

L'Indice di Protezione Naturale (IPN): nuovo metodo per la valutazione della vulnerabilità di sorgenti carsiche captate per uso potabile**

Tiziana Di Lorenzo, Paola De Laurentiis e Diana M.P. Galassi*

Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di L'Aquila, Via Vetoio, Coppito, 67100 L'Aquila

* *referente per la corrispondenza (Fax: 0862/433205; diana.galassi@aquila.infn.it)*

** *Ricerca parzialmente finanziata dal Cluster 11B e dal progetto UE-Pascalis (contract n° EVK2-CT-2001-00121-PASCALIS of the Fifth Research and Technological Development Framework Program).*

Pervenuto il 25.11.2002; Accettato il 16.5.2003

Riassunto

Viene proposto un Indice di Protezione Naturale (IPN) per la gestione integrata delle sorgenti carsiche captate ad uso potabile, al fine di garantirne la salvaguardia nell'ambito di un uso sostenibile, sia in termini di potabilità che di conservazione della biodiversità. L'approccio che ne deriva permette una valutazione qualitativa del grado di isolamento naturale di tali tipologie sorgive, sfruttando contemporaneamente il potenziale informativo degli indicatori idrogeologici, microbiologici e biologici, questi ultimi, finora, mai utilizzati nei criteri di salvaguardia delle risorse idriche sotterranee.

L'indice proposto, richiedendo la determinazione a livello specifico delle componenti biologiche del sistema sorgivo, consente anche la valutazione della sua biodiversità, del grado di endemismo e l'individuazione di biotopi di particolare rilevanza. Le potenzialità informative dell'inferenza biologica colmano le lacune di un'analisi, fino ad oggi, esclusivamente fisico-chimica e idrogeologica, mettendo in luce anche gli effetti sul biota, le conseguenze indirette di una contaminazione e gli effetti globali. Come tale, questa metodologia fornisce un vantaggioso ed oggettivo strumento di monitoraggio dei sistemi acquatici sotterranei.

PAROLE CHIAVE: vulnerabilità / acqua sotterranea / stigobionte / stigosseno / sorgenti / IPN / bioindicatori

Abstract

The Self-Protection Index (SPI): a new methodology for the evaluation of vulnerability of karstic springs used for drinking purposes

A Self-Protection Index (SPI) is proposed as a tool for an integrated management of karstic springs used for drinking purpose, in order to guarantee, from a sustainable use viewpoint, their safeguard both in terms of drinkableness and conservation of fauna. The derived approach allows the qualitative evaluation of the degree of natural protection of such spring typologies, by exploiting the informative power inborn in hydrogeological, microbiological, and biological indicators: so far, the latter have never been used in the criteria of protection of groundwater resources.

The proposed index, by identifying the species of the spring communities, leads also to the evaluation of the spring biodiversity, its degree of endemism and the assessment of relevant biotopes. The biological inference fills the gaps of an analysis until now based exclusively on chemical, physical and hydrogeological data and highlights the effects on the biota, the indirect consequences of a contamination and the global pollution effects. As such, it favourably constitutes a useful and objective tool for monitoring groundwater systems.

KEY WORDS: vulnerability / groundwater / stygobiont / stygoxen / springs / SPI / bioindicators

INTRODUZIONE

In Italia, come nella maggior parte dei paesi comunitari, una quantità considerevole dell'acqua destinata ad usi antropici deriva dalla risorsa idrica sotterranea. Le sorgenti, in particolare, vengono attualmente sempre più intensamente sfruttate quali fonti di approvvigionamento idropotabile.

L'esistenza di diverse tipologie sorgive complica l'individuazione delle strategie di salvaguardia: non esistono soluzioni univoche in tal senso, ma ogni metodo acquista una sua validità in relazione alla situazione idrogeologica dell'area, all'antropizzazione del territorio e agli aspetti socio-economici ed ambientali (BERETTA, 1992).

In merito alla conservazione di tali risorse, i decreti legislativi n. 152/99 e 258/00 forniscono disposizioni di carattere generale, individuando tre aree circolari di protezione, distinte in: Zona di Tutela assoluta (ZT) di raggio minimo di 10 m, adibita esclusivamente ad opere di captazione o di presa; Zona di Rispetto (ZR) in cui sono interdette attività particolarmente impattanti (aree cimiteriali, cave, stoccaggio di rifiuti, etc.) e che, in assenza di ulteriori indicazioni specifiche, possiede un raggio minimo di 200 m; Zona di Protezione (ZP) che, in taluni casi, può includere l'intero bacino di ricarica con una vincolistica differenziale in funzione della distanza dal centro del corpo idrico captato. Le metodologie di individuazione delle aree di salvaguardia si basano su criteri geometrico-temporali (protezione statica) e/o idrogeologici (protezione dinamica) e non prevedono l'analisi delle componenti biologiche che vivono in tali ambienti.

Per i sistemi carsici non esistono criteri di salvaguardia ideali; tuttavia la protezione statica (basata sull'individuazione di aree geometriche e/o di isocrone di rispetto) viene spesso preferita a quella dinamica (basata sul rilevamento di parametri idrogeologici) poiché l'elevata velocità del flusso, l'anisotropia dell'acquifero e la limitata capacità di attenuazione del carico inquinante non permettono di disporre di una rete di protezione efficiente intorno alle captazioni. L'infiltrazione rapida di un'acqua superficiale, potenzialmente contaminata, rende spesso irrilevante la capacità di autodepurazione della zona insatura e impraticabili gli interventi di recupero. Una rassegna dettagliata dei problemi relativi alla protezione delle risorse idriche in massicci carsici è riportata da PALOC (1985).

Per la salvaguardia delle sorgenti carsiche, è necessario determinare con sufficiente precisione le modalità di alimentazione della falda, identificando le principali faglie, gli inghiottitoi, le doline e i limiti del bacino (AVDAGOVIC e COROVIC, 1990), evitando di scindere concettualmente la vulnerabilità dell'acquifero a scala locale da quella a scala regionale (BERETTA, 1992), che

risente più della prima della posizione e distribuzione dei macrofenomeni carsici citati.

Scopo del lavoro è proporre un Indice di Protezione Naturale (IPN) che fornisca una valutazione qualitativa del grado di isolamento naturale delle sorgenti carsiche captate e funga da strumento di validazione delle strategie di tutela adottate. L'indice utilizza indicatori idrogeologici, microbiologici, edafici e faunistici, quest'ultimi fino ad oggi mai usati nei criteri di salvaguardia delle risorse idriche ipogee. L'esame della biocenosi ipogea completa il quadro conoscitivo della risorsa, mettendo in luce, in tempi relativamente più brevi, potenziali situazioni di vulnerabilità che richiederebbero invece lunghi approfondimenti analitici e/o idrogeologici (BODON e GAITER, 1995). Quale protocollo di integrazione dei suddetti indicatori, l'IPN funge anche da valido strumento di monitoraggio di integrità ecosistemica.

