

## STUDIO IDROGEOLOGICO PER L'IDENTIFICAZIONE, LA CARATTERIZZAZIONE E LA GESTIONE DEGLI ACQUIFERI DEL PARCO NAZIONALE DEI MONTI SIBILLINI

### HYDROGEOLOGICAL STUDY FOR IDENTIFICATION, CHARACTERISATION AND MANAGEMENT OF GROUNDWATER RESOURCES IN THE SIBILLINI MOUNTAINS NATIONAL PARK (CENTRAL ITALY)

CARLO BONI<sup>(\*)</sup> †, TIZIANA BALDONI<sup>(\*)</sup>, FRANCESCA BANZATO<sup>(\*)</sup>, DOREDANA CASCONI<sup>(\*)</sup> & MARCO PETITTA<sup>(\*)</sup>

<sup>(\*)</sup> "Sapienza" Università di Roma - Dipartimento di Scienze della Terra - Piazzale Aldo Moro, 5 - 00185 Roma  
E-mail: tizianabaldoni@libero.it - francesca.banzato@uniroma1.it - loredana.cascone@uniroma1.it - marco.petitta@uniroma1.it  
Tel. +39 06 49914834 - 06 49694238

#### RIASSUNTO

Le attività di ricerca sono state rivolte alla definizione dei caratteri idrogeologici degli acquiferi carbonatici che alimentano le sorgenti dei corsi d'acqua perenni del Parco Nazionale dei Monti Sibillini, per i quali sono state applicate le metodologie proprie dell'idrogeologia quantitativa.

L'analisi dei dati direttamente raccolti sul terreno in molti anni di rilievi ha consentito di ottenere informazioni quantitative sulla risorsa idrica sotterranea rinnovabile, corrispondente alle portate erogate dalle sorgenti, prevalentemente lineari, e sulla sua reale disponibilità, funzione del grado di utilizzazione antropica.

In questo lavoro viene presentata la sintesi dei risultati, che forniscono un quadro conoscitivo di base dell'idrogeologia del dominio carbonatico del Parco Nazionale. A tal proposito sono stati ricostruiti 19 modelli idrogeologici concettuali di circolazione idrica sotterranea, suddivisi in funzione dei diversi acquiferi, per ognuno dei quali si è proceduto all'identificazione dell'area di alimentazione, della portata media erogata dalle sorgenti, fino a determinare l'entità dell'infiltrazione efficace della singola struttura idrogeologica. Per ogni singolo bacino, è stata evidenziata la residua disponibilità idrica effettiva, relativa al flusso di base al netto dei prelievi antropici attualmente esistenti, con riferimento alla media su lungo periodo ma anche ai valori estremi di magra, in modo da fornire elementi quantitativi per il rilascio di nuove concessioni idriche e il controllo di quelle già in essere.

**TERMINI CHIAVE:** *acquiferi carbonatici, Monti Sibillini, sorgenti lineari, Deflusso Minimo Vitale, idrogeologia quantitativa*

#### INTRODUZIONE

Lo studio realizzato nell'ambito di un contratto di ricerca stipulato fra il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università "La Sapienza" di Roma, l'Autorità di Bacino del Fiume Tevere e il Parco Nazionale dei Monti Sibillini ha costituito l'occasione per una revisione critica delle conoscenze idrogeologiche relative ai corsi d'acqua perenni del Parco Nazionale dei Monti Sibillini, al fine di fornire uno strumento che consenta di guidare lo sviluppo delle attività del Parco in relazione alla componente idrica.

L'area di indagine si estende su una superficie di circa 1000 km<sup>2</sup> e comprende i principali rilievi carbonatici dell'Appennino umbro-

#### ABSTRACT

The research project discussed in this paper was focused on the Sibillini Mountains National Park. The project was expected to hydrogeologically characterise the carbonate aquifers supplying the springs of the Park's perennial streams, by using quantitative hydrogeology methods.

Analysis of data, directly collected in the field over many years of surveys, yielded quantitative information about local renewable groundwater resources, i.e. discharges from the dominantly linear springs and actual water availability (depending on water abstraction for different uses).

The paper summarises the results of the project, giving a basic picture of the hydrogeology of the Park's carbonate domain. For groundwater flowpaths, 19 Conceptual Hydrogeological Models were built. For each aquifer, the following elements were identified: recharge area; average discharge from springs, and Effective Infiltration of the individual hydrogeological structure. For each basin, the actual residual water availability was determined from the values of baseflow (net of current water abstraction for different uses) and of long-term average discharge under extreme minimum-flow conditions, so as to provide quantitative elements for granting new water leases and for controlling existing ones.

**KEY WORDS:** *carbonate aquifers, Sibillini Mountains, linear springs, Minimum In-Stream Flow, quantitative hydrogeology*

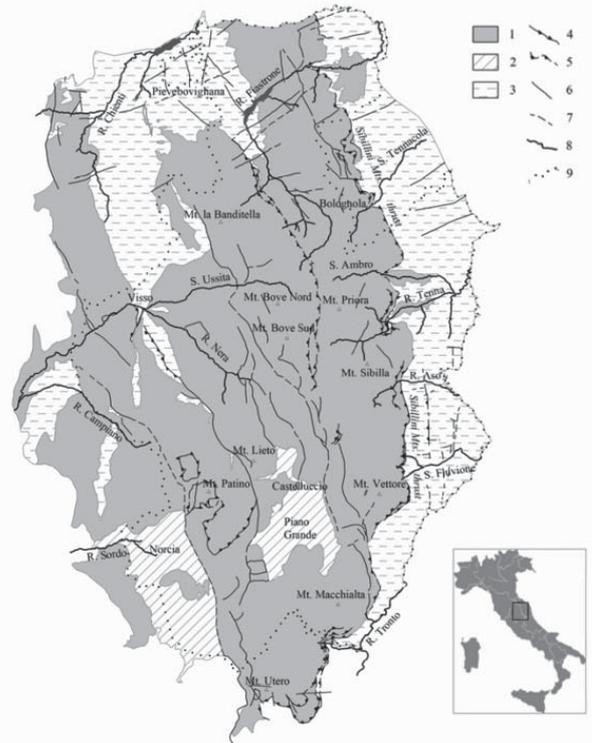
#### INTRODUCTION

The project was conducted as part of a research contract signed between the "Dipartimento di Scienze della Terra, Sapienza Università di Roma", the Tiber River Basin Board and the Sibillini Mts. National Park Authority. The project offered the opportunity to critically review hydrogeological knowledge about the perennial streams of the Sibillini Mts. National Park and to provide guidance for water management policies in the Park.

The investigated area extends over about 1,000 km<sup>2</sup> and includes the main carbonate reliefs of the Umbria-Marche Apennines falling within the Sibillini Mts. National Park (Fig. 1). Quantitative hydroge-

Fig. 1 - Assetto geologico-strutturale dell'area di studio. LEGENDA: 1) dorsali carbonatiche; 2) pianie intramontane; 3) depositi a bassa permeabilità; 4) sovrascorrimento; 5) sovrascorrimento presunto; 6) faglia; 7) faglia presunta; 8) corso d'acqua; 9) limite dell'area del Parco Nazionale dei Monti Sibillini

- Geological-structural setting of the investigated area. LEGEND: 1) carbonate ridges; 2) intramontane plains; 3) low-permeability deposits; 4) thrust; 5) supposed thrust; 6) fault; 7) supposed fault; 8) stream; 9) boundaries of the Sibillini Mts. National Park



marchigiano che ricadono all'interno del Parco Nazionale dei Monti Sibillini (Fig. 1). Sulla base dei metodi propri dell'idrogeologia quantitativa (BONI *et alii*, 2009) è stato fornito un quadro conoscitivo regionale delle risorse idriche disponibili rinnovabili in regime di magra ordinaria, individuando la reale estensione del reticolo idrografico perenne e la portata di tutte le emergenze naturali che alimentano il suo flusso di base. Particolare riguardo è stato dato alle situazioni relative ai singoli corsi d'acqua, per i quali sono state indicate le aree sottoposte a sfruttamento intensivo delle acque superficiali e/o quelle nelle quali indirizzare future indagini per l'utilizzo delle acque sotterranee.

I principali risultati dello studio condotto (BONI & PETITTA, 2007), che rappresentano la sintesi dei dati idrogeologici disponibili sul territorio, funzione del complesso assetto idrogeologico-strutturale, possono essere considerati una valida base conoscitiva di sufficiente dettaglio per future attività di pianificazione dell'uso della risorsa idrica nel territorio del Parco.

### ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

Nell'area affiora la tipica serie umbro-marchigiana, costituita da una successione sedimentaria sottilmente stratificata d'ambiente pelagico, in cui si alternano litotipi calcarei e litotipi da calcareo-marnosi a silicei. Detta successione si è imposta su calcari massivi neritici, disarticolati da una fase tettonica distensiva nel Lias medio. Questa situazione ha dato origine sia alla deposizione di una successione completa, caratterizzata da notevoli spessori, sia alla deposizione di successioni ridotte e condensate, caratterizzate da sensibili variazioni di spessore e con caratteri litologici singolari (CENTAMORE & MICARELLI, 1991; CENTAMORE *et alii*, 1991; COSENTINO, 1986).

ology methods (BONI *et alii*, 2009) were used to give a regional picture of available renewable water resources under normal minimum-flow conditions, defining the actual extent of the perennial catchment area and the discharge from all the natural springs supplying its baseflow. Particular emphasis was placed on individual streams, identifying the areas of intensive exploitation of surface water and/or those where future groundwater use investigations should be concentrated.

The key findings from the project (BONI & PETITTA, 2007) summarise the hydrogeological data available on the investigated area. These data, which are related to its complex hydrogeological-structural setting, offer a fairly detailed knowledge base for future water resource planning and management policies in the Park.

### GEOLOGICAL-STRUCTURAL SETTING

The investigated area has outcrops of the typical Umbria-Marche succession, which consists of thinly stratified, multiple sedimentary layers from a pelagic environment, with alternating calcareous and calcareous-marly to siliceous lithotypes. The succession was emplaced over neritic massive limestones, which were dismembered by extensional tectonic movements in the middle Lias. These movements caused the deposition of a complete succession of considerable thickness, as well as of reduced and condensed successions with significant thickness variations and unique lithological characters (CENTAMORE & MICARELLI, 1991; CENTAMORE *et alii*, 1991; COSENTINO, 1986).

L'assetto strutturale è quello tipico di una catena a pieghe a prevalente vergenza orientale, con assi che ruotano da una direzione meridiana ad una direzione appenninica. La dominante componente traslativa, che ha dato origine al rilievo, ha prodotto una serie di sovrascorrimenti e faglie inverse, molto evidenti sul fianco orientale e nord-orientale delle anticlinali, che ha causato il raccorciamento e l'accavallamento di termini più antichi su depositi più recenti.

L'elemento strutturale principale che delimita ad oriente la dorsale carbonatica è il sovrascorrimento dei Monti Sibillini (Fig. 1) che si estende verso Sud fino a raccordarsi con il sovrascorrimento della "Linea Ancona - Anzio" e verso Nord va a congiungersi col fronte del margine appenninico-padano (CALAMITA & DEIANA, 1986; CALAMITA *et alii*, 1995). La struttura del fronte del sovrascorrimento è caratterizzata da una geometria arcuata a vergenza nord-orientale e convessità adriatica; nella porzione settentrionale l'andamento è appenninico, mentre in quella meridionale è circa N-S. Questo motivo tettonico regionale presenta un'articolazione complessa: in alcune zone si realizza attraverso una sola superficie principale, mentre in altre per mezzo di due superfici che si intersecano e delimitano un corpo intermedio più avanzato rispetto a quello inferiore, ma più arretrato rispetto al superiore (LA VECCHIA, 1985; COOPER & BURBI, 1986; CALAMITA & DEIANA, 1988). Il thrust dei Sibillini ha portato i terreni meso-cenozoici interni sulle antistanti e più esterne formazioni creta-paleogeniche nel settore a Nord del F. Aso e su formazioni essenzialmente mioceniche nel settore a Sud.

A questo motivo compressivo, che delimita la dorsale carbonatica, si associano motivi secondari traslativi e faglie disgiuntive di trascinamento, che hanno profondamente modificato l'originario assetto stratigrafico. Alla principale fase traslativa è seguita una vistosa fase distensiva, che ha dato origine alla vasta depressione di Castelluccio di Norcia e a quella di Norcia (Fig. 1).

Al margine sud-occidentale dell'area considerata un fascio di motivi tettonici compressivi, con direzione appenninica e vergenza nord-orientale, ha prodotto un'intensa deformazione dei litotipi, tanto da alterarne totalmente gli originari caratteri idrogeologici, fino a costituire localmente una barriera idraulica, che separa l'area considerata da quelle contigue.

