



Antro del Corchia - 1997-2017
20 anni di monitoraggio e ricerche

QUADERNI AMBIENTALI

*Grazie a Sandro Montigiani,
sempre presente nei ricordi di tutti
coloro che lo hanno conosciuto*

L'Antro del Corchia è tuttora oggetto di un'attenta attività di controllo e monitoraggio di ARPAT. Recentemente si è concluso il "Progetto cave" realizzato con una rete di monitoraggio in continuo dei principali bacini apuani tenendo sotto controllo i possibili impatti sul sistema carsico, conseguenti all'attività estrattiva. Sono inoltre ancora attive le tre stazioni di controllo della meteorologia ipogea che sono in relazione all'attività turistica. I dati prodotti da questi sistemi di misura sono oggi disponibili presso ARPAT.

Antro del Corchia - 1997-2017

20 anni di monitoraggio e ricerche

Firenze, ottobre 2021

A cura di:

Francesco Mantelli, ARPAT, Dipartimento di Firenze,

Leonardo Piccini, Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze

Claudio Scala, Dipartimento di Economia Politica e Statistica, Università di Siena

Stefano Menichetti, ARPAT, SIRA

Licia Lotti, ARPAT, Dipartimento di Massa,

Alessandro Montigiani, ARPAT, Dipartimento di Firenze,

Francesco De Sio e Franco Occhini, Gruppo di monitoraggio Antro del Corchia.

Con la collaborazione per la parte analitica:

Marzia Masini, Paolo Spiniello, Stefania Tracchi, Paolo Bucci, Andrea D'Elia,

Gabriele Pratesi, Federica Cimoli, ARPAT Dipartimento di Firenze.

Si ringrazia la FST (Federazione Speleologica Toscana) e all'epoca il presidente *Gianni Ledda*, per avere determinato le premesse per la realizzazione del monitoraggio e il relativo gruppo di lavoro con *Valentina Malcapi, Alessandro Ferretti e Leonardo Piccini*.

Foto, Gruppo di monitoraggio Antro del Corchia, ARPAT

Collaborazione fotografica, *Maurizio Papucci*

Foto di coperta: ARPAT, *stalattiti e stalagmiti nell'Antro del Corchia*

Editing ARPAT, Settore Comunicazione, informazione e documentazione

ISBN 978-88-96693-27-8

ARPAT - Agenzia per la protezione ambientale della Toscana

Via Ponte alle Mosse 211 - 50144 Firenze - tel. 055 32061 - www.arpat.toscana.it

Introduzione	9
Capitolo 1 - Il Complesso carsico del monte Corchia	11
Capitolo 2 - Il progetto di fruizione scientifico culturale dell'Antro del Corchia	23
- Il monitoraggio dell'Antro del Corchia nel corso degli anni	25
- L'inizio dell'attività di monitoraggio ambientale di ARPAT	27
- Fattori di alterazione dell'ambiente ipogeo	31
- Modificazioni fisiche	
- Fattori connessi alla fruizione scientifico-culturale	
- Rifiuti connessi all'esplorazione speleologica	
- Impatto sull'ambiente delle attività antropiche esterne	
A) Attività estrattiva	
B) Rifiuti abbandonati in alcune aree della montagna	
- Contaminanti di origine naturale	
- Criteri del monitoraggio dell'ambiente ipogeo	38
Capitolo 3 - Aspetti della meteorologia ipogea	43
- Temperatura dell'aria	
- Temperatura del sistema aria-roccia	
- Umidità interna	
- Anemometria interna	
- Pressione atmosferica	
- Contenuto di anidride carbonica (CO ₂) nell'aria	
- Conclusioni	

Capitolo 4 - Le acque dell'Antro del Corchia	
Aspetti chimici e microbiologici	61
- Tipologia delle acque in ingresso nel Complesso carsico del monte Corchia -	61
Lo studio delle piogge	
- Il monitoraggio chimico delle acque	75
- Frequenza dei campionamenti	
- Postazioni di campionamento delle acque	
- Metodi di campionamento e analisi	
- Composizione delle acque	
- Origine della mineralizzazione delle acque ipogee	
- Caratteristiche chimiche delle acque dell'ambiente ipogeo e di quelle delle sue sorgenti	
- Cascata della Risalita dei Romani	
- Laghetto del Venerdi	
- Cascata della Risalita dei Lucchesi	
- Torrente della Gronda	
- Laghetto della Galleria Bassa delle Stalattiti	
- Laghetto della Galleria Alta delle Stalattiti	
- Torrente Vianello-Vidal	
- Lago Nero	
- Fontane di Cardoso	
- Altre acque dei dintorni del settore destinato a fruizione turistica	120
- Zona della Galleria della Neve	
- Cascata della Fangaia	
- Zona della Galleria Franosa	
- Altre acque del Complesso carsico del monte Corchia	
- I componenti minori	
- Nota sul residuo fisso	
- Metalli ed elementi di natura non metallica nelle acque	

- L'uranio in alcune acque dell'Antro del Corchia	136
- Aspetti microbiologici delle acque dell'Antro del Corchia	138
- Valutazioni sulle caratteristiche di potabilità delle acque dell'Antro del Corchia	149
- Valutazioni sulle caratteristiche chimiche delle acque	
- Valutazioni sulle caratteristiche microbiologiche delle acque	
- Conclusioni	
Capitolo 5 - Il monitoraggio delle acque sotterranee	157
- Idrologia del sistema carsico del monte Corchia	
- Idrodinamica del torrente Gronda	
- Considerazioni conclusive	
Capitolo 6 - L'attività di controllo ambientale	167
- Inquinamento da idrocarburi di un settore dell'Antro del Corchia (2010)	167
- Risultati analitici e valutazioni	
- Campioni di aria	
- Campioni di acque	
- Campioni di sedimenti	
- Conclusioni	
- L'inquinamento da marmettola delle acque di un settore dell'Antro del Corchia (2011)	180
Parte analitica	187
- Chimismo delle acque	

Analisi dei fanghi	191
<ul style="list-style-type: none">- Componenti principali- Metalli ed elementi di natura non metallica- L'analisi dei metalli ed elementi di natura non metallica nei fanghi- Valutazioni finali	
- Abbandono di rifiuti sul monte Corchia	201
Capitolo 7 - Il radon entro il Complesso carsico del monte Corchia	203
<ul style="list-style-type: none">- Il radon negli ambienti carsici ipogei- I riferimenti normativi e i valori limite- Materiali e metodi- Risultati- Valutazioni dei risultati- Conclusioni	
Capitolo 8 - I ciottoli della Galleria Franosa	217

Capitolo 9 - Analisi delle serie temporali	223
<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura - Decomposizione - Conclusioni - Umidità - Conclusioni - Flusso dell'aria - Conclusioni 	
Bibliografia - Normativa	248
Allegati	257
<ul style="list-style-type: none"> - Allegato 1 - Note di metodo in tema di morfometria dei ciottoli fluitati della Galleria Franosa 	(I-XX)
<ul style="list-style-type: none"> - Allegato 2 - Tabelle delle analisi delle acque del Complesso carsico del monte Corchia 	(I-XIV)

INTRODUZIONE

Sono onorato, in qualità di Direttore generale di recente nomina, di presentare questa pubblicazione che raccoglie un lavoro di ricerca ventennale per una pluralità di motivazioni. In primo luogo perché, essendo stato in gioventù uno speleologo del gruppo dei cosiddetti “fiorentini”, ho esplorato e soggiornato nel complesso carsico oggetto della ricerca, in secondo luogo per la stima che mi lega al mio istruttore, il compianto collega Alessandro Montigiani, che ha investito molte energie per promuovere un approccio scientifico allo studio delle cavità sotterranee.

Il lavoro riporta la sintesi della lunga esperienza di studio e monitoraggio del settore del Complesso carsico del monte Corchia, denominato Antro del Corchia, dove fu allestito alla fine degli anni 90 un percorso turistico ai fini della fruizione scientifico – culturale. Le attività scientifiche svolte all'interno dell'Antro del Corchia sono il risultato di importanti accordi e sinergie con il Parco regionale delle Alpi Apuane, i comuni di Stazzema e Seravezza e la Federazione Speleologica Toscana. L'attività di monitoraggio fu conseguente all'incarico conferito nel 1996 dai comuni di Stazzema e Seravezza all'Agenzia regionale per la protezione ambientale della Toscana (ARPAT) affinché, dallo studio e monitoraggio dell'Antro del Corchia, si potesse verificare la compatibilità dello stesso con il progetto di allestimento turistico. Il testo inizia con l'inquadramento geologico del Complesso carsico, uno dei più profondi d'Europa e certamente fra i più studiati, e prosegue con una serie di capitoli che inquadrano i principali filoni di monitoraggio e ricerca. Questo Complesso carsico è stato infatti oggetto di una tesi e di vari studi nel corso di molti anni, condotti da tre università toscane, CNR di Pisa e Università di Newcastle, (Australia).

Dopo avere riportato in dettaglio le motivazioni che condussero all'inizio dell'attività di monitoraggio ambientale di ARPAT, un capitolo descrive i fattori che possono alterare il sistema ipogeo; successivamente è descritta la meteorologia ipogea, di notevole interesse ai fini del mantenimento degli equilibri che consentono all'interno dell'ambiente ipogeo lo sviluppo dei vari speleotemi (stalattiti, stalagmiti e altre concrezioni). E' stato poi analizzato il sistema idrico, con un lungo monitoraggio sulla qualità chimica e microbiologica delle acque, con i possibili inquinamenti, sia in relazione alle pressioni esercitate dall'attività estrattiva sulla montagna, ma anche da fenomeni naturali (possibile alterazione microbiologica per presenza di fauna sulla montagna). Viene quindi riportato uno studio sulla presenza del radon e uno studio sui ciottoli prodotti da antichi corsi d'acqua che da moltissimo tempo hanno abbandonato i livelli oggi percorribili del Complesso carsico.

