

MECCANISMI DI TRASPORTO DEGLI INQUINANTI IN ACQUIFERI CARSICI SOTTO EVENTI ESTREMI (ALTA MURGIA, PUGLIA)

Maria Dolores Fidelibus

Politecnico di Bari - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale

RIASSUNTO

Sulla base dei risultati del monitoraggio eseguito nel periodo Febbraio 1995-Febbraio 1997 presso i pozzi della rete di monitoraggio regionale, è stato condotto uno studio con la finalità di riconoscere i meccanismi di ricarica agenti nel sistema carsico dell'Alta Murgia (Puglia), comprendente almeno due principali aree di alimentazione. La conoscenza dei meccanismi di ricarica è, infatti, essenziale nella valutazione dell'impatto degli inquinanti sulla qualità delle acque sotterranee circolanti in sistemi carsici: i meccanismi, nell'ambito di uno stesso sistema, in ragione della struttura e della distribuzione dei sottosistemi (suolo, epicarso, zona insatura e satura) e del regime pluviometrico, possono differire da luogo a luogo in maniera complessa, determinando un ampio spettro di valori della vulnerabilità intrinseca. Sotto l'influenza d'eventi di precipitazione estremi (intensi e/o di lunga durata), la rimozione dei volumi d'acqua e degli inquinanti immagazzinati nei diversi possibili sottosistemi durante il periodo che precede un evento, avviene per effetto pistone in tempi diversi: le acque immagazzinate mostrano diverso grado di modificazione delle caratteristiche qualitative. L'interpretazione incrociata degli andamenti delle precipitazioni, dei carichi idraulici e d'alcuni parametri chimici (nitrati, carbonio organico e costituenti maggiori), ha permesso di formulare ipotesi preliminari in merito al ruolo svolto dai diversi sottosistemi nel trasferimento degli inquinanti ed ai tempi di tale trasferimento. Lo stress idrologico a valle di un periodo secco ha messo in luce sia il ruolo esercitato da parti del sistema carsico che altrimenti non danno segnali apprezzabili, sia il pericolo d'inquinamento (temporaneo ma significativo) connesso all'arrivo in falda degli inquinanti accumulati su un lungo periodo. Eventi di minore entità, anche se ravvicinati, ma di volume complessivo inferiore a quello dell'acqua presente nei diversi serbatoi, producono solo variazioni minime della qualità delle acque sotterranee. Se ne desume che il pericolo d'esposizione a concentrazioni di picco di sostanze inquinanti è, per il sistema carsico dell'Alta Murgia, dipendente dal tempo di ritorno d'eventi estremi.

1. INTRODUZIONE

L'impatto degli inquinanti sulla qualità delle acque sotterranee circolanti in sistemi carsici dipende fondamentalmente, oltre che dalla distribuzione ed entità dei carichi inquinanti, dall'ammontare dell'infiltrazione efficace e dai meccanismi secondo cui essa è trasferita alla zona satura: i meccanismi di trasferimento, a loro volta, sono determinati dalla struttura dei sistemi carsici e dal regime pluviometrico. Data la complessità della struttura, nell'ambito di uno stesso sistema carsico i meccanismi di ricarica possono differire da luogo a luogo. La caratterizzazione della struttura, dei suoi sottosistemi e dei meccanismi di ricarica, è fondamentale per la definizione sia della vulnerabilità intrinseca, sia della vulnerabilità delle acque sotterranee. Entrambe, in accordo con il modello origine-percorso-obiettivo, richiedono la definizione del percorso compiuto dall'acqua e dagli inquinanti attraverso l'insaturo (meccanismo di ricarica) sino alla superficie della falda, laddove, per la vulnerabilità delle acque sotterranee, il percorso include anche quello compiuto dalla superficie della falda verso l'obiettivo (il punto di prelievo). Lo studio proposto

intende fornire un contributo metodologico per il riconoscimento dei meccanismi di ricarica nell'acquifero murgiano. Per tale fine sono stati elaborati dati chimici ed idrologici raccolti presso la Rete di Monitoraggio regionale (periodo Febbraio 1995-Febbraio 1996) nell'area dell'Alta Murgia, che include due aree di ricarica principali.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO

La Murgia appartiene alla Piattaforma carbonatica apula ed è costituita da una successione del Cretaceo spessa circa 3 Km con immersione SW e SSW (Pieri, 1980; Ricchetti, 1980; Ciaranfi *et al.*, 1988; Ricchetti *et al.*, 1988). Nella successione si distinguono la formazione del Calcere di Bari, spessa circa 2000 m ed affiorante nel settore settentrionale, e quella, spessa circa 1000 m ed affiorante nel settore meridionale, del Calcere d'Altamura. L'area di studio è rappresentata dall'altopiano carsico dell'Alta Murgia, allungato in direzione NW-SE con quote maggiori di 450 m s.l.m. (Fig. 1): l'altopiano, delimitato da scarpate (memoria d'antiche linee di costa), ha dimensioni di circa 15÷25 per 70÷90 Km.



Esso è inoltre caratterizzato da un'alta densità di forme carsiche epigee ed ipogee, con presenza diffusa di doline, campi carsici, polje, depressioni che raggiungono profondità di circa 100 m (Puli) ed inghiottitoi profondi anche più di 200 m: il loro maggiore sviluppo avvenne durante il Terziario (Grassi, 1974, Neboit, 1975).

