

Il radon come tracciante delle acque sorgive finalizzato alla vulnerabilità degli acquiferi carbonatici complessi: l'esempio del gruppo sorgivo del Rio Arno (Gran Sasso, Italia centrale)

Vanessa Di Sabatino¹, Mauro Manetta¹, Donato Sciannamblo², Michele Spizzico²,
Marco Tallini¹

¹Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno, Università dell'Aquila, Monteluco di Roio, 67040 L'Aquila; tel: 0862-434553; fax: 0862-434548; e-mail: vanessa.ds@softkey.it - tallini@ing.univaq.it.

²Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Bari, Via Orabona, 4, 70125 Bari; e-mail: m.spizzico@poliba.it - d.sciannamblo@poliba.it.

Radon survey in groundwater for the vulnerability of complex carbonatic aquifer: the case study of Rio Arno spring group (Gran Sasso, central Italy)

ABSTRACT: Among karst aquifers of central Italy the Gran Sasso certainly shows remarkable characteristics mainly the interaction of underground works (highway tunnels and nuclear physics lab) with a wide regional groundwater used for drinkable purpose. Therefore it is clear how in this case groundwater vulnerability is without doubt a focal point. With the goal to evaluate the groundwater vulnerability of the Rio Arno spring group located nearby and by the side of the Gran Sasso tunnels an integrated study of hydrochemistry and radon in spring water, used as environmental tracer, was carried out. The Rio Arno spring group (total average discharge of about 100 L/s) is generated by the outflow of the top of the regional groundwater due to the presence in the northern Gran Sasso slope of the permeability boundary caused by the overthrusting of Mesozoic and Tertiary limestone (i.e. regional aquifer) on to miocenic terrigenous unit (i.e. regional aquiclude). The study was based on two survey campaigns (August and September 2005) of 15 Rio Arno group springs. The analysis of hydrochemical and radon data permitted to establish the relationship of shallow groundwater flowpath in the Quaternary clastic deposits laid on the carbonatic bedrock with respect to the regional groundwater one. The radon and hydrochemical data furnished some indications on the groundwater recharge process. High values of radon (60-80 Bq/L) were found on groundwater coming from the regional groundwater outflow, while shallow groundwater had low values of radon (nearby 20 Bq/L). Average values suggested a mixing between shallow and regional groundwater. Moreover radon values, above all of the outflow spring, seemed also to be influenced by seasonal phenomena.

Key terms: Radon, Environmental tracers, Carbonatic aquifer vulnerability, Gran Sasso.

Termini chiave: Radon, Traccianti ambientali, Vulnerabilità degli acquiferi carbonatici, Gran Sasso

Riassunto

Fra gli acquiferi carbonatici dell'Italia centro-meridionale quello del Gran Sasso certamente presenta notevoli specificità quale l'interazione di importanti opere in sotterraneo (gallerie autostradali e laboratori INFN) con una estesa falda regionale captata a fini idropotabili.

Al fine di stimare il grado di vulnerabilità del gruppo sorgivo del Rio Arno, localizzato lateralmente ed a breve distanza dalle opere in sotterraneo è stato eseguito uno studio integrato idrochimico e del contenuto in radon su queste sorgenti connesse allo sfioro per soglia sottoposta del culmine della falda regionale.

Lo studio, basato su due campionamenti (agosto e ottobre 2004) di 15 polle d'acqua del Rio Arno, ha permesso di stabilire, correlando le caratteristiche chimico-fisiche e chimiche con il contenuto in radon delle acque

sorgive, il rapporto esistente tra il circuito superficiale delle acque che si muovono all'interno dei depositi detritici appoggiati al substrato carbonatico e il circuito più profondo connesso con l'acquifero regionale. I primi risultati di questo studio hanno pertanto dimostrato l'utilità della misura del contenuto in radon nelle acque sorgive come metodo di tracciamento delle acque sotterranee anche in acquiferi carsici che presentano un assetto litostratigrafico e tettonico particolarmente complesso.

Introduzione

La ricerca sull'idrologia del Gran Sasso, uno dei più rappresentativi tra gli acquiferi carsici dell'Italia centro-meridionale, è cruciale per la caratterizzazione della risorsa idrica utilizzabile e del relativo grado di vulnerabilità, per le interazioni che con essa hanno le opere in sotterraneo ed in

relazione alla valorizzazione e tutela delle aree protette. Al fine di stimare il grado di vulnerabilità dell'acquifero, in particolare del gruppo sorgivo del Rio Arno, è stato eseguito uno studio integrato dell'idrochimica e del contenuto in radon su queste sorgenti connesse allo sfioro della falda regionale e localizzate a breve distanza dalle infrastrutture realizzate all'interno del massiccio carbonatico del Gran Sasso (tunnel autostradali e laboratori INFN).

