

Evoluzione delle conoscenze idrogeologiche del settore nord-occidentale del massiccio carbonatico del Matese - nota preliminare

Updated hydrogeological model of the north-western part of Matese carbonate aquifer - preliminary study

CELICO F. (*), PETRELLA E. (*)

RIASSUNTO - Il massiccio carbonatico del Matese è oggetto, da diversi anni, di una ricerca interdisciplinare mirata ad affinare le conoscenze circa il comportamento idrogeologico dell'acquifero. I risultati finora conseguiti hanno consentito di documentare sperimentalmente (a) l'esistenza di zone di faglia parzialmente tamponanti, caratterizzate da bassa conducibilità idraulica ed elevati gradienti idraulici, che generano una configurazione dell'acquifero a "serbatoi in serie", strettamente interdipendenti, nonché (b) l'esistenza di un epicarso nella porzione sommitale della roccia carbonatica, caratterizzato da elevati valori di conducibilità idraulica, bassi gradienti idraulici e dalla mancanza di temporanea ritenzione delle acque di infiltrazione efficace diffusa.

PAROLE CHIAVE: idrogeologia, acquifero carbonatico, faglie, epicarso, Matese.

ABSTRACT - The Matese carbonate aquifer is currently being studied through an interdisciplinary research, in order to better understand its hydrogeological behaviour. Nowadays, the main results of the research can be summarized as follows: (a) some fault zones act as barriers to groundwater flow (aquitards), because of their low hydraulic conductivity, and cause very high hydraulic gradients; on the whole, the aquifer looks like a "basin-in-series system"; (b) there is an epikarst in the uppermost zone of the carbonate bedrock, that is characterized by a very high hydraulic conductivity and low hydraulic gradients; the contrast in permeability between the epikarstic zone and the underlying fractured limestones does not cause the temporary retention of percolation and storage of perched groundwater, as a function of the diffuse infiltration of rainfall.

KEYWORDS: hydrogeology, carbonate aquifer, faults, epikarst, Matese.

1. - INTRODUZIONE

Per quanto concerne il massiccio carbonatico del Matese, la ricerca in campo idrogeologico è stata incentrata, nel corso degli ultimi anni, sull'affinamento delle conoscenze circa le caratteristiche idrauliche del mezzo fratturato e carsificato e le modalità di deflusso idrico sotterraneo all'interno del medesimo mezzo. In modo particolare, la ricerca ha finora consentito di raggiungere interessanti ed innovativi risultati in merito a due argomenti: (a) presenza di epicarso e relativo comportamento idrogeologico e (b) incidenza delle discontinuità tettoniche sul deflusso idrico sotterraneo.

Nel presente lavoro ci si soffermerà innanzitutto sulla disamina dei principali risultati conseguiti in riferimento agli argomenti sopra citati, evidenziandone i risvolti in campo applicativo, con particolare riferimento alla tutela qualitativa delle risorse idriche sotterranee.

2. - INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

Il Massiccio del Matese (Italia meridionale) è costituito prevalentemente da termini carbonatici mesozoici, ascrivibili a successioni sedimentarie di ambiente sia di piattaforma, sia di transizione

(*) Università degli Studi del Molise, Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Contrada Fonte Lappone (86090) Pesche (IS) (celico@unimol.it)

(IETTO, 1970), stratigraficamente sovrastanti un comune substrato triassico francamente dolomitico. Quest'ultimo, diffusamente tettonizzato e caratterizzato da un aspetto farinoso, presenta spessori compresi tra 700 e 800 metri (IETTO, 1970). Ad esso fanno seguito, verso l'alto, i livelli carbonatici giurassici e cretacei, di natura calcarea - dolomitica o più prettamente calcarea, caratterizzati da uno spessore complessivo fino a 2000 metri (IETTO, 1970). Localmente, nel settore nord - occidentale del massiccio, al di sopra del livello dolomitico basale, si osservano direttamente i termini calcarei cretacei. In chiusura della serie carbonatica si osservano lembi di calcari organogeni terziari, trasgressivi sulla successione mesozoica (Formazione di Cusano), caratterizzati da estensione e spessore ridotti (da 1 a 20 metri).