Tra i due motivi tettonici compressivi dominanti ora descritti, che assumono la valenza di barriere idrauliche, si estende un territorio interessato da motivi tettonici secondari, che danno origine ad un assetto complesso ed articolato. Molti di questi elementi strutturali giocano un ruolo idrogeologico determinante nell'assetto idrostrutturale del territorio ed in particolare nella delimitazione dei grandi acquiferi regionali individuati e nella circolazione delle acque sotterranee, che si sviluppa secondo direttrici parallele ai più importanti elementi strutturali. Anche NANNI & VIVALDA (2005) evidenziano il ruolo della tettonica e dell'assetto lito-strutturale della regione umbro-marchigiana quale elemento fondamentale nel creare le condizioni idrogeologiche che favoriscono miscelamenti tra acque dei differenti acquiferi, ad esempio tramite la risalita di acque profonde lungo zone di frattura connesse a linee tettoniche e/o la presenza di serie lacunose o ridotte che permettono il contatto idraulico tra i diversi complessi.

The structural setting is typical of a dominantly E-dipping folded chain, whose axes rotate from a meridian to an Apennine direction. The prevailing translational component, which gave rise to the relief, produced a number of overthrusts and reverse faults. The faults, which are very clear on the eastern and north-eastern sides of the anticlines, have shortened and thrust the more ancient terms over the more recent ones.

The chief structural feature delimiting the carbonate ridge to the E is the Sibillini Mts. thrust fault (Fig. 1). This fault extends southwards and then connects to the "Linea Ancona-Anzio" (Ancona-Anzio Line) thrust fault; northwards, it joins the Apennine-Po River valley margin (CALAMITA & DEIANA, 1986; CALAMITA *et alii*, 1995). The thrust fault has an arcuate geometry with NE dip and Adriatic convexity; in its northern portion, it is Apennine-trending whereas, in its southern one, it is roughly NS-trending. This regional tectonic style is extremely diversified: in some zones, it involves a single main surface; in other zones, two surfaces intersect with each other and bound an intermediate body which is more advanced than the lower one, but more receded than the upper one (LA VECCHIA, 1985; COOPER & BURBI, 1986; CALAMITA & DEIANA, 1988). The Sibillini Mts. thrust has laid the internal formations of Meso-Cenozoic age over the opposite and more external formations of Cretaceous-Palaeogene age in the northern sector of the Aso River and over the formations, mostly of Miocene age, of its southern sector.

The compressional features, which bound the carbonate ridge, are associated with secondary translational features, which deeply altered the original stratigraphic setting. The main translational stage was followed by a marked extensional stage, giving rise to the wide depressions of Castelluccio di Norcia and of Norcia (Fig. 1).

At the south-western margin of the investigated area (Fig. 1), an Apennine-trending and NE-dipping belt of compressional tectonic features has intensely deformed the local lithotypes, to the extent of changing their original hydrogeological characters completely and creating a hydraulic barrier; this barrier separates the investigated area from adjoining areas.

Secondary tectonic features, producing a complex and diversified setting, extend between the above two compressional features, which act as hydraulic barriers. Many of these structural features play a crucial hydrogeological role in the local hydrostructural setting, demarcating the major regional aquifers and governing groundwater flowpaths, which run parallel to the most important structural features. Also NANNI & VIVALDA (2005) stressed the role of tectonics and of the litho-structural setting of the Umbria-Marche region as a fundamental factor in creating hydrogeological conditions conducive to the mixing of water from different aquifers, e.g. through the rising of deep water along fracture zones connected with tectonic lines and/or the occurrence of reduced or incomplete successions putting the different complexes in hydraulic communication with one another.

## RICARICA DEGLI ACQUIFERI

Sono stati analizzati i dati di precipitazione e temperatura relativi a 37 stazioni pluviometriche, di cui 7 pluvio-termometriche, pubblicati negli Annali del Servizio Idrografico di Stato, sezioni di Roma e Bologna, per il periodo 1921-1997 (Tab. 1).

Il calcolo degli afflussi meteorici è stato eseguito utilizzando sia il metodo dei topoieti, sia quello delle isoiete. La prima metodologia ha fornito una valutazione dell'afflusso meteorico certamente significativa, ma ritenuta poco idonea ad illustrare l'effettiva distribuzione degli apporti meteorici medi sulla catena dei Monti Sibillini, poiché non riflette l'orografia del territorio. Si è comunque osservato un campo di variabilità compreso fra gli 800 e i 1600 mm/anno di precipitazione media calcolata su lungo periodo. Il metodo delle isoiete è risultato più idoneo per la rappresentazione della distribuzione degli apporti meteorici nell'area considerata: infatti è stato possibile evidenziare le aree in cui si hanno le precipitazioni maggiori, che corrispondono ai rilievi montuosi della dorsale di Monte Bove-Monte Vettore, e le zone in cui gli afflussi meteorici sono minori.

Dai dati disponibili risulta che tra Arquata del Tronto e Bolognola le precipitazioni variano tra i 1213 e i 1561 mm/anno (Tab. 1), mentre si notano afflussi più limitati nella valle dell'Ussita e in corrispondenza dell'altopiano di Castelluccio di Norcia e della Piana di Norcia, con valori inferiori ai 1000 mm/anno.

Sono state inoltre valutate le precipitazioni efficaci medie, sottraendo alla precipitazione il valore della evapotraspirazione reale annua, calcolata con il metodo di Turc (Tab. 1). Per definire l'evapotraspirazione è stato necessario costruire una retta di regressione quota-temperatura (Fig. 2), grazie alla quale è stato possibile attribuire valori di temperatura a ciascuna delle stazioni prive di termometro, utilizzando 18 stazioni termometriche distribuite in un'area più estesa rispetto a quella analizzata.

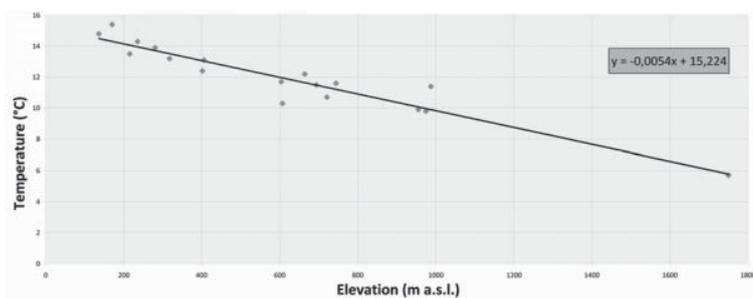


Fig. 2 - Retta di regressione quota-temperatura, utilizzata per attribuire i valori di temperatura alle stazioni pluviometriche che ricadono all'interno dell'area del Parco Nazionale dei Monti Sibillini

- Elevation-temperature regression curve, used to assign temperature values to the rain gauge stations of the Sibillini Mts. National Park

Fig. 3 - Distribuzione della precipitazione efficace nell'area del Parco. LEGENDA: 1) stazioni pluviometriche; 2) stazioni pluvio-termometriche; 3) isolinea della precipitazione efficace  
- Distribution of effective rainfall in the Park. LEGEND: 1) rain gauge stations; 2) rain-temperature gauge stations; 3) isoline of effective rainfall

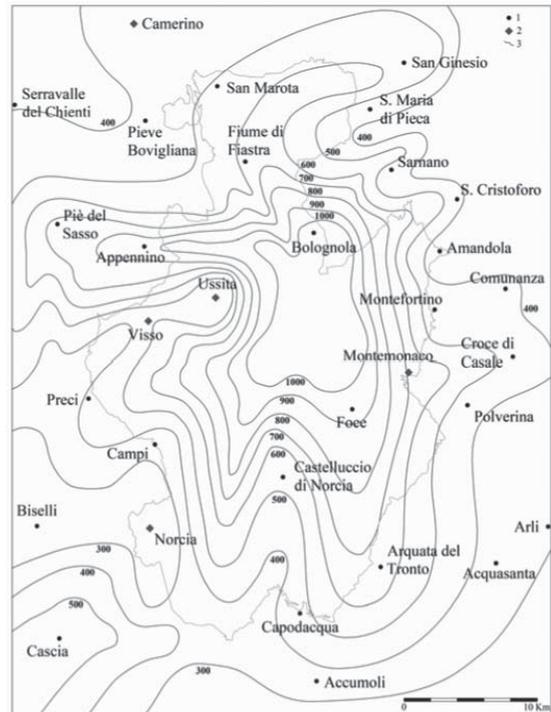
## AQUIFER RECHARGE

Analyses were carried out on rainfall and temperature data from 37 rain gauge stations (of which 7 rain and temperature gauge stations), published in the Annals of "Servizio Idrografico di Stato", Rome and Bologna sections, for the 1921-1997 period (Tab. 1).

Meteoric inflows were calculated with both the topohyet and isohyet methods. The assessment of meteoric inflows with the topohyet method was certainly significant, but poorly suitable to describe the actual distribution of average meteoric inflows into the Sibillini Mts. chain, as it did not reflect the local orography. However, the average rainfall, computed over the long term, showed an 800-1,600 mm/yr variability range. The isohyet method was found to be more suitable to portray the distribution of meteoric inflows into the investigated area, highlighting zones of more intense rainfall (reliefs of the Mt. Bove-Mt. Vettore ridge) and of less intense rainfall.

Available data indicate that rainfall ranges from 1,213 to 1,561 mm/yr (Tab. 1) between Arquata del Tronto and Bolognola and is much lower (1000 mm/yr) in the Ussita River valley and the Castelluccio di Norcia plateau and the Norcia Plain.

The average effective rainfall was computed by subtracting actual yearly evapotranspiration (calculated with the Turc method) from rainfall (Tab. 1). An elevation-temperature regression curve (Fig. 2) was drawn to obtain evapotranspiration. Thanks to this curve, temperature values were assigned to each of the stations which were not equipped with a temperature gauge, by using 18 temperature gauge stations scattered over an area wider than the investigated one.



Tab. 1 - Valori medi su lungo periodo di Precipitazione (P), Temperatura (T), Evapotraspirazione (ET) e Precipitazione Efficace (Peff) delle Stazioni del Servizio Idrografico che ricadono nell'area di indagine. In grassetto i valori di temperatura misurati dalle stazioni termometriche  
 - Average long-term values of Rainfall (P), Temperature (T), Evapotranspiration (ET) and Effective Rainfall (Peff) recorded by the Gauge Stations of "Servizio Idrografico" in the investigated area. In bold, the temperature values measured by the temperature gauge stations

Climatic Station	Elevation (m a.s.l.)	Operation years	P (mm/y)	T (°C)	ET (mm/y)	Peff (mm/y)
Accumoli	858	43	852	10,6	513	339
Acquasanta	392	49	952	13,1	596	356
Appennino	798	32	1465	10,9	590	875
Arli	288	39	960	13,7	613	348
Amandola	550	65	952	12,3	573	379
Arquata del Tronto	720	62	1213	11,3	584	629
Bolognola	1070	64	1561	9,5	546	1016
Biselli	598	45	769	12,0	524	245
Campi	761	23	848	11,1	524	324
Camerino	664	67	1036	<b>12,2</b>	587	449
Capo il Colle	539	39	870	12,3	557	313
Capodacqua	817	69	1033	10,8	548	485
Cascia	743	52	1123	11,2	570	553
Castelluccio di Norcia	1453	68	969	7,4	452	516
Cerreto di Spoleto	558	17	925	12,2	567	358
Comunanza	448	36	1015	12,8	600	415
Croce di Casale	657	38	1032	11,7	572	461
Foce	951	36	1484	10,1	563	920
Fiume di Fiastra	618	68	1231	11,9	603	628
Montefortino	639	43	1032	11,8	574	458
Montemonaco	987	65	1240	<b>11,4</b>	588	651
Norcia	604	57	805	<b>11,7</b>	527	278
Piè del Sasso	653	64	1322	11,7	606	716
Preci	907	54	950	10,3	523	427
Pieve Bovigliana	451	63	1029	12,8	602	426
Polverina dell'Aso	831	27	976	10,7	538	438
Rasiglia	694	51	1043	<b>11,5</b>	567	475
San Cristoforo	587	34	992	12,1	575	416
San Ginesio	687	40	1165	11,5	584	581
San Marota	555	33	1116	12,2	600	516
Santa Maria di Pieca	467	68	1061	12,7	606	456
Sarnano	539	64	1080	12,3	597	482
Serravalle del Chienti	647	22	951	11,7	559	392
Sellano	641	24	1535	11,8	623	912
Servigliano	215	64	847	<b>13,5</b>	579	268
Ussita	744	49	968	<b>11,6</b>	559	409
Visso	607	51	1019	<b>10,3</b>	532	487

Nell'area considerata i valori di precipitazione efficace (Tab. 1) variano da minimi inferiori a 300 mm/anno, nella Piana di Norcia, a massimi superiori a 1000 mm/anno in corrispondenza dei maggiori rilievi (Fig. 3).

Tali dati forniscono una valutazione approssimativa dell'apporto meteorico utile all'alimentazione degli acquiferi e, considerando che nell'area di indagine la componente riferibile al ruscellamento è trascurabile (BONI *et alii*, 1986), è possibile considerare i valori della precipitazione efficace come significativi dati di confronto per la corretta valutazione della infiltrazione efficace.

