



Abisso Revel - Alpi Apuane – ph Rossano Cagnoni

Le acque carsiche. Caratteristiche, utilizzo e rischi di inquinamento

di Francesco Mantelli¹

1. Comitato Scientifico Regionale Toscano "Fiorenzo Gei", socio CAI Sezione Valdarno inferiore (Fuvecchio)

Riassunto: Il contributo affronta il tema delle acque carsiche, privilegiando lo studio delle acque circolanti negli acquiferi carsici di tipo carbonatico, quelli più importanti nel nostro Paese anche ai fini dell'approvvigionamento idropotabile.

Per acque carsiche vanno intese, in senso generale, le acque che hanno relazione con il carsismo, cioè con quell'insieme di forme superficiali e sotterranee che si producono per l'azione solvente delle acque di superficie e profonde in differenti tipologie di rocce caratterizzate da una solubilità più o meno elevata (calcari, dolomie, gessi e altre rocce evaporitiche).

Si mette inoltre in evidenza come i complessi carsici rappresentino elementi di grande rilevanza naturalistica e la necessità inderogabile di una loro maggiore tutela, dato che questi sistemi sono talvolta interessati da attività estrattive o addirittura come corpi ricettori di vere e proprie discariche.

Vengono infine evidenziate le caratteristiche peculiari in relazione agli aspetti chimici e microbiologici delle acque che circolano negli acquiferi carbonatici in confronto alla normativa vigente, di derivazione europea, che regola le acque destinate al consumo umano.

Abstract: Karst waters. Characteristics, use and pollution risks

This contribution deals with karst waters, focusing on the study of waters circulating in the carbonate karst aquifers, which are the most important in Italy also for the purposes of drinking water supply.

Generally, karst waters have to be meant as waters related with karst phenomena, that is, with the set of surface and underground forms that are produced by the solvent action of surface and deep water in different types of soluble rocks (limestones, dolomites, gypsum and other evaporite rocks).

This study further highlights how the karst complexes represent very important natural systems, which deserve greater protection, because these systems are sometimes affected by extractive activities or even treated as dumps.

Finally, peculiar features are pointed out, related to the chemical and microbiological aspects of carbonate groundwaters, compared to the current legislation regulating the water intended for human consumption, in turn derived from European regulations.

Introduzione

L'acqua, pur essendo molto abbondante sulla Terra, è per la quasi totalità a elevato contenuto di solidi disciolti (mare e molti laghi salini). Secondo stime recenti il volume globale di acqua dolce liquida (meno dell'1% di tutta l'acqua presente sulla Terra in forma liquida, solida o gassosa) è stimato in circa 23 milioni di chilometri cubi, di cui il 99% di questo volume è costituito da acque sotterranee: solo 1,4 milioni di chilometri cubi di acque sotterranee accumulate sono recenti, ovvero sono infiltrate nel sottosuolo meno di 50 anni fa (Gleeson et al., 2016).

Acque fossili sono oggetto di sfruttamento in alcune zone del Sahara, ma anche in aree del sud-est asiatico, tuttavia occorre ricordare che tali acque, dato che sono rigenerabili solo in minima parte, non costituiscono una risorsa rinnovabile e sono destinate nel tempo a esaurirsi (o comunque a necessitare di tempi di ricarica estremamente lunghi).

Il prelievo di acqua dolce da laghi, acquiferi e bacini artificiali è aumentato notevolmente durante l'ultimo secolo e sta aumentando ancora nella maggior parte del mondo.

Si stima che il prelievo globale di acqua dolce sia stato probabilmente di circa 600 chilometri cubi all'anno nel 1900 ed è aumentato a 3.880 chilometri cubi all'anno nel 2021. L'incremento dei prelievi di acqua dolce è stato particolarmente elevato (circa il 3% all'anno) durante il periodo dal 1950 al 1980, in parte a causa di un maggiore tasso di crescita della popolazione e in parte per il rapido aumento dello sfruttamento delle acque sotterranee, in particolare per l'irrigazione.

Una parte significativa delle acque sotterranee è confinata in acquiferi di tipo carsico.

Per carsismo si intende l'insieme dei fenomeni operati per azione chimica dell'acqua prevalentemente

sulle rocce di natura carbonatica con conseguenti fenomeni di dissoluzione o precipitazione (Figura 1). In realtà azioni di carsismo si hanno anche su rocce gessose (a base di solfato di calcio), su rocce formate da cloruro di sodio (Figura 2), perfino su rocce di natura quarzifica, cioè solubili in parte esigua. I fenomeni indotti dal carsismo sono riconducibili alla

formazione di morfologie superficiali ben evidenti (campi solcati e doline), di cavità nelle formazioni rocciose (Figura 3) e a deposizione di concrezioni costituite spesso da stalattiti e stalagmiti (Figura 4). Il termine carsismo deriva dalla regione del Carso triestino dove questi fenomeni sono molto evidenti e dove sono stati all'inizio studiati.



Figura 1 – Carsismo di superficie nei marmi del monte Sembra (Alpi Apuane) – ph F. Mantelli



Figura 2 – Fenomeni di carsismo superficiale su una roccia evaporitica costituita prevalentemente da cloruro di sodio (Dancalia, Etiopia) – ph F. Mantelli



Figura 3 – Condotto carsico fossile nella formazione carbonatica dell'Antro del Corchia (Alpi Apuane) – ph F. Mantelli



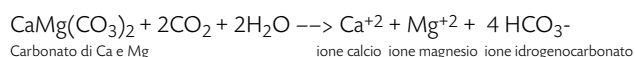
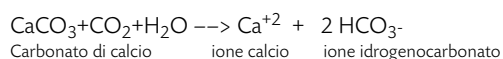
Figura 4 – Concrezioni formate da carbonato di calcio in un complesso carsico di tipo carbonatico – ph F. Mantelli

Tipologia degli acquiferi carsici

Gli acquiferi carsici di tipo carbonatico sono quelli maggiormente diffusi e quelli più studiati. Sono acquiferi costituiti da rocce sedimentarie come calcari e dolomie, rocce formatesi in gran parte per sedimentazione in ambiente marino in seguito alla deposizione di fanghi carbonatici originati da gusci di microrganismi (foraminiferi, briozoi e altri) o resti di grandi piattaforme carbonatiche simili, ad esempio, a barriere coralline (Marmolada, Dolomiti).

Il carsismo è ugualmente diffuso nelle rocce metamorfiche di natura carbonatica come i marmi; i classici esempi sono nelle Alpi Apuane dove sono ben noti sistemi carsici di notevole estensione e profondità.

I processi che danno luogo alle cavità carsiche sono dovuti alla solubilità del carbonato di calcio o della dolomia (carbonato di calcio e magnesio) in seguito all'interazione con acqua contenente anidride carbonica secondo le reazioni che seguono:

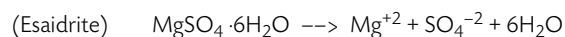
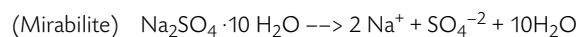
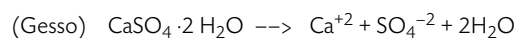


In relazione alle differenti tipologie di rocce carsificabili si possono osservare evidenti differenze nelle acque di circolazione nei rispettivi sistemi.

Gli acquiferi che si instaurano nelle rocce carbonatiche sono spesso riserve idriche di rilevante importanza ai fini dell'approvvigionamento a uso potabile, dato che le acque circolanti hanno una composizione prevalentemente idrogenocarbonato calcica (talvolta idrogenocarbonato calcico magnesica) e con mineralizzazione medio-basse (da 100 a 400 mg/L di residuo salino), con assenza [1] dei tipici contaminanti che possono interessare gli acquiferi di pianura densamente abitata (fitofarmaci, idrocarburi, solventi, metalli pesanti e altro) e pertanto adatte all'uso potabile.

Altri sistemi carsici interessano le evaporiti, ovvero rocce formate a seguito dall'evaporazione marina durante eventi verificatisi in un lontano passato in seguito a particolari fenomeni climatici e geologici. Durante il processo di evaporazione precipita per primo il carbonato di calcio, seguito da solfato di calcio idrato (gesso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e infine da cloruro di sodio (chiamato anche salgemma, NaCl), con presenza in minori quantità di cloruro di potassio, solfato di magnesio e altri composti molto solubili. Negli acquiferi costituiti prevalentemente da rocce gessose, le acque circolanti sono ricche in calcio e solfati essendo i gessi molto solubili. Di solito il residuo salino va da 2000 a 3000 mg/L. Quando le acque entrano in contatto con rocce costituite da salgemma (Figura 2), queste si arricchiscono prevalentemente in cloruri e sodio (oltre 2000 mg/L di residuo salino), quindi acque "salse" che possono in certi casi trovare impiego in ambito termale (Acque salse di Montecatini Terme).

L'arricchimento in contenuto salino delle acque che interagiscono con le rocce evaporitiche è dovuto all'elevata solubilità dei componenti di queste rocce, come si osserva nelle reazioni che seguono:



Nella Tabella 1 è riportato un confronto fra differenti tipologie di acque provenienti da tre differenti acquiferi; nelle colonne A e A1 si osserva l'arricchimento in calcio e solfato delle acque provenienti dal contatto con gessi e da sodio e cloruri di quelle provenienti dal contatto con salgemma (colonne B e B1). Le acque dall'acquifero carbonatico si distinguono nettamente dalle quattro precedenti, in quanto mostrano una bassa mineralizzazione e tipologia idrogenocarbonato calcica (colonna C). Vi sono inoltre gli acquiferi nelle quarziti, di cui sono noti da alcuni decenni quelli dei Tepui, massicci rocciosi dalla tipica forma tabulare con altitudini fino a 2800 m, localizzati nella Gran Sabana, una vasta area che si estende tra Venezuela, Guayana e Brasile. Il più noto tra questi rilievi è il Roraima-tepui che raggiunge i 2810 m ed è situato al confine tra Venezuela e Guayana. Questo è stato fra i primi massicci della Gran Sabana a essere stato esplorato dagli speleologi. Tra le cavità esplorate nel corso delle spedizioni del 1993 e del 1996, quella più complessa è il *Sistema Auyán-tepui Noroeste* (Figura 5). Il carsismo è sviluppato nella parte superiore degli altopiani costituiti da circa 2000 m di spessore di quarziti, cioè arenarie leggermente metamorfiche, formate originariamente da sabbie compattate e diagenizzate, costituite da quarzo.