In Murgia, l'evoluzione del carsismo epigeo ed ipogeo è stata condizionata dalle variazioni del livello base della circolazione, determinate nel tempo geologico dalla combinazione degli effetti delle variazioni glacio-eustatiche del livello mare e dei movimenti di subsidenza ed emersione della piattaforma. Al massimo della trasgressione Plio-Pleistocenica, l'area dell'Alta Murgia emergeva come un'isola (Tropeano, 2006). La successiva regressione, dovuta all'effetto combinato del periodo d'emersione del Medio e Tardo Quaternario (Ciaranfi *et al.*, 1983, Doglioni *et al.*, 1994, 1996) ed alle variazioni glacio-eustatiche, lasciava 16 ordini di terrazzi marini, il più alto dei quali si trova alla quota di 440-450 m s.l.m. (Ciaranfi *et al.*, 1988). I margini costieri dell'ammasso carbonatico murgiano erano soggetti a riattivazione della carsificazione in

zone di transizione temporanee, ed a dolomitizzazione nelle parti sottoposte all'influenza delle acque salate sotterranee. L'Alta Murgia, rimasta sempre lontana dal contatto con acque d'origine marina o salmastre per buona parte del suo spessore, è stata soggetta a carsismo meteorico, vadoso o freatico, con sviluppo di forme carsiche a prevalente sviluppo verticale con terminazioni orizzontali.

La falda murgiana fluisce verso l'Adriatico a NE e lo Ionio a S. A SW, i sedimenti della Fossa Bradanica costituiscono un limite impermeabile che forza il deflusso verso lo Ionio. La permeabilità del sistema carsico è determinata da fessurazione, fratturazione e carsismo: il sistema è molto permeabile negli orizzonti dolomitici e calcareo-dolomitici fratturati e molto carsificati che, sovrastati da spessi orizzonti a bassa permeabilità, si ritrovano, nella parte NW, tra i -220 ed i -415 m s.l.m. e, nella parte SE, tra i -170 ed i -205 m s.l.m.. Le cartelle tecniche delle perforazioni indicano ritrovamenti di falda in accordo con tale modello. I carichi piezometrici raggiungono anche i 200 m s.l.m.: il gradiente piezometrico varia tra l'1.5 e l'8 per mille. La precipitazione media annua varia tra 550 e 650 mm, con l'80%

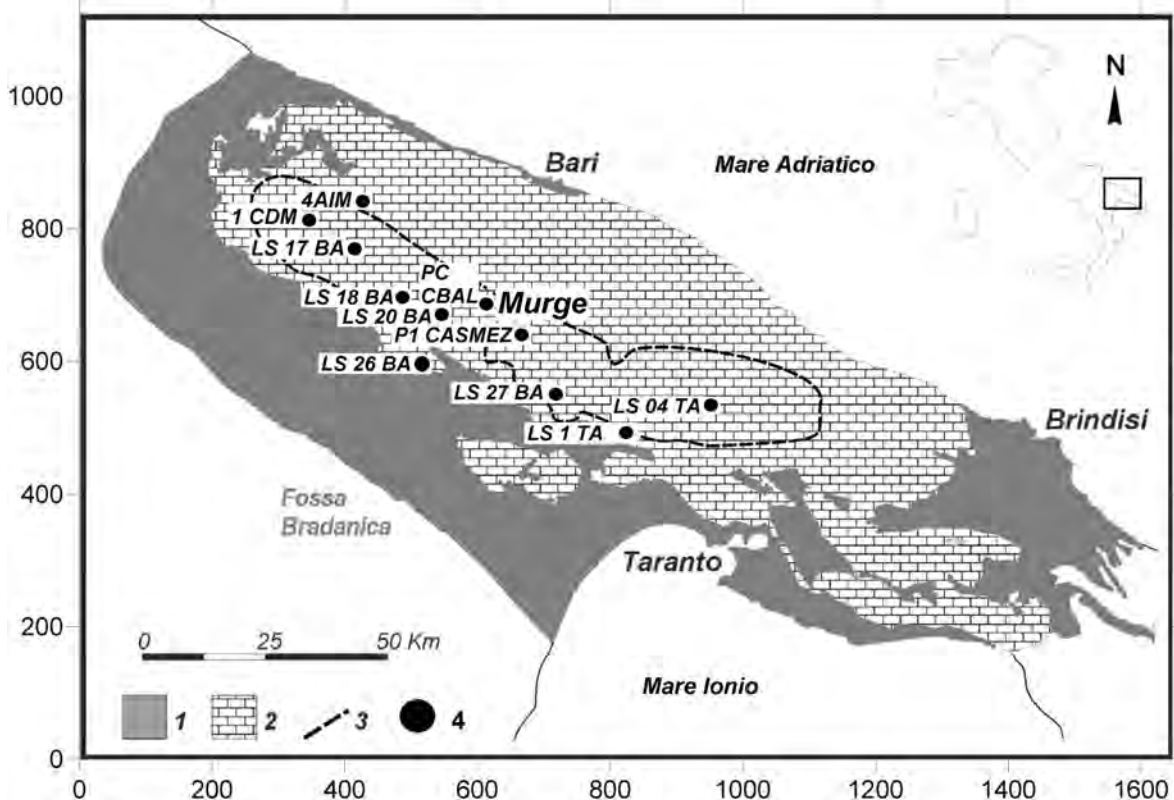


Figura 1 - Schema geologico semplificato della Murgia. 1) depositi Plio-Pleistocenici (ciclo della Fossa Bradanica e depositi terrazzati); 2) unità carbonatiche Meso-Cenozoiche dell'Avampaese Apulo con alcune coperture locali Quaternarie; 3) limite dell'area dell'Alta Murgia; 4) pozzi della Rete di monitoraggio regionale



delle precipitazioni nel periodo Ottobre-Marzo. L'infiltrazione efficace media è dell'ordine di 1100 Mm³/a (De Girolamo *et al.*, 2002).

Per le sue caratteristiche geologiche, geografiche e paleo-geografiche, l'Alta Murgia si comporta da area di ricarica per il sistema carsico murgiano, con la presenza di due aree di ricarica principali. Tale ruolo è ben individuato dalle caratteristiche chimiche ed isotopiche delle acque sotterranee che vi circolano (Tulipano *et al.*, 1990), dalle temperature più basse dell'intero sistema murgiano (Cotecchia *et al.*, 1978), e dai più bassi gradienti verticali di temperatura della regione, che segnalano un rapporto di anisotropia della conduttività idraulica (Kh/Kv) basso, tipico delle aree di ricarica di mezzi fratturati.

