

STUDIO IDROGEOLOGICO NEL SETTORE NORD-OCCIDENTALE DEI MONTI SIBILLINI: UN CONTRIBUTO ALLA CARTOGRAFIA IDROGEOLOGICA UFFICIALE

HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE MONTI SIBILLINI NORTH-WESTERN SECTOR (CENTRAL ITALY): A CONTRIBUTION TO THE OFFICIAL HYDROGEOLOGIC MAPPING

CARLO FELICE BONI^(*), CLAUDIA TARRAGONI^(*), LUCIO MARTARELLI^(**) & SIMONA PIERDOMINICI^(***)

(*) Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Scienze della Terra - Rome, Italy

(**) APAT - Dipartimento Difesa del Suolo/Servizio Geologico d'Italia - Rome, Italy

(***) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Rome, Italy

e-mail: claudia.tarragoni@uniroma1.it

RIASSUNTO

Questo lavoro evidenzia l'importanza del dato sperimentale acquisito con il rilevamento di campagna ed integra i consolidati metodi di cartografia idrogeologica. Vengono considerati i caratteri litostratigrafici fondamentali dei terreni affioranti nell'area di studio e la loro attitudine a farsi attraversare dalle acque meteoriche. L'analisi geologico-strutturale ha permesso di individuare quegli elementi che possono costituire delle barriere idrauliche e i complessi idrogeologici che possono ospitare gli acquiferi. E' stata eseguita un'analisi dettagliata dell'idrologia di superficie per mezzo di misure di portata eseguite in alveo; queste hanno permesso di: valutare il flusso di base dei corsi d'acqua, individuare le sorgenti puntuali e lineari, quantificare la risorsa idrica mediamente drenata e determinare il regime della portata di sorgenti e corsi d'acqua. La coniugazione dell'analisi geologico-strutturale e dell'analisi idrogeologica ha portato all'allestimento dei Modelli Idrogeologici Concettuali per ciascun acquifero individuato, da cui si ottengono i valori dell'infiltrazione efficace media (I_{eff}), successivamente raggruppati in classi. I molteplici caratteri idrogeologici emersi non possono trovare espressione in un unico elaborato. Pertanto, la Cartografia Idrogeologica sperimentale che ne deriva è stata preparata come la sovrapposizione di diversi livelli informativi, dai quali è stato derivato come documento cartografico di base la "Carta dei Complessi Idrogeologici e delle Emergenze naturali", cui si affiancano, come elementi complementari, la "Carta dell'Idrologia di superficie" e il "Modello Idrogeologico Concettuale" dei differenti acquiferi riconosciuti.

TERMINI CHIAVE: *idrologia quantitativa, cartografia idrogeologica, Monti Sibillini*

INTRODUZIONE

Questo lavoro presenta i risultati di uno studio idrogeologico quantitativo condotto nella porzione nord-occidentale dei Monti Sibillini (Marche, Italia) e il rilevante contributo del prof. CARLO F. BONI alla sperimentazione delle linee guida per la Cartografia Idrogeologica ufficiale alla scala 1:50.000 (Quaderni SGN, serie III, n. 5; MARI *et alii*, 1995).

La ricerca ha portato all'identificazione degli acquiferi più signifi-

ABSTRACT

This work underlines the importance of experimental data and integrates the hydrogeological mapping methods. The work has analyzed the lithological features of the outcropping rocks and their attitude to be crossed by the meteoric waters. Geologic-structural analysis has allowed to identify elements that can constitute the hydraulic barriers and the hydrogeological complexes that can contain the aquifers.

A detailed analysis of base flow was carried out through hydrogeological survey directly performed in the river. The hydrogeological survey has allowed us: 1) to appraise the river's base flow; 2) to identify the punctual and linear springs; 3) to quantify the water resource on average drained; and 4) to determine the discharge regime of springs and rivers.

The Conceptual Hydrogeological Model for each individual aquifer have been derived from geologic-structural analysis and hydrogeological studies. The Conceptual Hydrogeological Models allowed us to calculate the Mean Effective Infiltration (I_{eff}) of every aquifer. The values of I_{eff} are gathered in classes.

All merged information has been used in the preparation of Hydrogeological Complexes and Natural Springs Map. The manifold hydrogeological information cannot be represented in one document only; so the Experimental Hydrogeological Mapping has been prepared as the overlap of different informative levels: Hydrogeological Complexes and Natural Springs Map (principal document), Surface Hydrology Map and Conceptual Hydrogeological Models of several recognized aquifers (complementary elements).

KEY WORDS: *quantitative hydrogeology, hydrogeological mapping, Sibillini Mounts*

INTRODUCTION

This work shows the results of a quantitative hydrogeologic study carried out in the north-western area of Sibillini Mounts (Marche, Italy) and the significant contribution of prof. CARLO F. BONI concerning the test of guidelines to official hydrogeologic mapping at scale 1:50:000 (Quaderni SGN, issue III, n. 5; MARI *et alii*, 1995).

The study allowed the identification of the most relevant

ficativi e delle rispettive aree di alimentazione, dei limiti idraulici tra acquiferi e dell'assetto geologico-strutturale sottolineando la stretta dipendenza tra assetto litostrutturale e circolazione idrica sotterranea. In particolare, lo studio si è articolato in più fasi: i) riconoscimento dei principali caratteri litostratigrafici e strutturali della successione sedimentaria interessata; ii) identificazione e quantificazione delle sorgenti puntuali e lineari dei differenti acquiferi carbonatici sulla base di periodiche misure mensili delle portate; iii) analisi del regime di portata e rapporti tra queste e le precipitazioni. Lo studio idrogeologico realizzato coniuga gli standard di rappresentazione cartografica idrogeologica, statica e prevalentemente descrittiva, con valutazioni quantitative della risorsa considerando l'acqua come il principale protagonista di un processo dinamico, caratterizzato da variazioni cicliche sia di carattere stagionale, sia di lungo periodo.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area fa parte della porzione sud-orientale dell'Appennino umbro-marchigiano. Quest'ultimo è caratterizzato da uno stile deformativo a pieghe est-vergenti fortemente disarticolate da sovrascorrimenti ovest-immergenti a direzione N-S (LAVECCHIA, 1979, 1981, 1985; DECANDIA, 1982; KOOPMAN, 1983; COOPER & BURBI, 1986; CALAMITA & DEIANA, 1988) di cui il più noto è quello dei Monti Sibillini e da faglie ad andamento appenninico (NW-SE e NNW-SSE) ed antiappenninico (NNE-SSW; CALAMITA *et alii*, 1991, 1994; CALAMITA & PIZZI, 1992, 1994). L'Appennino umbro-marchigiano è stato profondamente coinvolto e smembrato dal susseguirsi di più fasi tettoniche associate a processi compressivi (Tortoniano-Pliocene medio) e distensivi (Pliocene superiore-Pleistocene; ELTER *et alii*, 1975; LAVECCHIA *et alii*, 1994).

L'area è caratterizzata principalmente da successioni sedimentarie tipiche di differenti ambienti di deposizione formati a seguito dello smembramento della piattaforma carbonatica triassico-liassica durante la fase di tettonica estensionale avvenuta nel Lias. In questo periodo inizia a costituirsi ed ad articolarsi il bacino pelagico caratterizzato da una serie di depressioni ed alti strutturali legati ai diversi tassi di subsidenza in cui si depositano sequenze sedimentarie differenti. Questa variabilità dell'ambiente di deposizione ha dato origine a significative eteropie verso successioni ridotte o condensate, con sensibili variazioni di spessore e con caratteri litologici singolari. I primi studi significativi sulla geologia dell'area sono stati condotti da SCARSELLA (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1941) per il rilevamento del foglio geologico ufficiale 132-Norcia alla scala 1:100.000, da SCARSELLA (1946, 1951a, 1951b), dal MERLA (1951), dal SELLI (1950), e da SCARSELLA & MORETTI per il settore settentrionale dell'area considerata in occasione del rilevamento del foglio alla scala 1:100.000 124-Macerata (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1967). Il principale contributo di questi lavori è stato un approfondito studio della successione stratigrafica, dell'assetto strutturale e dei rapporti tra tettonica e evoluzione temporale. Negli anni '70, un rilevamento di dettaglio alla scala 1:25.000 dei Monti Sibillini nord-orientali (CHIOCCHINI *et alii*, 1976) porta un nuovo sostanziale contributo per

aquifers, their hydraulic boundaries and the definition of the geological-structural setting, thus evidencing the close relationship between the lithostructural setting and groundwater circulation. In particular, the study consists of the following steps: i) identification of the main lithostratigraphic and structural aspects of the involved sedimentary sequence; ii) identification and quantification of springs of the different carbonate aquifers on the basis of periodical (monthly) measurements of discharge; iii) analysis of the regime and of the relationship among the discharges and precipitations. This hydrogeological study combines the standard hydrogeological mapping (static and predominantly descriptive), with quantitative evaluations of the resources in which water is considered as the main actor of a dynamic process, characterized by cyclic variations both seasonal and long term.

GEOLOGICAL SETTING

The area is located in the south-eastern part of the Umbro-Marchean Apennines. The Umbro-Marchean Apennines are characterized by eastward-verging folds strongly dislocated by westward-verging thrusts with N-S direction of which the most important is the Sibillini Mountains thrust (LAVECCHIA, 1979, 1981, 1985; DECANDIA, 1982; KOOPMAN, 1983; COOPER & BURBI, 1986; CALAMITA & DEIANA, 1988). This sector is also affected by faults with apenninico (NW-SE e NNW-SSE) and anti-apenninico trend (NNE-SSW; CALAMITA *et alii*, 1991, 1994; CALAMITA & PIZZI, 1992, 1994). The Umbro-Marchean Apennines has been strongly deformed during Tortonian-middle Pliocene compressive tectonic phase and during upper Pliocene to Pleistocene distensive tectonic phase (ELTER *et alii*, 1975; LAVECCHIA *et alii*, 1994).