Infine è riportata l'analisi di dati recenti conseguenti, a partire dal 2018, all'installazione da parte di ARPAT nell'ambito del Progetto CAVE, di una stazione ipogea di monitoraggio della qualità delle acque lungo il Torrente Vianello-Vidal. Il lavoro rappresenta uno stato dell'arte che sicuramente non è la conclusione di un percorso, ma la base conoscitiva per continuare in prospettiva, con sempre maggior attenzione, il monitoraggio e il controllo necessari alla salvaguardia di questo prezioso patrimonio naturale.

Pietro Rubellini

Direttore generale ARPAT

GLI SPELEOLOGI ITALIANI RICORDANO
IN QUESTA GROTTA UN GRANDE
PERSONAGGIO DEL LORO VARIO MONDO
GIUSEPPE P.S. OCCHIALINI
"BEPPÒ"

CHE ALLA SUA ATTIVITÀ DI INSIGNE FISICO
AFFIANCO' LA PASSIONE PER LA SPELEOLOGIA
ESPLORANDO CON GLI AMICI FIORENTINI
L'ABISSO REVEL (1931)
E QUESTO COMPLESSO (1934),
CHE ALLORA ERANO
I PIU' PROFONDI CONOSCIUTI.
IN SEGUITO CONTRIBUI'
A SCOPRIRE ED ESPLORARE
IL GOUFFRE DE LA PIERRE SAINT MARTIN (1951-52)
CHE E' STATO SINO AL 1979
LA PIU' PROFONDA GROTTA AL MONDO.

A CURA DELLA FONDAZIONE G. OCCHIALINI-FOSSOMBRONE
10 GIUGNO 2012

*L'esplorazione del Complesso carsico del monte Corchia inizia molti anni fa.
Un ricordo di Giuseppe Occhialini posto all'ingresso del tunnel di accesso al
percorso attrezzato dell'Antro del Corchia.*

Il Complesso carsico del monte Corchia

Il monte Corchia si trova all'interno del Parco Regionale delle Alpi Apuane e si eleva nelle propaggini meridionali della catena apuana lungo lo spartiacque che collega il monte Altissimo (1589 m) al gruppo delle Panie (1859 m). Alto 1677,7 m, si presenta come un massiccio calcareo isolato e allungato in direzione NW-SE, delimitato, a sud-ovest e ovest, da pareti verticali. I suoi fianchi meridionali cadono nel bacino del Torrente Vezza, mentre quelli settentrionali rientrano nel bacino della Turrice Secca (Fig. 1.1).

Sotto questa montagna si sviluppa uno dei più grandi sistemi sotterranei d'Italia e uno dei maggiori conosciuti al mondo.

Tale sistema, ormai noto come Complesso carsico del monte Corchia, conta attualmente ben 21 ingressi ed è definito "Complesso", perché le numerose esplorazioni hanno permesso di stabilire l'esistenza di collegamenti tra i molti ambienti sotterranei, per anni creduti distinti, ma appartenenti ad un unico sistema carsico. Tale complesso "contiene" infatti tre principali settori che un tempo erano fra loro divisi: Fighiera (ingresso nei pressi della sommità del monte Corchia), Farolfi (ingresso dal Retrocorchia) e Antro del Corchia (ingresso storico da Buca d'Eolo e, successivamente, Buca del Serpente).



Fig. 1.1 - Tramonto sulla catena apuana. Il monte Corchia appare nella parte centrale di questa immagine identificato dal biancheggiare dei tagli di cava del marmo che giungono in prossimità della cima. Sulla destra l'imponente ed elegante mole della Pania della Croce.



Fig. 1.2 – Il monte Corchia da sud-ovest. Legenda:

A: Basamento paleozoico; B: serie stratigrafica di tipo carbonatico; C: cava dei Tavolini (anche da notevole distanza è osservabile l'immensa escavazione prodotta dall'estrazione del marmo); D: cima del monte Corchia, m 1677.

Questo complesso carsico costituisce un fenomeno geologico di grande rilevanza per molti elementi di particolare interesse, tra cui:

- 1) le notevoli estensione e profondità, con quasi 70 km di percorsi esplorati; il complesso carsico presenta attualmente un dislivello di 1185 metri fra l'ingresso più elevato e il fondo. Si tratta di una delle grotte più estese e profonde a livello italiano ed europeo;
- 2) gli studi da parte di strutture di ricerca nazionali, europee ed extraeuropee sugli speleotemi come indicatori paleoclimatici;

3) la presenza, nel settore ipogeo denominato Antro del Corchia, di un percorso attrezzato destinato a fruizione scientifica, culturale e turistica;

4) l'essere un Geosito riconosciuto sulla base dei criteri della ProGEO e attraverso il modello di scheda ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) per la creazione di un catasto nazionale dei geositi;

5) l'appartenenza al Parco delle Alpi Apuane che ha recentemente ottenuto il riconoscimento di geoparco aderente alla rete internazionale dei geoparchi sotto l'egida dell'UNESCO.

Il monte Corchia è formato da una successione stratigrafica che ha inizio con il basamento paleozoico formato essenzialmente da Filladi (Ordoviciano), Porfiroidi e Scisti Porfirici (Ordoviciano, Siluriano). Sovrapposti al basamento e separati da esso da un sottile e discontinuo livello

di quarziti, troviamo i termini carbonatici mesozoici: "Grezzoni" (dolomie più o meno stratificate), Marmi s.l. e Calcari Selciferi metamorfici. Al passaggio Grezzoni/Marmi si ritrovano di frequente dei livelli di Breccie di Seravezza, oppure delle lenti discontinue di Scisti a Cloritoide (Fig. 1.2 e 1.3).

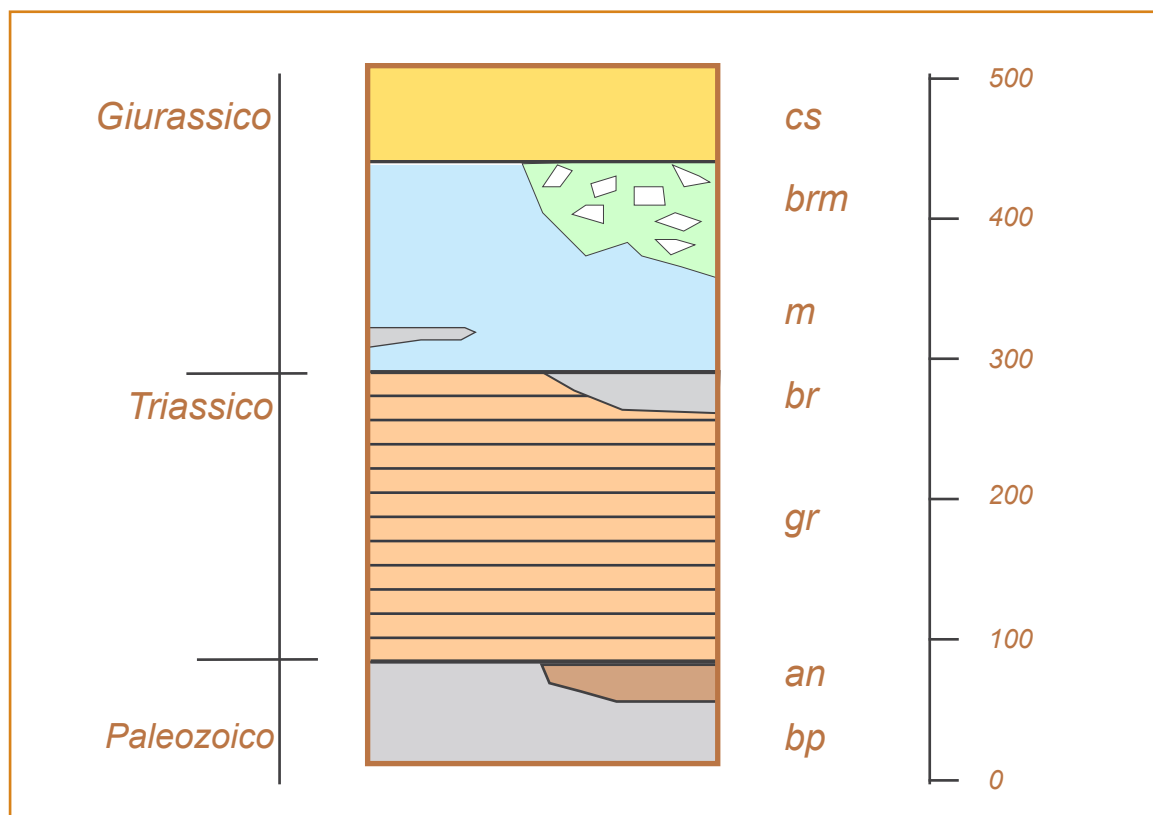


Fig. 1.3 - Schema stratigrafico della successione del monte Corchia. Legenda: **cs**: Calcari Selciferi metamorfici; **brm**: Breccie Marmoree; **m**: Marmi; **br**: Breccie di Seravezza; **gr**: Grezzoni; **an**: Anageniti del Verrucano; **bp**: Basamento Paleozoico.

Questo grande complesso carsico, che ha avuto un'importanza fondamentale nello sviluppo della speleologia italiana, fu scoperto da Emilio Simi nel 1841 (*Fig. 1.4*), ma per tutto l'800 e primi del '900 le esplorazioni si limitano alle zone vicine all'ingresso. Nel 1910-1912 si ebbero i primi tentativi di individuazione dei percorsi sotterranei delle acque usando traccianti colorati.

La speleologia moderna inizia a partire dal 1932-1936 da parte degli esploratori fiorentini con il raggiungimento del livello del Lago-Sifone a -541 metri⁽¹⁾, allora maggiore profondità raggiunta in una grotta al mondo. Dopo circa vent'anni di interruzione, anche per gli eventi bellici, le ricerche furono

riprese nel 1955-1959 da vari gruppi speleologici che raggiunsero una nuova profondità a -670 m.