Il carsismo si è potuto sviluppare in queste rocce antichissime, dell'ordine di circa 2 miliardi di anni, grazie ai tempi molto lunghi di interazione acqua-roccia con processi erosivi ma anche per dissoluzione chimica; infatti, a differenza delle rocce carbonatiche, le quarziti sono solubili in minima parte: nelle acque analizzate nei corsi sotterranei dell'*Auyán-tepui* la concentrazione di silice è estremamente bassa ed è quindi ipotizzabile che la formazione delle morfologie carsiche sia connessa a lentissimi processi di dissoluzione chimica in un ambiente immutabile nell'ordine dei milioni di anni (Mecchia e Piccini, 1999; Piccini, 2006). Il fattore tempo ha quindi giocato un ruolo fondamentale nel modellamento del paesaggio, determinando la formazione di morfologie carsiche vere e proprie con molte somiglianze ai paesaggi carsici tipici delle rocce calcaree. Esiste infine il carsismo glaciale, che presenta non poche analogie con il carsismo classico in roccia (Figura 6). Un tempo campo quasi

Parametri	Unità di misura	A	A1	B	B1	C
		Acquifero in evaporiti a salgemma e gessi	Acquifero in evaporiti a salgemma e gessi	Acquifero in evaporiti a gessi	Acquifero in evaporiti a gessi	Acquifero nei marmi e dolomie
Data prelievo		17/2/2009	17/2/2009	3/5/2008	3/5/2008	9/11/2011
Portata	L/s	-	-	30-35	150	22
Temperatura acqua	°C	26,9	33,3	7,9	10,0	10,0
Conducibilità elettrica	$\mu\text{S}/\text{cm } 20^\circ\text{C}$	24200	24400	1823	2030	221
Residuo fisso	mg/L 180°C	17000	17500	1735	2108	125
pH	Unità pH	6,4	6,4	7,4	7,3	7,6
Fluoruro	mg/L F	1,4	2,5	<0,1	0,9	<0,1
Cloruro	mg/L Cl	8830	9140	8,3	11,8	4,5
Nitrato	mg/L NO_3	<1	<1	3,0	2,3	3,0
Solfato	mg/L SO_4	1380	1420	1075	1400	8,0
Idrogeno carbonato	mg/L HCO_3	648	640	235	148	138
Sodio	mg/L Na	5497	5590	3,5	5,7	3,0
Potassio	mg/L K	136	143	1,8	2,5	0,3
Calcio	mg/L Ca	684	744	496	536	34,7
Magnesio	mg/L Mg	130	120	27,3	70,0	7,5
Silice	mg/L SiO_2	16,9	20,6	-	-	2,8

Tabella 1 – Confronto fra differenti tipologie di acque provenienti da tre differenti acquiferi. A: Sorgente Regina (Terme Montecatini). A1: Sorgente Leopoldina (Terme Montecatini). B: Sorgente degli Scettici (Gessi Sassalbo). B1: Sorgente Matucaso (Gessi di Sassalbo, Fivizzano). C: Sorgente di Cardoso - Principale sorgente del Complesso carsico del monte Corchia (Alpi Apuane). Fonte dei dati: analisi a cura dell'autore.

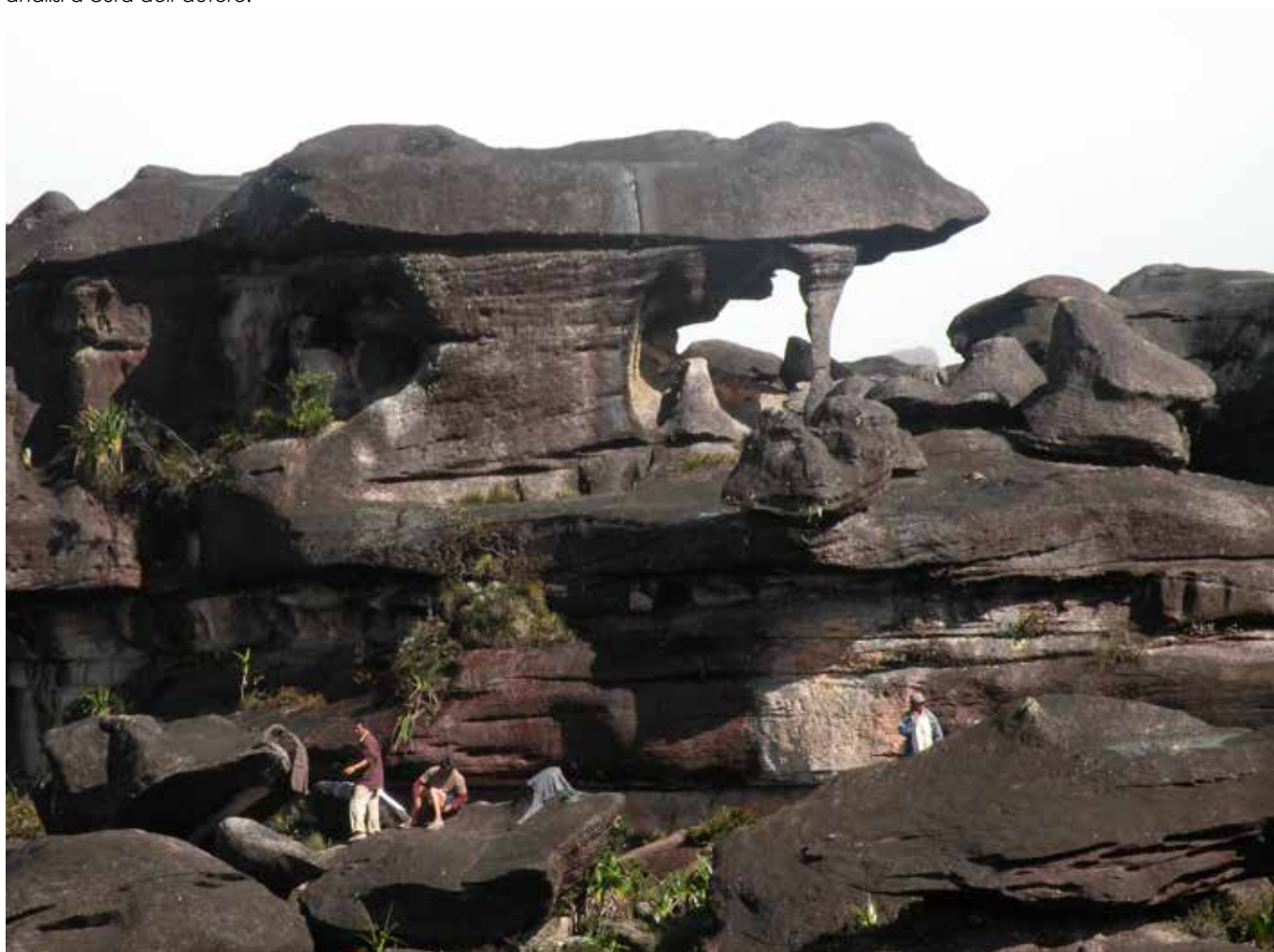


Figura 5 – Caratteristiche forme residuali dovute a dissoluzione ed erosione differenziale di rocce quarzitiche sulla superficie sommitale del Roraima Tepui (Venezuela) – ph Leonardo Piccini

di esclusivo interesse dei glaciologi, è divenuto in anni recenti oggetto di studi approfonditi da parte degli speleologi.

È il carsismo prodotto dall'inabissamento nei ghiacciai dei torrenti prodotti dalla fusione superficiale con formazione di profondi pozzi (mulini glaciali).

Il primo mulino glaciale oggetto di esplorazione fu un grande pozzo sul ghiacciaio della Mer de Glace denominato le Grand Mulin; nel 1898 Vallot vi scese fino alla profondità di 60,5 metri (Badino, 1999).

Gli acquiferi carsici carbonatici

Nel nostro Paese gli acquiferi di maggior importanza di tipo carsico sono quelli carbonatici localizzati in gran parte della Penisola: dal Carso triestino, una estesa parte delle Alpi Marittime, le Prealpi carniche, le Prealpi venete e lombarde, le ben note Alpi Apuane, gran parte delle dorsali appenniniche centrali (Monti Sibillini e gruppo del Gran Sasso) e meridionale (Monte Pollino), la Puglia e vaste aree della Sardegna come il Supramonte di Oliena (Figura 7) e aree della Sicilia con le aree carsiche dei Monti Iblei e delle Madonie.

Nel loro insieme le rocce carbonatiche ed evaporitiche (gessi) costituiscono in Italia circa un quarto della superficie collinare e montuosa e sono circa un sesto di tutta la superficie del nostro Paese.

La portata complessiva delle acque carsiche nell'intera Penisola è circa 13 miliardi di metri cubi ogni anno; una parte importante di queste acque è utilizzata ai fini potabili prevalentemente nell'Italia centro-meridionale. Si ricordano importanti acquedotti che traggono alimentazione dalle acque sotterranee di sistemi carsici: l'Acquedotto Pugliese in Puglia, l'acquedotto del Serino in Campania, l'acquedotto del Peschiera nel comprensorio romano. In questi ultimi anni i fenomeni d'inquinamento che interessano sempre di più le falde idriche di pianura stanno rendendo le risorse degli acquiferi carsici della fascia prealpina e appenninica di notevole importanza.

Nelle acque sotterranee e superficiali, fra gli inquinanti classici, principalmente forme di azoto derivante dai fertilizzanti e antiparassitari ed erbicidi (tra cui il Glifosate), diffusi questi ultimi con scarsi controlli e insufficienti conoscenze sulla loro tossicità in molte zone agricole, si rilevano nuove sostanze in seguito a scorrette pratiche industriali.

Recentemente le sostanze perfluoroalchiliche (PFAS) e acido perfluorottanoico (PFOA) costituiscono le criticità emergenti per il mantenimento della qualità delle acque. Un'estesa falda acquifera di un vasto territorio, pari a circa 180 km², appartenente alle province di Vicenza, Verona e Padova è stata inquinata per decenni (inizio anni '70) da sostanze perfluoroalchiliche, inquinamento che ha interessato perfino le acque potabili con conseguenti altissimi costi per riportare tali acque nei



Figura 6 – Carsismo glaciale. Discesa in un mulino glaciale nel ghiacciaio di Morteratsch, Massiccio del Bernina, Svizzera – ph Rossano Cagnoni

termini di legge (impiego di filtri a carbone attivo con necessità di frequenti ricambi di questo materiale adsorbente).

L'elevata permeabilità (per fratturazione) delle rocce carsiche consente all'acqua di infiltrarsi velocemente dalla superficie nel sottosuolo, dove scorre rapidamente, percorrendo distanze notevoli, lungo percorsi solitamente non conosciuti. Qualunque inquinante ha la possibilità di infiltrarsi facilmente e diffondersi anche a notevole distanza in tempi molto rapidi. Le acque carsiche sono quindi risorse di notevole importanza da destinare prioritariamente al consumo umano, risorse che vanno fortemente tutelate, sia per evitare fenomeni di inquinamento, sia per ridurre gli effetti di sprechi o di usi diversi da quello potabile.

Nella figura 8 è riportato lo schema di un classico sistema carsico dove si osserva l'acquifero carbonatico in parte delimitato da un substrato di rocce impermeabili; si osserva inoltre la zona satura che costituisce la zona perennemente allagata dove le acque di infiltrazione, dopo un percorso prevalentemente verticale in discesa, vi si accumulano e da cui defluiscono in seguito in senso orizzontale.



Figura 7 – Paesaggio carsico del Supramonte di Oliena. Punta Carabidda e dolina del Pradu (Sardegna) – ph F. Mantelli

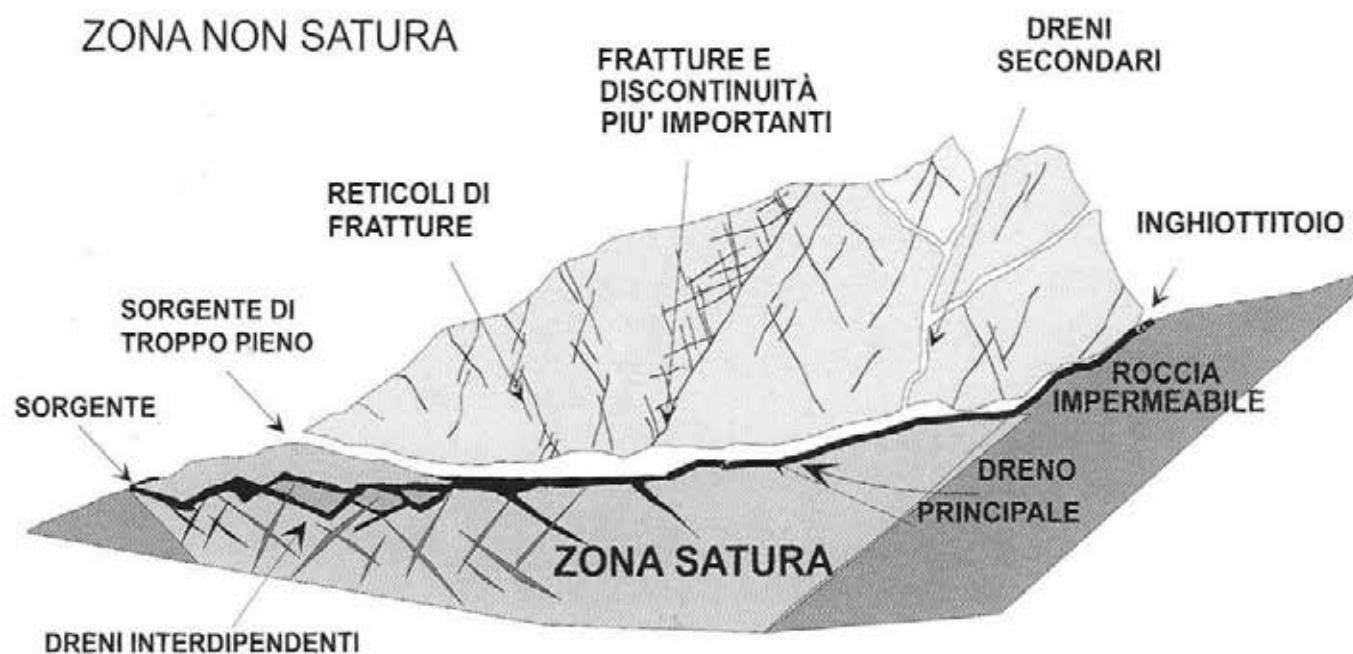


Figura 8 – Schematizzazione di un sistema carsico (Da: Vigna B., Gli acquiferi carsici, Quaderni didattici, Soc. Spel. It., 12, Erga Ed., Genova 2001)

