

## CONTRIBUTO ALL'IDROGEOLOGIA DELL'ITALIA CENTRALE: ANALISI CRITICA DEI METODI DI RICERCA

C. BONI (\*), P. BONO (\*), G. CAPELLI (\*), S. LOMBARDI (\*) & G.M. ZUPPI (\*\*)

### RIASSUNTO

Negli ultimi vent'anni le conoscenze sull'idrogeologia dell'Italia centrale hanno fatto notevoli progressi grazie al contributo di vari Autori e con l'impiego di diversi criteri e metodi di ricerca. Viene fatta una breve analisi critica dei più significativi contributi e vengono esaminati i principali risultati acquisiti. Nel 1970 l'idrogeologia regionale era sconosciuta e non erano stati ancora sperimentati validi metodi di ricerca adatti alla particolare situazione dell'Appennino centro-meridionale, ricchissimo di acque sotterranee. La definizione dei lineamenti idrogeologici regionali era, d'altra parte, condizione preliminare allo svolgimento di ricerche di dettaglio. Un primo tentativo di sintesi idrogeologica, basato sull'analisi dell'idrologia di superficie, ha fornito risultati insoddisfacenti. Indagini basate invece, sul confronto fra la situazione idrologica e i caratteri geologici del territorio, hanno dato migliori risultati, che si sono concretizzati nella proposta di un più attendibile schema idrogeologico, ancora molto elementare, dove venivano delineate le caratteristiche dei principali acquiferi regionali.

L'analisi dei bilanci dei singoli acquiferi individuati e i risultati dei primi studi di idrochimica e di idrologia isotopica, hanno consentito di preparare una serie di modelli della circolazione sotterranea, sempre più dettagliati, e di valutare con sufficiente approssimazione la quantità di risorse idriche sotterranee distribuite nei diversi ambienti idrogeologici.

Tra il 1970 ed il 1985 sono stati quindi sperimentati e definiti nuovi metodi di ricerca, particolarmente adatti all'analisi delle diverse situazioni idrogeologiche dell'Italia centro-meridionale.

Dopo aver chiarito le linee fondamentali della circolazione sotterranea, la ricerca è oggi indirizzata alla preparazione di più precisi modelli idrodinamici, basati sull'analisi del regime di portata delle sorgenti e sullo studio più approfondito dei caratteri chimici e isotopici delle acque sotterranee.

I primi tentativi in questo campo indicano chiaramente che l'età radiometrica delle acque sotterranee, calcolata con metodo isotopico, deve essere confrontata con l'età desumibile dai modelli idrodinamici basati sul regime delle sorgenti e sulle caratteristiche degli acquiferi; l'impiego separato dei metodi isotopici e dei metodi idrodinamici può infatti portare a vistosi errori di valutazione.

Con la definizione dei principali caratteri idrogeologici regionali, ormai acquisiti, si è conclusa la fase dell'idrogeologia descrittiva e si è passati alla fase della idrogeologia quantitativa, che ha per oggetto l'analisi di dettaglio dei singoli acquiferi, visti come elementi di un più complesso sistema idrogeologico regionale.

### ABSTRACT

In the last two decades hydrogeological knowledge in Central Italy improved significantly due to many Contributors and to different research approaches. The most significant contributions as well as the most important results are considered. In 1970 regional hydrogeology of Central Italy was still unexplored and methods of investigation suitable to that area had not yet been successfully experimented. A basic knowledge of the regional hydrogeology was however a preliminary condition to more detailed investigations. A first attempt of hydrogeological interpretation mainly based on surface hydrological evidences gave poor results while comparison between hydrology and regional geology gave better results. These results took the form of an elementary hydrogeological scheme where the main aquifers and their limits were identified. Between 1975 and 1985 the original scheme was developed in a series of more detailed hydrogeological models based on new hydrochemical and isotope investigations and on the analysis of hydrogeological balances. Quantity and quality of ground water resources have been evaluated.

During the period 1970-1985 new methods of investigation suitable to the hydrology of Central Italy have been successfully experimented. Researches are presently focused on preparing more reliable hydrodynamic models based on the analysis of discharge regimes, on hydrochemistry and on isotope hydrology. First attempts in this field showed that

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università «La Sapienza» di Roma.

(\*\*) Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino.

Lavoro eseguito con i contributi: a) Progetto per la «valutazione delle risorse idriche del territorio nazionale». Fondi M.P.I. 40%, 1986; b) Centro per lo studio della Geologia dell'Italia centrale. C.N.R. Roma.

radiometric age of ground water must be compatible with the age evaluated by means of hydrodynamic models. Separate use of the two methods can lead to unreliable results. The reconnaissance phase in hydrogeological researches has been completed. A new stage of quantitative hydrogeology is under way; its goal is to study every single aquifer considered as a part of a more complex regional system.

TERMINI CHIAVE: *idrogeologia, Italia centrale.*

Questa Nota intende considerare brevemente la validità dei criteri e dei metodi seguiti nelle ricerche idrogeologiche compiute da vari Autori in un vasto settore dell'Italia centrale negli ultimi venti anni e mettere in evidenza i risultati acquisiti ed i problemi ancora aperti.

## 1. CRITERI E METODI DI RICERCA

L'esperienza compiuta nell'alto bacino del Fiume Liri (ACCORDI *et alii*, 1969) si può considerare come una delle prime ricerche idrogeologiche tentate in Italia; da questo lavoro che riteniamo ancora valido per molti aspetti, risulta tuttavia chiaramente che lo studio delle acque sotterranee, nel contesto geologico dell'Italia centrale, doveva essere affrontato in un modo diverso. Lo studio idrogeologico di dettaglio, eseguito in un'area relativamente ristretta, doveva essere infatti preceduto da una ricerca di più ampio respiro, che definisse con buona approssimazione, i fondamentali lineamenti idrogeologici regionali, allora ancora completamente sconosciuti; occorre, in sostanza, definire le grandi linee della circolazione sotterranea, prima di affrontare l'analisi dei problemi idrogeologici locali. A partire dal 1970 si è di conseguenza tentato di programmare un piano di ricerca idrogeologica su lungo periodo, che è stato progressivamente aggiornato, fino ad assumere la forma di seguito sinteticamente indicata:

*Fase a)* Definizione di un primo elemento *schema idrogeologico regionale*, che indicasse la distribuzione, la natura, i limiti ed i livelli di base dei principali acquiferi.