Da quel momento ci si rese conto che l'Antro possedeva un gran numero di diramazioni che furono rilevate e descritte in seguito a esplorazioni compiute da speleologi inglesi (1966-1967) e da molti gruppi speleologici italiani tra il 1971 e il 1976; risalgono inoltre a quest'ultimo periodo le scoperte dell'ingresso della Buca del Serpente e dell'Abisso Claude Fighiera. L'evoluzione dei materiali (dalle scale metalliche alle corde) e la possibilità di prolungati campi in grotta ha determinato dalla fine degli anni '70 un salto di qualità nelle esplorazioni con molti chilometri di nuove diramazioni scoperte.

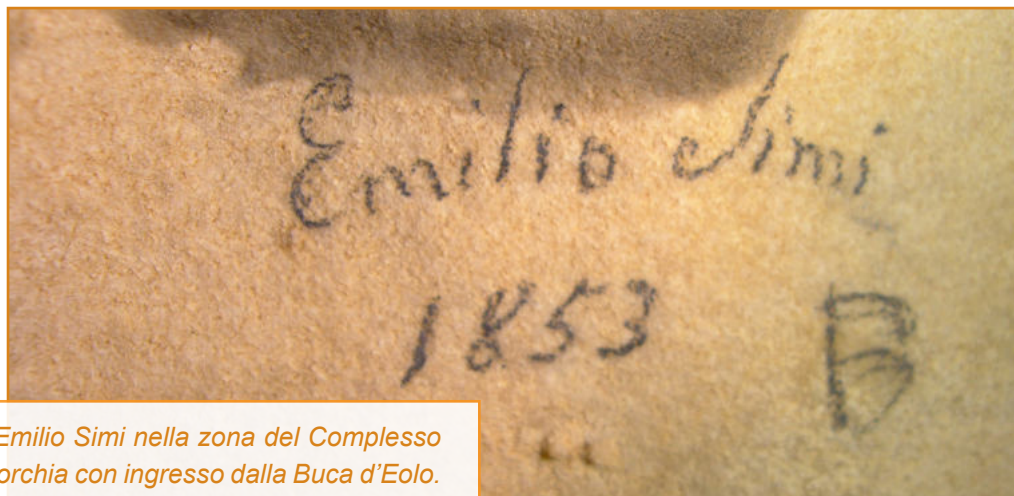


Fig. 1.4 - Scritta di Emilio Simi nella zona del Complesso carsico del monte Corchia con ingresso dalla Buca d'Eolo.

⁽¹⁾ Con il segno - si intende il dislivello in metri rispetto alla quota di ingresso. In questo caso - 541 m si riferisce al dislivello rispetto all'ingresso storico denominato Buca d'Eolo; attualmente il lago Sifone, rispetto all'ingresso più alto oggi conosciuto, si trova a profondità maggiore.

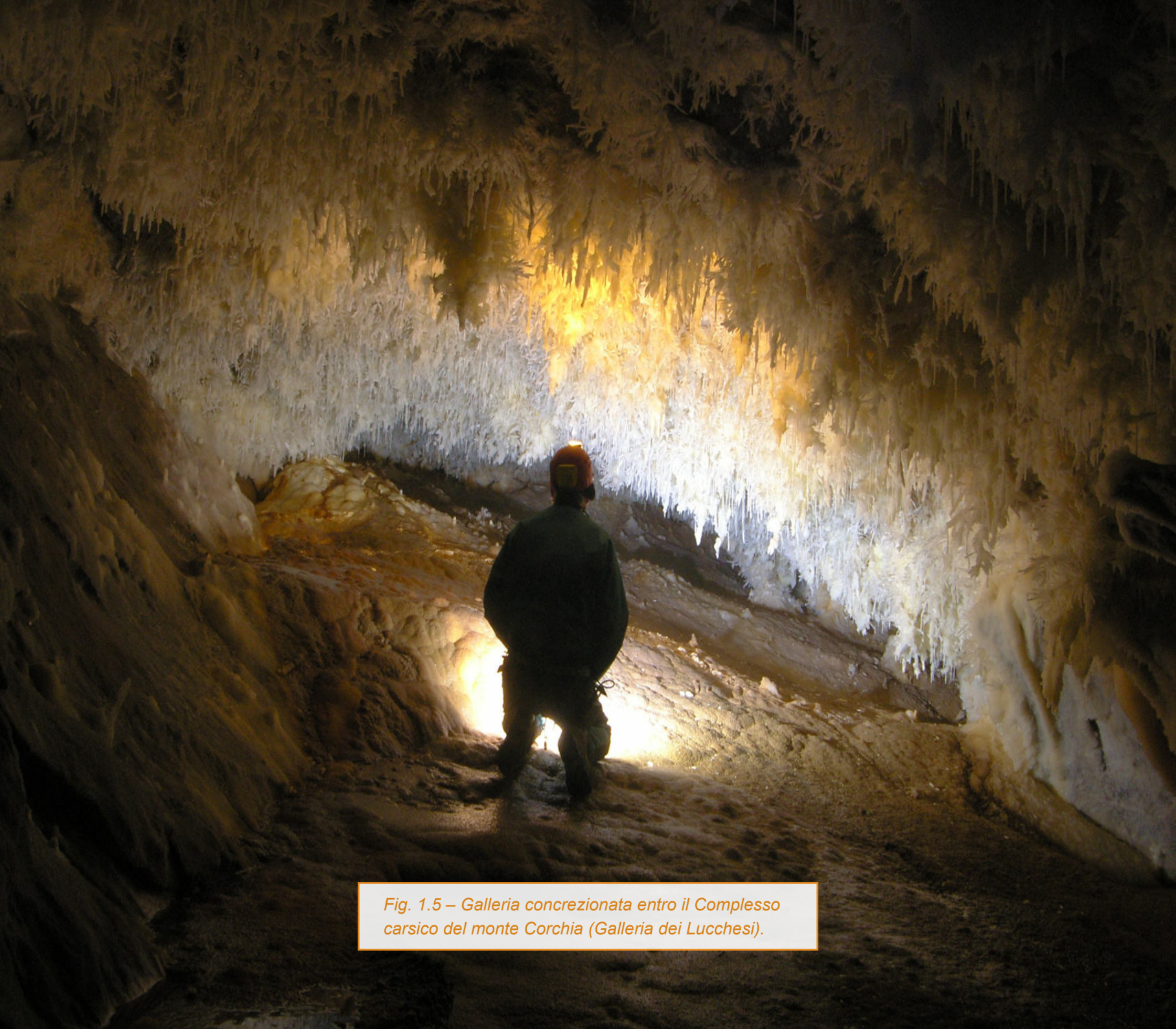


Fig. 1.5 – Galleria concrezionata entro il Complesso carsico del monte Corchia (Galleria dei Lucchesi).

Di rilevante importanza resta la scoperta, a cura di Nico Paladini, della Buca del Serpente, uno degli ingressi storici più conosciuti, scoperta che ha facilitato la frequentazione della parte più profonda del Complesso e del settore che sarà destinato alla fruizione turistica.

Nico Paladini, fondatore della Lega Alpinistica Speleologica Empolese (L.A.S.E.), dopo avere superato per la prima volta difficili strettoie, scese assieme a Giorgio Gamucci l'8 dicembre 1971 un pozzo di circa 18 metri (che fu chiamato "Empoli") ed entrò in una galleria di vaste dimensioni che solo qualche tempo dopo, grazie ai rilievi, scoprì corrispondere con una parte ben conosciuta dell'Antro del Corchia, quella parte che oggi coincide con l'inizio del percorso turistico di questa grotta, cioè la Galleria Franosa (Paladini, 2011).

Questa accelerazione nelle ricerche portò durante gli anni 1980-1990, alla scoperta di ulteriori ingressi e diramazioni (Ramo dei Fiorentini, Abisso Farolfi e Rami di Valinor) e dei collegamenti fra loro costituiti da condotti e gallerie di varie dimensioni, ed infine alla rivelazione di un unico complesso sotterraneo formato dall'unificazione dei vari abissi. Inoltre ci fu la scoperta degli ingressi alti situati a oltre 1600 m di quota, presso la vetta della montagna. L'ingresso più alto, conosciuto come Buca del Cacciatore, si apre a poche decine di metri dalla vetta della montagna, a quota 1637 m.

La scoperta di nuove diramazioni dura tuttora, e

l'ultima operazione di rilievo complessivo effettuata da Fallani e Piccini (1990) è costantemente oggetto di revisione con i nuovi rilievi in corso da alcuni anni. Il Complesso carsico del monte Corchia è senza dubbio un'area chiave per la comprensione dell'evoluzione del carsismo profondo delle Apuane; per questa ragione, questo sistema è stato oggetto di numerosi studi che hanno permesso di ricostruirne la storia evolutiva (Piccini, 1991, 1994). Ormai, da quasi un secolo il Complesso carsico del monte Corchia è oggetto di un'intensa attività esplorativa da parte di molti gruppi speleologici provenienti da molte regioni italiane e anche da alcuni paesi esteri.

Fra i vari testi scritti su questa grotta, si segnala quello di F. Utili che riporta la storia dettagliata delle prime esplorazioni e una sintesi di quelle più recenti, oltre a una ricchissima bibliografia.

Il sistema ipogeo del monte Corchia nel suo insieme costituisce un reticolo tridimensionale all'interno di un volume di roccia che ha circa una lunghezza di 2 km per 1 km di larghezza e poco più di 1 di altezza. Circa la metà dello sviluppo complessivo è dovuto a gallerie formatesi in condizioni freatiche ed epifreatiche, cioè di sommersione totale o parziale, talvolta anche profondamente modificate da successive fasi di scorrimento a pelo libero o da crolli, e suddivise in più piani sviluppati tra quota 1550 e quota 450 m s.l.m.