L'identificazione dei percorsi idrici sotterranei è la base da cui partire per attuare qualsiasi tipo di intervento a carico di un acquifero, per operare in modo compatibile nella gestione della risorsa idrica e per la valutazione delle relazioni con l'ambiente ipogeo e con l'intera struttura idrogeologica.

L'acquifero del Gran Sasso e il gruppo sorgivo del Rio Arno

Il massiccio del Gran Sasso è caratterizzato da sequenze meso-cenozoiche di piattaforma carbonatica ("facies laziale-abruzzese" Auct.) e di scarpata silico-calcareo-marmose con notevoli intercalazioni di risedimenti calcarei ("facies di transizione umbro-marchigiana" Auct.). Tali successioni sono state coinvolte nel Neogene durante l'orogenesi appenninica nella formazione di un articolato edificio strutturale embricato, successivamente dislocato e ribassato verso SW da numerose faglie distensive appenniniche e trasversali alla struttura, a partire dal Pliocene superiore.

Il risultato è stata la formazione di un acquifero carsico compartimentato in settori isolati o semi-indipendenti dal punto di vista idraulico in funzione della presenza, spessore e caratteristiche delle rocce di faglia associate agli elementi strutturali fragili di prim'ordine. L'acquifero, esteso circa 700 km², è saturato da un'unica falda regionale sostenuta alla base da dolomie altotriassiche che si comportano da livello di base (Boni et alii, 1986), con conducibilità idraulica per fratturazione inferiore a quella dei calcari, 10-8-10-9 m/s.

Il drenaggio sotterraneo è centrifugo dal nucleo dell'acquifero (conca quasi endoreica di Campo Imperatore) verso le zone periferiche da cui scaturiscono le sorgenti principali (Celico, 1983): verso SE (valle del Tirino e piana dell'Aquila) alla quota di base si realizzano per affioramento della superficie piezometrica sorgenti con portata costante compresa fra 1 e 8 m³/s, mentre, a NE, lungo il sovrascorrimento frontale si realizza un allineamento di sorgenti per trabocco della falda regionale (Figura 1). Verso SW il limite di permeabilità è costituito dal contatto stratigrafico discordante, e localmente tettonico, delle unità quaternarie detritiche (aquitardo regionale) e le unità calcaree dell'acquifero. Inoltre verso SE il sistema idrogeologico del Gran Sasso interagisce con quello del M. Sirente, dando luogo a scambi idrici sotterranei che si riscontrano nella valle del Tirino, e lungo la valle dell'Aterno (Petitta & Tallini, 2002).

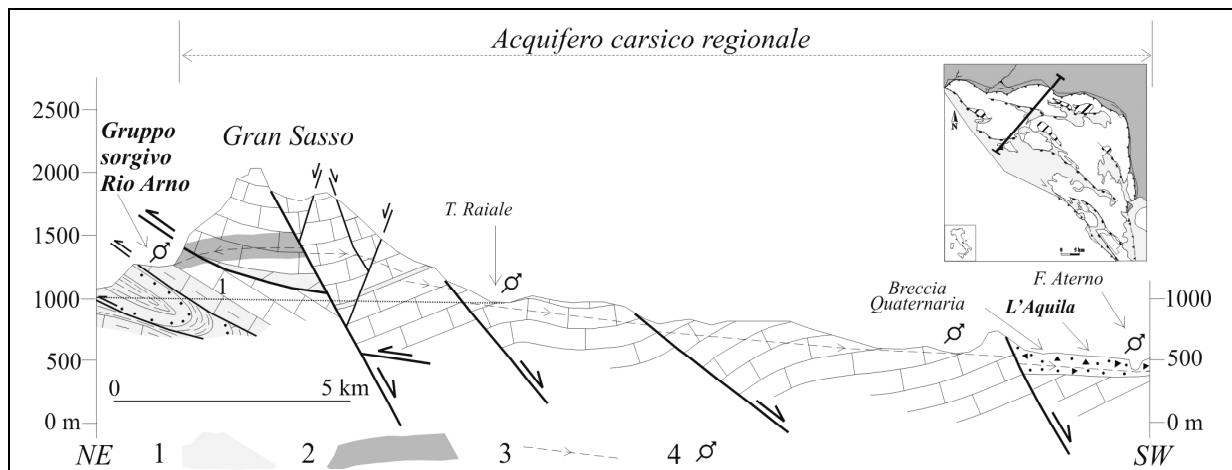


Figura 1 – Il contesto idrogeologico: struttura dell'acquifero del Gran Sasso e posizione delle sorgenti del Rio Arno. 1) substrato impermeabile; 2) fascia carsica; 3) livello di falda; 4) sorgenti.

