

CARLO BONI*, LUCIA MASTRORILLO*, ELISABETTA PREZIOSI**

* Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi "La Sapienza", Roma

** Dottorato di Ricerca c/o Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi "La Sapienza", Roma

*** C.N.R. Centro di Studio per il Quaternario e per l'evoluzione ambientale

c/o Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi "La Sapienza", Roma

SIMULAZIONE NUMERICA DI ACQUIFERI CARBONATICI: L'ESEMPIO DELLA STRUTTURA MONTE MAGGIO - MONTE PENNA (NOCERA UMBRA)

Viene presentato un primo tentativo di elaborazione di un modello numerico rappresentativo della circolazione idrica sotterranea, in regime stazionario, nella struttura carbonatica Monte Maggio - Monte Penna (Appennino umbro - marchigiano). Per la simulazione è stata utilizzato il programma alle differenze finite Newsam, che prevede una suddivisione dello spazio in maglie quadrate con dimensioni variabili.

Sono noti i seguenti dati: geometria dell'acquifero, natura dei suoi limiti, entità della ricarica pari all'infiltrazione efficace, le quote dei limiti a potenziale imposto, la portata media erogata dalle emergenze. Non è noto il campo dei valori di trasmissività e dei potenziali. Si è inteso sperimentare un metodo che consenta di valutare il campo dei valori delle trasmissività e dei potenziali più coerente con tutti i dati noti. È risultato che, nella struttura considerata, le trasmissività compatibili variano tra $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, mentre i gradienti idraulici variano tra un massimo del 21 per mille e un minimo del 10 per mille.

PAROLE CHIAVE: *Idrogeologia, acquifero carbonatico, simulazione numerica.*

KEY WORDS: *Hydrogeology, carbonate aquifer, numerical simulation.*

Introduzione

Viene presentato uno dei primi tentativi di elaborazione di un modello numerico rappresentativo della circolazione idrica sotterranea, in regime stazionario, in una struttura carbonatica dell'Appennino umbro-marchigiano (dorsale di Monte Maggio - Monte Penna). La ricerca ha lo scopo di sperimentare una metodologia capace di definire il più probabile campo dei valori di trasmissività e di potenziale idraulico, quando siano noti i limiti dell'acquifero, le condizioni idrostrutturali e le portate erogate dalle sorgenti. Ciò costituisce un'innovazione nella modellistica idrogeologica che generalmente utilizza, come dati di partenza, la distribuzione di trasmissività e l'andamento della piezometria, per ottenere come risultato il valore della portata erogata.

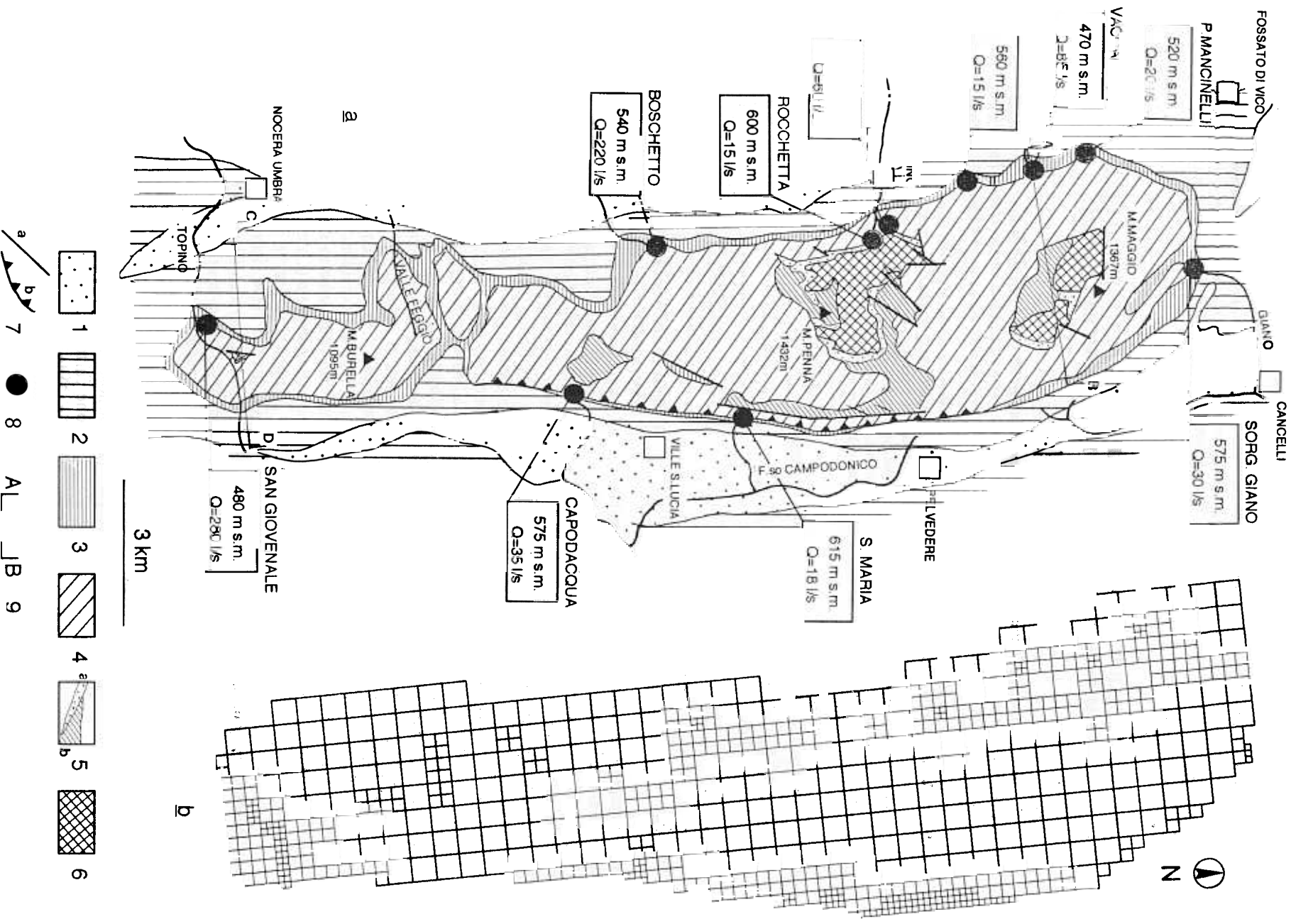
Cenni sulla situazione geografica e geologica dell'area

La dorsale carbonatica di Monte Maggio - Monte Penna si estende per circa 90 km^2 nel settore più interno dell'Appennino calcareo umbro-marchigiano. Con il suo andamento meridiano (da Fossato di Vico a Nocera Umbra), costituisce localmente lo spartiacque

idrografico fra il bacino del Fiume Chiascio, affluente di sinistra del Tevere, e l'alto bacino del Fiume Potenza, con foce nel Mare Adriatico. Nel settore più meridionale (Nocera Umbra) la dorsale è attraversata dall'alto corso del Fiume Topino; nell'estremità settentrionale (Fossato di Vico-Cancelli) sono ubicate le sorgenti del Fiume Giano, affluente del Fiume Esino.