L'INDICE DI PROTEZIONE NATURALE (IPN)

L'IPN si basa sulla valutazione di dieci indicatori di rischio, ognuno dei quali presenta quattro alternative. Ad ogni alternativa corrisponde un punteggio fisso, da 0 a 3, per il rischio idrogeologico rispettivamente basso, moderato, alto e molto alto (Tab. I). La somma dei dieci punteggi parziali fornisce il valore dell'IPN, che permette di attribuire la sorgente indagata ad una delle quattro classi di Protezione Naturale (PN), così definite:

Classe A (0-4): PN elevata e bassa vulnerabilità per infiltrazione; è sufficiente una protezione statica con applicazione del solo criterio geometrico;

Classe B (5-14): PN discreta e vulnerabilità per infiltrazione limitata; è sufficiente una protezione statica con applicazione di criteri geometrico-temporali;

Classe C (15-24): PN bassa e vulnerabilità per infiltrazione elevata; è necessario integrare la protezione statica con criteri di protezione dinamica;

Classe D (25-30): PN molto bassa e vulnerabilità per infiltrazione assai elevata; la protezione più idonea è di tipo dinamico con applicazione dei criteri idrogeologici estesi all'intero bacino di ricarica.

Il numero di punti totali da distribuire tra le 4 classi è pari a 31 (3 x 10, più il punto 0). Alle classi intermedie (B e C) è stata data un'ampiezza maggiore (10 punti ciascuna) rispetto alle classi A e D (rispettivamente 5 e 6 punti), allo scopo di evitare l'attribuzione di molte sorgenti alla classe A, per la quale è prevista solo una debole vincolistica di protezione, oppure alla classe D, che prevede criteri di protezione molto severi, spesso non sostenibili in contesti territoriali ad elevata urbanizzazione. Per ovvie ragioni matematiche, le classi A e D non possono avere lo stesso punteggio e per tale motivo si è deciso di assegnare meno punti (5) alla

classe A rispetto alla classe D (6 punti), allo scopo di minimizzare il rischio di attribuzione di una sorgente alla classe che prevede la più bassa vincolistica di protezione. L'indice è applicabile esclusivamente a sorgenti carsiche captate per uso potabile le cui opere di presa siano costruite in modo da escludere gli apporti idrici superficiali.

MATERIALI E METODI

Allo scopo di rendere i dati confrontabili, il protocollo proposto prevede tre campionamenti faunistici e tre microbiologici nell'arco dell'anno solare, coinci-

dentì con le condizioni di piena, magra e morbida dell'acquifero. Qualora possibile, è consigliabile eseguire altri tre campionamenti in concomitanza con eventi di precipitazione piovosa di particolare intensità. L'opera di presa di sorgenti minori (portata media dell'ordine di decine di L/s), consiste generalmente in una o due vasche di decantazione, di dimensione variabile da sorgente a sorgente, collocate molto vicine alla scaturigine. In questo caso i prelievi faunistici vanno effettuati dragando il fondo delle vasche con un retino a maglie di 60 µm (un campionamento efficace, tarato su vasche di dimensioni un metro per un metro, ha una

Tab. I. Indice di Protezione Naturale (IPN) e relative classi. (P = punteggio assegnato agli stati di ciascun indicatore; S.O. = sostanza organica).

INDICATORE	P	INDICATORE	P
Uso del suolo adiacente alla captazione		Andamento dei coliformi fecali (CF)	
Non antropizzato	0	Assenti	0
A coltivazioni orticole	1	Saltuariamente presenti, CF < (100 UFC/ 100 ml)	1
A pascolo	2	Saltuariamente presenti, CF > (100 UFC/ 100 ml)	2
Urbano ed industriale; agricoltura intensiva	3	Sempre presenti, CF > (100 UFC/ 100 ml)	3
Conformazione geologica della zona adiacente alla captazione		Andamento degli streptococchi fecali (SF)	
Alluvionale a grana minuta	0	Assenti	0
Alluvionale a grana grossa	1	Saltuariamente presenti, SF < (100 UFC/ 100 ml)	1
Fessurata	2	Saltuariamente presenti, SF > (100 UFC/ 100 ml)	2
Carsica	3	Sempre presenti, SF > (100 UFC/ 100 ml)	3
Andamento della temperatura dell'acqua		Frequenza di invertebrati stigosseni	
Deboli fluttuazioni (± 0.01°C)	0	Assenti	0
Fluttuazioni stagionali (± 0.1 °C)	1	Presenti in 1/3 dei replicati annuali	1
Fluttuazioni mensili (± 1 °C)	2	Presenti in 2/3 dei replicati annuali	2
Fluttuazioni giornaliere	3	Sempre presenti	3
Andamento della portata		Indice R	
Costante durante tutto l'anno	0	R = 0	0
Variabile con picchi non coincidenti con gli eventi piovosi	1	R < 1	1
Variabile con picchi coincidenti con gli eventi piovosi	2	R = 1	2
Brusche variazioni giornaliere	3	R > 1	3
Tempo di dimezzamento della portata max annua (Td)		Analisi del sedimento	
Td > 50 giorni (g)	0	S.O. totalmente mineralizzata	0
20 g < Td < 50 g	1	S.O. fortemente decomposta	1
5 g < Td < 20 g	2	S.O. debolmente decomposta	2
Td < 5 g	3	S.O. non decomposta (riconoscibili pezzi di legno, foglie, etc.)	3
Classe	IPN	Giudizio	
A	0-4	PN elevata e bassa vulnerabilità per infiltrazione: sufficiente una protezione statica con applicazione del solo criterio geometrico.	
B	5-14	PN discreta e vulnerabilità per infiltrazione limitata: sufficiente una protezione statica con applicazione dei criteri geometrico-temporali.	
C	15-24	PN bassa e vulnerabilità per infiltrazione elevata: è necessario integrare la protezione statica con criteri di protezione dinamica.	
D	25-30	PN molto bassa e vulnerabilità per infiltrazione molto elevata: la protezione più idonea è di tipo dinamico con applicazione dei criteri idrogeologici.	

durata di circa 10 minuti). Il sedimento inorganico raccolto comprenderà prevalentemente sabbie e ghiaie di piccole dimensioni e argille. In sorgenti più produttive (portata media dell'ordine di centinaia di L/s), l'opera di presa consta spesso di una galleria di convogliamento in cui l'acqua scorre rapidamente, a volte per molti metri, prima di arrivare nelle vasche. La galleria è solitamente agibile per consentire la manutenzione della struttura di presa. In questo caso l'operatore effettuerà una raccolta in modalità epi/inbentonica con un retino immanicato procedendo in senso contrario alla corrente, su un transetto ideale obliquo che vada dal punto di ingresso in galleria fino alla scaturigine. Vanno campionate tutte le diverse tipologie di sedimento: accumuli di sabbia fine e argille, depositi di ghiaie e sabbia grossolana, depositi di ghiaia su substrato litoido, accumuli di sabbia fine e argille su roccia calcarea fratturata, etc. Allo scopo di integrare i dati biologici, è consigliabile eseguire catture del drift sorgivo, principalmente nella fase iniziale del periodo di piena dell'acquifero, mediante l'uso di una rete tarata a 60 µm, posta controcorrente e di fronte alla scaturigine principale della sorgente. Il materiale raccolto viene fissato *in situ* con formalina (concentrazione finale pari al 7%) o con alcool (concentrazione finale pari all'80%). In laboratorio si procede, con l'ausilio di uno stereomicroscopio, allo smistamento della componente biologica che viene successivamente conservata in alcool etilico al 70%. Gli organismi animali vengono successivamente identificati a livello specifico allo scopo di aumentare la congruenza delle correlazioni osservate tra variabili biologiche e variabili ambientali (GALASSI *et al.*, 2001).