Gran Sasso hydrogeological section and Rio Arno spring group location. 1) Waterproof formation; 2) karsic level; 3) piezometric level; 4) springs.

Il gruppo sorgivo del Rio Arno è localizzato sul bordo nord del sistema idrogeologico del Gran Sasso ad una quota di 1524 metri, dove prende origine per trabocco della falda a causa del sovrascorrimento frontale, che mette in contatto l'acquifero carsico (hangigwall) con i depositi terrigeni torbiditici altomiocenici (footwall) (Figura 1). La portata

complessiva del gruppo sorgivo nel 2004 è variata da un minimo di 50 L/s in agosto e febbraio, ai 300L/s in giugno e i 150 L/s in dicembre, rispettivamente come massimo assoluto e relativo.

Tramite analisi della composizione chimica e del contenuto di Radon nelle acque delle varie sorgenti è stato

possibile identificare e caratterizzare la loro provenienza dando così una valutazione del rapporto con l'acquifero del Gran Sasso.

Uso del Radon come tracciante in Idrogeologia

L'analisi della concentrazione del radon (^{222}Rn), gas nobile radioattivo, ha permesso di caratterizzare l'ambiente idrogeologico e far luce sui meccanismi che influenzano la circolazione sotterranea negli acquiferi carbonatici fessurati (Tadolini & Spizzico, 1996). Studi condotti sulla presenza di tale tracciante ambientale, e sui processi diffusivi del radon in funzione del chimismo delle acque sotterranee, danno importanti informazioni sulla caratterizzazione idrogeologica dell'acquifero. La mobilità delle acque di falda trova, infatti, una sua corrispondenza con la concentrazione di tale gas. Il movimento del radon nel sottosuolo è fondamentalmente legato alle condizioni fisiche del sistema gas-acqua-roccia ed è indotto da gradienti di pressione o di concentrazione: nel primo caso il moto è detto di "avvezione", nel secondo il moto è detto di "diffusione". Nel sottosuolo raramente i due processi agiscono separatamente per cui lo spostamento della massa del gas radioattivo, nelle acque di falda, è imputabile all'azione combinata di entrambi i processi. Tali moti condizionano le concentrazioni di gas radioattivo nelle acque sotterranee e creano, in uno stesso punto acqua, differenziazioni per luoghi e con la profondità (Spizzico, 2005).

La concentrazione di radon negli acquiferi è direttamente legata alla presenza, all'interno di fessure e fratture che costituiscono le vie di circolazione delle acque sotterranee, di "terre rosse": prodotti residuali della dissoluzione dei calcari. Le diverse concentrazioni di sali di Radio contenute nelle "terre rosse" attivano lo scambio ionico e favoriscono la costante presenza di Radon nelle acque di falda (Tadolini & Spizzico, 1998).

Analisi e discussione dei dati Radon

Lo studio del contenuto di radon nelle acque sorgive del Gruppo del Rio Arno parte da due campagne di campionamenti in polle d'acqua dislocate lungo il corso superiore del Rio Arno.

Il primo ciclo di campionamenti è stato condotto tra luglio e agosto del 2004, nei mesi successivi alla massima ricarica della falda che per la zona può essere riferito al mese di maggio; il secondo ciclo è stato espletato alla fine del periodo di magra che coincide, prevalentemente, con la fine del mese di settembre-inizio di ottobre.

Nello stralcio topografico della Figura 2 sono indicati i punti in cui sono stati effettuati i prelievi: in particolare sono il gruppo delle *Sorgenti del Rio Arno* (gruppo 24) con sei punti acqua campionati, e gli affioramenti di *Fonte Pescopiano*, il gruppo 18, con quattro polle elocrene campionate che affiorano su un ripido pendio sulla sponda destra del Rio Arno al di sotto di una faggeta; tutti gli altri

punti campionati sono singole emergenze, alcuni rappresentano sorgenti in alveo che contribuiscono in modo lineare all'incremento della portata, il gruppo 19, altri sono affioramenti per lo più superficiali (gruppo 20).

Sono state eseguite misure di temperatura, conducibilità e pH sul campo per ciascuna sorgente o affioramento, mentre in laboratorio sono state eseguite le analisi chimiche degli elementi maggiori e del contenuto di radon.