Considerata la natura dei terreni che costituiscono la dorsale Sibillina e l'entità degli afflussi meteorici efficaci, si può stimare che l'infiltrazione efficace utile all'alimentazione degli acquiferi carbonatici possa, quindi, variare tra minimi compresi tra 200 e 400 mm/anno e massimi di circa 1000 mm/anno, soprattutto in alta quota.

## IDROLOGIA DI SUPERFICIE

Per la valutazione della risorsa idrica sotterranea rinnovabile si è proceduto alla raccolta e analisi dei dati bibliografici (BONI & BONO, 1982a-1982b; BONI *et alii*, 1986; BONI & PETITTA, 1994; BONI *et alii*, 2009; DRAGONI *et alii*, 2003; NANNI *et alii*, 2006; PERRONE, 1910; PARCO NAZIONALE DEI MONTI SIBILLINI, 2001; TARRAGONI, 2005), delle misure sperimentali eseguite in alveo per circa vent'anni, in anni e stagioni diverse, nei corsi d'acqua che ricadono nell'area in esame, oltre all'esame degli idrogrammi delle stazioni idrometriche gestite dal Servizio

In the investigated area, effective rainfall (Table 1) varies from less than 300 mm/yr in the Norcia Plain to above 1,000 mm/yr in the major reliefs (Fig. 3).

These data give an approximate indication of the meteoric inflows which are needed to recharge the aquifers. Assuming that the contribution of runoff in this area is negligible (BONI *et alii*, 1986), the values of effective rainfall represent a significant term of comparison for correctly assessing effective infiltration.

Considering the nature of the Sibillini Mts. formations and the extent of their effective meteoric inflows, the effective infiltration needed to recharge the aquifers is estimated to go from 200-400 mm/yr to about 1,100 mm/yr, especially at high altitude.

## SURFACE HYDROLOGY

To assess renewable groundwater resources, the following data were collected and analysed: literature data (BONI & BONO, 1982a-1982b; BONI *et alii*, 1986; BONI & PETITTA, 1994; BONI *et alii*, 2009; DRAGONI *et alii*, 2003; NANNI *et alii*, 2006; PERRONE, 1910; PARCO NAZIONALE DEI MONTI SIBILLINI, 2001; TARRAGONI, 2005); experimental measures taken in the streams of the investigated area for about two decades (in different years and seasons); and hydrograms from the hydrometric stations operated by "Servizio Idrografico di Stato"

Idrografico di Stato (MINISTERO LL.PP., 1921-1997). I valori di sintesi individuati in corrispondenza delle diverse sezioni di misura e i valori di portata relativi alle emergenze naturali non sono, ovviamente, il semplice risultato di medie o di differenze eseguite sugli eterogenei dati disponibili. Si è tenuto infatti conto di possibili errori nella valutazione del flusso di base dovuti ad apporti di ruscellamento superficiale nei mesi primaverili. Si è inoltre eseguito il calcolo degli apporti in alveo privilegiando i dati desunti da misure contemporanee, eseguite in diversi periodi dell'anno ed in anni successivi. Questo lavoro di sintesi e revisione critica ha permesso di individuare la reale estensione del reticolo idrografico perenne all'interno dell'area del Parco, la portata di tutte le emergenze naturali che alimentano il suo flusso di base e che, quindi, ne rappresentano la risorsa media di magra ordinaria rinnovabile.

È stato inoltre possibile indicare l'ubicazione dei maggiori impianti di derivazione e di restituzione delle acque, l'entità della portata derivata e della portata residua in alveo, confrontando le misure a monte e a valle delle opere di derivazione. Sono state individuate le principali captazioni di acque sotterranee, di cui gli Enti gestori preposti hanno fornito l'entità dei prelievi.

#### ANALISI DEI DATI IDROMETRICI

Per la scomposizione degli idrogrammi è stato utilizzato il "metodo delle portate mensili caratteristiche" (BONI *et alii*, 1993), che consente di identificare e valutare le due principali componenti della portata di un corso d'acqua: il ruscellamento, alimentato dal rapido processo di scorrimento delle acque meteoriche sulle superfici dei bacini e il flusso di base, erogato dalle sorgenti, sia lineari che puntuali, che sono alimentate dal lento movimento delle acque sotterranee. Tra questi due estremi si identifica un "campo indeterminato" che non è attribuibile con sicurezza né al flusso di base, né al ruscellamento. Il "metodo delle portate mensili caratteristiche" prevede che si mettano a confronto, per ogni mese, i valori medi ed estremi della portata, desunti dai dati giornalieri rilevati da una stazione di misura.

Nella scomposizione degli idrogrammi (Fig. 4) sono state quindi identificate:

1. la media delle portate mensili, che rappresenta la media aritmetica delle portate mensili, di ciascun mese, nel periodo di osservazione;
2. la media delle portate giornaliere minime, cioè la media aritmetica delle portate giornaliere minime, di ciascun mese, nel periodo di osservazione;
3. la minima delle portate medie mensili, corrispondente al valore più basso delle portate medie mensili, di ciascun mese, nel periodo di osservazione;
4. la minima delle portate giornaliere, equivalente al valore più basso della portata giornaliera, di ciascun mese, nel periodo di osservazione.

Il campo delimitato dalla media delle portate giornaliere minime (2) definisce le portate di magra ordinaria, corrispondenti alla somma del flusso di base calcolato e del campo indeterminato; la linea che rappresenta la minima delle portate medie mensili (3) delimita il campo riferibile al flusso di base.

(MINISTERO LL.PP., 1921-1997). As is obvious, the concise values obtained for the different sections of the streams and the discharge values for the natural springs are not merely the result of averages of or differences between the available heterogeneous data. Account was indeed taken of possible errors in assessing the baseflow due to the contribution of surface runoff in Spring. Furthermore, inflows into the streambeds were computed by preferably using data from simultaneous measurements made in different periods of the year and in subsequent years. This work of synthesis and critical review made it possible to identify: i) the actual extent of the Park's perennial catchment area; and ii) the discharge from all the natural springs which supply its baseflow and which thus represent the average renewable resource available under normal minimum-flow conditions.

Additionally, the major water intake and release structures were identified and the related intercepted flow and residual in-stream flow were determined by comparing the data measured upstream and downstream thereof. The main groundwater intake structures were also identified and the related withdrawal values were obtained from the entities in charge of managing them.

#### ANALYSIS OF HYDROMETRIC DATA

For decomposition of hydrograms, use was made of the "metodo delle portate mensili caratteristiche" (method of typical monthly discharge, BONI *et alii*, 1993). This method permits to determine the two principal components of stream discharge: runoff, i.e. the fast flow of meteoric water over the surfaces of the basins; and baseflow, which is delivered by the linear and localised springs supplied by slow-moving groundwater. An "indeterminate field", which cannot be attributed to baseflow or runoff with certainty, arises between these two extremes. Under this method, the average and extreme values of discharge (inferred from daily data recorded by a measuring station) are compared on a month-by-month basis.

The following values were obtained from hydrogram decomposition (Fig. 4):

1. average monthly discharge: arithmetical average of monthly discharge in each month of the observation period;
2. average minimum daily discharge: arithmetical average of minimum daily discharge in each month of the observation period;
3. minimum monthly discharge: lowest value of monthly discharge in each month of the observation period;
4. minimum daily discharge: lowest value of daily discharge in each month of the observation period.

The field delimited by the average minimum daily discharge (2) defines the discharge under normal minimum-flow conditions, i.e. the sum of the calculated baseflow and of the indeterminate field. The line representing the minimum monthly discharge (3) delimits the field of the baseflow.

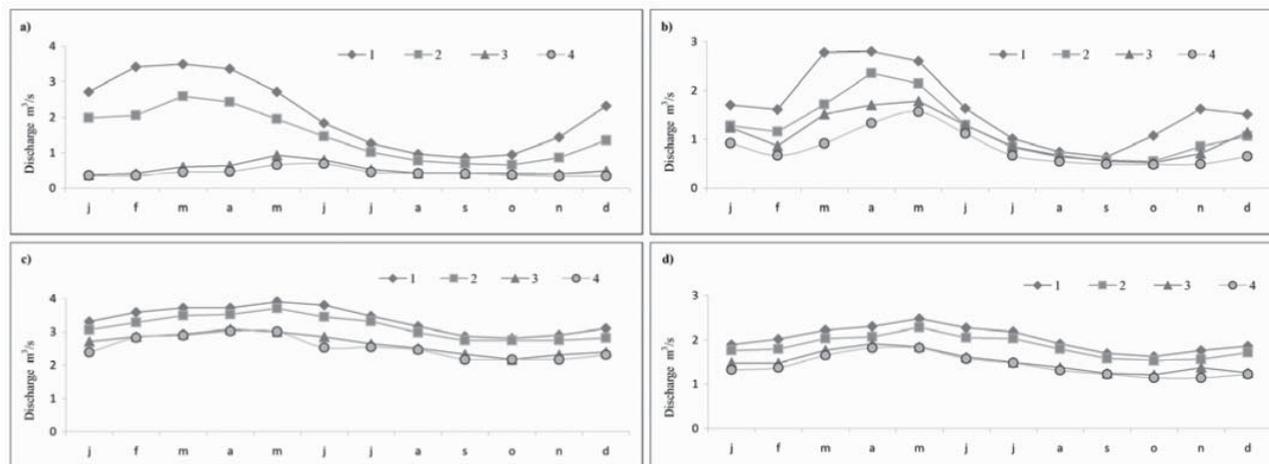


Fig. 4 - Scomposizione tramite il “metodo delle portate mensili caratteristiche” degli idrogrammi dei Fiumi Chienti (a), Fiastrone (b), Nera (c) e Ussita (d). LEGENDA: 1) media delle portate mensili; 2) media delle portate giornaliere minime; 3) minima delle portate medie mensili; 4) minima delle portate giornaliere  
 - Decomposition of the hydrograms (under the “method of typical monthly discharge”) of the Chienti (a), Fiastrone (b), Nera (c) and Ussita (d) Rivers. LEGEND: 1) average monthly discharge; 2) average minimum daily discharge; 3) minimum monthly discharge; 4) minimum daily discharge

La stazione del F. Chienti a Pieve Torina (Fig. 4a) ha funzionato, in maniera discontinua, nel periodo 1939-1978. La portata di magra ordinaria calcolata è di 1480 L/s, la minima delle portate mensili è di 530 L/s. Nella stazione di Pieve Torina è molto probabile che gran parte del campo indeterminato sia riferibile ad apporti nella copertura detritica di acque sorgive provenienti dall’acquifero della Scaglia Calcarea, per cui il valore del flusso di base risulterebbe più elevato di quello calcolato.

Dal 1929 al 1935 la stazione idrometrica a Fiume di Fiastra sul F. Fiastrone (Fig. 4b) ha rilevato una portata di magra ordinaria pari a 1200 L/s ed una minima delle portate mensili di 1070 L/s, che rappresenta il flusso di base. Confrontando i valori di portata storici, misurati dalla stazione idrometrica nel periodo di funzionamento, con quelli relativi alle misure effettuate negli ultimi decenni, si riconosce una sostanziale uniformità tra i valori della portata di magra ordinaria e quelli misurati a monte dell’attuale Lago di Fiastra (1020 L/s).

In corrispondenza dell’abitato di Visso sono stati esaminati i dati misurati da due stazioni idrometriche nel periodo 1931-1941, relativi al corso del F. Nera e del T. Ussita (Figg. 4c e 4d). La portata di magra ordinaria calcolata per il F. Nera è di 3150 L/s, per il T. Ussita è di 1850 L/s. I valori di flusso di base minimo sono, rispettivamente, di 2650 L/s e di 1500 L/s.

L’analisi degli idrogrammi dei Fiumi Nera ed Ussita indica chiaramente che i due corsi d’acqua sono prevalentemente alimentati da acque sotterranee erogate da acquiferi caratterizzati da un’elevata stabilità del regime di flusso. La componente riferibile al ruscellamento costituisce, invece, una piccola aliquota della portata media dei due corsi d’acqua.

Dal confronto di questi dati con quelli relativi alle misure effettuate in periodi più recenti, in prossimità dell’ubicazione delle stazioni idrometriche, risulta una sensibile diminuzione della risorsa idrica rinnovabile.

Le elaborazioni condotte sui dati relativi alle stazioni idrometriche ubicate in corrispondenza delle principali aste fluviali del Parco

The Chienti River station at Pieve Torina (Fig. 4a) operated discontinuously in the 1939-1978 period. The calculated discharge under normal minimum-flow conditions is 1480 L/s, while the minimum monthly discharge is 530 L/s. At the Pieve Torina station, the most part of the indeterminate field is very likely to be due to inflows of spring water from the “Scaglia Calcarea” aquifer into the debris cover. Therefore, the actual baseflow may be higher than the calculated one.

From 1929 to 1935, the Fiume di Fiastra hydrometric station on the Fiastrone River (Fig. 4b) recorded a discharge of 1,200 L/s under normal minimum-flow conditions and a minimum monthly discharge (baseflow) of 1,070 L/s. The comparison between the historical values of discharge (recorded by the hydrometric station during its period of operation) and those measured in the past few decades shows that the values of discharge under normal minimum-flow conditions practically match those measured upstream of the present Lake Fiastra (1,020 L/s).

