

ANALISI IDROGEOLOGICA QUANTITATIVA DEL DOMINIO CARBONATICO UMBRO

QUANTITATIVE HYDROGEOLOGICAL ANALYSIS OF THE CARBONATE DOMAIN OF THE UMBRIA REGION

LUCIA MASTRORILLO^(*), TIZIANA BALDONI^(*), FRANCESCA BANZATO^(*), ARNALDO BOSCHERINI^(**),
DOREDANA CASCONI^(*), ROBERTO CHECCUCCI^(**), MARCO PETITTA^(*) & CARLO BONI^(*)

^(*) "Sapienza" Università di Roma - Dipartimento di Scienze della Terra

^(**) Regione Umbria - Direzione Regionale Ambiente, Territorio e Infrastrutture Servizi Tecnici Regionali

RIASSUNTO

In questo lavoro viene presentata una sintesi dei risultati di circa 25 anni di studi e ricerche idrogeologiche che il Laboratorio di Idrogeologia Quantitativa del Dipartimento di Scienze della Terra dell'università di Roma "La Sapienza" ha svolto sotto la guida di CARLO BONI nel territorio umbro-marchigiano. Il metodo di ricerca utilizzato è quello dell'idrogeologia quantitativa in cui l'assetto geologico e idrogeologico del territorio viene messo a confronto con le portate erogate delle sorgenti per identificare le strutture idrogeologiche, definirne la natura dei limiti e quantificarne il bilancio idrogeologico.

I risultati innovativi forniti al quadro conoscitivo di base dell'idrogeologia del dominio carbonatico umbro possono essere così sintetizzati: 1) ricostruzione di un modello concettuale di circolazione idrica sotterranea suddiviso sia per idrostrutture che in funzione dei diversi acquiferi; 2) calcolo di un bilancio idrogeologico aggiornato di ciascuna idrostruttura integrato in uno schema globale a scala regionale, dove gli eventuali apporti sotterranei esterni a ciascuna struttura sono quantitativamente giustificati da altrettante perdite sotterranee in strutture limitrofe; 3) valutazione della distribuzione dell'infiltrazione efficace, che è risultata variabile all'interno dei singoli complessi idrogeologici, evidenziando la necessità di definirla per ciascuna idrostruttura.

TERMINI CHIAVE: *Idrogeologia quantitativa, bilancio idrogeologico, infiltrazione efficace*

INTRODUZIONE

La realizzazione della cartografia idrogeologica prevista da un contratto di ricerca stipulato nel 2007-2008 fra il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università "La Sapienza" di Roma e la Regione Umbria ha costituito l'occasione per una revisione critica delle attuali conoscenze idrogeologiche regionali. L'omogeneizzazione dell'intero quadro conoscitivo ha portato alla realizzazione di un modello idrogeologico concettuale in grado di coniugare l'approccio a scala regionale con quello di maggiore dettaglio relativo a singole strutture idrogeologiche (BONI & PETITTA, 2008).

Applicando i metodi di analisi idrogeologica quantitativa è stata aggiornata la valutazione delle risorse idriche sotterranee disponibili in

ABSTRACT

This paper condenses the results of around 25 years of hydrogeological researches performed by CARLO BONI and the Hydrogeology Laboratory of the Earth Science Department of University of Rome "La Sapienza", on the Umbria-Marchean domain. Research methodology is based on quantitative hydrogeology, in which geologic and hydrogeological setting of the area has been compared with spring discharge, to identify hydrogeological systems representing their recharge area, by definition of the role of the boundaries and by quantification of the hydrological budget.

Main improvements respect to the basic hydrogeological framework of the fractured-carbonate domain of the Umbria Region can be summarized as follow: i) elaboration of a conceptual model of groundwater circulation recognising both hydrogeological units and different aquifers; ii) computation of an up-to-date hydrological budget for each hydrogeological unit, integrated in a general regional view, where possible external contributions are justified and verified by corresponding groundwater losses from surrounding units; 3) evaluation of range of effective infiltration (net recharge), which has been found different for each hydrogeological complex, requiring specific calculation for each hydrogeological unit.

KEYWORDS: *quantitative hydrogeology, hydrological budget, net recharge*

INTRODUCTION

In the 2007-2008 period, the "Dipartimento Scienze della Terra" (University of Rome "La Sapienza") entered into a contract on hydrogeological mapping with the Umbria Region. The research contract offered the opportunity to critically review and homogenise the body of hydrogeological knowledge available on the Umbria region. These efforts resulted into a conceptual hydrogeological model, which combined a regional-scale approach with a more detailed approach focused on the local hydrogeological systems (BONI & PETITTA, 2008).

Use was made of quantitative hydrogeology methods: i) to update the data on available groundwater resources under normal minimum-flow conditions; and ii) to verify groundwater flow in the

regime di magra ordinaria ed è stato ricostruito un probabile schema di circolazione idrica sotterranea del dominio carbonatico umbro, suddiviso non solo per idrostrutture ma anche in funzione dei diversi acquiferi. Il modello idrogeologico proposto trova una sua verifica nel calcolo integrato del bilancio idrogeologico, in cui il risultato del bilancio delle strutture adiacenti viene tenuto in considerazione per giustificare quantitativamente gli eventuali apporti sotterranei esterni a ciascuna struttura con altrettante perdite sotterranee verso strutture limitrofe.

Questa nota, oltre ad illustrare, molto sinteticamente, i risultati raggiunti, è finalizzata a descrivere l'approccio metodologico utilizzato, nella convinzione che solo un'accurata conoscenza geologico-strutturale del territorio ed un'adeguata disponibilità di dati idrogeologici aggiornati può consentire la ricostruzione di modelli di circolazione idrica, traducibili in strumenti realisticamente operativi per la gestione della risorsa idrica sia a scala regionale che di dettaglio.

L'area di indagine si estende su circa 3200 km² e comprende i rilievi carbonatici dell'Appennino umbro-marchigiano che ricadono prevalentemente all'interno della regione Umbria e proseguono parzialmente anche in territorio marchigiano e laziale.

CENNI DI GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA REGIONALE

La porzione umbra della catena carbonatica appenninica appartiene al vasto dominio geologico-strutturale dell'Appennino umbro-marchigiano (Fig. 1), compreso fra il dominio umbro interno ad ovest e l'avanfossa marchigiana dove affiorano prevalentemente le successioni emipelagiche e torbiditiche. I nuclei carbonatici della dorsale Narnese-Amerina, dei Monti Martani, di Monte Subasio, dei Monti di Gubbio e dei Massicci Perugini emergono dai depositi terrigeni del dominio umbro interno ad ovest della catena carbonatica vera e propria.

Le rocce carbonatiche più antiche in affioramento sono riferibili al Trias superiore ("*Marne a Rhaetavicula contorta*" e "Anidriti di Burano") e giacciono sotto il Calcere Massiccio del Lias inferiore, tipico deposito di piattaforma carbonatica. Sul substrato liassico, fortemente disarticolato dalla tettonica distensiva, si è depositata fino al Miocene la ben nota successione carbonatica pelagica umbro-marchigiana. Tale successione è caratterizzata da un'evidente disomogeneità dei sedimenti giurassici, legata ai differenti ambienti deposizionali di quel periodo (sedimentazione su alti e bassi strutturali). Le locali differenze dello spessore e dei caratteri litologici e paleontologici delle formazioni giurassiche, hanno portato alla distinzione di una successione umbro-marchigiana "completa" (quando sono presenti le formazioni tipiche di basso strutturale) e di una successione "ridotta" e "condensata" (quando le formazioni presentano spessori limitati e lacune di sedimentazione, tipici di ambienti deposizionali di alto strutturale). In particolare per "condensata" si intende la successione in cui i depositi giurassici sono rappresentati dalla Formazione del Bugarone che, su alcuni alti strutturali, sostituisce tutte le formazioni comprese fra Rosso Ammonitico e Maiolica.

L'assetto strutturale dell'Appennino Umbro-Marchigiano è quel-

hydrogeological units and single aquifers of the Umbrian carbonate domain. The proposed model was validated by an integrated water budget computation. The computation took into consideration the water budget of neighbouring hydrogeological units in order to balance groundwater inflows into each hydrogeological unit with groundwater outflows towards neighbouring units.

This paper describes the results achieved, as well as the methodological approach used in the study. The approach is based on the consideration that the applicability of groundwater models to regional and local water resource management policies depends on a deep understanding of local geological-structural features and on an adequate availability of up-to-date data.

The investigated area, which extends over a surface of about 3,200 km², includes the carbonate reliefs of the Umbria-Marches Apennines, mostly located in the Umbria region and extending in part to the Marches and Latium regions.

OUTLINE OF REGIONAL GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY

The Umbrian portion of the Apennine carbonate ridge belongs to the large geological-structural domain of the Umbria-Marches Apennines (Fig. 1). This domain extends from the inner Umbrian domain (to the W) to the Marches fore-deep, where hemipelagic and turbiditic outcrops are dominant.

The carbonate reliefs of the Narni-Amerina ridge, of the Martani Mts., of Mt. Subasio and of the Gubbio and Perugia massifs outcrop from the terrigenous deposits of the inner Umbrian domain, W of the carbonate ridge proper.

The most ancient rock outcrops belong to the upper Trias ("*Marne a Rhaetavicula contorta*" marlstones and "Anidriti di Burano" anhydrites). They underlie the "Calcere Massiccio" limestone unit of lower Lias age, a typical carbonate-platform deposit. The well-known Umbria-Marches pelagic carbonate sequence was emplaced over the Liassic bedrock (strongly dislocated by extensional tectonic movements) until the Miocene. In this sequence, Jurassic sediments are clearly dishomogeneous, as they reflect the different depositional environments which prevailed at that time (sedimentation on structural highs and lows). Local differences (in terms of thickness, lithology and palaeontology) between the Jurassic formations suggested to make a distinction between the "complete" Umbria-Marches sequence (with typical structural-low formations) and the "reduced" or "condensed" sequence (with formations of small thickness and sedimentation hiatuses, typical of structural-low depositional environments). In particular, the "condensed" sequence was defined as the one where the Jurassic deposits are represented by the "Bugarone" formation. On some structural highs, this formation replaces all the formations ranging from the "Rosso Ammonitico" to

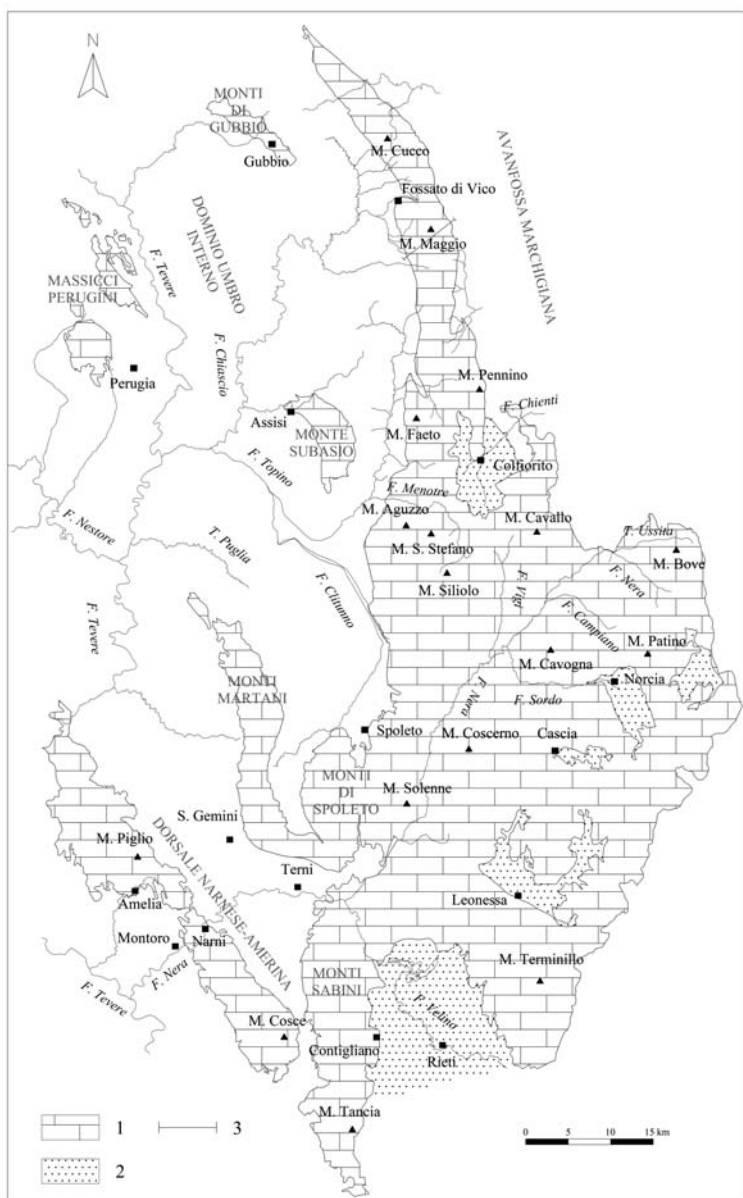


Fig. 1 - Area di studio. Legenda: 1) dorsali carbonatiche; 2) piane intramontane; 3) traccia della sezione riportata in Figura 3
 - Study area. Legend: 1) carbonate ridges; 2) intramontane basins; 3) location of the hydrogeological section of Fig. 3

lo tipico di una catena a pieghe e sovrascorrimenti a vergenza orientale. Le pieghe, fortemente asimmetriche, sono costituite da anticlinali (con cresta piatta e fianchi orientali da verticali a rovesciati) e da strette sinclinali. Il fianco orientale delle pieghe è generalmente interessato da sovrascorrimenti e faglie inverse, a cui frequentemente si associano zone di taglio trascorrenti N-S destre e E-W sinistre. Nel settore settentrionale (che si estende prevalentemente in territorio marchigiano) e centrale i piani di sovrascorrimento hanno direzione da NW-SE a NNW-SSE e sono puramente compressivi; nel settore meridionale hanno direzione NNW-SSE e prevale la componente transpressiva destra.