La bassa ricchezza specifica e l'assenza di ridondanza funzionale descritta dalla strategia cenotica di tipo *i* (BLANDIN *et al.*, 1976) sono caratteristiche proprie delle comunità ipogee, spesso costituite in maniera prevalente da un'unica taxocenosi che può quindi essere utilizzata quale gruppo focale (HAMMOND, 1995), in sostituzione del più complesso approccio biocenotico.

Descrizione degli indicatori (Tab. I)

Uso del suolo adiacente alla captazione

Le informazioni relative a tale indicatore sono desumibili da una carta di uso del suolo e da ricognizioni in campo. Un'area non antropizzata presenta un basso livello di rischio (P=0) e la presenza di piccoli appezzamenti orticoli, mantenuti con pratiche di agricoltura biologica, non aumenta significativamente il rischio della sorgente (P=1). Il pascolo, invece, comporta sempre una contaminazione fecale, che finisce inevitabilmente per interessare il sistema sorgivo (P=2). La

presenza di infrastrutture turistiche, di aree ad agricoltura intensiva, di zone industriali e/o di centri densamente abitati, sottopone il recapito ad un rischio elevato (P=3) (NOTENBOOM, 1999).

Conformazione geologica della zona adiacente alla captazione

Le informazioni relative sono desumibili da una carta geologica. La vicinanza con il recapito e la circolazione in *facies* carsica (P=3) o fessurata (P=2) riducono il tempo di sicurezza ed aumentano la vulnerabilità (CIVITA, 1994). D'altra parte, la presenza di una copertura a grana minuta (P=0) o grossolana (P=1), anche esigua, rallenta la discesa gravitativa del contaminante idroveicolato o fluente in fase a sé nella zona insatura, con il conseguente aumento del tempo di sicurezza (RHESE, 1977).

Andamento della temperatura dell'acqua

L'analisi dell'andamento termico del flusso sotterraneo fornisce informazioni qualitative sulla profondità di scorrimento dell'acqua nel tratto terminale del circuito. Nei sistemi carsici, i profili termici del flusso idrico sono spesso stati utilizzati per definire la circolazione dell'acqua (WILLIAMS *et al.*, 1984), per studiare la geometria delle reti di fratture (TRAINER, 1968) e per individuare le modalità di migrazione dei contaminanti (WILLIAMS e CONGER, 1990). Brusche anomalie dell'andamento termico indicano una veloce infiltrazione dell'acqua di precipitazione a temperatura diversa da quella sotterranea ma possono anche essere indice di un evento di contaminazione pregresso (MALARD e CHAPPUIS, 1995). In generale, un'acqua che scorre a profondità maggiori risentirà, dal punto di vista termico, dei soli cambiamenti climatici su grande scala (P=0), mentre la temperatura di un'acqua che scorre a profondità minori varierà in funzione delle escursioni termiche stagionali (P=1), mensili (P=2) o addirittura giornaliere (P=3) (CASTANY, 1982).

Andamento della portata

Dall'analisi dell'idrogramma e dal confronto con l'udrogramma del bacino di pertinenza, è possibile verificare l'eventuale occorrenza di apporti più o meno rapidi (P=3; P=2) di acqua di superficie o comunque prossimi al punto di emergenza o, in alternativa, un ottimo isolamento del flusso sotterraneo dall'infiltrazione superficiale (P=1; P=0).

Tempo di dimezzamento della portata massima annua (Td)

Il *Td* è inversamente proporzionale alla velocità di svuotamento della parte più permeabile del serbatoio acquifero e, quindi, alla velocità di arrivo di un conta-

minante idroveicolato (CIVITA, 1988). *Td* bassi indicano un transito veloce ed un limitato potenziale di abbattimento del carico inquinante ($P=3$; $P=2$); *Td* elevati indicano che l'ubicazione delle vie di infiltrazione efficace non è prossima al recapito o che tali vie sono di modesta entità ($P=1$; $P=0$).

Andamento dei coliformi fecali (CF) e degli streptococchi fecali (SF)

I coliformi fecali (CF) e gli streptococchi fecali (SF) si sono consolidati fra i più sicuri e pratici indicatori di inquinamento fecale (BALDINI e GAITER, 1990). In ambiente sotterraneo, gli SF sopravvivono probabilmente più a lungo rispetto ai CF e perciò possono indicare una fonte di inquinamento più distante dalla sorgente (McFETERS *et al.*, 1974), pertanto sono stati considerati indicatori distinti. Il movimento potenziale dei contaminanti batterici nelle rocce calcaree (fessurate e/o carsificate) è più elevato che in ogni altra conformazione geologica (MALARD *et al.*, 1994c). Infatti, mentre in una conformazione a grana minuta o grossolana, il rinvenimento all'emergenza dei batteri fecali, che rimangono intrappolati per lo più nella matrice porosa, sarà costante nel tempo e/o di scarsa entità ($P=0$; $P=1$), in una roccia fessurata o carsificata, esso varierà molto in funzione dell'ubicazione e densità delle vie preferenziali di infiltrazione efficace e delle dimensioni delle condotte trasmissive ($P=2$; $P=3$).

Frequenza di invertebrati stigosseni

Le sorgenti naturali, in quanto ambienti ecotonali, ospitano biocenosi animali composte da organismi acquatici sotterranei *sensu stricto* (stigobionti), da organismi che presentano affinità per l'ambiente sotterraneo anche se non sono esclusivi di questo (stigofili), da organismi che non hanno alcuna elettività per gli habitat ipogei e vi giungono solo accidentalmente (stigosseni) e da organismi che vivono permanentemente o temporaneamente in acque sorgive (crenobionti, crenofili, crenosseni) (BOTOSANEANU, 1998). L'assemblaggio biocenotico è sempre estremamente eterogeneo comprendendo platelminti turbellari, nematodi, rotiferi, molluschi, anellidi, tardigradi, artropodi crostacei, acari e insetti (larve), limitando l'elenco ai gruppi animali più rappresentati in tali ambienti (GALASSI *et al.*, 2001). La captazione, di regola, determina la perdita di ogni caratteristica ecotonale (alterazione della biocenosi e perdita delle componenti crenali) a causa dell'isolamento del punto di emergenza dall'ambiente esterno (DI LORENZO e GALASSI, 2001). In tali condizioni, gli organismi stigobionti possono essere rinvenuti in sorgenti carsiche captate (BODON e GAITER, 1995), rappresentando la categoria ecologica dominante.