3. STRUTTURA DEI SISTEMI CARSICI E MECCANISMI DI RICARICA

La struttura di un sistema carsico, definita dalla distribuzione delle porosità nell'insaturo, è funzione sia della storia geologica degli ammassi, sia dell'evoluzione del carsismo. La permeabilità di un sistema carsico è determinata dall'insieme, in variabili proporzioni, di tre componenti indipendenti: permeabilità di matrice, frattura e condotto. Dato che i meccanismi di ricarica sono legati alla struttura, essi possono, nell'ambito di uno stesso sistema carsico, differire da luogo a luogo in maniera ampia, in rapporto alla diversa distribuzione e prevalenza delle tre componenti.

Nel caso di carso 'maturo', Kiraly (1994) parla di dualità del comportamento idraulico dei sistemi carsici, in rapporto a quella che definisce (Kiraly, 1998) 'eterogeneità organizzata'. Essa è rappresentata da una rete di canalizzazioni carsiche, con 'tessiture' ampie chilometriche e distribuzione spaziale generalmente sconosciuta, immersa in un volume di roccia calcarea fratturata a bassa permeabilità: la rete è connessa ad una zona di drenaggio (la sorgente carsica). La dualità di comportamento idraulico si manifesta come dualità del processo d'infiltrazione (diffusa o lenta nei volumi a bassa permeabilità, rapida nella rete di canalizzazioni carsiche), dualità del campo di flusso (basse velocità nei volumi fratturati, alte velocità nella rete dei canali carsici), dualità delle condizioni di filtrazione (filtrazione diffusa nei volumi a bassa permeabilità, deflusso concentrato attraverso la rete delle canalizzazioni verso le emergenze). In accordo con questa dualità Aquilina *et al.* (2005) attribuiscono un ruolo trasmissivo alla rete di drenaggio sotterranea, mentre il ruolo d'immagazzinamento è assegnato alla roccia

meno permeabile che circonda la rete.

La letteratura propone molti modelli concettuali dei sistemi carsici (Mangin, 1975; Williams, 1983; Bakalowicz, 1995; Blavoux and Mudry, 1983; Drogue 1992; Jeannin, 1998; Doerfliger *et al.*, 1999). Essi sono sostanzialmente in accordo nel considerare quali sotto-sistemi, il suolo, l'epicarso, la zona insatura e quella satura, ciascuno dotato di una propria specificità rispetto ai processi di flusso e trasporto. Il suolo, principale fonte d'anidride carbonica (importante nel controllo della dissoluzione), controlla la reale infiltrazione nel sistema carsico, in ragione del suo spessore e del suo uso (Canora *et al.*, 2008) e contribuisce efficacemente all'immagazzinamento dell'acqua. L'epicarso (con spessore da pochi cm sino ai 20 m circa) rappresenta la parte superiore delle formazioni affioranti, e possiede una permeabilità, per fessurazione e diffusa carsificazione, sostanzialmente maggiore di quella della sottostante zona vadosa, ed una buona capacità d'immagazzinamento (Klimchouk, 2004). Quando la velocità d'infiltrazione supera la velocità di percolazione attraverso la zona vadosa, con saturazione dell'epicarso, lo stesso diventa elemento chiave nel determinare la risposta idraulica impulsiva delle sorgenti. Dati i tempi di residenza delle acque in questo sottosistema, dell'ordine di settimane o mesi, i parametri indicatori di dissoluzione (es. TDS e magnesio) e d'inquinamento conservativo (nitrati) hanno valori alti, mentre i valori dei parametri relativi a sostanze degradabili (es. TOC, Carbonio Organico Totale) sono bassi a causa delle reazioni d'abbattimento (Batiot *et al.*, 2003). La zona insatura è una zona trasmissiva che connette l'epicarso alla rete di condotti orizzontali della zona satura attraverso il drenaggio operato da una rete verticale di fratture e condotti (es. sistemi paleo-carsici, o cavità abbandonate, che comunicano ancora con l'asse di drenaggio principale). In questo sottosistema è ancora possibile la dissoluzione. La zona satura, costituita da una rete di condotti ad alta permeabilità e volumi a bassa permeabilità con un'alta capacità d'immagazzinamento, drena le acque sotterranee verso le emergenze, raccogliendo le acque provenienti dalla zona insatura e combinando i contributi dei vari sotto-sistemi. Durante eventi di piena, tale combinazione è non-lineare e la proporzione tra i contributi dei sotto-sistemi varia durante l'evento.

Aquilina *et al.* (2006) propongono uno schema di trasferimento delle acque di precipitazione ad alcune emergenze carsiche del Sud della Francia sotto la spinta di importanti eventi di pioggia consecutivi



occorsi nell'inverno 1997-1998. I dati chimici ed idrologici rilevati presso le sorgenti indicano un meccanismo a 'pistone', indotto da un evento 'n' che sposta verso l'emergenza, dai sotto-sistemi dell'insaturo, le acque dell'evento n-1 occorso in precedenza. L'epicarso risponde all'evento meteorico intenso e/o prolungato con il trasferimento ai condotti e verso la zona satura dei volumi d'acqua e del carico inquinante immagazzinati nel periodo precedente l'evento/ricarica. Allo sbocco delle sorgenti carsiche, le acque provenienti dai diversi sottosistemi possono essere riconosciute attraverso le loro caratteristiche chimiche ed isotopiche: la proporzione volumetrica delle componenti dipende dal volume complessivo di infiltrazione. Gli autori evidenziano, inoltre, che il diretto contributo delle acque di pioggia si osserva solo in due occasioni durante tutto il periodo di monitoraggio: tale trasferimento è riscontrato alle sorgenti a tempi brevissimi dall'evento piovoso ed indica l'infiltrazione diretta lungo un'asse principale di drenaggio. Le acque di precipitazione non sembrano quindi raggiungere direttamente la zona satura, se non attraverso la mediazione dei sottosistemi della zona insatura.