Lo studio degli acquiferi carsici

Lo studio degli acquiferi carsici si basa in primo luogo sulla conoscenza geologica del sistema. Gli aspetti geologici e strutturali, per esempio, di un gruppo montuoso forniscono già una prima idea della tipologia dell'acquifero. Morfologia del sistema, presenza di doline, faglie, sorgenti e loro portate, evidenti fratture e grotte consentono di stabilire un primo modello di possibile circolazione idrica.

L'esplorazione speleologica, quando possibile, consente in molti casi un approfondimento delle conoscenze della circolazione delle acque, sia per verifica diretta dei corsi idrici percorribili (talvolta anche con attività speleosubacquea), sia mediante l'uso dei traccianti quando l'acqua scompare in fessure non percorribili.

È importante ricordare quanto la speleologia, realizzata in larghissima parte come attività di volontariato e con altissima preparazione tecnica, abbia contribuito ad approfondire le conoscenze del vasto reticolo sotterraneo dei numerosi sistemi carsici nel nostro Paese.

L'uso di traccianti, tecnica di indagine impiegata da molti anni, ha consentito di studiare le linee preferenziali di scorrimento delle acque in molti sistemi carsici. L'uso principale dei traccianti immessi nelle acque serve per verificare dove un corso idrico sotterraneo risorge all'esterno o l'eventuale interconnessione di corsi idrici ipogei. I traccianti più comuni utilizzati in passato sono la Fluoresceina e il Tinopal. La fluoresceina sodica è un colorante

organico rilevabile nelle acque anche a bassissime concentrazioni grazie all'intensa fluorescenza nella gamma 520-530 nm (di colore giallo-verde, molto caratteristica) quando viene eccitata da raggi ultravioletti a 254 nm.

Il Tinopal CBS-X, che viene utilizzato come sbiancante ottico nei detersivi, fa parte di una nuova categoria di traccianti fluorescenti.

Nel complesso carsico del Monte Corchia per verificare il possibile collegamento fra un'area di cava e un piccolo torrente di questo complesso, è stato impiegato il cloruro di sodio, il comune sale da cucina. La rilevazione di tale tracciante nel corpo idrico in oggetto è stata effettuata tramite un conduttimetro che, dopo alcune ore dall'immissione di una soluzione concentrata di cloruro di sodio, ha rilevato un incremento della conducibilità, quindi un aumento degli ioni presenti in soluzione, evidenziando pertanto un collegamento fra l'area di cava oggetto di indagine e il piccolo torrente ipogeo.

Si ricorda infine che nello stesso complesso carsico molto anni fa fu utilizzato un tracciante gassoso per verificare il collegamento tra due diversi settori di tale complesso fino a quel momento considerati due sistemi carsici separati; a tale scopo fu usato il tetraidrotiofene (THT, C_4H_8S), liquido incolore molto volatile, comunemente usato come odorizzante del metano e altri gas. Piccolissime quantità di questa sostanza disperse dell'atmosfera sono facilmente avvertibili all'olfatto.

Vulnerabilità degli acquiferi carsici

Numerosi lavori hanno evidenziato l'importanza dei sistemi carsici come acquiferi di elevato pregio per il reperimento di acque destinate a uso potabile e, allo stesso tempo, l'elevata vulnerabilità all'inquinamento di questi sistemi date le particolari caratteristiche idrogeologiche. Caratteristica degli acquiferi carsici è l'elevata variabilità della portata delle acque, spesso in tempi molto brevi.

Per esempio la portata del Timavo, uno dei più noti fiumi carsici che nasce in Croazia, attraversa il Carso per quasi novanta chilometri e sfocia in mare vicino a Trieste, va da circa 9 m³/sec durante la magra ai 90 m³/sec nel periodo di piena.

Sulle Apuane la Grotta del Vento è caratterizzata da una moderata circolazione idrica che tuttavia può aumentare di vari ordini di grandezza in occasione di eventi meteorici particolarmente intensi. Il collettore principale è il fiume Acheronte che scompare in un sifone posto sul fondo della grotta; in caso di piena l'acqua sale e invade una buona metà del II° Itinerario turistico. Il 19 giugno 1996, in occasione della grave alluvione che coinvolse le

Apuane centro-meridionali, l'intero sistema fu completamente allagato e dall'ingresso si ebbe per alcune ore una fuoriuscita di acqua all'esterno con una portata massima di quasi 10 m³/sec per una durata di circa 6 ore (tabella 2).

Pertanto i sistemi carsici, soprattutto quelli caratterizzati da grandi collettori, hanno una circolazione simile alle acque superficiali e quindi sono sistemi sempre poco protetti da un possibile inquinamento. Le cause sono da individuare nella progressiva antropizzazione del territorio nel nostro Paese, ma anche in altre aree del mondo. Fra questi rischi possiamo annoverare l'edificazione di nuovi villaggi anche a quote elevate in alcune montagne, le attività di cava, gli stazzi di animali di allevamento in suoli carsici caratterizzati da elevata permeabilità, fino al loro utilizzo come vere e proprie discariche (Figura 9 - Civita et al., 1991, Forti et al., 1993; Forti, 1999; Sauro, 1999).

La suscettibilità all'inquinamento dei sistemi carsici è molto variabile; per esempio in funzione della tipologia del sistema carsico. È nota comunque la

rapida propagazione degli inquinanti per l'elevata velocità di flusso insieme, in certi casi, alla scarsa capacità di autodepurazione.

La protezione degli acquiferi carsici è possibile quanto più sono approfondite le conoscenze della loro struttura e del loro funzionamento. Nel loro insieme i sistemi di tipo carsico mostrano significative e importanti differenze fra loro.

Denominazione del corso idrico	Portata minima osservata L/min	Portata massima osservata L/min
Rio delle Perle	1	45
Cascata sommità Pozzo Infinito	0,2	220
Torrente Lete	10	180
Torrente Acheronte	20	> 1000

Tabella 2 – Variabilità di portata dalle acque in un sistema carsico (Grotta del Vento, Alpi Apuane)

Nei sistemi con rete a dreno dominante (Figura 10), caratterizzati dalla presenza di grandi collettori, la velocità di scorrimento delle acque è molto elevata, pertanto è rapido l'arrivo di un eventuale contaminante e comunque, in relazione alla natura dell'inquinante, può essere anche rapida la sua rimozione. È noto in questi casi l'aumento della carica microbica delle acque in seguito all'intenso

dilavamento delle aree assorbenti; nel caso di zone dove sono presenti pascoli è facile riscontrare un aumento di azoto nitrico, nitroso e ammoniacale nelle relative acque sotterranee, unito a un'inevitabile contaminazione microbiologica.

In figura 11 è riportato il caso di un rapido incremento della portata in un ambiente carsico nell'ordine di alcune ore, derivato a un evento meteorico molto intenso, seppur breve, con conseguente variazione chimica della composizione dell'acqua per effetto di diluizione degli ioni presenti.

Non sempre all'incremento di portata corrisponde una diminuzione della mineralizzazione delle acque: in certe situazioni le acque di infiltrazione possono rimobilizzare le acque più mineralizzate presenti nei settori meno permeabili del sistema (effetto pistone) e quindi è possibile osservare un temporaneo aumento del contenuto ionico.

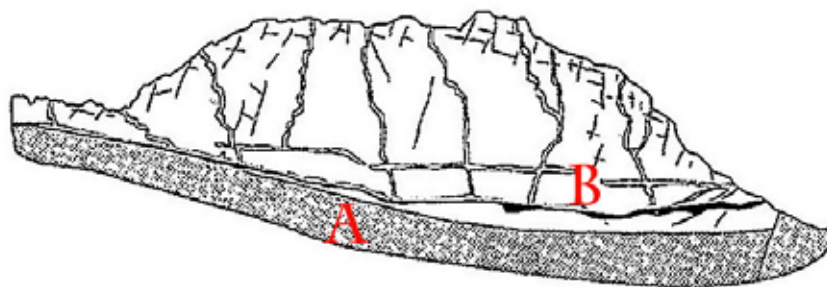
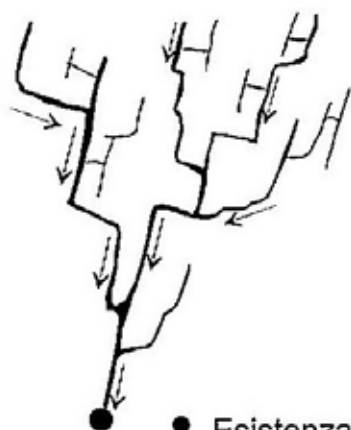
Nei sistemi a dreni interdipendenti (Figura 12), caratterizzati da numerose vie di drenaggio fra loro connesse, le acque presentano tempi di scorrimento più lunghi e con variazioni di portate solitamente più contenute. In questi casi un eventuale inquinante può risiedere più a lungo nel sistema.

Nei sistemi con rete a circolazione dispersiva (Figura 13), ammassi rocciosi carbonatici caratterizzati da intensa fratturazione anche a piccola scala e spesso fra loro collegati, si ha circolazione di acque simili a



Figura 9 – Ingresso di una grotta ridotta a discarica. Bus del Pal, Altopiano del Cansiglio (Prealpi bellunesi, Belluno, Treviso e Pordenone) – ph F. Mantelli

RETE A DRENO DOMINANTE



- Esistenza di importanti vie di drenaggio preferenziali
- Organizzazione della rete di drenaggio
- Condotti sifonanti ma assenza di una zona satura tradizionale

Figura 10 – Planimetria e sezione di un sistema a drenaggio dominante; A: formazione impermeabile; B: principali condotte di drenaggio (Da: Vigna B., *Gli acquiferi carsici*, Quaderni didattici, Soc. Spel. It., 12, Erga Ed., Genova 2001, modif.)