Allo stile tettonico compressivo si associano e si sovrappongono

the "Maiolica" ones.

The structural setting of the Umbria-Marches Apennines is typical of an E-dipping thrust-and-fold belt. Its strongly asymmetrical folds consist of anticlines (flat crest and vertical to overturned eastern limbs) and of narrow synclines. Locally, the eastern limb of the folds has thrust and reverse faults, frequently associated with dextral N-S and sinistral E-W strike-slip shear zones. In the northern sector (dominantly extending in the Marche region) and in the central one, the thrust planes are NW-SE- to NNW-SSE-trending and merely compressional; in the southern sector, they are NNW-SSE-trending with a prevailing transpressive dextral component.

The compressional tectonic style is compounded by the effects of

gli effetti della tettonica distensiva pliocenico-quadernaria, che ha ribassato ampi settori carbonatici originando, all'interno della dorsale, vaste depressioni intramontane, successivamente colmate dai depositi fluvio-lacustri (Piani di Colfiorito, Piani di Castelluccio, Piana di Norcia, Piana di Cascia).

Il dominio carbonatico umbro appartiene al grande "Gruppo idrogeologico dei Monti dell'arco umbro-marchigiano" individuato da BONI *et alii* (1986) che hanno misurato, per l'intera struttura, una portata complessiva in uscita di 58,6 m³/s, di cui circa l'80% emergente in corrispondenza di sorgenti lineari.

Il particolare assetto geologico-strutturale e geomorfologico del dominio umbro-marchigiano ha favorito l'impostazione di un reticolo di drenaggio attivo trasversale all'asse delle strutture e profondamente inciso, tanto da raggiungere la quota di saturazione degli acquiferi contenuti nelle dorsali. In queste condizioni, alcuni tratti di alveo costituiscono il punto di recapito della locale circolazione idrica sotterranea, assumendo le caratteristiche di una sorgente. Questo tipo di sorgente viene definita "lineare" per distinguerla dai tradizionali punti di emergenza delle acque sotterranee, definiti come sorgenti "puntuali".

Le ricerche di idrogeologia quantitativa regionale condotte successivamente alla pubblicazione dello Schema Idrogeologico dell'Italia Centrale (BONI *et alii*, 1986) hanno notevolmente approfondito il dettaglio delle conoscenze idrogeologiche dell'Appennino carbonatico umbro-marchigiano; i risultati ottenuti da circa un ventennio di studi sono ampiamente descritti nei numerosi lavori riportati in bibliografia (BONI *et alii*, 1991; BONI & MASTRORILLO, 1993; BONI *et alii*, 1994; BONI & PETITTA, 1994; BONI & PREZIOSI, 1994; BONI *et alii*, 2005; BONI *et alii*, stesso volume; BOSCHERINI *et alii*, 2005; CAPRARI & NANNI, 1999; DI MATTEO *et alii*, stesso volume; MASTRORILLO, 1994; MASTRORILLO, 1996; MASTRORILLO, 2001; PREZIOSI, 2007).

I rapporti stratigrafici e le caratteristiche strutturali del dominio umbro-marchigiano danno origine ad un assetto idrogeologico regionale caratterizzato dall'esistenza di acquiferi separati, variamente articolati e con possibili reciproche interconnessioni idrauliche locali. E' noto che la successione stratigrafica umbro-marchigiana è costituita da un'alternanza di formazioni prevalentemente calcaree, che costituiscono i complessi idrogeologici potenzialmente sede di acquiferi, e di formazioni marnoso-argillose con funzione di acquicludi e aquitardi.

A scala regionale è stata riconosciuta una circolazione idrica più profonda, all'interno dei complessi idrogeologici costituiti dalle formazioni del Calcarea Massiccio, della Corniola e della Maiolica ed una circolazione idrica generalmente meno profonda, all'interno del complesso della Scaglia calcarea (Scaglia bianca e Scaglia rossa) (BONI *et alii*, 2005). Nel territorio umbro risulta ben evidente la netta distinzione fra i nuclei calcarei delle anticlinali circondati dalla cintura impermeabile delle Marne a Fucoidi e contenenti acquiferi basali più o meno estesi, e la fascia periferica della Scaglia calcarea sede della circolazione idrica meno profonda idraulicamente limitata dalla formazione della Scaglia Cinerea (MASTRORILLO, 2001).

Plio-Quaternary extensional tectonic movements, which downthrew wide carbonate sectors, giving rise to extensive intermontane basins. These basins were subsequently filled with fluvio-lacustrine deposits (Colfiorito, Castelluccio, Norcia and Cascia plains).

The Umbrian carbonate domain makes part of the huge hydrogeological system of the Umbria-Marches mountains identified by BONI *et alii* (1986). The total outflow from this hydrogeological system was measured to be 58.6 m³/s, of which 80% from linear springs.

The distinctive geological-structural and geomorphological features of the Umbria-Marches domain have favoured the development of an active drainage area. This area, which extends transversally to the axis of the investigated hydrogeological systems, is deeply incised, to the extent that it reaches the saturated zone of the aquifers contained in the ridges. Under these conditions, some portions of streambeds act as points of discharge of local groundwater, taking on the characteristics of springs. These springs are defined as "linear" to distinguish them from the traditional points of emergence of groundwater, which are called "localised" springs.

Quantitative hydrogeology investigations at regional scale have been conducted after the publication of the hydrogeological model of central Italy (BONI *et alii*, 1986). These investigations have shed more light on the hydrogeology of the Umbria-Marches carbonate Apennines. The findings from over two decades of studies are extensively reported in the cited literature (BONI *et alii*, 1991; BONI & MASTRORILLO, 1993; BONI *et alii*, 1994; BONI & PETITTA, 1994; BONI & PREZIOSI, 1994; BONI *et alii*, this volume; DI MATTEO *et alii*, this volume; MASTRORILLO, 1994; MASTRORILLO, 1996; CAPRARI & NANNI, 1999; MASTRORILLO, 2001; BONI *et alii*, 2005; BOSCHERINI *et alii*, 2005; PREZIOSI, 2007).

The stratigraphic relations and structural features of the Umbria-Marches domain give rise to a regional hydrogeological setting with separate aquifers, having different characteristics and possible local hydraulic links. Dominantly calcareous formations make up the hydrogeological systems which potentially accommodate aquifers, while marly-clayey formations act as aquicludi and aquitardi.

A regional deep groundwater was identified inside the hydrogeological systems of the "Calcarea Massiccio", "Corniola" and "Maiolica" formations, while a generally shallow groundwater was found inside the "Scaglia Calcarea" ("Scaglia bianca" and "Scaglia rossa") formation (BONI *et alii*, 2005). In the Umbria domain, the calcareous cores of anticlines (surrounded by the impermeable belt of the "Marne a Fucoidi" marlstones and containing more or less significant basal aquifers) are well distinguished from the peripheral belt of the "Scaglia Calcarea", where the shallow groundwater (hydraulically bounded by the "Scaglia Cinerea" formation - MASTRORILLO, 2001) circulates.

I METODI D'INDAGINE DELL'IDROGEOLOGIA QUANTITATIVA

Il principio generale su cui si fonda il metodo dell'idrogeologia quantitativa stabilisce che la portata mediamente erogata da una struttura idrogeologica chiusa equivale alla portata che mediamente si infiltra nella sua area di alimentazione. Il confronto fra l'assetto geologico e idrogeologico del territorio e le portate erogate dalle sorgenti consente di identificare le strutture idrogeologiche, definirne la natura dei limiti idraulici e valutarne il bilancio idrogeologico.

Infiltrazione efficace

L'infiltrazione efficace rappresenta il quantitativo di acqua meteorica che, per unità di superficie, si infiltra ogni anno nel sottosuolo, fino a raggiungere gli acquiferi contenuti nelle strutture idrogeologiche. Questo parametro esprime quindi la capacità dei complessi idrogeologici in affioramento di assorbire le acque meteoriche sottraendole al ruscellamento, e varia in funzione della litologia, della morfologia e dell'entità delle precipitazioni.

I metodi classici di valutazione del parametro infiltrazione efficace utilizzano coefficienti empirici che, in funzione della litologia affiorante, forniscono una valutazione, espressa come percentuale della precipitazione o della precipitazione effettiva. I risultati ottenuti con questi metodi (definiti "indiretti") risentono dell'approssimazione legata ad una classificazione delle aree di ricarica basata esclusivamente su criteri litologici medi, desunti dalla letteratura, ma che non tengono conto delle reali condizioni degli affioramenti che costituiscono le aree di ricarica indagate.

L'efficacia di questi metodi, inoltre, dipende dal grado di attendibilità e rappresentatività dei dati termo-pluviometrici utilizzati. E' noto che nelle aree montuose le stazioni termo-pluviometriche e nivometriche ad alta quota sono rare, se non del tutto assenti; in realtà queste stazioni sarebbero le uniche idonee alla registrazione di dati rappresentativi dell'effettiva ricarica meteorica delle aree di alimentazione degli acquiferi carbonatici. I metodi di interpolazione quota-precipitazione e quota-temperatura, anche se estremamente sofisticati, non arrivano a fornire una valutazione sufficientemente attendibile della reale entità della ricarica meteorica e soprattutto della sua distribuzione stagionale.

BONI & BONO (1982) e BONI *et alii* (1986) hanno proposto un metodo di valutazione "diretto" del parametro infiltrazione efficace che, partendo dalla fine del processo idrogeologico, cioè dalla portata erogata dalle sorgenti, risale alla valutazione della quantità di acqua che si infiltra nel sottosuolo, dopo aver delimitato con la maggiore precisione possibile i limiti delle aree di alimentazione sulla base di un'accurata analisi geologico-strutturale del territorio. L'infiltrazione efficace viene operativamente calcolata, per ogni idrostruttura chiusa, dividendo il volume di acqua mediamente erogato dalle sorgenti dell'idrostruttura stessa per la relativa area di alimentazione.

Questo metodo comporta alcune difficoltà di applicazione nel caso di strutture idrogeologiche sede di circolazione idrica profonda ma prive di emergenze note, che risultano idraulicamente connesse

QUANTITATIVE HYDROGEOLOGY METHODS

Under the quantitative hydrogeology method, the mean discharge from a sealed hydrogeological system or unit is equivalent to the mean infiltration into its recharge area. Comparing the geological and hydrogeological setting of an investigated area with the discharge from its springs may help identify hydrogeological units, define the nature of their hydraulic boundaries and assess their water budget.

Net recharge

Net recharge, named also effective infiltration, is the amount of meteoric water per unit surface that infiltrates into the subsoil every year, until it reaches the aquifers contained in the hydrogeological systems. This parameter thus expresses the capability of the outcropping hydrogeological complexes to absorb meteoric water, which would otherwise run off. The value of this parameter depends on local lithology, morphology and precipitation.

Conventional methods to assess net recharge rely on empirical coefficients. With these coefficients, net recharge may be determined in terms of percentage of infiltration or of actual precipitation, depending on the outcropping lithotypes. The results from these "indirect" methods are biased by the fact that the classification of recharge areas is solely based on mean lithological parameters in terms of permeability. These parameters, which are inferred from the literature, do not consider the actual conditions of the outcrops making up the investigated recharge areas.

Additionally, the effectiveness of these methods depends on the reliability of the temperature-precipitation parameters that are used. As is known, temperature, rain and snow monitoring stations are rare or altogether missing in mountain areas. And yet, these stations would be crucial to collecting reliable data on the actual inflow of meteoric water into carbonate aquifer recharge areas. Elevation-precipitation and elevation-temperature interpolation methods, albeit extremely rigorous, do not afford a reliable assessment of actual meteoric recharge and especially of its seasonal distribution.

BONI & BONO (1982) and BONI *et alii* (1986) proposed a "direct" method to assess net recharge. Under this method, the boundaries of the recharge areas are demarcated as accurately as possible. Then, the amount of water infiltrating into the subsoil is determined on the basis of the discharge from springs (i.e. at the end of the water cycle). The demarcation process involves a thorough geological-structural analysis of the investigated area. In practice, net recharge is computed by dividing the volume of water discharged on average by the spring by its recharge area.

This method encounters some difficulties of application, if the investigated hydrogeological units have deep groundwater but no known springs and are hydraulically linked to nearby structures. In these situations, net recharge can be deduced indirectly by a percentage of rainfall estimation.

con strutture adiacenti. In questi casi può essere conveniente far riferimento a valori di infiltrazione efficace di letteratura, calcolati come aliquota della precipitazione.

Idrostrutture

L'analisi che conduce all'identificazione dell'idrostruttura (o struttura idrogeologica) richiede la formulazione di un modello idrogeologico concettuale della circolazione idrica sotterranea ad ampia scala, che sintetizzando i dati disponibili arriva alla formulazione di un'ipotesi attendibile e congruente.