I sotto-sistemi della zona insatura svolgono, di fatto, un ruolo importante nel dilazionare il trasferimento degli inquinanti verso la zona satura: grandi volumi idrici possono essere immagazzinati nei suddetti sottosistemi anche durante i periodi di maggiore precipitazione, per essere restituiti dopo diverse settimane fino a mesi sotto l'effetto d'eventi di precipitazione successivi. E' da rilevare che nei periodi precedenti un evento di pioggia, un'importante quantità di 'acqua vecchia' può trovarsi, in ogni caso, accumulata non solo nell'epicarso e nella zona insatura, ma anche nella stessa rete carsica ad alta permeabilità situata sotto il livello delle sorgenti. Questi volumi di 'acqua vecchia', così come quelli immagazzinati negli altri sotto-sistemi, spostati sotto effetto pistone, hanno, a causa degli apprezzabili tempi di residenza, caratteristiche chimiche ed isotopiche ben distinguibili da quelle delle acque provenienti direttamente dalla superficie.

I vari sistemi carsici, comunque, pur in accordo con un unico schema generale di funzionamento, sono, a causa della diversa organizzazione dell'eterogeneità, caratterizzati da meccanismi di ricarica e trasferimento degli inquinanti differenti, risultato della combinazione di processi più o meno rapidi. Ciò comporta la necessità, ai fini di un'affidabile definizione sia della vulnerabilità intrinseca sia della vulnerabilità delle acque sotterranee, di riconoscere,

per ciascun sistema carsico e nelle diverse zone di ciascun sistema, il ruolo giocato dai diversi sottosistemi nel processo di ricarica. Poichè la verifica diretta della struttura di un sistema carsico è nella pratica inattuabile, per ottenere informazioni sull'infiltrazione, sul grado di carsificazione, sulla distribuzione delle porosità, sul campo dei parametri idraulici, sulla presenza (e/o prevalenza) ed il ruolo dei diversi meccanismi di ricarica, e, quindi sui meccanismi di trasmissione degli inquinanti, si utilizza un approccio indiretto: si studia, in altre parole, il prodotto finito dell'azione di questi fattori, la cosiddetta 'risposta globale' dei sistemi carsici in rapporto agli eventi di precipitazione.

Questa 'risposta globale' può essere valutata presso le sorgenti carsiche, osservando ed interpretando le variazioni delle loro caratteristiche idrauliche, fisiche, chimiche ed isotopiche. Le sole misure di portata e le interpretazioni basate sull'analisi d'idrogrammi, infatti, non permettono di distinguere le componenti derivanti dai diversi sottosistemi, specie in fase di recessione: invece, il monitoraggio della composizione chimica ed isotopica delle acque di sorgente, condotto sulla base di un attento campionamento sulle estensioni crescenti e discendenti del picco dell'idrogramma, in accoppiamento all'analisi degli idrogrammi stessi, consente normalmente il riconoscimento dei contributi dei diversi serbatoi, poichè essi hanno una caratteristica impronta chimica ed isotopica (Blavoux *et al.* 1992; Katz *et al.*, 1997, 1998, Vaute *et al.* 1997; Barnes e Worden, 1998; Nativ *et al.*, 1999; Emblanch *et al.*, 2003).

4. RISULTATI DELL'ELABORAZIONE DI DATI IDROLOGICI E QUALITATIVI RILEVATI PRESSO LA RETE DI MONITORAGGIO DELLA REGIONE PUGLIA

Le acque sotterranee dei sistemi carsici e costieri pugliesi defluiscono solo presso le coste, in forma diffusa o concentrata; i sistemi di flusso ed i bacini idrogeologici che alimentano il deflusso hanno scala spaziale variabile. Le sorgenti concentrate, che potrebbero prestarsi allo studio della risposta globale, non manifestano tuttavia il carattere impulsivo tipico delle sorgenti carsiche, poichè rispondono a bacini con alto rapporto tra riserva idrogeologica e riserva regolatrice; in aggiunta, il loro alto contenuto salino maschera le caratteristiche chimiche ed isotopiche della componente d'acqua dolce. Proprio in ragione dell'assenza di sorgenti interne d'acqua dolce, in Puglia la captazione delle acque per uso civile ed irriguo avviene attraverso pozzi. Sfortuna-



tamente, il tipo di monitoraggio e le metodologie d'interpretazione prima delineati non sono agevolmente adattabili a punti di misura quali i pozzi, a meno di concentrare sforzi tecnici ed economici rilevanti su un numero limitatissimo di questi. L'assenza di un unico punto per le misure (come per le sorgenti), inoltre, aumenta il numero di variabili da considerare: se presso una sorgente la variabilità da monitorare è quella nel tempo, presso un pozzo tale variabilità, a parità di tempo, è anche nello spazio (lungo la verticale dello spessore saturo). Inoltre, la lunghezza di gran parte dei pozzi (anche di 900 m in Alta Murgia) rende nella pratica improponibile un campionamento frequente.

Pur con queste limitazioni, i dati chimici ottenuti dall'analisi dei campioni prelevati con cadenza grossomodo trimestrale (dal Febbraio 1995 al Febbraio 1997) presso la Rete di Monitoraggio delle acque sotterranee della Regione Puglia (con 65 pozzi nel complesso murgiano), consentono la ricostruzione degli andamenti d'alcuni parametri chimici. Presso

la rete, i campionamenti si attestavano nella parte più superficiale della zona saturata, con il vantaggio di ottenere informazioni sulla riserva regolatrice, ovviamente più soggetta all'inquinamento proveniente dalla superficie.