Le assise carbonatiche vengono a contatto, sia per faglia inversa che diretta, con i depositi miocenici in facies di flysch, prevalentemente costituiti da successioni silicoclastiche a bassa permeabilità (CIAMPO *et alii*, 1983). Tale contatto è in parte mascherato sia dalle coltri detritiche che raccordano i versanti carbonatici alle piane prospicienti, sia dai depositi di origine alluvionale di queste ultime. Affioramenti di dimensioni molto variabili di quei depositi flyschoidi sono presenti anche nella porzione interna del massiccio, in copertura alle rocce carbonatiche. In particolare, essi risultano molto estesi nelle principali depressioni intramontane (piane di Gallo Matese e Letino) ed in corrispondenza degli abitati di S. Gregorio d'Alife e Piedimonte Matese.

Lungo il versante meridionale, la struttura è bordata da un imponente conoide detritico quaternario, esteso da Ailano a Faicchio, caratterizzato dalla presenza di pezzame calcareo frammisto a materiale piroclastico. Conoidi detritici di dimensioni largamente minori affiorano sia lungo il versante meridionale delle dorsali di Gallo e di Ciorlano, sia in corrispondenza delle depressioni morfostrutturali presenti all'interno del massiccio (Piano delle Secine, Valle Agricola, Lago Matese). Nella porzione interna del rilievo è inoltre possibile osservare, in copertura delle rocce carbonatiche, la locale presenza di depositi limoso - argillosi all'interno delle depressioni di natura carsica.

Lungo il versante occidentale e meridionale sono presenti i depositi alluvionali delle valli di Venafro e del medio Volturno, direttamente a contatto con i litotipi carbonatici o sottoposti ai depositi detritici dei conoidi di raccordo tra i versanti carbonatici e la zona di piana.

Dal punto di vista strutturale, l'accostamento di serie carbonatiche appartenenti a differenti domini paleogeografici, è imputabile, secondo diversi Autori, all'esplicitarsi di un'importante fase

tettonica compressiva, responsabile dell'accavallamento tettonico di distinte unità strutturali (IETTO, 1970; ACCORDI & CARBONE, 1982; SGROSSO, 1988). Sebbene ancora non sia chiara l'ubicazione e l'andamento della linea tettonica che separa i due domini paleogeografici, è comunque possibile individuare le principali discontinuità di interesse idrogeologico in coincidenza delle linee di accavallamento, in parte o in tutto riprese dalla tettonica distensiva quaternaria, individuate in corrispondenza dell'allineamento delle principali depressioni intramontane (la finestra tettonica di Valle Agricola, le piane di Letino, Gallo Matese e delle Secine e la depressione del Lago Matese) e del margine settentrionale del Massiccio (valle del torrente Lorda e versante nord - orientale della dorsale del M. Patalecchia) (IETTO, 1970; ACCORDI & CARBONE, 1982; SGROSSO, 1988). Lungo la porzione settentrionale del Massiccio, che rappresenta l'area di maggiore interesse per la ricerca in corso, l'assetto strutturale è dominato da una struttura attiva estensionale (CUCCI *et alii*, 1996; GUERRIERI *et alii*, 1999; PORFIDO *et alii*, 2002; GALLI & GALADINI, 2003), che si sviluppa in direzione N300, per circa 25-28 km. Tale struttura è costituita da una faglia principale, immergente a NE, fino ad una profondità di almeno 9 km (MAZZOLI *et alii*, 2000; BUTLER *et alii*, 2004), e da faglie dirette quaternarie, sintetiche ed antitetiche, ad alto angolo, orientate in direzione prevalentemente E-O (DI BUCCI *et alii*, 2005).

Da un punto di vista idrogeologico, i Monti del Matese rappresentano un'unità delimitata dal tamponamento esercitato dai depositi in facies di flysch presenti al contorno (CIVITA, 1973; CELICO, 1978, 1983). Essa si presenta suddivisa in due settori principali, ad opera della complessa direttrice tettonica allineata con le principali depressioni tettono-carsiche presenti nel settore centrale del massiccio (Lago Matese, Letino e Gallo). Nell'ambito dei due settori sono individuabili numerosi sotto-bacini, dai quali traggono origine le numerose sorgenti, anche di notevole entità (Maretto, circa 1,2 m³/s; Torano, circa 2,3 m³/s; Boiano, circa 4,6 m³/s; Grassano, circa 4,7 m³/s; CIVITA, 1973; CELICO, 1978, 1983). Al di là di quanto attiene alla circolazione idrica sotterranea basale, il massiccio carbonatico del Matese è caratterizzato anche da numerose falde d'alta quota, le quali alimentano sorgenti talvolta perenni o, più spesso, stagionali, con portate medie annue generalmente inferiori alle poche decine di litri al secondo.

