

Considerazioni sull'origine e rinnovabilità delle acque presenti in livelli sabbiosi profondi del Tavoliere di Puglia

*Vincenzo Cotecchia⁽¹⁾, Giuseppe Ferrari⁽²⁾, M. Dolores Fidelibus⁽¹⁾
Maurizio Polemio⁽³⁾, Tiziano Tadolini⁽¹⁾, Luigi Tulipano⁽⁴⁾*

Riassunto. Nella formazione argillosa plio-pleistocenica del Tavoliere (Puglia) alcune perforazioni hanno rinvenuto livelli sabbiosi contenenti acque bicarbonato-sodiche, talvolta risalenti oltre il piano campagna. Ipotesi sull'origine e rinnovabilità delle acque presenti in tali livelli sono state svolte considerando gli usuali parametri idrogeologici, derivati da prove di portata, e analizzando dati geochimici ed isotopici.

[Parole chiave: *idrogeologia, acquifero di bassa permeabilità, acqua bicarbonato sodica, scambio ionico*].

Abstract. *Sandy levels bearing bicarbonate-sodium waters, having hydraulic heads sometimes higher than ground level, have been encountered during drillings in the Plio-Pleistocene clayey formation of the Tavoliere. Hypotheses on origin and renewal capability of groundwaters of these levels have been put forward considering usual hydrogeological parameters from discharge tests and geochemical and isotopical data.*

[Key words: *hydrogeology, low permeability aquifer, bicarbonate sodium water, ion exchange*].

1. INTRODUZIONE

Lo studio ha riguardato le risorse idriche sotterranee rinvenute in orizzonti acquiferi profondi, interclusi nella formazione argillosa plio-pleistocenica del Tavoliere.

Nel peculiare e complesso ambiente idrogeologico di tale unità, ove le risorse idriche sotterranee tradizionali sono state sottoposte ad intenso sfruttamento, l'esigenza di reperire nuove risorse idriche sotterranee ha indirizzato le ricerche verso profondità sempre maggiori, con il primario obiettivo di raggiungere la falda profonda circolante nei calcari mesozoici, presenti al disotto della formazione plio-pleistocenica. Nel corso di tali ricerche diverse perforazioni hanno invece intercettato corpi idrici sotterranei, costituiti da livelli sabbiosi interclusi nelle argille. Per le caratteristiche con le quali si manifestano appena raggiunti dal sondaggio (rapida risalienza dell'acqua, spesso traboccante al piano campagna), tali corpi idrici possono essere considerati come lenti artesiane.

La caratterizzazione idrologica ed idrochimica di tali lenti è stata svolta utilizzando i dati che si sono potuti raccogliere per alcune delle perforazioni sino ad oggi eseguite. Tale caratterizzazione è stata principalmente indirizzata alla valutazione della loro potenzialità: le acque sotterranee rinvenute nelle lenti artesiane potrebbero infatti costituire limitate fonti di approvvigionamento idrico da destinare ad usi locali di modesto fabbisogno o a cui ricorrere in caso di emergenza idrica.

⁽¹⁾ Istituto di Geologia Applicata e Geotecnica, Politecnico di Bari.

⁽²⁾ GEO srl, Bari.

⁽³⁾ CNR, Centro di Studio sulle Risorse Idriche e la Salvaguardia del Territorio, Bari.

⁽⁴⁾ Dipartimento Idraulica, Trasporti e Strade, Università di Roma «La Sapienza».

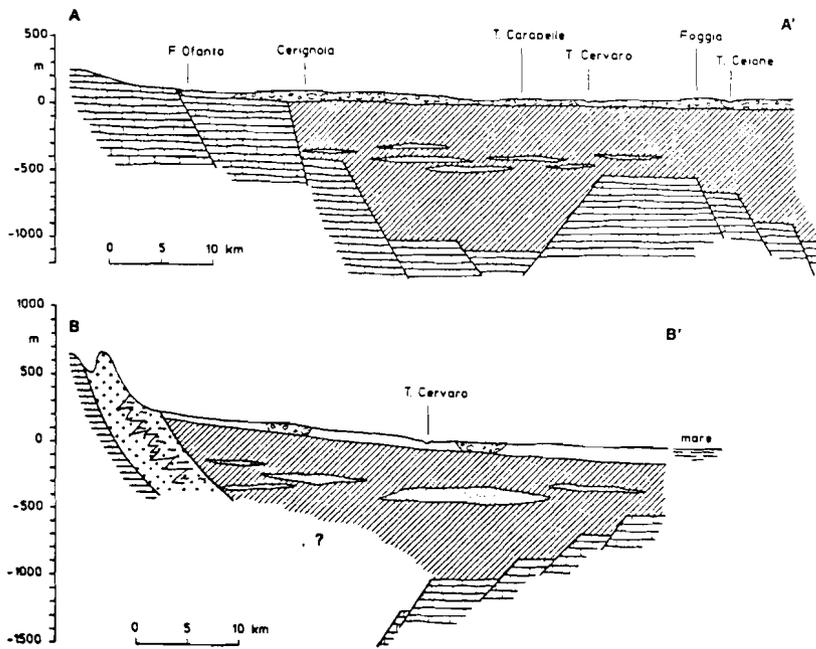
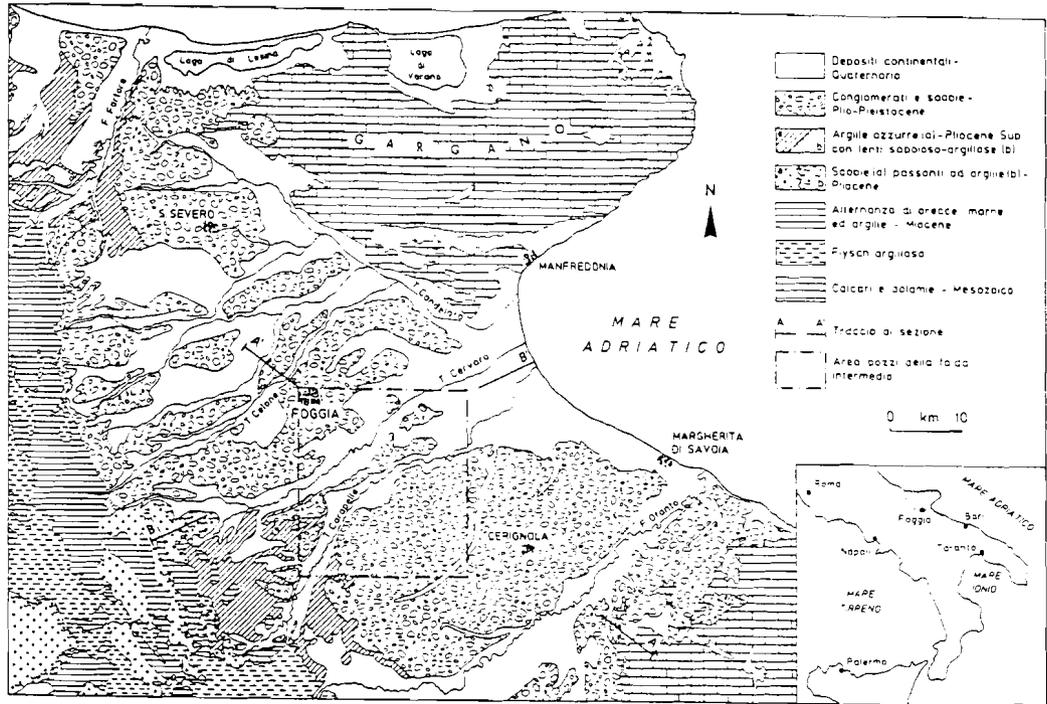