Durante il periodo di funzionamento della rete, nell'Agosto 1995, avveniva un evento di precipitazione 'estremo', che interessava Murgia e Salento: nella stazione di Cassano Murge si registravano 225 mm tra il 16 ed il 27 Agosto, ed il massimo giornaliero (circa 88 mm, 17 Agosto) per l'intera Murgia (Fig. 2a). Nello stesso periodo, presso la rete si eseguivano campionamenti le cui date erano tali da precedere e seguire l'evento estremo: esso rappresenta una circostanza favorevole per lo studio, giacché, come già detto, sotto l'influenza d'eventi di precipitazione importanti (intensi e/o di lunga durata), la rimozione d'inquinanti dai diversi sotto-sistemi di un sistema carsico avviene efficacemente sotto effetto pistone. La rimozione è più evidente nelle acque di falda se l'evento è preceduto da un periodo

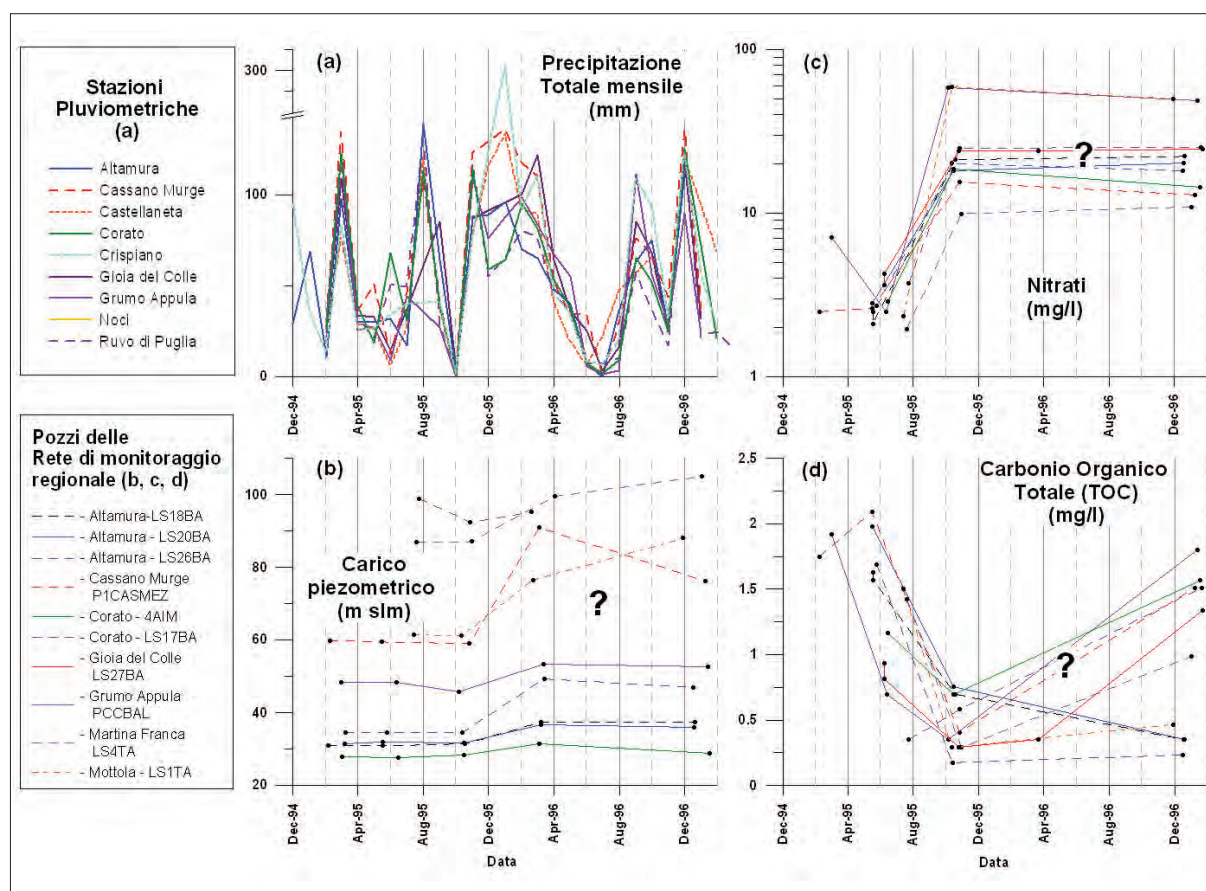


Figura 2 - a) Andamento delle precipitazioni (totali mensili, mm; periodo Dicembre '94 - Febbraio '97) nelle stazioni pluviometriche (riportate in legenda) ricadenti nel territorio dell'Alta Murgia. Gli andamenti dei carichi piezometrici (b), quelli delle concentrazioni dei nitrati (c) e del TOC (d) si riferiscono al periodo Febbraio '95 - Febbraio '97: i dati sono stati rilevati presso i pozzi della rete di monitoraggio regionale ricadenti nel territorio dell'Alta Murgia (in legenda)



con scarse precipitazioni (com'è avvenuto nel caso in esame), durante il quale l'acqua di infiltrazione e le sostanze inquinanti si accumulano all'interno dei sottosistemi: posti sotto stress dall'evento estremo, i sottosistemi generalmente rilasciano, in tempi e con gradi di modificazione diversi ma evidenti, quanto accumulato.

Le analisi chimiche sulle acque campionate presso la rete riguardavano parametri in situ (quali potenziale d'ossidazione-riduzione, pH, conducibilità elettrica, temperatura), costituenti maggiori e minori, e parametri indicatori d'inquinamento civile, agricolo o industriale: per la quasi totalità dei casi esaminati, relativi all'intero periodo di monitoraggio, rarissime volte si superavano i limiti di rilevanza degli inquinanti, tranne che per i nitrati ed il TOC. La Fig. 2 pone a confronto gli andamenti delle precipitazioni mensili nelle stazioni pluviometriche dell'Alta Murgia tra il Dicembre '94 ed il Febbraio '97 (Fig. 2a) con quelli delle concentrazioni dei nitrati (Fig. 2c) e del TOC (Fig. 2d) rilevate sulle acque campionate presso i pozzi della rete (ubicazione riportata in Fig. 1) ricadenti nella stessa area nel periodo Febbraio 1995 - Febbraio 1997. La Fig. 2b mostra l'andamento dei carichi piezometrici misurati in occasione dei campionamenti. Le Figg. 2b, 2c e 2d riportano un punto interrogativo allo scopo di segnalare lacune nelle analisi o nella misura/campionamento: tali lacune rendono evidentemente imprecisi gli andamenti nella loro parte finale.