The data reported for the town of Visso were measured by two hydrometric stations on the Nera River and Ussita Stream in the 1931-1941 period (Figs. 4c and 4d). The discharge calculated for the Nera River under normal minimum-flow conditions is 3,150 L/s, while the one for the Ussita Stream is 1,850 L/s. The minimum baseflow values are 2,650 L/s and 1,500 L/s, respectively.

The analysis of hydrograms of the Nera River and Ussita Stream clearly evidences that the two streams are dominantly supplied by groundwater from aquifers which have a very stable discharge. In contrast, runoff accounts for a small percentage of the average discharge of the two streams.

The comparison of these data with measurements made near the hydrometric stations in more recent periods suggests depletion of the local renewable water resources.

hanno confermato un'elevata potenzialità idrica sotterranea accompagnata da una notevole stabilità del regime di flusso, relegando il fenomeno del ruscellamento ad un ruolo marginale.

### COMPLESSI IDROGEOLOGICI ED EMERGENZE NATURALI

La metodologia di indagine ha portato all'individuazione delle aree di alimentazione degli acquiferi e di tutti i punti di emergenza, distribuiti nel territorio, basandosi sull'analisi di due diversi aspetti dell'idrogeologia regionale e sul successivo confronto dei risultati. Il primo aspetto riguarda lo studio accurato della geologia del territorio (CHIOCCHINI *et alii*, 1976; DEIANA & MARCHIGIANI, 2002a-2002b; REGIONE MARCHE, 1991; REGIONE UMBRIA, 2002), che ha consentito l'identificazione dei diversi complessi idrogeologici e delle barriere idrauliche, che suddividono il territorio in settori distinti. Il secondo aspetto riguarda l'analisi dell'idrologia di superficie, basata sulla misura sistematica delle portate erogate dalle sorgenti puntuali e lineari, al fine di valutare la portata di magra ordinaria.

#### COMPLESSI IDROGEOLOGICI

Nell'intera dorsale dei Monti Sibillini affiorano le ben note formazioni della Successione Umbro-Marchigiana (ACCORDI, 1984), intensamente corrugate dall'orogenesi appenninica, che sono state raggruppate in diversi Complessi Idrogeologici (Fig. 5).

Il Complesso Calcarea Basale comprende le formazioni del Calcarea Massiccio, della Corniola e del Bugarone, caratterizzate da considerevole permeabilità, sede dell'Acquifero "Basale".

Processing of the data from the hydrometric stations located on the main streams of the Park confirmed high groundwater potential, highly stable discharge and marginal role of runoff.

### HYDROGEOLOGICAL COMPLEXES AND NATURAL SPRINGS

With the selected methodology, aquifer recharge areas and all the springs scattered over the investigated area were identified, by analysing two different aspects of the regional hydrogeology and by subsequently comparing results. The first aspect was the local geology: a careful study was conducted to single out the various hydrogeological complexes of the area and the hydraulic barriers separating it into different sectors (CHIOCCHINI *et alii*, 1976; DEIANA & MARCHIGIANI, 2002a-2002b; REGIONE MARCHE, 1991; REGIONE UMBRIA, 2002). The second aspect was the local surface hydrology, whose analysis was based on systematic measurements of flows from the localised and linear springs, so as to determine their discharge under normal minimum-flow conditions

#### HYDROGEOLOGICAL COMPLEXES

The well-known formations of the Umbria-Marche Succession (ACCORDI, 1984) outcrop all over the Sibillini Mts. ridge. These formations, intensely folded upon the Apennine orogeny, were grouped into different Hydrogeological Complexes (Fig. 5).

The "Complesso Calcarea Basale" (Basal Calcareous Complex) consists of the "Calcarea Massiccio", "Corniola" and "Bugarone" formations, which are very permeable and which host the "Basal" Aquifer.

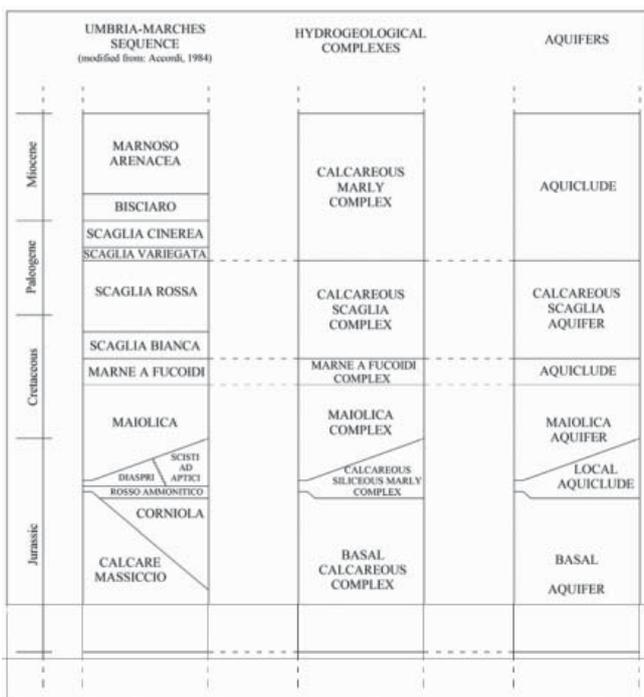


Fig. 5 - Schema dei rapporti fra successione stratigrafica umbro-marchigiana, complessi idrogeologici e acquiferi nell'area dei Monti Sibillini  
- Sketch of relationships between the Umbria-Marche stratigraphic succession, the hydrogeological complexes and the aquifers of the Sibillini Mts

Il Complesso Calcareo-Silico-Marnoso comprende le seguenti formazioni: Calcari e Marne del Sentino, Formazione del Bosso, Rosso Ammonitico, Calcari e Marne a Posidonie, Calcareniti di Monte Valvasseto, Calcareniti nocciola della Valnerina, Calcari Diasprigni. In corrispondenza dei Monti Sibillini questo complesso può avere spessori molto variabili: da oltre 200 metri (dove la successione è definita “completa”) a poche decine di metri (dove la successione è definita “ridotta”). Il Complesso Calcareo-Silico-Marnoso, data la sua bassa permeabilità, dove ha spessori notevoli si comporta come un acquicludo locale; dove ha spessore molto ridotto si può avere continuità idraulica tra il Complesso della Maiolica ed il Complesso Calcareo Basale.

Il Complesso della Maiolica, generalmente caratterizzato da notevole permeabilità, può ospitare un acquifero indipendente o può trovarsi in continuità idraulica con l’Acquifero Basale.

Il Complesso delle Marne a Fucoidi, a bassa permeabilità, è sempre presente ma con spessori limitati ad un massimo di alcune decine di metri. Dove si è conservato integro, questo complesso può costituire un limite idraulico tra il complesso della Maiolica e quello della Scaglia Calcareo.

Il Complesso della Scaglia Calcareo, che affiora in gran parte del territorio considerato e ospita acquiferi indipendenti, comprende le formazioni della Scaglia Bianca, Scaglia Rossa e Scaglia Variiegata.

Superiormente si trova una successione di formazioni marnoso-arenacee appartenenti al Complesso Calcareo-Marnoso (Scaglia Cinerea, Bisciario, Schlier, Marne a Pteropodi e Marne con Cerrognana) e al Complesso Argilloso-Arenaceo (Formazione della Laga, Formazione Gessoso-Solfifera ed Arenarie di Camerino), caratterizzati da bassa permeabilità e privi, quindi, di acquiferi significativi.

I Depositi Lacustri colmano le depressioni di Castelluccio di Norcia e di Norcia, con spessori variabili da pochi metri a qualche centinaio. Sono costituiti prevalentemente da alternanze di depositi limoso-argillosi, a luoghi con torbe. Questo complesso è caratterizzato da bassa permeabilità, ma al suo interno può contenere modesti acquiferi sospesi negli orizzonti più permeabili.

I Depositi di Copertura, di natura alluvionale e detritica, presentano caratteristiche granulometriche molto eterogenee e spessori variabili da qualche metro a decine di metri. Possono ospitare al loro interno falde sospese, libere o multistrato, alimentate da apporti sia zenitali che laterali provenienti dai complessi contigui. Tali acquiferi possono avere rilevanza locale, ma assumono un ruolo secondario nell’economia idrogeologica regionale.

Gli acquiferi riconosciuti e ospitati nei complessi idrogeologici descritti possono essere così sintetizzati:

- Acquiferi Basali, ospitati dal Complesso Calcareo Basale, alimentati dagli affioramenti del Calcareo Massiccio e della Corniola e, localmente, anche dagli affioramenti della Maiolica, dove la successione risulta condensata, e più raramente della Scaglia Calcareo, dove le Marne a Fucoidi presentano spessori ridotti o sono dislocate da faglie con un rigetto superiore al loro spessore.

The “Complesso Calcareo-Silico-Marnoso” (Calcareous-Siliceous-Marly Complex) includes the following formations: “Calcari e Marne del Sentino, Formazione del Bosso, Rosso Ammonitico, Calcari e Marne a Posidonie, Calcareniti di Monte Valvasseto, Calcareniti nocciola della Valnerina, Calcari Diasprigni”. In the Sibillini Mts., this complex may have very variable thickness: from more than 200 m (where the succession is defined as “complete”) to few tens of metres (where the succession is defined as “reduced”). The Calcareous-Siliceous-Marly Complex, which is poorly permeable, acts as a local aquiclude in areas where it is very thick. Conversely, in areas where it is thin or altogether missing, there may be hydraulic continuity between the “Complesso della Maiolica” (Maiolica Complex) and the Basal Calcareous Complex.

The Maiolica Complex, which is generally very permeable, may host an independent aquifer or be in hydraulic continuity with the Basal Aquifer.

The “Complesso delle Marne a Fucoidi” (Fucoiid-Bearing Marl Complex), of poor permeability, is always present, but its thickness does not exceed some tens of metres. In areas where this complex has remained undisturbed, it may act as a hydraulic barrier between the Maiolica Complex and the “Complesso della Scaglia Calcareo” (Calcareous Scaglia Complex).

The Calcareous Scaglia Complex, which is exposed over most of the investigated area and holds independent aquifers, includes the “Scaglia Bianca”, “Scaglia Rossa” and “Scaglia Variiegata” formations.

It is overlain by a succession of marly-arenaceous formations, belonging to the Calcareous-Marly Complex (“Scaglia Cinerea”, “Bisciario”, “Schlier”, “Marne a Pteropodi” and “Marne con Cerrognana”) and to the “Complesso Argilloso-Arenaceo” (Argillaceous-Arenaceous Complex, including “Formazione della Laga”, “Formazione Gessoso-Solfifera” and “Arenarie di Camerino”). As these complexes are poorly permeable, they do not accommodate significant aquifers.

The “Depositi Lacustri” (Lacustrine Deposits) fill the depressions of Castelluccio di Norcia and Norcia, with a thickness varying from few metres to some hundreds of metres. They are dominantly made up of alternating silty-clayey deposits, with occasional peat. This complex has a low permeability, but may hold minor perched aquifers in its more permeable horizons.

The “Depositi di Copertura” (Cover Deposits), of an alluvial and detrital nature, have a very heterogeneous grain size and a thickness of few metres to tens of metres. They may hold perched, unconfined or multi-layered aquifers, which are fed by both meteoric water and lateral inflows from the adjoining complexes. These aquifers may be of local relevance, but play a minor role in the regional hydrogeology.

The principal aquifers identified in the above-described hydrogeological complexes are as follows:

- Basal Aquifers within the Basal Calcareous Complex: they are supplied from the outcrops of the Calcareo Massiccio and Corniola and locally also from the outcrops of the Maiolica (where the succession is condensed) and, more rarely, of the Calcareous Scaglia, where the Fucoiid-Bearing Marls are thin or dislocated by faults with a dip-slip exceeding their thickness.

**STUDIO IDROGEOLOGICO PER L'IDENTIFICAZIONE, LA CARATTERIZZAZIONE E LA GESTIONE  
DEGLI ACQUIFERI DEL PARCO NAZIONALE DEI MONTI SIBILLINI**

- Acquiferi della Maiolica: sono delimitati alla base dal Complesso Calcareao-Silico-Marnoso e al tetto dalle Marne a Fucoidi.
- Acquiferi della Scaglia Calcarea: si estendono dove la successione stratigrafica è stata interessata da motivi tettonici più blandi, che hanno prodotto anticlinali e sinclinali in successione. L'acquifero della Scaglia, localmente, può essere coperto dal Complesso Marnoso-Arenaceo.

**EMERGENZE NATURALI**

Sono state riconosciute 52 emergenze naturali, sia puntuali che lineari, con portata media superiore ai 20 L/s, a ciascuna delle quali è associata una sigla identificativa in cui le lettere indicano il corso d'acqua di appartenenza e i numeri le quote di emergenza (Tab. 2). Relativamente a ciascuna sorgente si è provveduto ad indicarne i corrispondenti valori di portata di magra ordinaria e quella minima, registrati nel periodo di osservazione, e l'acquifero che l'alimenta. Per le piccole emergenze (portata inferiore a 20 L/s), alimentate da acquiferi minori, variamente distribuite nel territorio, è stata soltanto indicata l'ubicazione.