Nella dorsale di Monte Maggio - Monte Penna si rinvencono in affioramento i termini meso-cenozoici della ben nota Successione umbro-marchigiana, sia in serie completa che condensata, che non pare qui il caso di descrivere ulteriormente. È tuttavia necessario chiarire cosa si intenda per "Complesso calcareo-silicomarnoso" del Giurassico medio-superiore. Centamore *et alii* (1979) suddividono in diverse formazioni i sedimenti del Giurassico medio-superiore quando presente in serie completa (Calcari e marne del Sentino, Rosso Ammonitico, Marne a Posidonia, Calcari diasprigni); quando viene riconosciuta la serie condensata, gli stessi Autori identificano una sola formazione (Bugarone) con un contenuto argilloso-marnoso nettamente inferiore a quello presente nella serie completa. Per lo scopo di questa ricerca è parso opportuno considerare tutte le formazioni del Giurassico medio-superiore come "Complesso calcareo-silicomarnoso", differenziando tuttavia nella rappresentazione cartografica (Fig. 1) e nelle sezioni geologiche (Fig. 2) la formazione del Bugarone, come serie condensata. La dorsale di Monte Maggio - Monte Penna è un'anticlinale asimmetrica a vergenza orientale che

Lavoro eseguito con il contributo del Progetto Nazionale 40% M.P.I. "Valutazione delle risorse idriche sotterranee nazionali".



ha rapporti di sovrapposizione con le strutture limitrofe (Scarsella, 1951) e si accavalla sulla contigua sinclinale del Fosso di Campodonico. Lo stile tettonico dominante è quello plicativo, tipico della Successione umbro-marchigiana, a cui si associano e si sovrappongono motivi rigidi che interessano particolarmente il nucleo liassico dell'anticlinale.

Inquadramento idro-strutturale

La successione litostratigrafica è costituita da un'alternanza di formazioni prevalentemente calcaree (Calcare massiccio, Maiolica, Scaglia calcarea) considerate permeabili, e di formazioni marnoso-argillose (Complesso calcareo-silico-marnoso, Marne a Fucoidi, Scaglia cinerea) con funzione di acquiclude e aquitard. Questa situazione può dare origine a una serie di acquiferi separati (Deiana *et alii*, 1970). Il nucleo della struttura è sede di un acquifero contenuto nel Calcare massiccio e nella Maiolica; fra questi è interposto il Complesso calcareo-silico-marnoso, con ruolo di acquiclude, quando presente in serie completa, e di aquitard, quando è costituito dalla serie condensata. L'isolamento idraulico della struttura è assicurato dalle Marne a Fucoidi che la circondano con continuità. Fra Belvedere e Ville Santa Lucia, lungo il margine orientale, le marne risultano laminate e ridotte in affioramento perché implicate lungo un esteso fronte di accavallamento (Fig. 1).

Le principali emergenze si trovano in corrispondenza dei punti topograficamente più depressi, lungo il limite tra la Maiolica e le Marne a Fucoidi. Le sorgenti di Rocchetta e Santo Marzio (Gualdo Tadino) sono ubicate, invece, al contatto Calcare massiccio - Complesso calcareo-silico-marnoso. Tutte le sorgenti

sono parzialmente o totalmente captate per uso potabile. Inoltre sono presenti nell'area due campi pozzi nel Calcare massiccio (Rocchetta) e nella Maiolica (S. Giovenale), ubicati in corrispondenza delle originarie emergenze naturali.

Dati idrologici disponibili

Per ciascuna sorgente è stata valutata con la migliore approssimazione possibile la portata media, riportata nell'ultima colonna di Tab. 1. La stima dei valori di portata media proviene dal confronto e da una successiva sintesi di tutti i dati raccolti. Tutti i dati considerati sono elencati in Tab. 1, compresi quelli relativi ad un'apposita campagna di misure eseguita nel periodo marzo-settembre 1992. Poiché tutte le sorgenti censite risultano captate per uso potabile nella Tab. 1, al valore di portata è stata aggiunta l'entità della portata derivata dichiarata dai gestori. I valori di portata considerati sono elencati nell'ultima colonna di Tab. 1.

La portata media complessiva erogata dalla struttura risulta di circa 780 l/s. Considerando come area di ricarica l'estensione dell'affioramento carbonatico all'interno della cintura impermeabile delle Marne a Fucoidi (circa 64 km²), è stato calcolato un valore di infiltrazione efficace medio di circa 380 mm/a. Il valore ottenuto risulta leggermente inferiore ai valori di infiltrazione efficace noti in letteratura per zone adiacenti (550 mm/a, Boni *et alii*, 1986; 450-550 mm/a Cencetti *et alii*, 1989; 420 mm/a, Boni & Mastrotrillo, 1993). La portata media è presumibilmente sottostimata perché i dati relativi alla portata delle sorgenti sono stati rilevati prevalentemente in periodo di magra.

FIG. 1 — Schema idrogeologico semplificato della struttura di Monte Maggio - Monte Penna (a) e reticolo di maglie utilizzato nella simulazione numerica (b). 1) Scaglia cinerea, Paleogene; 2) Scaglia calcarea, Cretacico superiore; 3) Marne a Fucoidi, Albiano-Aptiano; 4) Maiolica, Cretacico inferiore; 5) Complesso calcareo-silico-marnoso (a: serie condensata, b: serie completa), Giurassico medio-superiore; 6) Corniola e Calcare massiccio indifferenziati, Giurassico inferiore; 7) linee tettoniche principali (a: faglie, b: accavallamento); 8) sorgenti considerate; 9) traccia delle sezioni di figura 2. La struttura idrogeologica è costituita da fasce concentriche con caratteristiche differenti. Le formazioni prevalentemente calcaree (Calcare massiccio, Corniola, Maiolica, Scaglia calcarea) sono circondate da sottili fasce costituite da litotipi marnoso-argillosi (Complesso calcareo-silico-marnoso, Marne a Fucoidi, Scaglia Cinerea) che assumono il ruolo di acquiclude o aquitard. Il Complesso calcareo-silico-marnoso quando è presente in serie condensata (5a) può essere considerato un aquitard. È stata studiata l'area all'interno della cintura impermeabile delle Marne a Fucoidi. Lungo questa cintura sono allineate quasi tutte le emergenze principali delle quali viene indicata in figura la quota e la portata media valutata con i dati disponibili (Tab. 1). Il settore considerato è stato suddiviso in 748 maglie quadrate con lato variabile da 125 a 500 m di lunghezza (metodo delle differenze finite). Le maglie sono più piccole in corrispondenza dei limiti a potenziale imposto (sorgenti) e nei settori in cui l'assetto idro-strutturale richiedeva un maggior dettaglio di rappresentazione. L'area totale è di 93 km². Il confine orientale del modello coincide con le Marne a Fucoidi e il fronte di accavallamento, considerati limiti a flusso nullo. Lungo il bordo occidentale il limite a flusso nullo è stato posto in corrispondenza dell'isobata del tetto della Maiolica di quota 0 m s.l.m.