Di particolare interesse, ai fini idrogeologici, è il fenomeno carsico epigeo ed ipogeo, molto sviluppato ed in grado di determinare la presenza

diffusa di rapporti di alimentazione tra le acque di ruscellamento superficiale e quelle della falda (RUGGIERO, 1926; LAMBIASE & RUGGIERO, 1980; CATASTO GROTTI DELLA CAMPANIA, 1988; SANTO, 1991). Infatti, si osservano corsi d'acqua che, nei tratti in cui attraversano l'acquifero carbonatico, presentano carattere disperdente, nonché conche endoreiche, le cui acque di ruscellamento vengono drenate in aree di assorbimento più o meno concentrato.

3. - PROCEDURA SPERIMENTALE

La ricerca è sviluppata prevalentemente nell'area campione di Acqua dei Faggi (Longano, Molise), costituita quasi interamente da calcari. Il bacino campione è stato scelto in modo da possedere le seguenti caratteristiche prioritarie: (a) peculiarità idrogeologiche, pedologiche e di uso del suolo rappresentative del Massiccio del Matese e di buona parte dell'Appennino carbonatico meridionale; (b) coesistenza di sorgenti perenni e sorgenti stagionali all'interno del medesimo acquifero; (c) ampie oscillazioni del livello piezometrico, con almeno temporanea saturazione della porzione sommitale del substrato carbonatico; (d) esistenza di attività di pascolo in grado di generare una significativa contaminazione microbiologica delle acque sotterranee.

Le attività sperimentali contemplano: (a) esecuzione di rilievi geologico-strutturale e pedologico, (b) monitoraggio orario dei principali parametri meteorologici, mediante apposita stazione, (c) monitoraggio settimanale delle portate di 7 sorgenti, mediante mulinello o micromulinello idraulico, (d) monitoraggio orario dei livelli piezometrici in 7 piezometri, mediante trasduttori di pressione con data-logger, (e) monitoraggio orario della temperatura e della conducibilità elettrica dell'acqua di falda in 7 piezometri, mediante sensori di temperatura con data-logger, (f) esecuzione di prove di emungimento su pozzo singolo e su stazioni di prova, (g) esecuzione di prove Lugeon nel mezzo fratturato e carsificato, (h) esecuzione di prove di assorbimento in suolo, mediante infiltrometro a doppio cilindro, (i) esecuzione di indagini geofisiche, (l) monitoraggio giornaliero, settimanale o mensile dei principali parametri chimico-fisici ed isotopici delle acque di precipitazione, di ruscellamento e di falda, (m) monitoraggio giornaliero o settimanale dei principali indicatori di contaminazione microbiologica delle acque di ruscellamento e di falda, (n) sviluppo di prove con traccianti artificiali, (o) esecuzione di prove in colonna per la simulazione del trasporto dei contaminanti attraverso il suolo.

4. - RISULTATI

Qui di seguito ci si soffermerà prevalentemente (a) sulla caratterizzazione di discontinuità tettoniche e sul rispettivo comportamento idrogeologico, nonché (b) sulla caratterizzazione dell'epicarso e sul suo funzionamento in chiave idrogeologica.

4.1. - CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA DI ZONE DI FAGLIA

Le variazioni di gradiente idraulico osservate, a diverse profondità, tra due piezometri perforati in zona di faglia (da 0,5% a 66%; CELICO *et alii*, 2006) testimoniano, con i propri elevatissimi valori nella fascia maggiormente cataclasata (66%), che essa, orientata circa est-ovest, funge da ostacolo alla circolazione idrica sotterranea.