Il reticolo freatico è intersecato da un sistema di cavità ad andamento prevalentemente verticale e costituite da pozzi, talvolta anche molto profondi, e meandri, spesso di piccole dimensioni, scavati in regime vadoso, cioè per scorrimento verticale delle acque in zona insatura, con stillicidi e percolazioni di entità varia lungo le principali famiglie di fratture. Queste cavità verticali, che presentano le tipiche morfologie degli abissi di alta montagna così frequenti nelle altre zone delle Apuane, rappresentano l'attuale sistema di drenaggio verticale dalla superficie sino al livello della zona satura.

Le prime fasi di sviluppo del fenomeno carsico sono da far risalire probabilmente alla fine del Pliocene (circa 2,6 milioni di anni fa), periodo in cui aveva appena avuto inizio il denudamento delle formazioni carbonatiche metamorfiche apuane e il territorio si presentava con un rilievo meno accentuato dell'attuale. L'evoluzione geologica del Complesso carsico del monte Corchia ha quindi una lunga storia molto travagliata: ne sono testimoni gli ambienti di grandi dimensioni che si ritrovano anche nelle parti più alte del complesso, le condotte di diversi metri quadri di sezione che presentano sulle pareti le scallops (caratteristiche incisioni simili a colpi di sgorbia prodotte dal moto vorticoso di consistenti flussi di acqua) (Fig. 1.6); i riempimenti di conglomerati che si ritrovano in alcune zone (ciottoli arrotondati trascinati dalla

corrente, cementati dal calcare e in seguito parzialmente erosi dall'acqua), le frane, le grandi e antiche concrezioni calcaree, ecc.



Fig. 1.6 – Scallops, morfologie prodotte dallo scorrimento delle acque sotto pressione, entro la Galleria della Neve, Antro del Corchia.

È evidente che, in tempi remoti, l'acqua a più riprese ha invaso, successivamente abbandonato e nuovamente allagato, varie gallerie e ambienti ipogei. Se si considera la quota a cui si nota il fenomeno sopra descritto, è lecito supporre che quella che oggi è la cima del monte Corchia costituiva in un tempo lontano una zona di fondovalle percorso da torrenti che si inabissavano

nelle fratture degli strati calcarei. Fenomeni di erosione esterna hanno modificato definitivamente il bacino di alimentazione del complesso; inoltre, nel tempo, il livello della falda acquifera si è abbassato fino a quello attuale che vede la maggior parte del complesso non più interessato dalla circolazione dell'acqua (Fig. 1.7).

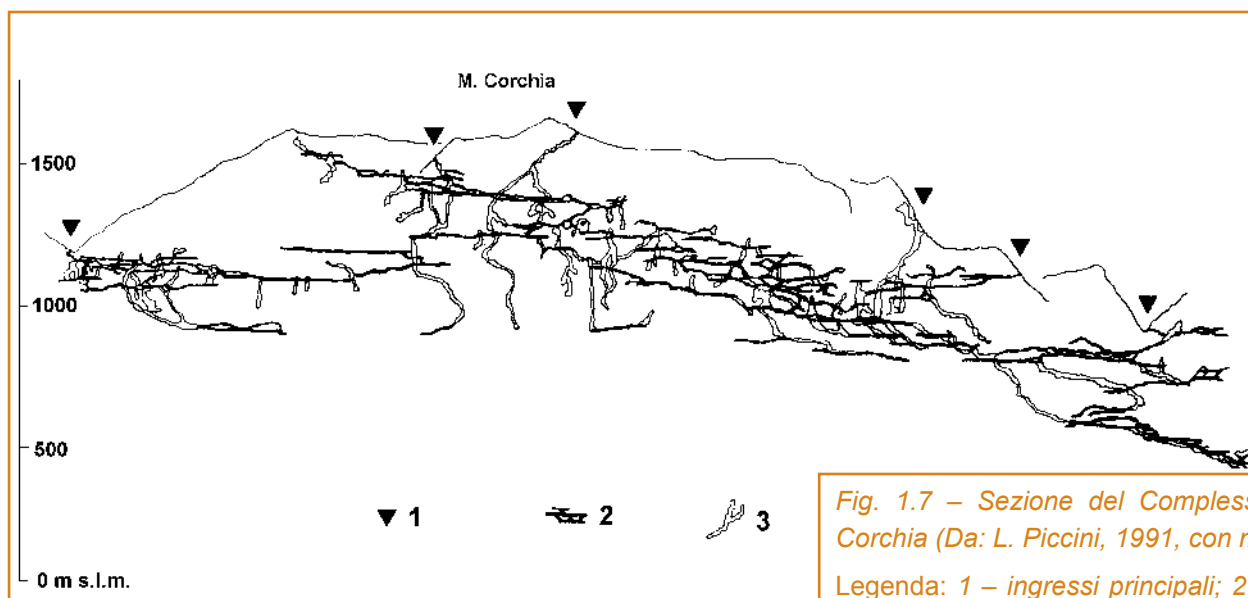


Fig. 1.7 – Sezione del Complesso carsico del monte Corchia (Da: L. Piccini, 1991, con modifiche).

Legenda: 1 – ingressi principali; 2 - gallerie sviluppatesi in condizioni freatiche; 3- condotti sviluppati in condizioni vadose.

Nota: In genere in un massiccio carsico si possono riconoscere tre zone, dall'alto verso il basso, con caratteristiche diverse per quanto riguarda la circolazione delle acque e le forme ed i processi carsici che avvengono. La zona superiore è detta **zona vadosa** o di **percolazione**; le cavità presenti sono percorse dall'acqua solo occasionalmente, a seguito delle precipitazioni, e il flusso dell'acqua è prevalentemente verticale. La zona inferiore è chiamata **zona freatica** e tutte le cavità sono costantemente sature di acqua, il cui flusso è prevalentemente orizzontale; nelle condotte e nelle gallerie l'acqua si muove in pressione e quindi può anche risalire verso livelli più superficiali. La zona intermedia, chiamata **zona di transizione (o anche epifreatica)** è di fluttuazione, cioè a seconda della quantità di acqua può essere in condizioni freatiche o vadose.



Fig. 1.8 – Pozzo di accesso al sistema carsico Fighiera, parte alta del Complesso carsico del monte Corchia.



Fig. 1.9 - La bocca di “troppo pieno” delle Fontane di Cardoso, principale sorgente alimentata dalle acque circolanti nel Complesso carsico del monte Corchia (piena del 1 novembre 2014).

Da un punto di vista idrogeologico, attualmente il monte Corchia costituisce un'idrostruttura relativamente isolata, circondata dalle rocce impermeabili del basamento. Al suo interno si trovano corsi di acqua perenni, con portata variabile con la stagione e la piovosità. Il collettore principale, a seconda del settore prende i nomi di Gran Fiume dei Tamugni, fiume Vidal e fiume Vianello, il principale affluente è invece noto come torrente della Gronda. Ci sono alcuni punti dove un apporto idrico è rilevabile solo in occasione di piogge intense e frequenti (la cascata a metà della galleria Franosa, la zona della Galleria della Neve e altri settori). Sono presenti anche corpi lacustri di

acqua stagnante o in lento movimento (lago Sifone, lago Paola, laghetto del Venerdì, laghetto Galleria Alta e laghetto Galleria Bassa delle Stalattiti, lago Nero, ecc.).

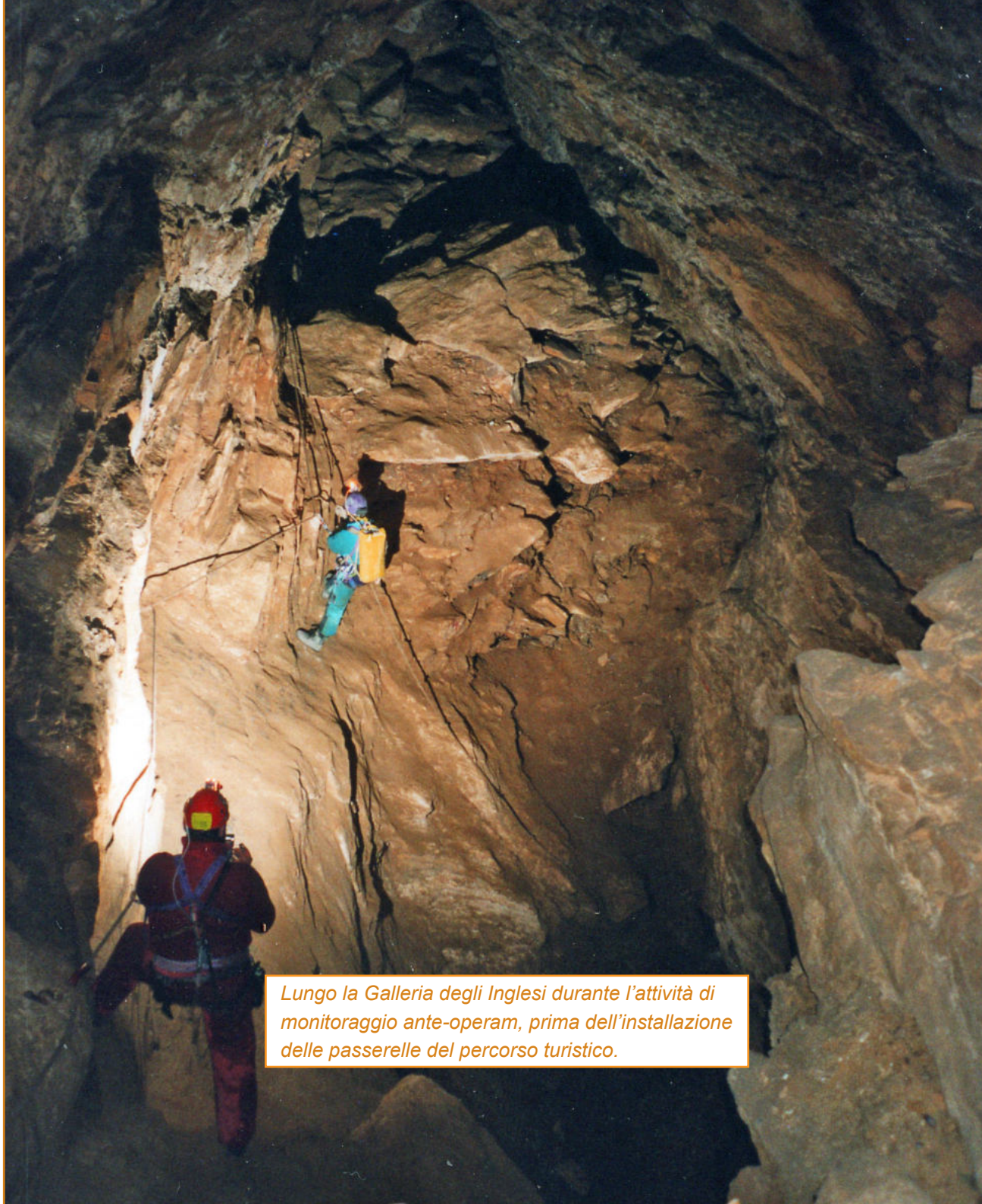
Le sorgenti alimentate dalle acque circolanti nel Complesso carsico del monte Corchia si trovano nella vallata di Cardoso e sono rappresentate da 3 sorgenti, fra loro molto vicine, denominate Fontanacce (o Fontane) di Cardoso (*Fig. 1.9*), localizzate poco a monte del paese di Ponte Stazzemese, la cui portata complessiva è mediamente intorno a 200 L/s (Cazzante et al. 1988, Piccini et al., 1997).

