

CONSIDERAZIONI SULLA SIMULAZIONE MATEMATICA DELL'ACQUIFERO CARSICO DEI MONTI LEPINI (APPENNINO CENTRALE, ITALIA)

Carlo BONI (*) & Marco PETITTA (**)

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

(**) Dottorato di Ricerca, Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

Abstract:

The possibility of applying numerical simulation of ground water flow to the large hydrogeological structures of Latium-Abruzzi carbonate Apennines has been verified.

The methodological approach to numerical simulation of the fractured aquifer of Monti Lepini is based on two considerations:

a) the great stability of the discharge regimen of the main springs, little affected by karstic systems, allows the use of methods of *equivalent porous media*;

b) the choice of the *inverse problem* approach was obliged.

Therefore discharge values were used to calibrate the models, adjusting the *equivalent transmissivity* and storage coefficient in order to obtain the best match between computed and observed discharges.

1. Introduzione

Viene descritta la metodologia utilizzata per la realizzazione di simulazioni numeriche di un acquifero carsico, attraverso l'impiego di un modello matematico alle differenze finite.

La ricerca è stata condotta sulla struttura idrogeologica dei Monti Lepini (Appennino carbonatico laziale-abruzzese) al fine di completare lo schema idrogeologico già esistente, tenendo presenti due finalità principali:

- in primo luogo, si è inteso verificare la possibilità di eseguire attendibili simulazioni numeriche degli acquiferi carsici dell'Appennino centrale, quantomeno al fine di controllare la coerenza delle ipotesi di circolazione formulate attraverso modelli concettuali (Király, 1993) e basate sull'interpretazione dei dati sperimentali rilevati al contorno. In particolare si è valutata la possibilità di utilizzare un modello alle differenze finite, concepito per la simulazione di acquiferi porosi;

- si è voluto inoltre ricavare informazioni il più possibile attendibili sui parametri idrodinamici dell'acquifero dei Monti Lepini, del quale sono state sufficientemente studiate le condizioni al contorno, al fine di allestire modelli previsionali rappresentativi dell'evoluzione della situazione idrogeologica, a seguito di modifiche naturali o artificialmente indotte.

Precedenti studi sull'idrogeologia dell'Appennino centrale hanno proposto uno schema idrogeologico (Boni et al., 1986; Celico, 1983; Bartolomei et al., 1980) che identifica acquiferi indipendenti, dei quali sono noti i limiti di permeabilità, la portata media delle sorgenti che alimentano, il valore dell'infiltrazione efficace ed elementi di valutazione del gradiente idraulico. L'analisi di bilancio delle portate in ingresso e in uscita dalle singole strutture rende accettabile il quadro idrogeologico proposto, ma non permette di ricavare informazioni sufficienti sui processi che si sviluppano all'interno degli acquiferi ed i valori dei parametri idrodinamici.

E' ben noto che la valutazione dei campi dei possibili valori medi di trasmissività e coefficiente di immagazzinamento, risulta estremamente difficoltosa in acquiferi carbonatici fraturati; infatti, le informazioni dirette che possono essere ricavate attraverso prove di pompaggio forniscono risultati che hanno valore locale e non sono estrapolabili come valori medi dell'acquifero; di conseguenza nello studio di acquiferi fraturati, si deve rinunciare a conoscere i campi fisici *reali* di questi parametri a mezzo di prove dirette (Király, 1975).

La realizzazione di simulazioni matematiche può comunque condurre a risultati significativi, quando sia possibile valutare campi di valori dei parametri idrodinamici coerenti con i modelli concettuali allestiti e con i dati sperimentali acquisiti.

E' possibile quindi impiegare modelli numerici, a scopo interpretativo e previsionale, tenendo ben presenti almeno due ordini di problemi principali:

a) i modelli di simulazione numerica, che sono sempre rappresentazioni approssimate e semplificate della realtà di terreno, devono essere impostati sulla base di un modello concettuale, dedotto da osservazioni di terreno e dalla raccolta di dati sperimentali (rilevamento geologico, misure di portata, osservazioni di tipo idrologico ed idrogeologico, ecc.), che definiscono con la migliore approssimazione le condizioni al contorno;

b) i risultati ottenuti dai tentativi di simulazione rappresentano comunque soltanto un'ipotesi della reale situazione idrogeologica analizzata, tanto più realistica quanto più fedele ai dati sperimentali acquisiti. Di conseguenza, i risultati della simulazione vanno considerati puramente rappresentativi di una possibile realtà.