Dai risultati ottenuti, riportati in tabella 1 si riscontra un generale incremento della concentrazione del ^{222}Rn tra il primo e il secondo ciclo di campionamento dovuto ad una maggiore persistenza dell'acqua nell'acquifero e del contatto con strati più profondi.

Va osservato anche che le analisi sulle acque prelevate negli stessi punti mostrano connotazioni chimiche sufficientemente costanti, indipendentemente dal periodo di prelievo (agosto, ottobre) mentre il contenuto di radon varia a seconda del periodo di campionamento.

I dati di campo acquisiti confermano come le attività di ^{222}Rn siano più contenute dopo il periodo di alimentazione della falda, (luglio-agosto), per il ricostituirsi degli equilibri idrici naturali. Questo spiega le minori concentrazioni del primo campionamento dovute ancora alla persistenza delle acque apportate nel periodo di ricarica, determinando un effetto di diluizione del radon disciolto in un volume maggiore.

Tabella 1 – Concentrazioni di radon riportate in pCi/L e Bq/L per i campionamenti di agosto 2004 e ottobre 2004
Radon concentration in pCi/L and Bq/L referred to August 2004 and October 2004

.codice campione	Agosto 2004		Ottobre 2004	
	pCi/l	Bq/l	pCi/l	Bq/l
18/A	55,35	2,05	26,11	0,97
18/B	87,45	3,24	n.d.	n.d.
18/C	107,69	3,99	n.d.	n.d.
18/D	98,95	3,66	n.d.	n.d.
19/A	64,12	2,37	n.d.	n.d.
19/B	69,76	2,58	71,22	2,64
20/A	58,04	2,15	62,09	2,3
20/B	23,17	0,86	n.d.	n.d.
20/C	19,37	0,72	n.d.	n.d.
20/D	n.d.	n.d.	30,57	1,13
24/A	25,68	0,95	51,14	1,89
24/B	27,61	1,02	45,87	1,7
24/C	33,26	2,4	64,69	1,23
24/D	20,53	0,76	51,91	1,92
24/E	19,06	0,71	46,35	1,72
24/F	59,04	2,19	12,19	0,45

Gli incrementi nel contenuto di radon che si evidenziano per il secondo campionamento sono dovuti alla riduzione degli spessori idrici in questo periodo, in particolare all'interessamento di livelli a più alta attività, che sono anche i più profondi.

Il processo di assorbimento di radon va di pari passo con processo di dissoluzione dei carbonati che a sua volta dipende dall'assorbimento di anidride carbonica nell'acqua piovana e di infiltrazione.

