999) - *Farming and water management in the Fucino Plain (Central Italy) in the last century*. In: *Proceedings XVII Intern. Congress International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)*, Granada (Spagna), **1D**: 257-268
- BURRI E. & PETITTA M. (2004) - *Agricultural changes affecting water availability: from abundance to scarcity (Fucino Plain, central Italy)*. *Irrigation and Drainage*, **53**: 287-299
- CAVINATO G.P., CARUSI C., DALL'ASTA M., MICCADEI E. & PIACENTINI T. (2002) - *Sedimentary and tectonic evolution of Plio - Pleistocene alluvial and lacustrine deposits of Fucino Basin (central Italy)*. *Sedimentary Geology*, **148**: 29-59.
- 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 F. & CELICO P. (1994) - *Aspetti idrogeologici del bacino del Fucino*. In "Sulle rive della Memoria. Il Lago Fucino ed il suo Emissario" (a cura di E. Burri), pagg. 35-43, CARSA Edizioni, Pescara.
- CELICO P. (1979) - *Schema idrogeologico dell'Appennino carbonatico centro-meridionale*. *Memorie e Note dell'Istituto di Geologia Applicata di Napoli (1978-1979)*, **14**: 97 pp.
- CELICO P. (1983) - *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro meridionale: Progetti speciali per gli schemi idrici nel Mezzogiorno*. *Quad. Cassa Mezzog.* **4/2**: 225 pp.

- CHIUCHIARELLI I., DI CIOCCIO A.M. & SANTUCCI S. (1994) - *Caratterizzazione granulometrica dell'orizzonte superficiale dei suoli della piana del Fucino*. A.R.S.S.A., Regione Abruzzo: 1-31.
- CIOTOLI G., GUERRA M., LOMBARDI S. & VITTORI E. (1998) - *Soil gas survey for tracing seismogenic faults: A case study in the Fucino basin, Central Italy*. Journal of Geophysical Research, **103**, n. **B10**: 781-794.
- FERRARA V. (1990) - *Carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero vulcanico dell'Etna alla scala 1:50.000*. C.N.R.-G.N.D.C.I., SELCA - Firenze.
- GALADINI F. & MESSINA P. (1999) - *Neotettonica della Piana del Fucino*. In: *13 gennaio 1915. Il terremoto della Marsica* (a cura di CASTENETTO S. e GALADINI F.). C.N.R., Serv. Sis. Naz., Ist. Poligr. Stat.: 199-222. Roma.
- GIRAUDI C. (1999) - *Evoluzione geologica tardo pleistocenica ed olocenica della Piana del Fucino e dei versanti adiacenti: analisi di nuovi dati stratigrafici e radiometrici e ricostruzione delle variazioni ambientali*. In *13 Gennaio 1915. Il terremoto della Marsica* (a cura di CASTENETTO S. e GALADINI F.). C.N.R., Serv. Sis. Naz., Ist. Poligr. Stat.: 183-197. Roma.
- LETTA D. & MASI U. (1997) - *Caratteristiche geochimiche di acque sorgive e di pozzo della zona della piana del Fucino (L'Aquila, Italia centrale)*. Geologica Romana, **33**: 1-12, 3 figg., 1 tab., Roma.
- MASSOLI NOVELLI R., PETITTA M. & SALVATI R. (1999) - *Analysis and protection of groundwater resources: Capo Pescara karst springs (Central Italy)*. Proceedings XXIX Congresso Internazionale della Ass. Intern. Idrogeologi (AIH), Bratislava (Slovacchia), settembre 1999: 449-454.
- MELLINI F., PETITTA M. & WASIMI S. (2007) - *Stochastic hydrologic simulation for water availability evaluation in the Fucino Plain (Central Italy)*. Water International, **5**: 844-855.
- PACIONI E., PETITTA M. & MARINO M.A. (2007) - *Simulation by IPTM-CS model of pesticides found in surface water and groundwater of the Fucino Plain, Italy*. In: WEBB B.W., DE BOER D. (eds) *Water Quality and Sediment Behaviour of the Future: Predictions for the 21<sup>st</sup> Century*. IAHS red book, **314**: 188-196.
- PACIONI E., PETITTA M., BURRI E., FANELLI M., MAZZEO P. & RUGGIERI F. (2009) - *Influence of surface/groundwater interaction on pollution by pesticides in farmlands of the Fucino Plain, Central Italy*, Environmental Earth Science. DOI: 10.1007/s12665-009-0337-5.
- PETITTA M. (2009) - *Idrogeologia della media valle del Velino e della Piana di S.Vittorino (Rieti, Italia Centrale)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **1/2009**: 157-181.
- PETITTA M. & BURRI E. (2006) - *Water management modeling for agricultural activities in the Fucino Plain (Central Italy)*. Proceedings Int. Conf. "All about karst & water": 151-158.
- PETITTA M., BURRI E., DEL BON A. & MARCHETTI A. (2005) - *Carta idrogeologica del Bacino del Fucino*. SELCA ed.
- PETITTA M., BURRI E., DEL BON A. & PANNUNZIO G. (2005) - *Water and agriculture management: environmental problems in the Fucino Plain (Central Italy)*. In RAZOWSKA-JAWOREK L. & SADURSKI A. eds., IAH Selected Papers 5, "Nitrates in groundwater": 269-277.
- PETITTA M. & CAPELLI G. (1994) - *Inquadramento idrologico del bacino del Fucino*. In: *Sulle rive della Memoria. Il Lago Fucino ed il suo Emissario* (a cura di E. BURRI): 44-63, CARSA Edizioni, Pescara.
- PETITTA M., FRACCHIOLLA D., ARAVENA R. & BARBIERI M. (2009) - *Application of isotopic and geochemical tools for the evaluation of the nitrogen cycle in an agricultural basin, the Fucino Plain. Central Italy*. Journal of Hydrology, **372**: 124-135.
- RUGGIERI F., FANELLI M., DI PASQUALE D., BURRI E., PETITTA M. & MAZZEO P. (2005) - *Evaluation by Chemical Parameters of the Pollution State of the Agricultural-Industrial Settlement of the Fucino Plain*. Annali di Chimica, **95 (9-10)**: 607-616.
- SERVIZIO IDROGRAFICO (1951-1995) - *Annali idrologici - parte prima e seconda*, sezione di Napoli, MIN. LL.PP.
- THORNTHWAITE C.W. & MATHER J.R. (1957) - *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Climatology, 10. Centerton, New Jersey. Laboratory of Climatology Drexel Institute of Technology, 311 pp.
- TUCCERI G. & RECINELLI E. (1996) - *Relazione sulle esigenze idriche del Fucino - A.R.S.S.A. (Abruzzo)*, Relazione inedita.

Received February 2009- Accepted September 2009