2. La struttura idrogeologica dei Monti Lepini (Lazio meridionale)

La prima struttura idrogeologica di cui sono state realizzate simulazioni numeriche (Petitta, 1994) è quella del Sistema Idrogeologico dei Monti Lepini, ubicato nel Lazio meridionale, che si estende su una superficie di 532 Km².

Ricerche precedenti (Mouton, 1977, Boni et al., 1980, Celico, 1983, Boni et al., 1986) indicano che la dorsale carbonatica, costituita da una successione di oltre 2000 m di calcari e calcari dolomitici depositi in ambiente di piattaforma, è sede di un importante acquifero che si può considerare idraulicamente isolato; i suoi limiti sono costituiti a nord dai depositi vulcanici neogenici dell'apparato dei Colli Albani; ad est dai depositi terrigeni sinorogenici affioranti nella Valle Latina, percorsa dal fiume Sacco; a sud-est della valle del fiume Amaseno, che separa i monti Lepini dalla dorsale dei Monti Ausoni-Aurunci (fig.1); lungo il bordo sud-occidentale la chiusura, data dai sedimenti

neogenici della Pianura Pontina, si trova a quote comprese tra 50 e 2 m, degradando progressivamente da nord verso sud. Questo limite di permeabilità coincide con il livello di base dell'acquifero, poiché la quota del contatto tra la dorsale carbonatica e i depositi alluvionali, prevalentemente argillosi, è più depresso rispetto agli altri limiti.

Il drenaggio ha luogo ai margini della Pianura Pontina, dove si trovano (fig.1) quattro imponenti gruppi sorgivi, con portate medie elevate: Ninfa (2,1 m³/s), Cavata-Cavatella (5,8 m³/s), Sardellane-Uffente (5,1 m³/s) e Laghi del Vescovo-Cotarda (2,0 m³/s) (Boni & Petitta, 1991); ne risulta un'erogazione complessiva di circa 15 m³/s, che rapportata all'area di alimentazione (530 km²) fornisce un valore medio di infiltrazione efficace di poco inferiore a 900 mm/anno.

Della struttura idrogeologica dei Monti Lepini, risultano noti: l'estensione ed i limiti (considerati in prima approssimazione come a flusso nullo); l'ubicazione e la portata media delle emergenze; alcune sequenze di misure di portate eseguite mensilmente per periodi di alcuni anni; il valore medio della ricarica, pari all'infiltrazione efficace.

Ad una buona analisi delle condizioni al contorno, corrisponde una scarsa conoscenza delle modalità di scorrimento nell'acqua nel sottosuolo, dei principali parametri idrodinamici (trasmissività, coefficiente di immagazzinamento, gradiente idraulico) e del regime di portata delle sorgenti.

Sia per la verifica dello schema idrogeologico proposto da altri Autori (Boni et al., 1986), che per l'impostazione di modelli dinamici del flusso sotterraneo, sono stati allestiti diversi modelli concettuali, per ognuno dei quali sono state realizzate simulazioni matematiche, attraverso la trasposizione degli elementi a disposizione in termini numerici.