*Fase b)* Verifica ed affinamento dello *schema idrogeologico regionale*, attraverso l'analisi quantitativa dei bilanci idrogeologici dei singoli acquiferi identificati, e preparazione di un più preciso *modello di circolazione*

*sotterranea* basato sui primi elementi di idrogeologia quantitativa acquisiti.

*Fase c)* Verifica del modello della circolazione sotterranea, attraverso l'analisi del regime delle portate, delle caratteristiche geochimiche ed isotopiche delle acque sotterranee, e preparazione di un *modello idrodinamico regionale*.

*Fase d)* Applicazione delle conoscenze idrogeologiche gradualmente acquisite, allo studio di problemi specifici (cartografia regionale, valutazione delle risorse idriche utilizzabili, geotermia, neotettonica, protezione delle risorse idriche etc.), che tuttavia non verranno considerati in questa nota, per esigenze di brevità.

Nello sviluppo della ricerca non si è rigorosamente seguita la successione cronologica qui sopra indicata, ma le varie fasi si sono in parte sovrapposte ed integrate.

## 2. SCHEMA IDROGEOLOGICO REGIONALE

Vengono sinteticamente enunciati i criteri che hanno portato gradualmente alla definizione dello *schema idrogeologico regionale*, considerato il più attendibile allo stato attuale delle conoscenze.

Si è partiti dalla identificazione dei fondamentali elementi di idrogeologia regionale:

*Aree di ricarica* corrispondenti agli affioramenti di rocce nelle quali le acque meteoriche si infiltrano con maggiore abbondanza.

*Acquiferi regionali* costituiti da rocce con spiccata attitudine ad immagazzinare le acque sotterranee (rocce serbatoio) che si trovano in situazioni strutturali tali da poter essere ricaricate e saturate da una falda di importanza regionale.

*Rocce dotate di permeabilità scarsa o trascurabile* considerate «*aquicludes*».

*Limiti degli acquiferi regionali* corrispondenti ai contatti litologici, stratigrafici o tettonici, tra rocce serbatoio ed «*aquicludes*».

*Livelli di base delle acque sotterranee* corrispondenti alle principali sorgenti alimentate da acquiferi regionali.

*Percorsi compiuti dalle acque sotterranee*: corrispondenti alle principali linee di flusso, che collegano le aree di ricarica con le sorgenti attraverso gli acquiferi regionali.

In un contesto idrogeologico articolato come quello appenninico, è relativamente agevole l'identificazione dei singoli elementi, mentre risulta sovente problematica la loro correlazione, vale a dire l'identificazione dei limiti e delle caratteristiche di strutture idrogeologiche indipendenti.

Le principali aree di ricarica sono facilmente identificabili nelle masse litoidi idrovere che formano le dorsali carbonatiche e i rilievi vulcanici; è agevole riconoscere nelle rocce carbonatiche e piroclastiche anche i caratteri di serbatoi potenziali per le acque sotterranee.

Tutti i depositi flyschiodi e le coltri alloctone sinorogeniche a matrice argilloso-marnosa si possono considerare, in prima approssimazione, buoni *aquicludes*, mentre è molto più problematico riconoscere il ruolo idrogeologico giocato dai depositi post-orogenici fluvio-lacustri, di litologia eterogenea, che colmano con spessori variabili le depressioni intermontane e vengono in molte zone a contatto con le strutture carbonatiche, in prossimità delle principali sorgenti. Risulta altrettanto difficoltoso individuare quali settori delle strutture carbonatiche e degli apparati vulcanici siano saturi e quali siano i limiti dei grandi acquiferi regionali.

Quando si è cominciato lo studio regionale non era ancora disponibile un inventario completo delle sorgenti, nemmeno delle principali (BONI C. & BONO P., 1973), ed i dati di portata disponibili erano scarsi e non sempre attendibili. Nelle aree centro-meridionali, la Cassa per il Mezzogiorno, promuoveva studi idrogeologici per l'identificazione di nuove fonti di approvvigionamento idrico, che avevano il grande merito di mantenere viva la ricerca e di raccogliere nuovi dati e nuove idee. Al di fuori dei limiti di intervento della Cassa, come ad esempio nell'alto Lazio, in Umbria e nelle Marche, la ricerca promossa dagli Enti locali era sostanzialmente indirizzata alla soluzione di problemi pratici; mancava e manca tuttora un adeguato servizio di raccolta di dati idrologici.

È stato quindi necessario colmare queste lacune dedicando molti anni alla misura delle portate delle principali sorgenti, su una regione estesa 40.000 km<sup>2</sup>.

Le opinioni sulle fondamentali modalità di circolazione delle acque sotterranee nel Lazio e nell'Abruzzo erano divergenti e ben poco si conosceva dell'Umbria e delle Mar-

che. MOUTON (1973) presentando i risultati di una ricerca idrogeologica molto approfondita ed accurata, durata diversi anni e condotta per conto della Cassa per il Mezzogiorno nel Lazio meridionale e parte dell'Abruzzo, ipotizzava l'esistenza di un'unica falda contenuta nelle dorsali carbonatiche, estesa con continuità dal Fucino al mare Tirreno; BONI (1973) nella stessa regione, proponeva uno schema idrogeologico molto semplificato dove figurano diverse strutture idrogeologiche indipendenti, ciascuna limitata ad un settore o ad un'intera dorsale carbonatica. Le varie strutture idrogeologiche erano considerate idraulicamente separate da potenti depositi flyschiodi argilloso-arenacei, accumulatisi durante le prime fasi orogeniche, nei profondi solchi che si produssero a seguito dello smembramento della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese.