The Umbro-Marchean Apennines are characterized by sedimentary successions deposited in different depositional environments related to breaking-up of the carbonate platform since the triassic-liassic rifting. This tectonic evolution determined the origin of horst and graben depositional setting, the latter characterized by a more pelagic environmental. This variability of the depositional environmental has produced significant heteropie consisting in condensed and discontinuous sequences with considerable thickness variations and peculiar lithological features. The first geological studies in the area were ones by SCARSELLA (1946, 1951a, 1951b), by MERLA (1951), by SELLI (1950) and by SCARSELLA & MORETTI (Geologic Map of Italy, Sheet N. 124-Macerata to a scale 1:100.000, SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1967). The most important contribution of these papers was an in-depth study of stratigraphic sequence, of the structural setting and of the relationship between tectonics and temporal evolution. In the seventies was performed a detailed geological survey to a scale 1:25.000 of north-eastern Sibillini Mts. (CHIOCCHINI *et alii*, 1976) which gives a relevant contribution to stratigraphic knowledge of the area and the structural setting of the boundary north-western boundary of the carbonates ridge of the Sibillini Mts between Ambro and Fiastrone

una migliore definizione della stratigrafia dell'area e dell'assetto strutturale in corrispondenza del fronte nord-orientale della dorsale carbonatica dei Monti Sibillini compreso tra il Fiume Ambro ed il Fiume Fiastrone. Numerosi e rilevanti sono i lavori a carattere regionale che interessano l'area in studio, soprattutto volti ad una sempre più dettagliata definizione dell'assetto strutturale (e.g.: COLACICCHI *et alii*, 1970; CENTAMORE *et alii*, 1971, 1972, 1986; JACOBACCI *et alii*, 1974; DAMIANI, 1975; LAVECCHIA, 1979, 1981; LAVECCHIA & PIALLI, 1981; BOCCALETTI *et alii*, 1983, 1986; CALAMITA & DEIANA, 1986a, 1986b, 1988; CALAMITA *et alii*, 1986, 1990, 1991, 1992; COOPER & BURBI, 1986; COSENTINO, 1986; BARCHI *et alii*, 1996). In sintesi, la successione stratigrafica umbro-marchigiana affiorante in questa area è principalmente costituita da una serie di livelli sedimentari sottilmente stratificati di ambiente pelagico, in cui si alternano litotipi calcarei a litotipi di tipo calcareo-marnoso a siliceo.

Una visione di più ampio respiro dell'area è contenuta nel lavoro di CENTAMORE *et alii* (1991) in cui si aggiungono ulteriori e ragguardevoli dettagli relativi alla stratigrafia, alle strutture tettoniche e agli elementi di idrogeologia, questi ultimi per la maggior parte provenienti da studi precedenti (BONI *et alii*, 1986). Una sintesi "aggiornata" delle conoscenze geologiche e geologico-strutturali della zona in studio si riscontra nel lavoro di TARRAGONI (2005) in cui l'Autore individua e descrive, per la prima volta, affioramenti di travertino lungo le valli del Fiume Fiastrone, dell'Acquasanta e dell'Ambro.

L'area indagata è quella dei bacini dei Fiumi Chienti di Pievetorina, Fornace ed alto Fiastrone nella porzione nord-occidentale dei Monti Sibillini (Marche), ubicata tra il sovrascorrimento dei Monti Sibillini ad E ed il sovrascorrimento di Montecavallo ad W e tra il Fiume Ussita a S ed il Fiume Chienti di Gelagna a N. La zona di studio è caratterizzata da formazioni tipiche della successione umbro-marchigiana dal Calcarea inferiore (Lias inferiore), alle Arenarie di Camerino (Messiniano inferiore), fino ai depositi quaternari detritici, alluvionali e di travertino. In particolar modo affiorano successioni ridotte e condensate contraddistinte da spessori nettamente inferiori a quelli attribuiti alla successione completa a causa della disarticolazione del fondale marino in un insieme di blocchi sollevati, abbassati e variamente ruotati. Nella figura 1 è presentata una sintesi in cui si

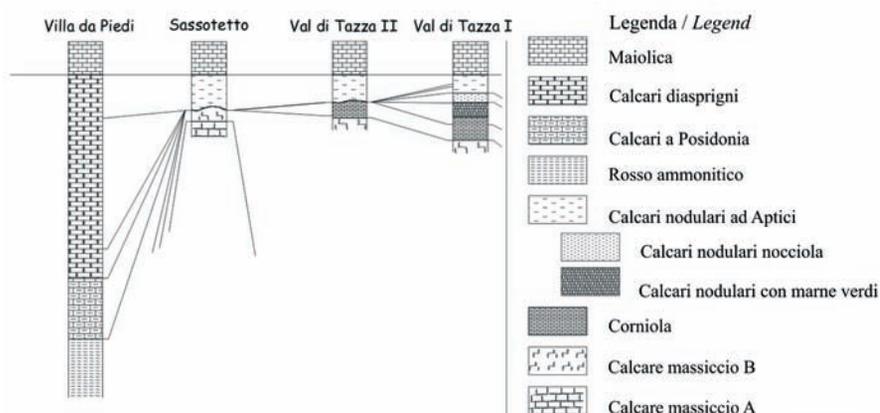
rivers. The works, to regional aspect that interested the study area, are a lot and relevant; in particular they are directed to have a more detailed definition of structural setting (e.g.: COLACICCHI *et alii*, 1970; CENTAMORE *et alii*, 1971, 1972, 1986; JACOBACCI *et alii*, 1974; DAMIANI, 1975; LAVECCHIA, 1979, 1981; LAVECCHIA & PIALLI, 1981; BOCCALETTI *et alii*, 1983, 1986; CALAMITA & DEIANA, 1986, 1988; CALAMITA *et alii*, 1986, 1990, 1991, 1992; COOPER & BURBI, 1986; COSENTINO, 1986; BARCHI *et alii*, 1996).

Briefly, in this area the cropping umbro-marchean stratigraphic sequence is mainly characterized by a series (set) of finely stratified sedimentary layers of pelagic environment, where the calcareous layers alternate between calcareous-marly and siliceous.

A large overview of the area is in the paper by CENTAMORE *et alii* (1991) where additional and distinguished details related to stratigraphy, tectonic structures and hydrogeologic elements are described. The hydrogeology part mostly comes from previous studies (BONI *et alii*, 1986). An up-to-date synthesis of the geological and structural knowledge of the study zone finds in the paper by TARRAGONI (2005) where the Author identifies and describes, for the first time, the outcrops of travertine along the Fiastrone, Acquasanta and Ambro valleys.

The investigated area is the Chienti di Pievetorina basin, Fornace and up-stream Fiastrone basins, in the north-western part of Sibillini Mts. (Marche-Italy). It is located among the Sibillini Mts. thrust to east, the Montecavallo thrust to west, the Ussita stream to south and the Chienti di Gelagna river to north. The area is characterized by standard Umbro-Marchean sequence from Calcarea Massiccio (lower Lias), to Camerino Sandstone (lower Messinian) up to detrital, alluvial and travertine quaternary deposits. In particular, some discontinuous and condensed successions crop out. They are characterized by very small thicknesses compared with continuous sequences, because of disjoining of the sea floor with a set of horst and graben. A synthesis is shown in Figure 1 where the Chienti river valley (Val di Tazza) is distinguished by small outcrops of liassic sequence. The "Maiolica" shows big thicknesses on western side of the Fiastrone river at Sassotetto Mt.. While on left side of Fiastrone river (Villa da Piedi)

Fig. 1 - Rapporti stratigrafici tra successioni condensate, lacunose e complete (CENTAMORE *et alii*, 1971, modificato)
- Stratigraphic correlations among condensed, discontinuous and continuous successions (modified from CENTAMORE *et alii*, 1971)



osserva che la valle del Fiume Chienti (località Val di Tazza) è contraddistinta da modesti affioramenti della serie liassica. Potenti spessori della Maiolica si osservano sul lato occidentale del Fiume Fiastrone presso Monte Sassotetto mentre in riva sinistra del Fiume Fiastrone (località Villa da Piedi), si riscontrano importanti affioramenti dei depositi liassici cui fanno seguito in continuità stratigrafica termini calcareo-silico-marnosi, di età giurassica con spessori molto variabili da luogo a luogo. Per la descrizione dei caratteri prettamente litostratigrafici si rimanda alla vasta letteratura esistente (e.g. SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1941, 1967; CENTAMORE *et alii*, 1971; PIALLI, 1971; CHIOCCHINI *et alii*, 1976; DECANDIA, 1982; CENTAMORE *et alii*, 1986; CENTAMORE & MICARELLI, 1991; PARISI, 1994; PASSERI, 2001).

IDROLOGIA E CLIMATOLOGIA

E' stata eseguita un'analisi ed una valutazione dei dati idrologici storici per confrontarli al dato odierno. I primi studi significativi sulla quantificazione della risorsa idrica sono quelli eseguiti dal Perrone (1910). Il lavoro del PERRONE fornisce un quadro di sintesi della disponibilità idrica nei primi anni del '900 sia della portata di magra ordinaria dei corsi d'acqua sia della portata delle principali sorgenti. A questo studio si affiancano i dati forniti dalle misure giornaliere eseguite dal Servizio Idrografico di Stato (Annuali idrografici del M.LL.PP. 1921-1992) a seguito della costruzione degli invasi artificiali di Fiastra (1950-1954) e di Polverina (1963-1967) che purtroppo hanno acquisito dati solo per un breve periodo ed in modo discontinuo (Tab. 1).

Il primo censimento di tutte le sorgenti esistenti sul territorio in studio, anche le più modeste, è da attribuire al lavoro di DRAMIS & DEIANA (1972). Questo lavoro ha permesso di avere una panoramica dell'intera risorsa disponibile pur non disponendo di misure delle portate di magra ordinaria dei corsi d'acqua principali. Quest'ultimi sono stati il principale obiettivo nel lavoro di BONI *et alii* (1986) in cui, oltre ad identificare le sorgenti puntuali, la loro quantificazione e regime, per la prima volta sono state identificate e misurate le sorgenti lineari più significative, indicandone i valori della portata media integrata anche da dati precedenti e da apposite misure eseguite in loco. La caratterizzazione delle acque sorgive, oltre che dal punto di vista della identificazione e della quantificazione, sono state anche distinte a seconda delle proprietà geochimiche nel lavoro di NANNI (1991).

Uno degli obiettivi del presente lavoro è fornire significativi elementi di dettaglio riguardo gli acquiferi e la risorsa idrica presenti nella porzione in studio, esulando dall'ambito regionale affrontato dagli studi precedenti. I dati delle misure di portata desunti dalla let-

has showed important liassic outcrop deposits, which follows, in stratigraphic continuity, the jurassic calcareous-siliceous-marly layers with very variable thicknesses (from place to place). For a better description of lithostratigraphic features the Authors refer to wide literatures (e.g. SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1941, 1967; CENTAMORE *et alii*, 1971; PIALLI, 1971; CHIOCCHINI *et alii*, 1976; DECANDIA, 1982; CENTAMORE *et alii*, 1986; CENTAMORE & MICARELLI, 1991; PARISI, 1994; PASSERI, 2001).