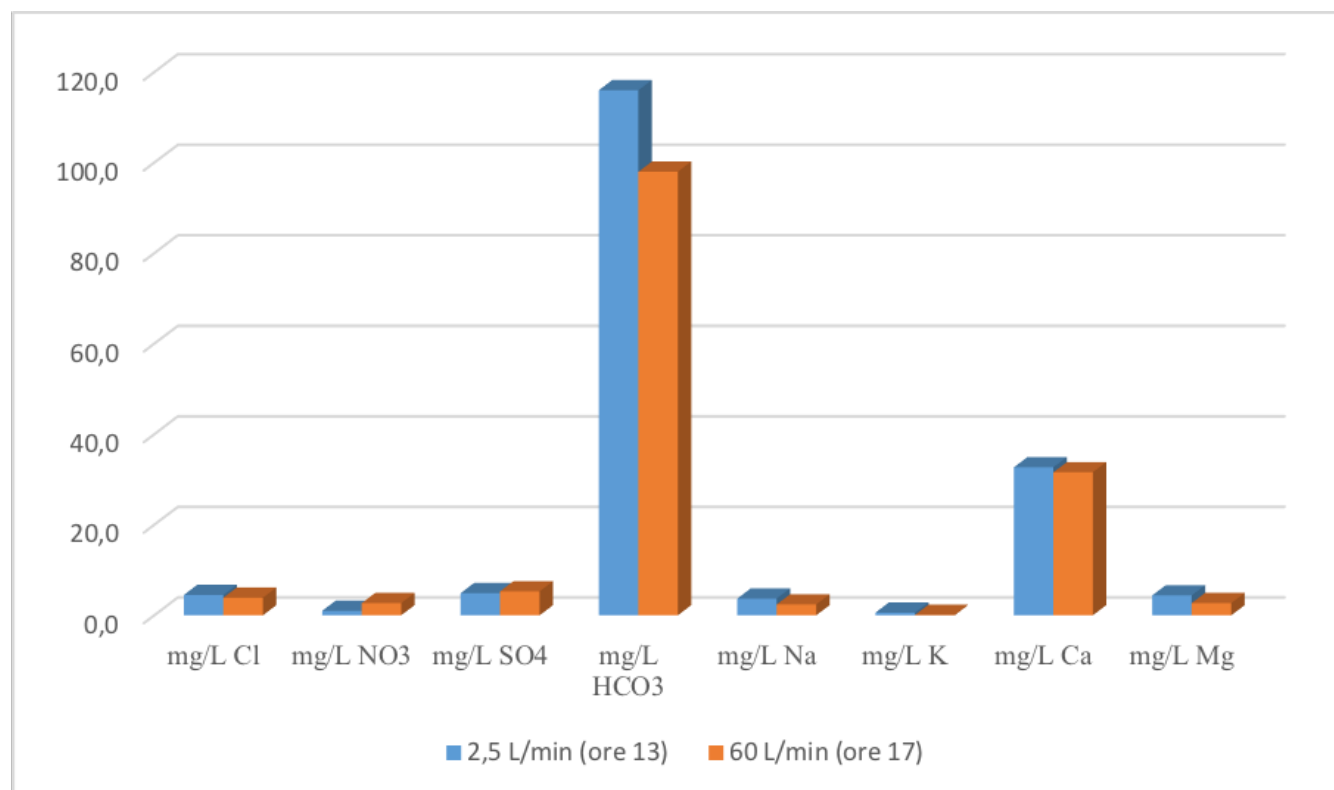


Figura 11 – Variazione di portata e di composizione chimica dell'acqua in arrivo in un condotto carsico in seguito a un intenso e rapido evento meteorico esterno – elaborazione F. Mantelli

un acquifero poroso in sabbia e ghiaie, quindi con tempi di scorrimento molto lunghi. Si ha pertanto assenza di vie di drenaggio preferenziale con presenza di una zona satura tradizionale.

In relazione ai tempi lunghi di residenza delle acque di infiltrazione (dell'ordine degli anni), si hanno alle sorgenti acque molto più mineralizzate per il lungo tempo di contatto acqua-roccia. Acquedotti importanti traggono acque da acquiferi di questo

tipo (sorgenti del Peschiera, Acquedotto Pugliese, Acquedotto Augusteo del Serino).

Il complesso carsico del Monte Corchia (Alpi Apuane, Toscana) che è localizzato all'interno dell'omonima montagna, per la presenza di cave attive, costituisce un laboratorio per lo studio della dinamica degli inquinanti rappresentati in questo ambiente dai fanghi di taglio in loco del marmo e dalla dispersione di idrocarburi.

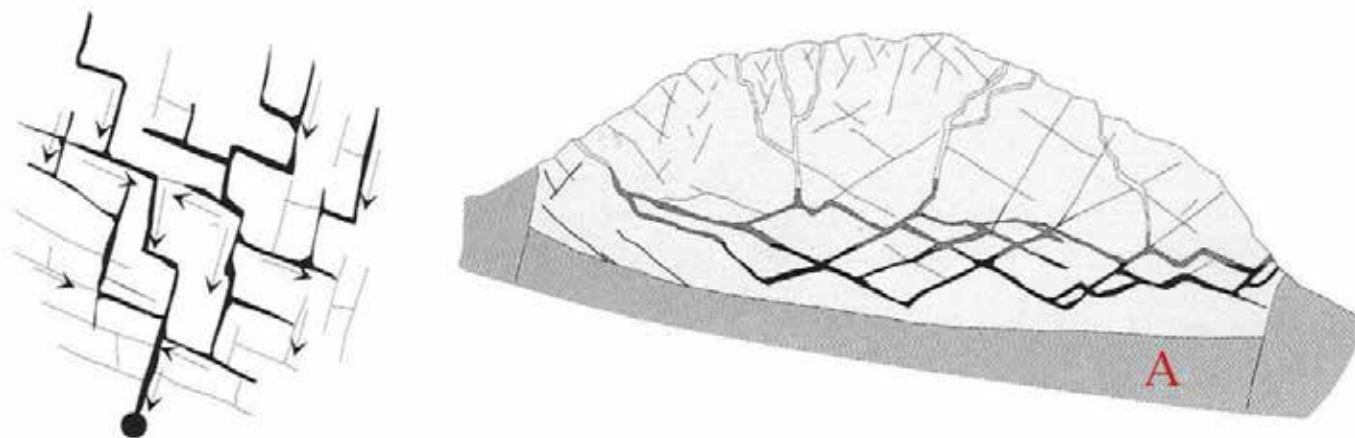


Figura 12 – Planimetria e sezione di un sistema a dreni interdipendenti; A: zona satura (Da: Vigna B., Gli acquiferi carsici, Quaderni didattici, Soc. Spel. It., 12, Erga Ed., Genova 2001, modif.)

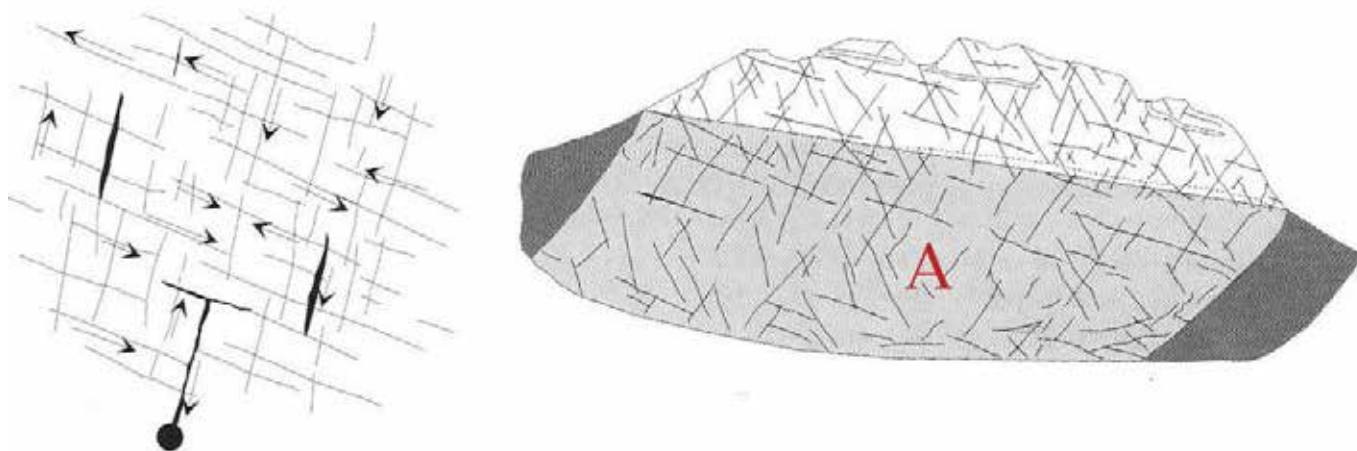


Figura 13 – Planimetria e sezione di un sistema a circolazione dispersiva; A: zona satura (Da: Vigna B., Gli acquiferi carsici, Quaderni didattici, Soc. Spel. It., 12, Erga Ed., Genova 2001, modif.)



Figura 14 – Il torrente Vianello-Vidal, uno dei principali collettori del complesso carsico del monte Corchia in un momento di elevata portata – ph F. Mantelli

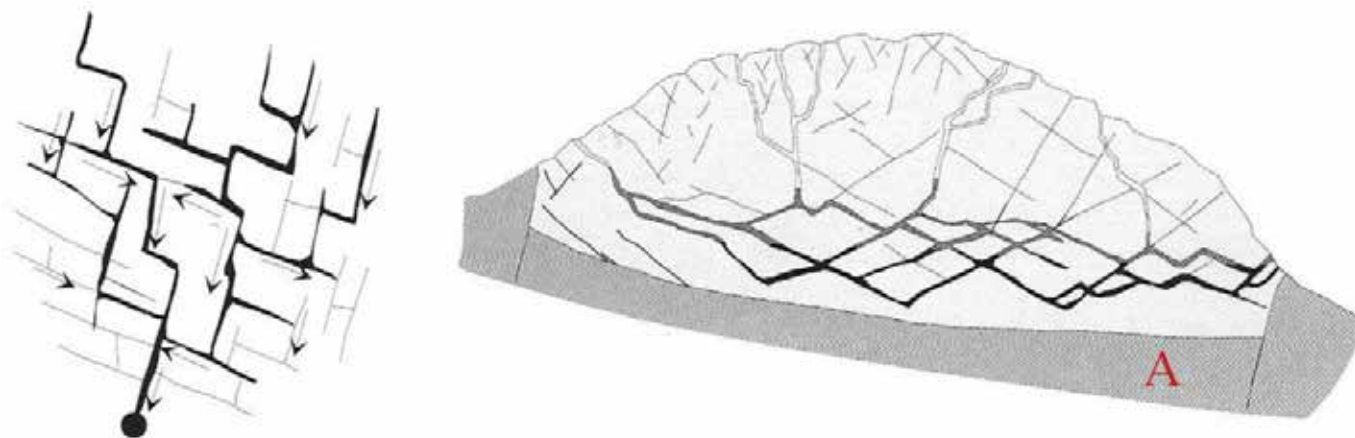


Figura 12 – Planimetria e sezione di un sistema a dreni interdipendenti; A: zona satura (Da: Vigna B., Gli acquiferi carsici, Quaderni didattici, Soc. Spel. It., 12, Erga Ed., Genova 2001, modif.)

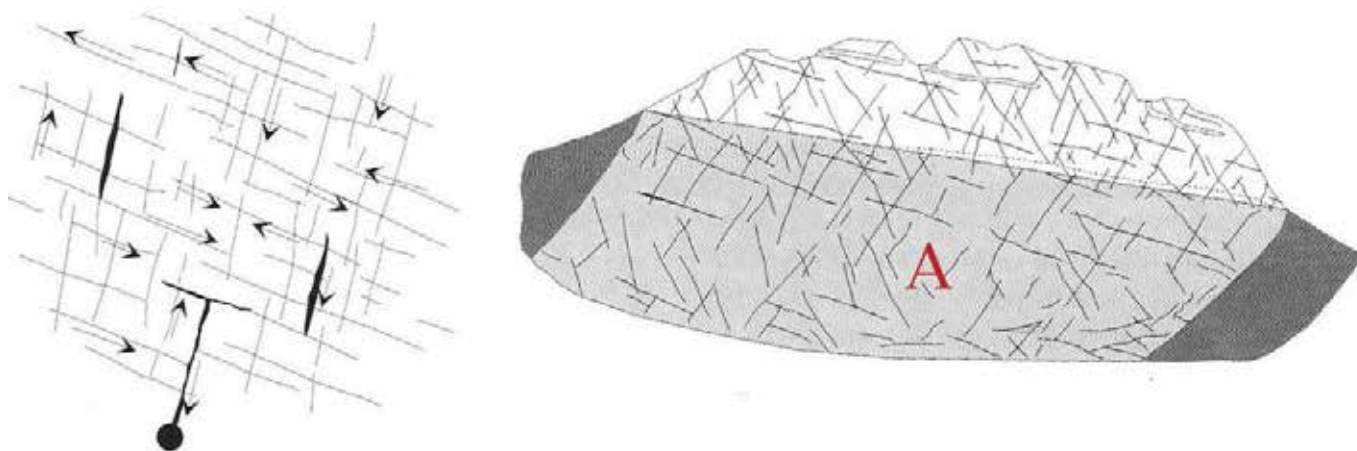


Figura 13 – Planimetria e sezione di un sistema a circolazione dispersiva; A: zona satura (Da: Vigna B., Gli acquiferi carsici, Quaderni didattici, Soc. Spel. It., 12, Erga Ed., Genova 2001, modif.)