- Maiolica Aquifers: they are bounded at their base by the Calcareous-Siliceous-Marly Complex and at their roof by the Fucoid-Bearing Marls.
- Calcareous Scaglia Aquifers: they extend where the stratigraphic succession experienced milder tectonic movements, which produced anticlines and synclines in sequence. Locally, the Scaglia aquifer may be covered by the Marly-Arenaceous Complex.

**NATURAL SPRINGS**

Fifty-two localised and linear natural springs were recognised, with an average discharge of over 20 L/s. Each spring was associated with an identification code, where the letters identify the belonging stream and the numbers refer to the elevation of the spring (Tab. 2). For each spring, the following values are reported: discharge under normal minimum-flow conditions and minimum discharge, recorded in the observation period, and supplying aquifer. For small springs (discharge below 20 L/s), which are supplied by minor aquifers distributed over the investigated area, only the location is shown.

Spring signature	Period of observation	Number of measures	Medium discharge (L/s)	Minimum discharge (L/s)	Aquifer
F1225-1060	1992-2005	16	160	40	Basal
San Ginesio			50		Basal
AS1150-1050	1992-2006	24	170	30	Scaglia
AS845-805	1992-2003	24	90	15	Basal
F1000-720	2000-2003	11	230	195	Basal
SR900-840	1992-2003	18	110	30	Maiolica
SR775-715	1992-2003	18	60	20	Scaglia
F715-650	1992-2003	17	255	170	Scaglia
RB920-645	1992-2002	10	60	10	Mixed
F560-400	1992-1993	8	340	325	Mixed
TN1150-750	1998-2007	110	190	65	Basal
AO1245	1992-2002	3	30	15	Basal
AO930-820	2002-2006	6	245	140	Basal
AO820-700	1992-2006	12	230	100	Mixed
TE1178	1988-2007	131	160	80	Maiolica
TE1140-845	1992-1993	2	300	65	Basal
TE845-543	1992-2006	9	350	305	Mixed
TE510	1988-2006	13	50	45	Mixed
CS520	1992-2006	10	80	10	Mixed
A940-830	1992-1993	4	690	380	Basal
A910	1989-2007	221	535	380	Basal
A830-737	1992-1993	5	190	80	Basal
FL1320-1300	2006-2007	12	50	40	Basal
CN1014	2002-2007	60	20	10	Basal
TR926	1989-2007	221	220	40	Maiolica
TR852	2000-2004	55	25	10	Maiolica
TR841	1989-2007	221	340	20	Basal
TR830-725	2007	1	130		Basal
CT643-565	1991-2003	26	180	35	Scaglia
CT518	1992-2003	21	175	50	Maiolica
CT527-488	1992-2003	14	215	120	Scaglia
VS615-480	1992-1993	6	50	10	Scaglia
FO461	2000-2001	6	250	140	Scaglia
FO460-440	2000-2001	6	75	20	Scaglia
FO453	2000-2006	18	505	230	Scaglia
U1250-1140	1991-2006	30	320	150	Maiolica
U830-727	1991-2003	15	80	40	Mixed
U718-645	1991-2003	25	570	400	Basal
U645-607	1991-2003	21	120	20	Scaglia
RA800-730	1991-2003	27	360	250	Basal
N844	1990-2003	25	100	60	Maiolica
SC760	1991-2003	22	640	500	Basal
N760-725	1992-2003	19	820	580	Basal
N660-640	1991-1998	8	90	70	Maiolica
N640-612	1991-1996	8	270	250	Scaglia
Le Vene			30		Scaglia
FV670-610	1991-2006	23	250	150	Scaglia
N502-470	1992-1993	8	710	510	Scaglia
C718-660	1992-2007	8	390	360	Scaglia
C660-560	1992-1993	7	90	40	Scaglia
C520-450	1988-2002	5	280	85	Scaglia
SO600-530	1992-2007	13	1380	1210	Mixed

Tab. 2 - Sorgenti puntuali e lineari. Per ciascuna sorgente è indicato l'acquifero di alimentazione: Basale, Maiolica, Scaglia o Misto, nel caso di sorgenti alimentate da più acquiferi o per le quali non è stato possibile riconoscere quello che le alimenta - *Linear and localised springs. For each spring, the supplying aquifer is reported as Basal, Maiolica, Scaglia or Mixed (if the springs are supplied by multiple aquifers or if their supplying aquifer was not detected)*

I valori di portata di magra ordinaria e minima delle sorgenti, riportati nella tabella 2, sono stati desunti dal controllo ed omogeneizzazione dei dati di portata rilevati dagli anni '90 dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università La Sapienza di Roma.

Nel caso delle sorgenti lineari, che rappresentano circa il 75% della risorsa idrica disponibile nell'area del Parco, i valori di portata sono stati calcolati come differenze tra misure di portata contemporanee eseguite a monte e a valle dei tratti di alveo drenanti.

La portata complessiva erogata dalle sorgenti ubicate nel territorio del Parco Nazionale dei Monti Sibillini è di circa 13000 L/s, di cui quasi il 50% sono alimentate da acquiferi del Complesso Calcarea Basale, il 40% da quelli della Scaglia Calcarea e meno del 10% da quelli del Complesso della Maiolica.

### MODELLI IDROGEOLOGICI CONCETTUALI

La metodologia adottata e i dati disponibili hanno consentito di realizzare modelli idrogeologici concettuali degli acquiferi, per la maggior parte dei quali, alla conoscenza dell'entità e del regime delle risorse sorgive si accompagna un'adeguata definizione dei relativi bacini idrogeologici e dei principali processi che ne regolano il deflusso idrico sotterraneo. Nei casi in cui il grado di conoscenza acquisito ha un dettaglio minore, è stato possibile redigere dei modelli idrogeologici concettuali preliminari circostanziati che dovranno essere ulteriormente verificati da successive indagini di dettaglio.

Dal confronto tra l'assetto idrostrutturale, che delinea la presunta geometria degli acquiferi, e la distribuzione territoriale delle sorgenti è stato possibile ottenere la più probabile configurazione degli acquiferi. I modelli idrogeologici concettuali derivati (Tav. 1) convalidano tale configurazione attraverso verifiche di bilancio, mettendo a confronto la natura e l'estensione delle aree di alimentazione con la portata media erogata dalle sorgenti: ne risultano valori dell'Infiltrazione Efficace generalmente confrontabili con quelli attesi dalle precipitazioni efficaci e soprattutto coerenti con quelli tipici dei diversi complessi idrogeologici (BONI *et alii*, 1986).

I Modelli Idrogeologici Concettuali (M.I.C.) dei singoli acquiferi individuati contengono le informazioni più significative sull'idrogeologia dell'area esaminata e consentono di valutare, con buona approssimazione, l'entità delle risorse sotterranee rinnovabili mediamente disponibili nei diversi settori del territorio.

Di ciascun bacino idrogeologico è stata riconosciuta l'area d'alimentazione, l'eventuale copertura operata da un complesso idrogeologico caratterizzato da permeabilità trascurabile, sovrastante il settore saturo dell'acquifero. Sono stati, inoltre, definiti: la tipologia dell'acquifero, l'estensione dell'area d'alimentazione, la portata media complessivamente erogata dalle sorgenti che alimenta, il valore dell'Infiltrazione Efficace relativo all'area di alimentazione riconosciuta ed il range di valori delle Precipitazioni Efficaci che caratterizzano le aree di ricarica (Tab. 3).

Per ciascun acquifero il calcolo dell'Infiltrazione Efficace è stato realizzato valutando il rapporto tra le portate medie erogate dalle sorgenti e l'estensione delle aree di alimentazione: questa metodologia ha permesso di valutare in maniera "diretta" i quantitativi di acque che si

The values of discharge under normal minimum-flow conditions and of minimum discharge from the springs (Table 2), were obtained by checking and homogenising the discharge data collected by the "Dipartimento di Scienze della Terra, Sapienza Università di Roma" since the 1990s.

For linear springs, which account for roughly 75% of the Park's available water resources, discharge was computed as the difference between simultaneous discharge measures taken upstream and downstream of the draining sections of the streams.

The overall discharge delivered by the springs of the Sibillini Mts. National Park is about 13,000 L/s, of which nearly 50% supplied by the aquifers of the Basal Calcareous Complex, 40% by those of the Calcareous Scaglia one and less than 10% by those of the Maiolica Complex.

### CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODELS

Under the selected methodology and with the available data, Conceptual Hydrogeological Models of the aquifers were built. For most of the aquifers, data about the extent of spring resources and their discharge were combined with an appropriate definition of the related hydrogeological basins and of the main processes governing their groundwater flow. Where the acquired knowledge was less detailed, preliminary Conceptual Hydrogeological Models, to be validated by subsequent detailed analyses, were built.

The most likely configuration of the aquifers was obtained by comparing the hydrostructural setting (suggesting the geometry of the aquifers) and the spatial distribution of the springs. The resulting Conceptual Hydrogeological Models (Plate 1) validated this configuration through water budget computations, which compared the nature and extent of the recharge areas with the average discharge from the springs: the ensuing values of Effective Infiltration are generally comparable with the expected values of effective rainfall and, above all, consistent with the typical values of the different hydrogeological complexes (BONI *et alii*, 1986).

The Conceptual Hydrogeological Models (CIMs) of the identified aquifers epitomise the hydrogeology of the investigated area, permitting to assess, to a good approximation, the extent of the renewable groundwater resources which are available on average in the different sectors thereof.

For each hydrogeological basin, the following elements were identified: recharge area and its extent; type of aquifer; hydrogeological complexes of negligible permeability, if any, overlying the saturated zone of the aquifer; overall average discharge from the springs supplied by the aquifer; value of Effective Infiltration into the identified recharge area, and range of values of Effective Rainfall in the recharge areas (Tab. 3).

For each aquifer, the Effective Infiltration was calculated by determining the ratio of average discharge from the springs to extent of the recharge area. With this methodology, the amount of water infiltrating into the subsoil was assessed in a "direct" way (MASTROIRILLO *et alii*, 2009). Where the acquired knowledge did not permit to ade-

**STUDIO IDROGEOLOGICO PER L'IDENTIFICAZIONE, LA CARATTERIZZAZIONE E LA GESTIONE  
DEGLI ACQUIFERI DEL PARCO NAZIONALE DEI MONTI SIBILLINI**

Hydrogeological Conceptual Model	Aquifer	Recharge area (Km <sup>2</sup> )		Average discharge (L/s)		Effective Infiltration (mm/year)		Effective rainfall ranges (mm/year)
		measured	estimated	measured	estimated	measured	estimated	
1	Scaglia	70,5		1275		570		400 - 900
2	Maiolica	4,7		175	90*		600	500 - 700
3	Scaglia	19,9		315		500		600 - 1000
4	Scaglia	7,7		170		700		> 1000
5	Maiolica	6,2		110		560		800 - 1000
6	Basale	7,4			140*		600	550 - 650
7	Scaglia	5,7		340	90*		500	450 - 600
8	Basale	106,8		3240		960		600 - >1000
9	Scaglia	3,7		350	100*		850	700 - 1000
10	Maiolica	7,4		160		680		900 - > 1000
11	Scaglia	46,8		640		430		400 - 800
12	Maiolica	5,7		90		500		600 - 900
13	Maiolica	6		100		530		750 - 950
14	Maiolica	10		320		1010		700 - > 1000
15	Basale	96,6		2390		780		450 - > 1000
16	Maiolica	12,5		245		620		500 - 700
17	Basale	46,4		490		330		300 - 500
18	Norcia Plain	41,1			260*		200	250 - 400
19	Scaglia		204,2 *	2590			400	250 - 500

Tab. 3 - Modelli Idrogeologici Concettuali. Per ciascun acquifero, del quale viene indicata la tipologia, è riportata l'estensione dell'area di alimentazione, la portata media erogata e l'Infiltrazione Efficace. Ad ogni acquifero è associato il range di valori delle Precipitazioni Efficaci che caratterizza le aree in affioramento

- *Conceptual Hydrogeological Models. For each aquifer, the type, the extent of the recharge area, the average discharge and the Effective Infiltration are reported. Each aquifer is associated with the range of Effective Rainfall values that is typical of the outcropping areas*

infiltrano nel sottosuolo (MASTROIRILLO *et alii*, 2009). Laddove il grado di conoscenza finora acquisito non ha permesso una corretta valutazione di questo parametro, ne è stato fornito un valore espresso come percentuale della precipitazione efficace (metodologia "indiretta").