Tali valori sono da uno a due ordini di grandezza maggiori di quelli generalmente osservati nei massicci carbonatici dell'Italia centro-meridionale (CELICO, 1983). Tenendo conto di quanto postulato da CAINE *et alii* (1996), si può ipotizzare che, nel caso specifico, la cosiddetta "damage zone" sia assente o poco sviluppata, rispetto alla cosiddetta "core zone", che favorisce il ruolo tamponante delle discontinuità tettoniche rispetto alla propagazione di fluidi. L'azione tamponante di questa zona di faglia è del resto confermata dalla determinazione, attraverso prove Lugeon, di una conducibilità idraulica (inferiore ad $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s) in linea con quella determinata, mediante medesime prove, nei depositi semi-permeabili che tamponano il massiccio del Matese a scala regionale (CELICO *et alii*, 2006). Dai rilievi finora realizzati, tale azione idrogeologica può essere associata quanto meno alla presenza di cataclasi cementata da calcite, con conseguente significativa diminuzione locale della porosità efficace e della conducibilità idraulica del mezzo, in accordo con quanto osservato da altri Autori, sia pure in acquiferi non carbonatici (CHESTER & LOGAN, 1986; ANTONELLINI & AYDIN, 1994; GODDARD & EVANS, 1995).

Tuttavia, le faglie finora analizzate nell'area campione, benché chiaramente tamponanti, fungono da spartiacque sotterranei "aperti" e non "chiusi", attraverso i quali avviene un flusso idrico sotterraneo significativo. Infatti (CELICO *et alii*, 2006):

(a) in corrispondenza di alcune di queste faglie si attivano sorgenti stagionali, ma il livello piezometrico a monte di queste ultime (rispetto al verso di flusso della falda) continua ad abbassarsi, in esaurimento, anche quando le scaturigini sono secche;

(b) sussiste una perfetta interdipendenza tra le variazioni temporali di livello piezometrico a monte ed a valle delle zone di faglia, sia durante le fasi di esaurimento, sia nel corso degli episodi di ricarica;

(c) le modalità di interdipendenza si modificano nell'ambito di ciascun anno idrologico, a seconda che sia attiva o meno la eventuale sorgente stagionale posta lunga la zona di faglia semi-permeabile; tale fenomeno è indotto da una diversa velocità di svuotamento del sotto-bacino a monte della faglia tamponante (rispetto al verso di flusso), a seconda che l'intera sua portata debba fluire attraverso la fascia cataclastica, ovvero possa in gran parte emergere all'esterno in corrispondenza della scaturigine.

Nel complesso, in virtù di questa eterogeneità discontinua (*sensu* FREEZE & CHERRY, 1979), l'aquifero si comporta come un sistema a serbatoi in serie, i cui limiti sono collocati lungo le zone di faglia caratterizzate da una minore conducibilità idraulica (fig. 1). In alcuni casi, come detto in precedenza, l'ostacolo parziale indotto da queste fasce cataclastiche genera un rincollo della falda a monte (rispetto al verso di deflusso della falda) e l'emergenza stagionale di sorgenti.

4.2. - CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA DELL'EPICARSO

Nell'area campione è stata documentata una significativa variazione, con la profondità, dello stato di fratturazione, di diffusa carsificazione e di conducibilità idraulica delle rocce carbonatiche. Gli elementi idrogeologici e geofisici acquisiti consentono di individuare la successione di almeno tre orizzonti lungo la verticale (PETRELLA *et alii*, 2007).

Un primo orizzonte, collocato immediatamente al di sotto del suolo di copertura e spesso circa 5 metri, è diffusamente carsificato, con condotti carsici aventi massimo diametro di 0,1 metri nei fori di sondaggio realizzati ad hoc. L'elevata carsificazione genera valori di RQD relativamente bassi, ma un'elevatissima porosità efficace. Quest'ultima è comprovata (a) dall'assorbimento

di 240 l/m per metro lineare, nel corso di prove Lugeon, senza che il sistema vada in pressione, (b) da un esaurimento del livello piezometrico (circa 0,1 m/g) significativamente più lento di quello accertato in altri piezometri di controllo, (c) da una entità di innalzamento piezometrico, in occasione di importanti fenomeni di infiltrazione efficace, significativamente inferiore a quella registrata in altri piezometri di controllo, (d) da valori di resistività elettrica di poche centinaia di ohm · m.

Un secondo orizzonte, di spessore pari sempre a circa 5 metri, è molto fratturato, ma meno carsificato di quello sovrastante. Tale orizzonte è caratterizzato da fratture ben interconnesse, elevate porosità efficace e conducibilità idraulica, come comprovato (a) dall'assorbimento di 18 l/m per metro lineare, nel corso di prove Lugeon, senza che il sistema vada in pressione, (b) da una velocità di esaurimento pari a circa 0,2 m/g, (c) da valori di resistività elettrica pari a circa 1000 ohm · m.

