

ACQUE

Ricerca
Trivellazione
Captazione

SOTTERRANEE

Anno XV - Dicembre '98 - Spedizione in abbonamento postale comma 20 B art. 2 legge 662/96 - Milano

FASCICOLO 60

GRUNDFOS



IN CONTINUA EVOLUZIONE



**L'USO DEI TRACCIANTI NELLO STUDIO DELLE ACQUE
SOTTERRANEE ED ESPERIENZE RELATIVE ALLA PUGLIA**

*Maurizio Polemio & Donatella Mitolo
CNR-CERIST, Bari*

L'uso dei traccianti nello studio delle acque sotterranee ed esperienze relative alla puglia.

M. Polemio & D. Mitolo

CNR-CERIST, Bari

SOMMARIO

Si descrivono alcune tecniche di studio basate sull'impiego di traccianti, con particolare riferimento alle esperienze maturate dalla comunità scientifica studiando le quattro unità idrogeologiche pugliesi, prevalentemente costituite da acquiferi rocciosi di natura carbonatica. La sintetica descrizione delle procedure utilizzate è integrata dall'analisi dei principali risultati conseguiti in alcune esperienze.

Le metodologie di studio basate sull'uso dei traccianti si sono dimostrate utili al fine di caratterizzare l'età delle acque sotterranee e la mobilità delle stesse, le modalità di circolazione idrica sotterranea e il moto degli inquinanti. In particolare, le misure relative al contenuto in radon delle acque di falda hanno evidenziato che negli acquiferi pugliesi a maggiori concentrazioni di radon nelle acque sotterranee corrisponde una maggiore mobilità delle stesse. I traccianti radioattivi utili per lo studio delle correnti verticali sono risultati lo iodio-131 ed il bromo-82, mentre tra i traccianti stabili è stato utilizzato il cloruro di cadmio in soluzione alcolica, anche se, di recente, l'impiego dello ioduro di potassio come tracciante ha mostrato anch'esso buoni risultati. La misura della direzione dei deflussi sotterranei in un pozzo singolo ha consentito di accertare sia l'inversione della direzione di deflusso delle acque dolci di falda in prossimità della costa, a causa delle oscillazioni del livello del mare, sia la direzione del moto delle acque di mare di invasione continentale, che in condizioni di alta marea è orientato verso il continente e che si inverte con la bassa marea.

1 PREMESSA

Nel corso degli ultimi decenni la ricerca idrogeologica nel territorio pugliese ha avuto un grande impulso, spinta dalla necessità di fornire risposte sempre più complesse alle domande che emergevano al crescere della domanda di acque sotterranee.

Ci si è posti, di volta in volta, il fine di pervenire all'individuazione dei caratteri geometrici degli acquiferi, del tipo e del grado di permeabilità, della modalità di flusso delle acque nel sottosuolo, della distribuzione dei carichi idraulici con la profondità, delle aree di alimentazione, dei tempi di residenza delle acque nel sottosuolo.

In un secondo tempo, al crescere dei timori di degrado delle risorse idriche sotterranee, le indagini sono state orientate

non solo allo studio delle potenzialità degli acquiferi ma anche e soprattutto alla salvaguardia della risorsa, perseguendo un corretto e sostenibile sfruttamento della stessa.

In tutti questi casi sono state frequentemente utilizzate tecniche di studio basate sull'uso dei traccianti. Con il presente lavoro si vuole descrivere brevemente alcune di queste tecniche e richiamare i principali risultati conseguiti negli anni, senza la pretesa di un esame sistematico ed esaustivo delle stesse. I risultati sono stati inseriti in un quadro unitario, avendo come riferimento le quattro unità idrogeologiche pugliesi.

Le tecniche che si basano sull'uso di traccianti, naturalmente presenti nell'ambiente o artificialmente immessi, offrono un notevole apporto negli studi sulla circolazione delle acque e quindi su quella degli inquinanti.

L'uso dei traccianti artificiali, come ad esempio il bromo-82, consente di ottenere, attraverso pozzi, ad un costo relativamente modesto, dati relativi alla velocità di filtrazione, all'esistenza di correnti verticali e alla direzione dei deflussi sotterranei. L'impiego di questi traccianti costituisce uno dei mezzi più efficaci attualmente disponibili negli studi sulla circolazione idrica sotterranea.