La corretta ricostruzione di un modello idrogeologico concettuale della circolazione idrica sotterranea richiede necessariamente la conoscenza nel dettaglio di due aspetti fondamentali del territorio:

- l'assetto geologico strutturale e soprattutto la natura dei principali lineamenti tettonici regionali (faglie, fronti di sovrascorrimento, ecc.), nonché le caratteristiche litologiche delle formazioni affioranti (contenuto marnoso-argilloso, grado di fratturazione, ecc.);
- la distribuzione territoriale e la portata di magra di tutte le emergenze naturali del territorio studiato.

Il modello idrogeologico ricostruito trova eventuali conferme sulla base di dati idrochimici delle acque delle principali emergenze riconosciute, che costituiscono, quindi, un complemento particolarmente utile alla conoscenza idrogeologica, fino a divenire indispensabili per i casi più complessi.

L'accurata analisi e revisione in chiave idrogeologica delle informazioni geologiche porta alla definizione ed individuazione dei lineamenti geologico-strutturali che potrebbero costituire, per la loro natura, limiti e barriere idrauliche in grado di condizionare le direzioni del deflusso sotterraneo.

Il confronto fra la distribuzione territoriale delle sorgenti, la portata delle stesse e l'andamento, in superficie e in profondità, dei probabili limiti idraulici riconosciuti, consente l'individuazione delle idrostrutture, che, in definitiva, corrispondono all'area di alimentazione di un sistema di emergenze naturali, distribuite sul territorio.

Il calcolo dell'infiltrazione efficace, eseguito con il metodo "diretto", fornisce un elemento di conferma dell'ipotesi di ricostruzione o, viceversa, richiede un ulteriore processo interpretativo. I valori di infiltrazione efficace, infatti, devono essere compatibili con la realtà idrogeologica investigata: qualora risultino inverosimilmente alti o bassi è necessario verificare il ruolo idrogeologico attribuito ai limiti idraulici, ipotizzare probabili scambi idrici sotterranei fra idrostrutture adiacenti e arrivare progressivamente ad una nuova e più congruente formulazione del modello idrogeologico inizialmente proposto.

Bilancio idrogeologico

Il bilancio idrogeologico prevede il confronto quantitativo fra il volume d'acqua sotterranea in uscita e il volume d'acqua in entrata nel tempo in un'idrostruttura e può essere riferito a diverse scale di indagine e, quindi, a diversi livelli di approssimazione.

Il metodo "diretto" dell'idrogeologia quantitativa indica come

Hydrogeological units

Identifying a hydrogeological unit means building a large-scale conceptual model of its groundwater flow. The model should be capable of summarising available data so as to yield plausible and consistent assumptions.

Developing an adequate conceptual model of groundwater flow requires collecting detailed data on two fundamental aspects of the investigated area:

- geological-structural setting, especially the nature of its main regional tectonic features (faults, overthrusts, etc.), as well as the lithological characteristics of its exposed formations (marly-clayey content, jointing, fracturing, etc.);
- spatial distribution of and minimum flow from all of its springs.

The hydrogeological model so built may be validated by the hydrochemical data of the water flowing from the main springs that have been identified. The availability of these data, which are a useful complement of hydrogeological data, becomes imperative in the most complex cases.

Careful review and analysis of available geological data from a hydrogeological standpoint may help define geological-structural features which act as hydraulic barriers to groundwater flow.

Comparison of the spatial distribution of springs, their discharge and the geometry of hydraulic barriers at the surface and at depth may help identify hydrogeological units, which ultimately correspond to the recharge area of a system of natural springs distributed over a given area.

Net recharge, computed with the "direct" method, may help substantiate the assumed model or point to the need for additional interpretation steps. In effect, net recharge values should be consistent with the investigated hydrogeological reality. If they are excessively high or low, it is necessary to verify the role assigned to hydraulic barriers, to suppose cross-flows between nearby hydrogeological units and gradually develop a new model which is more coherent than the initial one.

Hydrological budget

The hydrological budget requires a quantitative comparison between groundwater outflows and inflows from/into a given hydrogeological system or unit over time. The hydrological budget may refer to different scales of investigation and thus of approximation.

Under the "direct" method of quantitative hydrogeology, the

"uscite" del bilancio le portate erogate dalle sorgenti e gli scambi idrici sotterranei verso l'esterno; costituiscono le "entrate" l'infiltrazione efficace e gli eventuali apporti sotterranei provenienti dall'esterno.

BONI *et alii* (1986) hanno calcolato per l'intero Gruppo idrogeologico dell'Arco dei Monti Umbro-Marchigiano un bilancio idrogeologico a scala regionale, fornendo una prima indicazione dell'ordine di grandezza dei parametri idrogeologici che caratterizzano il dominio studiato. Gli Autori hanno valutato una portata complessivamente in uscita dal Gruppo idrogeologico pari a 58,5 m³/s, corrispondente ad una ricarica media annua di 533 mm, riconducibile alla sola infiltrazione efficace. Considerata la scala interpretativa (1:500.000) è evidente che le voci relative ai possibili scambi idrici sotterranei fra il Gruppo idrogeologico considerato e i sistemi limitrofi non sono significativamente apprezzabili.

La scala di maggior dettaglio utilizzata nel presente lavoro consente di identificare e valutare gli scambi idrici fra idrostrutture contigue, applicando la metodologia di seguito descritta.

Nelle idrostrutture idraulicamente chiuse, l'incognita è rappresentata dal valore dell'infiltrazione efficace, che viene calcolato dividendo la portata complessivamente erogata annualmente da tutte le sorgenti di ciascuna idrostruttura per l'area dell'idrostruttura stessa.

Il valore dell'infiltrazione efficace delle idrostrutture idraulicamente aperte viene considerato analogo a quello valutato nelle adiacenti idrostrutture idraulicamente chiuse, dove siano state riconosciute caratteristiche geologiche simili e un'analoga distribuzione territoriale dei valori di precipitazione. In queste idrostrutture l'incognita del bilancio è rappresentata dall'entità degli scambi idrici, che vengono calcolati confrontando il valore di portata teorico, ottenuto come prodotto dell'infiltrazione efficace per l'area dell'idrostruttura, con il valore complessivo di portata realmente erogata dalle sorgenti dell'idrostruttura.

Per le idrostrutture in cui l'entità delle portate complessivamente erogate dalle sorgenti risulta superiore al valore di portata teorico calcolato, si ipotizza un apporto idrico sotterraneo da strutture limitrofe; per le idrostrutture in cui l'entità delle portate complessivamente erogate dalle sorgenti risulta inferiore al valore di portata teorico calcolato si ipotizza un flusso idrico sotterraneo verso idrostrutture limitrofe. L'entità degli scambi idrici ipotizzati è pari alla differenza rilevata fra la portata teorica e la portata effettivamente erogata dall'idrostruttura.

Applicazione del metodo al dominio carbonatico umbro

La metodologia descritta è stata utilizzata per ottenere il modello idrogeologico concettuale della circolazione idrica sotterranea del dominio carbonatico umbro, presentato in questa nota.

L'elaborazione e l'interpretazione dei dati quantitativi disponibili ha portato alla realizzazione preliminare di una carta idrogeologica alla scala 1:100.000 che ha costituito la sintesi delle informazioni idrogeologiche di base per la ricostruzione, ad una scala di minore dettaglio (1:250.000), del modello di circolazione idrica proposto, riprodotto ad una scala ridotta nella tavola 1.

I principali contenuti del prodotto preliminare di sintesi (carta

"outflows" of the budget include the discharge from springs and groundwater losses, whereas the "inflows" are the net recharge and groundwater inputs, if any.

For the overall Umbrian-Marchean hydrogeological system, BONI *et alii* (1986) computed a regional-scale hydrological budget, providing a preliminary assessment of the order of magnitude of the hydrogeological parameters of the system (overall mean flow rate 58.5 m³/s, corresponding to an infiltration of 533 mm/year). Given the scale of the assessment (1:500,000), any groundwater cross-flows between the investigated hydrogeological unit and the neighbouring units were not significantly appreciable.

At the detailed scale adopted in this paper, water exchanges between adjacent hydrogeological units can be identified and evaluated, applying the methodology explained below.

In the hydrogeological units hydraulically independent, the unknown term is represented by the net recharge, which can be evaluated by the ratio between total yearly spring discharge and the outcrop area of each single hydrogeological unit.

Net recharge in the "open" hydrogeological units, having exchanges with adjacent units, is assumed equal at the value calculated for adjacent independent hydrogeological units, where similar geological and rainfall characteristics have been recognized. In these cases, the unknown term is represented by hydraulic exchanges, which are evaluated by comparison between theoretical spring discharge (net recharge in the outcrop area) respect to the measured spring discharge, evidencing deficit or surplus.

For hydrogeological units where real spring discharge is higher than calculated value, an inflow from adjacent units can be inferred; in hydrogeological units having real spring discharge lower than calculated values, an outflow towards neighbouring units can be attributed. Values of the exchanges is equal to the difference between calculated and measured spring discharges of each hydrogeological unit.

Application of the method to the Umbrian carbonate domain

The above-described methodology was used to build an up-to-date conceptual model of groundwater flow in the Umbrian carbonate domain.

By processing and interpreting available quantitative data, a preliminary hydrogeological map (scale 1:100,000) was built. This map, which summarised the basic hydrogeological data, was the starting point for building a groundwater model to a smaller scale (1:250,000), as shown in Plate 1.

The key components of the summary map (scale 1:100,000) were the geological-structural and hydrogeological features of the investi-

idrogeologica alla scala 1:100.000) corrispondono a quegli aspetti geologico-strutturali e idrogeologici del territorio la cui dettagliata conoscenza è necessaria per la successiva corretta formulazione di un' ipotesi di modello di circolazione idrica (complessi idrogeologici, lineamenti strutturali regionali e principali sorgenti).

Complessi idrogeologici e lineamenti strutturali regionali

Le formazioni appartenenti alla successione pelagica umbro-marchigiana sono state classificate in sette complessi idrogeologici in base alla capacità di assorbire ed immagazzinare le acque meteoriche, attitudine quantitativamente espressa dai valori di infiltrazione efficace (Fig. 2). Per il tipico assetto stratigrafico della successione, i complessi con buona capacità di infiltrazione efficace sono generalmente delimitati al letto e al tetto da complessi relativamente impermeabili. La valutazione diretta dell'infiltrazione efficace ha portato alla definizione di range di valori variabili fra 150 e 400 mm/anno per il complesso della scaglia calcarea, fra 350 e 600 mm/anno per il complesso della maiolica e fra 300 e 800 mm/anno per il complesso corniola-calcare massiccio. Il complesso calcareo-marnoso, il complesso delle marne a fucoidi ed il complesso calcareo-silico-marnoso presentano valori trascurabili di infiltrazione efficace.

gated area, which had to be further investigated in order to subsequently build a correct groundwater model (hydrogeological complexes, regional structural lineaments and main springs).

Hydrogeological complexes

The formations of the Umbria-Marches pelagic sequence were classified into seven hydrogeological complexes, according to their capability of absorbing and storing meteoric water; this capability was quantitatively expressed in terms of net recharge (Fig. 2). Given the particular stratigraphy of the sequence, the complexes with good infiltration capability are generally bounded by relatively impermeable complexes at their bottom and top. The directly assessed net recharge ranged from 150 to 400 mm/year in the "Scaglia Calcarea" complex, 350 to 600 mm/year in the "Maiolica" complex and 300 to 800 mm/year in the "Corniola-Calcare Massiccio" one. The calcareous-marly complex, the "Marne a Fucoidi" marlstone complex and the calcareous-siliceous-marly complex proved to have net recharge close to zero.

The hydrostructural setting of the Umbria-Marches carbonate

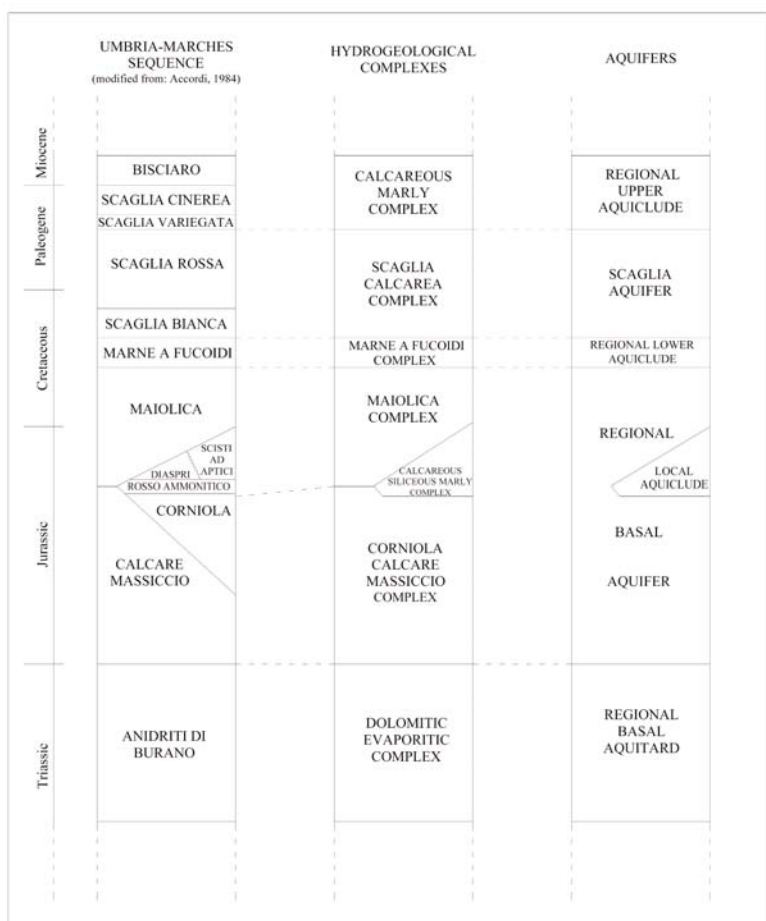


Fig. 2 - Schema dei rapporti fra successione stratigrafica umbro-marchigiana, complessi idrogeologici e acquiferi
 - Sketch of relationships between stratigraphic sequence, hydrogeological complexes and main aquifers in the Umbrian-Marchean domain