Pur essendo molto diverso il quadro idrogeologico proposto, fra le due interpretazioni esisteva una base comune che identificava negli acquiferi carbonatici la principale fonte di approvvigionamento idrico regionale. Le divergenze erano sostanzialmente dovute al diverso criterio di analisi, e centrate sul diverso peso attribuito al ruolo giocato dalla geologia (e in particolare dai rapporti di giacitura fra masse carbonatiche e flysch), nel ripartire le enormi riserve idriche sotterranee. MOUTON privilegiava l'analisi dei dati idrologici e interpretava l'idrogeologia dell'Appennino riferendosi agli schemi classici della scuola francese, che erano stati sperimentati e definiti in aree caratterizzate da situazioni strutturali molto meno complesse di quelle che si riscontrano nell'Appennino; BONI basava invece la sua interpretazione idrogeologica sul nuovo quadro stratigrafico e strutturale dell'Appennino centrale, che i geologi dell'Università di Roma stavano definendo in quegli anni.

Analoghe interpretazioni dell'idrogeologia regionale, relative ad aree limitrofe, venivano proposte dai ricercatori che operavano presso altri centri universitari (CIVITA *et alii*, 1973) aggiornati sui recenti progressi delle ricerche di geologia stratigrafica e strutturale.

La definizione dello schema più rappresentativo della idrogeologia regionale, cui hanno contribuito diversi Autori tra il 1973 ed il 1985, ha comportato un'analisi dei seguenti temi:

– *Evoluzione dell'assetto strutturale regionale* dal Lias inferiore al Quaternario recente (differenziazione dei bacini sedimentari, nel Lias medio-inferiore e migrazione dei margini della piattaforma carbonatica durante l'intero mesozoico; smembramento della piattaforma nel Miocene medio, deposizione delle torbiditi e messa in posto dei complessi alloctoni tardomiocenici; fase orogenica traslativa culminata nel Miocene-Pliocene inferiore e definizione dei fondamentali lineamenti dell'assetto strutturale e idrogeologico; fase tettonica distensiva plio-pleistocenica, che ha dato origine alle depressioni intermontane e ai graben costieri; vulcanismo plio-pleistocenico; colmamento fluvio-lacustre delle depressioni; epirogenesi ed eustatismo, in rapporto alla variazione dei livelli di base regionali). Queste ricerche sono state possibili grazie al contemporaneo sviluppo degli studi di geologia strutturale condotti dai ricercatori dell'Università e del C.N.R. (C.N.R. VARI AUTORI, «*Structural model of Italy*». In corso di stampa).

– *Evoluzione degli ambienti di sedimentazione* condizionato dall'evolversi del quadro strutturale, e conseguente differenziazione delle litofacies, nel dominio pelagico settentrionale ed orientale e nel dominio di piattaforma meridionale, con particolare attenzione all'evoluzione dei margini. Anche questo lavoro è stato reso agevole dal contemporaneo sviluppo delle ricerche sedimentologiche (C.N.R. VARI AUTORI «*Lithofacies map of Latium. Abruzzi and neighbouring areas*». In corso di stampa).

– *Censimento e misura delle portate delle principali sorgenti* e analisi del regime di portata dei corsi d'acqua perenni, per l'identificazione di sostanziali contributi attribuibili ad acque sotterranee (CELICO, 1978; 1983; BONI & BONO, 1982a; BONI, BONO & CAPELLI, 1986).

– *Identificazione delle sorgenti lineari e del loro ruolo fondamentale nell'idrogeologia regionale* (BONI, BONO & CAPELLI, 1986).

– *Indagine idrochimica* sui principali acquiferi e indagini localizzate di geochimica ed idrologia isotopica (BONI *et alii*, 1979, 1980, 1981; ZUPPI *et alii*, 1974).

A seguito di queste ricerche lo schema idrogeologico regionale è stato progressiva-

mente affinato e migliorato (BONI, 1975; BONI & BONO, 1982a; BONI & BONO, 1984) tanto da consentire il graduale passaggio alla fase successiva della ricerca, che prevedeva la valutazione quantitativa dei bilanci delle singole strutture idrogeologiche.

Contemporaneamente la Cassa per il Mezzogiorno avviava nel 1975 una vasta campagna di ricerche idrogeologiche, nell'Italia centro-meridionale (Progetto Speciale 29), finalizzata alla valutazione delle risorse idriche sotterranee, per programmarne la razionale utilizzazione. Poiché l'iniziativa della «Cassa» aveva un preminente interesse pubblico, sia tecnico che scientifico, gli Autori ritennero opportuno aderire alla richiesta della «Compagnia Mediterranea di Prospezioni» (C.M.P.), incaricata di eseguire la ricerca, di mettere a disposizione i dati idrologici disponibili e i risultati degli studi editi ed inediti, fino ad allora acquisiti. I risultati del Progetto Speciale 29, condotto con ampia disponibilità di mezzi e di personale (campagne geofisiche, perforazioni, censimento delle perforazioni e delle sorgenti, analisi idrochimiche ed isotopiche etc.), venivano elaborati e pubblicati da CELICO (1978), che presentava un quadro preliminare della situazione idrogeologica regionale, sostanzialmente analogo a quello già proposto per il Lazio, l'Abruzzo e per la Campania nord-occidentale (BONI, 1973; CIVITA *et alii*, 1973), ma caratterizzato da un maggior dettaglio e dalla proposta di numerosi elementi migliorativi, soprattutto nella definizione dei limiti tra diverse strutture idrogeologiche.