Anche l'uso degli isotopi ambientali nelle ricerche idrogeologiche ha avuto un notevole sviluppo negli ultimi decenni. Questi isotopi determinano un marcamento delle acque sotterranee su grande scala e forniscono informazioni sull'origine e sui tempi di residenza delle acque nel sottosuolo, nonché sulla localizzazione del bacino di alimentazione.

Dall'analisi dei contenuti naturali in tritio e carbonio-14 si possono invece trarre indicazioni sui tempi di permanenza delle acque nel sottosuolo, sui tassi di rinnovamento e sulle entità di eventuali miscelamenti tra acque antiche e recenti, e quindi sull'età delle acque.

2 INQUADRAMENTO DELLE UNITA' IDROGEOLOGICHE PUGLIESI

Le unità idrogeologiche della regione Puglia sono essenzialmente quattro: Gargano, Tavoliere, Murgia e Salento (Fig. 1). Per una più dettagliata caratterizzazione delle quattro unità idrogeologiche, qui brevemente delinata, si rimanda per brevità alla nota di COTECCHIA & POLEMIO (1998) e alla relativa bibliografia.

Eccetto il Tavoliere, le restanti unità idrogeologiche hanno in comune alcuni aspetti. Sono caratterizzate da ampi e potenti

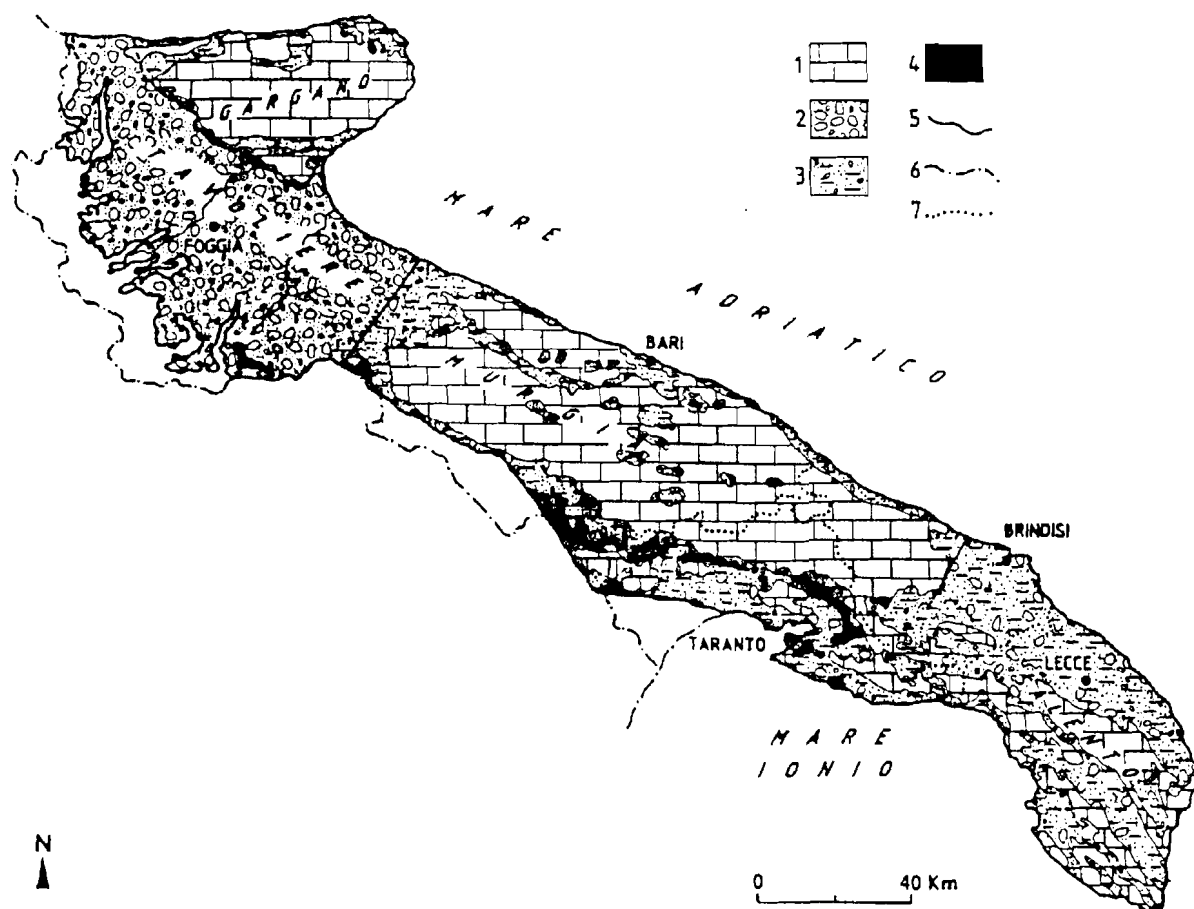


Fig. 1 - Unità idrogeologiche della Puglia (da COTECCHIA & POLEMIO, 1998). 1) Rocce carbonatiche affioranti nel Gargano, della Murgia e nel Salento, 2) unità idrogeologica del Tavoliere, principalmente costituita da conglomerati e sabbie, 3) acquiferi superficiali e litotipi permeabili, calcareniti, sabbie argillose, sabbie, ghiaie o conglomerati, 4) litotipi poco permeabili, argille e argille marnose, 5) limite delle unità idrogeologiche, 6) confine regionale, 7) confine provinciale.

acquiferi con sede nelle rocce calcaree e/o calcareo-dolomitiche del Mesozoico. Gli acquiferi sono interessati da fenomeni carsici e caratterizzati da un grado di fratturazione variabile nelle tre dimensioni, mostrando quindi, a luoghi, una elevata permeabilità.

Sia nel Gargano che nella Murgia la circolazione idrica sotterranea è in pressione, eccetto lungo una ristretta fascia costiera. Le quote piezometriche massime sono elevate, pari a circa 50 m s.l.m. nel caso del Gargano e 200 m s.l.m. nel caso della Murgia.

Nel Salento la circolazione idrica sotterranea è prevalentemente freatica. L'unità idrogeologica del Salento è caratterizzata quindi da una estesa falda idrica freatica, denominata "profonda" per distinguerla da altre numerose falde idriche rinvenibili in acquiferi poco potenti ed estesi, generalmente affioranti. Le falde idriche profonde del Salento raggiungono quote piezometriche di pochi metri al di sopra del livello del mare (al massimo 4-5 m s.l.m.).