Figura 14 – Il torrente Vianello-Vidal, uno dei principali collettori del complesso carsico del monte Corchia in un momento di elevata portata – ph F. Mantelli

Tale complesso carsico è un sistema a dreno dominante sino al fondo e probabilmente oltre (a dreni interdipendenti nella parte prossima alla sorgente dove probabilmente si unisce ad altri sistemi), è caratterizzato da importanti collettori (il torrente Vianello-Vidal e il torrente Gronda) che drenano grandi quantità di acqua in tempi molto rapidi (Figura 14).

Il corpo idrico che al momento appare più esposto all'inquinamento in seguito all'attività estrattiva è il torrente Vianello-Vidal; questo è un corpo idrico che in tempi non lontani ha subito inquinamento da dispersione di idrocarburi e da fango proveniente dal taglio del marmo [2]. Per quanto riguarda l'inquinamento da idrocarburi, avvenuto nell'agosto 2010, nelle acque di questo torrente non si sono trovate tracce di questi composti pur con l'impiego di tecniche analitiche molto evolute.

È tuttavia comprensibile che la miscela di idrocarburi sia stata velocemente rimossa nel giro di poche ore dalla forte corrente, mentre la presenza di queste sostanze è stata riscontrata e misurata nell'aria di un ampio settore dell'Antro del Corchia. Pertanto l'odore di gasolio è rimasto evidente per le sue caratteristiche odorigene per alcuni giorni e perfino nell'ambiente esterno nei pressi dell'ingresso del percorso turistico.

Nel caso dell'inquinamento da marmettola, avvenuto nel luglio 2011, gli effetti dovuti alla deposizione dei fanghi si sono prolungati per vari anni (Figura 15); solo piene molto intense sono riuscite ad asportare gli spessi depositi di fango sul fondo del torrente, tuttavia tracce di tali fanghi perdurano tuttora in alcuni rami minori che affluiscono nella parte superiore del torrente Vianello-Vidal (Mantelli et al., 2021).

Vi sono sistemi carsici dove nel relativo bacino imbrifero sono da ritenersi assenti le pressioni antropiche e altre possibili cause di inquinamento (abitazioni isolate sulla montagna, zone a pascolo anche temporaneo, attività estrattiva) e nel loro insieme possono rappresentare sistemi a elevata naturalità. Uniche possibilità di interferenza con le acque circolanti sono dovute solo ai cicli di trasporto a distanza di contaminanti organici e inorganici veicolati dalle precipitazioni meteoriche.

Sono riportati nella tabella 3 i risultati delle analisi di metalli e altri elementi di natura non metallica effettuate su vari corpi idrici della Grotta del Vento, un sistema carsico di notevole interesse localizzato in un territorio delle Alpi Apuane dove si ritiene che siano assenti significative pressioni antropiche.

I dati ottenuti evidenziano concentrazioni molto basse, che probabilmente rappresentano il fondo naturale delle acque nell'area apuana dove si apre la Grotta del Vento.

È noto che i valori del fondo naturale possono variare, anche notevolmente, in funzione delle caratteristiche litologiche del territorio.

Nei sistemi carsici è di particolare interesse la presenza del radon. Il radon è un gas radioattivo di origine naturale che deriva dal decadimento dell'uranio. Gli isotopi del radon presenti in natura sono: ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (thoron) ^{219}Rn (actinon), prodotti durante il decadimento delle serie radioattive rispettivamente dell' ^{238}U , del ^{232}Th e dell' ^{235}U . Il ^{222}Rn è quello di maggiore interesse ed è un gas solubile in acqua, incolore, inodore e insapore.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), attraverso l'*International Agency for Research on*



Figura 15 – Forte intorbidamento delle acque e deposizione di marmettola sul fondo in un ramo affluente nel torrente Vianello-Vidal (Antro del Corchia, agosto 2011) – ph F. Mantelli

Elementi	Isotopo selezione	Torrente Lete		Rio delle Perle		Lago sifone iniziale
Anno		2002	2006	2002	2006	2006
Boro	¹⁰ B	17,3	3,5	16,7	2,8	3,8
Alluminio	²⁷ Al	7,6	2,9	8,1	2,8	4,8
Vanadio	⁵¹ V	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Manganese	⁵⁵ Mn	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
Cobalto	⁵⁹ Co	<0,05	0,20	<0,05	0,17	0,23
Nichel	⁶⁰ Ni	0,8	0,6	0,6	0,6	0,7
Rame	⁶³ Cu	<0,1	0,10	<0,1	0,06	0,61
Zinco	⁶⁶ Zn	<0,1	0,1	<0,1	0,9	2,2
Arsenico	⁷⁵ As	<0,05	0,11	<0,05	0,13	0,11
Bromo	⁷⁹ Br	47,2	-	52	-	-
Stronzio	⁸⁸ Sr	23,9	-	23,6	-	-
Molibdeno	⁹⁵ Mo	0,26	0,11	0,28	0,30	0,14
Antimonio	¹²¹ Sb	0,08	0,05	0,07	0,06	0,07
Iodio	¹²⁷ I	17,5	-	14,4	-	-
Bario	¹³⁸ Ba	6,6	2,80	12,9	13,6	5,2
Piombo	²⁰⁸ Pb	<0,05	<0,05	-	<0,05	0,09
Uranio	²³⁸ U	0,32	0,30	0,49	<0,10	<0,10
Selenio	Se	-	0,05	-	0,07	0,08
Cromo	*Cr	<1	0,11	<1	0,14	0,12
Ferro	*Fe	13	-	<5	-	-

Tabella 3 – Analisi di elementi in traccia nelle acque della Grotta del Vento effettuate mediante spettrometria di massa con sorgente a plasma induttivo (ICP-MS). *Analisi mediante spettrometria di assorbimento atomico con atomizzazione elettrotermica. Concentrazioni espresse in microgrammi /litro (µg/L) – da Mantelli et al., 2008

Cancer (IARC), ha classificato il radon appartenente al gruppo 1 delle sostanze cancerogene per l'essere umano. Il nuovo D. Lgs n. 101/2020, in vigore dal 27 agosto 2020, recepisce la direttiva 2013/59/Euratom in materia di radioprotezione e stabilisce le norme di sicurezza al fine di proteggere le persone dai pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti. Per quanto riguarda il radon, i livelli di riferimento (art. 12) sono 300 Bq/m³ per luoghi di lavoro (e anche nelle abitazioni), espressi come attività media annua di gas radon in aria.

Il radon costituisce un parametro importante ai fini della frequentazione speleologica e soprattutto per la tutela dell'ambiente di lavoro nell'ambito delle grotte destinate a fruizione turistica dove le guide restano per molto tempo nell'ambiente sotterraneo. In alcuni casi il radon può rendere pericolosa la frequentazione di alcune grotte anche agli speleologi che, nella maggior parte dei casi, sono certamente esposti per tempi molto brevi all'eventuale presenza di questo gas; questo può accadere in certe grotte in aree vulcaniche dove i valori di radon possono essere molto elevati (superiori a 10 000 Bq/m³), tuttavia

valori di tali ordini di grandezza sono stati riscontrati anche in sistemi carsici di tipo carbonatico dove talvolta non sono note le cause di tali anomalie di concentrazione. All'interno della grotta "Forra Lucia", una grotta in ambiente carsico carbonatico sui monti della Calvana (Prato, Toscana), questo gas è stato riscontrato in concentrazioni rilevanti: in seguito al monitoraggio effettuato nel periodo 2007-2010, l'attività attribuita al radon era molto variabili da circa 1300 fino a circa 8600 Bq/m³.

Il radon, oltre che nell'atmosfera, viene misurato anche nelle acque in quanto, proprio per la sua solubilità in acqua, può essere veicolato in aree differenti di un sistema carsico. Nel laboratorio carsologico sotterraneo di Bossea (Frabosa Soprana, Cuneo) il radon viene monitorato con un sistema di acquisizione dati in continuo nelle acque di due corpi idrici (Figura 16).

Questo sistema carsico, pur articolato entro rocce carbonatiche, è delimitato da metavulcaniti (porfiroidi) con un rilevante contenuto di radioisotopi, pertanto sul radon viene posta particolare attenzione. In questa grotta è noto il trasporto del radon attraverso le acque dalla zona allagata del sistema carsico, situata a monte della grotta, settore dove si verifica un diretto trasferimento del gas dalle rocce all'acqua, e successivo passaggio dalle acque all'atmosfera nella zona aerata.



Figura 16 – Misurazione del radon con sistema di acquisizione dati in continuo in due corpi idrici entro la grotta di Bossea (Frabosa Soprana, Cuneo) – ph F. Mantelli

Utilizzo delle acque carsiche ai fini potabili

Attualmente le acque a uso potabile a livello mondiale provengono per circa il 30% da acquiferi carsici. In seguito alla modifica di numerosi fattori (aumento della popolazione, abbassamento delle falde in determinati territori, esaurimento delle riserve di acque fossili, salinizzazione degli acquiferi, ecc.), si presume che nel 2050 l'80% delle acque destinate al consumo umano proverrà dagli acquiferi carsici, prevalentemente di tipo carbonatico.

In Italia attualmente il 40% delle acque potabili deriva da acquiferi di questo tipo.

L'acquedotto del Peschiera, principale acquedotto di Roma, che convoglia le acque delle sorgenti del Peschiera (provincia di Rieti), alle falde del Monte Nuria, capta l'acqua da un sistema carsico con rete a circolazione dispersiva dove le acque risiedono per un lungo periodo (non esiste infatti una relazione fra portata e precipitazioni) e presentano una mineralizzazione più elevata (circa 300-400 mg/L) rispetto a molte acque carsiche a rapido scorrimento. La portata media dell'acqua che raggiunge Roma è circa 14 m³/s e costituisce circa l'85% dell'acqua consumata a Roma. Questo acquedotto è uno dei più grandi al mondo a utilizzare soltanto acqua di sorgente.

Una captazione da un acquifero carbonatico ai fini del processo di potabilizzazione prevede sempre un trattamento per eliminare la torbidità delle acque e un processo finale di disinfezione.

La torbidità nelle acque carsiche è un fenomeno ricorrente ed è dovuto al dilavamento superficiale dell'acqua di pioggia che poi si infiltra in profondità nelle numerose fessure presenti nel corpo roccioso

senza significativa capacità di depurazione attraverso gli strati rocciosi. Spesso i suoli carsici sono poveri di argilla e altro materiale fine, tuttavia in condizioni di particolari flussi intensi di pioggia le acque di scorrimento nel sistema possono avere torbidità superiore a 1,0 NTU (unità di torbidità nefelometrica), valore di parametro previsto per le acque potabili.