— Simplified hydrogeological scheme (a) and finite-difference grid for numerical model. 1) Scaglia cinerea, Paleogene; 2) Scaglia calcarea, Upper Cretaceous; 3) Marne a Fucoidi, Albiano-Aptian; 4) Maiolica, Lower Cretaceous; 5) Marly-cherty-limestone Complex (a: condensed series; b: complete series), Middle and Upper Jurassic; 6) Undifferentiated Corniola and Calcare massiccio, Lower Jurassic; 7) main fault (a: fault, b: thrust fault); 8) springs; 9) geologic section. This scheme shows the elongated Monte Maggio-Monte Penna anticline. Most of the main springs lie along the hydraulic boundary of the aquifer system represented by the impervious belt of Marne a Fucoidi formations. The model area is subdivided into a finite-difference grid of 748 nodes, which are 125 to 500 m on a side, corresponding to a surface area of 93 km². Smaller grid blocks were used to represent springs and other zones in which structural complexity asks for a more detailed subdivision. The no-flow boundary of the model, on the eastern side, corresponds to the Marne a Fucoidi outcrop or to the thrust fault. Along the western border the no-flow boundary corresponds to the 0 m above sea level contour line of top of Maiolica formation. The recharge area corresponds to the outcrop of the carbonate formations (64 km²).

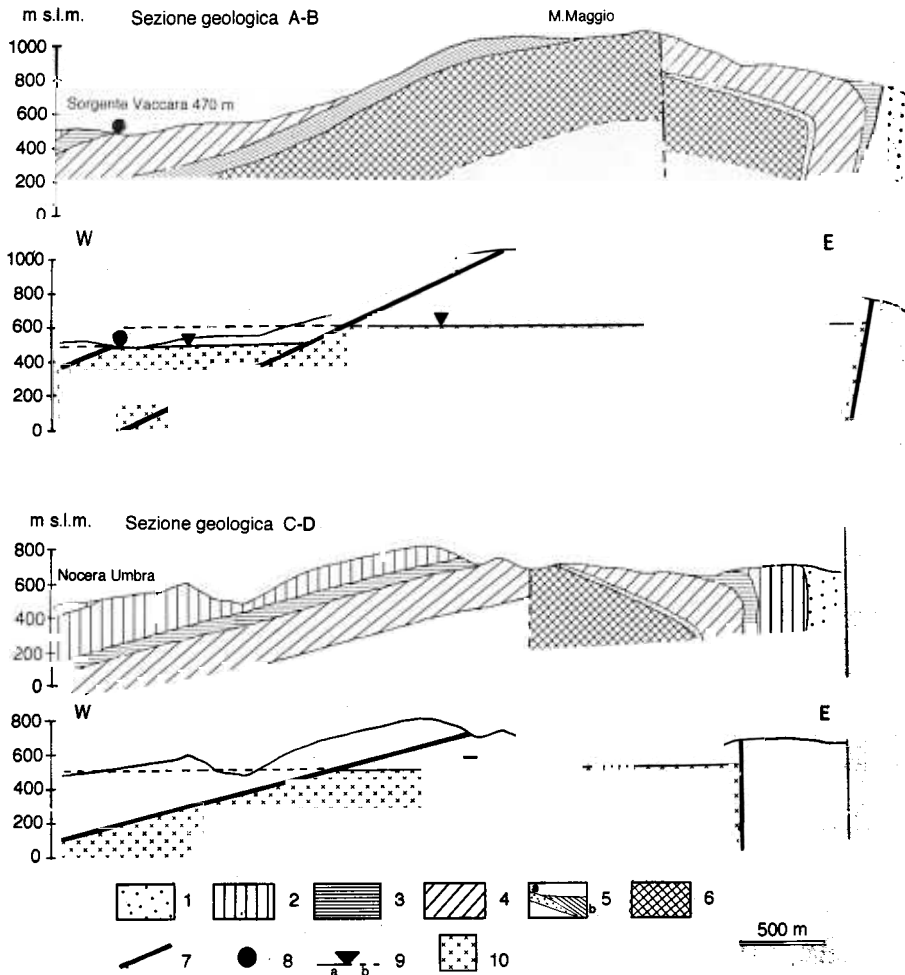


FIG. 2 — Sezioni geologiche semplificate e relative sezioni idrogeologiche schematiche 1) Scaglia cinerea, Paleogene; 2) Scaglia calcarea, Cretacico superiore; 3) Marne a Fucoidi, Albiano-Aptiano; 4) Maiolica, Cretacico inferiore; 5) Complesso calcareo-silico-marnoso (a: serie condensata, b: serie completa), Giurassico medio-superiore; 6) Corniola e Calcare massiccio indifferenziati, Giurassico inferiore; 7) limiti a flusso nullo nelle sezioni idrogeologiche; 8) limiti a potenziale imposto (sorgenti); 9) livello piezometrico (a: relativo alla falda libera, b: relativo alla falda imprigionata); 10) settore saturo degli acquiferi considerati. Non viene rappresentato l'acquifero della Scaglia calcarea. Sezione A-B: nella dorsale di Monte Maggio il Complesso calcareo-silico-marnoso si presenta in serie completa lungo il versante occidentale e in serie condensata sul fianco orientale. Secondo questa interpretazione nel settore nord orientale si verifica uno scambio idraulico fra Calcare massiccio e Maiolica, mentre nel settore nord occidentale i due acquiferi risultano separati da un limite a flusso nullo, rappresentato dal Complesso calcareo-silico-marnoso. Nella sezione idrogeologica schematica, posta sotto la sezione geologica, vengono rappresentati i limiti degli acquiferi e i livelli piezometrici relativi alle due falde individuate. La falda con quota di saturazione più bassa è contenuta nella Maiolica,

ha il suo livello di base in corrispondenza della sorgente Vaccara (470 m s.l.m.) ed è sostenuta dal Complesso calcareo-silico-marnoso. La falda di base ha quota di saturazione a circa 600 m s.l.m. e risulta pertanto imprigionata sotto il Complesso calcareo-silico-marnoso. La sezione geologica C-D è stata tracciata nell'estremità meridionale della struttura. In essa è ben evidente la presenza di una faglia il cui rigetto è tale da mettere in contatto il Calcare massiccio con la Maiolica assicurando quindi una continuità idraulica fra le due formazioni. Nella sezione idrogeologica relativa viene rappresentato il livello di saturazione della falda principale in prossimità del suo livello di base (S. Giovenale).