L'unità idrogeologica del Tavoliere è caratterizzata da un acquifero poroso la cui circolazione idrica sotterranea a letto è limitata da una formazione argillosa potente alcune centinaia di metri ed avviene in condizioni freatiche nella parte più interna del territorio e in pressione più a valle, fino alla costa. La superficie piezometrica della falda idrica superficiale si rinviene

a circa 300 m s.l.m. nelle zone più interne. Solo nei pressi della costa l'acquifero è abbastanza profondo da permettere l'intrusione marina. L'unità del Tavoliere è l'unica le cui acque alimentano il reticolo idrografico lontano dalla costa.

3 LA NATURA DEI TRACCIANTI E LE METODOLOGIE UTILIZZATE

Gli isotopi di un determinato elemento sono atomi o nuclidi aventi, rispetto ad altri atomi dello stesso elemento, uguale numero di protoni nel nucleo e diverso numero di neutroni, e quindi diverso peso atomico. Quando un nucleo di una specie isotopica è instabile l'isotopo stesso tende a raggiungere una configurazione nucleare stabile subendo spontaneamente una trasformazione nucleare (*decadimento radioattivo*), accompagnata da emissione di particelle nucleari e/o fotoni di energia: il fenomeno è noto come *radioattività* e gli isotopi instabili sono detti *radioisotopi* (IAEA, 1968).

Durante il processo di decadimento radioattivo possono essere emessi 3 tipi differenti di radiazione:

raggi α - fasci di nuclei di elio (particelle alfa o elioni) costituiti da 2 protoni e 2 neutroni;

raggi β - formati da fasci di elettroni o di positroni;
raggi γ - radiazione elettromagnetica di altissima energia.

Nelle ricerche idrogeologiche gli isotopi, sia radioattivi che stabili, vengono impiegati come *traccianti* al fine di studiare alcuni aspetti particolari. Tra tali aspetti si annovera: l'età delle acque sotterranee, che permette di formulare ipotesi sulla provenienza delle acque, sull'alimentazione, sulle connessioni fra bacini e/o sulla capacità di immagazzinamento, la velocità di filtrazione delle acque, la direzione del flusso sotterraneo, la velocità delle correnti idriche verticali nei pozzi che, a sua volta, permette di valutare la distribuzione dei carichi idraulici con la profondità.