HYDROLOGY AND CLIMATOLOGY

An analysis and evaluation of the historical hydrogeological data has been carried out to compare them to present data. The first important study about the quantification of water resource was the PERRONE'S one (1910). This paper gives a summary of water supply in the first '900 years about minimum common (ordinary) flow both of the rivers and of the flow of the main springs. Following studies give data from daily measurements of flow performed from Italian Hydrographic Survey (Hydrographic Annals of Italian M.LL.PP. 1921-1992) as result of building of Fiastra (1950-1954) and Polverina (1963-1967) dams. Unfortunately, the hydrographic stations recorded data just for a short period and discontinuous acquisition (Tab. 1).

DRAMIS & DEIANA (1972) have performed the first census of all springs in the area, also the more modest. This work gives an overview of whole available resource even if no measurement of minimum standard flow of main rivers was performed. This kind of measurement was the main aim in BONI *et alii* (1986), where apart from to identify the springs and their quantification and regime, for the first time the most important linear springs were identified and measured specifying the value of mean flow plus historical data (previous data) and from special measures performed in situ. The characterization of water springs, apart from identification and quantification point view, were classified depending on the geochemical properties in NANNI (1991).

One of the purposes of this paper is to give relevant details about aquifers and water supply available in the study area lying outside the regional contest discussed in previous studies. The historical data of discharge measurement have been used in this paper to characterize

Stazione idrometrica <i>Hydrometric station</i>	Quota (m s.l.m.) <i>Elevation (m s.l.m.)</i>	Anni funzionamento <i>Years</i>	Portata media annua (l/s) <i>Mean annual flow (l/s)</i>
F. Chienti di Pievetorina	445	26 - 1939-40, 1948, 1953-76	2.08
T. Bocca Fornace di Pievebovigliana	480	2 - 1939, 1940	1.13
F. Fiastrone a Fiastra	640	6 - 1929-35	1.46

Tab. 1 - Elenco dei dati delle stazioni idrometriche del Servizio Idrografico e Mareografico di Stato
- *List of hydrometric station data of Italian Hydrographic and Mariographic Survey*

teratura sono stati di supporto a quelli acquisiti in questo studio per la caratterizzazione della risorsa idrica e per la stesura di un prodotto cartografico specifico e caratterizzante dell'area. Sono state eseguite con cadenza mensile, nell'anno idrologico 2002-2003, circa 200 misure di portata in alveo in 21 sezioni opportunamente distribuite nel territorio, in corrispondenza delle sorgenti o dei limiti tra complessi a diverso comportamento idraulico. Grazie ai dati sperimentali mensili, è stato possibile definire l'andamento della portata delle sorgenti puntuali e lineari nel periodo di osservazione, calcolarne la portata media ed identificarne la minima. La cadenza mensile dei campionamenti è stata una condizione imprescindibile per quantificare e monitorare la risorsa idrica drenata dagli acquiferi.

Fiume Chienti di Pievevitorina

La Val di Tazza, che si sviluppa per diversi chilometri da Pian della Cuna alla confluenza con il Fosso di Corlano, è caratterizzata dalla totale assenza di drenaggio superficiale e di morfologia fluviale fino a quota 643 m, dove si trovano le sorgenti (parzialmente captate) ed un campo pozzi che alimentano l'acquedotto dell'abitato di Pievevitorina. Dalle sorgenti (643 m s.l.m.) fino alla confluenza con il Fosso di Corlano (580 m) è possibile misurare un graduale incremento della portata media di 285 l/s in alveo, che si mantiene inalterato fino quota 550 m. Tra quota 550 m e quota 524 m si registra un primo esiguo incremento di portata poi, dopo la confluenza del Fosso di Montecavallo (sempre in secca), si hanno altri incrementi legati alla presenza della sorgente puntuale Peschiera (515 m, 150 l/s portata media) e della sorgente lineare di quota 503-487 m (190 l/s portata media). Dopo l'abitato di Pievevitorina e fino alla confluenza con il Chienti di Gelagna, non si registrano variazioni della portata in alveo. La Figura 2a mostra l'andamento della portata media misurata dall'Aprile 2002 all'Aprile 2003 e il contributo delle sorgenti lineari e puntuali. Si osserva un sensibile aumento di portata da 200 l/s a circa 400 l/s nel tratto iniziale fino a

the water supply and to the drawing up of a detailed map. About 200 discharge measurements were performed with monthly frequency, on hydrological year 2002-2003, in 21 sections suitably located in the area near the springs, or boundaries among the complexes with different hydraulic behaviour. The Authors were able to define the trend of the discharge of the springs during the observation period, to calculate the mean discharge and to identify the minimum one. The monthly frequency of measurements was an absolutely necessary condition to quantify and monitor the water low drained from aquifers.

Chienti di Pievevitorina River

The Val di Tazza, develops for many kilometres from Pian della Cuna to Corlano stream confluence, is distinguished for the lack of surface drainage and for fluvial morphology until 643 m elevation. Here some partially won springs and a well field, that supplies the Pievevitorina village, are located. From springs to Corlano stream confluence (580 m) a gradual increase of the mean discharge of 285 l/s along the stream was measured. This condition is stable until 550 m a.s.l..

From 550 m and 524 m a small increase discharge was recorded but after the Montecavallo stream confluence, (always a dry river), other increases were measured due to Peschiera spring contribution (518 m, 150 l/s mean discharge) and to linear spring between 527 and 487 m (190 l/s mean discharge). Passed through the Pievevitorina village and up to confluence of Chienti river of Gelagna, the Authors did not measure variations of discharge.

The figure 2a shows the trend of mean measured discharge from April 2002 to April 2003 and the contribution of all linear springs. A sensitive increase of discharge was measured from 200 l/s to ca.

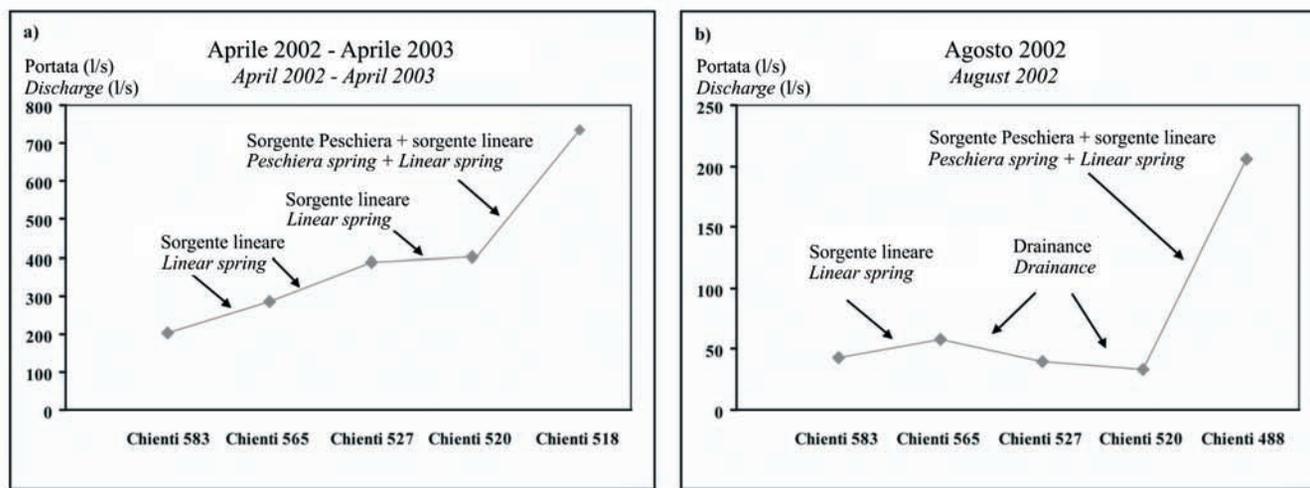


Fig. 2 - a) Andamento della portata media (l/s) misurata dall'Aprile 2002 all'Aprile 2003 del Fiume Chienti. Evidenti gli apporti di acque sorgive; b) Andamento del flusso di base misurato nel mese di Agosto 2002
 - a) Average flow trend (l/s) of Chienti river measured from April 2002 to April 2003. It is evident the contributions by spring waters and the derivations carried out; b) Base flow trend measured in August 2002

quota 520 m. Nel tratto finale, da quota 520 a 488 m, si è misurato un aumento della portata media di circa 320 l/s, il cui l'apporto è distribuito tra la sorgente puntuale Peschiera (150 l/s) e la sorgente lineare (170 l/s portata media). Dalla figura 2b, elaborata appositamente per il mese di Agosto, caratterizzato dall'assenza di precipitazioni, si può osservare come la portata del flusso di base aumenti nel tratto iniziale (tra la quota 583 e 565 m) e soprattutto in quello finale (tra quota 520 e 488 m) grazie agli apporti delle sole sorgenti lineare e puntuale. Nel tratto da quota 565 a 520 m si osserva un decremento della portata di circa 30 l/s che può essere imputabile all'abbassamento del livello di falda nel periodo di magra che comporta un deflusso delle acque in subalveo, oppure a fenomeni di drainance verso il sottostante acquifero nel complesso della maiolica. Andamento analogo si riscontra per tutti i mesi di magra (luglio-novembre).

Torrente di Bocca Fornace a Pievebovigliana

La valle in cui scorre il Fornace si distingue per la totale assenza di drenaggio perenne fino all'abitato di Capodacqua; a quota di 461 m, in sinistra idrografica, dei bottini di presa captano le sorgenti Le Vene. Da questo punto fino a quota 432 m, una sorgente lineare garantisce il flusso di base del reticolo idrografico perenne. A quota 440 m si ha la confluenza con le acque provenienti dal lago artificiale di Bocca Fornace, alimentato occasionalmente da un condotto carsico e costantemente da una sorgente perenne posta sul suo fondo. Gli incrementi di portata misurati nella sezione Fornace 435, posta a valle della confluenza con il rilascio del lago di Bocca Fornace, sono da attribuire in parte anche alle acque di ruscellamento che si accumulano nel lago artificiale e al contributo di una sorgente temporanea che si attiva per sifonamento in periodi di piogge particolarmente abbondanti. Attraversato l'abitato di Pievebovigliana, il Fornace subisce un nuovo sbarramento a quota 432 m, che interrompe completamente la continuità dell'alveo: le acque derivate dall'impianto vengono restituite a quota 403 m. I bacini idrografici a monte del lago di Bocca Fornace e delle sorgenti Le Vene, sono caratterizzati da estesi affioramenti di complessi a bassa permeabilità; di conseguenza, le portate misurate (anche se sono state eseguite a diversi giorni di distanza dall'ultimo evento piovoso per mitigare gli effetti del ruscellamento), risentono probabilmente degli apporti legati alle precipitazioni.