Il vasto territorio era suddiviso in «unità idrogeologiche» omogenee, all'interno delle quali venivano indicate le linee essenziali della circolazione sotterranea. Gli stessi temi sono stati riproposti 5 anni più tardi con maggiore dettaglio (CELICO, 1983), a conclusione della fase di ricerca del P.S. 29; lo schema proposto, oltre alle strutture carbonatiche considerava anche le piane quaternarie e le aree vulcaniche, e riportava l'elenco dettagliato delle principali sorgenti, con la sintesi dei relativi dati di portata. Uscivano contemporaneamente i risultati di numerose indagini a carattere locale condotte da vari Autori, che sarebbe troppo lungo considerare in questa sede, ma che sono commentati nei citati lavori di CELICO.

Le sintesi di CELICO hanno portato un notevole contributo alle conoscenze di idro-

geologia regionale proponendo un modello di grande dettaglio, basato su un accurato studio geologico e su un attento esame della situazione idrologica ed idrochimica. Il dettaglio proposto dallo schema pare tuttavia talvolta eccessivo e suggerito da considerazioni di carattere intuitivo, che sebbene siano generalmente condivisibili in linea teorica, paiono difficilmente dimostrabili con i dati disponibili.

Pur condividendo alcune proposte migliorative dello schema regionale di circolazione sotterranea, gli Autori hanno preferito, a questo stadio delle ricerche, considerare ancora strutture idrogeologiche più vaste, con limiti che paiono sufficientemente definiti, piuttosto che spingersi in un dettaglio che mal si presta ad una verifica quantitativa, attraverso l'analisi dei bilanci idrogeologici.

A differenza del dettagliato schema preparato da CELICO (1983), BONI & BONO (1982a) avevano infatti proposto un modello più semplice, nel quale il territorio veniva suddiviso in «Unità», «Sistemi» e «Gruppi» idrogeologici con dimensioni variabili da un minimo di un centinaio di km<sup>2</sup> ad un massimo di qualche migliaio di km<sup>2</sup>.

Questo schema, che si estende oltre i limiti del P.S. 29, include l'Umbria, le Marche ed un settore della Toscana meridionale, aree nelle quali si è individuata una situazione idrogeologica molto singolare che merita almeno un breve commento.

Per mettere in evidenza le caratteristiche idrogeologiche del dominio pelagico umbro-marchigiano è opportuno confrontarle con quelle del dominio di piattaforma carbonatica.

Nel Lazio, Abruzzo, Basilicata e Campania, la tettonica ha frantumato in diversi settori la piattaforma carbonatica, o le diverse piattaforme, che si svilupparono dal Lias al Cretacico superiore con sostanziale continuità litologica, pur nella progressiva evoluzione degli ambienti sedimentari. La deposizione dei flysch nei solchi che separavano i frammenti della piattaforma ed i successivi fenomeni traslativi, hanno accentuato l'isolamento idraulico delle diverse dorsali carbonatiche, dando origine a strutture idrogeologiche separate che alimentano grandi sorgenti. Nel dominio pelagico umbro-marchigiano e nelle ampie fasce di transizione bacino-piattaforma, l'evoluzione idrogeologica è stata sostanzialmente diversa. Il bacino sedimentario,

pur costantemente caratterizzato dalla sedimentazione di biomicriti calcaree, accumulatesi con diversi spessori su un substrato rigido disarticolato da una fase tettonica medio-liassica, ha subito a più riprese l'influenza di apporti continentali che hanno dato origine alle note intercalazioni marnose ed argillose, irregolarmente distribuite a vari livelli della serie pelagica mesozoica, che divengono dominanti nei termini paleogenici. La successiva deposizione del flysch marnoso-arenaceo, che ha preceduto ed accompagnato le fasi parossistiche della tettonica appenninica, è avvenuta in un ambiente già corrugato, ma privo di quei profondi solchi che, durante l'orogenesi, separavano i frammenti della piattaforma laziale, abruzzese e campana. La tettonica profonda, che ha probabilmente prodotto estesi fenomeni di traslazione e sovrascorrimento, pare non aver sensibilmente influenzato la circolazione delle acque sotterranee, quanto meno nelle strutture più corticali. Allo stato attuale delle conoscenze, infatti, le dorsali carbonatiche affioranti, non sembrano idraulicamente isolate, ma al contrario legate da sostanziale continuità idrogeologica.

Nette discontinuità idrogeologiche sono invece riferibili alle linee tettoniche distensive, prodotte dal collasso seguito al corrugamento, che hanno prevalentemente interessato il settore occidentale della regione, dando origine a vaste depressioni come il *graben* del Tevere e le conche di Rieti e di Terni, per citare solo le più vistose. Ne deriva un quadro idrogeologico relativamente semplice che vede i nuclei calcarei delle anticlinali (in molti casi riconoscibili come paleo-alti strutturali sommersi, dove la sedimentazione marnosa è stata ridotta o del tutto assente) assumere il ruolo di vaste aree di ricarica, ed i nuclei delle sinclinali, colmati di depositi marnosi paleogenico-miocenici, assumere il ruolo di *aquicludes* corticali, dove domina il ruscellamento di superficie.

L'evoluzione geomorfologica della catena umbro-marchigiana, in progressivo sollevamento, ha visto svilupparsi, da una parte, un reticolo di drenaggio e di erosione alimentato dall'abbondante ruscellamento che si produceva nelle sinclinali, dall'altra l'estendersi di sempre più vaste aree di infiltrazione profonda, al progredire del processo di denudamento dei nuclei calcarei delle anticlinali. I corsi d'acqua hanno colmato di depositi alluviona-

li le depressioni tettoniche e hanno inciso profonde gole attraverso i nuclei delle dorsali carbonatiche, saturati da una grande falda basale. Queste marcate incisioni che hanno svolto il ruolo di livelli di base degli acquiferi carbonatici si sono gradualmente approfondite fino alla situazione attuale. La maggior parte delle acque sotterranee si versa direttamente nei tratti di fiume che attraversano i rilievi calcarei; di conseguenza il reticolo fluviale è caratterizzato dalla notevole regolarità del regime delle portate e sono molto rare le grandi sorgenti localizzate.