In una parte del Complesso carsico del monte Corchia, nelle vicinanze, dell'ingresso della Buca del Serpente, negli anni 2000-2001 è stato installato un percorso attrezzato per consentirne la fruizione turistica e scientifico-culturale della parte più frequentata del sistema.

Nel corso degli anni, anche grazie alla collaborazione con strutture universitarie, con lo stesso Parco delle Alpi Apuane e con la Federazione Speleologica Toscana, sono stati pubblicati vari lavori, sia sull'attività di monitoraggio, sia su particolari ricerche, prevalentemente, nell'area del settore destinato a fruizione turistica.



Fig. 1.10 - Scritte storiche di esplorazioni del secolo scorso nei pressi del laghetto del Venerdi.



Lungo la Galleria degli Inglesi durante l'attività di monitoraggio ante-operam, prima dell'installazione delle passerelle del percorso turistico.



Fig. 2.1 - Galleria artificiale che conduce entro il ramo turistico dell'Antro del Corchia.

L'utilizzo ai fini turistici di un settore del Complesso carsico del monte Corchia denominato Antro del Corchia trae origine da un progetto successivo sia a lunghe operazioni politiche e di analisi dei costi da parte del Parco delle Apuane, in accordo con le comunità locali e la Federazione Speleologica Toscana, sia a un lungo periodo di rapporti contrastanti tra cavatori e speleologi che a partire dal 1984 iniziarono ad essere piuttosto conflittuali, per il crescere della sensibilità ambientale e per il contemporaneo uso massiccio di nuove tecnologie per l'estrazione dei marmi.

Infatti, su un territorio montano così ristretto, l'uso di strade di arroccamento per nuove cave, a quote anche molto elevate (nel caso specifico fino alla sommità di cresta del monte Corchia) e i tagli con filo diamantato e tagliatrici a catena, avevano moltiplicato i rischi di inquinamento e di alterazioni ambientali all'interno del complesso ipogeo.

Fino alla metà degli anni '90 si trascina nell'area apuana un conflitto più o meno aperto tra gli interessi dei cavatori e della comunità locale e le esigenze ambientali; successivamente, in un mutato clima di costruttivi confronti fra vari soggetti e istituzioni, si arriva nel 1997-1998 al progetto da parte del Parco delle Alpi Apuane di realizzazione di un percorso destinato a fruizione turistica in un settore dell'Antro del Corchia; questo progetto è conseguente, tra l'altro, alla deliberazione del Consiglio regionale

della Toscana n. 243 del 25 luglio 1996 che stabilisce un contributo ai comuni di Stazzema e Seravezza per lo studio e il monitoraggio dell'Antro del Corchia per l'individuazione della sua capacità di fruizione compatibile con l'ecosistema ipogeo.

Viene pertanto sottoscritto un protocollo di intesa tra Parco delle Alpi Apuane e Federazione Speleologica Toscana, nel quale, fra l'altro, era stata posta come condizione indispensabile alla realizzazione del progetto, che fosse attuato, prima dell'inizio dei lavori, uno studio e monitoraggio dell'ambiente ipogeo. L'esigenza di questo monitoraggio è derivata dalla consapevolezza che gli interventi necessari per installare un percorso turistico artificiale e, successivamente, l'accesso di gruppi di visitatori, avrebbero potuto modificare l'equilibrio naturale e provocare danni all'ambiente sotterraneo, con modificazioni irreversibili delle condizioni naturali esistenti nel corso della fruizione turistica.

L'Agenzia regionale per la protezione ambiente della Toscana (ARPAT), fu incaricata del monitoraggio ambientale della parte dell'Antro del Corchia interessata dal progetto.

Il progetto è stato attuato mediante la realizzazione di una galleria artificiale per l'accesso al tratto turistico e con l'installazione di passerelle e scalette in acciaio inossidabile per un percorso totale di circa 1800 metri, interessante il tratto dell'Antro del Corchia che va dalla Galleria Franosa fino alla

Galleria delle Stalattiti passando per la Galleria degli Inglesi e la Galleria del Venerdi.

Per poter consentire i lavori di allestimento del percorso entro la grotta e perché questo potesse essere poi accessibile ai visitatori, è stata quindi scavata una galleria artificiale, che dall'ingresso di una vecchia cava dismessa, localizzata lungo la marmifera che dal paese di Levigliani conduce alle cave Piastraio sul monte Corchia, va a intercettare la prima galleria del percorso turistico denominata Galleria Franosa. In data 10 luglio 1999 è stato aperto l'ultimo diaframma che separava l'ingresso artificiale dalla Galleria Franosa ed è stata installata al suo posto una porta stagna.

Poco dopo sono iniziati i lavori di allestimento vero e proprio che si sono conclusi nel 2001. L'inaugurazione ufficiale del percorso scientifico-culturale è avvenuta il 4 agosto 2001.

Il monitoraggio dell'Antro del Corchia nel corso degli anni

Per monitoraggio ambientale si intende il controllo nel tempo di alcuni parametri ritenuti di particolare interesse allo scopo di verificare lo stato di un determinato ambiente. Questo comporta l'osservazione, il rilevamento e l'analisi sistematica di un fenomeno che può interessare una o più matrici ambientali per un determinato periodo di tempo e in una prefissata area geografica allo scopo di studiare le cause delle eventuali modifiche, e il legame con eventi naturali o interventi antropici. Per alcuni parametri il monitoraggio può essere continuo negli anni, mentre per altri parametri può essere condotto per campagne.

Un monitoraggio presuppone la chiara identificazione dello scopo per cui è effettuato e l'acquisizione preventiva delle necessarie conoscenze scientifiche e ambientali relative alla situazione da monitorare e di conseguenza la corretta individuazione delle matrici ambientali e dei parametri significativi da misurare, delle postazioni più rappresentative dove effettuare le misure e i campionamenti e della frequenza necessaria a garantire la loro rappresentatività.

Si possono distinguere fondamentalmente due periodi.

Il primo, detto monitoraggio ante-operam va dalla stipula della Convenzione per il monitoraggio dell'Antro del Corchia fino all'inizio dei lavori di allestimento del percorso scientifico-culturale

Fig. 2.2 – In attesa degli acquisitori in continuo, prime misure dell'anidride carbonica nell'aria entro la Galleria del Venerdì (A. Montigiani e F. Mantelli, 1998).



Fig. 2.3 - Acquisizione di dati dalla prima strumentazione impiegata per il rilevamento dei parametri meteorologici (studio del microclima ipogeo) posizionata lungo la Galleria del Venerdì (1998).



(ottobre 1999). Per alcuni aspetti e per quanto tecnicamente possibile prosegue anche contemporaneamente ai lavori. Questa prima fase del monitoraggio è stata principalmente rivolta a:

- a)** quantificare i valori del fondo naturale (in modo particolare per i parametri microclimatici) dei parametri caratterizzanti la situazione ambientale in studio;
- b)** definire la compatibilità dell'ambiente con la fruizione turistica;
- c)** rilevare eventuali impatti immediati che i lavori di allestimento potevano creare specialmente sulla matrice acqua.

Il secondo periodo è quello del monitoraggio permanente che è iniziato nel 2002, dopo una proposta di monitoraggio presentata da ARPAT alla fine del periodo ante-operam ed è proseguito fino a tempi recenti.

Durante questo periodo, non senza difficoltà, si è continuato a monitorare una serie di parametri fondamentali di tipo microclimatico e di tipo chimico-fisico e microbiologico sulle acque al fine di valutare nel tempo la risposta dell'ambiente alla fruizione turistica e tenere maggiormente sotto controllo eventuali impatti di origine esterna.