Fiume Fiastrone

La valle del Fiastrone ha origine presso Forcella del Fargno a quota 1811 m; tra quota 1795 m e 1679 m sono ubicate le prime sorgenti interamente derivate (Acquedotto del Fargno, circa 13 l/s). Poco più a valle l'Acquedotto consorziale di San Ginesio utilizza le sorgenti situate tra quota 1300 m e 1250 m; anche le emergenze a quota 1055 m e quelle a quota 1035 m vengono derivate completamente, ma ad opera dell'ENEL. Tra quota 1010 m e 1000 m circa, si trovano altre sorgenti puntuali; un discreto incremento della portata, circa 170 l/s, è stato rilevato tra quota 1000 m e a quota 893 m. Da quota 880 m fino a quota 800 m il Fiastrone è alimentato da una sorgente lineare con

400 l/s along the first stream segment until 520 m a.s.l.. In the last segment, from 520 to 488 m, an increase of 320 l/s of the mean discharge was measured, due both to Peschiera spring (150 l/s) and linear spring (170 l/s mean discharge). The Figure 2b, drew up for August month devoid of precipitations, shows an increase of base discharge in the first part (583-565 m) and in particular in the last one (520-488 m) due to just spring contributions. In the segment (565-520 m) a discharge decrement of 30 l/s shown and that could be due to drop in water table during the minimum period, that produced a run-off, or drainance phenomenon toward the aquifer below in the "Maiolica" complex. A similar trend is observed in all months of minimum discharge (July-November).

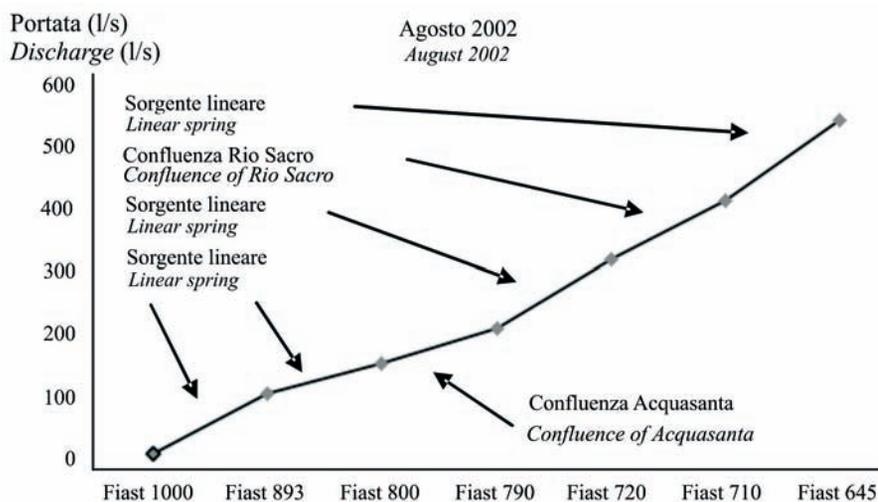
Fornace stream

The Fornace valley is characterized for the lack of the perennial drainage until Capodacqua village, at 461 m a.s.l., on left hydrographical side, of the wells field the Le Vene springs. From here to 440 m elevation, a linear spring warrants the base flow of the perennial hydrographic network. At 440 m there is the confluence with the water of the Bocca Fornace lake, occasionally supplied by a karst conduit and steadily by a perennial spring located at the bottom of the lake. The increase discharge measured at Fornace section (435 m) located to the plain of the confluence with the release of the Bocca Fornace lake are due to streamlet water that flows into the artificial lake and to contribution of temporary spring that starts just during the particularly plentiful rains. Passed through the Pievebovigliana village, the Fornace stream suffers a new barrage at 432 m. This dam blocks completely the current: the derived water by system is given back to 403 m. The hydrographical basin, upriver of the Bocca Fornace lake and of the Le Vene springs, are characterized by wide outcrops of complexes with low permeability; therefore the measured discharges feel of the contributions due very likely to rains.

Fiastrone river

The Fiastrone valley rises near Forcella del Fargno at 1811 m. The first springs (unfortunately totally derived) are located between 1795 and 1679 m (Fargno aqueduct, about 13 l/s). Coming down to the plain, the consortial San Ginesio Aqueduct uses the springs between 1300 and 1250 m, also the springs at 1055 m and 1035 m are totally tapped by ENEL. Other springs are situated between 1010 to 1000 m, a small increase of the discharge (170 l/s) was measured between 1000 m and 893 m. The Fiastrone river is feed by a linear spring from 880 m to 800 m with 75 l/s mean discharge. In this section of the river, the valley is getting narrow and deeper after that it widens at 790 m,

Fig. 3 - Andamento della portata del flusso di base (l/s) del Fiume Fiastrone relativa al mese di Agosto
 - Base flow trend (l/s) of Fiastrone river measured in August 2002



portata media di 75 l/s. In questo tratto del corso d'acqua la valle si fa stretta e piuttosto incisa per poi allargarsi intorno a quota 790 m, dove il fosso dell'Acquasanta confluisce nel Fiastrone. Subito dopo il guado in località Riterria, il fiume riprende a scorrere in una valle molto stretta e difficilmente accessibile dove riceve l'apporto medio di 170 l/s da sorgenti lineari (quota 830-720 m) e, a quota 720 m, la restituzione delle acque derivate dall'ENEL. Poco più a valle, si ha la confluenza con il Rio Sacro e un altro incremento della portata in alveo (220 l/s) tra quota 720 m e 645 m. Alla sezione di chiusura del bacino, la portata media del periodo di riferimento è nettamente inferiore ai dati storici (PERRONE, 1910; AGOSTINI, 1992; TARRAGONI 2001). La figura 3 mostra l'andamento della portata del flusso di base del Fiume Fiastrone relativa al mese di Agosto, contraddistinto da scarse precipitazioni, in cui l'apporto è legato esclusivamente alle acque sorgive.

Nel presente lavoro sono stati anche analizzati i dati pluviometrici e termometrici provenienti da 22 stazioni distribuite in un'area più vasta di quella in studio (Annali Idrologici del M.LL.PP. 1921-1992) in modo da poter tracciare un probabile andamento generale delle precipitazioni e della distribuzione della temperatura, indispensabile per un raffronto con i dati di I_{eff} (Tab. 2). In assenza di dati termometrici, in alcune stazioni sono stati utilizzati quelli desunti dalla retta di correlazione quote-temperature in TARRAGONI (2001). Per la valutazione

where the Acquasanta stream flows into the Fiastrone river. After the ford at Riterria place, the rivers starts flowing again in a valley extremely narrow and it is difficult to approach where it gets mean contribution of 170 l/s from linear springs (830-720 m) and the restitution of the water from ENEL to 720 m. Coming down to the plain, Rio Sacro flows into the Fiastrone river and an linear spring is identified between 720 m and 650 m (220 l/s). The Rio Sacro stream is characterized by another linear spring located between 900 m and 840 m. At the last section located at end of basin, the mean discharge is lower to historical data (PERRONE, 1910; AGOSTINI, 1992; TARRAGONI 2001). The Figure 3 shows the trend of the base discharge of the Fiastrone river just of August, distinguished from low rains, the discharge is due just the contribution of the spring water.

In this paper, the pluviometric and thermometric data were analysed. They come from 22 stations distributed in a larger area that one in study (Annali Idrologici of Italian M.LL.PP. 1921-1992) that has allowed to outline a probable general trend of the precipitations and of the distribution of the temperature necessary to compare it with calculated I_{eff} data (Tab. 2). Due to the lack of thermometric data, in some stations we have used ones come from elevation-temperature correlation line in TARRAGONI (2001). To evaluate the meteoric flows and for the evapotranspiration computation, the

Stazione pluviometrica <i>Pluviometric station</i>	Quota (m s.l.m.) <i>Elevation (m a.s.l.)</i>	Anni funzionamento <i>Years</i>	Precipitazione media (mm/a) <i>Mean Precipitation (mm/y)</i>
Pievebovigliana	451	62 - tra il 1924 ed il 1989 <i>62 - between 1924 and 1989</i>	1040
Bologna	1070	61 - tra il 1922 ed il 1984 <i>61 - between 1922 and 1984</i>	1240
Appennino	798	32 - tra il 1921 ed il 1955 <i>32 - between 1921 and 1955</i>	1160

Tab. 2 - Elenco dei dati delle stazioni pluviometriche del Servizio Idrografico e Mareografico di Stato
 - List of pluviometric station data of Italian Hydrographic and Marigraphic Survey

degli afflussi meteorici e per il calcolo dell'evapotraspirazione sono stati elaborati i dati pluviometrici delle tre stazioni più significative (Pievebovigliana, Bolognola e Appennino; Tab. 2), caratterizzate da precipitazioni medie tra i 1040 ed i 1240 mm/a. Non si hanno informazioni dirette sulle precipitazioni che interessano i rilievi posti a quote comprese tra 1500 m e 2000 m, poiché tutte le stazioni pluviometriche a disposizione sono distribuite, seppur omogeneamente sul territorio, a quote tra 1453 m e 314 m. Questa deficienza non ha consentito di stimare l'effettiva entità dell'afflusso meteorico in buona parte delle aree d'alimentazione dei principali acquiferi individuati. I valori di precipitazione e di precipitazione efficace media annua calcolata desunti dai dati disponibili devono essere considerati, pertanto, come valori indicativi e fortemente sottostimati in tutti i settori dove il territorio si eleva a quote superiori ai 1500 m. Questi valori non possono essere utilizzati per significativi calcoli di bilancio, ma sono certamente da considerarsi come utili dati di confronto.

INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

La letteratura idrogeologica dell'area in studio è scarsa (Annali Idrologici, 1921-1992; DRAMIS & DEIANA, 1972; BONI *et alii*, 1986; NANNI, 1991; MASTRORILLO, 1996; TARRAGONI, 2005). La circolazione idrica sotterranea e l'ubicazione delle principali sorgenti sono condizionate dall'assetto geologico-strutturale dell'area: i litotipi francamente calcarei e calcareo-marnosi costituiscono Complessi che sono sede di acquiferi ed ospitano sorgenti con portate considerevoli grazie all'alta permeabilità per fratturazione. Sono stati individuati tre complessi calcarei sovrapposti, di estensione regionale, capaci di assorbire, immagazzinare e restituire in superficie le acque meteoriche in corrispondenza di sorgenti puntuali o lineari: 1) Complesso calcareo basale indifferenziato; 2) Complesso della Maiolica; 3) Complesso della Scaglia calcarea. Le formazioni prettamente marnose, silicee e ad elevato contenuto argilloso (Rosso ammonitico, Calcari diasprigni, Marne a Fucoidi e Scaglia cinerea) costituiscono, invece, Complessi caratterizzati da una permeabilità estremamente bassa o nulla. Sono stati individuati cinque complessi dotati di minore permeabilità, che hanno la funzione di acquiclude o di aquitard, in relazione alla loro capacità di costituire dei limiti a flusso nullo o di consentire uno scambio idrico significativo tra acquiferi differenti: 1) Complesso calcareo-silico-marnoso; 2) Complesso delle Marne a Fucoidi; 3) Complesso della Scaglia marnosa; 4) Complesso dei depositi marnosi e calcareo-marnosi; 5) Complesso dei depositi terrigeni marnoso-arenacei. Nella stessa area, TARRAGONI (2005) ha identificato l'esistenza sia di acquiferi indipendenti, tra loro sovrapposti e con diversi potenziali ed emergenze, sia fenomeni di scambio per drainance tra acquiferi sovrapposti attraverso complessi che assumono la funzione di aquitard. Elevata permeabilità è stata riscontrata anche per i depositi alluvionali e le coltri detritiche, ma per questi non si è proceduto a calcoli di bilancio. Sono state identificate tutte le principali sorgenti e ne è stata definita la portata mediamente erogata nel periodo di osservazione.

pluviometric data of the three stations most important were processed (Pievebovigliana, Bolognola and Appennino; Tab. 2) and they are characterized from mean precipitation between 1040 and 1240 mm/y. None direct information about rains relative to the elevation between 1500 and 2000 m because all available pluviometric stations are spread even if they are homogeneous in the area between 1453 and 314 m.

This shortage did allow to estimate the real amount of the meteoric flow of the supply area of the most important aquifers. The precipitation and the mean annual effective precipitation computed values, inferred from available data, have to be considered as significant values and strongly underestimated in all area where the region rises above to 1500 m. These values could not be used to do balance calculus but they have to be considered as useful comparison data.

HYDROGEOLOGICAL SETTING

The hydrogeological literature of the study area is poor (Annali Idrologici, 1921-1992; DRAMIS & DEIANA, 1972; BONI *et alii*, 1986; NANNI, 1991; MASTRORILLO, 1996; TARRAGONI, 2005). The groundwater circulation and the location of the most important springs are conditioned by geological-structural setting of the area: the calcareous and calcareous-marly outcrop layers make up some hydrogeological Complexes. They house some aquifers and springs with considerable discharges, thanks to high permeability by fracturing. Three overlapping calcareous complexes of regional extension have been identified. They are able to soak up, store and restore at surface the meteoric water by springs: 1) Calcareous basal undifferentiated Complex; 2) "Maiolica" Complex; 3) "Scaglia calcarea" Complex. The typically sequence marly, siliceous and to high clayey content ("Rosso Ammonitico", "Calcari diasprigni", "Marne a Fucoidi" and "Scaglia cinerea") set up some complexes mark out by lower permeability or null. Five complexes to low permeability have been identified, they have a function as an aquiclude or an aquitard, related to be a boundary with null flow or to permit an important water exchange among different aquifers: 1) Calcareous-siliceous-marly Complex; 2) "Marne a Fucoidi" Complex; 3) "Scaglia marnosa" Complex; 4) Marly and calcareous marly deposits Complex; 5) Marly-arenaceous- terrigenous deposits Complex. In this area, TARRAGONI (2005) identified both independent aquifers overlapping one another on top of the other and with different potentialities and springs, and phenomenon of exchange for drainance among overlapping aquifers through complexes having an aquitard role.

A high permeability was found for alluvial deposits and detrital layers also, but no balance calculus was done. All main springs were identified and the mean discharge supplied was measured during the testing period.

MODELLI IDROGEOLOGICI CONCETTUALI

Sono stati identificati 5 acquiferi (Fig. 4a e 4b), per ciascuno dei quali è stato allestito il Modello Idrogeologico Concettuale (MIC) in cui sono schematicamente rappresentati l'area d'alimentazione, i limiti idraulici (tettonici e/o stratigrafici), il settore saturo, le principali sorgenti, l'eventuale copertura operata da un Complesso Idrogeologico caratterizzato da permeabilità trascurabile, il probabile campo piezometrico medio, il reticolo idrografico perenne e le opere antropiche ad esso relative. Nota la quantità di risorsa idrica mediamente drenata dalle sorgenti e l'estensione delle relative aree di alimentazione è possibile eseguire il bilancio idrogeologico per ciascun acquifero ed ottenere il valore di infiltrazione efficace (I_{eff}).

MIC dell'acquifero della Scaglia calcarea del Fiume Fiastrone. I limiti dell'acquifero sono: sovrascorrimento di Pizzo Tre Vescovi-Monte Val di Fibbia ad W-SW, limite stratigrafico con il Complesso delle Marne a Fucoidi a N, anticlinale di Pizzo di Chioggia-Monte Amandola a E-NE e limite stratigrafico con il Complesso delle Marne a Fucoidi a S. Lungo la valle del Fiume Fiastrone e del basso corso del Rio Sacro è presente una sorgente lineare tra quota 650 m e quota 830 m, che drena una portata media annua di 220 l/s. L'area di alimentazione delimitata è di 17.3 km², da cui si ottiene un' I_{eff} calcolata di 400 mm/a. Il probabile campo piezometrico medio è compreso tra 650 e 850 m s.l.m., mentre le principali linee di flusso hanno andamento circa meridiano in accordo con l'orientamento dei principali elementi strutturali con funzione di chiusura idraulica.

MIC dell'acquifero della Scaglia calcarea del Fosso dell'Acquasanta. I limiti dell'acquifero sono: sovrascorrimento di Pizzo Tre Vescovi-Monte Val di Fibbia ad W, limite stratigrafico con il Complesso delle Marne a Fucoidi a N e ad E, mentre il limite meridionale è stato posto in corrispondenza di Pizzo Berro dove il Complesso delle Marne a Fucoidi funge da spartiacque sotterraneo. Lungo la forra dell'Acquasanta, sul suo versante destro, sono presenti numerosissime sorgenti distribuite a quote differenti, lungo un fronte di circa 500 m e la cui portata media annua è stata stimata in 170 l/s. L'area di alimentazione delimitata è di circa 4.7 km², da cui si ottiene un' I_{eff} di 1140 mm/a. Le principali linee di flusso hanno andamento meridiano parallelamente ai principali elementi strutturali con funzione di chiusura idraulica.

MIC dell'acquifero del Complesso calcareo basale indifferenziato del Fiume Fiastrone. I limiti dell'acquifero sono costituiti essenzialmente dal limite stratigrafico con il Complesso delle Marne a Fucoidi, tranne nel settore meridionale dove il limite è rappresentato dal contatto con il Complesso calcareo-silico-marnoso.

Lungo la valle del Fiume Fiastrone e del basso corso dell'Acquasanta sono presenti diverse sorgenti lineari: F720-830 (tra quota 720 m e quota 830 m - portata media 170 l/s), F800-880 (tra quota 800 m e quota 880 m, portata media 75 l/s) e F893-1015 (tra quota 893

CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODELS

Five aquifers have been identified (Fig. 4a and 4b). For every aquifer a Conceptual Hydrogeological Model (CHM) has been acquired. In the CHM are synthesized the supply area, the hydraulic boundaries (tectonic and/or stratigraphic), the saturated portion, the main springs, the cover of a hydrogeological complex to low permeability, the possible mean piezometric field, the perennial hydrographic network and the anthropic manufactures. If the mean discharge drained from springs and the extension of supply area is possible to calculate the hydrogeological balance for every aquifer and to get a value of Mean Effective Infiltration (I_{eff}).

CHM of the aquifer of the "Scaglia calcarea" of the Fiastrone river. The aquifer boundaries are: the Pizzo Tre Vescovi-Monte Val di Fibbia thrust to W-SW, stratigraphic boundary with "Marne a Fucoidi" complex to N and S, Pizzo di Chioggia-Monte Amandola anticline to E-NE. Long the Fiastrone valley and the Rio Sacro stream a linear spring is located between 650 m and 830 m. It flows an annual mean discharge of 220 l/s. The circumscribed recharge area is 17.3 km², from which a calculated I_{eff} of 400 mm/y. A probable mean piezometric field is between 650 e 850 m a.s.l.; the principal flow lines have an approximately meridian trend in agreement with the orientation of the main structural features, these latter are some closed hydraulic boundaries.

CHM of the aquifer of the "Scaglia calcarea" of the Acquasanta stream. The aquifer boundaries are: Pizzo Tre Vescovi-Monte Val di Fibbia thrust to W, stratigraphic boundary with "Marne a Fucoidi" complex to N and to E, whereas the southern boundary is located near Pizzo Berro, where the "Marne a Fucoidi" complex represents an underground watershed. Along the Acquasanta gully, on right mountainside, many springs occur and they are arranged to different elevation for 500 m; the mean annual discharge was estimated about 170 l/s. The circumscribed recharge area is 4.7 km², from which a calculated I_{eff} of 1140 mm/y. The principal flow lines have a meridian parallel to most important structural lines, which represent some closed hydraulic boundaries.

CHM of the aquifer of the undifferentiated Basal calcareous Complex of the Fiastrone river. The aquifer boundaries are characterized by stratigraphic limit with the "Marne a Fucoidi" complex except in the southern region where it is distinguished by contact with Calcareous-siliceous-marly complex. Along the Fiastrone valley and the Acquasanta stream some linear spring are located at: F720-830 (between 720 m and 830 m, mean discharge 170 l/s), F800-880 (between 800 m and 880 m, mean discharge 75 l/s) and F893-1015 (between 893 m and 1015 m, mean discharge 170 l/s).

m e quota 1015 m, portata media 170 l/s). L'acquifero drena nel suo insieme una portata media annua di 415 l/s; l'area di alimentazione delimitata è di 21.2 km², da cui si ottiene un I_{eff} di 620 mm/a. Il probabile campo piezometrico medio è compreso tra 720 e 1250 m s.l.m..

MIC dell'acquifero della Maiolica del Rio Sacro. L'acquifero è idraulicamente isolato dal Complesso delle Marne a Fucoidi; la sorgente lineare, compresa tra quota 840 m e 900 m, drena una portata media annua di 100 l/s. L'area di alimentazione è di 6.1 km², da cui si ottiene un I_{eff} di 520 mm/a. Il probabile campo piezometrico medio è compreso tra 840 e 910 m s.l.m.

MIC dell'acquifero della Scaglia calcarea e della Maiolica del Fiume Chienti - Torrente Fornace. I limiti dell'acquifero sono: sovrascorrimento di Visso-Monte Cavallo ad W, limite stratigrafico con il Complesso dei depositi terrigeni marnosi-arenacei a N, sovrascorrimento di Pizzo Tre Vescovi-Monte Val di Fibbia ad E ed limite con il Complesso delle marne a Fucoidi a S.

