

Primi risultati del monitoraggio con misure di velocità in un acquifero carsico costiero (Bari, Italia meridionale)

Maurizio Polemio, Pier Paolo Limoni

CNR-IRPI, via Amendola, 122/I, Bari, Italy, m.polemio@ba.irpi.cnr.it

Preliminary results of groundwater monitoring and of flow velocity measurements in a coastal karst aquifer (Bari, Southern Italy)

ABSTRACT: The study area is located in the Murgia plateau which constitutes a large and deep coastal karst aquifer (of Mesozoic age), the predominant rock material of which is either limestone or limestone-dolomite. The aquifer is affected by karst and fracturing phenomena, also well below the sea level, whereas intruded seawater underlies fresh groundwater owing to a difference in density. The groundwater flow is confined, except on a restricted coastline strip. A strong connection between the increase in salt contamination and the lowering of piezometric levels, which can be ascribed to groundwater overdraft and/or a natural decrease in groundwater recharge, has been recognized in the coastal area. To contribute to the study of this groundwater and quality degradation phenomena on the basis of affordable data, a surveying station was realized in a well bored for this purpose in the urban area of Bari. The monitoring started in 2004, using probes equipped with sensors of piezometric head, temperature, specific electrical conductivity, pH, dissolved oxygen and Eh. The detailed characterization of vertical variability of flow velocity has been realized with tracer tests realized in the well, using a fluorimeter. The sampling of groundwater and the laboratory analyses were realized to complete the activity. The whole data set is analyzed highlighting the peculiarities of the selected karst aquifer and of groundwater quality degradation.

Key terms: Karst aquifer, Seawater intrusion, Monitoring, Flow velocity

Termini chiave: Acquifero carsico, Intrusione marina, Monitoraggio, Velocità di flusso

Riassunto

L'area di studio è localizzata nell'altopiano della Murgia, che ospita un ampio e profondo acquifero carsico costiero, con sede nelle rocce calcaree e/o calcareo-dolomitiche del basamento carbonatico Mesozoico.

La circolazione idrica sotterranea si esplica in pressione, eccetto lungo una ristretta fascia costiera; il flusso idrico sotterraneo spesso si concentra lungo particolari linee preferenziali, dall'interno verso la costa, dove si rinvergono numerose sorgenti. L'acquifero, di tipo costiero, è interessato da fenomeni carsici e da un grado di fratturazione variabile nelle tre dimensioni, anche sotto il livello medio mare.

E' oramai ben noto che vi è una relazione tra la degradazione qualitativa dovuta all'intrusione marina e l'abbassamento della superficie piezometrica. L'aggravarsi di tale degradazione è funzione di due diverse cause, che spesso si sovrappongono. Ad una situazione geologico-strutturale, stazionaria, che permette l'intrusione marina, si sommano sia il sempre crescente prelievo di acque sotterranee sia gli effetti di duraturi periodi siccitosi, causa diretta dell'abbassamento dei livelli piezometrici per deficit di ricarica, ma anche indiretta di bruschi incrementi degli emungimenti.

Al fine di contribuire allo studio di questi fenomeni sulla base di dati e metodologie affidabili, è stata realizzata una stazione di monitoraggio in un pozzo, ubicato nell'area urbana di Bari, perforato per tale scopo.

Il monitoraggio, partito nel 2004, si basa sulla misura periodica, mediante sonde multiparametriche, del livello piezometrico, della temperatura, della conducibilità elettrica, del pH, dell'ossigeno disciolto e di Eh dell'acqua sotterranea. La misura lungo la verticale del pozzo della velocità di flusso è stata realizzata mediante prove con tracciante, realizzate con la tecnica del pozzo singolo, utilizzando un fluorimetro da pozzo. Il campionamento delle acque sotterranee e l'analisi di laboratorio completa l'attività svolta.

L'intero insieme dei dati è stato analizzato evidenziando le peculiarità dell'acquifero carsico e le peculiarità emerse riguardo ai rischi di degrado delle risorse idriche sotterranee in esame.

Introduzione

Le risorse idriche pugliesi sono localizzate prevalentemente in acquiferi di natura carsica. Tali risorse, utilizzate a vario grado nei settori potabile, industriale e irriguo, continuano a svolgere un ruolo quanto mai decisivo per

lo sviluppo socio-economico della regione. Negli ultimi decenni la crescente domanda idrica è stata soddisfatta anche grazie a prelievi di acque sotterranee crescenti, in particolare durante frequenti e gravi periodi siccitosi (Polemio & Casarano, 2008). Tali tendenze sottopongono a notevoli sollecitazioni il sistema idrogeologico pugliese, incrementando, secondo modalità diverse, i rischi di degrado per le risorse idriche sotterranee.

Tali risorse, sia pure con marcate differenze da luogo a luogo, sono soggette agli effetti di due tipi di degradazione qualitativa: l'incremento della salinità, fenomeno in origine naturale, in quanto dovuto all'intrusione marina, favorito dal sovrasfruttamento delle falde idriche sotterranee, interessa spesso nuove porzioni di territorio, riducendo la disponibilità di risorse idriche di buona qualità (Polemio et al., 2009b); l'inquinamento chimico-fisico, di crescente importanza, non soltanto attorno alle principali aree urbanizzate (Polemio et al., 2006b).

L'aumento della salinità delle acque sotterranee per intrusione marina è certo da porsi in relazione al trend piezometrico decrescente, a sua volta determinato dall'effetto sovrapposto di sfavorevoli condizioni climatiche e dai crescenti prelievi; recenti campagne di misura della portata delle sorgenti costiere hanno evidenziato che le portate medie attuali sono pari a circa il 60% di quelle rilevate negli anni trenta, quando l'emungimento era pressoché trascurabile (Polemio & Casarano, 2008; Polemio et al., 2009c). Il sovrapporsi delle suddette tendenze, unitamente alle modalità costruttive e di esercizio dei pozzi, spesso determina il richiamo verso l'alto, nella zona satura e dolce della falda, di acqua salata proveniente dal basso, con conseguente dilatazione verso l'alto della zona di transizione (Polemio et al., 2009b). In questo contesto è fondamentale la conoscenza approfondita dell'ambiente in cui circolano le acque di falda; ovvero, diventa determinante definire in maniera rigorosa i diversi fenomeni che regolano i processi di alimentazione e deflusso della falda ed i rapporti intercorrenti tra le acque dolci di falda e quelle di intrusione marina (Cotecchia, 1977; Cotecchia & Tadolini, 1993; Cotecchia et al., 1981; Cotecchia et al., 1998; Fidelibus & Tulipano, 1996; Tadolini, 1990; Tulipano & Fidelibus, 1984).

L'inquinamento chimico-fisico delle acque sotterranee è favorito dalla diffusa ed elevata vulnerabilità degli acquiferi carbonatici pugliesi (Polemio et al., 2009a), ma è causato fondamentalmente dall'uso improprio del suolo e del sottosuolo, adibiti a ricettori di ogni sorta di scarico proveniente dalle più varie attività antropiche. Altri rischi per la qualità delle acque sotterranee provengono dalle discariche dei rifiuti di diversa natura. Lo smaltimento caotico ed incontrollato di rifiuti, in particolare dei più inquinanti, è una pratica illegale il cui contrasto ha conseguito numerosi successi ma che purtroppo perdura, utilizzando sia cave disattivate sia il cinico spandimento su vaste superfici agricole.