Per esempio si è osservato che, nel lungo periodo di monitoraggio delle acque del Complesso carsico del Monte Corchia, il torrente Gronda mostra perennemente una torbidità da 0,1 a 0,7 NTU, quindi un'acqua molto limpida, e non mostra variazioni significative anche in seguito all'aumento delle portate, mentre il torrente Vianello-Vidal mostra generalmente un incremento significativo di torbidità (fino a 4,4 NTU) con l'incremento della portata.

I sistemi impiantistici che permettono l'utilizzo delle acque carsiche ai fini potabili sono quindi fra i più semplici e apparentemente meno costosi, in quanto non necessitano di trattamenti di rimozione di ferro, manganese, arsenico e altri contaminanti come avviene per differenti tipologie di acque.

Tuttavia per quanto riguarda le captazioni in alcuni acquiferi carsici delle Alpi Apuane è necessario disporre di costosi sistemi aggiuntivi dato che in alcuni casi, a causa delle attività di cava che hanno determinato inquinamenti importanti delle acque sotterranee, è stato necessario adottare sistemi per rimuovere la grande quantità di marmettola (fine sospensione di carbonato di calcio, talvolta inquinata da oli e metalli) prodotta dal taglio del marmo e in alcuni casi attivare sistemi complessi per la rimozione degli idrocarburi infiltrati nelle acque sempre in seguito a questa attività (Pieroni, 1995).

Caratteristiche chimiche

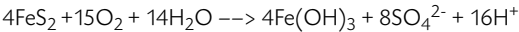
Le acque che circolano negli acquiferi carsici di tipo carbonatico sono caratterizzate dalla presenza di calcio, magnesio e idrogenocarbonato, generalmente con mineralizzazione bassa, cioè con un residuo fisso, indicativamente, da 100 a 400 mg/L. Nelle tabelle 4 e 5, a titolo di esempio, sono riportate le caratteristiche chimiche di acque campionate in differenti ambienti carsici: esse mostrano similitudine di composizione con ioni prevalenti calcio e idrogenocarbonato.

In assenza di particolari mineralizzazioni accessorie delle rocce carbonatiche o di fenomeni di inquinamento del suolo, gli altri componenti (cloruro, solfato, nitrato e altri componenti minori)

Tabella 4 – Composizione chimica di alcune acque del carso triestino – Fonte: analisi a cura dell'autore

	Unità di misura	Abisso di Trebiciano Trieste	Abisso di Trebiciano Trieste	Grotta di San Canziano Slovenia
Data		03/06/2011	03/06/2011	03/06/2011
T° acqua	°C	11,5	10,6	-
Tipo prelievo		Lago Timeus	Stillicidio - 70 m	Stillicidio uscita
pH	unità pH	7,2	7,9	7,5
Cond. elettrica	μS/cm 25°C	395	382	333
Residuo fisso	mg/L	238	235	203
Cloruri	mg/L Cl	7,2	4,5	6,5
Nitrati	mg/L NO ₃	4,7	14,0	3,1
Solfati	mg/L SO ₄	9,6	15,8	5,1
Idrogenocarbonato	mg/L HCO ₃	258	230	220
Sodio	mg/L Na	5,3	3,6	4,9
Potassio	mg/L K	0,9	0,6	3,4
Calcio	mg/L Ca	78,0	79,9	69,0
Magnesio	mg/L Mg	3,9	1,6	0,5
Ammonio	mg/L NH ₄	<0,05	<0,05	0,7
Silice	mg/L SiO ₂	3,2	6,7	0,3

sono veicolati con le piogge. I solfati, quando sono in concentrazioni significative in un acquifero carbonatico, possono provenire dalla dissoluzione di eventuali livelli di depositi gessosi o per alterazione di tracce di pirite o marcasite (FeS₂), minerali accessori comuni anche nelle rocce carbonatiche. Il meccanismo di ossidazione della pirite è stato ampiamente studiato ed è generalmente espresso dalla seguente reazione:



La presenza di nitrati in un'acqua carsica in concentrazioni ben superiori a quelle normalmente riscontrate nelle piogge indica quasi sempre un inquinamento di origine antropica (mineralizzazione di sostanze organiche e ossidazione dell'ammonio a nitrito e nitrato), presenza nel suolo di fertilizzanti.

Nella tabella 6 si osserva il contributo ionico delle piogge alla composizione delle acque che scorrono nell'acquifero carbonatico del Monte Corchia (Alpi Apuane). Il valore dei nitrati nelle piogge monitorate è compreso fra 0,8 e 3,6 mg/L.

Nel loro insieme le acque appartenenti agli acquiferi carbonatici presentano i requisiti chimici stabiliti dalla normativa vigente (Decreto legislativo 23 febbraio 2023, n. 18) per le acque destinate al consumo umano, ordinariamente definite acque potabili.

Ai fini delle valutazioni di tipo chimico per le acque carsiche, si riporta un confronto (Tabella 7) fra i parametri chimici previsti dalla normativa vigente, i rispettivi valori di parametro (da intendersi come valori limite ai fini della potabilità) stabiliti dal cita-

Componenti principali	Valori minimi	Valori mediani	Valori massimi
mg/L Cl	1,0	3,7	9,9
mg/L NO ₃	0,8	1,8	3,6
mg/L SO ₄	0,2	2,8	7,3
mg/L HCO ₃	<2,0	6,4	38
mg/L Na	0,3	2,7	9,5
mg/L K	0,1	0,4	4,0
mg/L Ca	0,8	3,0	9,0
mg/L Mg	<0,1	0,4	2,4

Tabella 6 – Valori minimi, mediani e massimi degli ioni principali contenuti nelle piogge campionate da 1997 al 2011 sullo sperone sud - ovest del monte Corchia (quota 1074 m)

Tabella 7 (a destra) – Confronto fra i parametri chimici indicati nella parte B allegato 1 D. lgs. 23 febbraio 2023, n. 18 e il chimismo di alcune acque carsiche dell'Antro del Corchia

to D. lgs. 23 febbraio 2023, n. 18, uniti ai valori di concentrazioni dei parametri determinati in campioni del torrente Vidal e del torrente della Gronda (complesso carsico del Monte Corchia).

Non sono stati inseriti parametri ritenuti non significativi ai fini della valutazione della potabilità come clorito e clorato, antiparassitari, triometani e altri composti clorurati, bromato, epicloridrina e altri parametri indicati nella Parte B dell'Allegato 1 del decreto sopra citato. Sono parametri la cui presenza è improbabile in quanto alcuni di essi sono in relazione con processi di disinfezione o immessi nell'ambiente in aree agricole o industriali.

	Unità di misura	Molinetto Pordenone	Santissima Pordenone	Gorgazzo Pordenone	Sorgenti del Meschio Treviso
Data		2/05/2004	2/05/2004	2/05/2004	30/04/2004
T° acqua	°C	110,6	8,8	10,1	10,4
pH	unità pH	7,7	7,9	7,7	7,8
Cond. elettrica	µS/cm 25°C	264	221	255	262
Residuo fisso	mg/L	145	138	141	142
Torbidità	N.T.U.	0,1	0,1	0,1	0,1
Cloruri	mg/L Cl	2,3	1,7	1,9	1,8
Nitrati	mg/L NO ₃	4,9	3,8	4,5	5,5
Solfati	mg/L SO ₄	3,8	2,7	2,7	4,0
Idrogenocarbonato	mg/L HCO ₃	159	130	150	156
Sodio	mg/L Na	1,2	0,9	1,0	0,9
Potassio	mg/L K	0,39	0,4	0,4	0,4
Calcio	mg/L Ca	51,8	42,7	48,4	46,6
Magnesio	mg/L Mg	1,3	1,6	2,2	4,6
Ammonio	mg/L NH ₄	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Silice	mg/L SiO ₂	0,19	<0,05	<0,05	0,59
Nitrito	mg/L NO ₂	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Fluoruro	mg/L F	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Tabella 5 – Composizione chimica di alcune acque carsiche nell'area del Pian di Cansiglio

Parametri	Unità misura	Valori di parametro	Fiume Vidal	Torrente Gronda
Antimonio	µg/L	10	0,15	0,20
Arsenico	µg/L	10	0,23	0,31
Benzene	µg/L	1,0	<0,05	<0,05
Benzo (a) pirene	µg/L	0,010	<0,001	<0,001
Boro (come B)	µg/L	1,5	0,005	0,005
Cadmio	µg/L	5,0	0,05	0,05
Cromo	µg/L	50 - 25	<2	<2
Rame	µg/L	2,0	<0,002	<0,002
Fluoruro	µg/L	1,50	<0,10	<0,10
Piombo	µg/L	10	<0,05	<0,05
Mercurio	µg/L	1,0	<0,3	<0,3
Nichel	µg/L	20	<2	<2
Nitrato	µg/L	50	1,4	1,2
Nitrito	µg/L	0,50	<0,05	<0,05
Selenio	µg/L	20	<2	<2
Vanadio	µg/L	140	0,28	0,32
Uranio	µg/L	30	0,8	0,9

Il D. lgs. 23 febbraio 2023, n. 18 riporta anche una serie di parametri definiti indicatori (parte C1 dell'allegato 1). Per questi è prevista la conformità ai rispettivi valori (Tabella 8).

Questi non sono valori limite ma, quando si verificano dei superamenti, l'articolo 15 (comma 1, lettera d) prevede che l'adozione di provvedimenti correttivi sia comunque subordinata all'evidenza di rischio per la salute umana.

Un parametro critico rispetto alle caratteristiche di potabilità è invece la torbidità poiché in seguito a forti piogge si possono avere fenomeni di intorbidamento delle acque correnti con valori fino a 19 NTU misurati alle Fontane di Cardoso e fino a 40 NTU per le acque del fiume Vidal.

Si è notato che comunque in tempi piuttosto brevi queste acque ritornano a valori di torbidità di 0,1-0,5 NTU.

Parametri	Unità di misura	Valori di parametro per cui è prevista la conformità	Fiume Vidal	Torrente Gronda
Alluminio	µg/L	200	<5	<5
Ammonio (NH ₄)	mg/L NH ₄	0,50	<0,1	<0,1
Cloruro	mg/L Cl	250	5,1 ± 1,1	5,8 ± 1,3
Clostridium perfringens	UFC/100 mL	0	-	-
Conduttività	µS/cm 20°C	2500	203 ± 13	223 ± 16
pH	unità pH	6,5 - 9,5	7,8	7,9
Ferro	µg/L Fe	200	<5	<5
Manganese	µg/L Mn	50	<1	<1
Solfato	mg/L SO ₄	250	7,7 ± 3,4	5,3 ± 1,4
Sodio	mg/L Na	200	3,1 ± 0,7	3,6 ± 0,7
Batteri coliformi	UFC/100 mL	0	-	-
Torbidità	N.T.U.	accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale	0,2	0,5
Residuo secco	mg/L	1500	117 ± 7	124 ± 8

Tabella 8 – Confronto fra i valori dei parametri indicatori riportati nel D. lgs. 23 febbraio 2023, n.18 con le concentrazioni degli stessi parametri nelle acque dei due principali collettori del complesso carsico del monte Corchia. (Per alcuni valori parametrici è associata l'incertezza di misura)

Caratteristiche microbiologiche

Per quanto riguarda gli aspetti microbiologici raramente queste acque rientrano nei rispettivi limiti previsti dalla normativa vigente poiché l'elevata fratturazione dell'epicarso, la porzione rocciosa posta subito sotto il suolo, non costituisce un adeguato sistema di filtraggio delle acque di pioggia che si infiltrano nel sistema. Le piogge dilavano l'ambiente esterno del sistema carsico e trascinano all'interno, oltre a materiale sospeso, determinando talvolta una certa torbidità, i batteri presenti nell'ambiente diffusi sia in seguito all'abbandono di feci prodotte da animali selvatici o al pascolo, o connessi a eventuali insediamenti umani non dotati di adeguati sistemi di smaltimento delle acque reflue. Per esempio nella grotta di Bossea (Frabosa Soprana, CN), dove per anni hanno circolato acque di elevata purezza in seguito a lavori di sterramento nella corrispondente area assorbente, insieme allo stazionamento di persone e bovini in tale area (Figura 17), hanno saltuariamente circolato acque torbide e con elevata carica microbica tanto da rendere ancora più rara la presenza di *Niphargus*, un crostaceo endemico di questa grotta.