Figura 1. Carta geologica semplificata e sezioni schematiche del Tavoliere di Puglia.

2. CARATTERISTICHE GEOLOGICHE ED IDROGEOLOGICHE GENERALI DEL TAVOLIERE

2.1. Inquadramento geologico

Il Tavoliere è delimitato a NW dai corsi dei Fiumi Biferno e Cigno e dalla fascia montuosa dell'Appennino Dauno fino alla zona del M. Vulture, a SE dagli affioramenti carbonatici della piattaforma murgiana e a NE dal T. Candelaro che, scorrendo da NW verso SE, seguendo l'omonima faglia, separa il Tavoliere dal promontorio del Gargano. La fig. 1 illustra, in maniera semplificata, i rapporti esistenti tra le varie formazioni presenti in affioramento ed in profondità nella regione; gli elementi necessari sono stati desunti dalla Carta Geologica dell'Appennino Meridionale (1988) e dalla Carta Geologica d'Italia.

Dal punto di vista tettonico l'area del Tavoliere rappresenta la prosecuzione, verso il Golfo di Manfredonia e verso la costa Adriatica, della Fossa Bradanica. Il Gargano, la Murgia e parti dell'Appennino meridionale, costituiscono gli Horst del sistema tettonico. Il basamento carbonatico mesozoico sprofonda a gradini, al disotto dei depositi del Tavoliere, sino a massimi di oltre 4000 m.

Lo sprofondamento tettonico ha determinato il ciclo sedimentario marino plio-pleistocenico completo, che ha colmato la fossa corrispondente al Tavoliere di sedimenti prevalentemente argillosi. Nella fase regressiva del ciclo si sono sedimentati, al di sopra della potente coltre argillosa, sedimenti sabbiosi e conglomeratici, sui quali si sono successivamente sedimentati depositi continentali, costituiti da argille, sabbie e conglomerati alluvionali, dei quali oggi sono rinvenibili in affioramento lembi residui dal processo di erosione continentale.

Nell'ambito della potente formazione argillosa sono osservabili variazioni laterali e verticali di facies verso termini sabbioso-limosi; a luoghi, in alcuni sondaggi, sono stati rinvenuti anche livelli ricchi di materia organica.

Il Tavoliere presenta una morfologia caratterizzata da vaste spianate che, a partire dalle più alte quote (circa 500 m s.l.m.) raggiunte a ridosso del sub-Appennino Dauno, digradano debolmente verso mare, interrotte da ampie valli erosive, queste ultime delimitate da versanti spesso ripidi.

2.2. Inquadramento idrogeologico

Anteriormente a questi nuovi ritrovamenti nel Tavoliere erano tradizionalmente riconoscibili due sistemi idrogeologici principali: l'acquifero superficiale, costituito dall'insieme dei depositi sabbioso-

conglomeratici marini ed alluvionali, e l'acquifero profondo, costituito dalla formazione carbonatica del Mesozoico, permeabile per fessurazione e per carsismo. A questi sistemi principali le attuali conoscenze consentono di aggiungere un terzo sistema, definito come acquifero intermedio, costituito da un insieme di lenti artesiane con tutta probabilità intercomunicanti tra di loro, contenute nell'ambito della formazione argillosa.

2.2.1. Acquifero superficiale

L'acquifero poroso superficiale del Tavoliere è delimitato, lateralmente ed in basso, dalla formazione delle argille azzurre, che affiorano ad anfiteatro lungo tutta la fascia occidentale dell'area in esame. La potenza di tale acquifero è generalmente modesta nelle zone al margine occidentale del Tavoliere ed aumenta progressivamente verso mare, superando anche i 100 m.

Costituito in pratica da un'alternanza di strati a varia granulometria e permeabilità, esso è caratterizzato da una forte anisotropia verticale, che spesso porta a condizioni di falda multistrato (IPPOLITO et al., 1958, TRAMONTE, 1955, TADOLINI et al., 1990).

L'acquifero trae alimentazione da un'aliquota delle precipitazioni incidenti sul territorio: il bilancio idrologico, effettuato sulla base di dati di temperatura e di piovosità riferiti al periodo 1975-1984 e relativi a numerose stazioni termo-pluviometriche del Servizio Idrografico, ha portato alla conclusione che la precipitazione media annua, pari a 552 mm, si ripartisce in 360 mm di evapotraspirazione, 96 mm di ruscellamento, fornendo un'altezza alimentante pari a 96 mm: tale valore è di per sé sufficientemente modesto, tenendo conto che non è stata considerata la ricostituzione dell'acqua nel terreno (TADOLINI & TULIPANO, inedito).

2.2.2. Acquifero profondo

Le rocce carbonatiche del Mesozoico, soggiacenti alla coltre argillosa del Tavoliere a profondità anche di diverse migliaia di metri, ospitano una falda idrica che è in continuità con quelle presenti nell'acquifero murgiano e garganico.

Nelle suddette masse carbonatiche sepolte di norma circolano acque dolci nelle zolle più elevate, mentre è presente solo acqua salata in quelle più sprofondate (ZORZI & REINA, 1960). Quest'ultima circostanza è confermata dal ritrovamento di sole acque salate in diversi pozzi che hanno raggiunto il substrato mesozoico alle maggiori profondità.