Diverse campagne d'indagine hanno caratterizzato la

qualità delle acque sotterranee e degli efflussi delle principali sorgenti costiere (Cotecchia & Tulipano, 1993; Cotecchia & Polemio, 1998; Cotecchia & Polemio, 1999; Polemio et al., 2006a; Polemio et al., 2006b). Da tali studi emerge in modo netto come, lungo i percorsi che partono dalle zone di alimentazione alle zone di efflusso, poste nei corpi idrici superficiali, siano essi piccole lagune, il reticolo idrografico in prossimità della costa o il mare, tutte zone ubicate comunque lungo la costa, la qualità delle acque peggiora sensibilmente. Tale andamento non è sempre continuo ed omogeneo, in quanto appare "disturbato" da diversi fattori idrogeologici e antropici, correlabili all'ubicazione dei principali centri urbani. In particolare, l'inquinamento delle acque sotterranee è assente solo in ristrette aree interne, parte delle aree di alimentazione degli acquiferi. Da tali aree le acque sotterranee fluiscono verso il mare e, mentre entrano progressivamente in contatto con acque saline, lungo il percorso acquisiscono carichi inquinanti provenienti dalle aree antropizzate e agricole.

Le acque così degradate si versano a mare e in lagune, creando rischi ecologici, in particolare eutrofizzazione (per l'aumento dell'azoto e del fosforo), anche per aree umide costiere di particolare pregio.

Al fine di contribuire allo studio di questi fenomeni sulla base di dati e metodologie affidabili, è stato realizzato un pozzo sperimentale di monitoraggio, ubicato nell'area urbana di Bari, in prossimità della sede dell'IRPI (Figura 1). Il pozzo di monitoraggio è profondo circa 20 m ed è collocato in un'area urbana in un recente passato utilizzata per attività industriali, alcune delle quali particolarmente nocive. Al momento non sono noti utilizzi della falda in un raggio di circa 500 m dal pozzo.

Il monitoraggio, partito nel 2004, misura, secondo diverse modalità operative, parametri piezometrici, chimico-fisici, isotopici e di velocità delle acque sotterranee.

Lineamenti geologici, morfo-strutturali e idrogeologici

Nel territorio regionale pugliese si individuano quattro domini geografici ed omonime strutture idrogeologiche: Gargano, Tavoliere, Murgia e Salento (Polemio et al., 2009b). La Murgia, in cui il pozzo di studio è posto, è geologicamente costituita da una potente successione di rocce carbonatiche cretacee, appartenenti al Gruppo dei Calcari delle Murge, sulla quale poggiano in trasgressione depositi calcarenitici del Pliocene medio-superiore e lembi di depositi Quaternari sia marini che continentali (Valduga, 1965; Ricchetti, 1975).

Il quadro geologico dell'area urbana (Figura 1) è relativamente semplice e noto (Radina, 1958; Pieri, 1975). I depositi più antichi affioranti nell'area di Bari appartengono alla Formazione del Calcare di Bari, localmente di età cenomaniana (Azzaroli & Valduga, 1967; Pieri, 1975).

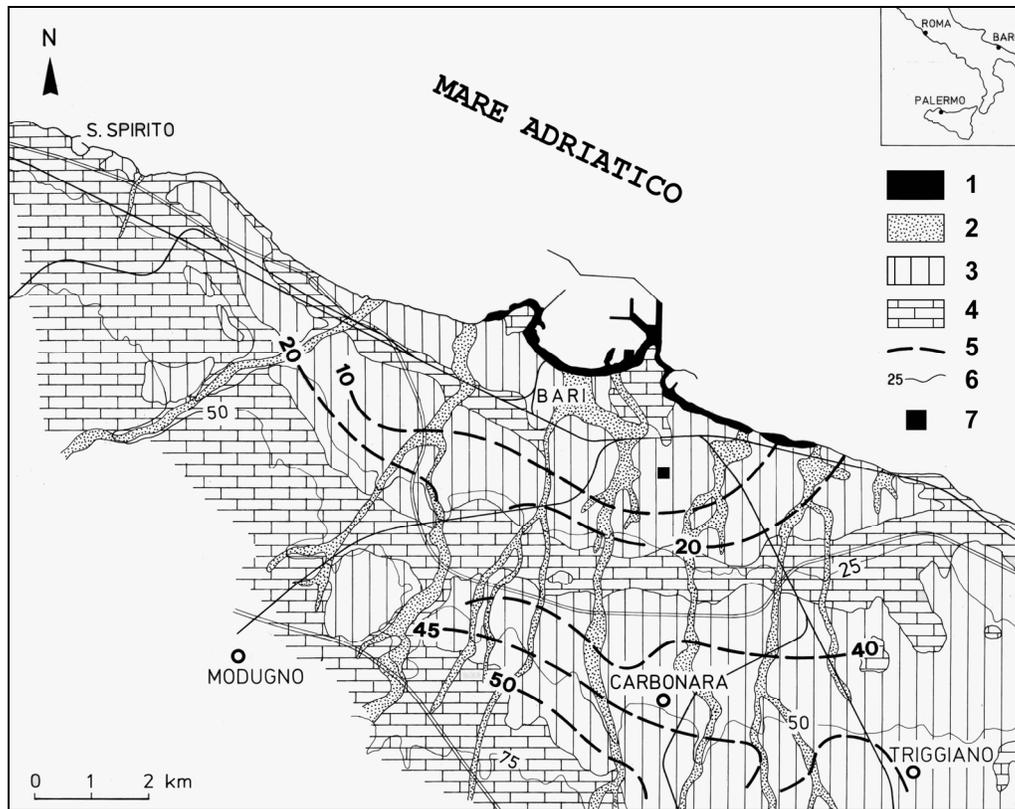


Figura 1. Carta geologica schematica (modificata da Cotecchia et al., 1996). Legenda: 1) Colmata; 2) Depositi alluvionali recenti; 3) Depositi marini terrazzati (Pleistocene medio-superiore) e Calcareniti di Gravina (Pleistocene inferiore); 4) Calcarea di Bari (Cenomaniano); 5) Andamento del tetto del Calcarea di Bari (m. s.l.m.); 6) Curva di livello (m. s.l.m.); 7) Stazione di monitoraggio.
 Figure 1. Geologic schematic map (modified from Cotecchia et al., 1996). Legend: 1) Backfill; 2) Recent alluvial Deposits; 3) Terraced sea deposits (early-middle Pliocene) and Calcarenites of Gravina (late Pleistocene); 4) Limestone of Bari (Cenomanian); 5) Contour line of Bari limestone top (m a.s.l.); 6) Contour line (m a.s.l.); 7) Station of monitoring.

Questa unità litostratigrafica, che fa parte della potente serie sedimentaria prevalentemente calcarea, conosciuta in letteratura col nome di gruppo dei Calcari delle Murge, è costituita in affioramento da strati e banchi di calcari, calcari dolomitici e dolomie mediamente fratturati e disposti localmente secondo blande pieghe con asse orientato circa WNW-ESE (praticamente parallelo all'attuale linea di costa).

Il fenomeno carsico manifesta i suoi effetti ovunque, sia pure con intensità diversa in superficie e al variare della profondità. Le cavità presentano forma e dimensioni diverse; le più comuni sono interstratali e da frattura. Spesso le cavità sono parzialmente o interamente riempite da depositi di varia natura in cui in genere è rilevante la frazione di terreni residuali quali la cosiddetta terra rossa.

In trasgressione sui calcari poggia la Calcarenite di Gravina, localmente attribuita al Pleistocene inferiore, costituita da strati e banchi di biocalcareniti e biocalciruditi con giaciture sub-orizzontali. Nell'area urbana è presente in lembi residui e discontinui, il cui spessore massimo è di pochi metri (Pieri, 1975).