È opportuno sottolineare che il ruolo idrogeologico giocato dalle formazioni marnose e silicee, intercalate da formazioni calcaree mesozoiche, appare decisamente secondario. Le falde sospese, sostenute dal «rosso ammonitico», dagli «scisti ad aptici» e dagli «scisti a fucoidi», sono infatti trascurabili nell'economia idrogeologica regionale. Sebbene siano generalmente modesti, questi acquiferi sospesi a quote relativamente elevate, possono tuttavia agevolmente risolvere locali problemi di approvvigionamento idrico di centri minori.

Il quadro idrogeologico dell'Italia centrale è completato dalla identificazione degli acquiferi che saturano gli apparati vulcanici che si susseguono lungo il margine tirrenico dal Monte Amiata a Roccamonfina. Particolarmente difficoltosa è l'identificazione dei loro livelli di base, riferibili sia a sorgenti con portate considerevoli, alimentate prevalentemente dalle colate laviche, sia a corsi d'acqua drenanti che incidono profondamente le pendici degli apparati, prevalentemente costituiti da prodotti piroclastici.

### 3. BILANCI IDROGEOLOGICI E MODELLO DI CIRCOLAZIONE SOTTERRANEA

Si è tentato di verificare l'attendibilità dello schema idrogeologico regionale, attraverso il calcolo del bilancio idrogeologico degli acquiferi. La verifica è stata fatta per fasi di approssimazione successiva (BONI, 1975; BONI & BONO, 1982 a, 1982 c, 1984) sui risultati delle quali si possono fare alcune considerazioni:

1) Sia nel dominio pelagico che nel dominio di piattaforma carbonatica, l'attendibilità dello schema proposto è risultata sostanzialmente verificata.

2) I valori medi dell'infiltrazione efficace espressi in mm/anno e calcolati dividendo i volumi medi annui erogati dalle singole strutture idrogeologiche per la loro area di alimentazione, risultano confrontabili in strutture idrogeologiche analoghe e nettamente differenziati in strutture caratterizzate da diversa litologia.

3) La verifica appare tanto più attendibile quanto più vaste sono le strutture idrogeologiche considerate; suddivisioni più dettagliate, anche quando siano suggerite da evidenti situazioni litologiche e strutturali, non vengono sempre confermate dal calcolo dei bilanci, che può risultare difficoltoso per l'influenza di fattori locali difficilmente controllabili o per l'insufficiente precisione dei dati idrologici disponibili.

I bilanci idrogeologici proposti nei citati lavori, sono stati ulteriormente affinati in un lavoro cartografico di sintesi, presentato a questo Congresso (BONI C., BONO P. & CAPELLI G., 1986) che viene qui di seguito brevemente commentato.

Sono state identificate e controllate oltre 250 emergenze significative, con portate medie superiori a 100 l/s, per le quali si è valutata la portata media utilizzando i dati disponibili in letteratura, e numerosissime misure direttamente eseguite dagli Autori nell'arco di 15 anni. Nel Lazio, nell'Abruzzo e nel Molise prevalgono nettamente le sorgenti localizzate, che erogano circa il 90% della portata, mentre nell'Umbria e nelle Marche prevalgono le sorgenti lineari che erogano circa il 90% della portata.

*Il dominio di piattaforma carbonatica*, esteso su una superficie di 5369 km<sup>2</sup>, ha una infiltrazione efficace media annua di poco inferiore ai 900 mm, pari ad un contributo di circa 28 l/sec per km<sup>2</sup>; la portata media erogata dalle sorgenti è di 151 m<sup>3</sup>/sec, pari a  $4.759 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

*Il dominio pelagico umbro-marchigiano* esteso su una superficie di 4.202 km<sup>2</sup> ha una infiltrazione efficace media di 550 mm/anno, pari a 17,5 l/sec per km<sup>2</sup>; la portata media erogata dalle sorgenti è di 73,5 m<sup>3</sup>/sec, pari a  $2.316 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

*Le strutture a litologia mista*, nella fascia di transizione bacino-piattaforma, estese su una superficie di 4.102 km<sup>2</sup>, hanno una infiltrazione media annua di 725 mm, pari ad un

contributo di 22 l/sec per km<sup>2</sup>; la portata media erogata è di 94,4 m<sup>3</sup>/sec, pari a  $2.975 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

*Il complesso marnoso-calcarenitico miocenico*, esteso su una superficie di 309 km<sup>2</sup> ha una infiltrazione efficace media annua di 235 mm, pari ad un contributo di 7,5 l/sec per km<sup>2</sup>; la portata media erogata è di 2,3 m<sup>3</sup>/sec pari a  $72,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

*Il dominio vulcanico*, esteso su una superficie di 5.498 km ha una infiltrazione efficace media annua di 295 mm, pari ad un contributo di 9 l/sec per km<sup>2</sup>; la portata media erogata è di 51,5 m<sup>3</sup>/sec, pari a  $1.623 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

Da questa analisi qui sinteticamente riportata, risulta sia l'entità delle portate delle acque sotterranee, che la loro distribuzione nei diversi ambienti geologici. Pare inoltre implicitamente confermata la generale validità dei criteri e dei metodi adottati. Resta certamente l'incertezza sui valori assoluti, la precisione dei quali potrà essere migliorata con una più accurata definizione delle portate medie erogate dalle sorgenti che si possono oggi considerare attendibili, ma certamente non precise.

Un significativo calcolo del bilancio idrogeologico, eseguito su aree estese per migliaia di chilometri quadrati in differenti situazioni idrogeologiche, anche se ancora approssimato, segna una significativa svolta negli studi di idrogeologia regionale, perché chiude la fase dell'idrogeologia descrittiva e propone criteri e metodi per intraprendere la nuova fase dell'idrogeologia quantitativa che caratterizzerà gli studi futuri. È tuttavia fin d'ora definibile un primo rudimentale modello di circolazione sotterranea del quale non solo è nota la complessa geometria, ma anche l'entità delle masse d'acqua in movimento, nei diversi tipi litologici e nelle diverse situazioni idrogeologiche.