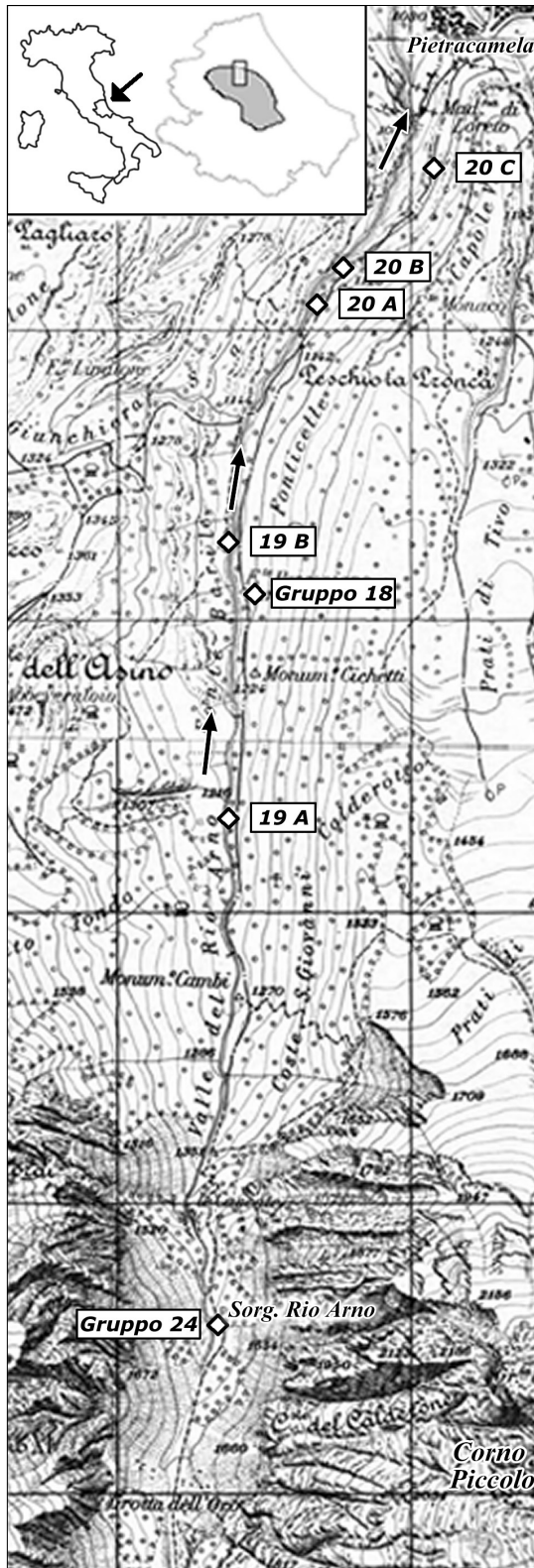


Figura 2 – Punti di campionamento delle sorgenti lungo il corso del Rio Arno
Sampling points of the Rio Arno spring group.

L'acqua, così arricchita, diventa più aggressiva nei confronti della roccia carbonatica: per effetto tampone si solubilizzano i cationi Ca^{++} e Mg^{++} ma anche Ra^{++} che emette radon (Spizzico & Sciannamblo, 2005). Maggiore è la pressione di CO_2 nell'atmosfera in contatto con l'acqua, maggiore è l'assorbimento di CO_2 nell'acqua stessa.

Il primo elemento che differenzia le acque superficiali da acque sotterranee è la concentrazione di magnesio nella frazione mineralogica: essendo, infatti, il magnesio una specie chimica rappresentativa soprattutto delle rocce dolomitiche, la sua bassa concentrazione può indicare che siamo in presenza di acque superficiali, che non hanno interagito con le dolomie altotriassiche del Gran Sasso.

Al contrario, una sua maggior presenza nelle acque sorgive testimonia una circolazione più complessa, con tempi di residenza nell'acquifero più lunghi e, quindi, con una più probabile interazione di queste con le dolomie di base.

A questo "indicatore" è stato associato il contenuto di radon per ottenere maggiori informazioni sulle modalità di circolazione delle acque. Questo elemento deriva dal radio che appartiene al II Gruppo degli elementi alcalino terrosi e il suo comportamento, entro certi limiti, è simile a quello del calcio e del magnesio che, normalmente, predominano in acque circolanti in ambienti carbonatici. Inoltre il ^{226}Ra viene adsorbito dai sedimenti argillosi, presenti nelle "terre rosse" (Moore, 1996). Questa condizione si verifica nelle sorgenti del Rio Arno (Figura 3): dalla relazione tra contenuto di Rn e di Mg è stato possibile distinguere tra acque con circolazione profonda (polle dei gruppi 18, 19 e 24) da quelle con circolazione più superficiale (polla 24/B). Appare evidente una correlazione diretta tra i due parametri.

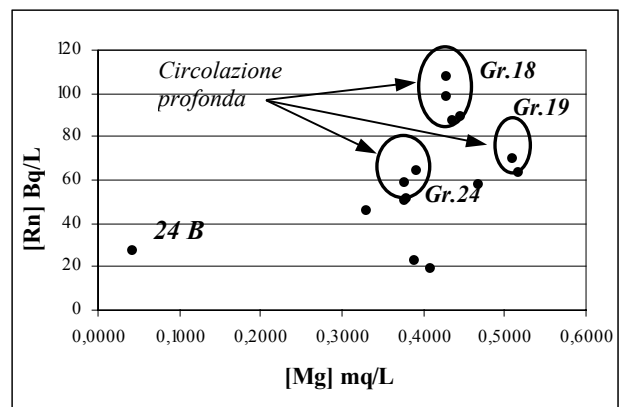


Figura 3 – Correlazione tra concentrazione di radon e di magnesio nelle sorgenti del Rio Arno.
Correlation between radon and magnesium concentration of the Rio Arno springs.

La circolazione delle acque all'interno dell'acquifero carbonatico determina, infatti, un arricchimento in radon perché in queste rocce il radio si sostituisce nel reticolo cristallino al calcio, nei calcari, ed al magnesio nelle dolomie. Pertanto, con tale processo di scambio, l'acqua di

falda, interagendo con la struttura cristallina, riesce ad assorbire il ^{222}Rn generato negli strati meno superficiali dei granelli delle "terre rosse" e della roccia (Spizzico, 2005).