In un simile ambiente denaturalizzato, la biodiversità rappresenta un utile strumento di monitoraggio, essendo elemento di integrazione spaziale e temporale di fattori storici ed ecologici, nonché geologici, vegetazionali e climatici (WILLIAMS, 1991; GALASSI *et al.*, 2001). In particolare lo studio della fauna fornisce indicazioni sul grado di isolamento naturale della sorgente e quindi sulla sua vulnerabilità per infiltrazione (DI LORENZO *et al.*, 2002), nonché sull'origine dell'acqua che raggiunge il recapito (MÖSSLACHER e NOTENBOOM, 1999). Ad esempio, un quadro faunistico dominato da saprofiti di superficie quali oligocheti tubificidi e larve di ditteri chironomidi è solitamente indizio di apporti inquinanti o comunque di arricchimento di sostanze organiche (BODON e GAITER, 1995; MALARD, 2000); per contro, la ricchezza in specie stigobionti è in intima relazione con l'estensione del bacino di alimentazione e con l'isolamento del reticolo sotterraneo (ROUCH, 1986; MALARD *et al.*, 1996). La scomparsa della componente stigobia è spesso indice di contaminazione (BALDINI e GAITER, 1990; POULSON, 1992; MALARD *et al.*, 1994b; MALARD *et al.*, 1996; MÖSSLACHER e NOTENBOOM, 1999; MÖSSLACHER *et al.*, 2001), mentre la sua graduale ricomparsa permette di evidenziare l'inizio del recupero che nessuna analisi chimica sarebbe in grado di rilevare. La presenza di fauna esogena in sistemi sotterranei è in relazione con infiltrazioni superficiali (MALARD *et al.*, 1996; MALARD, 2000; MÖSSLACHER *et al.*, 2001) e, in particolare, con la densità di vie preferenziali di infiltrazione efficace e con la loro distanza dalla sorgente (DI LORENZO e GALASSI, 2001). La probabilità che gli stigosseni riescano ad insediarsi stabilmente anche in falda è teoricamente molto bassa, sia per la marcata oligotrofia dell'ambiente ipogeo, sia per il loro minor successo adattativo in ambiente sotterraneo (DANIELOPOL e ROUCH, 1991; GIBERT *et al.*, 1994). Una volta entrati, se le condizioni lo permettono, essi possono tuttavia competere per le risorse con gli autoctoni stigobionti e, possedendo cicli ontogenetici più brevi e tassi di fecondità più elevati, li possono sostituire progressivamente nella struttura biocenotica (DI LORENZO e GALASSI, 2001).

Essendo ubiquitari ed abbondanti in ambiente superficiale, gli stigosseni riescono a sfuggire all'effetto di diluizione-dispersione-depurazione del mezzo acquifero e superano, in tal modo, l'efficienza degli indicatori abiotici (MÖSSLACHER e NOTENBOOM, 1999).

L'assenza di stigosseni o l'occasionalità del loro rinvenimento indicano un buon grado di isolamento ($P=0$; $P=1$), mentre la loro presenza consistente, sporadica o continua, indica un'elevata vulnerabilità ($P=2$; $P=3$).

Sebbene non sia possibile aprioristicamente colloca-

re un taxon di rango superiore alla specie in una delle categorie ecologiche (stigossemi, stigofili, stigobionti), in linea generale, nelle acque sotterranee italiane, la maggior parte delle specie stigossemi si riscontra tra Insecta (larve), Crustacea (Cladocera, Amphipoda Gammaridae), alcuni Annelida Oligochaeta; la maggior parte degli stigobionti tra i Crustacea Copepoda Harpacticoida (Ameiridae, Parastenocarididae e molti Canthocamptidae), Cyclopoida (Cyclopidae dei generi *Diacyclops*, *Speocyclops*, *Graeteriella*), Crustacea Isopoda (prev. *Proasellus*), Crustacea Amphipoda (prev. gruppo *Niphargus*), Crustacea Ostracoda (prev. Candoninae) e Mollusca Gastropoda (prev. Hydrobioidea).

Indice R (Rapporto tra categorie ecologiche)

L'indice R incorpora sia il numero di specie stigobionti-stigofile-stigossemi sia il numero totale di individui per ciascuna specie attribuibile ad ognuna delle categorie ecologiche suddette. Per ogni campionamento viene computato un R* (parziale) mentre R richiesto dall'indice è mediato sui tre (o sei) replicati. L'indicatore R pesa le *i* presenze/assenze degli stigossemi in una data comunità, esaltando o mitigando l'informazione dell'indicatore precedente che non rivela il grado di alterazione della biocenosi ipogea. L'entità di questa variazione strutturale è parametrizzata nella seguente formula:

$$R = \sum_i p_i / (\sum_z p_z + \sum_x p_x) \text{ dove:}$$

p_i = n. individui della specie stigossemi "i", per $i = 1, \dots, n$;

p_z = n. individui della specie stigobionte "z", per $z = 1, \dots, m$;

p_x = n. individui della specie stigofila "x", per $x = 1, \dots, q$.

Poiché i campioni faunistici vanno prelevati in ambiente sorgivo captato e isolato dalle acque superficiali, vale l'ipotesi nulla che

$$\sum_z p_z + \sum_x p_x \neq 0 \text{ (biocenosi ipogea).}$$

L'indicatore R può assumere pertanto i seguenti valori:

$$\begin{array}{ll} R = 0 & \text{se } \sum_i p_i = 0 \\ 0 < R < 1 & \text{se } \sum_i p_i < \sum_z p_z + \sum_x p_x \\ R = 1 & \text{se } \sum_i p_i = \sum_z p_z + \sum_x p_x \\ R > 1 & \text{se } \sum_i p_i > \sum_z p_z + \sum_x p_x \end{array}$$

$R = 0$ (assenza di stigossemi) indica la situazione più favorevole ($P=0$), mentre $R > 1$ (dominanza di fauna esogena nella struttura della biocenosi sotterranea) indica la più compromessa ($P=3$). $0 < R < 1$ e $R = 1$ sono indicativi di condizioni di isolamento intermedio ($P=1$ e $P=2$ rispettivamente).