Ai fini di una possibile captazione di un'acqua sotterranea in un ambiente carsico per la produzione di un'acqua minerale, il requisito indispensabile è la purezza microbiologica.

In Toscana vi sono numerose captazioni mediante sorgenti o pozzi di acque utilizzate come acque minerali lungo la dorsale dell'Appennino tosco-emiliano; queste acque, oltre a soddisfare i requisiti chimici

previsti dalla relativa normativa, presentano assenza di contaminazione microbiologica in quanto gli acquiferi localizzati nelle formazioni arenaceo-argillose, in virtù di quella litologia, sono ben protetti. Il suolo, formato da spessi depositi prodotti dall'alterazione rocciosa, costituisce un importante sistema filtrante insieme alla formazione rocciosa stessa formata principalmente da arenarie con argille, siltiti e in misura minore da marne (Figura 18).

Sulle Alpi Apuane non esistono invece captazioni di acque minerali nelle formazioni carbonatiche; le acque minerali che provengono da quel territorio sono captate in differenti formazioni, fra queste quelle dell'Unità Tettonica di Massa, formata da rocce metamorfiche, filladi e meta-arenarie con quarziti, che esercitano un adeguato sistema di protezione dalle infiltrazioni di superficie.

Il D. lgs. 23 febbraio 2023, n. 18, per la valutazione delle caratteristiche microbiologiche, richiede la ricerca dei parametri riportati nell'allegato 1 parte A e parte C1 di tale decreto: *Enterococchi intestinali*, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* (devono essere assenti in 100 ml di campione di acqua) conteggio delle colonie a 22 °C (senza variazioni anomale), batteri coliformi (assenti in 100 mL di campione acqua).

La presenza di questi batteri nelle acque può essere associata a microrganismi patogeni e pertanto mette in evidenza una contaminazione da infiltrazioni di materiale fecale. Tra i batteri più noti possiamo indicare l'*Escherichia coli* o colibacillo. Di solito



Figura 17 – Stazzo di bovini in un ambiente carsico (dintorni del rifugio Balma, monte Artesinera, Frabosa Soprana, CN). Si tratta di una zona a elevato assorbimento idrico; il corrispondente sistema carsico di Bossea alimentato è frequentemente contaminato da batteri – ph F. Mantelli



Figura 18 – La lunga dorsale dell'Appennino tosco-emiliano è formata prevalentemente da arenarie, siltiti, argille e marne, rocce che costituiscono nel loro insieme una copertura molto protettiva degli acquiferi. Da differenti settori di questo esteso sistema montuoso sono estratte acque microbiologicamente pure tanto da essere utilizzate ai fini dell'imbottigliamento – ph F. Mantelli

non è direttamente patogeno, al massimo è un opportunista, anche se esistono rare forme, geneticamente differenziate, che sono in grado di provocare gravi malattie in soggetti a rischio come neonati e immunodepressi.

Numerose campagne di studio sulla microbiologia delle acque carsiche sono state effettuate entro l'Antro del Corchia, un settore del vasto complesso carsico del Monte Corchia, caratterizzato dalla presenza di importanti corsi idrici sotterranei con notevole variabilità di portata; fra questi il torrente Vidal ha portate variabili da 300 litri/minuto fino a 2.000 litri/minuto. Sono presenti inoltre alcuni laghetti alimentati da acque di stillicidio.

La Tabella 9 riporta un'immagine istantanea di una situazione microbiologica di queste acque che comunque mette in evidenza una situazione ripetuta nel corso degli anni.

1. Le Fontane di Cardoso, localizzate poco a monte di Pontestazzemese (Stazzema, LU), che costituiscono la principale sorgente del complesso carsico, mostrano una contaminazione microbiologica che non si è mai modificata nel corso degli anni e, presumibilmente, potrebbe essere messa in relazione con gli abitati dei dintorni dove è possibile che il sistema fognario non garantisca adeguata protezione delle acque sotterranee. È il tipico caso in cui le pressioni antropiche sul suolo sovrastante il percorso delle acque sotterranee esercitano effetti diretti sulle acque e duraturi nel tempo dato che le cause non sono state individuate (Figura 19).
2. Le acque circolanti all'interno del Monte Corchia, almeno i principali collettori fino a oggi monitorati (torrente Gronda e torrente Vidal), non presentano mai gli elevati indici di inquinamento che si riscontrano nelle acque che

scaturiscono dalle Fontane di Cardoso. Questi torrenti, dopo un lungo periodo con mancanza di piogge, mostrano assenza di contaminazione microbiologica, contaminazione sempre presente con l'aumento delle portate.

3. Per quanto riguarda i laghetti (laghetto Galleria Bassa delle Stalattiti, laghetto Galleria Alta delle Stalattiti, laghetto del Venerdi), in questi si osserva costantemente assenza di indici di fecalizzazione (Assenza di *Enterococchi* e di *Escherichia coli*; non significativa la presenza di batteri coliformi). Le acque di alimentazione dei laghetti derivano da stillicidi, cioè da acque che, grazie a un lungo percorso attraverso imponenti spessori di roccia, subiscono una filtrazione e una lunga interazione con la roccia che incrementa il contenuto dei solidi disciolti. Le acque correnti sono alimentate da acqua di pioggia che arriva più rapidamente all'interno della montagna con minor tempo di contatto con l'interfaccia rocciosa e conseguentemente con un contenuto minore di solidi disciolti.

Altre indagini in differenti sistemi carsici, sempre in condizioni di assenza di pioggia da molti giorni, evidenziano condizioni di elevata purezza delle acque correnti in relazione ai parametri microbiologici (Tabella 10); si tratta delle acque circolanti entro la Grotta del Vento (Vergemoli, LU).

Si ritiene che nelle aree di assorbimento idrico (monte Pania Secca e montagne limitrofe) sussistano situazioni particolari dovute all'assenza di abitativi umani e, probabilmente, a scarsità di fauna selvatica e conseguenti scarse deiezioni sul suolo.

Seppur rare, vi sono situazioni in cui acquiferi carbonatici possono contenere acque di elevata purezza microbiologica così che possano essere captate per essere utilizzate come acque minerali

Denominazione campione	Carica batterica totale 22°C	Carica batterica totale 36°C	Batteri coliformi	Escherichiacoli	Enterococchi	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Pseudomonas</i> specie	<i>Clostridium perfringens</i>
	UFC/mL	UFC/mL	UFC/100 mL	UFC/100 mL	UFC/100 mL	UFC/100 mL	UFC/100 mL	UFC/100 mL
Sorgente Cardoso	200	10	77	11	13	0	100	1
Laghetto Galleria alta delle stallatiti	120	<10	5	0	0	0	1	0
Laghetto Galleria bassa delle stallatiti	20	<10	5	0	0	0	0	0
Torrente Vianello - Vidal	120	10	9	0	3	0	20	0
Torrente della Gronda	70	30	30	3	76	0	15	2
Laghetto del Venerdi	220	<10	16	4	0	0	4	0
Cascata risalita dei Lucchesi	<10	<10	16	4	0	0	-	0
Cascata risalita dei Romani	30	50	5	1	1	0	-	0

Tabella 9 – Valori dei parametri microbiologici nelle acque dei principali corpi idrici connessi al settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica. Prelievi del 09 ottobre 2010 (da: Mantelli et al., 2021)

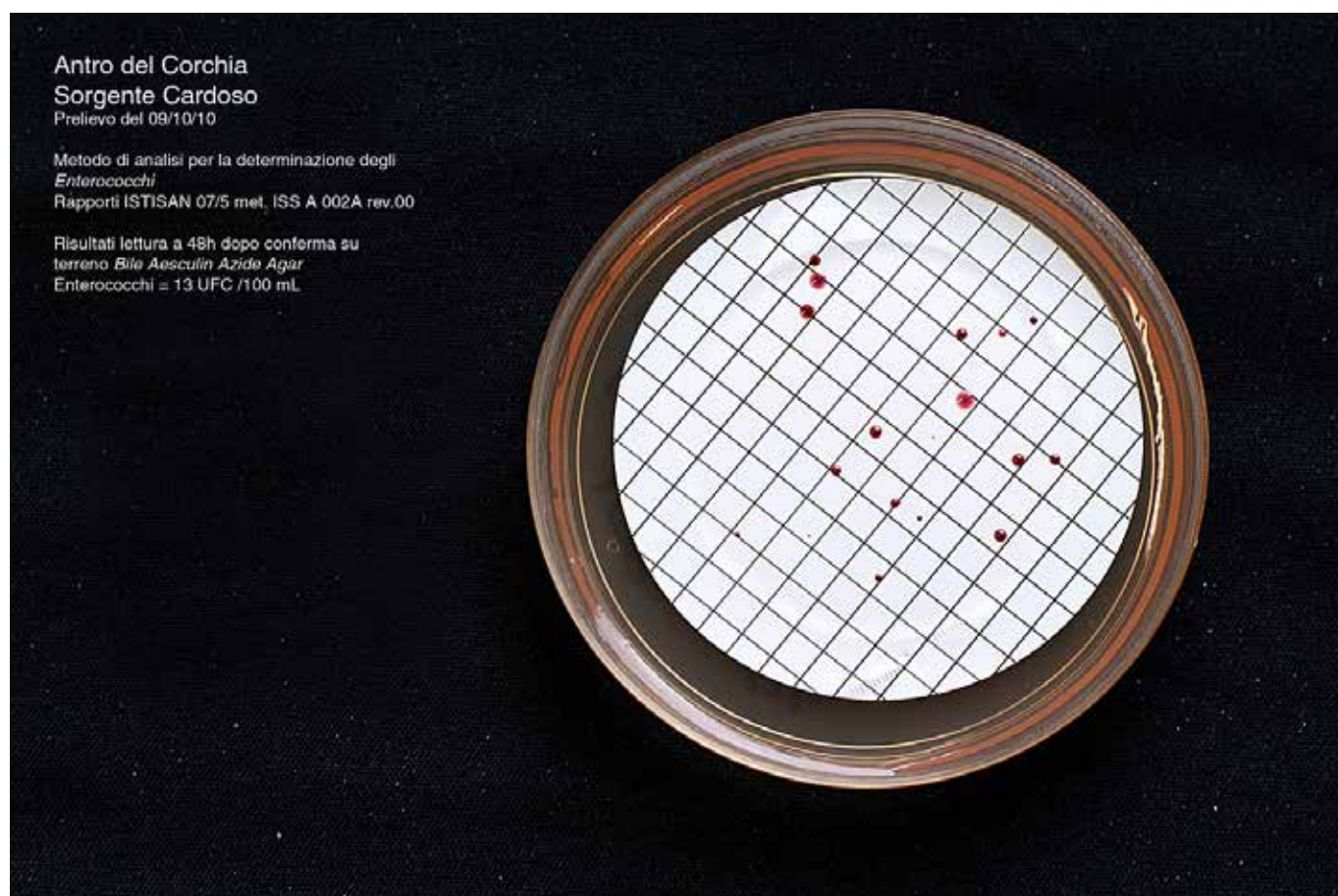


Figura 19 – Coltura di enterococchi riscontrati nelle acque delle Fontane di Cardoso (Prelievo del 09-10-2010) – ph F. Mantelli

Parametri	Unità di misura	Torrente Lete	Torrente Lete
		16/4/2005	21/10/2006
Coliformi totali	UFC/100 mL	0	3
Coliformi fecali	UFC/100 mL	0	0
Streptococchi fecali	UFC/100 mL	0	0
Parametri	Unità di misura	Torrente dell'Infinito	Torrente dell'Infinito
		15/4/2000	10/2/2001
Carica batterica totale 22° C	colonie/mL	2	-
Carica batterica totale 37° C	colonie/mL	5	-
Coliformi totali	UFC/100 mL	0	0
Coliformi fecali	UFC/100 mL	0	0
Streptococchi fecali	UFC/100 mL	0	0
Parametri	Unità di misura	Torrente Acheronte	Torrente Acheronte
		15/4/2000	2/7/2000
Carica batterica totale 22° C	colonie/mL	11	6
Carica batterica totale 37° C	colonie/mL	54	4
Coliformi totali	UFC/100 mL	1	0
Coliformi fecali	UFC/100 mL	1	0
Streptococchi fecali	UFC/100 mL	0	0

Tabella 10 – Microbiologia di alcune acque circolanti entro la Grotta del Vento (Vergemoli, LU). (Da Mantelli et al., 2008)

destinate all'imbottigliamento; per queste acque è richiesta una totale assenza di indici di contaminazione fecale. Nella Figura 20 è riportata una foto aerea del sistema montuoso di natura carbonatica a est di Gualdo Tadino (Perugia) al cui interno circolano acque utilizzate da un'importante azienda di imbottigliamento di acque minerali.