In discordanza sui termini precedenti, che nell'insieme rappresentano il substrato rigido su cui si sono sedimenta-

te le unità più recenti, giacciono i depositi del cordone litorale di Bari e i depositi delle Dune di S. Girolamo, entrambi appartenenti ai Depositi marini terrazzati delle Murge e del Salento (Zezza, 1971; Pieri, 1975). Questi ultimi, definiti regionalmente da Ciaranfi et al. (1988) ed attribuiti dagli stessi Autori al Pleistocene medio-superiore, sono depositi sabbioso-ghiaiosi e calcarenitici, discontinui e di spessore limitato, disposti all'incirca parallelamente all'attuale linea di costa e, dal più antico al più recente, posti a quote progressivamente decrescenti verso mare, a partire da circa 350 m slm.

Morfologicamente il territorio murgiano si presenta con vasti ripiani, digradanti verso il mare, con scarpate a luoghi piuttosto ripide e a luoghi poco acclivi. Esiste un chiaro rapporto di dipendenza fra gli elementi morfologici e quelli strutturali: le scarpate rappresentano il prodotto di fenomeni erosivi che hanno fatto arretrare originari piani di faglia subverticali, i rilievi e le depressioni spesso coincidono con anticlinali e sinclinali (Ciaranfi et al., 1988).

I caratteri morfologici dell'area urbana richiamano il motivo più importante dell'area murgiana, dato da una serie di ripiani posti a quote via via più basse, procedendo

dall'interno verso l'Adriatico. Sono, infatti, presenti tre ripiani dislocati a diverse altezze: quello più alto si colloca a quota 40-60 m slm, quello intermedio a 20-25 m slm, mentre quello più basso è posto a qualche metro sul livello del mare. Si tratta di terrazzi marini, allungati quasi parallelamente alla costa e leggermente inclinati a nord, che si raccordano tramite scarpate solo a luoghi nette e ben riconoscibili.

Il motivo tettonico principale dell'area in oggetto è dato dall'assetto monoclinale della successione cretacea che nel suo sviluppo, in direzione S-SW, è movimentato da pieghe ad ampio raggio e da sistemi di faglie, di tipo distensivo, generalmente subverticali, con rigetti non superiori a qualche decina di metri, che scompongono in blocchi il rigido substrato carbonatico mesozoico, originando un'estesa struttura a gradinata orientata da NW a SE (Martinis, 1961; Ricchetti, 1980).

L'evoluzione della rete idrica sotterranea è stata in massima parte favorita da una successione di processi carsici ipogei. I mutamenti della posizione del livello di base, costituito dal mare, inducevano la migrazione della rete idrica sotterranea, favorendo così i processi carsici. Come naturale conseguenza, nella struttura idrogeologica della Murgia si rinvennero, in seno all'ammasso carbona-

tico ed alle profondità più disparate, livelli di roccia discretamente o molto permeabili, per carsismo e fessurazione, inglobati in un insieme poco permeabile o addirittura praticamente impermeabile. Detti livelli risultano, tra l'altro, distribuiti a quote diverse e molto spesso non sono correlabili con quelli riconosciuti in zone anche vicine (Grassi, 1973; Cotecchia, 1977).

Nella struttura idrogeologica murgiana, della quale l'area urbana di Bari è parte integrante (Figura 2), è presente un ampio e potente acquifero carbonatico costiero, costituito da rocce calcaree e/o calcareo-dolomitiche del Mesozoico. In un siffatto ambiente la circolazione idrica si sviluppa in genere in pressione, a differenti profondità, generalmente al di sotto del livello medio mare, fatta eccezione per una ristretta fascia costiera, in cui il flusso idrico sotterraneo avviene in condizioni freatiche.

Il flusso idrico sotterraneo spesso si concentra lungo particolari linee preferenziali, orientate dall'interno verso la costa, dove si rinvennero numerose sorgenti. Lungo la fascia costiera si verifica il fenomeno dell'intrusione continentale di acque marine (Polemio et al., 2009b). La stazione di monitoraggio è posta in un'area dove vi è una moderata concentrazione del flusso e l'acquifero risulta essere debolmente in pressione (Figura 2).

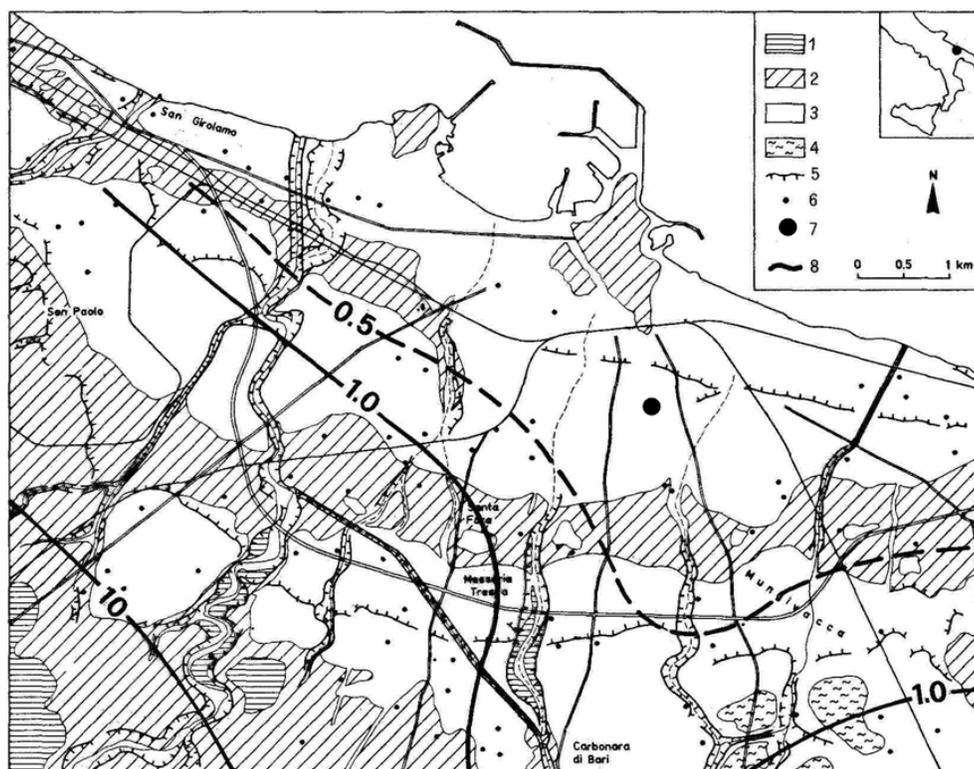


Figura 2. Carta idrogeologica schematica (modificata da Polemio, 1994). Legenda: permeabilità relativa (per porosità, dove non diversamente specificato): 1) alta; 2) alta per fessurazione e carsismo; 3) bassa, all'interno delle depressioni morfologiche; 4) variabile da bassa a media; 5) orlo di scarpata; 6) pozzo; 7) stazione di monitoraggio; 8) superficie piezometrica (m s.l.m.).

Figure 2 Hydrogeological schematic map ((modified from Polemio, 1994). Legend: relative permeability (for porosity, where not otherwise specified): 1) high; 2) high for fissured and karstic; 3) low, null inside the morphological depressions; 4) varying from low to average; 5) edge of scarp; 6) well; 7) station of monitoring; 8) piezometric surface (m a.s.l.).