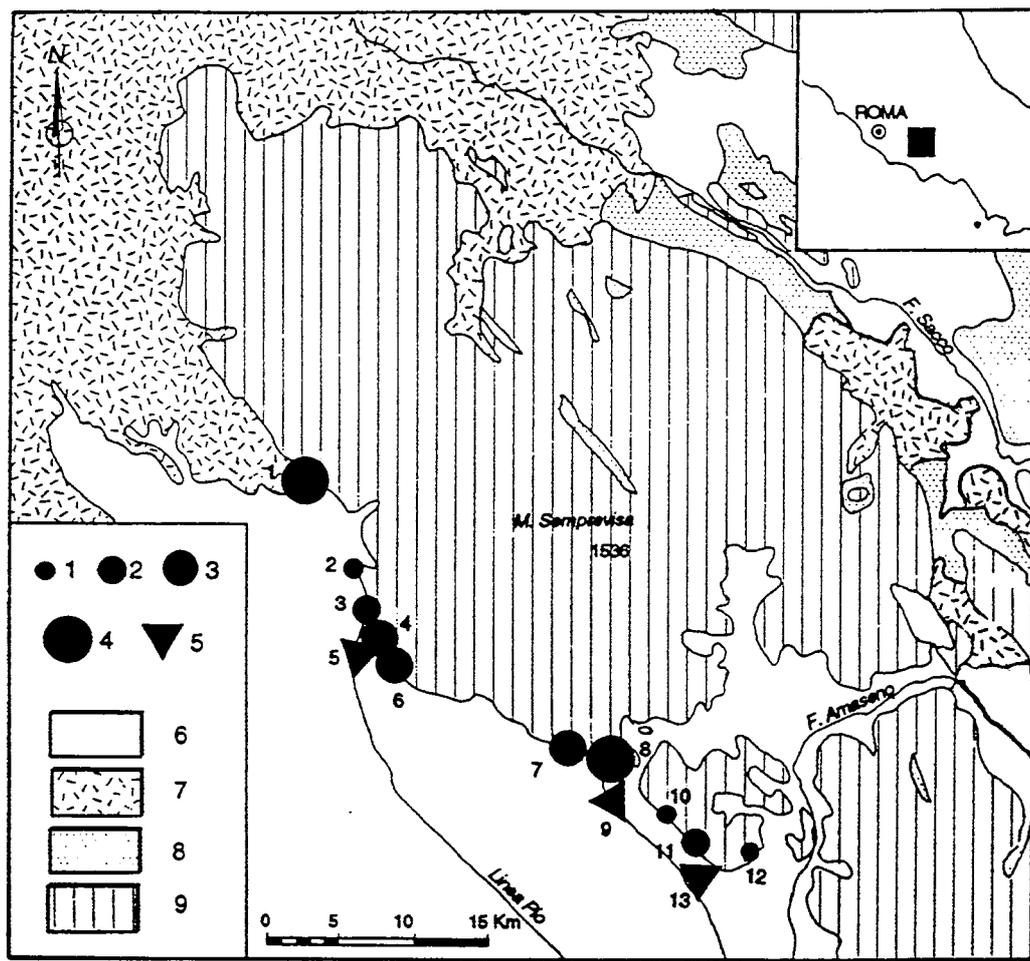


Fig.1: Sistema Idrogeologico dei Monti Lepini.

In figura sono riportati i principali complessi idrogeologici affioranti nell'area della dorsale dei Monti Lepini. I calcari di piattaforma carbonatica costituiscono l'acquifero regionale, la cui ricarica (infiltrazione efficace) è prossima a 900 mm/anno. Il contatto con i complessi vulcanico, terrigeno e dei depositi fluvio-lacustri rappresenta il limite della struttura in esame. Le principali emergenze localizzate e lineari sono ubicate lungo il contatto con i depositi della Pianura Pontina. La loro portata complessiva è di circa 15 m³/s.

Legenda: 1-Sorgente localizzata: portata media minore di 0,5 m³/s; 2-Sorgente localizzata: portata media compresa tra 0,5 e 1 m³/s; 3-Sorgente localizzata: portata media compresa tra 1 e 2 m³/s; 4-Sorgente localizzata: portata media superiore a 2 m³/s; 5-Sorgente lineare: portata media maggiore di 1 m³/s; 6-Complesso dei depositi alluvionali e di copertura recente (Pleistocene-Olocene); 7-Complesso delle vulcaniti (Pliocene-Pleistocene); 8-Complesso dei flysch marnoso-arenacei (Miocene); 9-Complesso di piattaforma carbonatica (Lias medio-Cretacico superiore).

3. Metodologia

Per le simulazioni è stato utilizzato il programma alle differenze finite NEWSAM (Ledoux, 1990), realizzato in Francia dall'*Ecole nationale Supérieure des Mines de Paris* ed installato presso il CASPUR dell'Università di Roma La Sapienza.

L'impiego di un programma di simulazione, concepito per la simulazione di acquiferi porosi, ad acquiferi carbonatici fratturati come quello dei Monti Lepini prevede l'esistenza di un moto laminare e il rispetto delle condizioni di flusso previste dalla legge di Darcy; in un acquifero carbonatico fratturato, le modalità di flusso sono determinate dalla rete di fratture dovuta agli eventi tettonici e dallo sviluppo del carsismo.