Sull'impiego di questi *traccianti isotopici* si basano quindi le tecniche isotopiche che, oltre a quanto detto, permettono anche di risalire al tipo di contaminazione sia artificiale (p.e. per immissione di rifiuti convenzionali o radioattivi) sia naturale (p.e. per l'influenza dell'acqua marina di intrusione continentale), che si esplica nei confronti delle acque sotterranee.

Generalmente non tutte le sostanze solubili in acqua, la cui concentrazione può essere misurata, vengono usate come traccianti. Il tracciante ideale, in pratica, deve presentare alcuni requisiti: non deve presentare alcuna affinità chimica con gli elementi costituenti la roccia, per evitare che il tracciante stesso possa fissarsi su questa; deve essere altamente solubile in acqua; nel caso di traccianti radioattivi, il periodo di dimezzamento del tracciante stesso deve essere compatibile con la durata delle prove; deve presentare una alta attività specifica, in modo che il suo peso specifico sia prossimo a quello dell'acqua, per evitare correnti di densità nella colonna idrica del pozzo in cui si immette; soprattutto, infine, deve possedere una bassissima tossicità (GASPAR & ONCESCU, 1972).

Per le indagini riguardanti l'origine e i tempi di residenza negli acquiferi delle acque sotterranee sono stati impiegati gli isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno come *traccianti ambientali o naturali* (*ambientali o naturali* perché presenti naturalmente nelle acque sotterranee), mentre lo studio sulla mobilità delle acque sotterranee è stato affrontato misurando i *contenuti naturali di radon*.

Per le misure indirette della velocità di filtrazione delle acque sotterranee e delle correnti verticali di pozzi sono state impiegate delle *sonde a radioisotopi*; le stesse sono anche risultate di grande aiuto per la determinazione del grado di fessurazione e della porosità in genere degli acquiferi, nonché per la misura in sito del contenuto in cloro delle acque sotterranee (COTECCHIA, 1977).

3.1 TRACCIANTI NATURALI

E' noto che nelle acque sono presenti diversi componenti chimici la cui concentrazione è funzione di diversi fattori come la litologia delle rocce attraversate, i tempi di contatto acqua-roccia e le condizioni di temperatura e pressione esistenti nel sottosuolo.

Nelle stesse acque si trovano in soluzione anche delle sostanze, la cui concentrazione è funzione soltanto delle caratteristiche proprie dell'acqua di infiltrazione, che possono essere utilizzate come traccianti naturali.

Questi traccianti naturali sono rappresentati sia dagli isotopi stabili che dai radioisotopi.

3.1.1 Traccianti stabili naturali

Nelle prospezioni idrogeologiche i traccianti stabili naturali servono principalmente a caratterizzare l'acqua ed a determinarne l'origine e l'età.

Gli isotopi stabili più utilizzati sono quelli dell'ossigeno (^{16}O , ^{17}O e ^{18}O) e dell'idrogeno (^1H e D).

Altri traccianti naturali che si rinvencono nelle acque sotterranee, però in piccole quantità, sono gli isotopi stabili del carbonio (carbonio-12 e il carbonio-13), il silicio-32, l'azoto-15, lo zolfo-34.

a) Ossigeno-18 e deuterio

Tra gli isotopi stabili, naturalmente presenti nelle acque, l'ossigeno-18 (^{18}O) ed il deuterio (D), isotopi rispettivamente dell'ossigeno e dell'idrogeno, sono quelli che vengono impiegati principalmente. Si trovano in natura in piccole quantità (0,20% e 0,015% rispettivamente per ^{18}O e D) e rappresentano degli ottimi traccianti perché fanno parte della molecola dell'acqua. Grazie ad essi, infatti, è possibile calcolare la quota media di infiltrazione delle acque sotterranee, permettendo così, in situazioni idrogeologiche dubbie, di localizzare il bacino di alimentazione.