Certamente si tratta di un sistema montuoso a circolazione dispersiva. È noto che in alcuni sistemi carbonatici le acque di infiltrazione possono avere tempi di residenza lunghissimi, anche fino a trent'anni, quindi con una circolazione lentissima in microfratture della massa rocciosa.

NOTE

1. Il termine 'assenza' non è corretto nel linguaggio della chimica analitica; generalmente si dovrebbe indicare che un determinato inquinante non è rilevabile ai livelli della sensibilità del metodo di analisi, purché tale metodo presenti la sensibilità analitica (capacità di rilevamento) prevista dai termini di legge per quello specifico inquinante.
2. Fango localmente denominato 'marmettola': fine sospensione di carbonato di calcio, talvolta inquinata da oli e metalli.

Bibliografia & Sitografia

- AGNESOD G., PEANO G., VILLAVECCHIA E. - Concentrazione atmosferica di 222radon nella grotta di Bossea e relazioni con il regime dei flussi idrici interni. Atti



Figura 20 – Montagna calcarea da cui viene estratta un'acqua microbiologicamente pura in provincia di Perugia. Si tratta di una situazione idrogeologica non frequente data l'elevata fratturazione di molti sistemi carbonatici che frequentemente non consente un'adeguata protezione degli acquiferi – ph F. Mantelli

convegno nazionale: L'ambiente carsico e l'uomo, Grotte di Bossea, Frabosa Soprana, CN, 2003, 39-52

- BADINO G. - *Il carsismo glaciale*, Le Scienze, 1999, n. 373, 44-51
- BANESCHI I., PICCINI L., REGATTIERI E., ISOLA I., GUIDI M., LOTTI L., MANTELLI F., MENICCHETTI M., DRYSDALE R. N. & ZANCHETTA G., *Hypogean microclimatology and hydrology of the 800-900 m asl level in the monte Corchia cave (Tuscany, Italy). Preliminary considerations and implications for paleoclimatological studies*. Acta Carsologica, 2011, 40/1, 175-187
- BARSANTI M., I. DELBONO, A. SCHIRONE, R. DELFANTI, G. PEANO, A.A.CIGNA, B. VIGNA - *Radioattività nei campioni di roccia della parte inferiore della Grotta di Bossea*, Atti del Convegno Nazionale "La ricerca carsologica in Italia", 22-23 giugno 2013, Laboratorio carsologico sotterraneo di Bossea, Frabosa Soprana, 2016, 209-213
- CIGNA A. - *Radon in Caves. International - Journal of Speleology*. Bologna (Italy) January-July, 2005, 34 (1-2) 1-18
- CIGNA A. - *Alcune considerazioni sul radon in grotta*, Atti del Convegno Nazionale "La ricerca carsologica in Italia", 22-23 giugno 2013, Laboratorio carsologico sotterraneo di Bossea, Frabosa Soprana, 2016, 221-228
- DECRETO LEGISLATIVO 31 luglio 2020, n. 101. Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117. S. O. alla "Gazzetta Ufficiale", n. 201 del 12 agosto 2020 - Serie generale
- DECRETO LEGISLATIVO 23 febbraio 2023, n. 18, Attuazione della direttiva (UE) 2020/2184 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2020, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano. (23G00025) (GU Serie Generale n.55 del 06-03-2023) note: Entrata in vigore del provvedimento: 21/03/2023
- DIRETTIVA (UE) 2020/2184 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 dicembre 2020 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano (rifusione) (Testo rilevante ai fini del SEE)
- FORTI P., PICCINI L. & PRANZINI G. - *Le risorse idriche di emergenza delle Alpi Apuane (Toscana, Italia)*. Atti del 2° Convegno Int. Geoidrologia, Firenze, 1993, 303-318
- FORTI P. - *Gli acquiferi carsici. Problematiche per il loro studio ed utilizzo. Atti del Convegno nazionale sull'inquinamento delle grotte e degli acquiferi carsici e possibili ricadute sulla collettività*. Ponte di Brenta (PD) 26 e 27 settembre 1998, 13-39. A cura del Gruppo Speleologico Padovano, 1999 Imprimitur Editrice, Padova
- GLEESON, T., BEFUS, K. M., JASECHKO, S., LUIJENDIJK, E. e CARDENAS, M. B. - *The global volume and distribution of modern groundwater*. Nature Geoscience, 2016, Vol. 9, 161-167. doi.org/10.1038/ngeo2590
- MANTELLI F., MONTIGIANI A., LOTTI L., BIANUCCI P. L., PICCINI L., MALCAPI V. - *Le acque sotterranee del sistema carsico del M. Corchia: valorizzazione,*

- salvaguardia e rischi di inquinamento. Atti del 3° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III millennio. Parma 13/15 ottobre 1999, in: Quaderni di geologia applicata, Pitagora Editrice, Bologna. Vol. 1, 115-125
- MANTELLI F., DE SIO F., MONTIGIANI A. – *Impiego di tecniche analitiche tradizionali e avanzate per le analisi delle acque in sistemi carsici ipogei*. Convegno "Il monitoraggio ambientale nelle grotte turistiche. Nuove esperienze e nuove proposte" l'Aquila 14, 15 e 16 dicembre 2000. Le Grotte d'Italia, 2002, s. V. 3, 45-60
 - MANTELLI F., LUCHETTI G., MONTIGIANI A., LOTTI L., DE SIO F. - *Lo stato delle acque dell'Antro del Corchia in relazione alla vulnerabilità degli acquiferi carsici*. Atti del Convegno "Le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo". Filanda di Forno, Massa, 22 giugno 2002. Pubblicazione a cura della Federazione Speleologica Toscana, 2003, 105-117
 - MANTELLI F., DE SIO F., CECCONI E., MONTIGIANI A., LO GALBO F., GUERRANTI G., CROCE G., RONCHI A. - *Idrochimica delle acque della Grotta del Vento (Alpi Apuane, Vergemoli, LU)*. Atti del XX Congresso Nazionale di Speleologia, 27-30 Aprile 2007, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, 2008, Serie II, vol. XXI, 585-594
 - MANTELLI F., PRATESI G., LOTTI L., MONTIGIANI A., DE SIO F., OCCHINI F. - *Il radon entro il complesso carsico del monte Corchia (Alpi Apuane, Toscana)*. Boll. Esp. Amb., 2016, n. 1, 24-34
 - MANTELLI F., PICCINI L., SCALA C., MENICCHETTI S., LOTTI L., MONTIGIANI A., DE SIO F., OCCHINI F. - *Antro del Corchia 1997-2017, 20 anni di monitoraggio e ricerche*, Arpat Quaderni Ambientali Firenze, 2021, 1-257, I-XIV, ISBN 978-88- 96693-27-8868
 - MASSARO R. M. C. - *Studio del Radon nelle cavità naturali della Calvana. Analisi degli esiti dei rilevamenti per la valutazione degli aspetti sanitari correlati*. Corso di laurea Tecniche della prevenzione nell'ambiente e nei luoghi di lavoro. Facoltà di Medicina e Chirurgia ed Agraria, Università degli studi di Firenze. A.A. 2009/2010
 - MECCHIA M, PICCINI L. - *Hydrogeology and SiO₂ geochemistry of the Aonda Cave System, Auyán-tepui, Bolívar, Venezuela*. Bol. Soc. Venezolana Espel. 1999, 33, 1-11
 - PEANO R. G., PEANO G., VIGNA B., VILLAVECCHIA, E. - *Le dinamiche di diffusione del radon nella Grotta di Bossea*. In: *Proceedings of Symposium "Karst environment: research in Italy at the beginning of the 21st century"*. Scientific Station of Bossea: 2005, 101-124
 - PICCINI L. - *Ipotesi sulla origine e sulla evoluzione del Complesso Carsico del Monte Corchia*. Atti VI° Congresso Federazione Speleologica Toscana, Stazzema (Lucca), 1991, 59-82
 - PICCINI, L. - *Karst in siliceous rocks - karst landforms and caves in the Auyán-Tepui Massif (Est. Bolívar, Venezuela)*. International Journal of Speleology, 1995, 24, 41-54. Available at: <https://digitalcommons.usf.edu/ijs/vol24/iss1/2>
 - PICCINI L. - *Caratteri morfologici ed evoluzione dei fenomeni carsici profondi nelle Alpi Apuane (Toscana - Italia)*. Natura Bresciana, Annali del Museo Civico di Scienze Naturali Brescia, 1996, 30, 45-85
 - PICCINI L. - *Acquiferi carbonatici e sorgenti carsiche delle Alpi Apuane*. Atti del Convegno "Le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo". Filanda di Forno, Massa, 22 giugno 2002. Pubblicazione a cura della Federazione Speleologica Toscana, 2003, 41-75
 - PICCINI L. - *Fenomeni carsici e grotte nelle quarziti dell'AUYÁN-TEPUI (Gran Sabana – Venezuela)* Supplemento a / supplement to KUR magazine n. 6 - giugno/June 2006
 - PICCINI L., DI LORENZO T., COSTAGLIOLA P. and GALASSI D. MP. - *Marble Slurry's Impact on Groundwater: The Case Study of the Apuan Alps Karst Aquifers*, Water 2019, 11, 2462, 1-16
 - PIERONI S., ROAS A., GUIDI G., URBANO C. - *Un gigante ferito: il monte Corchia il suo antro, le sue cave*, Atti del II° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee, Metodologie, tecnologie e obiettivi, Modena 17/19 maggio 1995, Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora Editrice, Bologna, 1995, 2, suppl. 2, 1/1995
 - SAURO U. – *Geoecosistemi carsici, risorsa acqua e impatto umano; esempi in aree carsiche del Veneto*. Atti del Convegno nazionale sull'inquinamento delle grotte e degli acquiferi carsici e possibili ricadute sulla collettività. Ponte di Brenta (PD) 26 e 27 settembre 1998. A cura del Gruppo Speleologico Padovano, Imprimitur Editrice, Padova, 1999, 41-60
 - VIGNA B. - *Gli acquiferi carsici*, Quaderni didattici, Soc. Spel. It., 12, Erga Edizioni, 2001, Genova
 - VILLHOLTH, KAREN G., STIGTER, TIBOR - *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2022: acque sotterranee: rendere visibile la risorsa invisibile*, pages 110-125, illustrations, maps. UNESCO [64883], International Association of Hydrogeologists- In: *Acque sotterranee, acquiferi e cambiamenti climatici*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380743_ita
 - <https://www.legambientecarrara.it/category/temi-locali/territorio/>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=D5bGlqefMNQ>