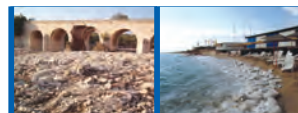
I nitrati seguono andamenti simili nei diversi punti di misura: se prima dell'evento le concentrazioni sono quelle tipiche del fondo ambientale (circa 5 mg/l), circa due mesi a valle dell'evento si ritrovano concentrazioni di picco anche di 60 mg/l. La cadenza del monitoraggio non permette di cogliere le variazioni che intercorrono nell'ambito dei due mesi post-evento: in mancanza di dati intermedi, è difficile asserire che il picco reale si manifesti in falda con un ritardo di due mesi. Di fatto, il campionamento può indifferentemente aver interessato la fase ascendente pre-picco o discendente post-picco, rendendo così la valutazione del ritardo solo approssimativa. Nel periodo successivo all'Ottobre '95, ai campionamenti effettuati non corrispondono analisi complete, perdendo così l'opportunità di monitorare la qualità delle acque di falda prima di un altro evento estremo (Settembre 1996), anch'esso preceduto da un periodo secco. Tuttavia, i dati relativi ad altri pozzi della rete murgiana (qui non illustrati), laddove tra l'Ottobre '95 e l'Ottobre '96 erano effet-

tuate analisi intermedie, indicano che l'andamento a cavallo dell'evento del Settembre '96 è dello stesso tipo di quello osservato in occasione dell'evento del '95.

L'andamento del TOC (Fig. 2d) è speculare a quello dei nitrati: i valori post-evento sono più bassi di circa un ordine di grandezza rispetto ai valori caratterizzanti la fase pre-evento. Nel caso di sistemi carsici non inquinati da fonti antropiche specifiche e non alimentati da acque superficiali, si può considerare che il TOC provenga solo dall'attività biologica nel suolo, il che lo rende un tracciante interessante dell'infiltrazione rapida. In periodi di piena, l'aumento delle concentrazioni di TOC alle emergenze carsiche evidenzia l'arrivo d'acque a basso tempo di residenza della zona insatura; durante la fase di magra emergono acque che hanno concentrazioni di TOC di molto inferiori a causa di tempi di residenza maggiori. Il TOC del suolo può raggiungere i 300 mg/l e solitamente non supera i 100 mg/l nei fiumi; nelle acque di rapida infiltrazione raggiunge massimi di 10 mg/l, mentre nelle acque sotterranee è normalmente più basso di 1 mg/l (Bakalowicz, 2003): le concentrazioni in falda sono inversamente proporzionali al tempo di residenza a causa dei processi d'ossidazione della materia organica mediati da batteri.

L'abbattimento del TOC nei campioni d'acqua sotterranea analizzati a valle dell'evento dell'agosto '95 indica, al pari dell'aumento dei nitrati, che le acque hanno un certo grado di maturità o meglio provengono da un sotto-sistema interposto tra la superficie e la zona satura nel quale esse hanno passato un tempo sufficientemente lungo da permettere la degradazione della materia organica. Il ritardo rispetto all'evento con cui si presentano in falda i picchi positivi dei nitrati e quelli negativi del TOC rappresenta, con la prudenza prima espressa in merito alla significatività temporale del monitoraggio, il tempo medio di trasferimento verso la zona satura dei volumi d'acqua immagazzinati nei sotto-sistemi dell'insaturo.

I costituenti maggiori, diversamente dai parametri d'inquinamento, sono stati analizzati in occasione d'ogni campionamento e consentono di accompagnare le precedenti considerazioni e di estenderle a tutto il periodo di monitoraggio. Gli andamenti del magnesio, dei cloruri e dei solfati, indicatori di tempo di residenza, sono grossomodo crescenti nel periodo a cavallo dell'evento dell'Agosto '95, indicando anch'essi l'arrivo in falda di acque più mature rispetto a quelle pre-evento; il



calcio, invece, tende a diminuire nella fase post-evento. Aumento del magnesio e diminuzione del calcio danno origine a rapporti Mg/Ca più alti. Il rapporto Mg/Ca è comunemente usato in idrogeologia carsica per differenziare, nel campo delle acque dolci, quelle di recente infiltrazione (valori bassi del rapporto) da quelle a più alto tempo di residenza: la cinetica di dissoluzione del magnesio è più lenta di quella del calcio, perciò la crescita del rapporto Mg/Ca post-evento rispetto al valore pre-evento, implica l'arrivo in falda d'acque più mature. Nei mesi successivi, magnesio, cloruri e solfati decrescono in concentrazione in rapporto all'effetto diluente delle abbondanti piogge dell'inverno 95-'96; subiscono in seguito una nuova impennata a valle dell'evento eccezionale del Settembre 96.

A sostegno di tutto quanto illustrato va anche considerato l'andamento dei carichi piezometrici (Fig. 2c). Nell'Ottobre 1995, in nessun pozzo il carico piezometrico appare risentire significativamente dell'evento estremo dell'agosto precedente; ciò indica che le variazioni osservate nella composizione chimica sono provocate da volumi d'acqua di infiltrazione non rilevanti, o comunque non tali da modificare sensibilmente i carichi. I carichi piezometrici aumentano solo nel marzo 1996, a valle dell'alimentazione prodotta dalle piogge invernali: all'aumento dei carichi corrispondono basse concentrazioni dei costituenti maggiori indicatori di tempo di residenza.

5. CONCLUSIONI

L'interpretazione degli andamenti nel tempo delle concentrazioni dei nitrati, del TOC e d'alcuni costituenti maggiori ed il loro confronto con quelli pluviometrici e piezometrici, permette di formulare un'ipotesi in merito ai meccanismi di ricarica agenti nel sistema carsico dell'Alta Murgia. Tale ipotesi è da intendersi come preliminare, dato che la cadenza del monitoraggio su cui si basa lo studio è verosimilmente inadeguata a cogliere l'andamento reale.