Analisi del sedimento

L'esame della componente organica raccolta all'interno della captazione può rivelare utili informazioni su

eventuali contaminazioni in atto o pregresse nonché sulla provenienza del materiale organico. Un sedimento povero di detrito organico si presenta in genere di un colore chiaro ed indica il forte isolamento del sistema idrico sotterraneo da apporti di superficie (BODON e GAITER, 1995). La presenza di sostanza organica fortemente decomposta rivela tempi di transito molto lunghi e bassa vulnerabilità ($P=0$; $P=1$). Un detrito organico abbondante e poco o per nulla decomposto indica l'alta vulnerabilità dell'ultimo tratto del circuito sotterraneo a causa dello scarso isolamento del manufatto o del non sufficiente approfondimento della captazione ($P=2$; $P=3$).

CASI DI STUDIO: SORGENTI CARSICHE DI PETTORANO SUL GIZIO, BUGNARA E PREZZA

Le sorgenti indagate

L'IPN è stato applicato a tre sorgenti carsiche captate a scopo potabile della provincia di L'Aquila (Abruzzo): Pettorano sul Gizio (P.s.G.), Bugnara (B.) e Prezza (Pr.).

La sorgente di P.s.G. (portata media annua di circa 450 L/sec) è il recapito principale della subunità idrogeologica M. Genzana (unità idrogeologica M. Genzana-M. Greco; estensione dell'acquifero 130 Km²). Le acque sorgive sono quasi immediatamente captate: dapprima in sotterraneo, per usi potabili, dai comuni di Sulmona e Pettorano e quindi dall'Enel (SALVATI, 1996). L'idrogramma non evidenzia brusche variazioni in concomitanza con eventi di precipitazione, pertanto la sorgente non sembra risentire delle variazioni climatiche stagionali.

La sorgente di B. (portata di 15,8 L/sec) è utilizzata per l'approvvigionamento idrico dei comuni di Bugnara e Prezza. La sorgente di Pr., collocata a circa 15 m dalla prima, presenta una portata non molto inferiore a quella di B. Entrambe appartengono ad un gruppo di 9 sorgenti minori probabilmente alimentate dalle coltri detritiche addossate al versante settentrionale del Genzana (SALVATI, 1996) e interpretate da CELICO *et al.* (1980) quali emergenze di un'aliquota delle acque del M. Genzana perse attraverso dislocazioni tettoniche.

Uso dell'area adiacente alla captazione e conformazione geologica della zona di captazione

L'opera di captazione della sorgente di P.s.G. consiste in un lungo tunnel scavato nella roccia carbonatica, coibentato in bitume e terra e terminante in due vasche di decantazione. La copertura dell'acquifero in questa zona è esigua, essendo lo spessore di suolo sormontante la roccia carbonatica assai modesto. La ZR è trapezoidale con il lato maggiore di circa 200 m. L'area immediatamente a monte della captazione non è

antropizzata (Tab. II) e si trova nel comprensorio della Riserva Naturale Guidata “Monte Genzana e Alto Gizio”.

L’opera di captazione di B. consiste in un casotto di cemento in cui trovano collocazione due piccole vasche di decantazione; la coibentazione in cemento è insufficiente. La captazione di Pr. consta di un piccolo tunnel terminante in un’unica vasca di decantazione; la coibentazione è in cemento e rocce a vista ed è comunque del tutto insufficiente a garantire l’isolamento della sorgente: l’infiltrazione è evidente in tutti i periodi dell’anno. La coltre detritica che sormonta le captazioni presenta uno spessore modesto. La ZR delle due sorgenti è unica, ma la recinzione non è continua e la distanza della stessa dalle emergenze è inferiore ai 200 m obbligatori per legge. A monte delle sorgenti ed immediatamente dietro la recinzione della ZR, il terreno è sfruttato a pascolo nel periodo primaverile ed estivo (Tab. II).

Andamento della temperatura e delle portate

L’andamento termico della sorgente di P.s.G. è caratterizzato da variazioni mensili dell’ordine del centesimo di °C, mentre le temperature dell’acqua di B. e Pr. variano stagionalmente in termini del decimo di °C (Fig. 1). In entrambi i casi le variazioni termiche non sono tali da far pensare ad un evento di contaminazione. L’idrogramma di P.s.G. presenta un massimo nel periodo tardo primaverile-estivo e un minimo in quello tardo autunnale-invernale. È probabile che il regime idrico di Pr. e B. risenta in misura maggiore degli eventi di precipitazione. Per tale motivo è sembrato opportuno assegnare il punteggio 2 ad entrambe le sorgenti, nell’attesa di compiere indagini più accurate.

Tempo di dimezzamento della portata massima annua (Td)

Il Td delle sorgenti indagate risulta superiore ai 50 giorni.

Tab. II. Punteggi IPN delle sorgenti di Bugnara (B.), Prezza (Pr.) e Pettorano sul Gizio (P.S.G.).

INDICATORE	P	B	Pr	PsG	INDICATORE	P	B	Pr	PsG
Uso del suolo adiacente alla captazione					Andamento dei coliformi fecali (CF)				
Non antropizzato	0				Assenti	0			
A coltivazioni orticole	1				Saltuariamente presenti, CF < (100 UFC/ 100 ml)	1			
A pascolo	2	2	2	0	Saltuariamente presenti, CF > (100 UFC/ 100 ml)	2	2	0	0
Urbano ed industriale; agricoltura intensiva	3				Sempre presenti, CF > (100 UFC/ 100 ml)	3			
Conformazione geologica della zona adiacente alla captazione					Andamento degli streptococchi fecali (SF)				
Alluvionale a grana minuta	0				Assenti	0			
Alluvionale a grana grossa	1	3	3	3	Saltuariamente presenti, SF < (100 UFC/ 100 ml)	1	2	2	0
Fessurata	2				Saltuariamente presenti, SF > (100 UFC/ 100 ml)	2			
Carsica	3				Sempre presenti, SF > (100 UFC/ 100 ml)	3			
Andamento della temperatura dell'acqua					Frequenza di fauna stigossena				
Deboli fluttuazioni (± 0.01 °C)	0				Assenti	0			
Fluttuazioni stagionali (± 0.1 °C)	1	1	1	0	Presenti in 1/3 dei replicati annuali	1	2	3	0
Fluttuazioni mensili (± 1 °C)	2				Presenti in 2/3 dei replicati annuali	2			
Fluttuazioni giornaliere	3				Sempre presenti	3			
Andamento della portata					Indice R				
Costante durante tutto l'anno	0				R = 0	0			
Variabile con picchi non coincidenti con gli eventi piovosi	1	2	2	1	R < 1	1	1	3	0
Variabile con picchi coincidenti con gli eventi piovosi	2				R = 1	2			
Brusche variazioni giornaliere	3				R > 1	3			
Tempo di dimezzamento della portata max annua (Td)					Analisi del sedimento				
Td > 50 giorni (g)	0				S.O. totalmente mineralizzata	0			
20 g < Td < 50 g	1	0	0	0	S.O. fortemente decomposta	1	2	3	0
5 g < Td < 20 g	2				S.O. debolmente decomposta	2			
Td < 5 g	3				S.O. non decomposta (riconoscibili pezzi di legno, foglie , etc.)	3			

	Punteggio totale	Classe di protezione naturale
Bugnara	17	C
Prezza	19	C
Pettorano sul Gizio	4	A

Andamento dei CF e degli SF

L'acqua della sorgente di P.s.G. è batteriologicamente pura. B. presenta andamenti di coliformi molto variabili durante il periodo di campionamento; Pr. è caratterizzata da un andamento più costante e da concentrazioni (UFC/100 ml) inferiori (Fig. 2). È pertanto probabile che, nonostante la stretta vicinanza fisica delle due sorgenti, esse abbiano una diversa alimentazione, e che il sito di contaminazione sia fisicamente più vicino a B. che a Pr. ($CF/SF = 0,94$ di B. contro $CF/SF = 0$ di Pr.); in quest'ultimo caso, infatti, solo gli SF, che sopravvivono più a lungo, raggiungono l'emergenza.