Nel caso in esame, come già proposto da altri Autori, risulta possibile applicare la legge di Darcy (Celico, 1981) e assimilare l'acquifero dei Monti Lepini ad un *mezzo poroso equivalente*, come definito da Anderson & Woessner (1992).

Infatti, sebbene la circolazione avvenga in fratture e condotti, per permeabilità secondaria, e l'influenza del carsismo evoluto sia evidente sulla superficie della dorsale in diverse località, il regime di portata delle sorgenti risulta notevolmente stabile. Questa situazione, oltre che per i Monti Lepini, risulta peculiare dei principali acquiferi carsici dell'Appennino laziale-abruzzese.

Nel caso specifico dei Monti Lepini, il regime di portata delle sorgenti della Pianura Pontina (considerando anche quelle alimentate dal rilievo degli Ausoni) risulta notevolmente stabile, variando da un massimo di 18,9 m³/s nel 1970 ad un minimo di 15,2 m³/s nel 1975, con una media di 17,2 m³/s. La portata media mensile varia da un massimo di 22,2 m³/s ad un minimo di 12,2 m³/s (Mouton 1977, Boni et al., 1980).

Queste considerazioni sembrano contrastare con le evidenze morfologiche del carsismo in quota, con forme epigee e anche ipogee molto sviluppate, che testimoniano una fase avanzata del processo carsico. Situazione differente si riscontra in corrispondenza delle emergenze che appaiono estremamente diffuse e prive di forme carsiche evolute.

La notevole stabilità del regime di portata può essere dovuta all'assenza di comunicazione diretta tra i canali carsici, la cui esistenza è ragionevole supporre, e l'attuale posizione delle sorgenti basali. Tale ipotesi trova elementi a favore nell'evoluzione strutturale dell'area considerata, dove la tettonica recente e l'eustatismo, connesso alle variazioni climatiche (Shackleton & Opdyke, 1973), giustificerebbero ingenti variazioni del livello di base degli acquiferi, anche in tempi recenti (Boni et al., 1980; Celico, 1983).

E' probabile che la deposizione di sedimenti alluvionali ai margini sud-occidentali della dorsale carbonatica lepina abbia determinato in tempi recenti (probabilmente in epoca post-wurmiana, Shackleton & Opdyke, 1973) il netto innalzamento del livello di base dell'acquifero e quindi la nuova ubicazione delle sorgenti.

In riferimento a questo nuovo livello di base, molto prossimo all'attuale livello marino, non si sarebbe ancora sviluppato un reticolo carsico tanto evoluto da condizionare le modalità di flusso delle acque sotterranee. Ciò non esclude la presenza di reticoli paleocarsici evoluti, sviluppatosi in passato, quando il livello di base era almeno un centinaio di metri inferiore a quello attuale. Questi reticoli paleocarsici evoluti non eserciterebbero oggi un'influenza determinante sull'idrodinamica sotterranea, trovandosi nettamente sotto l'attuale livello del mare.

Diversi elementi (Boni et al., 1980) sembrano avallare questa ipotesi di circolazione:

- la morfologia della maggior parte delle sorgenti è priva di caratteri di senilità tipici delle emergenze che fanno capo a reticoli carsici evoluti;
- le sorgenti sono numerose e distribuite lungo un fronte di 25 Km; il reticolo carsico, almeno nella parte più prossima all'emergenza, è ancora poco evoluto, in modo da non favorire la canalizzazione e la concentrazione del flusso.

L'indizio idrogeologico di maggior importanza resta comunque il regime delle emergenze che, come detto, è notevolmente stabile.

E' evidente che la rete di fratture determinata dalla tettonica e la presenza di forme carsiche evolute all'interno della dorsale, rappresentano elementi di discontinuità che difficilmente si accordano con una rappresentazione dell'acquifero in termini di *mezzo poroso equivalente*: per realizzare una simulazione rappresentativa è stato adottato un *Volume Elementare di Riferimento* (Anderson & Woessner, 1992) dell'ordine di alcune centinaia di metri di lato, più ampio della scala delle discontinuità. In tal modo, la struttura può essere considerata con buona approssimazione come un *mezzo poroso equivalente*, i cui elementi di discretizzazione hanno un'estensione di almeno 250 metri di lato.