#### 4. RICERCA DI UN MODELLO IDRODINAMICO E STUDI GEOCHIMICI E DI IDROLOGIA ISOTOPICA

Precorrendo forse i tempi, fin dal 1970 si è invano cercato di definire un modello idrodinamico, rappresentativo di una situazione idrogeologica assai complessa e articolata.

In via preliminare si può dire che i mo-

delli idrodinamici proposti per aree carsiche più evolute, o meglio, per aree che sono state sede di un diverso processo evolutivo del carsismo, mal si adattano alla situazione idrogeologica dell'Italia centrale. Il carsismo infatti è generalmente considerato sinonimo di irregolarità del flusso sotterraneo; ma non è certo questa la situazione tipica dell'Appennino centrale, dove, per motivi non ancora chiaramente definiti, si osserva quasi ovunque una circolazione estremamente regolare e caratterizzata dalla marcata stabilità del regime di portata delle sorgenti.

L'analisi del fenomeno idrodinamico è cominciata proprio dallo studio del regime delle sorgenti, o almeno di quelle poche sorgenti che sono state meglio controllate negli anni passati. Nella maggioranza dei casi non è stata ancora identificata una significativa relazione tra regime degli afflussi e dei deflussi, né a carattere stagionale né su cicli pluriennali. Questa osservazione appare tanto più verificata quanto più elevata è la portata media. Si può dedurre, in prima approssimazione, che i tempi medi di residenza delle acque sotterranee siano nettamente superiori alla durata sia dei cicli stagionali che dei cicli pluriennali che sovente caratterizzano l'entità delle precipitazioni. Si è quindi cercata una verifica a queste osservazioni qualitative adottando metodi di indagine geochimica e di idrologia isotopica.

Lo studio geochimico è stato eseguito sulle acque di oltre 200 sorgenti, per un totale che supera le 1000 analisi, in molti casi ripetute con frequenza mensile nell'arco di più anni. La maggior parte del lavoro di riconoscimento è stato eseguito nel periodo 1971-75, quando ancora mancava un attendibile modello di circolazione sotterranea. L'archivio di questi dati, la maggior parte dei quali sono ancora inediti, resta un punto di riferimento importante per ogni studio successivo. Prevalgono le acque a bicarbonati alcalino-terrosi, seguite in ordine di abbondanza da acque a solfati e bicarbonati alcalino-terrosi e a cloruri alcalini, fino ad acque tipiche di aree perivulcaniche, fortemente acide, a solfati di ferro e alluminio e bicarbonato-sodiche.

Sono chiaramente distinguibili acque di ambiente tipicamente carsico da acque che ricevono apprezzabili apporti da un ciclo più profondo (BONI *et alii*, 1980). Nell'ambito delle prime è ancora possibile distinguere chia-

ramente acque che compiono lunghi percorsi (con tenori in carbonati prossimi alla saturazione e notevole stabilità del contenuto salino, sia nel ciclo annuale che su più lungo periodo), da acque che compiono più brevi percorsi (insature in carbonati e con caratteri chimici sensibili ai cicli stagionali). Sulla natura degli apporti profondi è possibile riconoscere quelli legati a fenomeni idrotermali da quelli dovuti a semplice lisciviazione di masse sedimentarie ricche di evaporiti. La discriminazione è possibile sulla base del contenuto in elementi minori e della composizione dei gas associati ( $\text{CO}_2$ ;  $\text{H}_2\text{S}$ ;  $\text{CH}_4$ ; He).

Lo studio idrochimico, cominciato con lo scopo limitato di definire le caratteristiche idrochimiche delle grandi falde regionali, ha poi progressivamente ampliato il suo campo di indagine allo studio dell'interazione acqua-roccia, allo studio dei circuiti perivulcanici, all'analisi geotermica, all'analisi strutturale ed alla neotettonica. Dalla determinazione dei soli «elementi maggiori» si è passati allo studio degli elementi minori, come il Litio, Stronzio, Fluoro e della Silice, o di elementi in tracce come Bromo, Ferro, Alluminio, Boro, Manganese etc. In seguito l'indagine è stata estesa allo studio delle manifestazioni gassose, che spesso accompagnano le acque più mineralizzate o con anomalie termiche, ubicate in aree vulcaniche o lungo sistemi di fratture a carattere regionale. Anche nel caso dei gas si è passati dalla determinazione dei componenti maggiori ad analisi di composti o elementi minori o in tracce ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , etc.), sia per studi geotermici (BONI *et alii*, 1979; BONI *et alii*, 1981; C.N.R. VARI AUTORI, 1982a, 1982b) sia per gli studi di geologia strutturale e neotettonica (Rn e He).

Nei gas disciolti nelle acque di alcune sorgenti del Lazio e della Toscana è stato possibile individuare una componente di Elio proveniente dal mantello che assume particolare significato strutturale (HOOKER *et alii*, 1985). Sono stati inoltre studiati gli isotopi stabili d'ambiente  $^{18}\text{O}$ ;  $^2\text{H}$ ;  $^{13}\text{C}$ ;  $^{34}\text{S}$  e gli isotopi radioattivi  $^3\text{H}$  e  $^{14}\text{C}$  nelle acque di numerose emergenze.

Lo studio degli isotopi stabili, associato all'analisi geochimica delle acque e all'analisi delle condizioni idrogeologiche regionali, porta alla conclusione che, nel settore considerato, sono ben identificabili almeno due principali e diversi regimi di deflusso, nell'ambito degli acquiferi carsici:

a) regime caratteristico delle acque a lunga percorrenza e prolungata permanenza nel sottosuolo, riferibile al «flusso omogeneo di fondo».

b) regime caratteristico delle acque sotterranee a limitata percorrenza e a breve permanenza nel sottosuolo riferibile al «flusso rapido non omogeneo».