Frequenza di fauna stigossena

I crostacei copepodi (Crustacea: Copepoda), il gruppo animale predominante in ambiente acquatico sotterraneo, sono risultati il gruppo focale delle biocenosi indagate, rappresentando in ogni sorgente più dell'80% degli individui totali raccolti in ogni singolo campionamento. Per tale motivo si è potuto sostituire un approccio taxocenotico ad uno biocenotico, mantenendo lo stesso livello di informazioni. La taxocenosi a copepodi di B. presenta chiari sintomi di alterazione, essendo costituita da una bassa percentuale di copepodi stigobionti (Fig. 3); gli stigosseni inoltre compaiono in 5 campionamenti sui 6 effettuati. Tuttavia la fauna esogena non si è del tutto sostituita a quella autoctona nella dinamica della taxocenosi, come invece avviene a Pr. (Fig. 3) in cui gli stigosseni compaiono in sei campionamenti su sei e in abbondanze di gran lunga superiori agli stigobionti. Diversa è la situazione della sorgente di P.s.G. che ospita esclusivamente copepodi stigobionti (Fig. 3); gli stigosseni sono completamente assenti nei sei campionamenti effettuati.

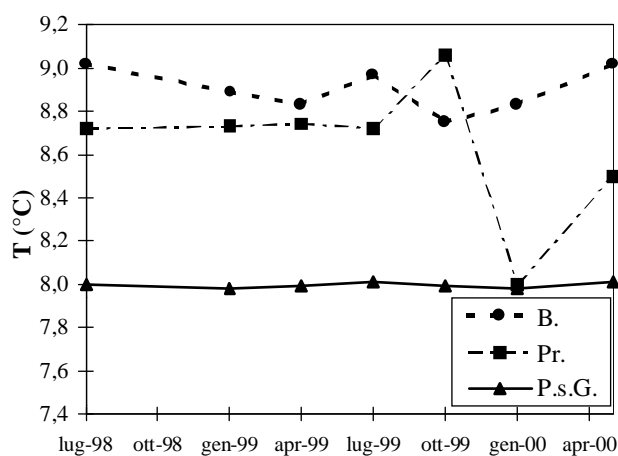


Fig. 1. Andamento della temperatura delle acque delle sorgenti di Bugnara (B.), Prezza (Pr.) e Pettorano sul Gizio (P.s.G.) nei periodi di indagine.

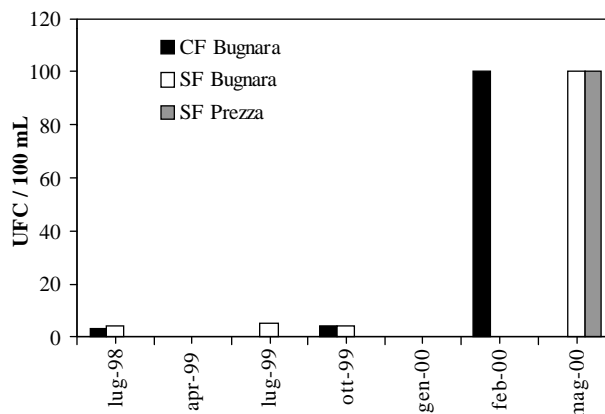


Fig. 2. Andamento annuale delle concentrazioni (UFC/100 mL) di coliformi fecali (CF) e streptococchi fecali (SF) nelle sorgenti di Bugnara e Prezza.

Indicizzazione delle frequenze osservate

La sorgente di B. presenta un $R < 1$ (alterazione biocenotica modesta e probabilmente recente); la sorgente di Pr. è caratterizzata da un $R > 1$ (alterazione biocenotica intensa e piuttosto remota); la sorgente di P.s.G. presenta un $R = 0$ (integrità biocenotica).

Analisi del sedimento

La sostanza organica rinvenuta in P.s.G. è poco abbondante e fortemente decomposta (Tab. II), mentre a B. è di piccole dimensioni e discretamente decomposta, per la maggior parte di natura vegetale con grande abbondanza di semi (Tab. II). A Pr. la sostanza organica è debolmente decomposta e costituita da foglie ed elementi legnosi di piccole dimensioni, semi, esuvie e funghi.

Risultati

La sorgente di P.s.G. è stata attribuita alla classe A (IPN=4), la sorgente di Pr. alla classe C (IPN=19), la sorgente di B. alla classe C (IPN=17).

CONCLUSIONI

L'inferenza biologica è stata sporadicamente saggiata in ambienti idrici ipogei sebbene non esista ancora una legislazione che ne regolamenti l'utilizzo nel campo del monitoraggio (WILLIAMS, 1991; POULSON, 1992; MALARD *et al.*, 1994a; MÖSSLACHER e NOTENBOOM, 1999). La totale esclusione del biota, sia dalle finalità di salvaguardia che dall'utilizzo quale indicatore di qualità delle acque sotterranee, costituisce una carenza della legge italiana, che in questo modo sottovaluta il considerevole valore strumentale della biodiversità degli ecosistemi ipogei.