Su tutta l'area di studio è impostato un fitto reticolo idrografico inciso nel substrato calcareo, in cui si riconoscono valli in genere poco profonde e svasate, dal caratteristico fondo piatto, su cui si accumulano modesti spessori di sedimenti alluvionali essenzialmente argillosi (terre rosse). Trattasi di corsi d'acqua effimeri e a regime torrentizio, che si attivano soltanto in occasione di piogge di rilevante intensità (Polemio, 2010).

Il pozzo e il monitoraggio

Il pozzo di monitoraggio (8,5 m slm) ricade in un'area fortemente urbanizzata e tristemente conosciuta per la presenza in zona dell'ex stabilimento Fibronit, che per più di 50 anni ha prodotto cemento-amianto; l'area dell'ex stabilimento è inserita nell'elenco dei siti inquinati di interesse nazionale (Pagliarulo et al., 2006).

La perforazione del pozzo si è spinta fino ad una profondità di 18 m dal piano campagna, adottando il diametro di perforazione di 157 mm. Successivamente l'opera è stata completata con una tubazione dal diametro di 150 mm, tubazione finestrata per l'intera lunghezza del perforo. Partendo dalla quota del piano campagna, si distinguono circa 4 m di terreno di riporto, costituito da inerti eterometrici di varia origine, quindi, da 4 a 10 m dal piano campagna, si rinvencono depositi sabbioso-limosi (Olocene) e calcarenitici (Pleistocene superiore) e, infine, fino a fondo foro, calcari micritici e calcari dolomitici (Cretaceo), fratturati, con abbondante terra rossa.

La falda idrica più cospicua è stata rinvenuta nei calcari cretacei a circa 11 m dal p.c.; il livello statico si è stabilizzato a fine perforazione a circa 8,2 m dal p.c., quindi a circa + 0,3 m s.l.m.

All'interno del pozzo sono state posizionate le strumentazioni per il monitoraggio automatico, in particolare: a 12 m dal p.c. il sensore piezometrico e a 16 m dal p.c. la sonda multiparametrica.

I rilievi e controlli nella stazione di monitoraggio sono effettuati con diversa frequenza. Nel corso dell'anno idrologico si effettuano determinazioni periodiche di carattere idrogeologico e geochimico (cadenza trimestrale/semestrale), mentre in automatico, con strumentazione installata nel perforo, si eseguono le misure piezometriche e chimico-fisiche.

Il monitoraggio automatico è eseguito con due distinti dispositivi e criteri: la misura piezometrica, stante anche la vicinanza del mare (circa 1 km), è la più frequente, mentre la misura dei principali parametri chimico-fisici delle acque di falda, condizionata dal fenomeno dell'intrusione marina, si effettua con minore frequenza (da 24 a 8 misure giornaliere).

Il monitoraggio piezometrico viene effettuato tramite l'utilizzo di un piezometro elettrico che è dotato di sensore termometrico interno che è indissolubilmente collegato via cavo a un data logger installato in modo duraturo in prossimità e all'interno della testa del pozzo. Il sensore

piezometrico è costituito da un trasduttore di pressione che opera in un campo di misura equivalente all'intervallo da 0 a 20 m di colonna idrica (precisione 0.1% del fondo scala). All'atto dello scarico dati, la misura di pressione è convertita in altezza piezometrica, tenuto conto della densità dell'acqua (stimata in base a temperatura e salinità) e, in funzione dei dati acquisiti all'atto dell'installazione, in quota riferita al livello medio mare. La profondità di installazione del sensore piezometrico, riferita al piano campagna, è stata inizialmente definita in modo che le prevedibili variazioni piezometriche fossero contenute nell'intervallo 20-80% del campo di misura. Tale valutazione è stata effettuata sulla base delle variazioni di livello della falda rilevate in pozzi posti in condizioni idrogeologiche affini. In ogni momento è peraltro possibile modificare la quota d'installazione del piezometro, in funzione delle misure acquisite.

Il monitoraggio chimico-fisico automatico è realizzato con una sonda multiparametrica con datalogger interno, che permette di monitorare la temperatura, la conducibilità elettrica, la salinità, il pH, l'ossigeno disciolto e il potenziale di ossido-riduzione delle acque sotterranee. La sonda multiparametrica è stata posizionata, all'interno del pozzo, in corrispondenza del livello di circolazione idrica più attivo; tale livello, individuato in fase di perforazione, è stato poi confermato dalle misure di velocità effettuate nel pozzo.

Sia il piezometro che la sonda multiparametrica sono programmabili con diverse frequenze di acquisizione e memorizzazione, in funzione delle conoscenze disponibili e delle finalità del monitoraggio (le principali opzioni sono valore istantaneo, media scalare nonché minimo, media e massimo in intervalli di tempo assegnati).

In considerazione della locale realtà idrogeologica, del parametro da osservare e della posizione del punto di controllo, sono stati definiti diversi valori della frequenza d'acquisizione. In particolare, per il piezometro, si è prevista un'acquisizione oraria con memorizzazione anche del valore medio giornaliero, mentre per la sonda multiparametrica si è prevista un'acquisizione ogni tre ore, con memorizzazione del valore istantaneo.

Rilievi periodici

La misura della velocità di filtrazione delle acque sotterranee è stata realizzata utilizzando la tecnica della diluizione di un tracciante in pozzo singolo. In pratica, si immette un tracciante con concentrazione omogenea lungo la colonna idrica del pozzo e si misura, dentro lo stesso pozzo, la variazione nel tempo della concentrazione (Haley et al., 1967; Cotecchia & Pirastru, 1969; Hazzaa, 1970; Polemio & Mitolo, 1998).

Si è fatto ricorso ad un tracciante fluorescente, appartenente al vasto gruppo di traccianti idrologici coloranti. Generalmente si utilizzano traccianti fluorescenti in quanto sono facilmente reperibili, possono essere usati in

campo con notevole rapidità e semplicità. Inoltre, i coloranti con proprietà fluorescenti sono rilevabili in concentrazioni molto basse, con grande accuratezza, mediante fluorimetri. Per quanto ciascun tipo di tracciante fluorescente presenti peculiarità, ovvero pro e contro nelle applicazioni idrologiche, si consideri che numerosi non sono tossici, sono poco costosi, molto solubili, semplici ed efficaci per le applicazioni in idrogeologia. Gli autori hanno operato con uranina e rodamina WT, che non pongono specifici o rilevanti problemi nelle applicazioni alle acque sotterranee, in particolare per le determinazioni descritte (Tazioli, 1986; Di Fazio, 1997; Polemio & Mitolo, 1998; Kass, 1998; Petrella et al., 2008).

Nel caso si operi per la prima volta su un pozzo, devono eseguirsi delle operazioni iniziali: misura dello zero e verifica dell'assenza di correnti verticali. Lo zero consiste nel rilievo delle concentrazioni di tracciante in assenza di immissioni. Generalmente tali concentrazioni devono risultare nulle, dato che trattasi di traccianti artificiali. La presenza di rilevanti correnti verticali sarebbe incompatibile con l'approccio teorico su cui si basa l'interpretazione delle misure di concentrazione. La loro assenza va quindi verificata per valutare l'effettiva utilità delle determinazioni. La verifica si effettua marcando in modo puntuale la colonna idrica a diversa profondità (un passo di un metro in genere può essere una scelta accettabile) e osservando se il colorante si sposta in modo rilevante lungo la colonna idrica piuttosto che verso l'esterno del pozzo.