Alla luce di quanto esposto, si è ritenuto possibile applicare dei modelli di simulazione matematica realizzati per acquiferi porosi anche a particolari situazioni di acquiferi carbonatici fratturati, quali quelli presi in esame, osservando alcune cautele, esposte di seguito:

- la circolazione viene simulata a scala regionale, considerando un *Volume Elementare di Riferimento* notevolmente più ampio della scala delle fratture o condotti presenti, in modo tale da ridurre al minimo gli effetti delle singole discontinuità;

- i valori di trasmissività e di coefficiente di immagazzinamento sono considerati rappresentativi dell'acquifero a scala regionale; in particolare, il concetto di trasmissività va sostituito con quello di *trasmissività equivalente* (Király, 1975; Anderson & Woessner, 1992), che sta ad indicare una grandezza delle stesse dimensioni, che non esprime le caratteristiche fisiche valide in ogni punto dell'acquifero, ma semplicemente costituisce la trasmissività media di un determinato settore o di tutta la struttura, il cui valore può essere anche notevolmente differente da quello effettivo nei diversi punti dell'acquifero;

- i risultati ottenuti (campo dei potenziali) saranno più attendibili in prossimità dei punti di controllo, coincidenti con le sorgenti ed alcuni livelli piezometrici misurati in pozzo; il margine di incertezza dei risultati si farà via via più ampio allontanandosi dai punti di controllo del sistema.

Un altro problema di rilevante importanza per la realizzazione di simulazioni numeriche in questo tipo di strutture, è rappresentato dalla necessità di attribuire a priori, ad ogni maglia del reticolo di discretizzazione, precisi valori dei

parametri idrodinamici. Come detto, i dati relativi a trasmissività e coefficiente di immagazzinamento ottenuti da misure dirette non solo sono molto scarsi, ma hanno rappresentatività quasi nulla nella costruzione di un modello numerico, sia perché sono riferiti a situazioni locali, sia per l'effetto di scala molto marcato (Kiraly, 1975), che riguarda il parametro permeabilità (e di conseguenza la trasmissività); è evidente che i valori dei parametri idrodinamici calcolati da prove di pompaggio non sono uguali a quelli relativi a *Volumi Elementari di Riferimento* di centinaia di metri di lato, ma possono differire anche di 3-4 ordini di grandezza.

La carenza di dati sperimentali dei parametri idrodinamici e comunque la loro scarsa rappresentatività, ha indotto ad utilizzare per la simulazione il metodo di risoluzione inverso (*problema inverso*, Kiraly, 1975).

La metodologia del *problema inverso* prevede la taratura del modello in esame, utilizzando alcuni valori incogniti e verificando i risultati ottenuti dalla simulazione, attraverso un confronto con altri valori noti precedentemente. Nel caso specifico, sono incogniti e vengono quindi ipotizzati i valori di trasmissività (e del coefficiente di immagazzinamento in regime transitorio), indispensabili per la simulazione, mentre sono noti i valori di portata in uscita dalla struttura, che generalmente rappresentano un'incognita.

Attraverso una lunga fase di calibrazione e per approssimazioni successive, si è giunti alla definizione di due possibili modelli di circolazione, prima in regime stazionario e poi transitorio, sufficientemente rappresentativi della situazione media dell'acquifero, quando i valori di trasmissività inseriti (principale variabile ignota nel sistema) hanno fornito in uscita valori di portata media molto simili a quelli noti sperimentalmente. In regime stazionario si sono utilizzati per la taratura i valori di portata media annua (calcolati su dati frammentari riferiti al periodo 1930-1980) e in regime transitorio le portate medie mensili, sia su lungo periodo che su un quinquennio di riferimento (1968-1972), per il quale erano disponibili sufficienti dati sperimentali.

Allo stesso modo si è proceduto, in regime transitorio, nei riguardi del coefficiente di immagazzinamento, il cui valore ipotetico iniziale in entrata è stato modificato in fase di taratura, per minimizzare lo scarto tra i valori di portata simulata e misurata.

I valori di trasmissività, di volta in volta inseriti nel programma di simulazione e considerati significativi al termine delle simulazioni, devono essere espressi sotto forma di *trasmissività equivalente*.