— Geologic sections and corresponding hydrogeologic sections. 1) Scaglia cinerea, Paleogene; 2) Scaglia calcarea, Upper Cretaceous; 3) Marne a Fucoidi, Albian-Aptian; 4) Maiolica, Lower Cretaceous; 5) Marly-cherty-limestone Complex (a: condensed series; b: complete series), Middle and Upper Jurassic; 6) Undifferentiated Corniola and Calcare massiccio, Lower Jurassic; 7) no-flow boundary; 8) constant-head node (springs); 9) potentiometric surface (a: unconfined, b: confined); 10) saturated aquifer. Geologic section A-B represents the northern part of Monte Maggio structure. On the western side the complete Marly-cherty-limestone complex act as a no-flow boundary between Calcare massiccio and Maiolica. On the East, the same reduced complex probably provides hydraulic connection between the two carbonate formations. In this hypothesis the base aquifer is confined under the Marly-cherty-limestone Complex on the western border and lies unconfined on the East. Geologic section C-D shows a geologic fault with a great vertical displacement that provides good hydraulic connection between Calcare massiccio and Maiolica. The no-flow boundaries are provided by the Marne a Fucoidi formation.

Simulazione numerica dell'acquifero carbonatico

La simulazione idrodinamica è stata realizzata con il programma Newsam (Ledoux & Levassor, 1989). Il settore esaminato è stato discretizzato, col metodo delle differenze finite, in 748 maglie quadrate, il lato delle quali varia da 125 a 500 m di lunghezza. L'area considerata è di 93 km² ed è quindi più estesa dell'area di ricarica (Fig. 1b). Il programma Newsam, per la simulazione del regime stazionario, richiede, come dati di input, la definizione della geometria dell'ac-

quifero, delle condizioni idrodinamiche ai suoi limiti, l'entità della ricarica, la trasmissività media di ogni maglia, le quote dei limiti a potenziale imposto. L'afflusso è un dato sperimentale pari al valore di infiltrazione efficace medio ricavato dall'analisi di bilancio (380 mm/a). Le quote dei limiti a potenziale imposto corrispondono alle quote delle sorgenti, variabili fra 470 e 600 m s.l.m. La distribuzione della trasmissività, unico parametro di input di cui non sono noti dati sperimentali, è stata ipotizzata arbitrariamente. Nella taratura del modello la distribuzione dei valori di tra-

	quota	1		2		3		4			5			6
	m	data	portata l/s	data	portata l/s	data	portata l/s	data	portata l/s #	prelievo l/s	data	portata l/s #	prelievo l/s	portata media l/s
S.Giovenale (campo pozzi)	480												280	280
Boschetto	540	23-10-1890 7-10-1892 27-01-1898	26 54 80			-10-1975 -12-1975 -01-1976 -02-1976 -03-1976 -03-1976 -05-1976 -06-1976 -07-1976	150 850 250 200 600 300 1000 300 250	1-10-1988 ? ? ? ?	306 293 206 339 237		13-05-1992 9-08-1992 22-09-1992	147 170 130	17	220
Rocchetta (campo pozzi)	600												15	15
Santo Marzio	580	1890	18-27								13-05-1992 9-08-1992 22-09-1992	0 0 0	15-90	60
Cappuccini	560	8-08-1892 14-10-1895 27-01-1898	41 47 52					27-09-1988 17-10-1988 8-11-1988 13-02-1988 18-01-1989	81 81 100 107 104	19	13-05-1992	5*	8	15
Vaccara	470	8-08-1892 14-10-1895 27-01-1898	28 42 37					5-08-1988 13-09-1988 12-10-1988 8-11-1988 13-12-1988 18-01-1989	74 53 42 60 62 59	28	13-05-1992 10-08-1992 22-09-1992	75 33 35	30	85
Palazzo Mancinelli	525										13-05-1992 10-08-1992 22-09-1992	5* 11* 1*	15	20
Sorg. del Giano	575										13-05-1992 -07-1992 10-08-1992 22-09-1992	40* 20 17 17	2	30
	615										13-05-1992 10-08-1992 22-09-1992	28 18 10	2	18
Capodacqua	575			-07-1904 -09-1904 -11-1904 -05-1908 -10-1908	102 104 89 124 92			27-09-1988 17-10-1988 8-11-1988 13-12-1988 18-01-1989	2,5* 2,5* 2,5* 2,5* 2,5*	35	13-05-1992	2*	35	35

TAB. 1 — Sintesi dei dati di portata di ciascuna sorgente. #) misure delle portate rilasciate in alveo a valle delle captazioni; *) valori di portata stimati; 1) Ministero Agricoltura Industria e Commercio (1889); 2) Perrone E. (1910); 3) Conversini *et alii* (1979); 4) Regione Umbria (1988-89); 5) misure di portata effettuate nel 1992; 6) portata media considerata.

— Synthesis of all available data about spring discharges. #) measurement of the outlet of water released from ground-water catchments. *) estimated discharges. 1) Ministero Agricoltura Industria e Commercio (1889); 2) Perrone E. (1910); 3) Conversini *et alii* (1979); 4) Regione Umbria (1988-89); 5) discharges measured in 1992; 6) mean discharge adopted for modelling.

smisività è stata più volte modificata fino ad ottenere quella che fornisce la migliore corrispondenza fra i valori di portata sperimentali e simulati. Il risultato dell'elaborazione numerica fornisce la distribuzione del potenziale idraulico in ogni maglia e la portata erogata da ciascuna sorgente. Condizioni necessarie per l'attendibilità del risultato sono: 1) la superficie piezometrica degli acquiferi liberi deve trovarsi ovunque al di sopra delle quote delle emergenze e al di sotto, sia dei limiti a flusso nullo che circondano la struttura, sia del reticolo idrografico privo di deflusso che la incide. La posizione di questa superficie è quindi ristretta all'interno di un campo di quote ben determinato; 2) i gradienti idraulici devono essere compatibili con quelli noti per altre strutture dell'arco umbro-marchigiano, normalmente compresi tra 10 e 30 per mille; 3) le portate delle sorgenti simulate devono essere confrontabili con quelle osservate sperimentalmente.