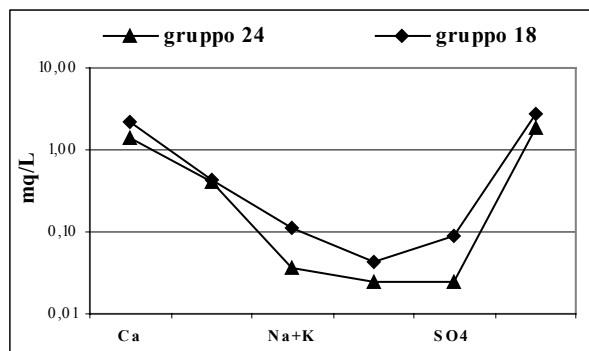
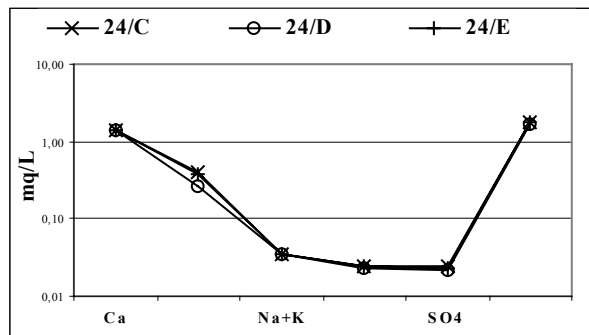


Figura 4 – Rapporto Ca/Mg in relazione alla quota delle sorgenti. *Ca/Mg versus spring altitude*

Inoltre è stata messa in evidenza la relazione fra il rapporto Ca/Mg e la quota della sorgente (Figura 4). I termini calcarei, essendo più facilmente solubili di quelli dolomitici, comportano una maggiore concentrazione di Ca^{++} nelle acque che vi entrano a contatto rispetto alla concentrazione di Mg^{++} : in questo caso un basso rapporto Ca/Mg indica una circolazione profonda e con tempi di residenza nell'acquifero elevata, mentre per rapporti Ca/Mg elevati siamo in presenza di acque con circolazione più rapida. Come mostra il grafico della Figura 5, risultano del primo tipo le sorgenti del gruppo 24, con una marcata differenza per la 24/B ad ulteriore conferma del fatto che questa sorgente è alimentata da un circuito superficiale all'interno dei depositi di versante.

Anche le sorgenti del gruppo 18 mostrano un basso rapporto Ca/Mg e quindi risultano più mineralizzate anche per la loro posizione topografica: essendo a quote più basse ricevono probabilmente apporti idrici da livelli più profondi della falda regionale.

Dal punto di vista del contenuto di sali disciolti, le acque campionate alle sorgenti presentano una composizione chimica di tipo bicarbonato-calcico-magnesiache e tutte con provenienza più profonda dall'acquifero regionale ma con componente magnesiaca meno marcata rispetto alla componente calcica in quanto si tratta di sorgenti di

trabocco legate al trabocco del culmine dell'acquifero regionale, le cui acque risentono notevolmente delle variazioni stagionali del livello della falda e mostrano una circolazione rapida.

Passando ad un'analisi delle sorgenti del gruppo 18 e delle polle campionate in alveo (gruppo 19) si riscontra una forte omogeneità per composizione chimica tra le diverse polle e anche questi due gruppi, attribuibili ad un unico sistema idrogeologico, presentano una tipologia di acque bicarbonato-calcico-magnesiache. A differenza delle sorgenti del gruppo 24 presentano una maggiore salinità e questo perché ci troviamo a quote più basse, i percorsi sotterranei sono più lunghi e l'interazione acqua-roccia è maggiore (Figura 5). Con questa considerazione si spiegherebbe anche un maggior arricchimento in sali disciolti per i gruppi 18 e 19.

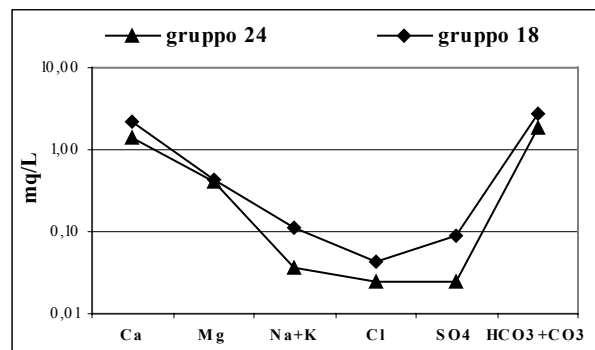
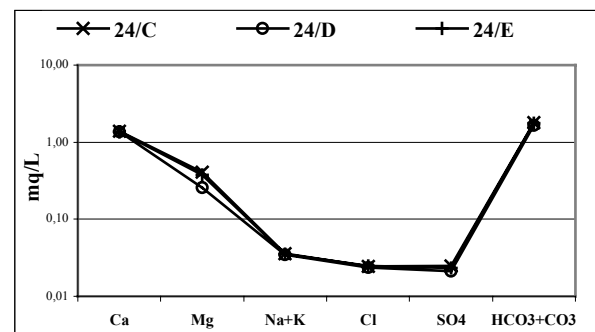