Tali operazioni sono state eseguite con esito positivo nel pozzo di monitoraggio. I veri e propri carotaggi verticali della velocità nel pozzo possono a questo punto iniziare con l'immissione del tracciante. Si deve avere cura di marcare omogeneamente l'intera colonna idrica del pozzo. Tale operazione non richiede un'elevata accuratezza e può quindi essere effettuata mediante un semplice sistema di immissione a gravità costituito da tubazione plastica con graduazione submetrica (per controllare la profondità di immissione), serbatoio tarato e cronometro (in alternativa al serbatoio-cronometro si possono usare piccole pompe da laboratorio).

Marcata la colonna, deve effettuarsi il primo carotaggio della concentrazione, a partire dalla quale si registreranno, in funzione della profondità, le variazioni di concentrazione in funzione del tempo, che saranno utili per il calcolo della velocità idrica. Terminato il primo carotaggio, si effettuano ripetuti carotaggi verticali della concentrazione del tracciante, ad intervalli di tempo da determinarsi in funzione della rapidità con cui le concentrazioni variano e delle capacità operative del gruppo di lavoro. In ogni caso, si deve aver cura di spostare la strumentazione nel pozzo con velocità verticale tanto bassa da non alterare le differenze di concentrazioni che si determinano come effetto del flusso della falda attraverso il pozzo.

La durata complessiva di una misura dipende principalmente dalla velocità di filtrazione della falda acquifera

e secondariamente da diversi fattori tra i quali la concentrazione iniziale, le caratteristiche della strumentazione di analisi, da cui dipende la concentrazione minima rilevabile e dal diametro del pozzo (Drost et al., 1968).

Per la determinazione della concentrazione del tracciante si è utilizzato un fluorimetro portatile, interfacciato ad un sistema di acquisizione e visualizzazione dati in tempo reale. Il fluorimetro è stato ingegnerizzato per essere calato in pozzi e piezometri con diametro interno non minore di 60 mm circa. Il metodo si basa sulla relazione esistente tra la velocità con cui un tracciante immerso in un pozzo si diluisce e la velocità di filtrazione dell'acqua sotterranea. La velocità di filtrazione $v(t)$, espressa in m/g, è legata alla diluizione del tracciante, che avviene con legge esponenziale, secondo la formula (Mosetti, 1961):

$$v(t) = - (V/\alpha St) \ln C/C_0$$

dove V è il volume di acqua relativo al tratto del pozzo in cui si effettua la misura (cm^3), α è un coefficiente di correzione che tiene conto della distorsione dei filetti idrici provocata dal pozzo, S è la sezione del pozzo normale alla direzione di flusso dell'acqua (cm^2), t è l'intervallo di tempo durante il quale si svolge la misura (s), C_0 e C sono, rispettivamente, la concentrazione del tracciante all'inizio e alla fine della misura, all'istante t .

Il coefficiente di correzione rappresenta in pratica il rapporto tra la portata attraverso il pozzo e quella che si ha nell'acquifero per una stessa sezione; tale coefficiente, calcolato per ogni singolo pozzo e per tutta la lunghezza della colonna idrica, dipende dalla geometria del perforo, dalle caratteristiche delle tubazioni di rivestimento e dell'acqua.

Le misure effettuate (Figure 3a e 3b) segnalano un discreto flusso lungo l'intera colonna idrica, con velocità massime fra 0.3-0.5 m/g nell'intervallo di profondità 11-16 m.

L'utilizzo del carotaggio multiparametrico in pozzi interessati da una rilevante circolazione idrica naturale può contribuire alla caratterizzazione idrogeologica del sito, alla preliminare caratterizzazione chimico-fisica delle acque sotterranee e può essere integrato nel contesto di metodologie di gestione, operando anche in ambienti idrogeologici complessi, quale quelli carsici (Cotecchia et al., 1999; Polemio et al., 2009b). Il carotaggio deve essere eseguito secondo criteri standard, avendo cura che la velocità di discesa della sonda all'interno del pozzo sia sufficientemente bassa, al fine di non alterare la naturale stratificazione delle acque e tenendo conto del tempo di risposta dei diversi sensori.

Le misure possono essere acquisite in modo automatico, se la sonda è dotata di sensore di pressione, e comunemente ad intervalli di profondità in genere non maggiori di 0,5 m. E' comunque estremamente opportuno che i carotaggi multiparametrici siano preceduti ed integrati da tradizionali osservazioni da eseguirsi nel corso della perforazione dei pozzi (Daurù et al., 2002).

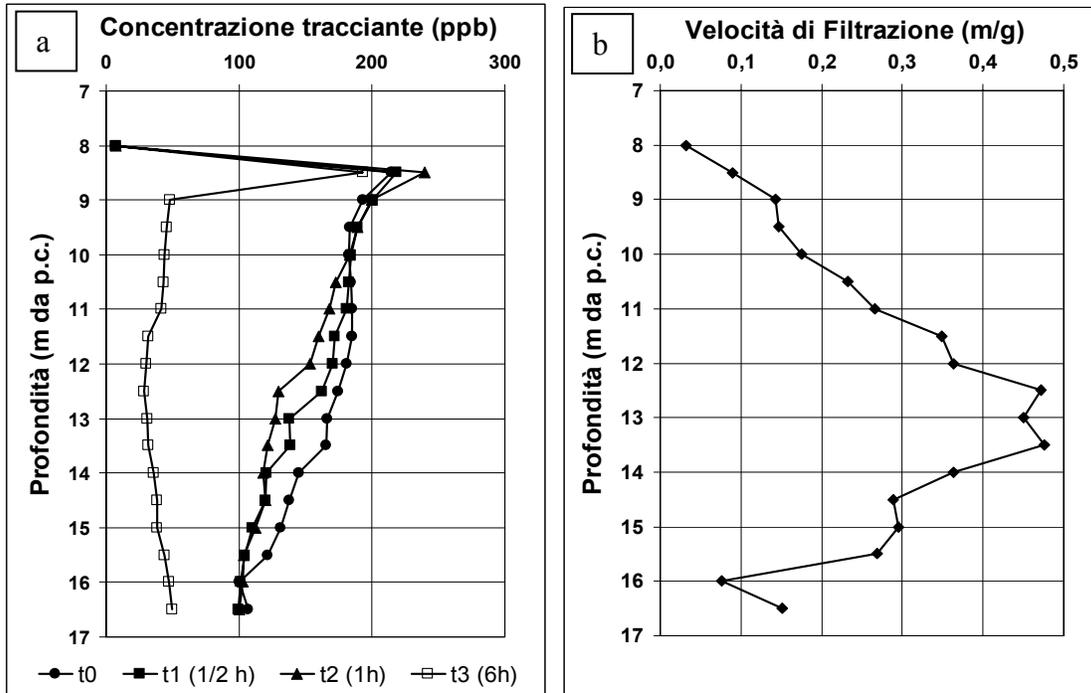


Figura 3. Determinazione della velocità di filtrazione dell'acquifero. a) Rilievi della concentrazione del tracciante, lungo l'intera colonna idrica, ad intervalli di tempo crescenti, b) valore delle velocità di filtrazione, calcolata nel tratto marcato.
 Figure 3. Measurement of groundwater flow velocity. a) Tracer concentration logs at variable time, b) Calculated velocity.