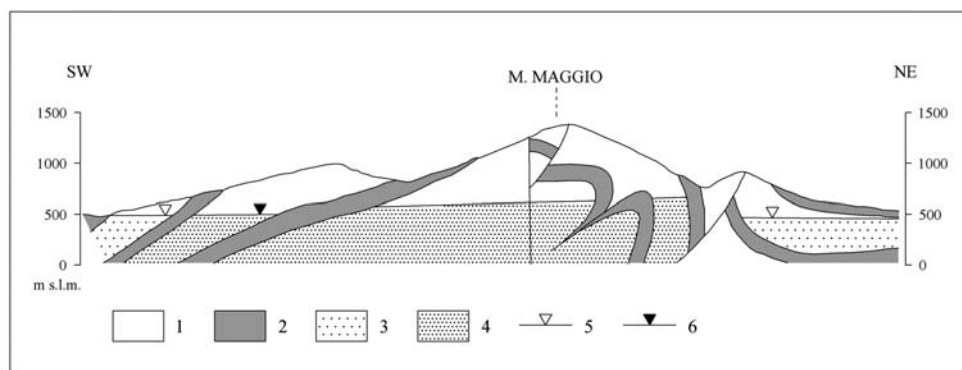


Fig. 3 - Sezione idrogeologica interpretativa dell'assetto idrostrutturale della dorsale di Monte Maggio (stralcio da BONI *et alii*, 2005). La traccia della sezione è riportata nella figura 1. Legenda: 1) complessi carbonatici indifferenziati; 2) complessi siliceo - marnoso - arenacei indifferenziati; 3) acquifero della Scaglia calcarea; 4) acquifero basale indifferenziato; 5) probabile livello piezometrico medio dell'acquifero della scaglia calcarea; 6) probabile livello piezometrico medio dell'acquifero basale

- Hydrogeological section interpreting structural setting of the Monte Maggio ridge (modified from BONI *et alii*, 2005). Section location is shown in Fig. 1. Legend: 1) carbonate hydrogeological complexes; 2) calcareous-siliceous-marly complexes; 3) "Scaglia Calcareo" aquifer; 4) basal aquifer ("Maiolica" and "Corniola-Calcarea Massiccio" complexes); 5) mean watertable of "Scaglia Calcareo" aquifer; 6) mean watertable of basal aquifer

L'alternanza di complessi con caratteristiche idrogeologiche differenti, associata allo stile tettonico regionale, determina l'assetto idrostrutturale del dominio carbonatico umbro-marchigiano dove il nucleo delle anticlinali è sede di potenti acquiferi basali e nei fianchi delle dorsali sono contenuti significativi acquiferi periferici (Figg. 2 e 3).

A scala regionale è possibile individuare due circolazioni idriche sotterranee, generalmente indipendenti. La circolazione idrica più profonda si svolge nell'acquifero regionale basale, contenuto nei complessi della maiolica e della corniola-calcarea massiccio. Questa circolazione è fortemente condizionata dalla presenza del complesso calcareo-siliceo-marnoso che, influenzando le direttrici di flusso principali, indirizza il drenaggio sotterraneo verso i principali punti di recapito. A scala regionale questo complesso assume il ruolo di aquitard. Localmente, dove si presenta poco fratturato, con il massimo spessore e con una marcata componente argillosa, costituisce un aquiclude locale che può sostenere falde sospese nel complesso della maiolica.

La circolazione idrica periferica ha sede nell'acquifero della scaglia, contenuto nel complesso della scaglia calcarea. Si tratta di una circolazione estremamente frammentata e sviluppata nei settori periferici delle dorsali anticlinali e nei nuclei delle sinclinali. La falda dell'acquifero della scaglia si trova generalmente sospesa sulla falda dell'acquifero basale, sostenuta dall'aquiclude delle marne a fucoidi. Le due falde sovrapposte hanno generalmente circolazioni idriche indipendenti, con quote di saturazione diverse. Dove viene a mancare l'isolamento idraulico dell'aquiclude delle marne a fucoidi i due acquiferi risultano indifferenziati, dando luogo ad imponenti circolazioni idriche senza soluzione di continuità.

Non è ancora sufficientemente noto il ruolo idrogeologico del complesso dolomitico-evaporitico, la cui scarsa estensione in affioramento rende estremamente difficile qualsiasi valutazione quantitativa diretta. Si presuppone che gli orizzonti dolomitici, particolarmente fratturati, siano sede di una circolazione idrica profonda, mentre gli orizzonti evaporitici possano essere considerati aquicludes privi di

domain consists of an alternation of complexes with different hydrogeological characters, combined with the regional tectonic style. In this domain, the cores of anticlines accommodate thick basal aquifers, while the slopes of ridges host significant peripheral aquifers (Figg. 2 and 3).

Therefore, two generally independent groundwater flows may be identified at regional scale. The deep groundwater runs inside the regional basal aquifer, which is embedded in the "Maiolica" and "Corniola-Calcarea Massiccio" complexes. The calcareous-siliceous-marly complex significantly affects the flowpaths of this groundwater, channelling drainage towards the main points of discharge. At regional scale, this complex plays the role of aquitard. Locally, where this complex is poorly jointed, has its maximum thickness and a pronounced clayey component, it represents an aquiclude, which may sustain perched aquifers in the "Maiolica" complex.

Peripheral groundwater circulates inside the "Scaglia" aquifer, which is embedded in the "Scaglia Calcareo" complex. The flow of this groundwater is extremely fragmented and developed above all in the peripheral sectors of the anticlinal ridges and in the cores of synclines. The "Scaglia" groundwater is generally perched over the basal groundwater, which is sustained by the "Marne a Fucoidi" marlstone aquiclude. The two overlapping aquifers generally have independent flows with saturated zones at different elevations. In places where the "Marne a Fucoidi" complex fails to seal the aquifers, the two groundwaters are undifferentiated, giving rise to continuous and impressive flows.

The hydrogeological role of the dolomitic-evaporitic complex is not yet fully known. Its poor exposure makes any direct quantitative assessment extremely difficult. The densely jointed dolomitic horizons are supposed to host a deep groundwater, whereas the evaporitic horizons may be regarded as aquicludes without significant groundwater flow. As a whole, this complex may be interpreted as an aquitard located at the base of the regional basal aquifer.

circolazione idrica significativa. Nel suo insieme il complesso può essere interpretato come un aquitard posto alla base dell'aquifero regionale basale.

Le emergenze di acqua sotterranea alimentate dall'aquifero regionale basale e arricchite nella componente solfatico-magnesiaca, potrebbero essere interpretate come punti di recapito di una circolazione idrica profonda, diffusa a livello regionale, che coinvolgerebbe il substrato dolomitico-evaporitico e di cui attualmente non sono note le dinamiche principali.

Nello schema di circolazione idrica sotterranea proposto viene attribuito il ruolo idrogeologico di limite di permeabilità ad alcuni lineamenti tettonici di importanza regionale. Questi lineamenti, interpretati come limiti a flusso nullo, condizionano le principali direttrici di flusso sotterraneo; in particolare, l'isolamento idraulico lungo i bordi orientali delle idrostrutture è generalmente assicurato dai fronti di sovrascorrimento che determinano l'accavallamento delle dorsali interne su quelle più esterne. La descrizione dello specifico ruolo idrogeologico riconosciuto per i principali elementi strutturali regionali è sintetizzata nella successiva proposta di un modello idrogeologico concettuale di circolazione idrica sotterranea.

SORGENTI

Sono state riconosciute ottantadue sorgenti perenni puntuali e lineari con portata di magra ordinaria uguale o maggiore di 30 L/s; la portata di magra ordinaria di queste sorgenti è stata utilizzata nel calcolo dei valori di infiltrazione efficace e del bilancio idrogeologico delle idrostrutture. Solo nel caso specifico dell'idrostruttura di Monte Cucco sono state considerate alcune sorgenti minori il cui contributo complessivo (circa 100 L/s) non è stato ritenuto trascurabile rispetto alla portata complessiva dell'idrostruttura.

Per ciascuna sorgente è stata considerata la portata di magra ordinaria, che generalmente risulta inferiore alla portata media della sorgente. Per portata di magra ordinaria si intende, infatti, la portata integralmente alimentata dalle acque di falda non influenzata dal contributo di acque di ruscellamento superficiale e/o epidermico. La portata di magra è stata quindi calcolata utilizzando esclusivamente le misure eseguite dopo un periodo di tempo sufficiente all'esaurimento della componente di ruscellamento superficiale legata all'ultimo evento piovoso significativo. Tale periodo è stato stimato non inferiore a dieci-quindici giorni per le sorgenti lineari e di alcuni giorni per le sorgenti puntuali.

Il valore della portata di magra ordinaria delle sorgenti, riportato nella tabella 1, è stato desunto dal controllo, elaborazione ed omogeneizzazione di dati di portata rilevati negli ultimi venticinque anni dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università La Sapienza di Roma, integrati con i dati rilevati dal monitoraggio quantitativo eseguito dall'ARPA Umbria e da misure dirette di portata eseguite dai Servizi Tecnici della Regione Umbria (BONI & PETITTA, 2008).

Nel caso delle sorgenti puntuali captate per scopi idropotabili è stato ricostruito il valore delle portate naturali, utilizzando i dati di

Groundwater springs, supplied by the regional basal aquifer and enriched in sulphate-magnesium components, might be interpreted as the points of discharge of a deep groundwater of regional scale; this groundwater, whose dynamics is still poorly known, is likely to flow through the dolomitic-evaporitic bedrock.

In the suggested groundwater flow setting, some main tectonic lines represent no-flow limits, affecting groundwater flowpaths. In detail, hydraulic barriers on the eastern boundaries of hydrogeological units is frequently due to overthrusts of the internal ridges on the external ones. Detailed roles of main tectonic lines is resumed in the following hydrogeological conceptual model.

SPRINGS

Eightytwo localised and linear perennial springs were identified. Their normal minimum-flow values are equal to or greater than 30 L/s. These values were used to calculate the net recharge and the water budget of the investigated hydrogeological units. In the specific case of the Mt. Cucco unit, consideration was given to some minor springs, whose overall (100 L/s) contribution was regarded as significant with respect to the overall discharge from the hydrogeological unit.

For each spring, normal minimum-flow values (generally lower than mean discharge values) were considered. The normal minimum flow expresses the flow that is entirely supplied by groundwater, without the contribution of surface runoff. Therefore, the minimum flow was computed by using the flow data obtained only after allowing sufficient time for exhaustion of runoff from the latest significant rainfall event. This time was estimated to be equal to at least ten-fifteen days for linear springs and to a few days for localised ones.

The normal minimum flow values of the springs (Tab. 1) were obtained after checking, processing and homogenising the discharge data collected in the past twenty-five years by the "Dipartimento di Scienze della Terra" (University of Rome "La Sapienza"). These data were supplemented with the data from a quantitative monitoring survey conducted by ARPA Umbria and with the discharge data directly measured by the Technical Services of the Umbria Region (BONI & PETITTA, 2008).