La sorgente del Peschiera drena il Complesso dalla Maiolica (150 l/s), ma la superficie di affioramento è insufficiente ad alimentare la portata erogata, per cui si ipotizza una connessione idraulica con il Complesso della Scaglia calcarea. Il fenomeno di drainance avverrebbe attraverso il Complesso delle Marne a Fucoidi che si presentano in questo settore fortemente assottigliato e tettonizzato. Con un'area di alimentazione di soli 4.3 km², l'I_{eff} che si ottiene sarebbe superiore ai 1100 mm/a, che appare decisamente elevata considerato il basso valore della Precipitazione Efficace in corrispondenza dell'area d'alimentazione. Si è pertanto valutato un apporto per drainance di circa 50 l/s proveniente dal Complesso della Scaglia calcarea. Da questa ipotesi risulta un I_{eff} calcolata pari a 750 mm/a.

The aquifer flows a total mean annual discharge of 415 l/s; the circumscribed recharge area is 21.2 km², from which a calculated I_{eff} of 620 mm/y. The possible mean piezometric field is between 720 e 1250 m a.s.l.

CHM of Maiolica complex of the del Rio Sacro stream. The aquifer is totally closed from "Marne a Fucoidi" complex; the linear spring, between 840 m and 900 m, has a mean annual discharge of 100 l/s. The recharge area is 6.1 km², from which an I_{eff} of 520 mm/y. The possible mean piezometric field is between 840 and 910 m a.s.l.

CHM of the aquifer of the "Scaglia calcarea" and of the "Maiolica" complex of the Chienti river - Fornace stream. The aquifer boundaries are: Visso-Monte Cavallo thrust to W, stratigraphic limit with marly-arenaceous- terrigenous deposits complex to N, Pizzo Tre Vescovi-Monte Val di Fibbia thrust to E and the boundary with the "Marne a Fucoidi" complex to S.

The Peschiera spring drains the "Maiolica" complex (150 l/s), but the outcrop surface is not sufficient to justify the supplied discharge. The Authors guess a hydraulic connection with "Scaglia calcarea" complex. The drainance phenomenon would occur by the "Marne a Fucoidi" complex because this latter shows serious thinning and are highly fractured. The recharge area is just of 4.3 km², so the computed I_{eff} would be superior to 1100 mm/y. This value seems to be too high because the esteemed effective precipitation values are too low in this area. Therefore the Authors suggest a contribution by a drainance about of 50 l/s coming from "Scaglia calcarea" complex. The computed I_{eff} is of 750 mm/y.

The linear springs of the Chienti river of Pievetorina (Ch565-

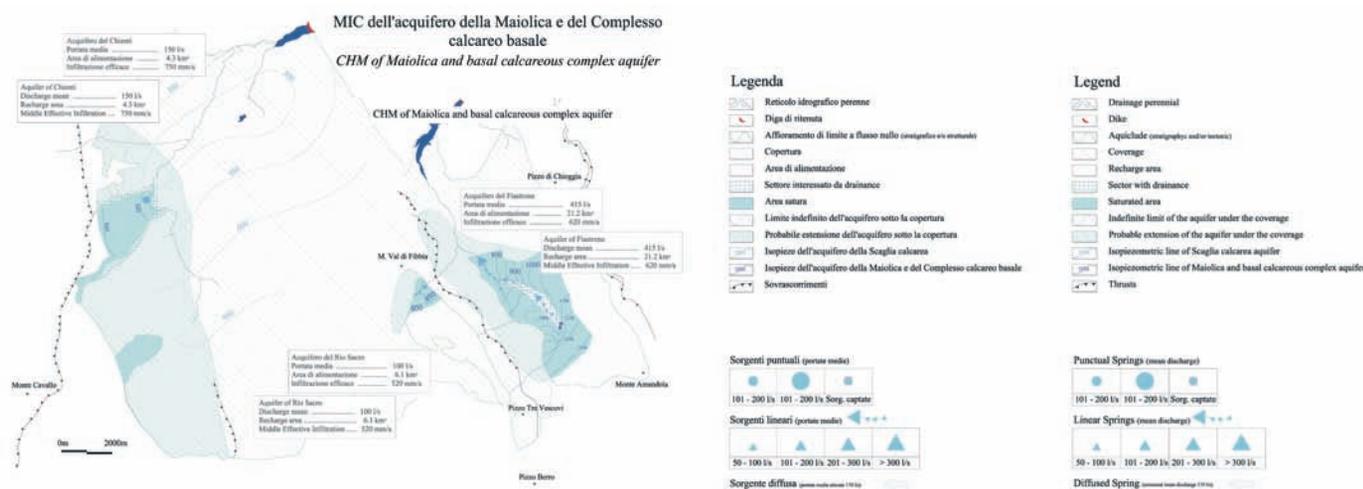


Fig. 4a - Modelli Idrogeologici Concettuali degli acquiferi riconosciuti nell'area di studio. I modelli sono stati raggruppati in base al complesso idrogeologico di appartenenza: MIC degli acquiferi della Maiolica e del Complesso calcareo basale. La figura illustra, per ciascun acquifero, l'estensione dell'area di ricarica, la portata mediamente erogata ed il valore di I_{eff} calcolato
 - Conceptual Hydrogeological Models of every aquifer individualized. The CHMs have been gathered to hydrogeological complex of affiliation: CHM of Maiolica and basal calcareous complex aquifers. The figure shows, for every aquifer individualized, the supply area extension, the mean discharge and the calculated I_{eff}

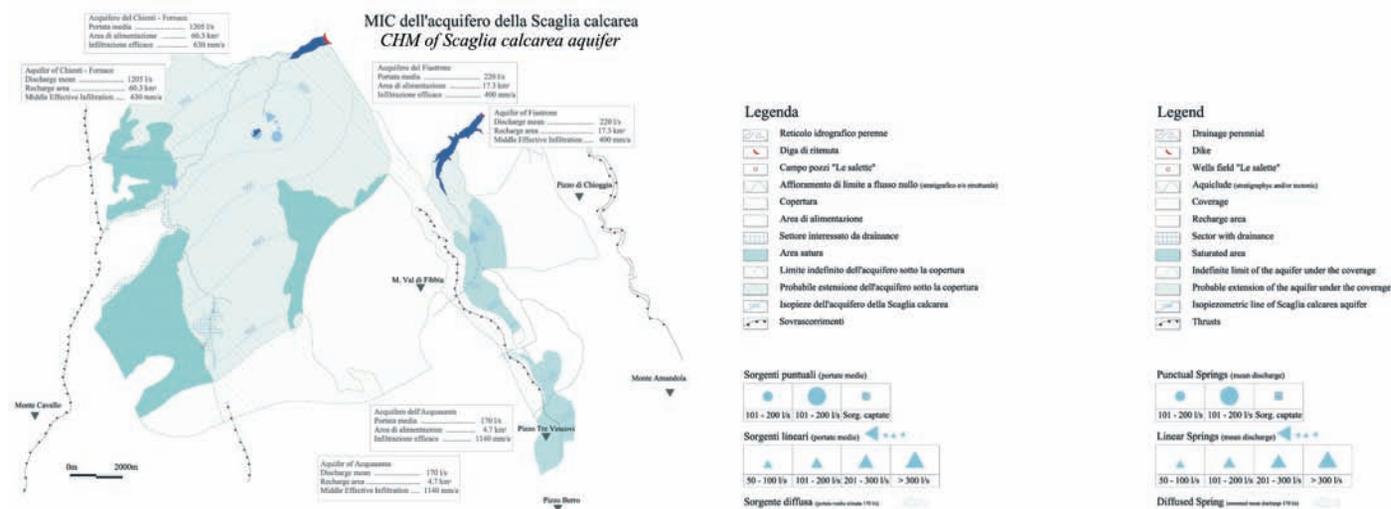


Fig. 4b - Modelli Idrogeologici Concettuali degli acquiferi riconosciuti nell'area di studio. I modelli sono stati raggruppati in base al complesso idrogeologico di appartenenza: MIC degli acquiferi della Scaglia calcarea. La figura illustra, per ciascun acquifero, l'estensione dell'area di ricarica, la portata mediamente erogata ed il valore di I_{eff} calcolato

- *Conceptual Hydrogeological Models of every aquifer individualized. The CHMs have been gathered to hydrogeological complex of affiliation: CHM of Scaglia calcarea aquifers. The figure shows, for every aquifer individualized, the supply area extension, the mean discharge and the calculated I_{eff}*

Le sorgenti lineari del Fiume Chienti di Pievetorina (Ch565-643, 285 l/s; Ch488-527, 170 l/s), del torrente S. Angelo (Ca540-565, 50 l/s) e del Torrente Fornace (Fo440-461, 120 l/s) e le sorgenti puntuali di Boccafornace (Fo453, 310 l/s) e di Capodacqua (Fo461, 270 l/s) drenano il Complesso della Scaglia calcarea per un totale di 1205 l/s.

L'area di alimentazione delimitata è di 60.3 km², da cui si ottiene un I_{eff} almeno di 630 mm/a; considerando anche gli ipotetici 50 l/s che si perderebbero per drainance, si avrebbe un I_{eff} di 600 mm/a. Il probabile campo piezometrico medio è compreso tra 440 e 650 m s.l.m.

PROPOSTE OPERATIVE PER LA CARTOGRAFIA IDROGEOLOGICA UFFICIALE

Per un'adeguata rappresentazione delle informazioni precedentemente descritte, ottenute con l'applicazione di criteri dell'idrogeologia quantitativa, il presente lavoro, pur prendendo in considerazione per quanto possibile le linee guida per la cartografia idrogeologica ufficiale (Quaderno SGN n.5, serie III; MARI *et alii*, 1995), ha avuto come obiettivo l'illustrazione di alcune sperimentazioni di soluzioni cartografiche per migliorare l'immediata valutazione dello stato della risorsa idrica sotterranea.

Per una visione degli aspetti generali della Cartografia Idrogeologica sperimentale proposta si faccia riferimento a BONI *et alii* (2009) dove, per evidenziare i dati idrometrici sperimentali che definiscono i molteplici caratteri idrogeologici espressi come sovrapposizione di diversi livelli informativi, è stato derivato un documento cartografico di base consistente in una "Carta dei Complessi Idrogeologici e delle Emergenze naturali", cui si affiancano, come elementi complementari, la "Carta dell'Idrologia di superficie" e il "Modello Idrogeologico Concettuale" dei differenti acquiferi riconosciuti.