Dall'analisi delle infiltrazioni efficaci calcolate con il metodo "diretto" appare evidente come non sia possibile associare alle diverse tipologie di acquiferi un valore preciso, ma questo risenta localmente sia dell'assetto geologico-strutturale, che condiziona lo stato di fratturazione e la circolazione negli acquiferi calcarei, sia degli afflussi meteorici. In alcuni acquiferi riconosciuti nell'area investigata (M.I.C. n° 1, 8, 14, 15, 16, 17) esiste una buona corrispondenza tra il campo di variabilità delle precipitazioni efficaci che caratterizzano le aree di ricarica e i valori di infiltrazione efficace calcolati; per altri sono necessarie opportune considerazioni.

In alcuni acquiferi (M.I.C. 2, 6, 7, 9, 18 e 19) le portate erogate dalle sorgenti risultano elevate rispetto alle presunte aree di ricarica individuate. Si può quindi ipotizzare un'estensione delle aree di ricarica in settori limitrofi, in alcuni casi ben oltre il territorio del Parco, o apporti idrici sotterranei provenienti da acquiferi contigui. Le ipotesi proposte nella ricostruzione dei Modelli di questi acquiferi dovranno quindi essere verificate nell'immediato futuro con ulteriori indagini che permettano un approfondimento dello studio sulle situazioni idrogeologiche locali.

In alcune situazioni i valori di infiltrazione efficace calcolati dalle portate misurate e dall'area di ricarica, sono risultati inferiori rispetto ai valori

quately assess this parameter, its value was expressed as a percentage of effective rainfall ("indirect" methodology).

The analysis of effective infiltration calculated with the "direct" method clearly demonstrates that the different types of aquifers cannot be associated with an accurate value, as this value is dependent on the geological-structural setting (which controls the fissuring and fracturing of and the groundwater flow in the calcareous aquifers) and on meteoric inflows. In some aquifers of the investigated area (CIMs 1, 8, 14, 15, 16, 17), the range of variability of effective rainfall in the recharge areas is in good agreement with the calculated values of effective infiltration. For other aquifers, appropriate considerations should be made.

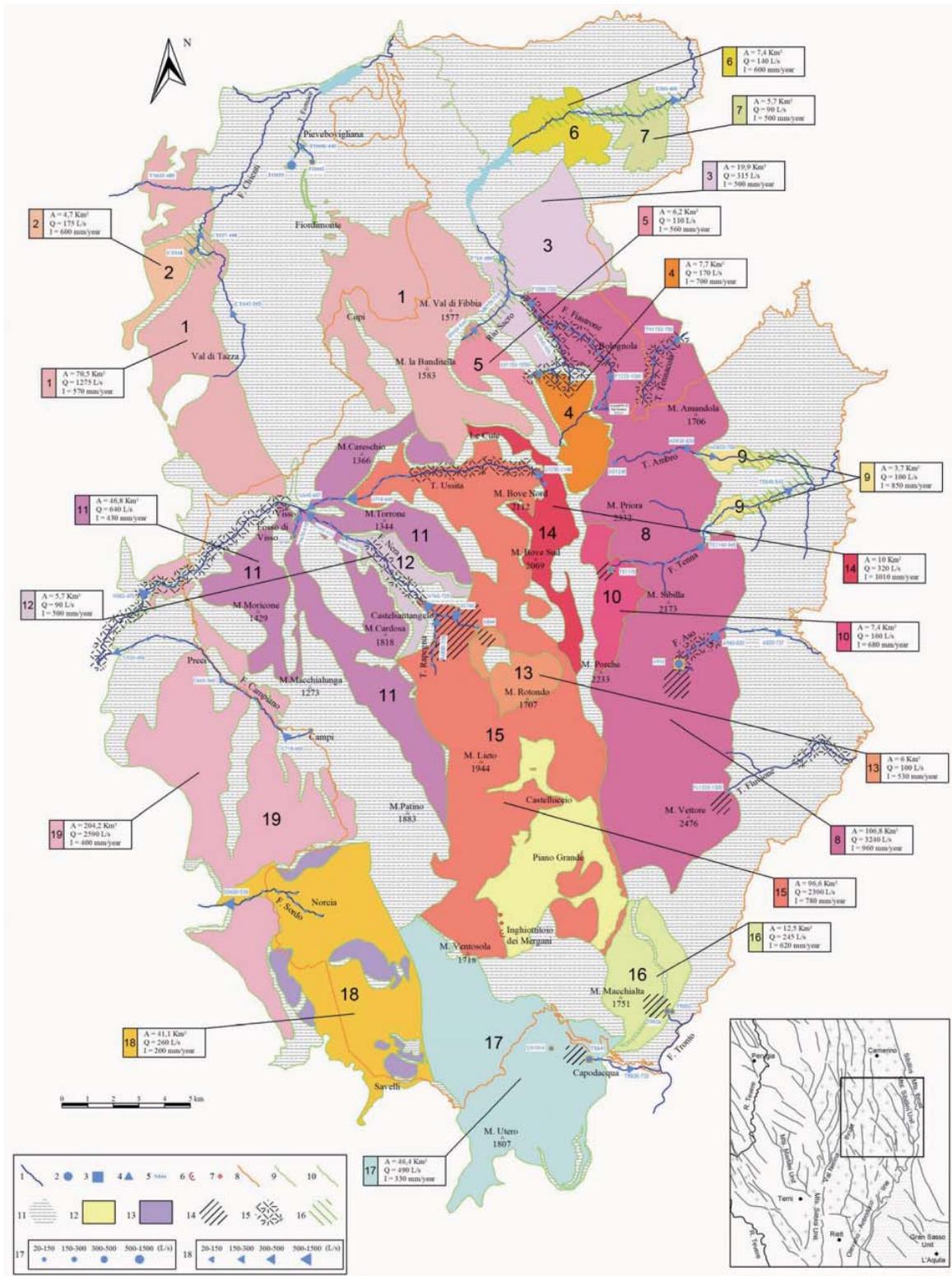
For some aquifers (CIMs 2, 6, 7, 9, 18 and 19), the discharge delivered by the springs proves to be high with respect to their presumable recharge areas. This suggests that the recharge areas may extend to neighbouring sectors and, in some cases, well beyond the area of the Park, or that they may receive groundwater inputs from adjoining aquifers. Therefore, the assumptions underlying the Models of these aquifers need to be validated in the near future by additional investigations, which may shed more light on the local hydrogeological conditions.

In some instances, the effective infiltration calculated from the measured discharge and from the recharge area proved to be lower

Tav. 1 - Carta dei Modelli Idrogeologici Concettuali. Per ciascun acquifero, indicato con un numero progressivo, è stata indicata l'area di alimentazione (A), la portata complessiva erogata (Q) e l'infiltrazione efficace (I). LEGENDA: 1) Reticolo idrografico perenne; 2) Sorgente puntuale perenne; 3) Sorgente puntuale perenne captata; 4) Sorgente lineare perenne; 5) Sigla di riferimento delle sorgenti puntuali e lineari (Tab. 2); 6) Inghiottitotio; 7) Dolina; 8) Limite del Parco Nazionale dei Monti Sibillini; 9) Limite dei Modelli Idrogeologici Concettuali; 10) Limite dell'area indagata; 11) Depositi a bassa permeabilità; 12) Piana di Castelluccio; 13) Complessi calcarei della Piana di Norcia; 14) Settore di acquifero interessato da prelievo intensivo; 15) Tratto di alveo fluviale interessato da prelievo intensivo; 16) Settore di acquifero indagabile per lo sfruttamento di acque sotterranee; 17) Classi di portata delle sorgenti puntuali; 18) Classi di portata delle sorgenti lineari

Plate 1 - Map of Conceptual Hydrogeological Models. For each aquifer, associated with an identification number, the following elements were identified: the recharge area (A), the overall discharge (Q) and the effective infiltration (I). LEGEND: 1) Perennial river network; 2) Localised perennial spring; 3) Localised exploited perennial spring; 4) Linear perennial spring; 5) Identification code of localised and linear springs (Tab. 2); 6) Swallow hole; 7) Doline; 8) Sibillini Mts. National Park limit; 9) Conceptual Hydrogeological Models limit; 10) area investigated limit; 11) Low permeability deposits; 12) Castelluccio Plain; 13) Calcareous complexes of the Norcia Plain; 14) Aquifer zone affected by intensive withdrawal; 15) River bed area affected by intensive withdrawal; 16) Potentially suitable zone for groundwater withdrawals; 17) Flow rate classes of localised springs; 18) Flow rate classes of linear springs

**HYDROGEOLOGICAL STUDY FOR IDENTIFICATION, CHARACTERISATION AND MANAGEMENT OF GROUNDWATER RESOURCES IN THE SIBILLINI MOUNTAINS NATIONAL PARK (CENTRAL ITALY)**



delle precipitazioni efficaci (M.I.C. 3, 4, 5, 10, 11, 12 e 13). Queste anomalie potrebbero essere attribuite ad una minore intensità dello stato di fratturazione degli affioramenti calcarei delle aree di ricarica, legata a particolari situazioni di stress tettonico, che, a parità di disponibilità idrica di origine meteorica, determinerebbe una minore capacità di infiltrazione delle acque.

## USO DELLE RISORSE E VALUTAZIONE DELLE DISPONIBILITÀ IDRICHE

Le sorgenti del Parco Nazionale dei Monti Sibillini rappresentano una risorsa strategica di particolare pregio sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo. Tenuto conto della sensibile diminuzione delle portate in alveo rispetto ai valori storici, per poter valutare la compatibilità delle numerose utilizzazioni esistenti e le richieste di nuove concessioni nell'area del Parco, si è reso necessario analizzare la reale disponibilità idrica, funzione del grado di utilizzazione antropica.

Per ciascun bacino idrografico, quindi, è stata valutata la potenzialità idrica, evidenziandone l'uso attuale e quantificando, laddove possibile, i reali prelievi attualmente operati. In questo modo è possibile definire la disponibilità idrica residua relativa ad alcuni settori dei bacini idrografici, in funzione delle captazioni idropotabili e delle derivazioni idroelettriche attualmente presenti nei corsi d'acqua (tab. 4).

L'analisi degli utilizzi delle risorse idriche ha evidenziato come il loro sfruttamento non sia distribuito in maniera omogenea nel territorio del Parco, ma esistano particolari situazioni di sovrasfruttamento, legate a concessioni pregresse, che non soddisfano le esigenze attuali.

Nei bacini dei fiumi Fiastrone e Nera, la presenza di captazioni per uso idropotabile ma soprattutto di opere di derivazione idroelettrica e/o di bacini di invaso, riduce notevolmente la residua disponibilità relativa al flusso di base dei due corsi d'acqua, rilasciando in alveo esigui quantitativi nei tratti subito a valle delle opere di derivazione.

Nell'invaso artificiale di Fiastra confluiscono le acque dell'alto corso del fiume Fiastrone, del Rio Sacro e del Fosso dell'Acquasanta, di cui solo il 20% viene rilasciato a valle della diga.

A valle dell'abitato di Visso, il fiume Nera è quasi completamente derivato da un impianto idroelettrico (Canale del Medio Nera) che rilascia in alveo circa il 10% delle risorse idriche disponibili erogate dagli acquiferi dei fiumi Nera e Ussita; questi corsi d'acqua sono già intensamente sfruttati nei loro settori montani per scopi idroelettrici, idropotabili e da stabilimenti di itticultura.

Basin	River	Water resources (L/s)	Availability (%)
Chienti		675 - 1620	97
Fiastrone	Fiastrone, Acquasanta and Rio Sacro	620 - 1135	21
	Fiastrone, after the dam	325 - 340	100
	Tennacola	65 - 190	0
Tenna	Ambro	240 - 475	0
	Tenna	450 - 810	82
	Aso	840 - 1415	22
Aso	Fluvione	40 - 50	0
	Tronto	730	18
Nera	Nera and Rapegna	1710 - 2280	30
	Fosso di Visso	150 - 250	100
	Ussita	610 - 1090	77
	Nera in Visso	2470 - 3620	12
Sordo		1210 - 1380	100
Campiano		485 - 760	100

than the effective rainfall (CIMS 3, 4, 5, 10, 11, 12 and 13). A possible explanation is that, owing to tectonic stresses, some calcareous outcrops in the recharge areas may be less fractured and, consequently, less capable of absorbing the same volume of meteoric water as the other outcrops.

## WATER RESOURCE USE AND WATER SUPPLY ASSESSMENT

The springs of the Sibillini Mts. National Park are a strategic resource of high value, both quantitatively and qualitatively. Local stream discharge has significantly declined with respect to its historical values. Therefore, the sustainability of present water uses and of new water lease applications was assessed by analyzing actual water supply vs. withdrawal.

The water potential of each catchment basin was assessed, taking into account present water uses and, where feasible, quantifying actual withdrawal. In this way, the residual water supply in some sectors of the catchment basins was determined with respect to withdrawal for drinking uses and hydro power generation.

The analysis of the uses of the water resources highlighted that they are not exploited in a homogeneous way in the Park and that, in some cases (previously granted water leases), they are overexploited.

In the Fiastrone and Nera River basins, drinking water intake structures and, above all, diversions and/or impoundments for hydro power generation are considerably reducing the residual baseflow of the two rivers. Indeed, the volumes of water released into the sections of the rivers located immediately downstream of the diversion structures are very low.