Figura 5 – Diagrammi di Schöeller per le sorgenti dei gruppi 24 e 18. Il diagramma in alto mostra la composizione di tre polle rappresentative di acque profonde. Quello in basso confronta la composizione chimica media per le sorgenti del gruppo 24 con quelle del gruppo 18.

Schöeller diagrams for spring group 24 and 18. The upper diagram reports the most representative deep waters. The lower one shows the different chemical composition between the springs of group 24 and group 18.

Dal punto di vista del contenuto di sali disciolti, le acque campionate alle sorgenti presentano una composizione chimica di tipo bicarbonato-calcico-magnesiache e tutte con provenienza più profonda dall'acquifero regionale ma con componente magnesiaca meno marcata rispetto alla componente calcica in quanto si tratta di sorgenti di

regionale, le cui acque risentono notevolmente delle variazioni stagionali del livello della falda e mostrano una circolazione rapida.

Passando ad un'analisi delle sorgenti del gruppo 18 e delle polle campionate in alveo (gruppo 19) si riscontra una forte omogeneità per composizione chimica tra le diverse polle e anche questi due gruppi, attribuibili ad un unico sistema idrogeologico, presentano una tipologia di acque bicarbonato-calcico-magnesiache. A differenza delle sorgenti del gruppo 24 presentano una maggiore salinità e questo perché ci troviamo a quote più basse, i percorsi sotterranei sono più lunghi e l'interazione acqua-roccia è maggiore (Figura 5). Con questa considerazione si spiegherebbe anche un maggior arricchimento in sali disciolti per i gruppi 18 e 19.

A differenza dei due gruppi principali (24 e 18), si riscontra un chimismo meno omogeneo per gli affioramenti del gruppo 20 per i quali la variabilità dei parametri è influenzata dalla copertura pedologica e dal substrato detritico presente nel punto di affioramento. Queste acque, tra l'altro, presentano un certo grado di miscelazione con acque superficiali, di conseguenza non possono essere attribuite ad un preciso sistema idrogeologico, se non a livelli locali di falda di modesta entità, sostenute alla base da lenti argillose.

In sintesi la circolazione idrica delle sorgenti del Rio Arno e le modalità di affioramento possono essere sintetizzate nello schema di Figura 7. Sui fianchi dei rilievi carbonatici sono appoggiati depositi di versante con spessori, caratteristiche composizionali e tessitura variabili, al cui interno talora si intercalano orizzonti più grossolani che entrano in diretto contatto con il substrato calcareo. In questi depositi si realizza un circuito superficiale, alimentato dalla ricarica zenitale le cui direzioni di deflusso sono legate alla tessitura e quindi ai differenti valori di conducibilità idraulica (sorgente 24/B: 1 in Figura 6).

Vi sono poi sorgenti miste alimentate sia dal circuito superficiale all'interno dei depositi di versante che da quello della falda regionale (sorgenti del gruppo 20: 2 in Figura 6). La dispersione dei valori del chimismo del gruppo 20 è imputabile a differenti gradi di miscelazione con le acque della falda di base che rifluisce in superficie lungo vie preferenziali di drenaggio costituite da orizzonti più permeabili all'interno dei depositi di versante, con quelle legate alla circolazione superficiale all'interno dei depositi di versante e dei suoli.

Lungo il *thalweg* del Rio Arno scaturiscono le sorgenti del gruppo 24 alle quote più alte e quelle del gruppo 18 (come sorgenti) e 19 (come incrementi in alveo) alle quote più basse (3 in Figura 5). Dal punto di vista del chimismo e del contenuto in Rn questi gruppi sembrano essere alimentati unicamente dalla falda regionale di base. D'altra parte l'aumento nel contenuto in Rn e Mg (Figura 3) che si individua a partire dalle sorgenti del gruppo 24, poste a quota più elevate, verso quelle localizzate più in basso

(gruppo 18 e 19) evidenzia una differenziazione che probabilmente deve essere messa in relazione a percorsi più lunghi all'interno della falda regionale, e quindi ad una maggiore interazione acqua/roccia.