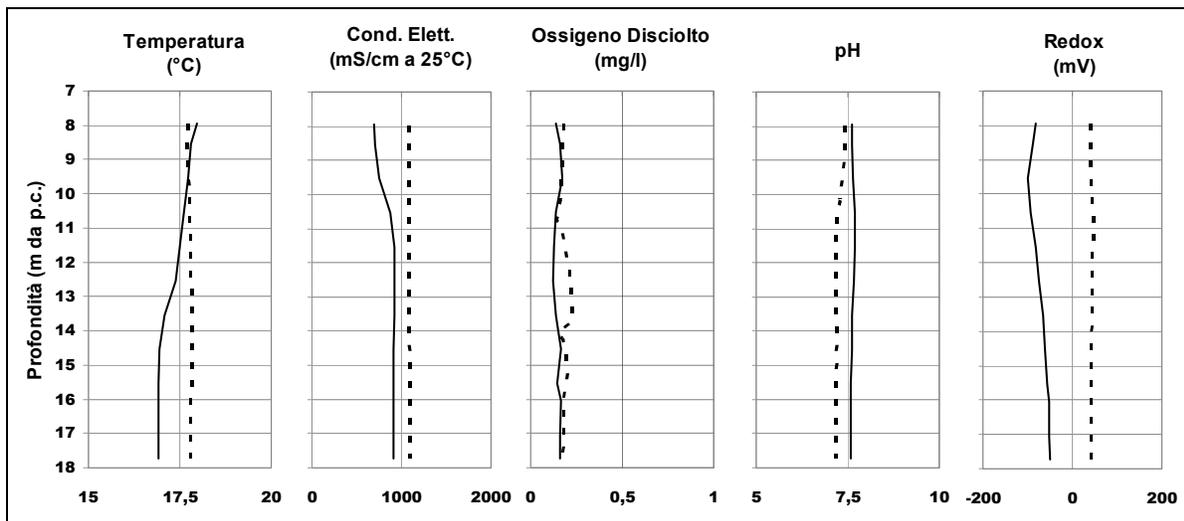


Figura 4. Tipici carotaggi multiparametrici rilevati nel pozzo. Con la linea tratteggiata, carotaggio effettuato nel periodo primaverile; con linea continua, carotaggio effettuato nel periodo invernale.
 Figure 4. Typical multi-parameter logs noticed in the well. With the outlined line, multi-parameter logs performed in the spring period; with the continuous line, multi-parameter logs performed in the winter period.

Nel pozzo di monitoraggio sono stati eseguiti carotaggi periodici (Figura 4) utilizzando una sonda multiparametrica. Le misure sono state condotte in continuo lungo la colonna idrica del perforo rilevando, ad intervalli di 0.5 m, i dati relativi ai parametri suddetti, con una velocità di discesa sufficientemente bassa.

Da una lettura combinata dei parametri monitorati, è

possibile riscontrare una più attiva circolazione idrica da 11 m dal p.c. fino a fondo foro. Tale risultato è coerente con l'andamento verticale dei valori di velocità di filtrazione. È possibile notare come tutti i parametri monitorati subiscano nel tempo e lungo la verticale variazioni modeste ma significative, con valori compresi fra 16÷18 °C per la temperatura, 0.7÷1.1 mS/cm per la conducibilità elet-

trica specifica (a 25 °C), 7.2 ± 7.7 per il pH e $-100 \div +50$ mV per il potenziale di ossidoriduzione (Eh).

Nel tratto interessato da circolazione più attiva (11-16 m dal p.c.) sono stati prelevati dei campioni idrici, in condizioni statiche, con un campionatore Kemmerer in acciaio, per effettuare successive analisi chimiche ed isotopiche.

Le analisi chimiche sono state condotte, dopo breve tempo dal prelievo, mediante titolazioni acido-base per la determinazione del tenore in HCO_3^- e mediante cromatografia ionica per la misura delle concentrazioni degli ioni principali (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) e di alcuni ioni secondari (F^- , Br^-) presenti in soluzione acquosa.

Dalle risultanze analitiche (Tabella 1) l'acqua campionata è classificabile come bicarbonato-alcalino-terrosa. Considerati i valori dei parametri chimici e fisici, non risulta una contaminazione delle acque sotterranee da parte del mare o da sostanze inquinanti, alle profondità raggiunte dal pozzo; anche i valori dei nitrati risultano essere bassi.

Tabella 1. Risultati chimico-fisici ed isotopici di un tipico campione idrico, prelevato ad aprile 2008.

Table 1. Chemical-physical and isotopic results of a typical water sample, withdrawn to April 2008.

T (°C)	pH	Redox (mV)	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)
16,9	7,9	-183	912	74,0	13,3	25,5	66,1
F (mg/l)	Cl (mg/l)	Br (mg/l)	NO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	d^{18}O	dD
0,6	64,4	0,5	15,5	50,1	350,9	-6,9	-42,8

Al fine di fornire dei descrittori sintetici delle caratteristiche chimico-fisiche della falda idrica sotterranea monitorata, si riportano i principali rapporti caratteristici e la classificazione delle acque, ricavati dall'elaborazione e dall'esame delle analisi chimiche effettuate sui campioni idrici prelevati in condizioni statiche (Cotecchia, 1977).

Il valore del rapporto $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}$, pari a 0.6, si può ritenere tipico di acque sotterranee fluenti in acquiferi di natura spiccatamente carbonatica, non contaminate da intrusioni marine. Infatti, tale rapporto caratteristico, da esperienze pregresse, tende a decrescere procedendo dall'interno verso la costa e dall'alto verso il basso per l'effetto dell'intrusione di acque marine, che incrementano la concentrazione del cloro. Tale aspetto non si riscontra nel pozzo in oggetto, che pure ricade nella fascia costiera, poiché la profondità dello stesso non è tale da raggiungere la zona di transizione.

Nel caso del rapporto caratteristico $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$, valori bassi come quello determinato (0.6) sono riconducibili a circuiti idrici sotterranei piuttosto rapidi, influenzati non poco dalla ricarica.

Se si applica il criterio, basato sul solo contenuto di cloruri, per la valutazione a "soglia" della presen-

za/assenza di miscelazione delle acque dolci di falda con quelle di intrusione marina, il valore rilevato si colloca, in sostanza, in corrispondenza della soglia, in un intervallo di valori per il quale non si può escludere con certezza statistica l'assenza, sia pur minima, di miscelazione (Polemio et al., 2009b).

In riferimento all'approfondimento isotopico, l'attività svolta è stata basata sul campionamento mensile delle acque di pioggia, mediante un pluviometro totalizzatore installato presso la sede dell'IRPI di Bari, al fine anche di determinare mensilmente la quantità di precipitazione.

I valori di composizione isotopica degli elementi che vengono spesso usati nelle applicazioni di idrologia isotopica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e D/H) sono espressi come variazione in parti per mille rispetto a uno standard di riferimento. Lo standard è rappresentato dallo SMOW (Standard Mean Ocean Water), cioè dal valore medio della composizione isotopica delle acque oceaniche, le quali possono considerarsi il punto iniziale e finale del ciclo idrologico.

Nell'area murgiana, le precipitazioni meteoriche rappresentano la principale ricarica delle acque sotterranee. Di conseguenza le acque di falda hanno una connotazione isotopica che riflette quella delle precipitazioni. In particolare, come in tutte le regioni con clima mediterraneo, di tipo semi arido, l'infiltrazione efficace avviene prevalentemente durante la stagione fredda (da ottobre a marzo), stagione durante la quale la composizione isotopica delle precipitazioni mostra i valori più negativi e una variabilità minore rispetto a quella tipica dell'intero anno idrologico. Per questo motivo le acque sotterranee hanno, come nel caso in esame, una composizione isotopica negativa rispetto alla media ponderata delle precipitazioni e con variazioni annue che sono molto contenute. Nel caso in oggetto, i dati isotopici non evidenziano il miscelarsi delle acque sotterranee con l'acqua di mare. In particolare, poiché l'acqua di mare è caratterizzata da valori di composizione isotopica positivi ($\text{d}^{18}\text{O} = +1$ e $\text{dD} = +10$), un eventuale miscelamento con acqua sotterranea sarebbe evidenziato da un arricchimento isotopico.