La presenza di acque dolci è infatti condizionata dal carico che esse hanno localmente: esse sono

presenti solo se tale carico è in grado di mantenere l'acqua salata ad una profondità maggiore rispetto a quella del tetto della formazione carbonatica. Non sono disponibili dati in numero sufficiente da consentire una ricostruzione della superficie piezometrica della falda contenuta nella formazione mesozoica di base. Dati puntuali indicano tuttavia che valori molto alti del carico idraulico sono misurabili nella zona

grossomodo a SW di Cerignola, con valori superiori ai 100 m s.l.m.: da questa zona, proseguendo verso la foce del fiume Ofanto, detti carichi diminuiscono bruscamente sino a valori compresi tra 20 e 30 m. I più elevati carichi riscontrati possono essere messi in relazione con valori del carico idraulico superiori a 240 m s.l.m., riscontrati in alcune perforazioni eseguite nell'area di Castel del Monte (35 km a SE di Cerignola).

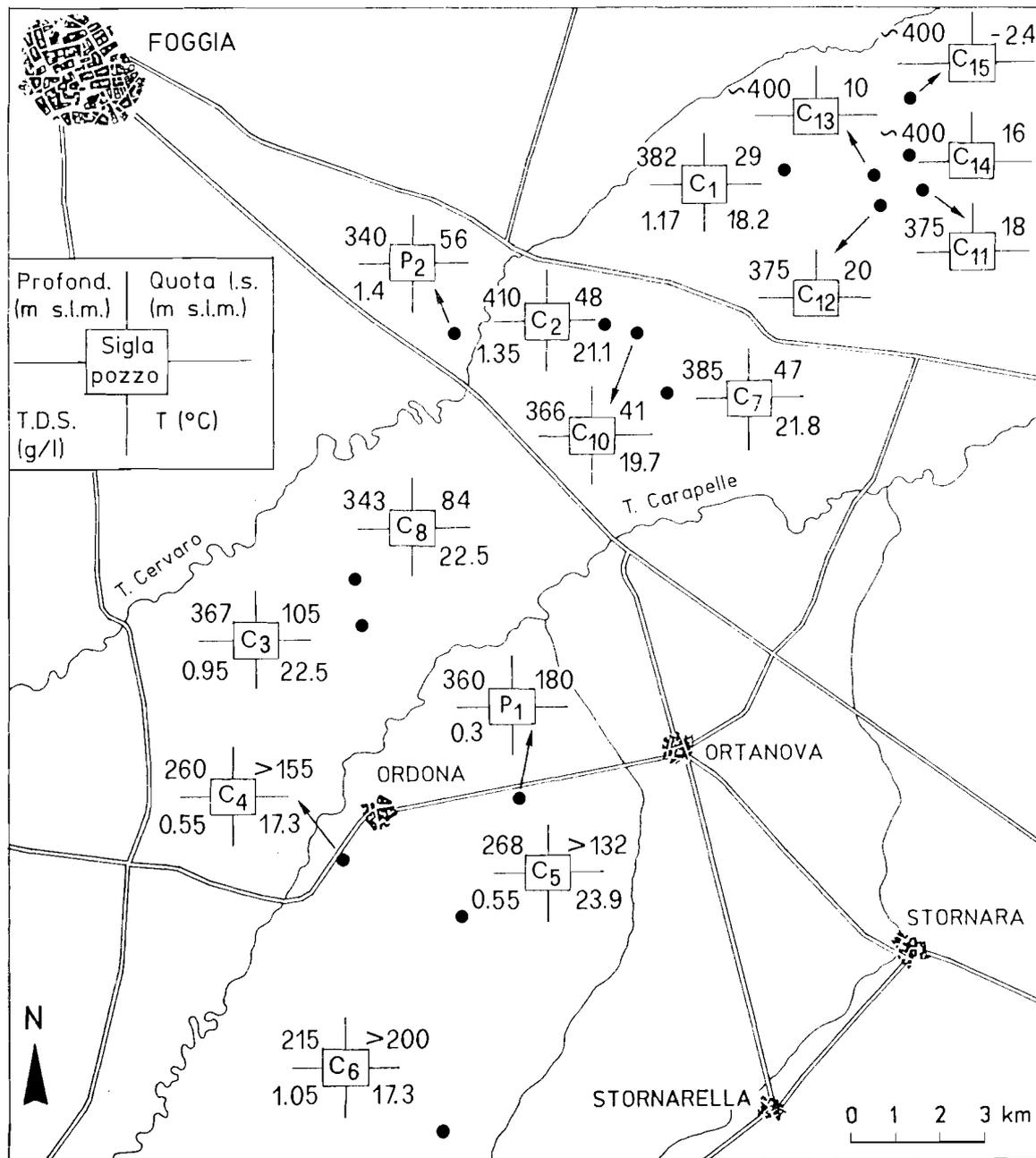


Figura 2. Ubicazione dei pozzi studiati.

2.2.3. Acquifero intermedio

Nell'area esaminata (fig. 1) una serie di pozzi trivellati ha intercettato livelli di diversa potenza, costituiti da sabbie più o meno limose, interposti nella formazione argillosa e contenenti acqua in pressione. Tali livelli sono stati rinvenuti a quote variabili tra i 200 e i 400 m sotto il l.m. e, per quanto è stato possibile ricostruire sulla base dei pochi dati stratigrafici a disposizione, il loro spessore non supera le poche decine di metri. Le quote piezometriche rilevate variano, procedendo da SSW verso NNE, da valori anche superiori ai 200 m s.l.m. sino a valori dell'ordine di una decina di metri (fig. 2), con una perdita di carico media stimabile intorno al 10%. Nella parte nordorientale dell'area in studio fenomeni di sovrasfruttamento hanno determinato abbassamenti della superficie piezometrica, in qualche caso depressa al di sotto del livello mare.

Si tratta evidentemente di depositi caratterizzati da valori di permeabilità e trasmissività molto modesti, come attestato dalle caratteristiche idrodinamiche valutate con prove di emungimento. La potenzialità di tali livelli acquiferi risulta sempre molto bassa: portate non superiori ai 15 l/s generano normalmente depressioni idrodinamiche di diverse decine di metri.

La tab. 1 riassume i valori di trasmissività e permeabilità ottenuti per alcuni pozzi considerando il deflusso indotto dall'opera di captazione sia in regime permanente che in regime transitorio.

Tabella 1. Valori di trasmissività, permeabilità e spessore dell'acquifero calcolati dai risultati di prove di portata. Le formule utilizzate sono: a) Dupuit; b) Babouchkine-Guirinsky; c) Jacob.