Si sono inoltre individuati casi nei quali si osserva una sovrapposizione dei due regimi (dovuta alla miscelazione delle acque dei due cicli) che si possono considerare come casi estremi.

Il flusso omogeneo di fondo si manifesta in tutte le grandi sorgenti della Italia centrale caratterizzate da:

- notevole portata (qualche  $\text{m}^3/\text{sec}$ );
- notevole stabilità del regime di portata (scarti del 50% in più o in meno rispetto alla portata media);
- notevole stabilità dei parametri geochimici ed isotopici, con assenza di segnale stagionale;
- tenori in carbonati prossimi alla saturazione;
- notevole estensione dei bacini di alimentazione.

In queste condizioni l'eventuale sovrapposizione di una componente di flusso rapido, anche se rilevabile, non modifica sostanzialmente il quadro idrogeologico sopra definito.

Il flusso rapido non omogeneo si manifesta di norma nelle sorgenti minori, generalmente perenni, caratterizzate da:

- portate medie inferiori a qualche  $\text{m}^3/\text{sec}$ ;
- notevole variabilità del regime di portata;
- notevole variabilità dei parametri geochimici ed isotopici;
- sottosaturazione rispetto ai carbonati;
- estensione relativamente limitata dei bacini di alimentazione.

Si tratta in genere di sorgenti alimentate da acquiferi sospesi, rispetto all'acquifero basale della struttura, o di emergenze dell'acquifero basale che si trovano a quote più elevate.

Si può concludere che l'analisi periodica dei parametri geochimici ed isotopici consente di definire il regime più caratteristico dell'acquifero che alimenta una data sorgente e si può rilevare una sistematica corrisponden-

za fra osservazioni idrogeologiche ed idrodinamiche, ed osservazioni geochimiche ed isotopiche.

L'analisi degli isotopi radioattivi ha sollevato problemi di interpretazione perché i primi valori di età radiometrica delle acque ottenuti da diversi isotopi e con diversi metodi, erano fra loro discordanti e risultavano inoltre incompatibili con il modello idrodinamico che si veniva via via delineando.

L'età radiometrica delle acque sorgive, ottenuta col  $^{14}\text{C}$ , risultava variabile da qualche centinaio di anni ad oltre un migliaio di anni, evidentemente superiore ai possibili tempi di rinnovamento consentiti dalla geometria degli acquiferi.

L'origine di questo invecchiamento è stata riferita agli apporti di  $\text{CO}_2$  profonda, riconoscibili dall'analisi geochimica di cui si è detto in precedenza, dalla sensibile concentrazione in  $^3\text{He}$  contenuto nella fase gassosa e dall'arricchimento in  $^{13}\text{C}$  del Carbonio totale disciolto. Questi risultati dimostrano l'impossibilità o quanto meno la notevole difficoltà di utilizzare il  $^{14}\text{C}$  come metodo di datazione in aree dove sono diffusi fenomeni idrotermali ad elevata componente gassosa.

Il Tritio ha fornito in una prima fase, utilizzando il metodo di YURTSEVER (PRZEWLOCKI & YURTSEVER, 1974), età radiometriche leggermente inferiori a quelle del  $^{14}\text{C}$ , ma ritenute ancora largamente incompatibili con il modello idrodinamico di riferimento. La recente applicazione del modello degli «stati finiti» (SIMPSON & DUCKSTEIN, 1976) e del modello di YURTSEVER Y., PAYNE B.R. & GOMEZ MARTOS M. (1986), ha fornito età radiometriche, per le acque di diverse sorgenti, variabili da qualche decina ad un centinaio di anni, valori questi finalmente coerenti con la situazione idrogeologica regionale e con i possibili modelli idrodinamici.

A commento dei risultati degli studi geochimici ed isotopici, qui sommariamente esposti, si può dire che la palese interferenza fra le acque di un ciclo carsico dominante e le acque e i gas di un ciclo idrotermale, prevalentemente sviluppato lungo le linee tettoniche regionali che bordano sovente le strutture idrogeologiche, rende assai difficile ogni interpretazione di dati geochimici. Si può facilmente pervenire a conclusioni errate, quando le acque contengono elevata concentrazione di  $\text{CO}_2$  e di  $\text{H}_2\text{S}$  nella fase gassosa e di Hg, As, B, Li e Mn nella fase liquida. In

questi casi è stato possibile discriminare, per via isotopica, la doppia origine, sedimentaria e magmatica, dei solfati contenuti nelle acque del ciclo idrotermale che si mischiano con acque del ciclo carsico.

#### 4. CONCLUSIONI

Dopo circa venti anni di ricerche idrogeologiche nell'Italia centrale, con il contributo di vari Autori, è stato possibile mettere a punto metodi di indagine idrogeologica che hanno consentito di definire, in una prima fase, un attendibile schema idrogeologico regionale, e, successivamente, un modello della circolazione sotterranea, basato su elementi quantitativamente misurabili e chiaramente differenziati nei diversi ambienti idrogeologici riconosciuti. È in corso la preparazione di un modello idrodinamico basato sull'analisi dei regimi di portata delle sorgenti e sullo studio dei caratteri geochimici ed isotopici delle acque sotterranee. Il modello idrogeologico oggi disponibile può essere migliorato con un più accurato rilevamento sistematico dei dati idrologici e con la più diffusa applicazione dei metodi geochimici e di indagine isotopica.