Nel concetto stesso di *trasmissività equivalente*, considerata come valore medio della struttura tale da fornire risposte che simulino in modo apprezzabile il comportamento della falda in una situazione nota (portata media), è espressa la possibilità di ottenere differenti distribuzioni ugualmente significative e quindi la non unicità delle soluzioni proposte (Kiraly, 1975).

4. Risultati ottenuti

Le simulazioni effettuate per la dorsale dei Monti Lepini (Petitta, 1994) hanno fornito risultati coerenti con i dati sperimentali, sia in regime stazionario che transitorio, individuando un ristretto campo di valori medi possibili di trasmissività, di coefficiente di immagazzinamento e di potenziale.

In fig.2 viene riportato un esempio, relativo al quinquennio 1968-72, del confronto tra i dati sperimentali e i risultati ottenuti con la simulazione, riguardante il gruppo di sorgenti Sardellane nord (n°7 in fig.1).

L'attendibilità del modello è stata verificata con una sistematica analisi di sensitività (Anderson & Woessner, 1992). Il migliore dimensionamento del lato delle maglie del reticolo di discretizzazione è risultato compreso tra 2 Km nel settore centrale dell'acquifero e 250 m in prossimità delle emergenze.

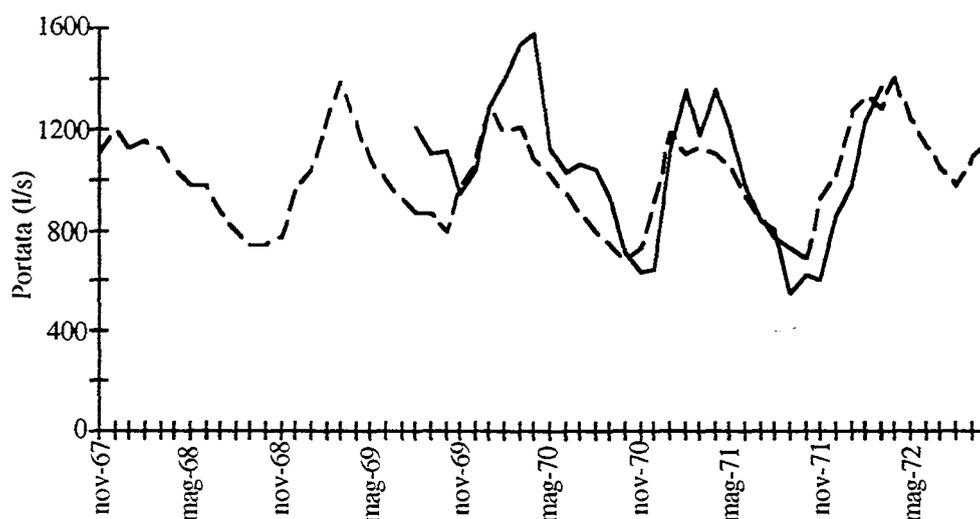


Fig.2: Esempio dei risultati ottenuti con la simulazione per l'acquifero carsico dei Monti Lepini. Viene riportato, per il gruppo di sorgenti Sardellane nord (n°7 in fig.1), il confronto tra i valori misurati nel periodo agosto 1969-aprile 1972 (linea intera) e le portate simulate per il quinquennio 1968-1972 (linea tratteggiata).

Dalle analisi condotte emergono i seguenti valori dei parametri idrodinamici, da considerare medi per l'acquifero e non rispondenti a situazioni puntuali specifiche:

- trasmissività equivalente dell'ordine di $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$, prossima ai valori ricavati da osservazioni empiriche sulla stessa struttura da altri Autori (Celico, 1981, Boni et al., 1980);
- coefficiente di immagazzinamento variabile tra 1 e 3%, a seconda delle differenti ipotesi di circolazione, in accordo con quanto ricavato tramite simulazione anche da altri Autori (Padilla-Benitez & Pulido-Bosch, 1988) su strutture carbonatiche dalle caratteristiche simili;
- superficie piezometrica caratterizzata da gradienti idraulici del 3-5‰, come già ipotizzato da Boni et al. (1986) per le strutture carbonatiche dell'Appennino centrale, sulla base di osservazioni di campagna;
- il regime di portata ricostruito risulta concorde con i dati frammentari disponibili, in particolare per le sorgenti di portata più elevata.