Monitoraggio in continuo

Il trend piezometrico nel pozzo di monitoraggio nel periodo 2004-2009 (Figura 5) risulta, in sostanza, moderatamente positivo grazie all'esaurirsi degli effetti della più recente siccità, conclusasi nel 2002 (Polemio e Casarano, 2008; Polemio et al., 2009c).

L'intervallo di variabilità dei valori piezometrici giornalieri è pari a circa 1.3 m.

La risposta del livello piezometrico agli eventi pluviometrici locali è alquanto rapida, mentre è poco apprezzabile nel caso di piogge intense incidenti nelle aree interne di ricarica, come verificato in occasione dell'evento alluvionale che colpì il territorio di Bari tra il 22 e 23/10/2005 (Figura 5). In poche ore caddero circa

110x10⁶ m³ di pioggia su un'area interna, che lambì la città di Bari, di 1.840 km² (volume equivalente a un'altezza media di pioggia di 60 mm) e che determinò piene che causarono 6 vittime, numerosi feriti e gravissimi danni (Polemio, 2010).

Anche il monitoraggio dei principali parametri chimico-fisici mostra una rapida variazione degli stessi, associabile agli eventi pluviometrici particolarmente intensi.

La Figura 6 mostra, ad esempio, come l'infiltrazione rapida nell'acquifero di acqua meteorica, con caratteristiche chimico-fisiche diverse dall'acqua sotterranea, produca una rapida variazione dei parametri monitorati. Le variazioni maggiori si osservano nei parametri più sensibili alla presenza di ossigeno nell'acqua.

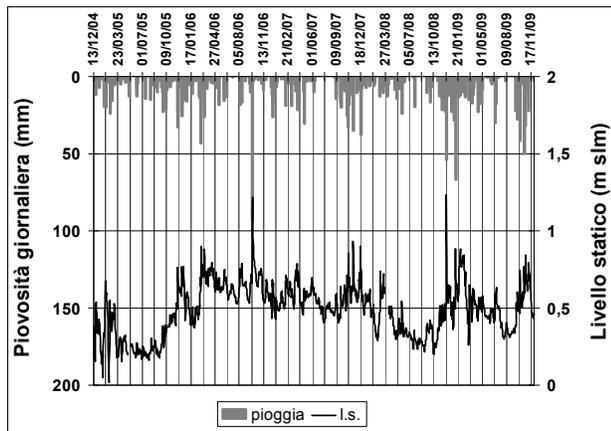


Figura 5. Piovosità giornaliera alla stazione di Bari e idrogramma piezometrico.

Figure 5. Daily rain (Bari gauge) and piezometric head.

Considerazioni conclusive

Molte delle fenomenologie presenti nel territorio pugliese (inquinamento antropico diffuso, intrusione salina in avanzamento, accentuazione dei drenaggi per sovrasfruttamento) derivano da un profondo disequilibrio tra "risorse" e "bisogni", con pericolose conseguenze sulle economie interessate.

Una corretta gestione della risorsa idrica sotterranea può avvenire solo a patto che siano ben conosciute le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero e quelle idrodinamiche e qualitative della falda. Tale obiettivo si può realizzare solo con un monitoraggio regolare e sistematico che consente di controllare le possibili evoluzioni idrologiche e idrochimiche che il sistema ambientale subisce per effetto delle evoluzioni del sistema socio-economico, con il quale interagisce.

Bibliografia

Azzaroli, A., Valduga, A., 1967. Note illustrative Carta Geologica: Fogli 177 "Bari" e 178 "Mola di Bari". Servizio Geologico d'Italia, 26pp.

Ciaranfi, N., Pieri, P., Ricchetti, G., 1988. Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale). Memorie Società Geologica Italiana, 41, 449-460.

Cotecchia, V., 1977. Studies and investigations on Apulian groundwaters and intruding seawaters (Salento Peninsula). Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque, CNR, 20, 345pp.

I dati sin qui acquisiti dalla stazione di monitoraggio, seppur preliminari per quanto attiene l'aspetto qualitativo, dimostrano quanto rapida possa essere l'infiltrazione in tali mezzi acquiferi e quanto basso possa essere l'effetto della degradazione salina, per intrusione marina anche in prossimità della costa, in assenza di prelievi intensi.

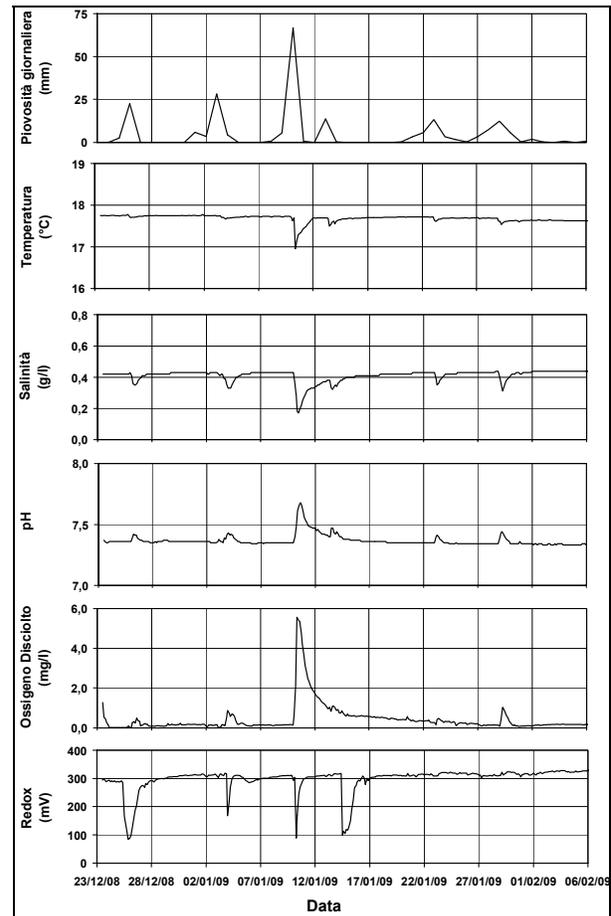


Figura 6. Monitoraggio multiparametrico a di -7.5 m slm.

Figure 6. Multi-parametric measurements at -7.5 m asl.

L'esperienza descritta mostra concretamente quante preziose conoscenze idrogeologiche possono essere acquisite con metodologie sostanzialmente di semplice applicazione, purché applicate con criteri rigorosi e di comprovata affidabilità.