*Manoscritto consegnato il 4 ottobre 1986.*

*Ultime bozze restituite il 22 giugno 1988.*

#### BIBLIOGRAFIA

- ACCORDI B., ANGELUCCI A., AVENA G.C., BERNARDINI F., BONI C., BRUNO F., CERCATO M., COPPOLA B., FIORE G., FUNICIELLO R., GIGLIO G., LA MONICA G.B., LUPA PALMIERI E., MATTIOLI B. & PAROTTO M. (1969) - *Idrogeologia dell'alto bacino del Liri (Appennino centrale)*. Geologica Romana, **8**, Roma.
- BONI C. (1973) - *Lineamenti idrogeologici dell'Appennino carbonatico laziale-abruzzese (primi risultati della campagna 1970-72)*. Atti del II Convegno internazionale sulle acque sotterranee, Palermo.
- BONI C. (1975) - *The relationships between the geology and hydrogeology of the Latium-Abruzzes Appennines*. Structural Model of Italy. Quaderni de «La ricerca scientifica», **90**, C.N.R., Roma.
- BONI C. & BONO P. (1973) - *Segnalazione di un gruppo di grandi sorgenti nel bacino del fiume Peccia, affluente del Garigliano*. Geologica Romana, **12**, Roma.

- BONI C. & BONO P. (1982a) - *Prima valutazione quantitativa dell'infiltrazione efficace sui sistemi carsici della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese e nei sistemi di facies pelagica umbro-marchigiano-sabina (Italia centrale)*. Geologia applicata e idrogeologia, **17**, Bari.
- BONI C. & BONO P. (1982b) - *Carta idrogeologica del Lazio sud-occidentale*. Relazione finale del sottoprogramma «Energia Geotermica» del C.N.R., RF, **15**, Roma.
- BONI C. & BONO P. (1982c) - *Lineamenti idrogeologici dell'Appennino umbro-marchigiano e laziale-abruzzese-campiano*. Relazione finale del sottoprogramma «Energia Geotermica» del C.N.R., RF, **13**, Roma.
- BONI C. & BONO P. (1984) - *Essai de bilan hydrogeologique dans une region karstique de l'Italie centrale*. Hydrogeology of karstic terrains, cases histories. International contributions to hydrogeology. 1 Heise Hannover 1984.
- BONI C., BONO P., CALDERONI G., LOMBARDI S. & TURI B. (1980) - *Indagine idrogeologica e geochemica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale nella pianura Pontina (Lazio meridionale)*. Geologia applicata e Idrogeologia, **15**, Bari.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, Roma.
- BONI C., BONO P., CAPELLI G., D'AMORE F. & LOMBARDI S. (1981) - *Nuove osservazioni su idrologia, geochemica e termalismo dell'area albana (Lazio meridionale)*. Atti del II Seminario Informativo del sottoprogramma «Energia geotermica» del C.N.R., Roma.
- BONI C., BONO P., CAPELLI G., LOMBARDI S., PAROTTO M. & VENTURA G. (1979) - *Indagine idrogeologica e geochemica nell'Appennino carbonatico laziale-abruzzese. Primi risultati della campagna 1976-1978*. Atti del I Seminario Informativo del sottoprogramma «Energia geotermica», del C.N.R., Roma.
- CELICO P. (1978) - *Schema idrogeologico dell'Appennino carbonatico centro-meridionale*. Memorie e note dell'Istituto di Geologia applicata, **14**, Napoli.
- CELICO P. (1983) - *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale*. Quaderni della Casa per il Mezzogiorno, **4(2)**, Roma.
- CIVITA M., DE MEDICI G.B., DE RISO R., NICOTERA P. & NOTA D'ELOGIO E. (1973) - *Carta idrogeologica della Campania nord-occidentale e relativa memoria descrittiva*. Atti del II Convegno internazionale sulle acque sotterranee, Palermo.
- C.N.R. VARI AUTORI (1982a) - *Contributo alla conoscenza delle potenzialità geotermiche della Toscana e del Lazio*. Relazione finale del sottoprogramma «Energia Geotermica» del C.N.R., RF, **15**, Roma.
- C.N.R. VARI AUTORI (1982b) - *Contributo alla conoscenza delle risorse geotermiche del territorio italiano*. Relazione finale del sottoprogramma «Energia Geotermica» del C.N.R. RF, **13**, Appendice, Roma.
- C.N.R. VARI AUTORI (in corso di stampa) - *Lithofacies map of Latium-Abruzzi and neighbouring areas*. (Scala 1:250.000) P.F. GEODINAMICA, sottoprogramma 4. La Ricerca scientifica, Quad., **114**, Roma.
- C.N.R. VARI AUTORI (in corso di stampa) - *Structural model of Italy*. (Scala 1:500.000) Sheet n° 3 e 4 P.F. GEODINAMICA, sottoprogramma «Modello strutturale tridimensionale». Firenze.
- HOOKE P.J., BERTRAMI R., LOMBARDI S., O'NIONS R.K. & OXBURGH E.R. (1985) - *Helium-3 anomalies and crust-mantle interaction in Italy*. Geochem. and Cosmochem. Acta, **49**.
- MOUTON J. (1973) - *Contributo allo studio delle acque sotterranee del Lazio meridionale*. Atti del II Convegno internazionale sulle acque sotterranee, Palermo.
- PRZEWLOCKI K. & YURTSEVER Y. (1974) - *Some conceptual mathematical models and digital simulation approach in the use of tracers in hydrological systems*. In «Isotope techniques in groundwater hydrology», **2**, I.A.E.A., Vienna.
- YURTSEVER Y., PAYNE B.R. & GOMEZ MARTOS M. (1986) - *Use of linear compartmental simulation approach for quantitative interpretation of isotope data under time variant flow conditions*. In Mathematical models for interpretation of tracer data in groundwater hydrology. I.A.E.A., TEC-DOC-381, Vienna.
- SIMPSON E.G. & DUCKSTEIN L. (1976) - *Finite state mixing cell-model*. In «Karst hydrology and water resources», Water Resources Publ., Fort Collins Colorado, USA.
- ZUPPI G.M., FONTES J. CH. & LETOILLE R. (1974) - *Isotopes du milieu et circulation d'eaux sulfurées dans le Latium*. Isotope techniques in ground water hydrology, **1**, I.A.E.A., Vienna.