Un terzo orizzonte è fratturato, ma con bassi valori di conducibilità idraulica (da 1,0 a $3,5 \cdot 10^{-6}$ m/s). Inoltre, l'elevata velocità di esaurimento del livello piezometrico (circa 0,7 m/g) e la notevole entità di innalzamento piezometrico (fino a qualche decina di metri in pochi giorni) in occasione di fenomeni di infiltrazione efficace di modesta entità, testimoniano bassi valori di porosità efficace.

In sintesi, gli elementi finora acquisiti convergono nel delineare il modello idrogeologico di seguito schematizzato (fig. 2):

- L'epicarso ha uno spessore di circa 10 metri al di sotto del suolo di copertura, ma si presenta costituito da almeno due orizzonti con grado di carsificazione decrescente verso il basso; in particolare, le prove Lugeon hanno evidenziato un carsismo pervasivo nell'orizzonte più prossimo al suolo di copertura e meno continuo in quello sottostante;

- L'epicarso è caratterizzato da infiltrazione

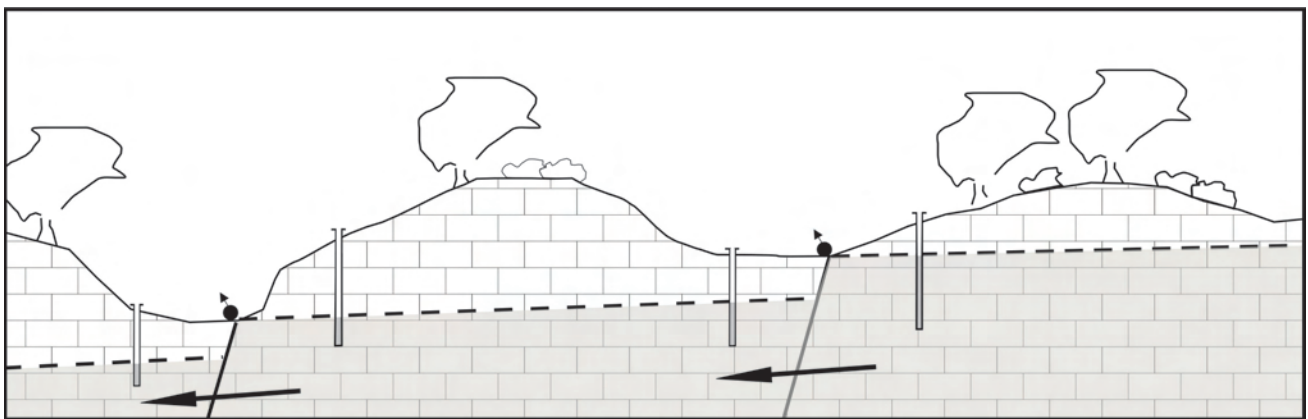


Fig. 1 - Modello schematico di un sistema a "serbatoi in serie" (da CELICO *et alii*, 2006).
- Schematic representation of a "basin-in-series system" (after CELICO *et alii*, 2006).

diffusa delle precipitazioni e da altrettanto diffuso flusso della falda, quando coinvolto nel processo di saturazione; le prove di emungimento mostrano che il flusso è schematizzabile attraverso l'approccio del mezzo continuo, a scala metrica e decametrica;

- la diffusa infiltrazione che si realizza all'interno dell'epicarso non è maggiore della percolazione nel substrato fratturato sottostante; ciò in quanto il contrasto di permeabilità individuato alla base dell'epicarso, per quanto significativo in termini assoluti, non è sufficiente per ostacolare l'immediata e completa percolazione delle acque di infiltrazione efficace verso la falda in rete;

- le condizioni appena sopra accennate fanno sì che non si manifesti una temporanea saturazione dell'epicarso, quanto meno nel corso dei fenomeni di infiltrazione diffusa delle precipitazioni finora monitorate (inferiori o uguali a 130 mm/g), e, quindi, che non si formino falde sospese in occasione di tali eventi pluviometrici;

- la buona interconnessione tra epicarso e fratture del sottostante substrato, nonché la frequenza delle fratture rinvenute, fa sì che la percolazione nel substrato sia altrettanto diffusa e che non si manifesti il fenomeno del "funneling" documentato in epicarsi di acquiferi carsici europei;

- tenendo conto dell'assenza di "funneling", il regime estremamente variabile dei livelli piezometrici e delle portate sorgive, documentati in tutti i punti d'acqua monitorati, è da associare alla elevata permeabilità ed al ridotto spessore complessivo del mezzo non saturo nell'area di studio.