Entrambi sono espressi in differenza per mille ($\delta\text{‰}$) del rapporto isotopico del campione rispetto allo stesso rapporto nello standard, secondo l'espressione:

$$\delta = [(R_{\text{cp}} / R_{\text{st}}) - 1] * 1000$$

dove, per l'ossigeno:

R_{cp} = rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ del campione

R_{st} = rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dello standard

e, per l'idrogeno:

R_{cp} = rapporto $\text{D}/^1\text{H}$ del campione

R_{st} = rapporto $\text{D}/^1\text{H}$ dello standard

Lo standard è generalmente rappresentato dallo SMOW (Standard Mean Ocean Water) (CRAIG, 1961) che rappresenta il valore medio della composizione isotopica delle acque oceaniche.

Sulla base della loro abbondanza relativa si è convenuto di utilizzare i rapporti $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $\text{D}/^1\text{H}$ per lo studio del frazionamento isotopico dell'ossigeno e dell'idrogeno.

Nelle acque meteoriche il comportamento del rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ è strettamente legato a quello del rapporto $\text{D}/^1\text{H}$; ad esempio una massa di vapore acqueo formatasi in seguito all'evaporazione dell'acqua oceanica nelle regioni tropicali subirà, durante la sua migrazione verso le zone polari, una progressiva diminuzione del rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in seguito alle precipitazioni che avvengono durante il trasporto. Il vapore d'acqua che raggiunge le zone polari condenserà e il rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sarà perciò estremamente basso.

In tal modo i rapporti isotopici tra ^{18}O e ^{16}O e tra D e ^1H subiscono delle variazioni in funzione della temperatura di evaporazione e di condensazione dell'acqua e quindi dell'altitudine a cui avvengono le precipitazioni. Ne consegue che le determinazioni dei rapporti isotopici $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $\text{D}/^1\text{H}$ permettono di ottenere numerose e preziose informazioni idrologiche quali, per es., l'individuazione delle aree in cui è avvenuta la ricarica delle acque sotterranee e, in alcuni casi, anche i periodi dell'anno durante i quali tale ricarica ha avuto luogo (TAZIOLI,

1973).

La determinazione di tali isotopi avviene tramite l'ausilio di uno spettrometro di massa, previo prelievo di 20 ml di acqua.

Lo spettrometro di massa è, generalmente, uno strumento che viene usato sia per la misura dei rapporti isotopici, sia per la determinazione di minime concentrazioni di elementi nelle rocce e nei minerali (da pochi ppm sino a nanogrammi) con notevole precisione; infatti, è stato impiegato per la determinazione degli isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno (^{18}O e D) con una precisione dello 0,1% per $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e dell'1% per $\text{D}/^1\text{H}$.

Esso è costituito da quattro componenti principali: una sorgente, dove gli atomi o le molecole sono trasformate in un fascio di ioni di uguale energia; un elettromagnete, che genera un campo magnetico a intensità variabile; un collettore di ioni, tramite il quale l'intensità relativa ai vari fasci ionici può essere misurata ed un tubo di acciaio o di vetro, che collega sorgente e collettore su uno stesso piano con un certo angolo. Tutti i componenti, tranne il magnete, si trovano sotto vuoto spinto.

Gli ioni di diversa massa, prodotti e accelerati dalla sorgente, passano nel tubo, attraversando il campo magnetico che è perpendicolare alla direzione del movimento. Il campo magnetico devia la traiettoria degli ioni ugualmente carichi in modo proporzionale alla massa (cioè quelli a massa maggiore sono deviati meno di quelli a massa minore). I fasci ionici, così deviati, raccolti tramite una sottile fenditura, vengono captati separatamente da un collettore e la loro intensità relativa viene misurata elettronicamente. Variando il campo magnetico, i vari fasci ionici passeranno attraverso la fenditura nel collettore, uno dopo l'altro. La corrente portata dai diversi fasci ionici è amplificata elettronicamente. Il tracciato dei segnali così ottenuto è costituito da una serie di picchi ciascuno dei quali corrisponde ad una determinata massa mentre l'altezza del picco stesso è proporzionale all'intensità del fascio di ioni e quindi, nel caso di un elemento, alla concentrazione relativa dell'isotopo che lo compone. Dal rapporto delle intensità elettriche si risale quindi alla misura del rapporto isotopico.

b) Azoto-15

^{15}N è un tracciante stabile naturale ed il suo impiego nelle prospezioni idrogeologiche serve ad individuare eventuali cause d'inquinamento.