643, 285 l/s; Ch488-527, 170 l/s), of S. Angelo stream (Ca540-565, 50 l/s) and of the Fornace stream (Fo440-461, 120 l/s) and the Boccafornace (Fo453, 310 l/s) and Capodacqua springs (Fo461, 270 l/s) drain the "Scaglia calcarea" complex with a total discharge of 1205 l/s. The circumscribed recharge area is 60.3 km² with a computed I_{eff} of 630 mm/y. If we consider also the theoretical discharge of 50 l/s by drainance, the computed I_{eff} would be about 600 mm/y. The possible mean piezometric field is between 440 and 650 m a.s.l.

SUGGESTIONS FOR THE OFFICIAL HYDROGEOLOGIC CARTOGRAPHY

The aim of this section is to illustrate some cartographic solutions for an immediate evaluation of the groundwater resource condition. To this purpose, the guidelines for the official hydrogeologic cartography (MARI *et alii*, 1995) were taken into account, as much as they were considered suitable for the representation of the specific hydrogeologic features of the study area, which were obtained applying the quantitative field hydrogeology criteria.

The general aspects of these suggestions for the official hydrogeologic cartography are extensively exposed in BONI *et alii* (2009); these Authors, for evidencing the quantitative hydrometric field information defining the composite hydrogeologic outline organised in different informative layers, have selected as main cartographic document the "Hydrogeologic Complexes and Natural Springs Map", while complementary elements are the "Surface Hydrology Map" and the "Conceptual Hydrogeologic Model" of the distinguished aquifers.

The suggestions in the cited hydrogeologic cartography of BONI

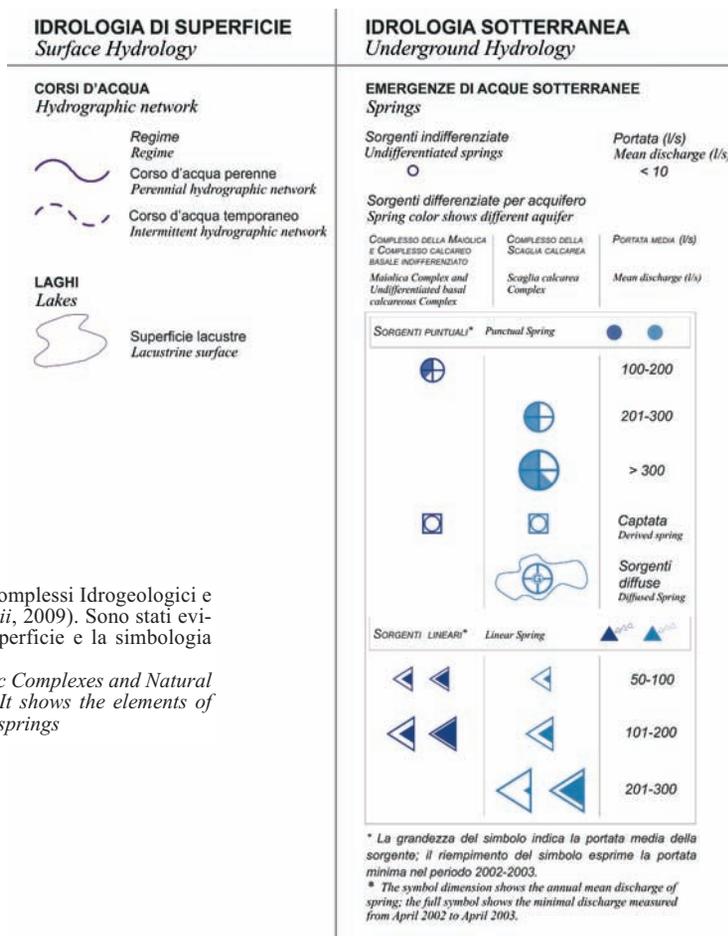


Fig. 5b - Stralcio della Legenda della Carta dei Complessi Idrogeologici e delle Emergenze Naturali (da BONI *et alii*, 2009). Sono stati evidenziati gli elementi di idrologia di superficie e la simbologia delle sorgenti
 - Detail of the Legend of the Hydrogeologic Complexes and Natural Springs Map (from BONI *et alii*, 2009). It shows the elements of surface hydrology and the symbology of springs

nale, sono stati illustrati solo con un retino rosso indicativo del processo di infiltrazione (Fig. 5a). Inoltre, la rappresentazione delle emergenze ha una sua specifica struttura (Fig. 5b) che ne permette l'immediata valutazione della portata media (dimensione del simbolo esterno), della variabilità stagionale (indicazione dei minimi misurati con un simbolo in colore pieno al centro del precedente) e dell'acquifero cui essa appartiene (diverso tono di colore azzurro); di rilievo è inoltre che le sorgenti lineari sono state evidenziate con uno specifico simbolo, peraltro non previsto nella legenda delle linee guida (MARI *et alii*, 1995), che indica con chiarezza anche la lunghezza del tratto drenante (Fig. 5b).

CONCLUSIONI

Il lavoro presentato evidenzia l'importanza del dato sperimentale acquisito con il rilevamento di campagna, quantifica le risorse idriche sotterranee nel settore nord-occidentale della Dorsale dei Monti Sibillini ed integra i consolidati metodi di cartografia idrogeologica.

Il rilevamento idrogeologico è la base imprescindibile per la quantificazione e localizzazione delle risorse idriche sotterranee.

Per ciascun acquifero individuato è stato allestito il MIC in cui sono schematicamente rappresentati l'area d'alimentazione, i limiti

tern indicating the infiltration process occurrence (Fig. 5a). Finally, it is noteworthy that the springs have a specific symbolic structure (Fig. 5b) that allows an immediate understanding of their mean flow rate (external symbol dimension), of seasonal flow variation (minimal measured values indicated by the full symbol in the centre of the previous one) and of the specific aquifer which fed them on (different blue colour gradation); regarding the linear springs, they are also evidenced with a specific sign, however not included in the official guidelines (MARI *et alii*, 1995), representing the length of the draining stream section (Fig. 5b).

CONCLUSIONS

This work underlines the importance of experimental data, quantification of groundwater of the north-western area of Sibillini Mounts and integrates the hydrogeological mapping methods.

The hydrogeological survey is essential for the identification and quantification of groundwater resources.

For every aquifer a CHM has been acquired. In the CHM are synthesized the supply area, the hydraulic boundaries (tectonic and/or stratigraphic), the saturated portion, the main springs and their annu-

idraulici (tettonici e/o stratigrafici), il settore saturo, le principali sorgenti e la loro portata media, il valore di I_{eff} , l'eventuale copertura operata da un Complesso Idrogeologico caratterizzato da permeabilità trascurabile, il probabile campo piezometrico medio, il reticolo idrografico perenne e le opere antropiche ad esso relative.

MIC dell'acquifero della Scaglia calcarea del Fiume Fiastrone. L'area di alimentazione è di 17.3 km², la portata media annua è di 220 l/s e l' I_{eff} calcolata è di 400 mm/a. Il probabile campo piezometrico medio è compreso tra 650 e 850 m s.l.m..

MIC dell'acquifero della Scaglia calcarea del Fosso dell'Acquasanta. L'area di alimentazione è di circa 4.7 km², la portata media annua è di 170 l/s e l' I_{eff} calcolata è di 1140 mm/a.

MIC dell'acquifero del Complesso calcareo basale indifferenziato del Fiume Fiastrone. L'area di alimentazione è di 21.2 km², la portata media annua è di 415 l/s e l' I_{eff} calcolata è di 620 mm/a. Il probabile campo piezometrico medio è compreso tra 720 e 1250 m s.l.m.

MIC dell'acquifero della Maiolica del Rio Sacro. L'area di alimentazione è di 6.1 km², la portata media annua è di 100 l/s e l' I_{eff} calcolata è di 520 mm/a. Il probabile campo piezometrico medio è compreso tra 840 e 910 m s.l.m..

MIC dell'acquifero della Scaglia calcarea e della Maiolica del Fiume Chienti - Torrente Fornace. L'area di alimentazione è di 60.3 km², la portata media annua è di 1205 l/s e l' I_{eff} calcolata è di 630 mm/a. Il probabile campo piezometrico medio è compreso tra 440 e 650 m s.l.m.

La Cartografia Idrogeologica sperimentale è stata preparata come la sovrapposizione di diversi livelli informativi, dai quali è stato derivato come documento cartografico di base la "Carta dei Complessi Idrogeologici e delle Emergenze naturali", cui si affiancano, come elementi complementari, la "Carta dell'Idrologia di superficie" e il "Modello Idrogeologico Concettuale" dei differenti acquiferi riconosciuti.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i due revisori, i cui commenti hanno largamente migliorato la versione finale del manoscritto. Si ringraziano il Dott. Nicola Daniele, la Dott.ssa Doredana Cascone ed il Dott. Mauro Roma per la fattiva collaborazione tecnico-scientifica.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AGOSTINI A. (1993) - *Contributo all'idrogeologia del bacino del F. Fiastrone (Sibillini nord-orientali)*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".
- ANNALI IDROLOGICI (1921-1992) - *Parte prima e parte seconda (sezioni di Bologna e Roma)*. Servizio Idrografico Ministero dei Lavori Pubblici, anni 1921-1992, Roma.
- BARCHI M., MINELLI G. & PIALI G. (1996) - *Tettonica dell'Appennino settentrionale alla luce dei risultati del CROP 03*. Abstract Convegno: "Presentazione dei risultati del profilo sismico CROP 03". Roma, novembre 1996, 11-12.
- BONI C.F., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**: 991-1012.
- BONI C.F., TARRAGONI C. & MARTARELLI L. (2009) - *Cartografia Idrogeologica sperimentale del settore nord-occidentale dei Monti Sibillini (Marche)*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., vol. LXXX, in stampa.
- CALAMITA F., CENTAMORE E., DEIANA G. & MICARELLI A. (1986) - *Evoluzione tettonico-sedimentaria dell'area umbro-marchigiana dal Trias al Pleistocene*. Da "La Geologia delle Marche", Studi Geol. Camerti, numero speciale in occasione del 73° Congresso della Società Geologica Italiana, Roma 30 settembre-4 ottobre 1986, 89-90.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1986a) - *Geodinamica dell'Appennino Umbro-Marchigiano*. Mem. Soc. Geol. It., **35**: 311-316.

al mean discharge, the I_{eff} value, the cover of a hydrogeological complex to low permeability, the possible mean piezometric field, the perennial hydrographic network and the anthropic manufactures.

CHM of the aquifer of the "Scaglia calcarea" of the Fiastrone river. The recharge area is 17.3 km², the annual mean discharge is 220 l/s and the calculated I_{eff} is 400 mm/y. A probable mean piezometric field is between 650 e 850 m a.s.l..

CHM of the aquifer of the "Scaglia calcarea" of the Acquasanta stream. The recharge area is 4.7 km², the annual mean discharge is 170 l/s and the calculated I_{eff} is 1140 mm/y.