For localised springs whose water was used for drinking, the natural discharge value was estimated by using water abstraction data coming from different sources and verified at the Regional Technical Office. To avoid gross errors in estimating the discharge from linear

QUANTITATIVE HYDROGEOLOGICAL ANALYSIS OF THE CARBONATE DOMAIN OF THE UMBRIA REGION

Id	n	Sorgenti / Springs	q m a.s.l.	Q L/s
1	1	Fosso Bevano dalle sorgenti a Cantiano	500-360	105
	2	Torrente Sentino fra Ponte Calcarà e Valdorbia	560-520	85
	3	Sorgente del Fosso delle Prigioni	705	30
	4a	Sorgente dell'Eremo	590	55
	4b	Sorgente Bocca Nera	900	
	4c	Sorgente Acqua Fredda	1025	
	5	Sorgente Scirca	575	
	6	Sorgenti del Torrente Sodo	580-525	40
7	Fossi Valle del Lago e Valle Canovia	570-525	60	
8	Fosso Vetorno a Purello	525-500	30	
2	9	Sorgenti del Giano	575-535	30
	10	Sorgente della Vena	525	40
	11	Sorgente Vaccara	475	130
	12	Torrente Vaccara	480-445	70
	13	Sorgente Cappuccini-Rumore	510	125
	14	Sorgente Rocchetta-Santo Marzio	600	100
	15	Sorgente del Fosso di Castelvecchio	690	80
	16a	Sorgenti del Fosso di Molinaccio	650	30
	16b			
	17	Sorgente Boschetto	560	250
	18	Rio Fergia	530-510	90
	19	Sorgente Capodacqua di Fabriano	560	120
	20	Sorgente Pettinara	500	30
	21	Sorgente San Giovenale	480	330
	22	Fiume Topino fra San Giovenale e Petracchio	480-440	350
23	Sorgente Le Cese	460	45	
3	24	Fossi di Capodacqua e Casaluna	550-500	60
	25	Fiume Potenza fra Poggio Sorifa e Costa Pulita	540-495	230
	26	Sorgente Bagnara	630	135
4	27	Fosso La Vena fra Le Prata e il Lago di Acciano	655-620	50
	28	Sorgenti del Fosso di Bagni	580	55
	29	Fiume Topino fra Petracchio e Nocera Umbra	440-415	365
	30	Sorgente Capodacqua di Foligno	380	200
6	31	Sorgente Acqua Bianca	390	50
	32	Fonti del Clitunno	225	1245
	33	Sorgenti del Tempio	225-220	490
	34	Fiume Clitunno fra Chiesa Tonda e Faustana	220-215	300
7	35	Fosso di Fauvella	800-720	170
	36	Torrente Menotre fra Rasiglia e Serrone	625-590	110
	37	Sorgente Acqua Rua	720	40
	38	Sorgente Montefiorello	750	40

Id	n	Sorgenti / Springs	q m a.s.l.	Q L/s
8	39	Sorgente Capo Vena di Rasiglia	670	700
	40	Sorgente dell'acquedotto di Verchiano	650	45
	41	Sorgente Alzabove	650	200
	42	Sorgente Argentina	565	400
9	43	Fosso S. Angelo a Fiume	700-620	105
	44	Fiume Vigi dalle sorgenti a Sellano	654-480	755
10	45	Fiume Nera tra Ponte e Vallo di Nera	356-300	450
	46	Fiume Nera tra Castel S. Felice e Scheggino	290-283	1075
	47	Sorgente di Scheggino	300	200
	48	Fiume Nera tra Scheggino ed Umbriano	283-250	1570
	49	Fosso del Castellone	450-325	115
	50	Sorgente Lupa	365	125
	51	Sorgente Pacce	475	80
	52	Fiume Nera tra Ponte Nuovo e Cervara	502-470	710
11	53	Torrente Campiano dalle sorgenti a Campi	718-660	390
	54	Torrente Campiano da Campi a Piedivalle	660-650	90
	55	Torrente Campiano tra Borgo e Corone	520-450	280
	56	Fiume Nera a Belforte	440-410	670
	57	Fiume Nera fra Bagni di Tripunzo e Tripunzo	394-370	1575
	58	Fiume Nera fra Tripunzo e Ponte	370-345	1975
	59	Fiume Sordo dalle Marcite a Casali di Serravalle	600-530	1380
	60	Fiume Sordo fra Casali di Serravalle e Biselli	530-463	3500
	61	Fiume Corno prima della confluenza col Nera	440-374	80
	62	Sorgenti di Panico	1250-1140	320
12	63	T. Ussita tra Pieve e Madonna dell' Uccelletto	718-645	570
	64	T. Ussita tra Madonna dell'Uccelletto e Visso	645-607	120
	65	Sorgenti del Nera	844-765	100
	66	Sorgente San Chiodo	760	640
	67	Torrente Rapegna	800-730	360
	68	Fiume Nera a Castelsantangelo	760-725	820
	69	Fiume Nera a monte di Borgo S. Giovanni	660-640	90
	70	Fiume Nera tra Visso e Borgo S. Giovanni	640-612	270
	71	Fosso di Visso	670-610	250
	72	Galleria San Pellegrino	1000	35
	73	Sorgente Pescara del Tronto	926	225
13	74	Sorgente Capodacqua del Tronto	841	340
	75	Fonte Pescia	1175	150
	76	Fiume Nera tra Ferentillo e Arrone	240-227	940
	77	Sorgente Peschiera	254	35
	78	Sorgente lineare nel Fiume Velino	???	>635
	79	Sorgente S. Susanna	385	5500
	80	Sorgente San Liberato	575	150
14	81	Sorgente Cantaro	418	500
	82	Sorgente Stifone Montoro	90-75	13420

Tab. 1 - Sorgenti puntuali e lineari. Legenda: Id) idrostruttura di appartenenza; n) numero di riferimento nella tavola 1; q) quota in metri s.l.m.; Q) portata di magra ordinaria in litri/secondo

- Linear and localised springs. Legend: Id) hydrogeological unit; n) sigle referred to Plate 1; q) elevation in m a.s.l.; Q) normal minimum discharge in L/s

prelievo desunti da fonti di diversa natura e verificati presso l'ufficio tecnico regionale. Per evitare grossolani errori di valutazione della portata delle sorgenti lineari è stata dedicata una particolare attenzione alla ricostruzione degli schemi delle principali derivazioni per scopi idroelettrici, presenti sui corsi d'acqua investigati.

Sono stati, inoltre, controllati e reinterpretati i dati sul chimismo delle acque, desunti da lavori di letteratura e da rapporti tecnici messi a disposizione dalla Regione Umbria. Le informazioni acquisite hanno consentito di verificare le ipotesi di circolazione idrica formulate ed in particolare sono state riconosciute le sorgenti dell'acquifero basale in cui la presenza di alti tenori di magnesio e solfati può essere messa in relazione al contributo della circolazione idrica profonda che coinvolgerebbe il substrato dolomitico- evaporitico triassico.

L'elaborazione e l'interpretazione delle misure di portata eseguite negli alvei ha messo in evidenza anche l'esistenza di due tratti di alveo del torrente Menotre che alimenterebbero la falda sottostante (Tab. 2).

Id	n	Perdite in alveo / Losses from river to groundwater	q m a.s.l.	D L/s
6	83	Torrente Menotre fra Casenove e Scopoli	680-650	-70
7	84	Torrente Menotre fra Paraonda e C.le Fuscone	570-530	-190

Tab. 2 - Perdite di portata in alveo. Legenda: Id) idrostruttura di appartenenza; n) numero di riferimento nella tavola 1; q) quota in metri s.l.m.; D) decremento medio di portata in litri/secondo

- Losses from river to groundwater. Legend: Id) hydrogeological unit; n) sigle referred to Plate 1; q) elevation in m a.s.l.; Q) discharge decrease in L/s

springs, particular care was taken to reconstruct the models of the principal head installations for hydro power generation located on the investigated streams.

Furthermore, data on water chemistry from the literature and from technical reports provided by the Umbria region were checked and reinterpreted. The collected data made it possible to validate the groundwater flow assumptions made in the study and, in particular, to recognise the springs of the basal groundwater. The high magne-

sium and sulphate contents of the water from these springs may be ascribed to the contribution of a deep groundwater flowing inside the dolomitic-evaporitic bedrock of Triassic age.

Processing and interpretation of flow data collected from streambeds highlighted two portions of the Menotre streambed, which are likely to supply the underlying aquifer, i.e. draining towards the aquifer (Tab. 2).

BILANCIO IDROGEOLOGICO INTEGRATO

Il bilancio idrogeologico, riportato nella tabella 3, è stato calcolato utilizzando la procedura spiegata nel capitolo di descrizione dei metodi d'indagine dell'idrogeologia quantitativa. Il bilancio idrogeologico presentato viene denominato "integrato" in quanto tiene in considerazione il risultato del bilancio di ciascuna idrostruttura per giustificare quantitativamente eventuali scambi idrici sotterranei fra idrostrutture adiacenti, secondo la procedura precedentemente illustrata.

L'area di ricarica di ciascuna idrostruttura (colonna A della tabella 3) corrisponde all'estensione dell'idrostruttura stessa. L'area di alimentazione effettiva corrisponderebbe all'estensione degli affioramenti dei complessi idrogeologici che svolgono un ruolo attivo nell'alimentazione delle falde, grazie alla loro marcata capacità di infiltrazione. Lo stile tettonico plicativo caratteristico della regione determina l'affioramento, lungo i versanti delle dorsali, di un'alternanza di complessi relativamente permeabili, con elevata attitudine all'infiltrazione, e di quelli considerati impermeabili, in cui prevale il ruscellamento superficiale, che comunque localmente contribuisce ad alimentare l'infiltrazione efficace dei complessi permeabili topograficamente sottostanti. In questa analisi idrogeologica a scala regionale gli affioramenti dei complessi idrogeologici prevalentemente marnosi sono, quindi, da considerarsi a tutti gli effetti parte integrante dell'a-

INTEGRATED HYDROLOGICAL BUDGET

The proposed hydrogeological model was validated by an integrated computation of the water budget, evaluated following the above explained methodology. The result of the water budget has been named "integrated", taking into account water budget of each hydrogeological unit, with the aim of justify possible groundwater exchanges between adjacent units.

The actual recharge area of each hydrogeological unit (column A in table 3) is supposed to correspond to the outcropping area of the hydrogeological complexes playing an active role in groundwater recharge, thanks to their high capability of infiltration. The folding tectonic style which is typical of the region favours the outcropping of an alternation of complexes along the ridge slopes: i) permeable complexes with a high infiltration capability; and ii) impermeable complexes where surface runoff is dominant but contributes to the net recharge of the underlying permeable complexes. Thus, in regional-scale hydrogeological analyses, the exposures of dominantly marly hydrogeological complexes are to be considered as an integral part of the recharge area. Therefore, the extent of the hydrogeological unit matches the extent of the area recharging the groundwater which flows in the same unit.

The adopted "direct" method for water budget calculation considers as outflows the spring discharges and groundwater losses

Id	Hydrogeological unit	A km ²	Qs L/s	Qex L/s	QU _{TOT} L/s	Ie		Qin L/s	Qf L/s	QE _{TOT} L/s
						mm/y	L/s			
1	Monte Cucco	87	695		695	250	690			690
2	Monte Maggio	122	1820		1820	410	1570	265		1835
3	Monte Pennino	35	425		425	380	420			420
4	Monte Faeto	61	720	80	800	415	800			800
5	Monte Aguzzo	44	0	640	640	460	640			640
6	Monte S.Stefano	96	2035		2035	460	1400	555	80	2035
7	Monte Siliolo - Monte Carpegna	91	360	1140	1500	460	1330		190	1520
8	Monte S.Salvatore	82	1345		1345	470	1220	125		1345
9	Monte Cavallo	64	860		860	425	860			860
10	Monte Coscerno	241	3615		3615	475	3630			3630
11	Monte Tolentino - Monte Cavogna	754	10650		10650	445	10640			10640
12	Monte Bove	266	4290		4290	510	4300			4300
13	Monte Solenne - Ferentillo	107	1610		1610	475	1610			1610
14	Monte Terminillo	221	6150		6150	880	6170			6170
15a	Monti Martani	130	0	2060	2060	500	2060			2060
15b	Monti di Narni - Amelia	268	13420		13420	600	5100	8320		13420
15c	Monti di Spoleto	164	0	2860	2860	550	2860			2860
15d	Monti Sabini Inferiori	212	0	4370	4370	650	4370			4370
16	Massicci Perugini	60	0	770	770	405	770			770
17	Monti di Gubbio	15	200	50	250	530	250			250
18	Monte Subasio	48	0	730	730	480	730			730

Tab. 3 - Bilancio idrogeologico. Legenda: *Id*) sigla identificativa dell'idrostruttura; *A*) area di ricarica in chilometri quadrati; *Qs*) portata erogata dalle sorgenti in litri/secondo; *Qex*) scambi idrici sotterranei verso l'esterno; *QU_{TOT}*) portata totale in uscita dall'idrostruttura; *Ie*) Infiltrazione efficace media dell'idrostruttura in millimetri/anno e litri/secondo; *Qin*) apporto idrico sotterraneo dall'esterno; *Qf*) perdite di portata in alveo; *QE_{TOT}*) portata totale in entrata nell'idrostruttura
- *Hydrogeological budget. Legend: Id*) id of each hydrogeological unit; *A*) total area in km²; *Qs*) Spring discharge in L/s; *Qex*) Groundwater seepage towards surrounding hydrogeological units; *QU_{TOT}*: total discharge of the unit; *Ie*) Net recharge in mm/year and L/s; *Qin*) groundwater seepage from surrounding hydrogeological units; *Qf*) losses from river to groundwater; *QE_{TOT}*) total discharge entering in the hydrogeological unit

rea di ricarica stessa. L'estensione dell'area di ricarica corrisponde quindi all'estensione dell'intera idrostruttura.

Il metodo "diretto" utilizzato per il calcolo considera come "uscite" del bilancio le portate erogate dalle sorgenti e gli scambi idrici sotterranei verso l'esterno; costituiscono le "entrate" l'infiltrazione efficace e gli eventuali apporti sotterranei provenienti dall'esterno. I valori complessivi di portata in uscita (colonna Q_{TOT} in tabella 3) si ottengono, quindi, dalla somma della portata delle sorgenti (Q_s) e delle perdite sotterranee verso l'esterno (Q_{ex}) mentre i valori complessivi di portata in entrata (Q_{ETOT}) sono desunti dalla somma della ricarica diretta per infiltrazione efficace (I_e), degli ingressi idrici sotterranei (Q_{in}) e dell'alimentazione della falda da parte di fiumi in cui sono state rilevate perdite di portata in alveo (Q_f).

E' opportuno ribadire che il metodo utilizzato non prevede l'analisi dei dati pluviometrici; infatti il valore dell'infiltrazione efficace non è stato calcolato come aliquota delle precipitazioni, ma dal rapporto fra la portata erogata dalle sorgenti e l'estensione della loro area di ricarica.

La trascurabile differenza rilevabile, talvolta, fra il valore complessivo delle entrate e delle uscite del bilancio è da attribuire all'approssimazione dei calcoli, in quanto i valori di portata misurati sono stati originariamente approssimati, con ovvie ripercussioni nel calcolo degli altri termini del bilancio espressi in L/s e mm/anno.