La successione degli eventi che definisce il meccanismo di trasferimento degli inquinanti dalla superficie topografica alla falda, può essere così sintetizzata: a) l'evento estremo dell'Agosto '95 sposta verso la falda, per effetto pistone, le acque residenti nei sottosistemi dell'insaturo; la mancanza di dati isotopici e di un background di conoscenza in merito alle caratteristiche locali delle acque del suolo, dell'epicarso e della zona insatura non consente di individuare quale dei sotto-sistemi sia coinvolto prevalentemente; b) le acque che arrivano alla zona satura

portano con sé un carico d'inquinanti conservativi accumulato nei sotto-sistemi durante il periodo precedente l'evento (Aprile '94 - Luglio '95), privo di precipitazioni alimentanti; c) le concentrazioni dei nitrati nelle acque di falda aumentano e quelle del TOC diminuiscono senza apprezzabile incremento piezometrico, indicando che i volumi d'acqua trasferiti sono di trascurabile entità: essi, comunque trasportano carichi inquinanti tali da modificare la qualità delle acque in maniera apprezzabile; d) i sotto-sistemi dell'insaturo sotto precipitazione prolungata, sono progressivamente dilavati: le acque che continuano ad infiltrarsi rimpiazzano progressivamente le acque residenti e l'epicarso diventa zona di filtrazione attiva verso le canalizzazioni verticali; e) con l'arrivo delle precipitazioni invernali, per effetto pistone ripetuto, volumi successivi d'acqua di infiltrazione procurano un ulteriore lavaggio dell'epicarso e della zona insatura, ormai sostanzialmente privi d'inquinanti: coerentemente, la diminuzione delle concentrazioni dei costituenti maggiori indica l'arrivo di acque a basso tempo di residenza; g) l'aumento dei carichi piezometrici si realizza solo durante e dopo le precipitazioni invernali, dai due ai quattro mesi di distanza rispetto ai picchi dei nitrati.

Nel sistema carsico dell'Alta Murgia, lo stress idrologico dovuto al presentarsi di un evento di precipitazione estremo a valle di un periodo secco, permette, quindi, di evidenziare il ruolo esercitato dai sotto-sistemi dell'insaturo nel determinare un pericolo d'esposizione a concentrazioni di picco dei nitrati. Il pericolo d'inquinamento (temporaneo, ma significativo) non sembra esistere nella fase invernale di alimentazione, nella quale gli inquinanti, se presenti, vengono diluiti in volumi consistenti di acque d'infiltrazione. Il pericolo è invece sicuramente ravvisabile, nell'ambito di un tempo medio di circa due mesi, quando si verifica un evento importante e prolungato dopo un periodo di scarse precipitazioni. Secondo tale modello di funzionamento, eventi di piccola entità, anche se ravvicinati ma di volume inferiore a quello dell'acqua complessivamente accumulabile nei diversi sotto-sistemi dell'insaturo, non producono variazioni apprezzabili della qualità delle acque di falda.

Anche se i nitrati sono inquinanti conservativi e dal loro comportamento non si può derivare immediatamente quello d'altri inquinanti, specie se degradabili o soggetti a ritardo, pur si può argomentare da questi primi dati sperimentali che il pericolo d'esposizione a concentrazioni di picco di sostanze inquinanti in generale è, per la falda, dipendente dal veri-



ficarsi d'eventi di precipitazione importanti/estremi; altra condizione, ravvisata nel caso in esame, è che l'evento estremo sia preceduto da un periodo privo di precipitazioni alimentanti.

Altre indicazioni che si possono trarre dai dati esaminati, riguardano le pratiche di monitoraggio e le metodologie di studio del trasporto d'inquinanti/contaminanti in sistemi carsici. Quando si debba proteggere la risorsa idrica di un sistema carsico, il monitoraggio deve considerare che la struttura del sistema può riservare sorprese quali quelle illustrate: specie a valle di periodi di scarsa o nulla precipitazione, generalmente corrispondenti ai periodi più caldi e con più intensa attività agricola, il pericolo d'inquinamento, anche se temporaneo, aumenta. La presenza di un evento estremo e/o prolungato dopo tali periodi, comporta la necessità di eseguire il monitoraggio con una frequenza adeguatamente elevata (possibile a scala locale) che può essere ridotta durante il periodo d'alimentazione.

Altro insegnamento riguarda lo stato qualitativo della falda, che non può quindi essere definito attraverso un solo campionamento, se pur esteso e fitto: gli andamenti dei parametri d'inquinamento indicano che, in un sistema carsico, indagini condotte in stagioni diverse possono fornire quadri del tutto differenti e diversamente preoccupanti dell'inquinamento. La dinamica dei sistemi carsici, quindi, deve essere tenuta in conto nel loro studio, ed il monitoraggio deve essere adeguato alla complessità della loro struttura.