METODO	POZZO	T(mq/s)	K (m/s)	e (m)
a	C1	$8,0 \cdot 10^{-06}$	$1,6 \cdot 10^{-06}$	
b	C1		$1,1 \cdot 10^{-06}$	
c	C1	$1,20 \cdot 10^{-04}$		
a	C2	$2,1 \cdot 10^{-04}$	$4,2 \cdot 10^{-06}$	
b	C2		$1,9 \cdot 10^{-06}$	
a	C7	$3,8 \cdot 10^{-04}$	$1,3 \cdot 10^{-05}$	
b	C7		$8,5 \cdot 10^{-06}$	
a	C8	$2,8 \cdot 10^{-05}$	$1,4 \cdot 10^{-06}$	
b	C8		$3,7 \cdot 10^{-07}$	
c	C8	$1,06 \cdot 10^{-05}$		
media		$1,38 \cdot 10^{-04}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	
T/K				34,7

3. CARATTERISTICHE DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA NELL'ACQUIFERO INTERMEDIO.

La scarsità di dati stratigrafici non ha consentito la ricostruzione di un soddisfacente quadro geologico, specialmente per l'aspetto riguardante l'estensione areale dei livelli sabbioso-limosi rinvenuti e i loro eventuali rapporti con le formazioni permeabili affioranti al bordo del Tavoliere; il modello della circolazione idrica interessante le lenti artesiane, dal riconoscimento delle modalità della loro alimentazione alla valutazione delle velocità di filtrazione e dei tempi di residenza delle acque in esse circolanti, è stato ipotizzato attraverso l'ausilio di metodologie geochemiche ed isotopiche.

Tali metodologie si sono avvalse di dati analitici riferiti a campioni prelevati da alcuni pozzi durante prove di emungimento.

3.1. Caratteristiche chimiche delle acque campionate.

La composizione chimica delle acque campionate è rappresentata nella fig. 3. Per tutte le acque Na^+ e HCO_3^- rappresentano circa l'80% del contenuto in solidi disciolti: tranne che in un campione, il Ca^{++} è presente in concentrazioni non superiori ai 7 mg/l, mentre il Mg^{++} è spesso del tutto assente. Cloruri e solfati sono anch'essi presenti in concentrazioni basse: i solfati, in particolare, presentano concentrazioni in diminuzione all'aumentare della concentrazione in bicarbonati. Le acque hanno salinità compresa tra 0,4 e 1,5 g/l e risultano tutte appartenenti alla facies bicarbonato-sodica. Nella fig. 3 la composizione chimica dell'acqua delle lenti è posta a confronto con quella di un'acqua di tipo bicarbonato-calcico campionata nelle parti più interne della Murgia nordoccidentale.

La facies idrochimica bicarbonato-sodica viene tipicamente originata per l'azione di reazioni di scambio cationico in acquiferi sedimentari contenenti permutiti già a contatto con acque salate quando si instaura una circolazione di acque dolci (FOSTER, 1950, BACK, 1960, BLAKE, 1989, CHAPPELLE, 1983, APPELO & GEIRNAERT, 1983, BEEKMAN, 1990, GIMENEZ & FIDELIBUS, 1994). Infatti, quando un sedimento, per intrusione di acque marine o perché depositatosi in ambiente marino, è in equilibrio con acque salate, le permutiti presenti nei sedimenti contengono ioni Na^+ in elevata proporzione nei siti di scambio: se tali sedimenti vengono successivamente a contatto con acque dolci contenenti prevalentemente ioni Ca^{++} (ioni che hanno verso i siti di scambio una affinità

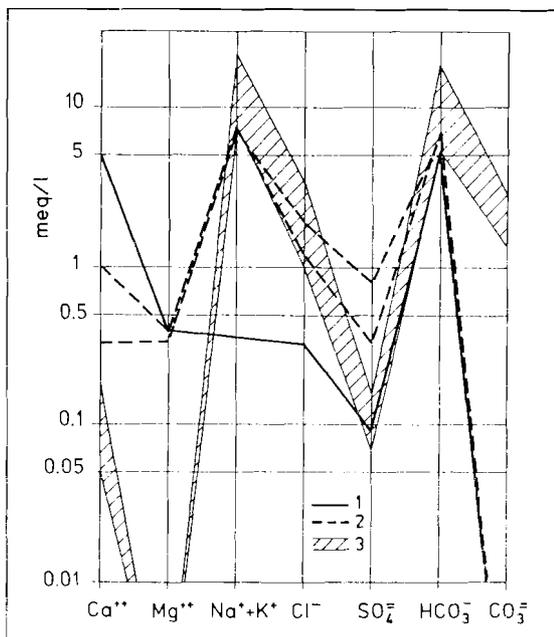


Figura 3. Composizione chimica di acque sotterranee circolanti nell'acquifero della Murgia nordoccidentale (1) e delle acque rinvenute nelle lenti artesiane (2 e 3).

maggiore rispetto a quella degli ioni Na⁺ residenti), in relazione al disequilibrio chimico che si viene a creare tra le acque dolci e il sedimento, si attivano reazioni di scambio cationico che tendono a ripristinare l'equilibrio tra ioni adsorbiti e ioni in soluzione. Il fenomeno, definibile come «addolcimento» (ing. refreshing), può portare ad una forte alterazione della composizione cationica iniziale dell'acqua dolce, che si arricchisce in Na⁺ e perde Ca⁺⁺ fino a che l'incremento del contenuto di ioni Na⁺ non comporti il raggiungimento dell'equilibrio (APPELO & POSTMA, 1993). Questo tipo di reazione di scambio è conosciuto come scambio cationico diretto.

I processi di addolcimento sono stati simulati da APPELO et al., 1989, e da BEEKMAN, 1990, sia attraverso sperimentazioni di laboratorio, applicando i principi della cromatografia ionica, che attraverso codici di calcolo, implementati con gli opportuni algoritmi del modello geochemico conseguente alla sperimentazione. Il comportamento dei diversi costituenti chimici durante lo sviluppo dei processi di scambio è stato osservato dipendere da vari fattori: differenze tra i coefficienti di selettività, valore della capacità di scambio cationico (CEC), contrasto tra la composizione chimica del fluido in ingresso e quello residente inizialmente nei pori del sedimento, dispersione del mezzo.