L'inizio dell'attività di monitoraggio ambientale di ARPAT

La Giunta Regionale Toscana aveva deliberato il 30.10.95 di assegnare al Parco delle Alpi Apuane i finanziamenti per la fruizione scientifico-culturale dell'Antro del Corchia. Il Consiglio Regionale del 25.07.96 con la delibera n. 243, visti e sentiti vari enti, aveva invitato i Comuni di Seravezza e Stazzema a conferire incarico ad ARPAT per effettuare un'attività di studio e monitoraggio dell'Antro del Corchia ai fini dell'individuazione della sua capacità di fruizione compatibile con l'ecosistema ipogeo. Veniva altresì disposto che il monitoraggio avrebbe avuto inizio almeno un anno prima dell'esecuzione dei lavori previsti per l'accessibilità alla grotta. Il Consiglio Regionale era stato sollecitato a questa risoluzione da un deciso e proficuo intervento della Federazione Speleologica Toscana (FST). I comuni di Seravezza e Stazzema avevano pertanto conferito incarico ad ARPAT come disposto dalla Regione Toscana con delibere rispettivamente n. 877 e n. 260 del 1996.

ARPAT con decreto del Direttore generale (DDG) n. 230 del 13/05/97 aveva accettato l'incarico e stipulato la convenzione con i Comuni di Seravezza e Stazzema finalizzata allo "Studio e monitoraggio dell'Antro del Corchia per l'individuazione della sua capacità di fruizione compatibile con l'ecosistema ipogeo relativamente al tratto (e zone adiacenti) individuato dal Parco delle Alpi Apuane per fruizione scientifico-culturale al fine di fornire al Parco delle

Apuane la definizione della capacità di carico di tale ambiente relativamente al progetto di fruizione turistica".

Fig. 2.4 - Il passaggio attraverso la Buca del Serpente, con le relative strettoie, comportava lunghi tempi per raggiungere le zone che sarebbero state interessate dal progetto di fruizione turistica (1997).



**DECRETO N. 230
DEL 13-05-97**

OGGETTO : Delibera del Consiglio Regionale Toscano n° 243 del 25 luglio 1996 : incarico per lo studio e il monitoraggio ambientale dell'Antro del Corchia.

IL DIRETTORE GENERALE

Vista la L.R. n. 66 del 18.04.1995 "Istituzione dell'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana";

Vista la Deliberazione della G.R. n. 3943 del 31.07.1995 con la quale il sottoscritto è stato nominato Direttore Generale dell'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana;

Vista la Deliberazione del Consiglio Regionale della Toscana n° 243 del 25 luglio 1996 che stabilisce che il residuo di £ 46.000.000 = sul contributo assegnato sulla L.R. n° 20/84 ai Comuni di Stazzema e Seravezza venga destinata allo studio ed al monitoraggio dell'Antro del Corchia per l'individuazione della sua capacità di fruizione compatibile con l'ecosistema ipogeo ;

Viste le Delibere dei Comuni di Stazzema e Seravezza, rispettivamente n° 260 del 15 ottobre 1996 e n° 877 del 31-12-96 con le quali viene incaricata l'ARPAT di procedere all'esecuzione dello studio e monitoraggio dell'Antro del Corchia, mettendo ciascuno a disposizione la somma di £ 23.000.000= ;

Considerato che il suddetto finanziamento comporta una entrata di £ 46.000.000 = nel bilancio dell'Agenzia alla voce A)2 "Proventi e ricavi diversi" ;

Acquisiti i pareri favorevoli del Direttore Amministrativo e del Direttore Tecnico, acquisiti mediante sottoscrizione in calce al presente atto ;

Visto l'art. 8 della L. R. n° 48 del 03.09.1992;

D E C R E T A

- 1) di accettare l'incarico del Comune di Stazzema e di Seravezza per lo studio ed il monitoraggio ambientale dell'Antro del Corchia per la individuazione della sua capacità di fruizione compatibile con l'ecosistema ipogeo, secondo il progetto a suo tempo predisposto ed approvato dal Consiglio della Regione Toscana con Deliberazione n° 243 del 25 luglio 1996;
- 2) di provvedere l'entrata di £ 46.000.000 = alla voce A)2 "proventi e ricavi diversi" del bilancio di esercizio 1997 dell'Agenzia ;
- 3) di approvare la convenzione fra l'ARPAT ed i Comuni di Seravezza e Stazzema che si allega al presente atto (all. A) ;
- 4) di nominare il Dott. Alessandro Montigiani quale responsabile del procedimento, e coordinatore del gruppo operativo ;
- 5) di trasmettere il presente decreto al Collegio dei Revisori ai sensi dell'art. 9 della L.R.T. n° 48 del 03.09.1992 e dichiarato immediatamente eseguibile ai sensi dell'art. 47,3 comma della L. 142/90.

GR/fg dec. Antro del Corchia

Il Direttore Generale
(Dr. Alessandro Lippi)

Fig. 2.5 - Decreto del Direttore generale ARPAT n. 230 del 13/05/97 che accetta l'incarico del comune di Stazzema e Seravezza per lo studio e monitoraggio dell'Antro del Corchia.

**COMUNE DI STAZZEMA (Lucca)
PARCO DELLE ALPI APUANE**

piazza Europa, 2
55040 Pontestazzemese (Lucca)



Prot. n.: 3699

Pontestazzemese, 28 settembre 1998

Oggetto: *Richiesta contributi ex L.R. n. 20/84 per studio e monitoraggio Antro del Corchia*

**All'Assessore all'Ambiente
della Regione Toscana**

e, p.c.,

*al Direttore Generale
dell'A.R.P.A.T.*

Ai sensi degli artt. 6 e 7 della L.R. n. 20/84, il Comune di Stazzema - con l'avallo del Parco Regionale delle Alpi Apuane - richiede con la presente un congruo contributo per portare a termine la ricerca già intrapresa (e giunta ad una prima definizione) di studio e monitoraggio della cavità carsica "Antro del Corchia", ubicata nel proprio territorio comunale.

A tal proposito, in allegato alla presente, si trasmette il *"Progetto per il completamento dello studio e la realizzazione di un sistema di monitoraggio permanente del tratto di grotta interessato dal progetto di fruizione turistica"*, di cui al finanziamento sul Reg. comunitario n. 2081/93, obiettivo 5/b, misura 6.3

Resta inteso che questo secondo studio sarà condotto, come il precedente, dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, la quale si è detta disponibile alla cosa, nel corso di una riunione convocata presso il Municipio di Stazzema, lo scorso 19 settembre.

La necessità di un ulteriore e parimenti rigoroso studio nasce dall'esigenza di ottenere una più completa serie di dati ed informazioni sulla capacità di fruizione pubblica dell'Antro del Corchia, compatibile con l'ecosistema ipogeo.

Distinti saluti.

*Fig. 2.6 - Atti del Comune di Stazzema
in relazione allo studio e monitoraggio
dell'Antro del Corchia.*

**Il Commissario straordinario del Parco
(Luigi Grassi)**

**Il Sindaco di Stazzema
(Gian Piero Lorenzoni)**

La Convenzione aveva inoltre stabilito l'articolazione dello studio e monitoraggio ante-operam in 3 fasi fondamentali:

1° FASE

Raccolta e razionalizzazione delle conoscenze.

Ambiente esterno:

- ↘ individuazione degli ingressi del sistema ipogeo;
- ↘ presenza e coesistenza delle attività antropiche nelle zone di interesse;
- ↘ presenza di specie animali e vegetali.

Ambiente interno:

- ↘ individuazione delle postazioni per il monitoraggio;
- ↘ censimento dei danni alle concrezioni presenti;
- ↘ scelta dei parametri relativi al microclima ipogeo e alla tipologia delle acque (parametri fisico-chimici di composizione) per l'indagine di prima conoscenza.

2° FASE

Individuazione di una serie di parametri significativi, scelti in base alle conoscenze acquisite e dopo valutazione dei risultati della prima serie di misure, da ricercare nei successivi monitoraggi ambientali e da integrarsi con monitoraggi in continuo sulle matrici acqua ed aria.

3° FASE

Relazione sui dati raccolti, informatizzazione, valutazioni sullo stato dell'ambiente, considerazioni e proposte.

Per raggiungere questi obiettivi venne messo a punto un programma di lavoro che prevedeva la collaborazione della Federazione Speleologica Toscana (FST) che si impegnavano ad offrire supporto scientifico e logistico ed a presentare una relazione sullo stato attuale del tratto che avrebbe di lì a poco subito la trasformazione turistica.

Per attuare quanto disposto nella Convenzione venne costituito un Gruppo Operativo di monitoraggio, composto da personale ARPAT che univa le competenze tecniche in ambito chimico, fisico, biologico e geologico e con esperienza personale per l'attività speleologica.

La realizzazione di questo programma di massima, i cui contenuti e mezzi si sono affinati nel corso del tempo, cominciò nel mese di maggio 1997.

Fattori di alterazione dell'ambiente ipogeo

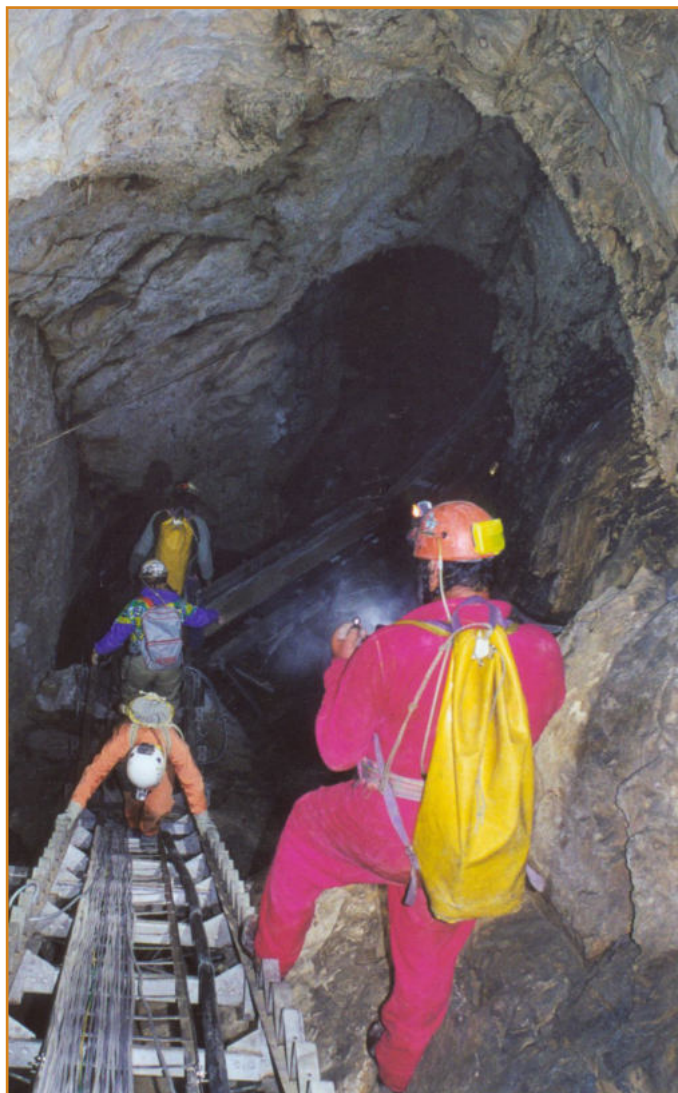


Fig. 2.7 - Mantenimento dell'attività di monitoraggio durante l'allestimento delle passerelle lungo il percorso nel settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica (Anno 2000).