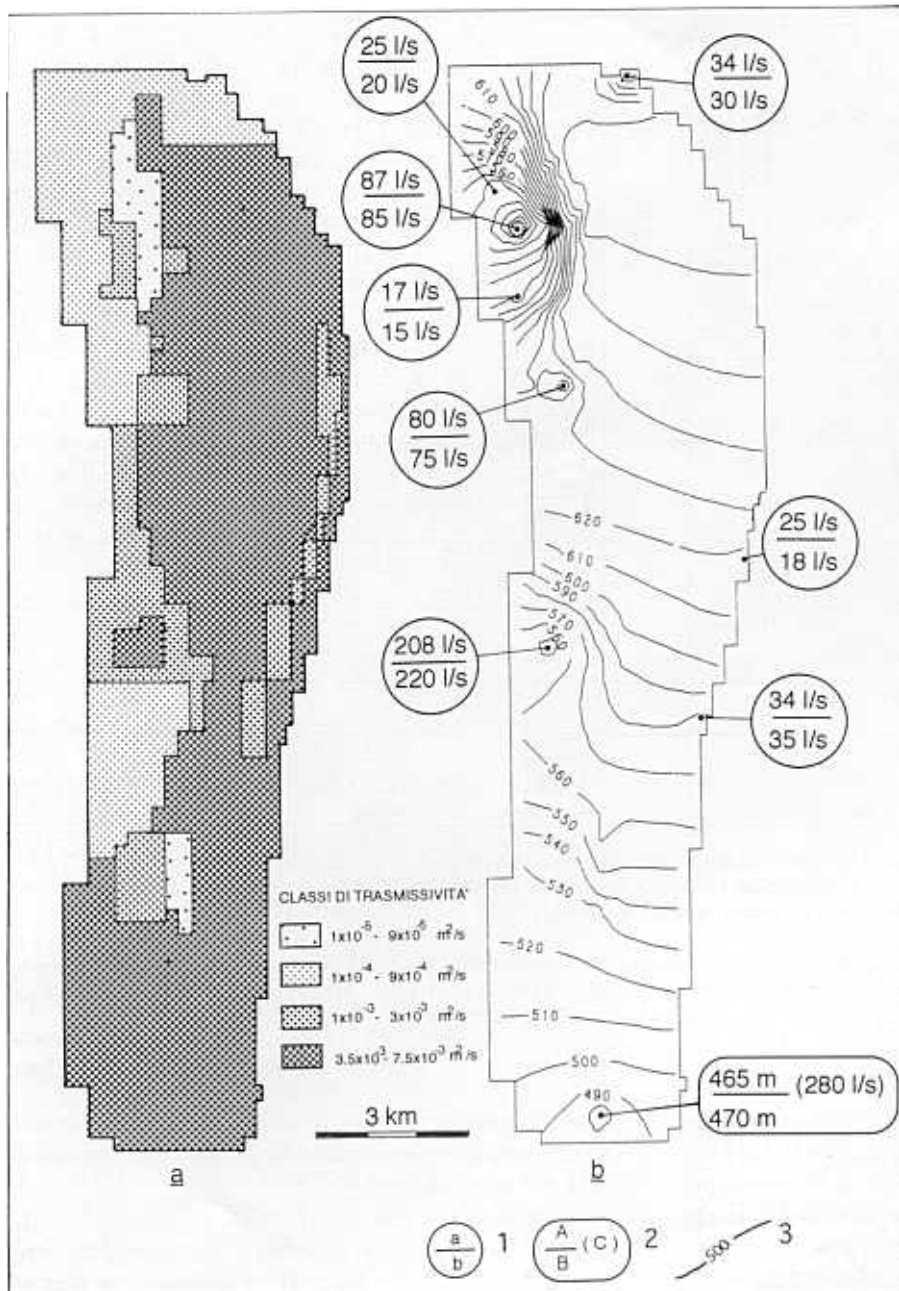
Applicazioni

Vengono descritti i risultati ottenuti da diversi tentativi di simulazione. Partendo da un'ipotesi di lavoro

estremamente semplificata, si è arrivati gradualmente ad ottenere il risultato ritenuto più coerente con tutti i dati sperimentali noti.

In una prima fase è stato allestito un modello numerico, in regime stazionario, ipotizzando un unico acquifero costituito dal settore saturo del Calcarea massiccio e della Maiolica, indifferenziati e comunicanti attraverso il Complesso calcareo-silico-marnoso interposto. Per ottenere la migliore corrispondenza fra portate delle sorgenti sperimentali e simulate è stato necessario utilizzare una distribuzione di trasmissività compresa fra $4 \text{ E-}5$ e $7,5 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$ (schema a di Fig. 3). La superficie piezometrica ottenuta dalla simulazione raggiunge quota 660 m nel settore nord orientale, da cui digrada verso sud con un gradiente idraulico medio del 12 per mille. Presenta un'evidente anomalia nel settore nord occidentale, dove il gradiente raggiunge valori troppo elevati per poter essere considerati attendibili (150 per mille) (schema b di Fig. 3).

In una seconda fase, considerando con maggior dettaglio le condizioni idrostrutturali e i risultati della simulazione precedente, è stato possibile individuare



observed water level, C: average pumping); 3) computed potentiometric contours. The aquifer is modeled as having no-flow boundaries around its sides. At each node, arbitrary values of transmissivity were input. Rates of areal recharge (effective infiltration), constant head nodes (springs) and pumping value at S. Giovenale wells are also input data. Output data are: head at each node and discharge at the constant-head nodes. Model-derived transmissivities range between 4 E-5 and $7.5 \text{ E-3} \text{ m}^2/\text{s}$; 3.5 E-3 to $7.5 \text{ E-3} \text{ m}^2/\text{s}$ values are prevailing. The potentiometric surface provided by computer simulation slopes gradually from North (660m) to South (470m) on a gradient of 1.2 per cent. In the North-Western area the computed hydraulic gradient is too steep to be acceptable (15 per cent).

piccoli acquiferi presumibilmente sospesi in alcune aree periferiche della struttura. In particolare nel settore settentrionale, dove nella fase precedente venivano riconosciuti valori anomali del gradiente idraulico, è stato individuato un acquifero sospeso nella Maiolica, sostenuto dal complesso Calcereo-silico-marnoso e quindi isolato dalla sottostante falda di base (sezione A-B di Fig. 2). La falda contenuta nella Maiolica

Fig. 3 — Primo tentativo di simulazione numerica in regime stazionario) ipotesi di un solo acquifero. Schema (a): distribuzione dei valori di trasmissività; schema (b): andamento della superficie piezometrica fornito dalla simulazione. 1) portata erogata dalle sorgenti (a): valore fornito dalla simulazione, b: valore sperimentale); 2) campo pozzi S. Giovenale (A: livello dinamico fornito dalla simulazione, B: livello dinamico osservato, C: portata emunta dal campo pozzi); 3) isopieze fornite dalla simulazione. Sono stati forniti a questo modello: i limiti a flusso nullo; i limiti a potenziale imposto (emergenze); i valori di trasmissività delle maglie, arbitrariamente assegnati; l'infiltrazione efficace. Il modello fornisce i valori di portata erogati dalle emergenze e la superficie piezometrica. Sono stati utilizzati valori di trasmissività compresi fra 4 E-5 e $7.5 \text{ E-3} \text{ m}^2/\text{s}$, con netta prevalenza di quelli compresi fra 3.5 e $7.5 \text{ E-3} \text{ m}^2/\text{s}$ scelti in modo da ottenere la migliore corrispondenza tra i valori di portata sperimentali e simulati (schema b). Per il campo pozzi S. Giovenale viene imposto il valore di portata emunta e si ricava la quota media del livello dinamico del campo pozzi. La corrispondenza fra valori simulati e sperimentali può considerarsi ottima. La superficie piezometrica fornita dalla simulazione digrada da nord (660 m) verso sud (470 m) con un gradiente idraulico medio del 12 per mille, ma presenta un'evidente anomalia nel settore nord occidentale dove il gradiente raggiunge valori troppo elevati per poter essere considerati attendibili (150 per mille).