The artificial impoundment of Fiastra receives the water from the upper Fiastrone River and of the Rio Sacro and Fosso dell'Acquasanta streams. Only 20% of this water is released downstream of the dam.

Downstream of the town of Visso, the water of the Nera River is almost completely exploited by a hydro power plant (channel of the middle Nera River), which releases about 10% of the water resources available from the aquifers of the Nera and Ussita Rivers into the streambed. The mountainous sections of these rivers are already intensely exploited for hydro power generation, drinking uses and fish farming.

Tab. 4 - Analisi della potenzialità idrica dei corsi d'acqua che ricadono nel territorio del Parco. Per ciascun bacino sono indicati i prelievi operati per scopi idropotabili e/o idroelettrici  
- *Water potential of the Park's streams, with volumes of withdrawal for drinking uses and/or hydro power generation*

Le sorgenti dei fiumi Tenna e Tenna non sono più osservabili a causa delle opere di captazione costituite da articolate gallerie drenanti che derivano completamente le acque all'interno dei rilievi prima che possano venire a giorno. La continuità del reticolo idrografico del fiume Ambro è condizionata dalla presa idroelettrica presente in località Madonna dell'Ambro, che ne deriva la quasi totalità della sua portata.

Nel bacino del fiume Aso, alla captazione della principale sorgente per scopi idropotabili si aggiungono le derivazioni idroelettriche operate dall'ENEL lungo il corso del fiume, determinando una disponibilità idrica effettiva che è pari a circa il 20% delle risorse erogate dall'acquifero.

Le principali sorgenti dell'alto corso del fiume Tronto sono captate per uso potabile; la disponibilità idrica effettiva, rappresentata dai rilasci operati dagli impianti di captazione e dagli esigui apporti che ci sono a valle delle sorgenti, è quindi legata sia alla disponibilità della risorsa ma soprattutto alle richieste dell'ente gestore delle opere di captazione.

Nei bacini dei fiumi Sordo e Campiano le risorse idriche disponibili corrispondono a quelle erogate dagli acquiferi, in quanto non sono presenti opere di derivazione superficiali o sotterranee che condizionano le portate dei due corsi d'acqua. I modesti prelievi sotterranei operati nel bacino del fiume Chienti rappresentano una percentuale bassa rispetto alla reale risorsa erogata dall'acquifero, determinando quindi un impatto limitato in caso di eventuali futuri prelievi.

### SUGGERIMENTI PER LA PROTEZIONE E LA GESTIONE DELLA RISORSA IDRICA

Sulla base dell'analisi dei risultati ottenuti con lo studio e secondo il criterio per il quale prelievi di acque sotterranee distribuiti in diverse aree del territorio esercitano sulle condizioni ambientali effetti limitati rispetto ad un equivalente prelievo operato in un solo punto, sono state individuate aree potenzialmente idonee al prelievo di acque sotterranee (Tavola 1). Queste aree rappresentano zone in cui l'eventuale captazione della risorsa idrica rappresenta non un ulteriore sfruttamento, ma una valida alternativa a situazioni critiche attualmente presenti nell'area di studio, che richiedono piani alternativi.

E' da sottolineare, inoltre, che l'eventuale sfruttamento della risorsa erogata dagli acquiferi deve essere considerato solo dopo aver definito quello che è il Deflusso Minimo Vitale (D.M. 28 Luglio 2004) su ogni corso d'acqua, impostando così una corretta gestione delle acque.

In riferimento al D.Lgs 30/2009 sull'attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento, la realizzazione dei Modelli Idrogeologici Concettuali rappresenta un inequivocabile punto di partenza per la identificazione e la caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei che ricadono nell'area di studio. Infatti, tali modelli, attraverso l'analisi pregressa delle caratteristiche naturali del corpo idrico (tipo di acquifero, entità della ricarica) e degli effetti potenziali della pressione antropica (prelievi) consentono di identificare i requisiti specifici per la creazione di reti di monitoraggio, per la densità dei siti e per la frequenza del monitoraggio.

Per una attenta valutazione delle risorse idriche disponibili è necessario sottoporre a monitoraggio continuo i corsi d'acqua, le sor-

The springs of the Tenna and Tenna Rivers are no longer visible owing to the presence of intake structures, consisting of complex draining tunnels. These tunnels completely withdraw the groundwater contained in the reliefs before it reaches the surface. The continuity of the catchment area of the Ambro river is disturbed by a diversion for hydro power generation at Madonna dell'Ambro. This structure captures the near totality of its discharge.

In the Aso River basin, the main spring is exploited by drinking water intake structures, which add to Enel's hydro power diversions. The resulting actual water availability accounts for about 20% of the resources supplied by the aquifer.

The water from the main springs of the upper Tronto River is exploited for drinking uses. Therefore, actual water supply (releases by intake structures and small inflows downstream of springs) depends on availability of the resource, but above on the requirements of the entity in charge of managing the intake structures.

In the Sordo and Campiano River basins, available water resources correspond to those delivered by the aquifers, as no shallow or deep intake structures reduce the discharge of the two rivers. The percentage of water abstracted from the Chienti River basin is low with respect to the resource supplied by the aquifer; consequently, future withdrawal will have a low impact.

### SUGGESTIONS FOR SAFEGUARDING AND MANAGING LOCAL WATER RESOURCES

The zones potentially suitable for groundwater abstraction (Plate 1) were identified by analysing the results obtained from the project, assuming that groundwater abstraction in the different zones of the investigated area has a lower impact on the environment than equivalent groundwater abstraction in a single point. In these potentially exploitable zones, the possible utilisation of the resource would not represent an additional exploitation, but a viable alternative to the critical conditions which exist in the investigated area and which require alternative plans.

Moreover, it is worth stressing that the possible exploitation of the resource supplied by the aquifers should be taken into consideration only after defining the Minimum In-Stream Flow (Ministerial Decree of 28 July 2004) in each stream, i.e. after formulating sustainable water management policies.

With regard to Legislative Decree 30/2009 (implementing Directive 2006/118/EC on the protection of groundwater against pollution and deterioration), Conceptual Hydrogeological Models undeniably represent a starting point for identifying and characterising groundwater bodies in the investigated area. By analysing past and present data about the natural characteristics of a water body (type of aquifer, extent of rainfall) and the potential effects of anthropogenic pressure (water abstraction), these models help identify specific requirements for monitoring networks, density of monitoring sites and monitoring frequency.

Careful assessment of available water resources requires continu-

genti (puntuali e lineari) e i livelli piezometrici delle falde, con particolare riferimento alle condizioni di magra.

Nell'area oggetto di studio le stazioni idrometriche sono ancora poco numerose e in molti casi hanno funzionato solo per brevi periodi, antecedenti agli anni '50. È auspicabile quindi che venga potenziata la rete di monitoraggio idrometrica dei corsi d'acqua del Parco, che costituirebbe un valido strumento anche per la valutazione e quantificazione dell'entità delle portate derivate e di quelle residue negli alvei fluviali, già intensamente sfruttati per la produzione di energia elettrica.

L'individuazione delle aree da monitorare, riportate nella Tavola 1 con una specifica simbologia, ha tenuto conto dei seguenti fattori: bacini idrogeologici identificati, reticolo idrografico perenne e apporti diretti in alveo, presenza di captazioni ad uso potabile o di derivazioni idroelettriche, presenza di stazioni idrometriche, distribuzione delle aree soggette a criticità e delle aree potenzialmente ancora sfruttabili. L'ubicazione di dettaglio di queste stazioni di monitoraggio necessita, comunque, di una più approfondita analisi da effettuarsi solo dopo avere definito l'attuale operatività delle stazioni idrometriche e piezometriche presenti sul territorio.

Sono stati identificati cinque settori potenzialmente sfruttabili (Tav. 1) in grado di fornire quantitativi idrici ad uso potabile, per i quali sono auspicabili indagini integrative e adeguato monitoraggio, in modo da poter valutare le effettive portate derivabili, non precisabili allo stato attuale delle conoscenze. Sarà così possibile, in fase di programmazione procedere ad una redistribuzione dei prelievi idrici a favore delle aree sovrasfruttate.

## CONCLUSIONI

Le attività svolte nell'ambito di questo studio, basate sull'analisi di dati direttamente raccolti sul terreno in molti anni di rilievi condotti nel territorio in esame, hanno consentito di ottenere informazioni quantitative sulla disponibilità idrica sotterranea rinnovabile del territorio del Parco Nazionale dei Monti Sibillini, corrispondente alle portate erogate dalle sorgenti, prevalentemente lineari, che alimentano direttamente i corsi d'acqua perenni presenti.

- I principali risultati dello studio possono essere riassunti come segue:
- l'analisi dei dati meteorologici ha evidenziato una precipitazione media sull'area in studio compresa tra 900 e 1600 mm/anno ed una precipitazione efficace, ugualmente variabile in funzione dell'orografia, compresa tra 300 e 1000 mm/anno;
  - tenuto conto dell'elevata permeabilità delle aree di ricarica e l'entità dei deflussi efficaci, l'Infiltrazione Efficace utile all'alimentazione degli acquiferi è stata valutata tra 200 e circa 1000 mm/anno, distribuita in modo variabile in funzione non solo del diverso grado di permeabilità delle rocce affioranti, ma anche e soprattutto della distribuzione areale e orografica delle precipitazioni efficaci;
  - l'idrologia superficiale in queste aree montane è direttamente influenzata dalla circolazione idrica sotterranea ed in particolar modo dalle sorgenti lineari in alveo, abbondanti per numero e portata, che drenano gli acquiferi presenti; in tale situazione, l'esame diretto e ripetuto nel tempo dei deflussi fluviali naturali consente la valutazione del flusso di base, corrispondente alle risorse idriche sotterranee rinnovabili;

ous monitoring of streams, localised and linear springs and piezometric levels of groundwater, especially under minimum-flow conditions

In the investigated area, hydrometric stations are still very few and many of them operated only for short periods of time before the 1950s. It follows that the hydrometric monitoring network for the Park's streams should be strengthened, also in view of quantifying the intercepted flows and the residual flows in the streambeds, which are already intensely exploited for hydro power generation.

In the identification of the areas to be monitored (reported in Table 1 with specific symbols), the following factors were taken into account: identified hydrogeological basins; perennial catchment area; direct inflows into streambeds; drinking water intakes structures or hydro power diversions; hydrometric stations, distribution of critical areas and still potentially exploitable zones. However, the siting of these monitoring stations requires a more thorough analysis, to be carried out only after determining the hydrometric and piezometric stations which are still in operation in the investigated area.

Five sectors with water potentially exploitable for drinking uses were identified (Plate 1). However, as their actually exploitable discharge cannot be determined at the present state of knowledge, further investigations and appropriate monitoring surveys are needed. These investigations will help plan the reallocation of water withdrawal so as to relieve the pressure on overexploited areas.

## CONCLUSIONS

The analysis of data directly collected in the field over many years of surveys in the Sibillini Mts. National Park yielded quantitative information about its available renewable groundwater resources. These resources are represented by the discharge delivered by the springs (mostly linear), which directly supply the Park's perennial streams.

The main findings from the study may be outlined as follows:

- the analysis of weather and climate data showed an average rainfall in the investigated area of 900-1600 mm/yr and an effective rainfall (equally variable, depending on its orography) of 300-1000 mm/yr;
- taking into account the high permeability of the recharge areas and the extent of effective discharge, the Effective Infiltration needed to supply the aquifers was computed to be 400-1000 mm/yr; this infiltration is variably distributed, depending not only on the different permeability of the outcropping rocks, but also and above all on the spatial and orographic distribution of effective rainfall;
- the surface hydrology of these mountainous areas is directly affected by groundwater flows and, namely, by the linear springs lying in the streambeds; these numerous and high-discharge springs drain the local aquifers; in this situation, direct and repeated measurements of natural stream discharge permits to assess the baseflow, corresponding to renewable groundwater resources;