BIBLIOGRAFIA

- AQUILINA L., LADOUCHE B., DÖRFLIGER N. (2005) - *Recharge processes in karstic systems investigated through the correlation of chemical and isotopic composition of rain and spring-waters*. Appl. Geochem., 20: 2189-2206
- AQUILINA L., LADOUCHE B., DÖRFLIGER N. (2006) - *Water storage and transfer in the epikarst of karstic systems during high flow periods*. Journal of Hydrology, 327: 472-485
- BAKALOWICZ M. (1995) - *La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement*. Hydrogéologie, 4: 3-21.
- BAKALOWICZ M. (2003) - *Natural organic carbon in groundwater*. C. R. Geoscience, 335: 423-424
- BARNES S., WORDEN R.H. (1998) - *Understanding groundwater sources and movement using water chemistry and tracers in a low matrix permeability terrain: the Cretaceous (Chalk) Ulster White limestone formation, Northern Ireland*. Appl. Geochem., 13: 143-153.
- BATIOT C., EMBLANCH C., BLAVOUX B. (2003) - *Total Organic Carbon (TOC) and magnesium (Mg^{2+}): two complementary tracers of residence time in karstic systems*. C. R. Geoscience, 335: 205-214
- BLAVOUX B., MUDRY J. (1983) - *Décomposition chimique des hydrogrammes du karst*. Hydrogéologie-Géologie de l'Ingénieur, 4: 270-278.
- BLAVOUX B., MUDRY J., PUIG J.M (1992) - *Bilan, fonctionnement et protection du système karstique de la Fontaine de Vaucluse (Sud-Est de la France)*. Geodin. Acta, 5(3):153-172.
- CANORA F., FIDELIBUS M. D., SCIORTINO A., SPILOTTO G. (2008) - *Variation of infiltration rate through karstic surfaces due to land use changes: A case study in Murgia (SE-Italy)*. Eng. Geology, 99 (3-4): 210-227.
- CIARANFI N., GHISSETTI F., GUIDA M., IACCARINO G., LAMBIASE S., PIERI P., RAPIARDI L., RICCHETTI G., TORRE M., TORTORICI L., VEZZANI L. (1983) - *Carta Neotettonica dell'Italia meridionale*. Progetto Finalizzato Geodinamica CNR, 515, 62 pp.
- CIARANFI N., PIERI P., RICCHETTI G. (1988) - *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. Mem. Soc. Geol. It., 41: 449-460.
- COTECCHIA V., TADOLINI T., TULIPANO L. (1978) - *Ground water temperature in the Murgia karst aquifer (Puglia-Southern Italy)*. Proc. Int. Symp. on Karst Hydrology, Budapest, 1-18.
- DE GIROLAMO A. M., LIMONI P.P., PORTOGHESE I., VURRO M. (2002) - *Il bilancio idrogeologico delle idrostrutture pugliesi: sovrasfruttamento e criteri di gestione*. L'Acqua, 3: 33 - 45.
- DOGLIONI C., MONGELLI F., PIERI P. (1994) - *The Puglia uplift (SE Italy): an anomaly in the foreland of the Apenninic subduction due to buckling of a thick continental lithosphere*. Tectonics, 13 (5): 1309- 1321.
- DOGLIONI C., HARABAGLIA P., MARTINELLI G., MONGELLI F., ZITO G. (1996) - *A geodynamic model of the Southern Apennines accretionary prism*. Terra Nova 8: 540-547.
- DÖRFLIGER N., JEANNIN P.Y., ZWAHLEN F. (1999) - *Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)*. Environ. Geol. 39: 165-176.
- DROGUE C. (1992) - *Hydrodynamics of karstic aquifers: experimental sites in the Mediterranean karst, Southern France*. In: W. Back et al. (Eds),



Hydrog. of Selected Karst Regions, Int. Contr. Hydrog., IAH, Heise, Hannover, 13: 133-149.

EMBLANCH C., ZUPPI G.M., MUDRY J., BLAVOUX B., BATIOU C. (2003) - *Carbon 13 of TIDC to quantify the role of the unsaturated zone: the example of the Vaucluse karst system (Southeastern France)*. J. Hydrol., 279: 262-274.

GRASSI D. (1974) - *Il carsismo della Murgia e sua influenza sull'idrogeologia della regione*. Geol. Appl. e Idrogeol., IX: 39-57

KATZ B.G., COPLEN T.B., BULLEN T.D., DAVIS J.H. (1997) - *Use of chemical and isotopic Tracers to characterize the interactions between ground water and surface water in mantled karst*. Ground Water, 35 (6): 1014-1028.

KATZ B.G., CATCHES J.S., BULLEN T.D., MICHEL R.L. (1998) - *Changes in the isotopic and chemical composition of ground water resulting from a recharge pulse from a sinking stream*. Journal of Hydrology, 211 (1-4): 178-207.

KIRALY L. (1994) - *Groundwater flow in fractures rocks: models and reality*. 14. Mintrop Seminar, ber Interpretationsstrategien in Expl. und Prod., Ruhr Univ. Bochum, 159: 1-21

KIRALY L. (1998) - *Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach*. Bulletin d'Hydrogéologie, 16: 77-98.

KLIMCHOUKA A. (2004) - *Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution*. In Jones W.K. et al (Eds.) Proc. Symp. On Epikarst, Sheperdstown, West Virginia, USA. Karst Water Inst. Spec.Publ., 9: 23-35.

JEANNIN P.Y. (1998) - *Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques*. PhD Thesis, Neuch, tel, 237 pp.

MANGIN A. (1975) - *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Ann. Spèlèol., 30: 21-124.

NATIV R., GUNAY G., HÖTZL H., REICHERT B., SOLOMON D.K., TEZCAN L. (1999) - *Separation of groundwater-flow components in a karstified aquifer using environmental tracers*. Appl. Geochem., 14: 1001-1014.

NEBOIT R. (1975) - *Plateaux et collines de Lucanie orientale et des Poullies: étude morphologique*. These Univ. Lille, Libr. H. Champion, Paris, 715 pp.

PIERI P. (1980) - *Principali caratteri geologici e morfologici delle Murge*. Murgia sotterranea. Bollettino Gruppo Speleo Martinense, 2:13-19.

RICCHETTI G. (1980) - *Contributo alla conoscenza strutturale della Fossa bradanica e delle Murge*. Boll. Soc. Geol. It., 49: 421-430.

RICCHETTI G., CIARANFI N., LUPERTO SINNI E., MONGELLI F., PIERI P. (1988) - *Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'avampaese apulo*. Mem. Soc. Geol. It., 41: 57-82.

TROPEANO M. (2006) - *The Calcarene di Gravina Formation in Matera: a good training for sequence stratigraphy*. Workshop on 'Thirty years of Sequence Stratigraphy: Applications, Limits and Prospects', Oct. 2006, Bari (Italy), Abstract Volume, 37-40.

TULIPANO L., COTECCHIA V., FIDELIBUS M.D. (1990) - *An example of multitracing approach in the studies of karstic and coastal aquifers*. Int. Symp. and Field Seminar on Hydrogeologic Processes in Karst Terranes, Antalya, Turkey. I.A.H.S. Publ. No. 207: 381-389.

VAUTE L., DROGUE C., GARRELLY L., GHELFENSTEIN M. (1997) - *Relations between the structure of storage and the transport of chemical compounds in karstic aquifers*. Journal of Hydrology, 199: 221 - 238.

WILLIAMS P.W. (1983) - *The role of the subcutaneous zone in karst hydrology*. Journal of Hydrology, 61: 45-67.