La fig. 4 mostra il risultato della simulazione (basata su valori dei parametri di ingresso derivati dai risultati sperimentali) di un processo di addolcimento di un acquifero salinizzato lungo una linea di flusso delle acque dolci. Gli andamenti delle concentrazioni dei differenti costituenti maggiori sono riferiti alla situazione determinatasi in ogni punto dell'acquifero immediatamente dopo il passaggio di un volume di acqua dolce pari al volume dei pori (BEEKMAN, 1990), cioè appena dopo la rimozione totale delle acque salate. Le alte concentrazioni di Na⁺, tipiche delle acque salate, si incontrano infatti alla fine del deflusso, mentre da sinistra, fronte di arrivo delle acque dolci, è visibile come si sviluppi il lavaggio del complesso di scambio, in quanto l'equilibratura delle acque dolci con il complesso di scambio provoca una serie di reazioni che favoriscono la cessione sequenziale di Mg⁺⁺ e Na⁺ alla soluzione in cambio di Ca⁺⁺.

L'aumento, concomitantemente al Na⁺, dell'alcalinità totale è in relazione alla dissoluzione di calcite, dissoluzione derivata dalla sottosaturazione indotta dalla perdita di Ca⁺⁺, sottratto all'acqua dallo scambio cationico: tale dissoluzione, in ambiente chiuso, comporta un aumento del pH delle acque.

Da un punto di vista del tutto generale, la sequenza spaziale delle facies chimiche che si può derivare dalla fig. 4 lungo lo sviluppo del processo, dal fronte di ingresso delle acque dolci verso il fronte salino, è:



Solo quando tutto il Na⁺ presente nei siti di

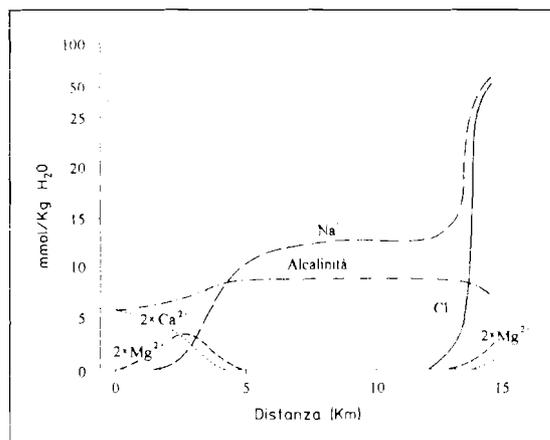


Figura 4. Simulazione del processo di lavaggio di un acquifero salinizzato da parte di acque dolci. La distanza in km rappresenta la distanza dal fronte delle acque dolci (da BEEKMAN, 1990, modificato).

scambio è spiazzato, il Mg^{++} viene sequenzialmente spiazzato dal Ca^{++} (zona intermedia dell'acquifero simulato in fig. 4), producendo la facies $Mg-HCO_3$ ed infine, quando il complesso di scambio risulta finalmente equilibrato con la facies $Ca-HCO_3$ (zona iniziale dell'acquifero in fig. 4), questa rimane l'unica facies presente.

La velocità con cui si susseguono le facies in un determinato punto dell'acquifero dipende dal rapporto tra la quantità di ioni adsorbiti e la quantità di ioni scambiabili apportati dalle acque dolci. Sedimenti già a contatto con acque salate presentano quantità di ioni Na^+ adsorbiti di molto superiori rispetto alle possibili quantità di ioni Ca^{++} apportati dalle acque dolci, comportando un rapporto (ioni adsorbiti) / (ioni in soluzione) molto alto: il succedersi delle diverse facies idrochimiche durante i processi di addolcimento è quindi un processo sufficientemente lento, dato che è necessario il passaggio di un volume di acque dolci, apportanti Ca^{++} in relativamente bassa concentrazione, molte volte superiore al volume dei pori per spostare tutto il Na^+ dai siti di scambio. A meno di suppletive dissoluzioni di calcite, il processo di recupero alla circolazione di acque bicarbonato-calciche può quindi risultare, in acquiferi dotati di scarsa conducibilità idraulica, molto lungo, richiedendo anche periodi di tempo pari alle centinaia o migliaia di anni, anche per acquiferi arealmente poco sviluppati (APPELO & POSTMA, 1993).

Da quanto detto risulta quindi plausibile che le caratteristiche delle acque delle lenti artesiane del Tavoliere possano essere generate da un processo di lavaggio dei sedimenti marini da parte di acque dolci provenienti dagli acquiferi contigui: la debole salinità delle acque (0,5-1,5 g/l), il loro pH (8-8,7) e la caratteristica facies idrochimica corrispondono al processo descritto.

I contenuti in bicarbonati e in Na^+ rilevati nelle acque delle lenti sono variabili in un ampio intervallo, raggiungendo nei casi estremi valori pari a 23 e 21 meq/l rispettivamente. Questi tenori sono possibili solo se si ammette la presenza di materiale calcareo nelle lenti: in questo caso la rimozione di Ca^{++} per scambio cationico provocherebbe la soluzione di calcite. A meno di processi aggiuntivi, essendo il sistema chiuso alla CO_2 , il processo di soluzione, mantenendo le acque condizioni di saturazione con la calcite, porterebbe all'aumento dei contenuti in bicarbonati ed ad una diminuzione della pressione parziale della CO_2 ; per ulteriore successivo scambio del Ca^{++} prodotto dalla dissoluzione si avrebbe quindi un aumento dei contenuti in Na^+ , fatto che com-

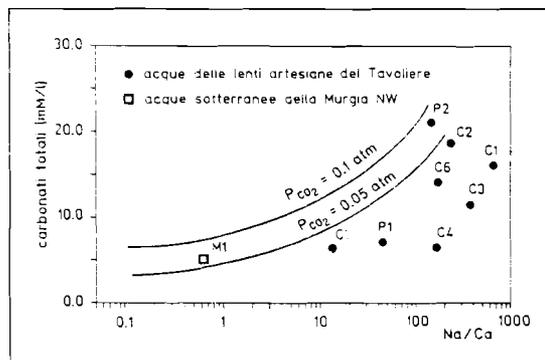


Figura 5. Relazione tra i contenuti in carbonati totali (moli/l) e i valori del rapporto molare Na/Ca per le acque delle lenti artesiane e per alcuni campioni di acque sotterranee della Murgia nord-occidentale.

porterebbe a sua volta una rinnovata dissoluzione.

Il grafico di fig. 5 mostra come le acque, a partire da termini bicarbonato calcici (M1, campionato in Murgia), possano evolvere verso rapporti Na/Ca molto alti e tenori molto alti in carbonati totali, comportando P_{CO_2} in progressiva diminuzione (PEARSON & SWARZENKI, 1974).