- le elaborazioni condotte sui dati idrologici storici confermano un'elevata potenzialità idrica sotterranea accompagnata da una notevole stabilità del regime di flusso, relegando il fenomeno del ruscellamento ad un ruolo marginale;
  - l'assetto geologico-strutturale influenza notevolmente la circolazione idrica sotterranea; dal punto di vista stratigrafico, sono stati riconosciuti tre Complessi Idrogeologici corrispondenti ad acquiferi (Complesso Calcarea Basale, Complesso della Maiolica, Complesso della Scaglia Calcarea), due complessi idrogeologici a bassa permeabilità che separano generalmente i precedenti acquiferi (Complesso Calcarea-Silico-Marnoso e Complesso delle Marne a Fucoidi) e complessi di copertura recente a permeabilità medio-bassa (Depositi Lacustri e Depositi di Copertura);
  - da un punto di vista strutturale, la tettonica dell'area ha dislocato i diversi complessi, determinando limiti di permeabilità dei singoli acquiferi, condizionandone quindi l'estensione e la localizzazione delle aree di recapito; allo stesso tempo, il grado di tettonizzazione, soprattutto nel settore centro-orientale, influenza direttamente anche la capacità di infiltrazione, riducendola notevolmente in corrispondenza di lineamenti tettonici compressivi e di una conseguente fascia di intensa deformazione;
  - i dati idrogeologici direttamente raccolti nei decenni precedenti e quelli appositamente rilevati nel corso dello studio, unitamente a controlli di natura geologico-strutturale, hanno consentito di censire e determinare la portata di magra ordinaria ed estrema di tutte le emergenze localizzate e lineari di portata superiore a 20 L/s e dei relativi corsi d'acqua da esse alimentate; al contempo, le misure dirette rappresentano un elemento di controllo immediato sul grado di utilizzazione della risorsa, sia captata alle sorgenti che derivata in alveo;
  - la portata complessiva erogata dalle sorgenti ubicate nel territorio del Parco Nazionale dei Monti Sibillini è di circa 13000 L/s, di cui quasi il 50% sono alimentate da acquiferi del Complesso Basale, il 40% da quelli della Scaglia Calcarea e meno del 10% da quelli del Complesso della Maiolica;
  - l'esame comparato dei dati e dell'assetto geologico-strutturale ha portato al riconoscimento dei singoli acquiferi alimentanti le diverse sorgenti, attraverso la stesura di 19 modelli idrogeologici concettuali per le principali strutture idrogeologiche riconosciute nell'area in esame, ognuno caratterizzato da limiti idraulici definiti, con definizione dell'area di alimentazione e della portata media erogata dalle sorgenti, fino a determinare l'entità dell'Infiltrazione Efficace relativa alla singola struttura idrogeologica.
- I risultati ottenuti rappresentano da un lato la sintesi dei dati idrogeologici disponibili sul territorio, compresi quelli storici, funzione del complesso assetto idrogeologico-strutturale, ma al tempo stesso possono essere considerati una valida base conoscitiva di sufficiente dettaglio per future attività di pianificazione dell'uso della risorsa idrica nel territorio del Parco.
- Per ogni singolo bacino, è stata evidenziata la residua disponibilità idrica effettiva, relativa al flusso di base, con riferimento alla media su
- the processing of historical hydrological data confirmed that the local groundwater potential is high, that discharge is very stable and that runoff plays a minor role;
  - the geological-structural setting significantly influences groundwater flowpaths; stratigraphically, the following complexes were identified: 3 Hydrogeological Complexes corresponding to aquifers (Basal Calcareous Complex, Maiolica Complex, Calcareous Scaglia Complex); 2 low-permeability hydrogeological complexes, which generally separate the above-mentioned aquifers (Calcareous-Siliceous-Marly Complex and Fucoiid-Bearing Marl Complex); and recent cover complexes with average-low permeability (Lacustrine Deposits and Cover Deposits);
  - from a structural standpoint, tectonic movements in the investigated area have dislocated the various complexes, determining the permeability boundaries of the individual aquifers and thus controlling the extent and location of their discharge areas; at the same time, the level of tectonisation, especially in the central-eastern sector, directly affects also the capability of infiltration, significantly reducing it near compressional tectonic features and a consequent intensely-deformed belt;
  - all the localised and linear springs with a discharge of more than 20 L/s and the streams supplied by them were surveyed and their discharge was determined under both normal and extreme minimum-flow conditions; reliance was made on hydrogeological data directly collected in previous decades, on data recorded during the project, as well as on geological-structural studies; at the same time, direct measurements represented a way to immediately check the level of exploitation of groundwater resources from both the springs and the streams;
  - the overall discharge delivered by the springs lying in the Sibillini Mts. National Park is equal to about 13,000 L/s, of which nearly 50% are supplied by the aquifers of the Basal Complex, 40% by those of the Calcareous Scaglia Complex and less than 10% by those of the Maiolica Complex;
  - the comparative examination of the data and of the geological-structural setting made it possible to identify the individual aquifers which feed the springs and to build 19 Conceptual Hydrogeological Models for the main hydrogeological structures recognised in the investigated area; each hydrogeological structure was characterised in terms of hydraulic barriers, recharge area and average discharge from the springs and, finally, Effective Infiltration.
- The results from the project give a concise picture of the historical and current hydrogeology of the investigated area, which reflects a complex hydrogeological-structural setting; at the same time, these results may be regarded as a sufficiently detailed knowledge base for future water resource use planning and management in the Park. For each basin, the actual residual baseflow was quantified on the basis of its average discharge in the long term and discharge under extreme

lungo periodo ma anche ai valori estremi di magra, in modo da fornire elementi quantitativi per nuove concessioni idriche e il controllo di quelle già in essere, nonché poter guidare lo sviluppo delle attività del Parco relativamente alla componente idrica, che ne rappresenta un elemento di particolare pregio da preservare, pur in considerazione delle esigenze antropiche.

Inoltre, considerata l'elevata qualità intrinseca della risorsa e l'ottimo grado di protezione garantito dalla stessa presenza del Parco Nazionale, sono state appositamente evidenziate possibili aree idonee a prelievi di acque sotterranee con limitato impatto ambientale, dove ovviamente la disponibilità idrica sotterranea è relativamente abbondante. L'eventuale futuro utilizzo di acque sotterranee nelle aree proposte è da ritenersi comunque subordinato alla minimizzazione degli impatti sulle condizioni ambientali e alla definizione del Deflusso Minimo Vitale, che non è stato direttamente valutato nel corso dello studio.

Infine, considerato che il presente studio costituisce una sintesi dell'assetto idrogeologico e una valutazione della reale risorsa disponibile sulla dorsale dei Monti Sibillini, si considera opportuno proseguire con il monitoraggio della risorsa, soprattutto attraverso la realizzazione di una rete di monitoraggio prevalentemente idrometrica, che possa fornire informazioni aggiuntive e soprattutto continue nel tempo.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il Parco Nazionale dei Monti Sibillini e l'Autorità di Bacino del Fiume Tevere per il supporto tecnico-scientifico e per il finanziamento dello studio.

## OPERE CITATE/REFERENCES

- ACCORDI B. (1984) - *Lezioni di geologia stratigrafica*. Ed. CISU. Roma.
- BONI C. (2009) - *Le imponenti risorse idriche sotterranee rinnovabili dell'Appennino Centrale: quante sono, dove sono, come sono utilizzate*. Atti dei Convegni Lincei, **248**: 235-243.
- BONI C. & BONO P. (1982a) - *Prima valutazione quantitativa dell'infiltrazione efficace sui sistemi carsici della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese e nei sistemi di facies pelagica umbro-marchigiano-sabina (Italia Centrale)*. Geol. Applicata e Idrogeologia, **17**, Bari.
- BONI C. & BONO P. (1982b) - *Lineamenti idrogeologici dell'Appennino umbro-marchigiano e laziale-abruzzese-campano*. Rel. Fin. Sottoprog. "Energia Geotermica", CNR Ref. 15, Roma.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia Centrale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, Roma.
- BONI C. & PETITTA M. (1994) - *Sorgenti lineari e valutazione dell'infiltrazione efficace in alcuni bacini dell'Italia centrale*. Quaderni di Geologia Applicata, **1**, Bologna.
- BONI C. & PETITTA M. (2007) - *Studio idrogeologico per l'identificazione e la caratterizzazione degli acquiferi che alimentano le sorgenti dei corsi d'acqua perenni dei Monti Sibillini, esteso all'intera area del Parco Nazionale*. Dipartimento Scienze della Terra Università La Sapienza di Roma, Autorità di Bacino del Fiume Tevere, Parco Nazionale Monti Sibillini. Relazione inedita.
- BONI C., PETITTA M., PREZIOSI E. & SERENI M. (1993) - *Genesi e regime di portata delle acque continentali del Lazio*. Collana di bibliografie scientifiche, **78** - CNR. Roma.
- BONI C., TARRAGONI C., MARTARELLI L. & PIERDOMINICI S. (2009) - *Studio idrogeologico nel settore Nord-occidentale dei Monti Sibillini: un contributo alla cartografia idrogeologica ufficiale*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **1**: 25-40.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1986) - *Evoluzione strutturale Neogenico-Quaternaria dell'Appennino Umbro-Marchigiano*. Studi Geologici Camerti. Vol. Spec. "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., ROMANO A., ROSCIONI M., SCISCIANI V. & SECCHIONI G. (1995) - *La tettonica quaternaria nella dorsale appenninica Umbro-Marchigiana: una deformazione progressiva non assiale*. Studi Geol. Camerti, Vol. Spec. 1995(1): 203-223.
- CENTAMORE E. & MICARELLI A. (1991) - *Stratigrafia. Da "L'ambiente fisico delle Marche"*, Regione Marche, Assessorato urbanistica. Ed. S.E.L.C.A.
- CENTAMORE E., PANBIANCHI 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 urbanistica. Ed. S.E.L.C.A.

minimum-flow conditions, so as to provide quantitative data for: i) granting new water leases; ii) controlling existing ones, and iii) guiding the development of activities concerning the Park's high-value water resources, which should be conserved, while taking into account human requirements.

Moreover, considering the intrinsically high quality of the investigated water resources and their excellent protection guaranteed by the presence of the National Park, the project identified zones suitable for groundwater abstraction with low environmental impact, i.e. zones with relatively abundant groundwater supply. Nevertheless, any future utilisation of groundwater in the proposed zones requires the mitigation of the environmental impact and the definition of the Minimum In-Stream Flow, which was not directly assessed during the project.

Finally, as the results of the project provide a concise picture of the hydrogeological setting and actually available resources in the Sibillini Mts. Ridge, the need arises for continuing the monitoring activity and, above all, for putting in place a monitoring network, mostly with hydrometric stations, with a view to obtaining additional and, in particular, continuous data over time.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Sibillini Mountains National Park and the Tiber River Basin Authority, for their technical support and for financing this study.

**HYDROGEOLOGICAL STUDY FOR IDENTIFICATION, CHARACTERISATION AND MANAGEMENT OF GROUNDWATER RESOURCES IN THE SIBILLINI MOUNTAINS NATIONAL PARK (CENTRAL ITALY)**

- CHIOCCINI M., DEIANA G., MICARELLI A., MORETTI A., & PIERUCCINI U. (1976) - *Carta Geologica dei Monti Sibillini Nord-Orientali*. Studi Geologici Camerti, II.
- 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.
- DEIANA G. & MARCHEGIANI L. (2002a) - *Carta geologica del Parco Nazionale dei Monti Sibillini*. Quaderni scientifico-divulgativi del Parco Nazionale dei Monti Sibillini. Quaderno n° 7. Anibaldi, Ancona.
- DEIANA G. & MARCHEGIANI L. (2002b) - *Note di Geologia del Parco Nazionale dei Monti Sibillini*. Quaderni scientifico-divulgativi del Parco Nazionale dei Monti Sibillini. Quaderno n° 7. Anibaldi, Ancona.
- DRAGONI W., SPERANZA G. & VALIGI D. (2003) - *Impatto delle variazioni climatiche sui sistemi idrogeologici: il caso della sorgente Pescara d'Arquata (Appennino Umbro-Marchigiano, Italia)*. Geologia Tecnica ed Ambientale, **3**: 13-27.
- LAVECCHIA G. (1985) - *Il sovrascorrimento dei Monti Sibillini: analisi cinematica e strutturale*. Boll. Soc. Geol. It., **104**: 161-194.
- MASTRORILLO L., BALDONI T., BANZATO F., BOSCHERINI A., CASCONI D., CHECCUCCI R., PETITTA M. & BONI C., (2009) - *Analisi idrogeologica quantitative del dominio carbonatico Umbro*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **1**: 137-155.
- MINISTERO LL.PP. (1921-1997) - *Annali idrologici, parte prima e seconda*. Pubbl. Serv. Idrografico, Compartimenti di Roma e Bologna. Poligrafico di Stato, Roma.
- NANNI T. & VIVALDA P., (2005) - *The aquifers of the Umbria-Marche Adriatic region: relationships between structural setting and groundwater chemistry*. Boll. Soc. Geol. It., **124**: 523-542.
- NANNI T., VIVALDA P., MARCELLINI M. & PALPACELLI S. (2006) - *Spring monitoring and analysis of groundwater circulation in the Sibillini mountains aquifers (Adriatic side of central Apennine, Italy)*. 8th Conference on Limestone Hydrogeology, 21-23 September 2006, Neuchâtel.
- PARCO NAZIONALE DEI MONTI SIBILLINI (2001) - *Piano delle acque del Parco Nazionale dei Monti Sibillini*.
- 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 Com. Memorie illustrative della Carta Idrografica d'Italia, **35**, Roma.
- REGIONE MARCHE (1991) - *Ambiente fisico delle Marche. Geologia - Geomorfologia - Idrogeologia*. Ed. S.E.L.C.A.
- REGIONE UMBRIA (2002) - *Rilevamento Geologico e Geotematico delle aree terremotate. Carte Geologiche e di Pericolosità sismica locale. Scala 1:10.000*. Regione dell'Umbria, Direzione Politiche Territoriali Ambiente e Infrastrutture, Servizio Geologico.
- 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 June 2009 - Accepted January 2010*