Per definire i criteri da adottare nel monitoraggio era stato necessario prendere in esame le possibili cause di alterazione del sistema. La situazione ambientale che a suo tempo fu rilevata dal Gruppo Operativo di monitoraggio ARPAT era condizionata principalmente da alcuni fattori, spesso anche in sinergia tra loro, con differente peso sulle condizioni microclimatiche e sulla risorsa idrica, molti dei quali ancora sussistono.

Qui di seguito sono riepilogati i più significativi.

Modificazioni fisiche

Qualsiasi modificazione fisica apportata al sistema che alteri sostanzialmente gli scambi energetici con l'ambiente esterno o tra una porzione di grotta e l'altra, può spostare sensibilmente l'equilibrio microclimatico esistente. Raramente si tratta di variazioni macroscopicamente misurabili e valutabili in tempo reale in quanto stiamo trattando di un sistema i cui tempi di risposta possono essere molto lenti. Come già accennato, l'apertura di nuovi ingressi, che induce scambi energetici con l'ambiente esterno, dove le energie messe in gioco sono di diversi ordini di grandezza superiori a quelle dell'ambiente ipogeo, può alterare sensibilmente l'equilibrio esistente. L'ecosistema reagisce nella continua ricerca di un nuovo equilibrio e ciò si traduce in pratica, per alcune zone dell'ambiente ipogeo, in un'evoluzione spesso in contrasto con la situazione ambientale che ne ha permesso la genesi.

Tra i fattori da considerare con un peso più consistente nella modifica degli equilibri interni della grotta, c'è l'alterazione dello stato del microclima legata all'apertura della galleria artificiale; per tale ragione fu subito provveduto, su indicazione del Gruppo Operativo di monitoraggio ARPAT, all'installazione di 3 porte stagne.

Già limitando inizialmente l'analisi al solo tratto di grotta destinato alla fruizione turistica, si evidenziarono precocemente alcuni fattori contribuenti ad influenzare lo stato dell'ambiente carsico, quali:

✓ Presenza di 11 ingressi accessibili da speleologi. Molti altri, naturali o dovuti all'intercettazione di gallerie in seguito all'attività estrattiva, non sono collegati con passaggi transitabili. Di questi, quattro sono considerati ingressi bassi e sette ingressi alti. Due degli ingressi bassi, Buca del Serpente e Buca dei Pompieri, sono direttamente in collegamento con il percorso turistico ed immettono, o sottraggono secondo le stagioni, notevoli quantità d'aria. All'ingresso denominato Buca del Serpente, per esempio, è stato misurato il vento fino a 78 km/h in una sezione di 0,4 m², circa, pari ad una portata stimata di 9 m³/s.

✓ Confluenza in tutta la lunghezza del percorso, tramite condotti di sezione anche molto elevata

(si arriva a sezioni dell'ordine di 100 m²), di masse d'aria provenienti dai livelli superiori o inferiori del complesso.

✓ Presenza di corsi d'acqua perenni, con portata variabile con la stagione e la piovosità; fra questi i più noti sono: la cascata dei Romani, la cascata della Gronda, la cascata dei Lucchesi. Ci sono alcuni punti dove un apporto idrico è rilevabile solo in occasione di piogge intense e frequenti (la cascata a metà della Galleria Franosa, la zona della galleria della Neve).

✓ Fenomeni di percolazione delle acque visibili lungo alcuni tratti del percorso ed in particolare nella zona della Galleria delle Stalattiti, ma anche all'inizio della Galleria Franosa in occasione di piogge anche di media intensità (tanto che la passerella sarà in seguito protetta da una tettoia).

Fattori connessi alla fruizione scientifico-culturale

Tra i fattori da considerare in relazione alla fruizione turistica nella modifica degli equilibri interni della grotta, oltre alla possibile causa di alterazione dello stato del microclima legato all'apertura della galleria artificiale, si è dovuto valutare l'immissione di altre fonti energetiche quali le luci, il calore corporeo, il contenuto di anidride carbonica dell'aria emessa durante la respirazione dai frequentatori della grotta. Le lampade, in particolare, producono energia luminosa che attiva la fotosintesi con possibili conseguenze di fioriture algali, inoltre producono anche una certa quantità di calore che, in ambienti con scarso ricambio di aria, può essere causa di un aumento significativo della temperatura, nel senso di valore sufficiente a spostare gli equilibri speleogenetici.

Ai fini della possibile alterazione del sistema carsico, occorre inoltre considerare le spore ed altro materiale organico trasportato sui vestiti o sotto le scarpe. E' anzitutto da considerare che ogni persona introduce in un sistema prossimo alla sterilità dei microrganismi, che in ambiente umido e in presenza di luce, possono svilupparsi determinando contaminazioni dell'acqua e del suolo.

Anche la frequentazione speleologica può avere delle conseguenze legate ad alcuni di questi fattori, ma più limitate in relazione al numero più esiguo di



Fig. 2.8 - La Buca del Serpente, ingresso comunemente usato per alcuni anni per l'accesso alla grotta durante il periodo di monitoraggio ante-operam. Essendo un "ingresso basso", in inverno aspira aria determinando un forte raffreddamento nella iniziale della grotta, talvolta con depositi di ghiaccio e neve anche all'interno della relativa galleria.

persone che percorrono una grotta.

L'aumento della temperatura e del tenore dell'anidride carbonica nell'aria possono avere conseguenze rilevabili anche in tempi relativamente brevi (su base stagionale o annuale).

Mettendo in relazione la massa corporea e la superficie corporea con il consumo di ossigeno e con la produzione di anidride carbonica, con le dovute approssimazioni che derivano da un riferimento ad un individuo medio per altezza, peso, superficie corporea, si può stimare per ogni visitatore della grotta una produzione di anidride carbonica pari a 22,5 grammi per ogni ora di permanenza.

Anche l'effetto di riscaldamento dell'aria determinato dalla presenza di persone in un ambiente confinato può essere stimato. Una persona del peso di 70 kg e 1,70 metri di altezza, approssimativamente possiede un volume corporeo di 70 dm³ ed una superficie corporea di 150 dm², respira e conseguentemente emette alla temperatura di circa 37 °C una quantità d'aria in condizioni di riposo pari a circa 20 L/minuto mentre la temperatura dell'aria ambiente nel Corchia è di circa 7,5 °C. Anche trascurando il contributo derivante dal calore radiante, che è limitato dalla presenza degli abiti, un gruppo di 100 persone riscalda ad una temperatura vicina a 37 °C una massa d'aria pari a circa a 120 m³ per ogni ora di permanenza.

Rifiuti connessi all'esplorazione speleologica

I rifiuti che erano presenti in alcune zone dell'Antro del Corchia, tra cui quelle destinate alla fruizione turistica, erano da collegarsi al fatto che queste aree sono state nel corso dei vari decenni molto frequentate dagli speleologi; in passato, le maggiori difficoltà d'accesso a tali zone rendevano anche più complicato il trasporto all'esterno di tali rifiuti prodotti nel corso dell'attività esplorativa; soprattutto non era diffusa la conoscenza dei possibili impatti ambientali causati da materiale di rifiuto abbandonato, in particolare in aree sensibili come sono i sistemi carsici.

Molti rifiuti possono rilasciare sostanze inquinanti,



Fig. 2.9 - Vecchie batterie trovate durante l'operazione di pulizia del settembre 2001 nei pressi del Campo Base localizzato nella galleria presso la base della Risalita dei Lucchesi (Antro del Corchia) utilizzato durante le esplorazioni degli anni '60.

pochi sono quelli costituiti da materiale prevalentemente inerte che determina disturbi solo di tipo estetico. I rifiuti abbandonati erano costituiti soprattutto da materiale plastico e cartaceo, batterie usate, lattine e scatolette e materiale organico in putrefazione e in aggiunta residui di carburo per le lampade ad acetilene, oggi non più in uso. Fu effettuata un'estesa operazione di pulizia a cura della FST e del Parco delle Alpi Apuane (1 e 2 settembre 2001) del deposito di rifiuti interrato presso il Campo Base nei pressi della cascatella della Risalita dei Lucchesi; il materiale fu raccolto e, con le opportune cautele, portato all'esterno.

Impatto sull'ambiente delle attività antropiche esterne

In sintesi gli elementi emersi durante il monitoraggio come particolarmente significativi in relazione all'impatto ambientale sono risultati i seguenti.