Tuttavia non può essere escluso che anidride carbonica possa essere prodotta nell'ambito delle lenti, per esempio in relazione a decadimento anaerobico di materia organica o in conseguenza di processi di riduzione dei solfati: ciò determinerebbe localmente situazioni assimilabili ad un sistema aperto, esaltando i processi di dissoluzione. Alcuni ritrovamenti suggeriscono che le acque possono essere state in contatto con materia organica: durante le trivellazioni di alcuni dei pozzi sono stati infatti segnalati livelli ricchi di materia organica e, durante l'espletamento di prove di portata, è stata notata nelle acque presenza di frammenti di lignite; inoltre, sempre durante fasi di trivellazione, in alcuni casi si sono prodotte emanazioni gassose temporanee (CO_2 e CH_4), mentre le acque campionate risultavano a colorazione giallo-bruna.

Il progressivo aumento dei contenuti in Na^+ e HCO_3^- , e la concomitante diminuzione della concentrazione del Ca^{++} dovrebbero, assumendo che nella maggior parte dei casi esista una condizione di sistema chiuso alla CO_2 , indicare fasi evolutive sempre più avanzate della facies bicarbonato-sodica, in allontanamento dal fronte delle acque dolci. Se si depurano i dati analitici dall'effetto di miscelamento con residui delle acque marine interstiziali, effetto che si nota maggiormente per le acque dei pozzi trivellati nella parte N della zona di studio, gli eccessi in Na^+ e i deficit in Ca^{++} calcolati descrivono una

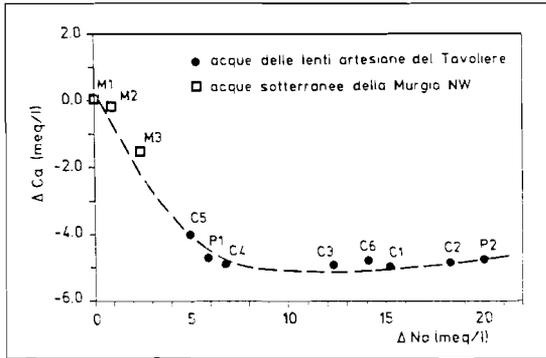


Figura 6. Relazione tra i valori dei deficit in Ca^{2+} (ΔCa) e degli eccessi in Na^+ (ΔNa) relativi alle acque delle lenti artesiane.

sequenza (fig. 6) che suggerisce una generica direzione SE-NW del deflusso delle acque presenti nelle lenti artesiane.

Da tale diagramma si ricava infatti che le acque campionate nei pozzi C5 e P1 rappresentano una facies di transizione, definibile come Na-Ca-HCO_3 , tra termini bicarbonato-calcici del tipo presente nell'acquifero carbonatico della Murgia, e termini bicarbonato-sodici campionati negli altri pozzi.

Il ritrovamento nelle lenti della sola facies bicarbonato-sodica segnala comunque che il processo di lavaggio è ancora in corso, non essendovi infatti, perlomeno relativamente ai pochi campionamenti, ritrovamenti di altre facies più avanzate (Ca-HCO_3 e Mg-HCO_3) dal punto di vista evolutivo del processo.

Sulla base del modello proposto e dei dati chimici ed idrologici disponibili, possono essere effettuati semplici calcoli quantitativi per valutare i tempi necessari allo sviluppo e alla scomparsa della facies bicarbonato-sodica (APPELO & POSTMA, 1993). Considerando il valore medio della permeabilità ($4,0 \cdot 10^{-6}$ m/s) e un valore medio della cadente idraulica ($8 \cdot 10^{-3}$), si ottiene per una sezione di 1 m^2 un valore di portata fluente di circa $1 \text{ m}^3/\text{anno}$; assumendo inoltre $\text{CEC} = 1 \text{ meq}/100\text{g}$ di sedimento, $\gamma_s = 2 \text{ g}/\text{cm}^3$, porosità = 0,3 e $[\text{Ca}^{2+}] = 5 \text{ meq}/\text{l}$ nelle acque dolci, lo spiazzamento delle originarie acque saline interstiziali risulterebbe avvenire in 300 anni/km, mentre la facies Na-HCO_3 scomparirebbe solo dopo i successivi 2300 anni/km. Ad es., su una distanza di 30 km, il passaggio della facies Na-HCO_3 si compirebbe in 69000 anni. Dato che la facies Na-HCO_3 è la sola presente, l'età delle acque dovrebbe, secondo queste valutazioni, essere compresa tra 9000 e 70000 anni. In realtà questa ultima valutazione è in eccesso: in questo calcolo infatti non è tenuto in conto l'effetto delle dissoluzioni, mentre la loro entità influenza la

velocità del fenomeno di scambio e quindi lo sviluppo e la scomparsa della facies Na-HCO_3 .

Il calcolo proposto (anche se basato su alcune assunzioni) e la valutazione dei parametri idrologici concordano tuttavia nel suggerire che le acque in studio siano soggette ad una circolazione estremamente lenta.

4. INDICAZIONI DI ETÀ ED ORIGINE DELLE ACQUE DA DATI ISOTOPICI.

Su tre campioni (C2, C3, C4) sono state effettuate determinazioni del contenuto in ^{14}C e di $\delta^{13}\text{C}$, δD e $\delta^{18}\text{O}$.

I valori di attività del ^{14}C (da 4 a 1,53 pcm) indicano età apparenti molto alte. In conseguenza al modello geochimico proposto, a tali età deve essere apportata una correzione in relazione all'azione del carbonio «antico» che, man mano che l'acqua nel suo percorso discioglie carbonati, diluisce quello moderno. I dati del $\delta^{13}\text{C}$ concordano nel segnalare un processo di diluizione da parte di carbonio minerale, portandosi verso valori sempre più positivi man mano che si sviluppa il processo di scambio ionico e quindi il relativo processo di dissoluzione: concordemente diminuiscono i valori dell'attività del ^{14}C (fig. 7).

Per correggere i dati apparenti occorrerebbe conoscere l'entità della diluizione: se A è l'attività del ^{14}C misurata (in % di carbonio moderno) ed A_0 è l'attività al tempo zero, l'età t può essere calcolata da:

$$A = A_0 Q 2^{-t/T}$$

dove Q è il fattore di correzione e T è il tempo di dimezzamento (PEARSON & HANSHAW, 1970).