Tale modello di funzionamento, così diverso da quelli riscontrati in acquiferi carsici europei (MANGIN, 1975; GUNN, 1981; WILLIAMS, 1983, 1985; KLIMCHOUK, 2000; PERRIN, 2003; PERRIN *et alii*, 2003), è probabilmente il risultato non solo del tipo di fratturazione generato dalla tettonica sul mezzo in esame, ma anche della presenza di suoli di origine piroclastica. Utilizzando in modo estensivo quanto verificato da WHITE (1969), una diffusa infiltrazione delle precipitazioni nel suolo tende a favorire uno sviluppo altrettanto diffuso di condotti e fratture più o meno beanti nell'epicarso e nel fratturato sottostante. Questa ipotesi è in accordo con i risultati ottenuti da PALMER (1975), il quale ha osservato lo sviluppo di un diffuso reticolo carsico in una roccia carbonatica sottoposta a sedimenti arenacei.

5. - CONCLUSIONI

Le attività sperimentali finora sviluppate nell'area campione di Acqua dei Faggi (Longano, Molise) hanno consentito di affinare le conoscenze circa alcuni importanti aspetti relativi al com-

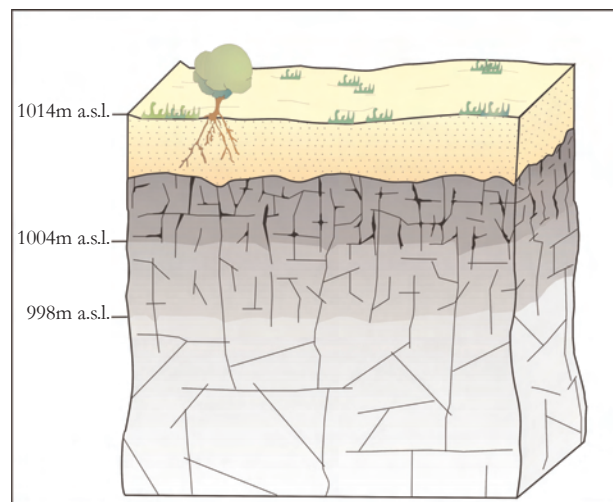


Fig. 2 - Modello schematico di epicarso nell'area campione di Acqua dei Faggi (da PETRELLA *et alii*, 2007).

- Schematic representation of epikarst in the Acqua dei Faggi test site (after PETRELLA *et alii*, 2007).

portamento idrogeologico del massiccio del Matese, in particolare, e dei massicci carbonatici dell'Appennino meridionale, più in generale.

Tali nuove informazioni, al di là dell'interesse strettamente scientifico, hanno già avuto notevoli risvolti applicativi, in quanto hanno rappresentato le basi idrogeologiche su cui è stato impostato un processo di affinamento delle soluzioni di protezione dall'inquinamento degli acquiferi in esame (CELICO *et alii*, 2006d). Più specificatamente, lo studio dettagliato dei fenomeni di inquinamento microbiologico indotto da pascolo di bestiame ed uso di concime organico in agricoltura, sia attraverso studi di campo (CELICO *et alii*, 2004a, 2004b; ALLOCCA *et alii*, 2008), sia attraverso simulazioni in laboratorio (CELICO *et alii*, 2004a), ha consentito di affinare il metodo DAC (CELICO, 1996) per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi. Processo di affinamento metodologico la cui efficacia è stata sperimentalmente dimostrata (CELICO & NACLERIO, 2005; CELICO *et alii*, 2007a, 2008).

Ringraziamenti

Il progetto di ricerca è stato finanziato dall'Unione Europea (Progetti KATER e KATER II; Responsabile scientifico Prof. Fulvio Celico).