— First step in the steady-state simulation: a: transmissivity values based on model calibration; b: computed potentiometric surface. 1) spring discharge (a: simulated discharge, (b: observed discharge); 2) S. Giovenale wells (A: simulated water level, B:

avrebbe una limitatissima estensione, compatibile con la portata erogata dalla sua sorgente e troverebbe il suo livello di base a quota 470 m (sorgente Vaccara) lungo il limite di permeabilità costituito dalle Marne a Fucoidi. La falda di base è, invece, caratterizzata da una circolazione profonda che troverebbe i suoi punti di recapito a 600 m (sorgenti Rocchetta e Santo Marzio), a 540 m (sorgente Boschetto) e a quota 470 m in

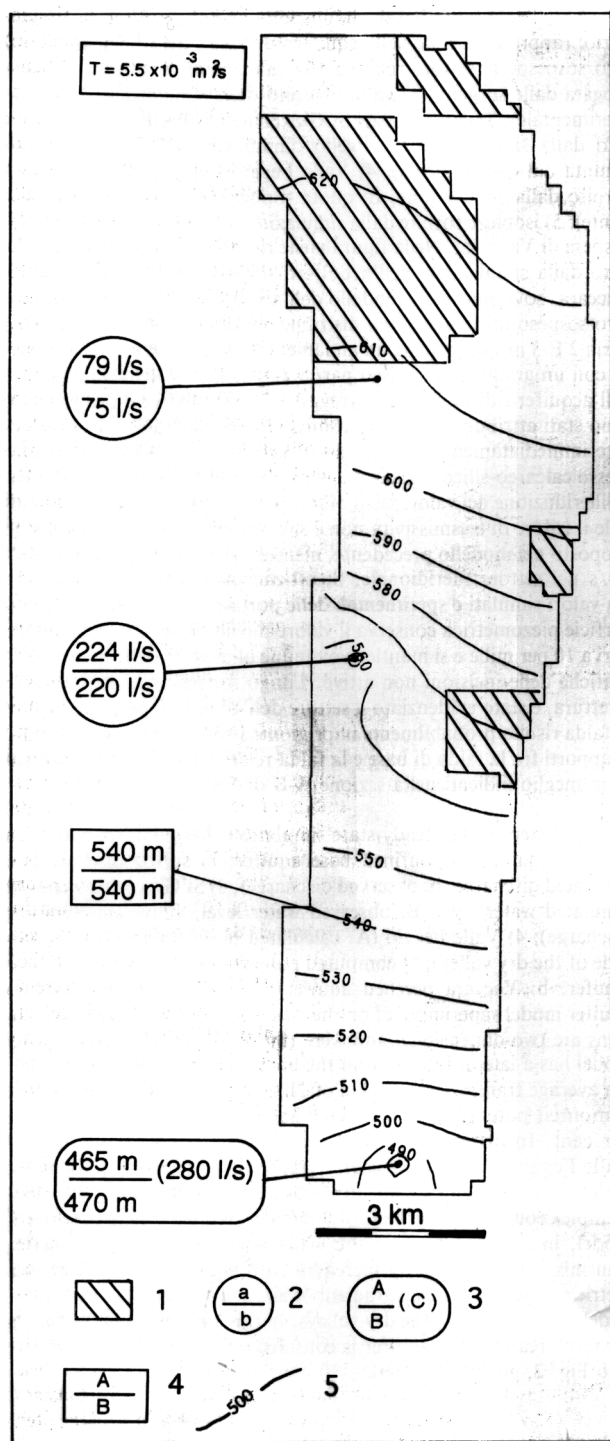


FIG. 4 — Secondo tentativo di simulazione numerica in regime stazionario: ipotesi di un acquifero di base e di alcuni acquiferi sospesi. 1) acquiferi sospesi; 2) portata erogata dalle sorgenti (a: valore fornito dalla simulazione, b: valore sperimentale); 3) campo pozzi S. Giovenale (A: livello dinamico fornito dalla simulazione, B: livello dinamico osservato, C: portata emunta dal campo pozzi); 4) Valle Feggio (A: livello piezometrico fornito dalla simulazione, B: quota topografica dell'alveo non drenante); 5) isopieze fornite dalla simulazione. Vengono riportate le aree di ricarica relative ad acquiferi sospesi individuati a seguito di una più accurata analisi idrostrutturale e dei risultati del primo tentativo di simulazione. Le sorgenti alimentate da questi acquiferi non sono state prese in considerazione nell'allestimento di questo secondo modello, che rappresen-

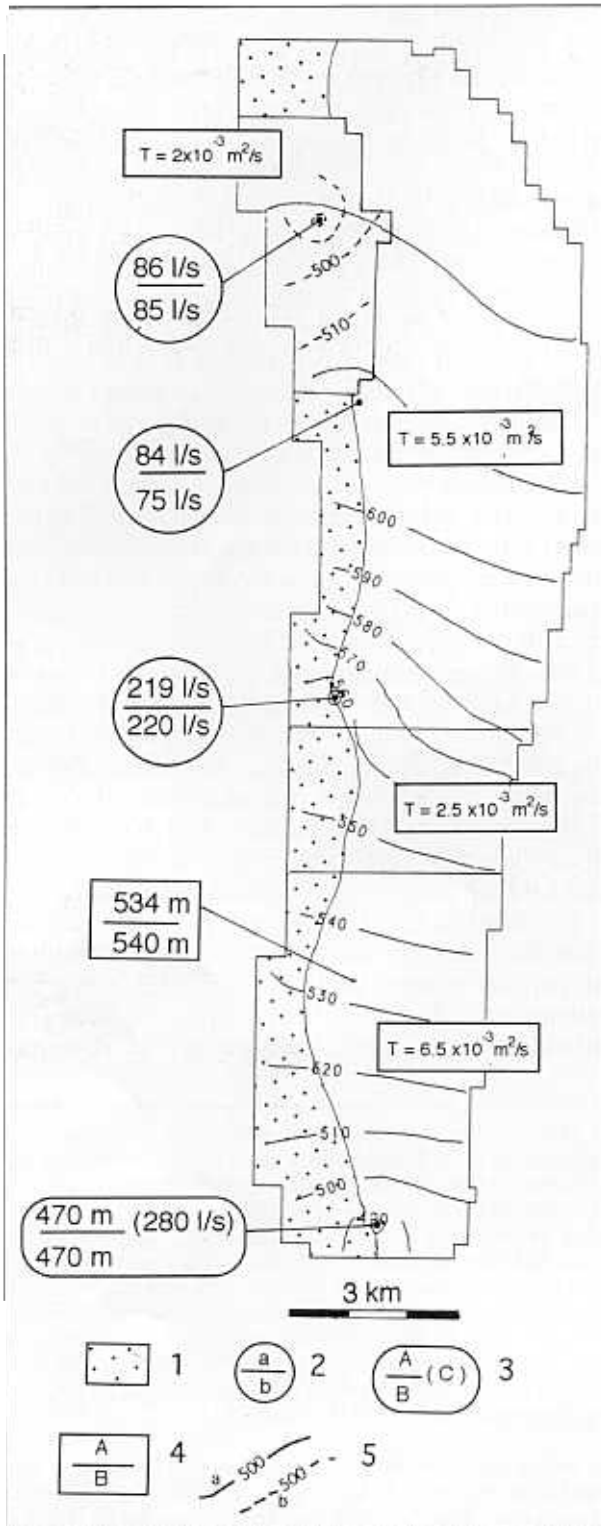
corrispondenza del livello dinamico del campo pozzi di S. Giovenale, ubicato all'estremità meridionale della dorsale. La circolazione interesserebbe in modo articolato, ma continuo, sia il Calcere massiccio che la Maiolica. Secondo il modello devono esistere delle condizioni idrostrutturali che consentano la continuità idraulica tra i due termini calcarei. Il Complesso calcareo-silico-marnoso assume localmente spessori molto ridotti e risulta interessato da faglie con notevole rigetto, tanto da consentire presumibilmente lo scambio idrico e la continuità idraulica fra i due principali acquiferi carbonatici (sezione C-D di Fig. 2).