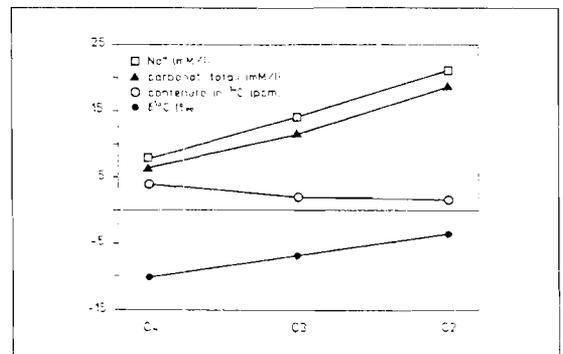


Figura 7. Variazioni dei contenuti in ^{14}C , in Na^+ e carbonati totali e del valore del $\delta^{13}\text{C}$ per alcune delle acque campionate dalle lenti artesiane.

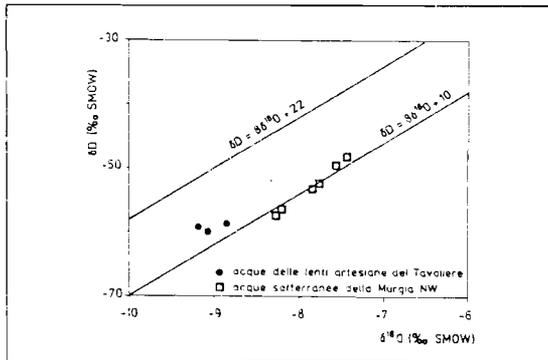


Figura 8. Composizione in isotopi stabili di alcune delle acque delle lenti artesiane del Tavoliere a confronto con dati relativi alle acque sotterranee dell'acquifero carbonatico della Murgia nordoccidentale.

Dovendo necessariamente adottare delle semplificazioni, in assenza di dati isotopici ed idrochimici fondamentali necessari ad una correzione esatta, si è ritenuto di stimare il fattore di correzione secondo WIGLEY (1975). Adottando un modello di evoluzione in sistema chiuso (secondo la definizione di GARRELLS & CHRIST, 1965), per pH tra 5.8 e 8.4, come nel caso delle acque in esame, il fattore di correzione prende valori intorno a 0,5; tuttavia WIGLEY (1975) osserva che valori considerevolmente più bassi possono derivare dall'azione dei processi di scambio cationico.

Adottando quindi per il fattore di correzione due diversi valori, pari a 0,4 e 0,3, si ottengono per i tre campioni età nell'intervallo 19000-27000 anni e 16500-24500 rispettivamente. Queste valutazioni non sono in contraddizione con quanto ipotizzato attraverso i calcoli basati sui dati chimici. Ipotizzando inoltre un circuito che, in accordo con le indicazioni che si possono trarre dalla fig. 6, si origini nella zona dei pozzi C5 e P1 e che si estenda verso le zone dei pozzi C4, C3 e C2, le velocità che si possono calcolare risultano essere del metro all'anno, dello stesso ordine di grandezza di quelle desumibili sulla base dei parametri idrogeologici.

La composizione in isotopi stabili (fig. 8) risulta caratterizzata da valori più impoveriti rispetto a quelli relativi ad acque sotterranee circolanti nella porzione nordoccidentale del massiccio murgiano, collegate ad aree di alimentazione poste a quote medie intorno ai 500 m s.l.m. (TULIPANO et al., 1990). Nella interpretazione dei suddetti dati isotopici va tenuto conto che la lentissima velocità di filtrazione nelle lenti artesiane riporta l'epoca dell'infiltrazione a circa 20000 anni fa o più, in coincidenza con la glaciazione Würmiana. Le più basse temperature

atmosferiche dell'epoca giustificerebbero quindi valori più impoveriti delle precipitazioni alimentanti alle stesse quote su indicate.

5. VALUTAZIONI DELLE POTENZIALITÀ DELL'ACQUIFERO

Quanto sin qui detto consente di formulare ipotesi circa la provenienza delle acque presenti nelle lenti artesiane.

La presenza ad W del Tavoliere, sui primi rilievi dell'Appennino dauno, di estesi affioramenti di terreni sabbiosi i cui strati si incuneano sotto i terreni argillosi costituenti la formazione delle argille azzurre (sez. BB' in fig. 1), ha, in un primo momento, fatto ipotizzare che tali litotipi, così disposti, potessero fornire alimentazione alla circolazione individuata nelle lenti.

A tale ipotesi, in seguito, si è contrapposta la possibilità che tali lenti, invece, ricevano alimentazione, laterale o dal basso, dalle acque presenti nel massiccio carbonatico murgiano, che, a partire dal confine con il Tavoliere, sprofonda a gradinata, immergendosi sotto la coltre argillosa (sez. AA' di fig. 1). L'ipotesi è basata sulla valutazione di pochi dati puntuali riferiti ad alcune perforazioni profonde eseguite più di un decennio addietro sia in calcari, nella parte nordoccidentale dell'acquifero Murgiano, in prossimità del confine con il Tavoliere (30 km circa a SSE di Cerignola), che nel Tavoliere stesso, in territorio di Cerignola, perforazioni queste ultime attestate nei calcari di base.

La falda idrica incontrata dalle perforazioni nelle parti interne della Murgia presenta carichi idraulici dell'ordine di 240 m s.l.m.: tali carichi giustificerebbero l'andamento dei carichi idraulici caratterizzanti le lenti presenti nelle zone più prossime al basamento. Dalla Murgia, tra i 200 e i 250 m sotto il l.m., si origina un flusso preferenziale (COTECCHIA et al., 1978) individuato da temperature minime di 12°C, evidentemente alimentato alle più alte quote del massiccio. Più a valle, dove i calcari si immergono, in alcune perforazioni che raggiungono il tetto della formazione mesozoica a quote intorno ai 400 m sotto il l.m., nei calcari sono state rinvenute acque molto dolci (0,5 g/l), di tipo bicarbonato-calcico, aventi carichi idraulici superiori ai 100 m s.l.m. e temperatura di circa 14°C. Tale temperatura, anomalamente bassa per le profondità considerate, può essere indicativa di un flusso preferenziale che si è visto originarsi a monte. Il ritrovamento nel basamento a contatto con i sedimenti argillosi di acque dolci con carichi elevati, salinità molto basse

e basse temperature, supporta fortemente l'ipotesi che, almeno localmente, l'acquifero carbonatico possa risultare tributario di acque dolci di alimentazione alle lenti.