BIBLIOGRAFIA

- ACCORDI G. & CARBONE F. (1982) - *Cretaceous depositional system in north-eastern Matese (Molise-Italy)*. *Geologica Romana*, **21**, 11-18.
- ALLOCCA V., CELICO F., PETRELLA E., MARZULLO G. & NACLERIO G. (2008) - *The role of land use and environmental factors on microbial pollution of mountainous limestone aquifers*. *Environ. Geol.*, in corso di stampa.
- ANTONELLINI M. & AYDIN A. (1994) - *Effect of faulting on*

- fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties.* Am. Ass. Petrol. Geol. Bull., **78**, 355-377.
- BUTLER R.W.H., MAZZOLI S., CORRADO S., DE DONATIS M., SCROCCA D., DI BUCCI D., GAMBINI R., NASO G., NICOLAI C., SHINER P. & ZUCCONI V. (2004) - *Applying thick-skinned tectonic models to the Apennine thrust belt of Italy: limitations and implications.* In: *Thrust tectonics and Hydrocarbon Systems* (McCLAY K., Ed.). Am. Ass. Petrol. Geol. Mem., **82**, 647-667.
- CAINE J.S., EVANS J.P. & FORSTER C.B. (1996) - *Fault zone architecture and permeability structure.* Geology, **24**, 1025-1028.
- CATASTO GROTTA DELLA CAMPANIA (1988) - *Campagna esplorativa 1986.* C.A.I. Sezione di Napoli, Not. Sezionale, **2**, 27-28.
- CELICO F. (1996) - *Vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi e delle risorse idriche sotterranee in realtà idrogeologiche complesse: i metodi DAC e VTR.* Quad. di Geol. Appl., **1**, 93-116.
- CELICO F., VARCAMONTI M., GUIDA M. & NACLERIO G. (2004a) - *Influence of precipitation and soil on transport of fecal enterococci in limestone aquifers.* Appl. and Environ. Microbiol., **70**(5), 2843-2847.
- CELICO F., MUSILLI I. & NACLERIO G. (2004b) - *The impact of pasture and manure spreading on microbial groundwater quality in carbonate aquifers.* Environ. Geol., **46**(2), 233-236.
- CELICO F. & NACLERIO G. (2005) - *Verification of a DRASTIC-based method for limestone aquifers.* Water Int., **30** (4), 530-537.
- CELICO F., PETRELLA E. & CELICO P. (2006) - *Hydrogeological behavior of some fault zones in a carbonate aquifer of Southern Italy: an experimentally-based model.* Terra Nova, **18**, 308-313.
- CELICO F., PETRELLA E. & NACLERIO G. (2007a) - *Updating of a DRASTIC-based method for vulnerability assessment in carbonate aquifers.* Water Int., **32**, 475-482.
- CELICO F., PETRELLA E. & NACLERIO G. (2007b) - *DAC: a vulnerability assessing methodology for carbonate aquifers, validated by field and laboratory experiments.* In: WITKOWSKI A.J., KOWALCZYK A., VRBA J. (Eds) *Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping*, TAYLOR & FRANCIS, 177-190; IAH book of Selected papers on "Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping", Balkema, in corso di stampa.
- CELICO F., PETRELLA E. & MARZULLO G., NACLERIO G. (2008) - *Integrative Measures for Protection of Carbonate Aquifers against Microbial Pollution in Central-Southern Italy.* Water Int., **33**, 116-126.
- CELICO P. (1978) - *Schema idrogeologico dell'Appennino carbonatico centro-meridionale.* Mem. e Note dell'Ist. Geol. Appl. Napoli, **14**, 3-97.
- CELICO P. (1983) - *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionali, Abruzzo, Molise e Campania).* Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno, **4/2**, 1-225, Roma.
- CHESTER F.M. & LOGAN J.M. (1986) - *Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl fault, California.* J. Struct. Geol., **9**, 621-634.
- CIAMPO G., SGROSSO I., & RUGGIERO TADDEI E. (1983) - *Età e messa in posto del massiccio del Matese nel Bacino Molisano.* Boll. Soc. Geol. It., **102**, 573-580.
- CIVITA M. (1973) - *L'infiltrazione potenziale media annua nel massiccio carbonatico del Matese (Italia meridionale).* Atti 2° Conv. Intern. sulle Acque Sotterranee, Palermo, 129-142.
- CUCCI L., D'ADDEZIO G., VALENSISE G. & BURRATO F. (1996) - *Investigating seismogenic faults in Central and Southern Apennines (Italy): modelling of fault-related landscape features.* Annali di Geofisica, **39**, 603-618.