Il calcolo del bilancio mette in evidenza che le 21 idrostrutture individuate hanno una potenzialità complessiva di circa 50.000 L/s e costituiscono, nel loro insieme, un sistema idrogeologico aperto in corrispondenza della Piana di Colfiorito, da cui riceverebbe un apporto sotterraneo di circa 860 L/s, e in corrispondenza del limite con la Valle Umbra, dove sono state valutate perdite sotterranee di almeno 2510 L/s, di cui 1780 L/s dalle idrostrutture di Monte Aguzzo e di Monte Carpegna e circa 730 L/s da Monte Subasio; l'intero sistema, inoltre, cederebbe dall'idrostruttura dei Massicci Perugini circa 770 L/s e dall'idrostruttura dei Monti di Gubbio circa 50 L/s, che contribuirebbero all'alimentazione degli acquiferi alluvionali della piana del Tevere.

MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE DI CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA

Il modello idrogeologico, presentato nella tavola 1, costituisce il prodotto finale di una ripetuta e reciproca verifica fra i risultati del calcolo del bilancio idrogeologico integrato e l'analisi dell'assetto geologico-strutturale del territorio investigato.

Il modello idrogeologico proposto evidenzia a scala regionale una circolazione idrica sotterranea estremamente articolata, frammentata in ventuno idrostrutture che presentano generalmente direttrici preferenziali di flusso orientate NS, la cui geometria ricalca la morfologia delle dorsali carbonatiche.

I risultati proposti devono considerarsi come ipotesi interpretative, in parte verificate e in parte ancora da sottoporre a valutazioni successive, anche attraverso studi e indagini integrative. Il dettaglio del modello di circolazione non è uniforme per tutte le strutture investigate; in alcuni casi, infatti, è necessario un maggiore approfondimento

toward external units; inflows are represented by net recharge and possible groundwater exchanges coming from adjacent hydrogeological units. Total discharge of outflows (column Q_{TOT} in Table 3) has been calculated adding spring discharge (Q_s) with groundwater losses (Q_{ex}), while total inflows (Q_{ETOT}) are inferred adding net recharge (I_e), groundwater exchanges entering in the unit (Q_{in}) and losses from streams where discharge decrease has been measured (Q_f).

It is worth reiterating that the method does not involve the analysis of precipitation data. In effect, net recharge is computed as a percentage of precipitation, but on the basis of a comparison between the discharge from springs and the respective recharge area.

Negligible differences between inflow and outflow of the water budget is due to uncertainty of calculation, because discharge values have been rounded, affecting subsequent evaluation of water budget terms.

The identified 21 hydrogeological units have an overall water potential of roughly 50,000 L/s. As a whole, they constitute an open hydrogeological unit which includes the Colfiorito Plain, which is recharged with about 860 l/s of groundwater. Near the boundary with the Valle Umbra valley, groundwater leakage from the hydrogeological units of Mt. Aguzzo-Mt. Carpegna (1780 L/s) and of Mt. Subasio (730 L/s) was calculated to be equal to at least 2,510 L/s. Additionally, groundwater leakage from the Perugia reliefs (about 770 L/s) and from Gubbio Mts. unit (50 L/s) is supposed to supply the alluvial aquifers of the Tiber river.

CONCEPTUAL MODEL OF GROUNDWATER FLOW

A conceptual groundwater flow model (Plate 1) is the final result of the iterative verify between integrated water budget values and geological-structural setting analysis of the studied area.

The proposed model shows that, at regional scale, groundwater flow is extremely diversified and fragmented among twenty-one hydrogeological units with preferential N-S flowpaths. The geometry of these units is reflective of the morphology of the local carbonate ridges.

These results should be regarded as interpretative assumptions, in part tested and in part to be refined, also through additional studies and investigations. The detailed groundwater flow model is not uniform for all the investigated structures. In some cases, the need arises for conducting more thorough hydrogeological studies, especially where the geological-structural setting is particularly complex and where available quantitative hydrogeological data are insufficient.

dello studio idrogeologico, soprattutto dove l'assetto geologico-strutturale si presenta particolarmente complesso e dove i dati idrogeologici quantitativi disponibili risultino carenti. La completezza del quadro conoscitivo ha consentito l'accurata ricostruzione della circolazione idrica sotterranea il cui dettaglio arriva alla distinzione delle direttrici di flusso dell'acquifero basale da quelle dell'acquifero della scaglia.

La ricostruzione dell'assetto idrogeologico delle strutture carbonatiche minori (Monti di Gubbio, Massicci Perugini e Monte Subasio), ubicate ad ovest della dorsale carbonatica umbro-marchigiana, ripropone semplicemente le interpretazioni proposte da altri Autori (BOILA *et alii*, 1999; CHIODINI *et alii*, 1991; FICIARÀ *et alii*, 1998).

L'isolamento idraulico lungo i fianchi orientali delle idrostrutture è assicurato generalmente da elementi tettonici compressivi e lungo il fianco occidentale dal tamponamento dei complessi marnosi e argillosi. In corrispondenza dei limiti meridionali e settentrionali non sempre è stato accertato e verificato l'isolamento idraulico e, in alcuni casi, sono state individuate alcune situazioni di scambi idrici sotterranei fra idrostrutture confinanti.

Il limite di permeabilità lungo il bordo orientale delle idrostrutture più interne (Monte Cucco, Monte Maggio, Monte Faeto e Monte Santo Stefano) è stato riconosciuto in corrispondenza del sovrascorrimento regionale Monte Nerone-Monte Santo Stefano (CALAMITA & DEIANA, 1995); il fronte di sovrascorrimento di Monte Cavallo (CALAMITA & PIERANTONI, 1992) separa le circolazioni idriche sotterranee dell'idrostrutture di Monte Cavallo e di Monte Tolentino - Monte Cavogna; la linea della Valnerina (DECANDIA *et alii*, 1980; DECANDIA, 1982; COSENTINO *et alii*, 1991; CALAMITA & PIERANTONI, 1992) e il fronte di sovrascorrimento di Tancia-Contigliano (MANGANELLI & FARAMONDI, 1990) dividono il sistema di alimentazione delle grandi sorgenti di Montoro-Stifone da quello che alimenta il flusso di base del fiume Nera (idrostrutture di Monte Coscerno e Monte Tolentino - Monte Cavogna).

Il fronte di sovrascorrimento dei Monti Sibillini (CASTELLARIN *et alii*, 1978; COLI, 1981; SALVINI & VITTORI, 1982; BOCCALETTI *et alii*, 1983; LAVECCHIA, 1985, COOPER & BURBI, 1986) e la linea Olevano-AnTRODoco (CIPOLLARI & COSENTINO, 1992) costituiscono un limite a flusso nullo lungo il bordo orientale delle idrostrutture più esterne. Alcuni fronti di sovrascorrimento minori costituiscono limiti a flusso nullo locali che separano idraulicamente le idrostrutture.

Sono stati riconosciuti locali scambi idrici sotterranei attraverso i limiti di alcune idrostrutture dove l'assenza di idonei elementi strutturali o litologici non garantisce la separazione idraulica completa.

In particolare, sono stati individuati possibili scambi idrici sotterranei fra la Piana di Colfiorito e le idrostrutture di Monte Maggio, di Monte Santo Stefano e di Monte S.Salvatore, che riceverebbero un'alimentazione sotterranea di entità tutt'altro che trascurabile. I piani carsici di Colfiorito possono essere considerati un'area ad elevata infiltrazione, in quanto la pioggia caduta viene raccolta dalla piana, trattenuta in superficie dal complesso fluvio-lacustre, a bassa permeabilità, e indirizzata dal ruscellamento superficiale verso gli inghiotti-

Completeness of the collected data made it possible to carefully reconstruct groundwater flow in most of the investigated hydrogeological units. The level of detail of the reconstruction was such as to discriminate the flowpaths of the basal groundwater from those of the "Scaglia" groundwater.

The hydrogeological model of the minor carbonate structures, located W of the Umbria-Marches carbonate ridge, re-proposes the interpretations given by other authors (BOILA *et alii*, 1999; CHIODINI *et alii*, 1991; FICIARÀ *et alii*, 1998).

In general, hydraulic separation between adjacent hydrogeological units is provided by compressional tectonic features along the eastern slopes and by the sealing marly and clayey complexes along the western ones. Hydraulic separation between neighbouring hydrogeological units at the southern and northern boundaries was not always detected or verified. Indeed, some hydraulically open hydrogeological units were observed.

The eastern permeability limit of internal hydrogeological units (Monte Cucco, Monte Maggio, Monte Faeto and Monte Santo Stefano) has been identified along the regional overthrust Monte Nerone-Monte Santo Stefano (CALAMITA & DEIANA, 1995); thrust of Monte Cavallo (CALAMITA & PIERANTONI, 1992) acts as a divide between groundwater flows of Monte Cavallo unit and Monte Tolentino - Monte Cavogna unit; Valnerina tectonic line (DECANDIA *et alii*, 1980; DECANDIA, 1982; COSENTINO *et alii*, 1991; CALAMITA & PIERANTONI, 1992) and Tancia-Contigliano thrust (MANGANELLI & FARAMONDI, 1990) are groundwater divides between Montoro-Stifone spring recharge area and baseflow of Nera Valley (hydrogeological units of Monte Coscerno and Monte Tolentino-monte Cavogna). Thrust of Monti Sibillini (CASTELLARIN *et alii*, 1978; COLI, 1981; SALVINI & VITTORI, 1982; BOCCALETTI *et alii*, 1983; LAVECCHIA, 1985, COOPER & BURBI, 1986) and Olevano-AnTRODoco line (CIPOLLARI & COSENTINO, 1992) represent a no-flow eastern limit of external hydrogeological units. Locally, minor thrusts correspond to no-flow limits between hydrogeological units.

Groundwater exchanges have been recognized through boundaries of some hydrogeological units, where absence of real lithological or structural limits does not ensure hydraulic separation between units. In particular, groundwater cross-flows between the Colfiorito Plain and the hydrogeological units of Mt. Maggio, Mt. Santo Stefano and Mt. S.Salvatore are likely to be supplied by groundwater flows of a non-negligible extent.

The karst planes of Colfiorito may be considered as a high infiltration area, since rainwater is collected by the plain, retained at the surface by the low-permeability fluvio-lacustrine complex and channelled by surface runoff towards karst swallow-holes. From these swallow-holes, the water directly supplies the carbonate aquifers underlying the fluvio-lacustrine cover. Part of this runoff water represents the minimum flow of the Fiume Chienti river, which is equal to about 115 L/s at the outlet of the plain. For the Colfiorito plain, MASTRORILLO (1994) determined a yearly mean value of net precipi-

toi carsici, attraverso i quali alimenta direttamente gli acquiferi carbonatici sottostanti la coltre fluvio-lacustre. Una parte di queste acque di ruscellamento costituisce integralmente la portata del Fiume Chienti, che all'uscita dalla piana è di circa 115 L/s. MASTRORILLO (1994) valuta per la piana un valore medio annuo di precipitazione efficace di circa 600 mm. Considerate le locali caratteristiche geomorfologiche descritte, è ragionevole attribuire all'infiltrazione efficace un valore prossimo a quello della precipitazione efficace; per la Piana di Colfiorito si stima quindi una potenzialità idrica pari a circa 1000 L/s. Il deficit di bilancio calcolato per le adiacenti idrostrutture consente di ipotizzare un'alimentazione sotterranea verso l'idrostruttura di Monte Maggio di almeno 185 L/s; l'idrostruttura di Monte S.Stefano sarebbe idraulicamente ricaricata dalla Piana di Colfiorito con almeno 550 L/s; verso l'idrostruttura di Monte S.Salvatore drenerebbero circa 120 L/s. La potenzialità idrica residua (circa 140 L/s) contribuirebbe all'alimentazione delle adiacenti dorsali marchigiane.

Scambi idrici consistenti avvengono anche lungo il fronte di contatto fra le dorsali carbonatiche e la Valle Umbra fra Foligno e Spoleto, favoriti dalla presenza di spesse coltri detritiche al piede dei versanti. Il deficit ottenuto dal bilancio conferma, infatti, l'ipotesi di collegamento idraulico già avanzata da altri Autori (MARCHETTI & MARTINELLI, 1991). Il settore meridionale dell'idrostruttura di Monte Siliolo-Monte Carpegna alimenterebbe l'acquifero della Valle Umbra con almeno 1140 L/s a sud delle Fonti del Clitunno, mentre nel tratto a nord del Clitunno è stata ipotizzata un'alimentazione dell'acquifero alluvionale di circa 640 L/s da parte dell'idrostruttura di Monte Aguzzo.

E' stato, inoltre, individuato un probabile flusso idrico sotterraneo di circa 80 L/s dall'idrostruttura di Monte Faeto verso quella di Monte Maggio.

La maggiore incertezza del modello di circolazione proposto riguarda il settore sudoccidentale, dove la posizione decentrata della più grande sorgente delle regione (Stifone-Montoro, 13.420 L/s) troverebbe una continuità idraulica con le idrostrutture prive di emergenze significative che la circondano (Monti Martani, Monti di Narni-Amelia, Monti di Spoleto, Monti Sabini). Attribuendo a queste idrostrutture valori di infiltrazione efficace compatibili con l'estensione degli affioramenti dei complessi idrogeologici che le caratterizzano, è stata calcolata per l'intero sistema una potenzialità idrica complessiva di 14.400 L/s (Tab. 4), valore confrontabile con quello della portata misurata della sorgente di Stifone-Montoro. Secondo i criteri adottati, questo risultato avvalorava l'ipotesi di una comunicazione sotterranea diretta fra le idrostrutture, ma non ne costituisce la verifica, per l'impossibilità di un controllo diretto delle portate travasate dalle idro-

tation of roughly 600 mm. Considering the above-described local geomorphological features, net recharge is reasonably estimated to be at least equal to net precipitation. Consequently, the groundwater potential discharge of the Piana di Colfiorito plain is assumed to be approximately 1000 L/s.