Nel caso di sorgenti carsiche captate per uso potabile, è necessario un confronto continuativo di infor-

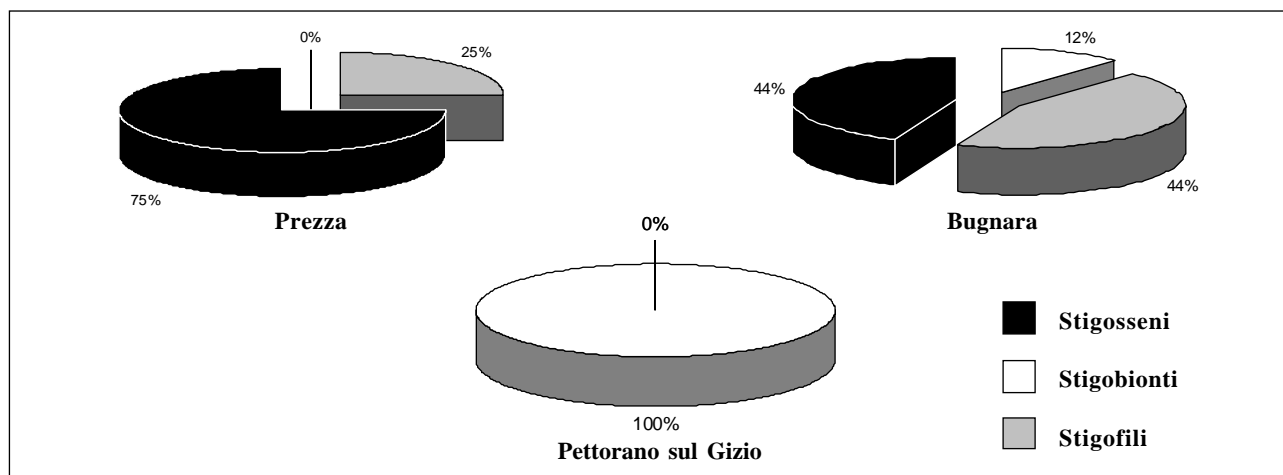


Fig. 3. Rappresentatività (espressa in %) delle tre categorie ecologiche (stigosseni, stigofili, stigobionti) di crostacei copepodi presenti nelle sorgenti captate indagate.

mazioni desunte da indicatori diversi (idrogeologici, geologici, microbiologici e biologici) al fine di giungere ad una valutazione più ponderata del grado di protezione naturale. Su tali basi nasce l'IPN che, oltre a convalidare le strategie di protezione attualmente adottate per le sorgenti carsiche captate, possiede il vantaggio di garantire la loro salvaguardia sia in termini di potabilità che di conservazione faunistica, nell'ottica di un uso sostenibile di tali risorse. Il protocollo operativo proposto in questa sede necessita di una procedura di validazione in altri comprensori territoriali, allo scopo di verificare la validità dell'indice su scala nazionale e di consentire un migliore assestamento degli stati di ciascun parametro-indicatore, stabiliti in questa sede in via preliminare. Utilizzando per la prima volta la biodiversità acquatica sotterranea quale indicatore, l'IPN presenta importanti ripercussioni in chiave conservazionistica, permettendo l'individuazione di biotopi di particolare rilevanza attraverso una stima della ricchezza specifica, dei dati di distribuzione zoogeografica, del livello di endemismo e dell'antichità faunistica (GALASSI, 2002).

Su tali basi la sorgente di P.s.G., caratterizzata da un elevato numero di specie attualmente nuove per la scienza e tuttora in corso di descrizione (*Pseudectinosoma* sp., *Nitocrella* sp. e *Parastenocaris* sp.) e da una consistente dispersione tassonomica della diversità (le specie che compongono la comunità sotterranea ap-

partengono a categorie tassonomiche di rango superiore distinte nello spazio filogenetico), sarebbe a tutti gli effetti da considerare biotopo sotterraneo di particolare interesse. Tra le nuove specie, tutte di antica origine sia dulciacquicola che marina, *Pseudectinosoma* sp. costituisce un fossile vivente, relitto distribuzionale e/o filetico di una fauna marina oggi scomparsa dagli habitat plesiotipici e a distribuzione disgiunta nelle acque sotterranee continentali (GALASSI *et al.*, 1999; GALASSI, 2001).

Nello sfruttare l'inferenza biologica, l'IPN colma le lacune di un approccio esclusivamente chimico-fisico-idrogeologico, mettendo in luce gli effetti sul biota, le conseguenze indirette e gli effetti globali di eventi di contaminazione e come tale, al di là delle informazioni dirette relative al livello di protezione naturale delle sorgenti carsiche, l'indice può anche vantaggiosamente fornire un primo strumento di monitoraggio integrato di sistemi idrici sotterranei.

Ringraziamenti

La fase istruttoria della ricerca ha fatto parte di un progetto di collaborazione con l'A.S.L. Sulmona-Avezzano. Le dr.sse R. Cassiani e T. Tolone (A.S.L. Sulmona-Avezzano) hanno gentilmente messo a disposizione i dati microbiologici conseguiti e agevolato il campionamento per l'intero periodo della ricerca. Si ringraziano i comuni di Bugnara e di Prezza e il Consorzio Acquedottistico di Sulmona. Questa ricerca è stata parzialmente presentata all'XVI International Symposium of Biospeleology, Verona (2002).

Bibliografia

AVDAGOVIC I., COROVIC A., 1990. Defining of protective zones of karst mountainous springs. In: *Water Resources in Mountainous Regions*, XIIInd Congress of I.A.H.-A.I.H., Memories,

part 2, 27 August-1 September, Lousanne.

BALDINI I., GAITER S., 1990. Possibili metodologie di valutazione della vulnerabilità delle acque sorgive e proposte preliminari