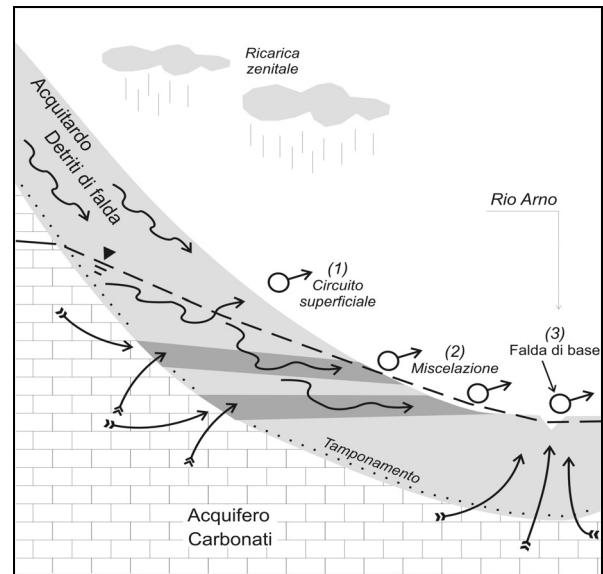


Figura 6 – Modello di circolazione sotterranea delle sorgenti del Rio Arno: acque a circuito superficiale (1), acque di falda con miscelazione di acque superficiali (2), acque profonde provenienti dalla falda di base (3).

Conceptual model of groundwater flowpath in the Rio Arno spring group: shallow groundwater flowpath (1), shallow and regional groundwater mixing (2), springs generated by the outflow of the regional groundwater (3).

Conclusioni e prospettive

Uno studio integrato tra i parametri chimico-fisici e il contenuto di radon risulta essere un buon metodo per valutare le modalità di circolazione sotterranea nei sistemi carbonatici complessi come quello del Gran Sasso.

Il radon, utilizzato in questo caso come tracciante naturale, fornisce delle indicazioni aggiuntive piuttosto significative anche sui tempi di permanenza delle acque nel sottosuolo: parametro da cui dipende strettamente il grado di vulnerabilità dell'acquifero e quindi della risorsa idrica. Alla luce dei risultati ottenuti si ritiene che questa metodologia di indagine possa essere utilizzata anche nelle valutazioni di impatto ambientale di eventuali opere o attività antropiche.

In prospettiva la metodica consentirà di definire anche sistemi idrici più complessi, fornire preziose indicazioni sull'attuazione di una corretta gestione delle risorse idriche e sul loro grado di vulnerabilità: condizioni necessarie per poter svolgere qualsiasi tipo di attività nel rispetto dei delicati equilibri dei sistemi idrogeologici.

Bibliografia

- Boni C., Bono P. & Capelli G. (1986) - Schema idrogeologico dell'Italia Centrale. Mem. Soc. Geol. It., 35, 991-1012.
- Celico P. (1983) - Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale: Progetti speciali per gli schemi idrici nel Mezzogiorno. Quad. Cassa Mezzog., 4/2, 1-225.
- Moore W.S. (1996) - Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments. - *Nature*, 380, 612-614.
- Petitta M., Tallini M. (2002) - Idrodinamica sotterranea del massiccio del Gran Sasso (Abruzzo): nuove indagini idrologiche, idrogeologiche e idrochimiche (1994-2001) - *Boll. Soc. Geol. It.*, 121(3), 343-363.
- Spizzico M. (2005) - Radium and radon content in the carbonate-rock aquifer of the southern Italian region of Apulia. *Hydrogeology Journal*, 13, 493-505.
- Spizzico M. & Sciannamblo D. (2005) - On ^{226}Ra and ^{222}Rn concentrations in the brackish waters of coastal aquifers: lab-investigations and confirmation in the carbonate aquifer of brindisi (Italy). *Environmental Geology*, 48 n° 1, 117-124.
- Tadolini T. & Spizzico M. (1996) - ^{222}Rn as a powerful tool for solving hydrogeological problems in karst areas. In: Buddemeier, R.W. (1996, Ed.) - Groundwater discharge in the coastal zone. Proc. of an international Symposium, 98-107, Moscow, Russia.
- Tadolini T. & Spizzico M. (1998) - Relation between «terra rossa» from the Apulia aquifer of Italy and the radon content of groundwater: experimental results and their applicability to radon occurrence in the aquifer. *Hydrogeology Journal*, 6, 450-454.