From the water budget of surrounding hydrogeological units, a groundwater flow of at least 185 L/s towards the Mt. Maggio hydrogeological unit has been inferred. The Mt. S.Stefano hydrogeological unit appears to be hydraulically recharged by the Piana di Colfiorito plain with at least 445 L/s. About 120 L/s are supposed to drain towards the Mt. S.Salvatore unit. The remaining potential discharge (about 140 L/s) is likely to supply the adjacent Marches ridges.

Substantial groundwater transfers also occur along the interface between the carbonate ridges and the Valle Umbra valley, between Foligno and Spoleto; here, these transfers are facilitated by the thick debris covers lying at the foot of the slopes. Indeed, the water budget corroborates the assumed hydraulic linkage proposed by other authors (MARCHETTI & MARTINELLI, 1991). The southern sector of the Mt. Siliolo-Mt. Carpegna hydrogeological unit is thought to supply the Valle Umbra aquifer with at least 1,140 L/s, in the area S of the Fonti del Clitunno springs. In the area N of the Clitunno springs, the alluvial aquifer is likely to receive about 640 L/s from the Mt. Aguzzo hydrogeological unit.

Additionally, groundwater cross-flows (about 80 L/s) were inferred from the Mt. Faeto unit towards the Mt. Maggio unit.

The greatest uncertainty in the proposed groundwater model concerns the south-western sector of the studied area, which accommodates the largest spring of the region (Stifone Montoro, 13,420 L/s); given its remote location, this spring is likely to be in hydraulic continuity with the surrounding hydrogeological units (Martani, Narni-Amelia, Spoleto and Sabini mountains). Assuming that the net recharge of these hydrogeological units is consistent with the extent of their outcrops, their overall water potential is 14,400 L/s (Tab. 4). This figure compares with the discharge value of the Stifone Montoro spring (13,420 L/s). Following the adopted methodology, this result supports the hypothesis of a groundwater link between the above mentioned hydrogeological units, evidencing that groundwater flow from each of these hydrogeological units toward Stifone-Montoro spring cannot be directly checked. Alternative hypothesis suggest wider recharge area to this spring, including portions of the Valnerina ridge and of Reatini Mts., developing water budgets based on rainfall and temperature values (CHIOCCHINI *et alii*, 1987; DI MATTEO *et alii*, this volume).

Tab. 4 - Potenzialità idrica delle idrostrutture del sistema di alimentazione di Stifone-Montoro calcolata sulla base dell'attribuzione di valori di infiltrazione efficace ipotizzati. LEGENDA: Id) numero identificativo dell'idrostruttura; Ie) infiltrazione efficace in millimetri/anno; Q) potenzialità media dell'idrostruttura in litri/secondo
- Discharge potential of Stifone-Montoro recharge units, based on assumed net recharge evaluation. LEGEND: Id) id of each hydrogeological unit; Ie) net recharge in mm/year; Q) mean discharge potential in L/s

Id	Hydrogeological unit	Ie (mm/y)	Q (L/s)
15a	Monti Martani	500	2060
15b	Monti di Narni-Amelia	600	5099
15c	Monti di Spoleto	550	2860
15d	Monti Sabini	650	4370
Total			14389

strutture adiacenti verso l'emergenza di Stifone-Montoro.

Altri Autori (CHIOCCHINI *et alii*, 1987; DI MATTEO *et alii*, stesso volume), sulla base del risultato di bilanci idrogeologici che prendendo in considerazione l'analisi dei dati pluviometrici e termometrici, attribuiscono alle sorgenti di Stifone-Montoro un'area di alimentazione più ampia, comprendente una parte delle dorsali della Valnerina e dei Monti Reatini.

La verifica di una probabile alimentazione della sorgente da parte delle idrostrutture considerate richiede un necessario approfondimento delle ricerche, mirato alla corretta interpretazione dell'assetto geologico-strutturale profondo, per chiarire le modalità di un'eventuale comunicazione idraulica profonda fra le singole idrostrutture. Inoltre, per una corretta definizione dell'area di ricarica delle sorgenti di Stifone Montoro è necessario approfondire gli studi sul ruolo del substrato evaporitico-dolomitico triassico, che influenza in modo determinante la qualità delle acque di questa sorgente, caratterizzata da un'elevata mineralizzazione.

VALUTAZIONE DEL PARAMETRO INFILTRAZIONE EFFICACE

Nel calcolo del bilancio è stato attribuito a ciascuna idrostruttura un valore di infiltrazione efficace medio, indicativo dell'ordine di grandezza del fenomeno valutato.

Una maggiore rappresentatività è espressa dai valori di infiltrazione efficace direttamente valutati dividendo la portata erogata da alcune singole emergenze per le rispettive aree di ricarica, individuate dall'analisi geologico-strutturale. I dati ottenuti hanno consentito di attribuire un valore medio di infiltrazione efficace ai singoli complessi idrogeologici affioranti in alcune idrostrutture. Questa valutazione è riportata nella tabella 5.

I risultati ottenuti confermano la maggiore capacità di infiltrazione efficace dei complessi della maiolica e della corniola-calcare massiccio, rispetto a quella del complesso della scaglia calcarea, già rilevata da BONI *et alii* (2005); evidenziano inoltre una variabilità spaziale dell'infiltrazione efficace all'interno dei singoli complessi idrogeologici, attribuibile alla distribuzione territoriale delle precipitazioni, ma soprattutto alle caratteristiche litologiche e strutturali degli affioramenti dei singoli complessi idrogeologici (MASTRORILLO, 2001).

I complessi della maiolica e della corniola-calcare massiccio contribuiscono entrambi all'alimentazione dell'acquifero regionale basale; l'affioramento del complesso corniola-calcare massiccio costituisce una porzione generalmente troppo limitata dell'area di alimentazione complessiva per consentire una valutazione differenziata dei valori di infiltrazione efficace tra i due complessi.

Tab. 5 - Infiltrazione efficace valutata per i complessi idrogeologici di alcune idrostrutture. Legenda: *Id*) sigla identificativa dell'idrostruttura; *Ie sc*) Infiltrazione efficace media annua del complesso della scaglia calcarea; *Ie ma,co-cm*) Infiltrazione efficace media annua dei complessi della maiolica e della corniola-calcare massiccio indifferenziati
- *Net recharge evaluated for hydrogeological complexes of some units. Legend: Id) hydrogeological unit; Ie sc) Net recharge average for Scaglia complex; Ie ma, co-cm) Net recharge average of Maiolica and Corniola-Calcare Massiccio complexes*

Determining whether this spring is supplied by the above-mentioned hydrogeological units requires more detailed studies, so as to gain greater insight into their deep geological-structural setting and identify a possible hydraulic linkage between them. Furthermore, to correctly define the recharge area of the Stifone-Montoro springs, the role of the evaporitic-dolomitic bedrock of Triassic age should be investigated further, as this bedrock has a major impact on the quality of water from this spring (highly mineralised, as is known).

ASSESSMENT OF NET RECHARGE

To compute the water budget, a mean net recharge value was assigned to each hydrogeological unit. Therefore, the resulting values are merely indicative of the order of magnitude of the investigated phenomenon.

Net recharge values have been evaluated comparing discharge of some single springs to their recharge area, individuated on the basis of geological-structural setting. Obtained results allowed to assign a mean value of net recharge for each single hydrogeological complex outcropping in some hydrogeological unit. This evaluation is shown in Table 5.

The results confirm that the capability of infiltration of the "Maiolica" and "Corniola-Calcare Massiccio" complexes is higher than the one of the "Scaglia Calcarea" complex, as reported in previous studies (BONI *et alii*, 2005). The same results suggest that the net recharge of the individual hydrogeological complexes is spatially variable and that this variability may be due to: i) the spatial distribution of precipitation (depending on morpho-climatic parameters); and ii) the lithological and structural characteristics of the outcrops of the individual hydrogeological complexes (MASTRORILLO, 2001).

Both the "Maiolica" and "Corniola-Calcare Massiccio" complexes contribute to supplying the regional basal groundwater. However, the outcrop area of the "Corniola-Calcare Massiccio" was too small (with respect to the overall recharge area) to permit separate calculation of its net recharge values. For the two complexes as a whole, the net recharge was calculated to lie in the 435-680

Id	Idrostrutture / Hydrogeological unit	Ie sc mm/y	Ie ma,co-cm mm/y
1	Monte Cucco	170	435
2	Monte Maggio	345	470
3	Monte Pennino	380	---
4	Monte Faeto	410	---
6	Monte S.Stefano	400	490

E' stata valutata un'infiltrazione efficace compresa fra 435 e 680 mm/anno attribuibile ai due complessi indifferenziati. I valori più alti corrispondono alle aree di ricarica in cui gli affioramenti del complesso della corniola-calcare massiccio hanno un'estensione rilevante rispetto a quella del complesso della Maiolica (Monte Coscerno e settore settentrionale dell'idrostruttura di Monte Bove). E' lecito, quindi, ipotizzare che l'infiltrazione efficace attribuibile al solo complesso della corniola-calcare massiccio abbia valori superiori a quella calcolata per i due complessi indifferenziati. Il valore minimo ottenuto di infiltrazione efficace di 295 mm/anno, attribuito al settore meridionale dell'idrostruttura di Monte Bove, costituisce un'anomalia nella distribuzione regionale dei valori di infiltrazione efficace, legata alla scarsità delle precipitazioni osservata nella zona di Castelluccio-Monte Vettore (BONI & PETITTA, 2007).

Il calcolo dell'infiltrazione efficace nel complesso della scaglia calcarea ha fornito valori compresi fra 170 e 425 mm/anno.

Le idrostrutture più settentrionali (Monte Cucco e Monte Maggio) presentano valori di infiltrazione efficace notevolmente inferiori a quelli noti in letteratura per i complessi carbonatici della successione umbro-marchigiana. Queste differenze possono essere attribuite all'incidenza maggiore in queste idrostrutture delle intercalazioni marnose della scaglia, che influenzano sia la litologia degli affioramenti, sia la tipologia delle deformazioni subite dalla formazione durante l'orogenesi. Anche MASTRORILLO (2001) ha rilevato una notevole differenza nei valori di infiltrazione efficace della scaglia tra la porzione della dorsale umbro-marchigiana settentrionale (120 mm/anno) e la porzione meridionale (365 mm/anno), sottolineando che i valori di infiltrazione efficace sembrerebbero aumentare progressivamente da nord verso sud.

CONCLUSIONI

In questa nota viene proposta un'ipotesi di modello concettuale di circolazione idrica sotterranea del dominio carbonatico umbro, formulata sulla base della revisione critica ed omogeneizzazione delle conoscenze acquisite di circa 25 anni di studi e ricerche idrogeologiche che il Laboratorio di Idrogeologia Quantitativa ha svolto sotto la guida del Professor Carlo Boni nel territorio umbro-marchigiano.

I principali risultati ottenuti con l'applicazione del metodo dell'analisi idrogeologica quantitativa costituiscono un contributo innovativo all'attuale quadro conoscitivo dell'idrogeologia del dominio carbonatico umbro e sono sintetizzati nella Carta delle Idrostrutture Carbonatiche Umbre, realizzata alla scala 1:250.000 come prodotto di una convenzione di ricerca fra il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università "La Sapienza" di Roma e la Regione Umbria e presentata in questa nota a scala ridotta nella tavola 1.

L'approccio metodologico, basato sul metodo di calcolo del bilancio integrato, ha portato all'allestimento di un modello concettuale di circolazione idrica sotterranea suddiviso non solo per idrostrutture ma anche in funzione dei diversi acquiferi; nella maggior parte delle idrostrutture, infatti, sono state differenziate e ricostruite

mm/year range. The highest values correspond to recharge areas where the outcrops of the "Corniola-Calcare Massiccio" complex have considerable extent with respect to the one of the "Maiolica" complex (Mt. Coscerno and northern sector of the Mt. Bove hydrogeological unit). Hence, it is fair to suppose that the net recharge which may be attributed to the "Corniola-Calcare Massiccio" complex alone exceeds the one computed for the two complexes as a whole. The 295 mm/year value attributed to the "Maiolica" and "Corniola-Calcare Massiccio" complexes, in the southern sector of the Mt. Bove hydrogeological unit, represents an anomaly in the regional distribution of net recharge; this anomaly is related to the poor precipitation recorded in the Castelluccio-Mt. Vettore area (BONI & PETITTA, 2007).

The net recharge of the "Scaglia Calcarea" complex proved to be 170-425 mm/year.

The more northerly hydrogeological units (Mt. Cucco and Mt. Maggio) have a net recharge of the "Scaglia complex" which is significantly lower than the values reported in the literature for the carbonate complexes of the Umbria-Marches sequence. These differences may be ascribed to the fact that the "Scaglia" formation in these hydrogeological units has a greater number of marly intercalations, which affected both the lithology of outcrops and the types of deformations that the formation underwent during orogeny. MASTRORILLO (2001), too, noted significantly different net recharge values between the northern portion (120 mm/year) and the southern portion (365 mm/year) of the Umbria-Marches ridge, emphasising that net recharge appears to progressively increase from N to S.