5. Conclusioni

La ricerca condotta sulla possibilità di allestire modelli numerici di simulazione di acquiferi carsici dell'Appennino centrale e in particolare per la dorsale dei Monti Lepini, ha condotto ai seguenti risultati essenziali:

1) è stato possibile simulare l'acquifero carsico dei Monti Lepini con un modello concepito per la simulazione di acquiferi porosi;

2) la determinazione di un campo di valori dei parametri idrodinamici rappresentativi è stata effettuata adottando la metodologia del *problema inverso*. I valori di portata erogata dalle sorgenti, sperimentalmente determinati, sono stati utilizzati per calibrare i possibili valori di *trasmissività equivalente* e di coefficiente di immagazzinamento con metodo iterativo, fino ad ottenere la migliore corrispondenza tra portate misurate e simulate;

3) la metodologia utilizzata considera la struttura carbonatica come un *mezzo poroso equivalente*, in base a due principali considerazioni:

- a) la notevole stabilità del regime di portata delle sorgenti, che esclude l'esistenza di un flusso canalizzato direttamente connesso con le emergenze;
- b) la scelta di un *Volume Elementare di Riferimento* dell'ordine delle centinaia di metri di lato, che ha permesso di considerare la rete di fratture equivalente omogeneamente distribuita all'interno di ogni elemento di discretizzazione.

La distribuzione della trasmissività e la superficie piezometrica ottenute si possono considerare valide soltanto alla scala del modello.

Allo stato attuale delle ricerche, si può considerare possibile l'allestimento di modelli matematici rappresentativi per le strutture carbonatiche fratturate dell'Appennino centrale, con le limitazioni sopra descritte.

Bibliografia

- Anderson M.P. & Woessner W.W., 1992: Applied groundwater modeling; simulation of flow and advective transport, pp.381, Academic Press, San Diego, California.
- Bartolomei C., Celico P. & Pecoraro A., 1980: Sulle possibilità di alimentazione artificiale della falda di base del massiccio carbonatico dei Monti Lepini (Lazio meridionale), Atti 4° Conv. Int. Acque Sotterranee, Acireale.
- 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), Geol. Appl. e Idrog. 15, 203-247.
- Boni C., Bono P. & Capelli G., 1986: Schema idrogeologico dell'Italia centrale, Mem.Soc.Geol.It. 35, 991-1012.
- Boni C. & Petitta M., 1991: Il programma Newsam nella modellistica degli acquiferi dell'Appennino centrale, Atti 1° convegno nazionale Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Gargnano (BS), 22-23 ottobre 1991, Rivista Scientifica ed educazione permanente supplemento n°93, 237-246.
- Celico P., 1981: Metodologia di calcolo e possibilità di utilizzazione dei principali parametri idrodinamici dell'acquifero carbonatico dei Monti Lepini (Lazio Meridionale), Mem. e Note dell'Istituto di Geologia Applicata 16, 5-32.
- Celico P., 1983: Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale - Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno, 4 (2), 215 pp.
- Kiraly L., 1975: Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques - Hydrogeology of karstic terrains, IAH 1975, 53-67.
- Kiraly L., 1993: Besoins et réalités dans la modélisation hydrogéologique en milieu fissuré - ASSN 1993 Verbier, Symposium spécialisé du 23-9-93, Hydrogéologie et circulations hydrothermales en milieu fissuré, 9 pp.
- Ledoux E., 1990: Programme Newsam, Notice d'utilisation aide-mémoire, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre d'Informatique Géologique, LHM/RD/90/7, 22 pp.
- Mouton J., 1977: Contributo allo studio delle acque sotterranee dell'Agro Pontino e Romano, Convegno di studio su "L'acqua per la Pianura Pontina: situazioni e prospettive", Latina.
- Petitta M., 1994: Modelli matematici di simulazione dell'acquifero carsico dei Monti Lepini (Lazio meridionale), Tesi di Dottorato di Ricerca, Dip. Scienze della Terra, Università degli studi di Roma "La Sapienza", 270 pp.
- Pulido-Bosch A. & Padilla-Benitez A., 1988: Deux exemples de modélisation d'aquifères karstiques espagnols, Hydrogéologie 4, 281-290.
- Shackleton N.J. & Opdyke N.D., 1973: Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-V238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 and 10^6 year scale, Quat.Res. 3, 39-55.