Sulla base di queste considerazioni è stato allestito un secondo modello numerico che considera l'acquifero di base separatamente dagli acquiferi sospesi (Fig. 4). Per l'acquifero basale è stata ipotizzata una distribuzione uniforme della trasmissività pari a $5,5 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$. I valori di portata delle singole sorgenti considerate, ottenuti dalla simulazione, risultano confrontabili con i dati sperimentali. Il gradiente piezometrico medio, pari a circa 10 per mille, è compatibile con quelli noti per acquiferi con caratteristiche analoghe. Tuttavia questa soluzione non è accettabile perché la superficie piezometrica, fornita dalla simulazione, viene a trovarsi a quote più alte dell'incisione del fosso di Valle Feggio (540 m), che risulta invece privo di emergenze (Fig. 4).

Si è quindi realizzata una terza fase di simulazione in cui l'iniziale distribuzione uniforme della trasmissività è stata leggermente modificata, attribuendo valori più bassi ($2,5 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$) ad un settore in cui il Complesso calcareo-silico-marnoso sembra costituire un parziale ostacolo al deflusso (Fig. 5). Nel settore settentrionale il valore di trasmissività non è stato modificato rispetto a quello utilizzato nel modello prece-

ta solo l'acquifero principale. È stata utilizzata una distribuzione uniforme dei valori di trasmissività pari a $5,5 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$. Viene rappresentato l'andamento della superficie piezometrica dell'acquifero di base fornita dalla simulazione ed il valore delle portate sperimentali e simulate delle sorgenti basali. La corrispondenza fra questi valori può ritenersi buona. L'andamento della superficie piezometrica ottenuta ha un gradiente idraulico medio del 10 per mille che si riscontra correntemente in questo tipo di strutture. Tuttavia si nota un'anomalia a quota 540 m in corrispondenza dell'incisione di Valle Feggio (4), dove la quota della superficie freatica coincide con la quota topografica del fosso che risulta invece completamente privo di emergenze durante l'intero anno.

— Second step in the steady-state simulation: a base aquifer separated from smaller perched aquifers. 1) perched aquifers; 2) spring discharge (a: simulated discharge, b: observed discharge); 3) S. Giovenale wells (A: simulated water level, B: observed water level, C: average pumping discharge); 4) Valle Feggio (A: calculated piezometric head, B: altitude of the dry valley); 5) computed potentiometric contours. This figure shows recharge areas related to perched aquifers which feed springs not connected to a base aquifer. The base aquifer feeds S. Marzio-Rocchetta springs, (600 m), Boschetto spring and S. Giovenale wells (470 m). The computed potentiometric surface slopes from North to South on a mean gradient of 1.0 per cent. This solution is not completely satisfactory because in Valle Feggio, which is always dry, the elevation of the computed potentiometric surface reaches ground level.



dente ($5,5 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$), mentre è stato aumentato a $6,5 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$ nel settore meridionale. La superficie piezometrica ottenuta, conservando un gradiente idraulico del 10 per mille, si mantiene ovunque al di sotto delle quote topografiche delle incisioni non attive.

È stato allestito anche un modello idrodinamico del settore saturo dell'acquifero sospeso che alimenta la sor-

FIG. 5 — Terzo tentativo di simulazione numerica in regime stazionario: rappresentazione dell'acquifero di base e del principale acquifero sospeso. 1) settore relativo alla falda imprigionata; 2) portata erogata dalle sorgenti (a: valore fornito dalla simulazione, b: valore sperimentale); 3) campo pozzi S. Giovenale (A: livello dinamico fornito dalla simulazione, B: livello dinamico osservato, C: portata emunta dal campo pozzi); 4) Valle Feggio (A: livello piezometrico fornito dalla simulazione, B: quota topografica dell'alveo non drenante); 5) isopieze fornite dalla simulazione (a: falda di base, b: falda sospesa di Vaccara). Nella figura viene rappresentato il modello ottenuto dalla simulazione dell'acquifero sospeso relativo alla sorgente Vaccara, sovrapposto al modello dell'acquifero di base. Per l'acquifero sospeso utilizzando una distribuzione uniforme di trasmissività pari a $2 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$ si ottiene un andamento della superficie piezometrica con un gradiente idraulico pari a 21 per mille. Nella simulazione dell'acquifero di base, per correggere l'anomalia mostrata in fig.4, sono stati attribuiti valori di trasmissività pari a $2,5 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$ al settore immediatamente a sud della sorgente Boschetto, dove il Complesso calcareo-silico-marnoso determina, presumibilmente, una sensibile riduzione dei valori medi di trasmissività. Nel settore settentrionale il valore di trasmissività non è stato modificato rispetto a quello proposto nel modello precedente, mentre è stato aumentato a $6,5 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$ nel settore meridionale. Si ottiene un'ottima corrispondenza fra valori simulati e sperimentali delle portate; l'andamento della superficie piezometrica conserva il valore medio del gradiente idraulico pari a 10 per mille e si mantiene ovunque al di sotto delle quote topografiche delle incisioni non attive. Lungo il bordo occidentale della struttura, è stato evidenziato il settore dell'acquifero principale in cui la falda risulta probabilmente imprigionata sotto le Marne a Fuocidi. I rapporti fra la falda di base e la falda relativa alla sorgente Vaccara sono meglio indicati nella sezione A-B di Fig. 2.