CONCLUDING REMARKS

This paper proposes a conceptual model of groundwater flow in the Umbria carbonate domain. The model was built after critically reviewing and homogenising the data collected in about 25 years of hydrogeological studies in the Umbria-Marches regions. The studies were conducted by the Hydrogeological Laboratory under the supervision of Professor Carlo Boni.

The main results achieved through the application of the quantitative hydrogeology method provide an innovative contribution to understanding the basic hydrogeological features of the Umbrian carbonate domain. These results are summarised in the Map of the carbonate hydrogeological units of the Umbria region. The map (scale 1:250,000) is the result of a research contract which was signed between the "Dipartimento di Scienze della Terra" (University of Rome "La Sapienza") and the Umbria Region. This paper encloses a simplified small-scale version of the map (Plate 1).

Thanks to the methodological approach extensively covered in this paper, a conceptual groundwater model was built. The model considered not only the hydrogeological units, but also the related aquifers. Indeed, in most of the investigated hydrogeological units,

le principali direzioni di flusso sotterraneo distinte per i due acquiferi regionali riconosciuti (acquifero della scaglia calcarea e acquifero regionale basale).

Per ciascuna idrostruttura è stato, inoltre, calcolato un bilancio idrogeologico che tiene in considerazione il risultato del bilancio delle strutture adiacenti. Il bilancio della singola struttura risulta, quindi, integrato in uno schema globale a scala regionale, dove gli eventuali apporti sotterranei provenienti dall'esterno di ciascuna struttura sono quantitativamente giustificati da altrettante perdite sotterranee verso strutture limitrofe.

La valutazione dell'infiltrazione efficace media ha messo in evidenza l'estrema variabilità spaziale di questo parametro all'interno dei singoli complessi idrogeologici permeabili affioranti, manifestando, quindi, la necessità di definirla per ciascuna idrostruttura; i valori di infiltrazione efficace media valutati per il complesso della scaglia calcarea sono compresi, infatti, fra 170 mm/anno e 425 mm/anno e quelli relativi ai complessi della maiolica e della corniola-calcareo massiccio indifferenziati variano da 295 mm/anno a 680 mm/anno.

I risultati presentati in questo lavoro forniscono un'ulteriore conferma della validità dei metodi di analisi dell'idrogeologia quantitativa nelle indagini idrogeologiche a scala regionale e costituiscono una verifica positiva della loro applicazione anche ad una scala di maggior dettaglio. Il modello idrogeologico concettuale proposto, infatti, coniuga l'analisi a scala regionale dell'intero dominio carbonatico umbro con l'analisi alla scala delle singole idrostrutture, raggiungendo l'obiettivo di superare un approccio dedicato alla singola porzione di territorio, senza rinunciare al grado di dettaglio minimo necessario per fornire un adeguato supporto al governo della risorsa idrica sotterranea a scala regionale.

OPERE CITATE/REFERENCES

- ACCORDI B. (1984) - *Lezioni di geologia stratigrafica*. Ed. CISU. Roma.
- BOCCALETTI M., CALAMITA F., CENTAMORE E., DEIANA G. & DRAMIS F. (1983) - *The Umbria-Marche apennine: an example of thrust and wrenching tectonics in a model of ensialic Neogenic- Quaternary deformation*. Boll. Soc. Geol. It. **102**, (4): 581-592.
- BOILA P., CHECCUCCI R. & VACCA G. (1999) - *Studio idrogeologico per la captazione di risorse idriche dall'Unità carbonatici di Monte Malbe - Umbria*. Atti del 3° Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio. Parma 13-14-15 ottobre 1999. Quaderni di Geologia Applicata **2/1999**, (2): 4.69-4.82.
- BONI C. & BONO P. (1982) - *Prima valutazione quantitativa dell'infiltrazione efficace sui sistemi carsici della piattaforma carbonatici laziale-abruzzese e nei sistemi di facies pelagica umbro-marchigiana-sabina (Italia centrale)*. Geologia Applicata e idrogeologia, **17**: 427-436.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. **35**: 991-1012.
- BONI C., FALCONE M., GIAQUINTO S., MARTINI E. & ZOPPI L. (1991) - *Risorse idriche sotterranee dei massicci carbonatici umbri. Le acque sotterranee in Umbria*. Protagon Publ. n° **413** del GNDICI-CNR: 49-64.
- BONI C. & MASTRORILLO L. (1993) - *Rilevamento idrogeologico dei monti di Foligno*. Atti del Convegno "Ricerca e protezione delle risorse idriche sotterranee delle aree montuose" Brescia 24-25 ottobre 1991. Quaderni di sintesi, **42**: 247-268. Azienda Servizi Municipalizzati. Brescia.
- BONI C., MASTRORILLO M. & PREZIOSI E. (1994) - *Simulazione numerica di acquiferi carbonatici: l'esempio della struttura Monte Maggi -Monte Penna (Nocera Umbra)*. Geologica Romana, **30**: 27-36.
- BONI C., MASTRORILLO M., CASCONI D. & TARRAGONI C. (2005) - *Carta idrogeologica delle dorsali interne umbro-marchigiane (scala 1:50.000)*. Pubblicazione GNDICI - CNR n°**2865**, Roma.
- BONI C. & PETITTA M. (1994) - *Sorgenti lineari e valutazione dell'infiltrazione efficace in alcuni bacini dell'Italia centrale*. Quaderni di Geologia Applicata, **1994/1**: 99-113.

the main groundwater flowpaths inside the two regional aquifers (the "Scaglia Calcarea" aquifer and the regional basal aquifer) were discriminated and reconstructed.

The identified 21 hydrogeological units (some of which characterised for the first time) are briefly described in their main characteristics. Additionally, for each hydrogeological unit, an up-to-date hydrogeological budget taking into account the budget of neighbouring units was computed. Therefore, the budget of each hydrogeological unit is integrated into a regional-scale model, where possible groundwater outflows to each unit are balanced by as many groundwater inflows from neighbouring units.

Net recharge, calculated with the direct quantitative hydrogeology method, proved to have a high spatial variability inside the investigated hydrogeological complexes. The need thus arose for defining net recharge for each hydrogeological unit. Indeed, the mean net recharge values for the "Scaglia Calcarea" complex were calculated to be 170-425 mm/year; those for both the "Maiolica" and "Corniola-Calcareo Massiccio" complexes ranged between 295 mm/year and 680 mm/year.

The findings from the study confirm, once again: i) the value of quantitative hydrogeology methods in regional-scale hydrogeological investigations; and ii) their applicability to a more detailed scale. Indeed, the proposed hydrogeological model combines regional-scale analysis of the entire Umbrian carbonate domain with local-scale analysis of its individual hydrogeological units. This choice achieved a two-fold goal: i) overcoming the limits of an approach focused on a single area; and ii) ensuring the minimum level of detail which is required to support regional groundwater resource management policies.

- 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. Rapporto definitivo*. Contratto di studio e ricerca Autorità di Bacino del Fiume Tevere-Parco Nazionale dei Monti Sibillini-Dipartimento di Scienze della Terra Università di Roma "La Sapienza".
- BONI C. & PETITTA M. (2008) - *Redazione informatizzata della cartografia idrogeologica tematica del territorio della Regione Umbria. Rapporto definitivo*. Contratto di ricerca Regione Umbria - Giunta Regionale Direzione Regionale Ambiente, Territorio e Infrastrutture Servizi tecnici Regionali-Dipartimento di Scienze della Terra Università di Roma "La Sapienza"
- BONI C. & PREZIOSI E. (1994) - *Le sorgenti lineari nell'alto bacino del fiume Nera (Appennino Umbro-Marchigiano, Italia centrale)*. Atti del "1st International Meeting for young Researchers in Applied Geology". Lausanne, april 21th 1994, SwissFederal Institute of Technology. GEOLOP-DGC/EPFL.
- BONI C., TARRAGONI C., MARTARELLI L. & PIERDOMINICI S. - *Studio idrogeologico del settore nord-occidentale dei Monti Sibillini: un contributo alla cartografia idrogeologica ufficiale*. Questo volume.
- BOSCHERINI A., CHECCUCCI R., NATALE G. & NATALI N. (2005) - *Carta idrogeologica della Regione Umbria a scala 1:100.000*. Regione Umbria Direzione Politiche Territoriali, ambientali e Infrastrutture. Servizio Geologico. Giornale di Geologia Applicata 2.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1995) - *Correlazione tra gli eventi deformativi neogenico-quadernari del settore tosco-umbro-marchigiano*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale **1**: 137-152.
- CALAMITA F. & PIERANTONI P. (1992) - *Il sovrascorrimento di Monte Cavallo- Monte Primo (Appennino umbro-marchigiano)*. Preprint 76°Congresso della Società Geol. It, **1992**, 225-226, Firenze.
- CAPRARI M. & NANNI T. (1999) - *Idrogeologia della dorsale carbonatici del M.Catria-M.Nerone (Appennino umbro-marchigiano settentrionale)*. Boll.Soc. Geol. It., **118**: 313-326.
- CASTELLARIN A., COLACICCHI R. & PRATURLON A. (1978) - *Fasi distensive, trascorrenze e sovrascorrimenti lungo la "linea Ancona- Anzio" dal Lias medio al Pliocene*. Geologica Romana, **17**: 161-190.
- CHIOCCHINI U., CHIOCCHINI M. & MANNA F. (1987) - *Studio idrogeologico per il tracciato della galleria S.Croce della linea ferroviaria Orte/Falconara*. Geologia Applicata e Idrogeologia **22**: 103 -140
- CHIODINI G., GIAQUINTO S., MARCHETTI G. & MARTINELLI A. (1991) - *L'area di ricarica di Monte Subasio. Le acque sotterranee in Umbria*. Protagon Publ. n° **413** del GNDICI - CNR: 181-190.
- CIPOLLARI P. & COSENTINO D. (1992) - *La Linea Olevano-AnTRODoco: contributo della biostratigrafia alla sua caratterizzazione cinematica*. Studi Geologici Camerti, vol. spec. **1991/2 CROP 11**: 143-149.
- COLI M. (1981) - *Studio strutturale della "Linea Ancona - Anzio" tra Posta e Antrodoco (Gole del Velino)*. Boll. Soc. Geol. It. **100**: 171-182.
- COOPER J.C. & BURBI L. (1986) - *The geology of the central Sibillini Mountains*. Mem. Soc. Geol. It. **35 (1)**: 323-347.
- COSENTINO D., SCOPPOLA C., SCROCCA D. & LA VECCHIA P. (1991) - *Stile strutturale dei Monti Reatini e dei Monti Sabini settentrionali (Appennino centrale) a confronto*. Studi Geologici Camerti. Vol. spec. **1991/2 CROP 11**: 55-61.
- DECANDIA F., GIANNINI E. & MICHELUCCHINI M. (1980) - *I fenomeni sismici e il recente terremoto in Valnerina-Umbria*. Geologia Tecnica **27 (1)**: 37-46.
- DECANDIA F. (1982) - *Geologia dei Monti di Spoleto (Provincia di Perugia)*. Boll. Soc. Geol. It. **101**: 291-315.
- DI MATTEO L., DRAGONI W. & VALIGI D. - *Aggiornamento delle conoscenze sulle risorse idriche dei Monti di Amelia (Italia centrale)*. Questo volume.
- FICIARA' R., MARCHETTI G., MARTINELLI A. & PASSERI S. (1998) - *La definizione delle risorse idriche degli acquiferi calcarei dei monti di Gubbio*. Atti del Convegno "Carte di vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi: strumenti di salvaguardia e gestione delle risorse idriche" Gubbio, 26 giugno 1998. Pubblicazione n° **1961** del G.N.D.C.I. del C.N.R.:117-145.
- LAVECCHIA G. (1985) - *Il sovrascorrimento dei Monti Sibillini: analisi cinematica e strutturale*. Boll. Soc. Geol. It. **104**: 162-194.
- MANGANELLI V. & FARAMONDI S. (1990) - *Tettonica traslativa dei Monti Sabini: l'area della Valle S.Croce (Contigliano, Rieti)*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It. **38**: 207-214.
- MARCHETTI G. & MARTINELLI A. (1991) - *Gli acquiferi alluvionali dell'Umbria. Le acque sotterranee in Umbria*. Protagon. Publ. n° **413** del GNDICI - CNR: 13-48.
- MASTROIRILLO L. (1994) - *Idrogeologia quantitativa delle dorsali carbonatiche dell'Appennino marchigiano: valutazione delle risorse idriche rinnovabili*. Tesi di Dottorato in Scienze della Terra. Università degli studi di Roma "La Sapienza".
- MASTROIRILLO L. (1996) - *Contributo alla valutazione delle risorse idriche sotterranee dell'Appennino carbonatico marchigiano*. Quaderni di Geologia Applicata **1/1996**: 25-35.
- MASTROIRILLO L. (2001) - *Elementi strutturali e caratteristiche idrogeologiche della dorsale carbonatica Umbro - Marchigiana interna*. Mem. Soc.Geol. It. **56**: 219-226.
- PREZIOSI E. (2007) - *Simulazioni numeriche di acquiferi carbonatici in aree corrugate: applicazioni al sistema idrogeologico della Valnerina (Italia centrale)*. Quaderno 125. Istituto di Ricerca sulle Acque - CNR.
- SALVINI F. & VITTORI E. (1982) - *Analisi strutturale della Linea Olevano-AnTRODoco- osta (Ancona-Anzio auct.): metodologia di studio delle deformazioni fragili e presentazione del tratto meridionale*. Mem.Soc. Geol. It. **24**: 337-355.

Received October 2008 - Accepted February 2009