- DI BUCCI D., NASO G., CORRADO S., & VILLA I.M. (2005) - *Growth, interaction and seismogenic potential of coupled active normal faults (Isernia Basin, central-southern Italy).* Terra Nova, **17**, 44-55.
- FREEZE R.A. & CHERRY A.C. (1979) - *Groundwater.* Prentice-Hall International, Inc., Upper Saddle River, USA.
- GALLI P. & GALADINI F. (2003) - *Disruptive earthquakes revealed by faulted archaeological relics in Sannium (Molise, southern Italy).* Geophys. Res. Lett., **30**, 1266.
- GODDARD J.V. & EVANS J.P. (1995) - *Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming.* U.S.A. J. Struct. Geol., **17**, 533-547.
- GUERRIERI L., SCARASCIA MUGNOZZA G. & VITTORI E. (1999) - *Analisi stratigrafica e geomorfologica della conoide terdoquaternaria di Campochiaro ed implicazioni per la conca di Boiano in Molise.* Il Quaternario, **12**, 237-247.
- GUNN J. (1981) - *Hydrological processes in karst depressions.* Zeit. Geomorph. NF, **25**, 313-331.
- KLIMCHOUK A.B. (2000) - *The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis.* In: *Speleogenesis. Evolution of Karst Aquifers* (A.B. KLIMCHOUK, D.C. FORD, A.N. PALMER AND W. DREYBRODT, Eds.) National Speleological Society, Huntsville, USA.
- IETTO A. (1970) - *Assetto strutturale e ricostruzione paleogeografica del Matese occidentale (Appennino meridionale).* Mem. Soc. Nat. in Napoli, supp. Boll. **78**, 441-471.
- LAMBIASE S. & RUGGIERO A. (1980) - *La forra del Torano (Matese centrale): un caso di convergenza tra morfogenesi carsica e fluviale.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., **87**, 171-192.
- MANGIN A. (1975) - *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques.* Ph.D. thesis, 124 pp., Univ. de Dijon, Dijon, France.
- MAZZOLI S., CORRADO S., DE DONATIS M., SCROCCA D., BUTLER R.W.H., DI BUCCI D., NASO G., NICOLAI C. & ZUCCONI V. (2000) - *Time and space variability of "thin-skinned" and "thick-skinned" thrust tectonics in the Italian Apennines.* Rend. Fis. Acc. Lincei, **11**, 5-39.
- PALMER A.N. (1975) - *The origin of maze caves.* Bull. Natl. Speleol. Soc., **37**(3), 56-76.
- PERRIN J. (2003) - *A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers.* PhD thesis, Faculty of Sciences of the University of Neuchâtel, 187 pp.
- PERRIN J., JEANNIN P.Y. & ZWAHLEN F. (2003) - *Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland.* J. Hydrol., **279** (1-4), 106-124.
- PETRELLA E., CAPUANO P. & CELICO F. (2007) - *Unusual behavior of epikarst in the Acqua dei Faggi carbonate aquifer (Southern Italy).* Terra Nova, **19**, 82-88.
- PORFIDO S., ESPOSITO E., VITTORI E., TRANFAGLIA G., MICHETTI A.M., BLUMETTI A.M., FERRELLI L., GUERRIERI L. & SERVA L. (2002) - *Areal distribution of ground effects induced by strong earthquakes in the Southern Apennines (Italy).* Surv. Geophys., **23**, 529-562.
- RUGGIERO P. (1926) - *Risultati di alcune indagini sul regime idrologico del massiccio del Matese.* Ann. Lav. Pubbl., **64**, 381-401.
- SANTO A. (1991) - *Karst processes and potential vulnerability of the campanian carbonatic aquifers: the state of knowledge.* Proc. Int. Symp. on Environmental Changes in Karst Areas I.G.U.-U.I.S.- Quad. Dip. Geografia, **13**, Univ. Padova, 95-107.
- SGROSSO I. (1988) - *Nuovi elementi per un più articolato modello paleogeografico nell'Appennino centro-meridionale.* Atti 74° Congr. Soc. Geol. It., Sorrento, Vol. B, pp. 388-391.
- WHITE W.B. (1969) - *Conceptual models for carbonate aquifers.* Ground Water, **7**(3), 15 - 21.
- WILLIAMS P.W. (1983) - *The role of the subcutaneous zone in karst hydrology.* J. Hydrol., **61**, 45-67.
- WILLIAMS P.W. (1985) - *Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst.* Zeit. Geomorph. NF, **29**, 463-482.