— Third step in the steady-state simulation: base aquifer and main perched aquifer. 1) confined base aquifer; 2) spring discharge (a: simulated discharge, b: observed discharge); 3) S. Giovenale wells (A: simulated water level, B: observed water level, C: average pumping discharge); 4) Valle Feggio (A: calculated piezometric head, B: altitude of the dry valley); 5) computed potentiometric contours (a: base aquifer, b: Vaccara perched aquifer). This figure shows Vaccara aquifer model superimposed on the base aquifer model. Both simulations are two-dimensional and were run separately. Vaccara aquifer model has a lateral inflow from the unsaturated area of the aquifer. An average transmissivity value of $2\text{E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$ was introduced. The computed potentiometric surface has an average gradient of 2.1 per cent. In order to lower the computed heads in the area of Valle Feggio, the transmissivity was reduced ($2.5\text{E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$) at the nodes corresponding to an area where the Marly-cherty-limestone Complex could hinder ground-water flow. In the southern area of the model, in order to balance the water level of S. Giovenale wells, transmissivity was slightly increased to $6.5\text{E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$. The potentiometric surface has a mean gradient of about 1 per cent and lies always under the elevation of the dry valleys. In this hypothesis in the North-western area the base aquifer is confined under Vaccara aquifer (see also Fig. 2, geologic section A-B).

gente Vaccara, già descritto. Utilizzando una distribuzione uniforme della trasmissività pari a $2 \text{ E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$ si ottiene un andamento della superficie piezometrica con gradiente idraulico pari a 21 per mille. Confrontando l'andamento delle superfici piezometriche relative alle due falde considerate (Fig. 5) risulta evidente che la falda di base si troverebbe imprigionata (quota di satura-

zione 620-610 m) sotto il Complesso calcareo-silico-marnoso e al di sotto della falda sospesa (quota di saturazione 510-470 m). Si può ritenere che in alcuni punti topograficamente più depressi, la falda di base possa trovarsi in condizioni artesiane. Questa considerazione risulterebbe di particolare importanza per gli eventuali risvolti applicativi che il proseguimento di questa ricerca potrebbe approfondire.

Conclusioni

La ricerca ha messo in evidenza che la realizzazione di un modello di simulazione numerica, che

intenda valutare il più probabile campo dei valori di trasmissività e dei potenziali all'interno di una struttura idrogeologica, richiede un'approfondita conoscenza della situazione stratigrafica e strutturale della realtà che si vuole rappresentare. Richiede, inoltre, attendibili dati sul regime di portata delle emergenze naturali e artificiali, che permettano di definire i valori della portata media. I metodi adottati consentono di verificare l'attendibilità di diverse ipotesi sulla circolazione delle acque sotterranee, di correggere gli errori più evidenti e di pervenire alla soluzione più coerente con tutti i dati a disposizione.

SUMMARY

This paper presents an application of computer simulation to ground-water flow of a carbonate aquifer in Central Apennines. A two-dimensional simulation in steady-state conditions was attempted using finite-difference technique. The Monte Maggio - Monte Penna aquifer system (Fig. 1) consists of the carbonate formations of Calcare massiccio (Lower Liassic) and Maiolica (Lower Cretaceous) separated by a generally less permeable sequence, referred to in this work as the "Marly-cherty-limestone complex" ("Serie umbro-marchigiana"). The thickness of this complex ranges in the investigated area between 0 and 100 m. The main springs generally lie along the hydraulic boundary of the aquifer, represented by the impervious formation of Marne a Fuocidi (Upper Cretaceous). Spring discharge is known on the basis of historical information and measurements made during 1988 and 1992 (Tab.1). Effective infiltration (380 mm/year) is evaluated dividing mean total discharge (780 l/s) by its recharge area (64 km²). The elevation of potentiometric surface is unknown. The only available information is the altitude of springs and the elevation of the valleys without inflow. Admissible gradients range between 1 and 3 per cent. No data were available about transmissivities, but simulation suggests average values mostly ranging between 1.0 E-3 and 7.5 E-3 m²/s. To calibrate the model computed discharges are matched to observed discharges. Numerical simulation was attempted in three phases. In the first step, in order to get the best match between observed dis-

charge and simulated discharge at each spring, an arbitrary choice of transmissivity value distribution in the area was made (Fig. 3a). This model doesn't take into account the confining role of the Cherty-marly-limestone complex but supposes the existence of a continuous aquifer with very different transmissivity values. The computed potentiometric surface (Fig. 3b) slopes from North to South on a mean gradient of 1.2 per cent. In the north-western area the gradient is too steep to be acceptable. In the second step (Fig. 4) some of the springs were considered as fed by small perched aquifers. An average transmissivity value of 5.5 E-3 m²/s was introduced. The computed potentiometric surface, related only to 3 springs or wells, slopes from north to south on a gradient of 1.0 per cent and the comparison of observed versus simulated discharge is good. This solution is not completely satisfactory because in Valle Feggio, which is always dry, the elevation of the computed potentiometric surface reaches ground level. In the third step an area with a lower transmissivity (2.5 E-3 m²/s) was introduced, and the computed potentiometric surface matches with all the observed data. The small area of the perched Vaccara aquifer was modeled separately, using a transmissivity value of 2.0 E-3 m²/s. The computed potentiometric surface of the base aquifer is about 100m higher than the perched one (Fig. 2, hydrogeological section A-B).

Manoscritto presentato il 28 ottobre 1992.

BIBLIOGRAFIA

- 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. A cura dell'Azienda servizi Municipalizzati, Brescia.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - Schema idrogeologico dell'Italia centrale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 35: 991-1012, 2 tavv., Roma.
- CENCETTI C., DRAGONI W. & NEJAD MASSOUM M. (1989) - Contributo alle conoscenze delle caratteristiche idrogeologiche del Fiume Nera (Appennino centro-settentrionale). *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 24: 191-210, Bari.
- CENTAMORE E., CHIOCCHINI M., CHIOCCHINI U., DRAMIS F., GIARDINI G., JACOBACCI A., MARTELLI G., MICARELLI A. & POTETTI M. (1979) - Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Note illustrative del Foglio 301 Fabriano. *Servizio Geologico d'Italia*, Roma.
- CONVERSINI P., NOTO P. & SABATINI P. (1976) - Dati caratteristici dei corpi idrici presenti nel bacino del F. Topino a nord di Foligno. *Documenti Studi Ricerche. Provincia di Perugia*, Perugia.
- DEIANA G., DRAMIS F. & MORETTI A. (1970) - Condizioni idrogeologiche delle formazioni mesozoiche e paleogeniche dell'Appennino marchigiano. *Atti Conv. Inter. sulle Acque Sotterranee 6-8 dic. 1970*: 240-247, Palermo.
- LEDoux E. & LEVASSOR A. (1989) - Notice Newsam. *Inter. Rep. Ecole des Mines, LHM/RD/89/57*, Paris.
- MINISTERO DI AGRICOLTURA, INDUSTRIA e COMMERCIO (1889) - Carta idrografica d'Italia. Tevere. Roma.
- PERRONE E. (1910) - Carta idrografica d'Italia. Reno, Lamone, Fiumi Uniti, Savio, Marecchia, Foglia, Esino, Potenza, Chienti, Tenna, Aso, ed altri minori. *Ministero di Agricoltura, Industria e Commercio*, Roma.
- REGIONE UMBRIA (1988-89) - Piano ottimale di utilizzazione delle risorse idriche della Regione. Studio dei massicci carbonatici. Perugia. Lavoro inedito.
- SCARSELLA F. (1951) - Un aggruppamento di pieghe nell'Appennino umbro-marchigiano. La catena di M. Nerone-M. Catria-M. Cucco-M. Penna-Colfiorito-M. Serano. *Boll. Soc. Geol.*, 73: 307-320, Roma.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1966) - Carta geologica d'Italia alla scala 1:100.000 Foglio 123 Assisi, *Poligrafico dello Stato*, Napoli.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1979) - Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio 301 Fabriano, *Poligrafico dello Stato*, Roma.