Anche nelle ultime perforazioni considerate sono state rinvenuti livelli sabbiosi e sabbioso-argillosi inclusi nella coltre argillosa, a profondità comparabili a quelle a cui si sono incontrati nelle perforazioni in studio. Quest'ultima circostanza, insieme alle considerazioni precedentemente svolte, rende plausibile l'ipotesi che le lenti artesiane intercettate appartengano in realtà ad un unico livello, che si estende fino ad entrare in contatto con le masse carbonatiche mesozoiche. Tale ipotesi è plausibile se si consideri quali e quante possano essere le cause che possono aver determinato una variazione verticale di facies per un aumento temporaneo della quantità di materiale più grossolano trasportato nel bacino (aumentato potere erosivo dei corsi d'acqua in concomitanza con l'abbassamento del livello mare, etc.) in una determinata fase del ciclo sedimentario.

A favore della continuità è anche la constatazione della progressiva diminuzione dei carichi idraulici nella direzione del probabile deflusso delle acque (fig. 2).

Gli unici dati certi in base ai quali valutare la potenzialità dell'acquifero o, in termini pratici, la possibilità di utilizzarne le acque, sono i valori della permeabilità e trasmissività calcolati dalle prove di portata che, insieme alle altre considerazioni svolte, forniscono velocità di filtrazione assai modeste e tempi di residenza estremamente lunghi; tali informazioni portano alla conclusione che le lenti ricevono una ricarica del tutto trascurabile.

Le acque contenute in tali lenti possono essere quindi sfruttate per tempi brevi o per usi strettamente locali, che comportino l'estrazione di portate modeste. Se si volesse seguire la filosofia emergente in tema di sfruttamento delle risorse, secondo la quale le risorse idriche sono un bene che può essere utilizzato sino al completo esaurimento o inutilizzabilità, purché si conseguano adeguati benefici economici, anche se temporanei, andrebbe comunque valutata per il Tavoliere la possibile ricaduta economica in relazione allo sfruttamento delle acque delle lenti: in questo senso la sopravvivenza di attività economiche nel Tavoliere, in attesa di adduzioni di acque da altra fonte, giustificherebbe lo sfruttamento.

Va comunque infine evidenziato che tali acque non sono idonee ad un uso irriguo per l'elevato valore della concentrazione in Na^+ e in alcuni casi per la presenza di boro in elevate concentrazioni.

BIBLIOGRAFIA

- APPELO C.A.J., PONTEN J. & BEEKMAN H.E. (1989) - *Natural ion chromatography during fresh-/sea water displacements in aquifers: A hydrogeochemical model of the past*. Water-Rock Interaction, Miles (Ed.), Balkema, Rotterdam, 23-28.
- APPELO C.A.J. & POSTMA D. (1993) - *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 536 pp.
- APPELO C.A.J. & GEIRNAERT W. (1983) - *Processes accompanying the intrusion of salt water*. Proc. of 8th Salt Water Intrusion Meeting, Geologia Applicata e Idrogeologia, vol. XVIII, p. II, 29-40.
- BACK W. (1960) - *Origin of hydrochemical facies of ground water in the Atlantic Coastal Plain*. Proc. Int. Geol. Cong., 21th, Copenhagen, vol. I, 87-95.
- BEEKMAN H. E. (1990) - *Ion Chromatography of fresh- and seawater intrusion: multicomponent dispersive and diffusive transport in groundwater*. Ph. D. Tesis, Vrije Universiteit te Amsterdam, 200 pp.
- BLAKE R. (1989) - *The origin of high sodium bicarbonate waters in the Orway Basin, Victoria, Australia*. Water-Rock Interaction, Miles (Ed.), Balkema, Rotterdam, 83-85.
- CARTA GEOLOGICA DELL'APPENNINO MERIDIONALE (1988) - *Parti rilevate da CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G.* (Fogli 164, 175, 176). 74° Cong. della Società Geologica Italiana, Sorrento.
- CHAPPELLE F.H. (1983) - *Groundwater geochemistry and calcite cementation of the Aquia aquifer in Southern Maryland*. Water Resour. Res., vol. 19, 545-558.
- COTECCHIA V., TADOLINI T. & TULIPANO L. (1978) - *Ground water temperature in the Murgia karst aquifer (Puglia - Southern Italy)*. Proc. of Int. Symp. on Karst Hydrology, Bocker T. (Ed.), Budapest.
- FOSTER M.D. (1950) - *The origin of high sodium bicarbonate waters in the Atlantic and Gulf Coast Plains*. Geochim. e Cosmochim. Acta, vol. 1, 33-48.
- GARRELS R.M. & CHRISTS C.L. (1965) - *Solutions, Minerals and Equilibria*. Harper and Row, New York, 450 pp.
- GIMÉNEZ E. & FIDELIBUS M.D. (1994) - *Processi di salinizzazione delle acque sotterranee nell'acquifero della Piana di Oropesa (Castellon-Spagna)*. IV Convegno dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Riccione (in stampa).
- IPPOLITO F., COTECCHIA V., DE MARCHI G. & DENTICE R. (1958) - *Indagine sulle acque sotterranee del Tavoliere - Puglia*. Cassa per il Mezzogiorno, Roma, 1-56.
- PEARSON F.J. & HANSHAW B.B. (1970) - *Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on*

carbon-14 dating. Proc. of Int. Symp. Isotope Hydrology 1970, IAEA, Vienna, 271-286.

Pearson F.J. & Swarzenki W.V. (1974) - *¹⁴C evidence for the origin of arid region groundwater, Northeastern Province, Kenia*. Proc. of Symp. on Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, IAEA, Vienna, 1974, vol. II, 95-109.

SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA. *Carta Geologica d'Italia. Fogli 164, 174, 175, 176*.

TADOLINI T., SDAO F. & FERRARI G. (1990) - *Grado di vulnerabilità della falda superficiale del Tavoliere di Foggia nei confronti di possibili inquinamenti antropici*. Atti del I Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle

Acque Sotterranee, 291-303, Modena.

TADOLINI T. & TULIPANO L. (inedito) - *Il bilancio idrogeologico dei sistemi acquiferi pugliesi*. In preparazione per la stampa su Geol. Appl. e Idrogeol., Bari.

TRAMONTE R. (1955) - *Contributo allo studio delle acque sotterranee di Capitanata*. Laterza editore, I-III, Bari.

WIGLEY T.M.L. (1975) - *Carbon-14 Dating of Groundwater From Closed and Open Systems*. Water Resour. Res., vol. II, p. 2, 324-328.

ZORZI L. & REINA C. (1960) - *Nuove vedute sul movimento delle acque sotterranee nel bacino artesiano del Tavoliere di Puglia*. L'Acqua, I, 4-13.