- Cotecchia, V., Daurù, M., Limoni, P.P., Polemio, M., Spizzico, M., Tadolini, T., 1998. Il Controllo Idro-Chimico-fisico della falda idrica carbonatica Murgiano-Salentina (Puglia). Atti del Convegno sulle Acque sotterranee: Risorsa Invisibile, Roma, 43-49.
- Cotecchia, V., Limoni, P.P., Polemio, M., 1999. Identification of typical chemical and physical conditions in Apulian groundwater (Southern Italy) through well multi-parameter logs. 39th IAH Congress, Bratislava, 353-358.
- Cotecchia V., Polemio M., 1998. The hydrogeological survey of Apulian groundwater (Southern Italy): salinization, pollution and over-abstraction. Proc. Int. Conf. on «Hydrology in a changing environment», British Hydrological Society, Exeter, 6-10 July, U.K., II, 129-136.
- Cotecchia, V., Polemio, M., 1999. Apulian groundwater (Southern Italy) salt pollution monitoring network. Flemish Journal of Natural Science, 197-204.
- Cotecchia, V., Polemio, M., Tadolini, T., Spizzico, M., 1996. Hydrogeological problems relating to the construction of an underground metro system in Bari urban and suburban areas. Proc. of 1st International Conference «The Impact of Industry on Groundwater Resources», 215-222.
- Cotecchia, V., Pirastru, E., 1969. Nuove prospettive per la misura nucleare di traccianti stabili (cadmio, boro) nelle acque sotterranee. Geologia Applicata e Idrogeologia, IV, 149-159.
- Cotecchia, V., Tadolini, T., 1993. Problematichè ambientali in Murgia e Salento (Puglia) connesse alla contaminazione progressiva delle acque di falda ad opera dell'ingressione marina. Atti del V Workshop «Clima, Ambiente e Territorio nel Mezzogiorno», 489-501.
- Cotecchia, V., Tadolini, T., Tulipano, L., 1981. Saline contamination phenomena in the karstic and fissured carbonatic aquifer of the Salentine Peninsula (Southern Italy) and their evolution. Proc. of 7th Salt Water Intrusion Meeting, 77-82.
- Cotecchia, V., Tulipano, L., 1993. Caratteristiche fisiche del territorio della provincia di Bari ed alcuni aspetti dell'impatto geo-ambientale indotto dalla urbanizzazione. Atti del Convegno «Area Metropolitana di Bari», CNR-IRIS, 31-45.
- Daurù, M., Limoni, P.P., Spizzico, M., 2002. Le prospezioni multiparametriche nella caratterizzazione degli acquiferi carbonatici, fessurati e carsici. 28° Conv. di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, 109-117.
- Di Fazio, A., 1997. Uso di traccianti in studi sul campo. Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque.
- Drost, W., Klotz, D., Koch, A., Moser, H., Neumaier, F., Rauert, W., 1968. Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes. Water Resources Research, IV (1).
- Fidelibus, M.D., Tulipano, L., 1996. Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of Apulia (Southern Italy). 14th Salt Water Intrusion Meeting, Malmo, Sweden.
- Grassi, D., 1973. Fondamentali aspetti dell'idrogeologia carsica della Murgia (Puglia), con particolare riferimento al versante adriatico. Geologia Applicata e Idrogeologia, VIII (II), 285-313.
- Haley, E., Moser, H., Zellhofer, O., Zuber, A., 1967. Borehole dilution techniques: a critical review. In: Isotope Hydrology, IAEA, Vienna.
- Hazzaa, I.B., 1970. Single-well technique using 32P for determining direction and velocity of groundwater flow. In: Isotope Hydrology, IAEA, Vienna.
- Kaas, W., 1998. Tracing technique in geohydrology. A.A Balkema, 581pp.
- Martinis, B., 1961. Sulla tettonica delle Murge nord-occidentali. Accademia Nazionale dei Lincei, 8, 31pp.
- Mosetti, F., 1961. Misure della velocità di flusso dell'acqua mediante la diffusione di un tracciante. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata, III, 12.
- Pagliarulo, R., Reina, A., Trizzino, R., Valletta, S., 2006. Analisi delle modificazioni al territorio connesse ai siti inquinati in territori urbani (brownfields): il caso dell'ex-Fibronit di Bari. Giornale di Geologia Applicata, 4, 201-205.
- Petrella, E., Falasca, A., Celico, F., 2009. Natural-gradient tracer experiments in epikarst: a test study in the Acqua dei Faggi experimental site, southern Italy. Geofluids, 8 (3), 159-166.
- Pieri, P., 1975. Geologia della città di Bari. Memorie Società Geologica Italiana, 1, 379-407.
- Polemio, M., 1994. I modelli numerici per la previsione degli effetti dell'utilizzo delle acque sotterranee nelle aree urbane soggette all'intrusione marina, il caso di Bari. Acque Sotterranee, 41, 47-58.
- Polemio, M., 2010. Historical floods and a recent extreme rainfall event in the Murgia karstic environment (Southern Italy). Zeitschrift für Geomorphologie, 54 (2), 195-219.
- Polemio, M., Casarano, D., 2008. Climate change, drought and groundwater availability in southern Italy. In: Dragoni W. (ed.) Climate Change and Groundwater. Geological Society, 288, 39-51.
- Polemio, M., Dragone, V., Limoni, P.P., 2006a. Salt contamination of Apulian aquifers: spatial and time trend. Proc. of «1st SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference», 115-121.
- Polemio, M., Casarano, D., Limoni, P.P., 2009a. Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). Natural Hazards and Earth System Sciences, 9(4), 1461-1470.
- Polemio, M., Dragone, V., Limoni, P.P., 2009b. Monitoring and methods to analyse the groundwater quality degradation risk in coastal karstic aquifers (Apulia, Southern Italy), Environmental Geology, 58 (2), 299-312.
- Polemio, M., Dragone, V., Limoni, P.P., 2009c. The piezometric stress in the coastal aquifers of a karstic region (Apulia, Italy). Proc. of Symposium «Trends and Sustainability of Groundwater in Highly Stressed Aquifers», IAHS Publ., 329, 138-144.
- Polemio, M., Limoni, P.P., Mitolo D., Virga R., 2006b. Il degrado qualitativo delle acque sotterranee pugliesi. Giornale di Geologia Applicata, 3, 25-31.
- Polemio, M., Mitolo D., 1998. L'uso dei traccianti nello studio delle acque sotterranee ed esperienze relative alla Puglia. Acque Sotterranee, XV, 9-25.
- Radina, B., 1958. Sui terreni di fondazione della città di Bari. Giornale Genio Civile, 10.
- Ricchetti, G., 1975. Nuovi dati stratigrafici sul Creataceo delle Murge, emersi da indagini nel sottosuolo. Bollettino Società Geologica Italiana, 94, 1083-1108.
- Ricchetti, G., 1980. Contributo alla conoscenza strutturale della Fossa Bradanica e delle Murge. Bollettino Società Geologica Italiana, 99, 421-430.
- Tadolini, T., 1990. Salt concentration cyclic changes in the waters of the salentine karstic aquifer (Puglia, southern Italy). Proc. of 11th Salt Water Intrusion Meeting, 42-54.
- Tazioli, G.S., 1986. Sullo studio degli acquiferi in vista di sfruttamenti per usi civili; Esempi di impiego di tecniche che si basano sull'uso di traccianti artificiali e di isotopi ambientali. Ambiente: Protezione e Risanamento, I.
- Tulipano, L., Fidelibus, M.D., 1984. Geochemical characteristic of Apulian coastal spring water. (Southern Italy) related to mixing processes of ground waters with sea water having different residence time into the aquifer. Proc. of V International Congress of Water Resources Planning and anagement, 2, 55-67.
- Valduga, A., 1965. Contributo alla conoscenza geologica delle Murge baresi. Studi geologici e morfologici della regione pugliese, 1, 26 pp.
- Zeza, F., 1971. Significato geologico e caratteristiche sedimentologiche delle dune e dei depositi di spiaggia fossili tra Bari e Monopoli. Geologia Applicata e Idrogeologia, 6, 1-15.