- per la formulazione di gradienti di rischio igienico. In: Atti Meeting int. *Acque minerali naturali*, maggio 1990, Pisa. Riv. Ital. Ig., **5-6**: 232-246.
- BERETTA G. P., 1992. La prevenzione degli inquinamenti a scala locale: le aree di salvaguardia delle opere di captazione. In: *Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee. Tecniche per lo studio e la progettazione degli interventi di prevenzione, controllo, bonifica e recupero*. Pitagora Editrice Bologna: 561-622.
- BLANDIN P., BARBAULT R., LECORDIER C., 1976. Réflexions sur la notion d'écosystème: Le concept de stratégie cénotique. *Bull. Ecol.*, **7** (4): 391-410.
- BODON M., GAITER S., 1995. Nuovi criteri di valutazione, basati sulla componente biologica, per le captazioni di acqua destinata al consumo umano. *Igiene ambientale*, **1**: 5-17.
- BOTOSANEANU L., 1998. *Studies in Crenobiology. The biology of springs and springsbrooks*. Backhuys Publishers, Leiden, 261 pp.
- CASTANY G., 1982. *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod Université, Paris, 238 pp.
- CELICO P., BARTOLOMEI C., PECORAIO A., 1980. Rapporti tra struttura ed idrogeologia in alcuni massicci carsici dell'Abruzzo: risultati di alcune indagini geognostiche. *Boll. Soc. Natur.*, Napoli: 89.
- CIVITA M., 1988. Una metodologia per la definizione ed il dimensionamento delle aree di salvaguardia delle opere di presa delle sorgenti normali. *Boll. Ass. Mineraria*, **25** (4): 423-440.
- CIVITA M., 1994. Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica. *Quaderni di tecniche di protezione ambientale*. Pitagora Ed., Bologna.
- DANIELOPOL D., ROUCH R., 1991. L'adaptation des organismes au milieu aquatique souterrain. Réflexions sur l'apport des recherches écologiques récentes. *Stylogia*, **6** (3): 129-142.
- DI LORENZO T., DE LAURENTIIS P., GALASSI D.M.P., 2002. Ecological risk assessment in Italian karstic springs managed for drinking purpose. In: Atti XVI International Symposium of Biospeleology, 8-15 Settembre 2002, Italia: 36-37.
- DI LORENZO T., GALASSI D.M.P., 2001. Approccio interdisciplinare alla valutazione della vulnerabilità di sorgenti carsiche: l'inferenza biologica. In: Atti 62° Congresso Internazionale U.Z.I. San Remo 23-27 Settembre 2001: 85.
- GALASSI D.M.P., 2001. Groundwater copepods: diversity patterns over ecological and evolutionary scales. *Hydrobiologia*, **453/454**: 227-253.
- GALASSI D. M. P., 2002. Il progetto PASCALIS. *Biol. Amb.*, **16** (1): 60-61.
- GALASSI D.M.P., DE LAURENTIIS M., PETITTA M., MARINELLI G., FIASCA B., 2001. Influenza dei fattori storici ed ecologici sulla biodiversità animale: la copepodofauna (Crustacea: Copepoda) delle sorgenti di Presciano (Fiume Tirino, L'Aquila, Abruzzo). In: Cicolani (ed.), *Monitoraggio Biologico del Gran Sasso*, Andromeda Editrice, vol 2: 159-182.
- GALASSI D.M.P., DOLE-OLIVIER M.-J., DE LAURENTIS P., 1999. Phylogeny and biogeography of the genus *Pseudectinosoma*, and description of *P. janinae* sp. n. (Crustacea: Copepoda, Ectinosomatidae). *Zool. Scr.*, **28**: 289-303.
- GIBERT J., STANFORD J.A., DOLE-OLIVIER M.J., WARD J.V., 1994. Basic Attributes of Groundwater Ecosystems and Prospects for Research. In: Gibert J., Danielopol D.L., Stanford J.A. (eds.), *Groundwater Ecology*, Academic Press San Diego: 7-40.
- HAMMOND P.M., 1995. Practical approaches to the estimation of the extent of biodiversity in speciose groups. In: D.L. Hawksworth Ed., *Biodiversity, measurement and estimation*, Chapman & Hall, London: 119-136.
- MALARD F., 2000. Groundwater Contamination and Ecological Monitoring in a Mediterranean Karst Ecosystem in southern France. In: Griebler C., Danielopol D.L., Gibert J., Natchnebel H.P., Notenboom J. (eds.), *Groundwater ecology – A tool for management of water resources*. Austrian Academy of Sciences Institute of Limnology Vienna-Mondsee: 183-196.
- MALARD F., CHAPPUIS R., 1995. Temperature logging to describe the movement of sewage - polluted surface water infiltrating into a fractured rock aquifer. *Journal of Hydrology*, **173**: 191-217.
- MALARD F., CRAGUE G., TURQUIN M.J., BOUVET Y., 1994a. Monitoring karstic ground water: the practical aspect of subterranean ecology. *Theoretical and Applied Karstology*, **7**: 115-126.
- MALARD F., REYGROBELLET J.L., GIBERT J., DROGUE C., WINIARSKY T., BOUVET Y., 1994b. Sensitivity of underground karst ecosystem to human perturbation - Conceptual and methodological framework applied to the experimental site of Terrieu (Herauld - France). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **24**: 1414-1419.
- MALARD F., REYGROBELLET J.H., SOULIÉ M., 1994c. Transport and Retention of Fecal Bacteria at Sewage - Polluted fractured rock Sites. *Journal of Environmental Quality*, **23** (6): 1352-1363.
- MALARD F., MATHIEU J., REYGROBELLET J.-L., LAFONT M., 1996. Biomonitoring groundwater contamination: Application to a karst area in Southern France. *Aquatic Sciences*, **58** (2): 158-187.
- McFETERS C.A., BISSONNETTE G.K., JEZESCKI J.J., THOMSON C.A., STUART D.G., 1974. Comparative survival of indicator bacteria and enteric pathogens in well water. *Appl. Microbiol.*, **27**: 823-829.
- MÖSSLACHER F., NOTENBOOM J., 1999. Groundwater biomonitoring. In: Gerhardt, A. (ed.) *Biomonitoring of polluted waters*, Trans Publ., Zurich, San Diego: 477-504.
- MÖSSLACHER F., GRIEBLER C., NOTENBOOM J., 2001. Biomonitoring of groundwater system: Methods, Applications and Possible Indicators among the Groundwater Biota. In: Griebler C., Danielopol D.L., Gibert J., Natchnebel H.P., Notenboom J. (eds.), *Groundwater ecology – A tool for management of water resources*. Austrian Academy of Sciences, Institute of Limnology Vienna-Mondsee: 183-196.
- NOTENBOOM J., 1999. Managing Ecological Risks Of Groundwater Pollution. In: Griebler C., Danielopol D.L., Gibert J., Natchnebel H.P., Notenboom J. (eds.), *Groundwater ecology – A tool for management of water resources*. Austrian Academy of Sciences, Institute of Limnology Vienna-Mondsee: 183-196.
- PALOC H., 1985. Problèmes de protection de la qualité de l'eau souterraines en terrains calcaires. In: *Theoretical background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones*, I.A.H., vol. 6, Heise, Hannover.
- POULSON T.L., 1992. Assessing groundwater quality in caves using indices of biological integrity. In: *Proceedings of the Third Conference on Hydrogeology, Ecology, Monitoring and Ma-*

- agement of Groundwater in Karst terrains*. U.S. EPA and the Association of Groundwater Scientists and Engineers, Nashville, Tennessee: 495-511.
- RHESE W., 1977. Abbaubare organische Verunreinigungen pathogene Keime und Viren, Raport n. 40177 Eidgenössisches amt für Umweltschutz, Berne.
- ROUCH R., 1986. Sur l'écologie des eaux souterraines dans le karst. *Stygologia*, **2** (4): 345-372.
- SALVATI R., 1996. Idrogeologia strutturale ed idrogeologia quantitativa del margine orientale della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese. Tesi di Dottorato. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 129 pp.
- TRAINER F.W., 1968. Temperature profiles in water wells as indicators of bedrock fractures. *US Geol. Surv. Water Prof. Pap.*, 600 – B: 210-214.
- WILLIAMS D.D., 1991. The springs as an interface between groundwater and lotic faunas and as a tool in assessing groundwater quality. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **24**: 1621-1624.
- WILLIAMS J.H., CARSWELL L.D., LLOYD O.B., ROTH W.C., 1984. Characterization of groundwater circulation in selected fractured rock aquifers using borehole temperature and flow logs. In: *Proc. National Water Well Association*, US Environmental Protection Agency Conference Investigation: 842 – 852.
- WILLIAMS J.H., CONGER R.W., 1990. Preliminary delineation of contaminated water-bearing fractures intersected by open hole bedrock wells. *Ground water Monit. rev.*, **10** (4): 118-126.