Viene espresso in differenza per mille (‰) in rapporto ad uno standard, l'azoto atmosferico (^{14}N).

c) Zolfo

Lo ^{34}S è un tracciante stabile naturale che viene usato principalmente per distinguere l'acqua di mare dall'acqua dolce e consente, inoltre, di distinguere i solfati dovuti ad ossidazione delle evaporiti antiche o a H_2S di origine biogenica (IAEA, 1962). Viene espresso in differenza per mille (‰) in rapporto ad uno standard, troilite meteoritica (FeS) (CELICO, 1990).

Lo ^{35}S invece, con un periodo di dimezzamento di 87 giorni, è indicato per esperimenti di una certa durata (LALLEMAND & GRISON, 1970).

3.1.2 Traccianti radioattivi naturali

I traccianti radioattivi naturali servono essenzialmente a determinare l'età dell'acqua; tra questi, quelli principalmente utilizzati sono il tritio (T), il carbonio-14, il carbonio-13, il

silicio-32 ed il radon-222.

a) Tritio

Il tritio (T), generato nell'atmosfera per interazione dei raggi cosmici con i componenti dell'atmosfera stessa, in particolare con ^{14}N , è praticamente indicato per rivelare ravvenamenti recenti, infatti permette datazioni di acqua fino a ≈ 50 anni, considerando che il suo periodo di dimezzamento è tra 12,26-12,46 anni e che la concentrazione massima nelle acque di precipitazione, precedentemente alle esplosioni termonucleari del 1952, era pari a 20 UT (una Unità Tritio corrisponde ad un atomo di tritio ogni 1018 atomi di idrogeno).

Il tritio viene determinato per scintillazione in fase liquida o gassosa.

b) Carbonio-14

Il ^{14}C , prodotto per interazione di neutroni con l'azoto negli strati alti dell'atmosfera, viene usato per la datazione di acque da 1.000 a 30.000 anni (periodo di dimezzamento tra 5.400-5.570 anni). Viene espresso in differenza per mille (‰) in rapporto ad uno standard (NBS, National Bureau of Standards).

Generalmente per la sua determinazione occorre un prelievo di 50-100 litri d'acqua ed anch'esso, come il tritio, viene determinato per scintillazione in fase liquida o gassosa.

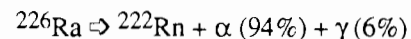
c) Silicio-32

Il ^{32}Si è generato per interazione dei raggi cosmici con l'argon, la cui totale produzione annuale è dell'ordine di 2-6 giorni. Avendo un periodo di dimezzamento di 710 anni, consente di datare acque di 1.000-2.000 anni di età anche se difficilmente viene impiegato per studi idrogeologici in quanto per essere determinato occorrono da 5 a 20 tonnellate di acqua.

La determinazione del ^{32}Si avviene indirettamente per mezzo del suo discendente, il fosforo-32 (periodo di dimezzamento pari a 14,22-14,60 giorni) (IAEA, 1968).

d) Radon-222

Il ^{222}Rn , elemento radioattivo gassoso, solubile in acqua, sempre presente nelle acque sotterranee e avente periodo di dimezzamento di 3,82 giorni, si origina per decadimento radioattivo del ^{226}Ra secondo la reazione:



La determinazione del ^{222}Rn avviene o per concentrazione su carbone attivo granulare e conteggio dell'attività gamma dei suoi prodotti di decadimento a vita breve, per mezzo di rivelatori a scintillazione gamma, o per scintillazione alfa previo degassamento da campioni di acqua (MAGRI & TAZIOLI, 1968).

Il primo metodo si basa sulla misura della concentrazione di radon fissato su carbone attivo mediante filtrazione del campione d'acqua per almeno 2 ore (tempo di filtrazione necessario affinché si fissi su carbone attivo una quantità di radon pari al 50% di quello necessario per la saturazione del carbone). La misurazione si effettua in sito con un contatore a scintillazione gamma, dopo aver atteso che il radon si ponga in equilibrio con i suoi prodotti di decadimento a vita breve (circa 3 ore). Per risalire alla concentrazione di radon nelle acque, dal conteggio dei campioni di carbone, è stata elaborata una curva di taratura, misurando la radioattività del carbone dovuta a filtrazione di