CHM of the aquifer of the undifferentiated Basal calcareous Complex of the Fiastrone river. The recharge area is 21.2 km², the annual mean discharge is 415 l/s and the calculated I_{eff} is 620 mm/y. A probable mean piezometric field is between 720 e 1250 m a.s.l..

CHM of Maiolica complex of the del Rio Sacro stream. The recharge area is 6.1 km², the annual mean discharge is 100 l/s and the calculated I_{eff} is 520 mm/y. A probable mean piezometric field is between 840 e 910 m a.s.l..

CHM of the aquifer of the "Scaglia calcarea" and of the "Maiolica" complex of the Chienti river - Fornace stream. The recharge area is 60.3 km², the annual mean discharge is 1205 l/s and the calculated I_{eff} is 630 mm/y. A probable mean piezometric field is between 440 e 650 m a.s.l..

The Experimental Hydrogeological Mapping has been prepared as the overlap of different informative levels: Hydrogeological Complexes and Natural Springs Map (principal document), Surface Hydrology Map and Conceptual Hydrogeological Models Maps (complementary elements).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to two reviewers whose insightful comments greatly improved the final version of the manuscript. The authors would like to thank also Dr. Nicola Daniele, Dr. Doredana Cascone and Dr. Mauro Roma for their technical-scientific collaboration.

- CALAMITA F. & DEIANA G. (1986b) - *Evoluzione strutturale neogenico-quadernaria dell'Appennino umbro-marchigiano*. Studi Geol. Camerti, Vol. speciale "La Geologia delle Marche", 91-98.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1988) - *The arcuate shape of the Umbria-Marche Apennines (Central Italy)*. Tectonophysics, **146**: 139-147.
- CALAMITA F., PIZZI A. & TOSTI A. (1990) - *Blind-thrust: esempi nell'appennino Umbro-Marchigiano*. E carta allegata "Le associazioni strutturali di Monte Patino e di Monte Fema". Studi Geol. Camerti Vol. speciale 1990, 57-67.
- CALAMITA F., DEIANA G., INVERNIZZI C. & PIZZI A. (1991) - *Tettonica*. Da "L'ambiente fisico delle Marche", Regione Marche, Assessorato Urbanistico, Ed. S.E.L.C.A. (FI), 67-80.
- CALAMITA F. & PIZZI A. (1992) - *Tettonica quadernaria nella Dorsale appenninica umbro-marchigiana e bacini intrappenninici associati*. Studi Geol. Camerti, Vol. speciale **1992/I**, 17-25.
- CALAMITA F., PIZZI A. & ROSCIONI M. (1992) - *I fasci di faglie recenti ed attive di M. Vettore - M.Bove e di M.Castello - M.Cardosa (Appennino umbro-marchigiano)*. Studi Geol. Camerti, Vol. speciale **1992/I**, 81-95.
- CALAMITA F., COLTORTI M., FARABOLLINI P. & PIZZI A. (1994) - *Le faglie normali quadernarie nella dorsale appenninica umbro-marchigiana: proposta di un modello di tettonica di inversione*. Studi Geol. Camerti, Vol. speciale, CROP **18**: 211-226.
- CALAMITA F. & PIZZI A. (1994) - *Recent and active extensional tectonics in the southern Umbro-Marchean Apennines (Central Italy)*. Mem. Soc. Geol. It., **48**: 541-548.
- CENTAMORE E., CHIOCCINI M., DEIANA G., MICARELLI A. & PIERUCCINI U. (1971) - *Contributo alla conoscenza del Giurassico dell'Appennino umbro-marchigiano*. Studi Geol. Camerti, **1**: 7-90.
- CENTAMORE E., JACOBACCI A. & MARTELLI G. (1972) - *Modello strutturale umbro-marchigiano. Correlazione con le regioni adiacenti*. Boll. Serv. Geol. d'It., **XCIII**: 155-188.
- CENTAMORE E., DEIANA G., MICARELLI A. & POTETTI M. (1986) - *Il Trias-Paleogene delle Marche*. Da "La Geologia delle Marche", Studi Geol. Camerti, numero speciale in occasione del 73° Congresso della Società Geologica Italiana, Roma 30 settembre-4 ottobre 1986, 9-27.
- CENTAMORE E. & MICARELLI A. (1991) - *Stratigrafia*. Da "L'ambiente fisico delle Marche", Regione Marche, Assessorato Urbanistico, Ed. S.E.L.C.A. (FI), 1-66.
- CENTAMORE E., PAMBIANCHI G., DEIANA G., CALAMITA F., CELLO G., DRAMIS F., GENTILI B. & NANNI T. (1991) - *Foglio 2, scala 1:100.000*. Da "L'ambiente fisico delle Marche", Regione Marche, Assessorato Urbanistico, Ed. S.E.L.C.A. (FI).
- CHIOCCINI M., DEIANA G., MICARELLI A., MORETTI A. & PIERUCCINI U. (1976) - *Geologia dei Monti Sibillini nord-orientali*. Studi Geol. Camerti, **II**: 7-44.
- COOPER J.C. & BURBI L. (1986) - *The geology of the central Sibillini Mountains*. Mem. Soc. Geol. It., **35**: 323-347.
- COSENTINO D. (1986) - *Alti strutturali mesozoici e loro implicazioni geodinamiche durante la tettonogenesi dell'Appennino centrale: un esempio nei M.ti Sibillini meridionali*. Mem. Soc. Geol. It., **35**: 349-356.
- DAMIANI A.V. (1975) - *Aspetti geomorfologici e possibile schema evolutivo dei Monti Sibillini (Appennino umbro-marchigiano)*. Boll. Serv. Geol. It., **46**: 231-314.
- DECANDIA F.A. (1982) - *Geologia dei Monti di Spoleto (provincia di Perugia)*. Boll. Soc. Geol. It., **CI**, 291-315.
- DRAMIS F. & DEIANA G. (1972) - *Le sorgenti della provincia di Macerata*. Cam. Comm. Ind. Artig. e Agr. di Macerata, vol. I-II, Macerata.
- ELTER P., GIGLIA C., TONGIORGI M. & TREVISAN L. (1975) - *Tensional and compressional areas in the recent (Tortonian to present) evolution of the Northern Apennines*. Boll. Geofis. Teor. Appl., **17**: 3-19.
- KOOPMAN A. (1983) - *Detachment tectonics in the Central Apennines, Italy*. Geol. Ultraiectina, **30**: 1-155.
- LAVECCHIA G. (1979) - *Analisi cinematica del sovrascorrimento del F. Fiastrone (Sibillini nord-orientali)*. Boll. Soc. Geol. It., **XCVIII**: 457-468.
- LAVECCHIA G. (1981) - *Appunti per uno schema strutturale dell'Appennino Umbro-Marchigiano*. 3 - Lo stile deformativo. Boll. Soc. Geol. d'It., **C**: 271-278.
- LAVECCHIA G. (1985) - *Il sovrascorrimento dei Monti Sibillini: analisi cinematica e strutturale*. Boll. Soc. Geol. It., **CIV**: 161-194.
- LAVECCHIA G., BARCHI M. & BROZZETTI F. (1994) - *Recent tectonics and active stress field in the Umbria - Marche Apennines*. Mem. Soc. Geol. It., **48**: 535-537.
- LAVECCHIA G. & PIALLI G. (1981) - *Appunti per uno schema strutturale dell'Appennino Umbro-Marchigiano*. 1 - Il basamento. Geologica Romana, **20**: 183-195.
- MARI G.M., MOTTERAN G., SCALISE A.R., TERRIBILI D. & ZATTINI N. (1995) - *Carta Idrogeologica d'Italia - 1:50.000*. Guida al rilevamento e alla rappresentazione. Quad. SGN N. 5, serie III, IPZS, Roma.
- MASTROIRILLO L. (1996) - *Contributo alla valutazione delle risorse idriche sotterranee dell'Appennino carbonatico marchigiano*. Quaderni di geologia applicata, **3**, **1**: 25-35.
- MERLA G. (1951) - *Ricerche tettoniche nell'Appennino settentrionale*. Boll. Soc. Geol. d'It., **LXX**: 95-382.
- NANNI T. (1991) - *Idrogeologia*. Da "L'ambiente fisico delle Marche", Regione Marche, Assessorato Urbanistico, Ed. S.E.L.C.A. (FI), 115-209.
- PARISI G. (1994) - *Le successioni pelagiche del dominio umbro-marchigiano*. In: Guide Geologiche Regionali (Soc. Geol. It.), N. 7, Ed. BE-MA, 31-36.
- PERRONE E. (1910) - *Reno, Lamone, Fiumi Uniti, Savio, Marecchia, Foglia, Metauro, Esino, Potenza, Chienti, Tenna, Aso ed altri minori. Pozzi artesiani della pianura emiliana, dal Panaro alla Marecchia e del litorale Adriatico, da Porto Corsini a Pesaro*. Min. Agr. Ind. e Comm., Mem. Illustrative della Carta idrografica d'It., 35, Roma.
- PIALLI G. (1971) - *Facies di piana cotidale nel Calcare Massiccio dell'Appennino umbro-marchigiano*. Boll. Soc. Geol. It., **XC**: 481-507.
- SCARSELLA F. (1946) - *Di un motivo tettonico dell'Appennino centrale Umbro-Marchigiano*. Boll. Soc. Geol. d'It., **LXV**: 21-23.

- SCARSELLA F. (1951a) - *Un aggruppamento di pieghe dell'Appennino Umbro-Marchigiano*. Boll. Serv. Geol. d'It., **LXXIII**: 307-320.
- SCARSELLA F. (1951b) - *Sulla zona d'incontro dell'Umbria e dell'Abruzzo*. Boll. Serv. Geol. d'It., **LXXI**: 155-166.
- SELLI R. (1950) - *I caratteri geologici della regione marchigiana*. Giornale di Geologia, serie **2**, **21**: 99-125.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1941) - *Foglio geologico 132 (Norcia)*. Carta geologica d'Italia, scala 1:100.000. IPZS, Roma.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1967) - *Foglio geologico 124 (Macerata)*. Carta geologica d'Italia, scala 1:100.000. IPZS, Roma.
- TARRAGONI C. (2001) - *Modello Concettuale e simulazione numerica delle condizioni di flusso degli acquiferi dell'alto bacino del Fiastrone (Sibillini nord-orientali)*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".
- TARRAGONI C. (2005) - *Definizione dell'assetto idrogeologico dei Monti Sibillini e sua verifica col contributo della simulazione numerica delle condizioni di flusso e dell'idrologia isotopica*. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

Received July 2008 - Accepted February 2009