Attività estrattiva

Il monte Corchia rappresenta uno dei casi più tipici delle varie problematiche di compatibilità tra attività estrattiva e salvaguardia del patrimonio ambientale. Le cave attive all'epoca ed ancora oggi sono raggruppate in tre zone: le cave dei Tavolini, situate nella parte alta della montagna a oltre 1500 m di quota, le cave di Piastraio, situate sul versante marino intorno ai 1200 m di quota, e la cava di Borra Larga, situata nei pressi del Canale delle Volte. Quelle che più minacciano l'integrità del complesso sotterraneo sono soprattutto le cave dei Tavolini che, durante l'approfondimento del piano di escavazione, hanno più volte intercettato alcune cavità carsiche connesse con il sistema sotterraneo. Anche l'attività delle cave del Piastraio, che si svolge prevalentemente in galleria, minaccia alcune diramazioni del complesso carsico distanti non più di un centinaio di metri dalla zona di escavazione.

Problemi di degrado degli ambienti sotterranei dovuti all'attività estrattiva erano già stati segnalati in passato sotto forma di presenza di depositi di fanghi di taglio del marmo (marmettola) ed

Fig. 2.10 - La cava dei Tavolini sul monte Corchia. Gli scavi interessano ampi volumi della montagna con possibile interessamento del relativo Complesso carsico.



episodica registrazione di intorbidamenti biancastri delle acque interne. Tali evidenze, benché presenti prevalentemente al di fuori del tratto interessato dalla fruizione turistica, dimostravano la vulnerabilità dell'intero complesso e delle sue acque.

Si ricorda a questo proposito un articolo pubblicato su *Speleologia* nel marzo 1994 (GSF, 1994), che riporta come fra le cause che avevano portato alla chiusura di 7 cave nel comune di Stazzema su ordine della magistratura, ci fossero sia la possibile interferenza fra attività estrattiva e il complesso carsico del monte Corchia, sia l'inquinamento della grotta dovuto allo scarico di marmettola, anche contenente idrocarburi.

Quando è presente un'attività di cava, un altro fattore di possibile inquinamento è costituito infatti dagli idrocarburi che possono provenire da perdite dei depositi di combustibile, dai trasformatori elettrici, dalle macchine in movimento ed altro. Inoltre non si può neppure escludere la presenza di altri possibili inquinanti altamente persistenti nell'ambiente come i policlorobifenili (PCB), un tempo componenti degli oli dielettrici dei trasformatori.

Da quegli anni forse qualcosa è cambiato nella conduzione delle attività estrattive in un ambiente così vulnerabile come il monte Corchia, nella mentalità dei pubblici amministratori, nelle imprese che lavorano su quella montagna e in tutti coloro che vi gravitano attorno. Ma, a conferma della fatica a mettere radici da parte di una nuova

cultura, si registrano anche negli ultimi anni due episodi di inquinamento (riportati in dettaglio in altro capitolo): il primo nel 2010 dovuto ad idrocarburi, mentre il secondo, verificatosi nel 2011, per presenza di depositi di fanghi di taglio del marmo (marmettola). Senza entrare nel merito sull'opportunità dell'estrazione del marmo in quel particolare contesto ambientale, è innegabile il fatto che l'impatto di quella attività sulle acque e sullo stesso sistema carsico non può essere trascurabile. Difficile una valutazione quantitativa di possibili danni sul sistema, ma certamente opere estrattive di tale intensità non possono che condizionare negativamente lo stato ambientale della montagna e soprattutto la risorsa più vulnerabile, cioè l'acqua. Elevati valori di torbidità dell'acqua depongono negativamente sia per un possibile uso potabile, sia per la vita dei microrganismi presenti nei corpi idrici superficiali dove l'acqua della grotta successivamente arriva.

Rifiuti abbandonati in alcune aree della montagna

Oltre un decennio fa la situazione delle discariche nella zona denominata del Retrocorchia era molto grave. Vecchie discariche con presenza di macchinari abbandonati, batterie esauste (*Fig. 2.11*) potenzialmente molto inquinanti e rifiuti vari, erano ben visibili lungo la strada marmifera che sale alle cave del monte Corchia e probabilmente altri cumuli di rifiuti potevano essere dispersi in zone

meno evidenti e poco accessibili.

E' possibile che rifiuti abbandonati in alcune zone della montagna costituiscano una fonte di contaminazione delle acque.

Fig. 2.11 - Batterie esauste abbandonate nel Retrocorchia (successivamente rimosse).



Contaminanti di origine naturale

E' possibile l'ingresso in grotta di acque contaminate microbiologicamente in seguito al dilavamento del terreno inquinato da deiezioni degli animali selvatici (ma anche umane dove sono presenti insediamenti, anche piccoli, che non dispongono di adeguato trattamento dei reflui). Inoltre in seguito a piogge particolarmente intense, benché il suolo del monte Corchia sia piuttosto povero di sedimenti, è possibile l'ingresso di acque con materiale in sospensione derivato dal suolo.

Nella **Fig. 2.12** è riportato un istogramma in cui è indicata una stima percentuale delle possibili cause di inquinamento di quelle acque. Si sottolinea che i valori assegnati sono affetti da incertezza e che sono soggetti a cambiare nel tempo. Questa stima aveva comunque indirizzato il controllo ambientale verso le cause che maggiormente avevano condizionato (e condizionano tutt'oggi) lo stato di qualità delle acque.

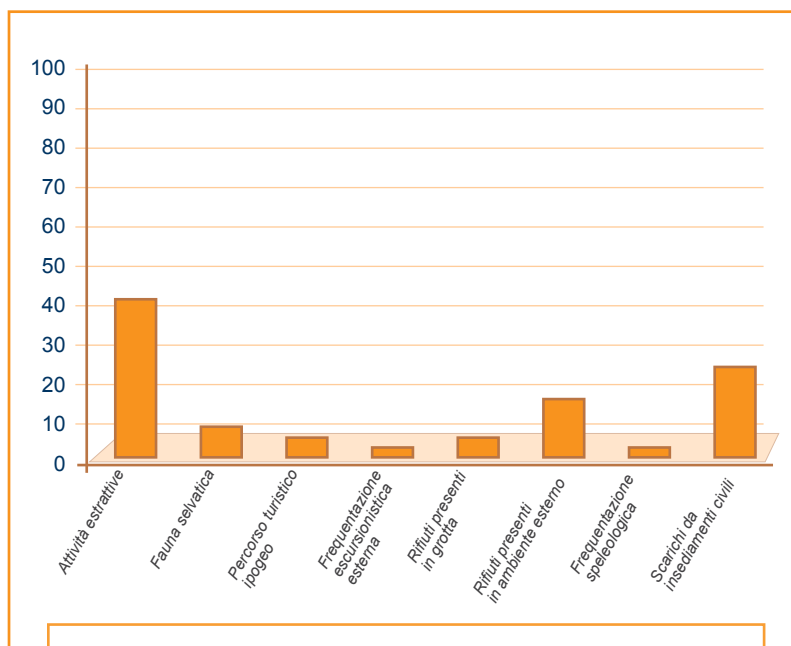


Fig. 2.12 - Stima di contributo in percentuale delle possibili cause di inquinamento delle acque del Complesso carsico del monte Corchia.

Criteri del monitoraggio dell'ambiente ipogeo



Fig. 2.13 - Allestimento della centralina per il rilevamento dei parametri atmosferici localizzata a quota 1470 m al di sopra della strada che conduce alla cava dei Tavolini (Anno 2002).

Il monitoraggio era rivolto a definire la situazione ambientale del settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica e aveva come oggetto principalmente la meteorologia ipogea in quanto matrice di possibile influenza in seguito alla frequentazione turistica. Le acque a loro volta erano di interesse per verificare i possibili impatti dovuti sia all'allestimento turistico e, soprattutto, dall'attività di estrazione del marmo nella parte superiore della montagna. La scelta di inserire le acque come indicatori di possibili impatti dovuti all'attività estrattiva si sarebbe rivelata, purtroppo, molto utile.

Gli obiettivi della scelta di monitorare la matrice aria (all'interno ed all'esterno):

- ✓ verifica dei valori del fondo naturale dei parametri indicatori del sistema (velocità dell'aria, umidità relativa, tenore di anidride carbonica e temperatura) nella fase ante-operam e delle eventuali modifiche successive;
- ✓ verifica di possibili impatti ambientali conseguenti ad attività antropiche in esterno che possono immettere contaminanti nell'aria;
- ✓ verifica del tenore di radon;
- ✓ studio della microbiologia delle acque;
- ✓ acquisizione di una maggior conoscenza della risposta dell'ambiente ipogeo alle variazioni meteorologiche esterne.

Durante il monitoraggio si è deciso di non trascurare, a scopo conoscitivo, la misura della concentrazione di radon nell'aria dell'ambiente ipogeo, anche perché il radon è spesso presente naturalmente in concentrazioni elevate anche nelle grotte calcaree, quindi per prevedere l'eventuale esposizione alla radioattività naturale dei frequentatori della grotta, tra cui speleologi, ma in misura maggiore il personale addetto al settore turistico.

Obiettivi della scelta di monitorare la matrice acqua (acque superficiali all'interno del sistema carsico, acque delle risorgive a valle, acque di stillicidio, acqua piovana):

- ✓ verifica della composizione chimica delle acque, dello stato di qualità microbiologica e delle caratteristiche di potabilità;
- ✓ verifica di possibili impatti conseguenti alle opere di allestimento turistico e frequentazione scientifico-culturale entro l'ambiente carsico che possono contaminare le acque;
- ✓ verifica della possibile influenza sullo stato delle acque delle attività antropiche esterne;
- ✓ verifica delle caratteristiche chimiche delle piogge per determinare il loro contributo alla composizione chimica delle acque circolanti;
- ✓ verifica delle caratteristiche chimiche delle acque di stillicidio per il loro contributo alla formazione delle acque stagnanti;
- ✓ acquisizione di informazioni a carattere generale in relazione all'idrologia del sistema ipogeo.

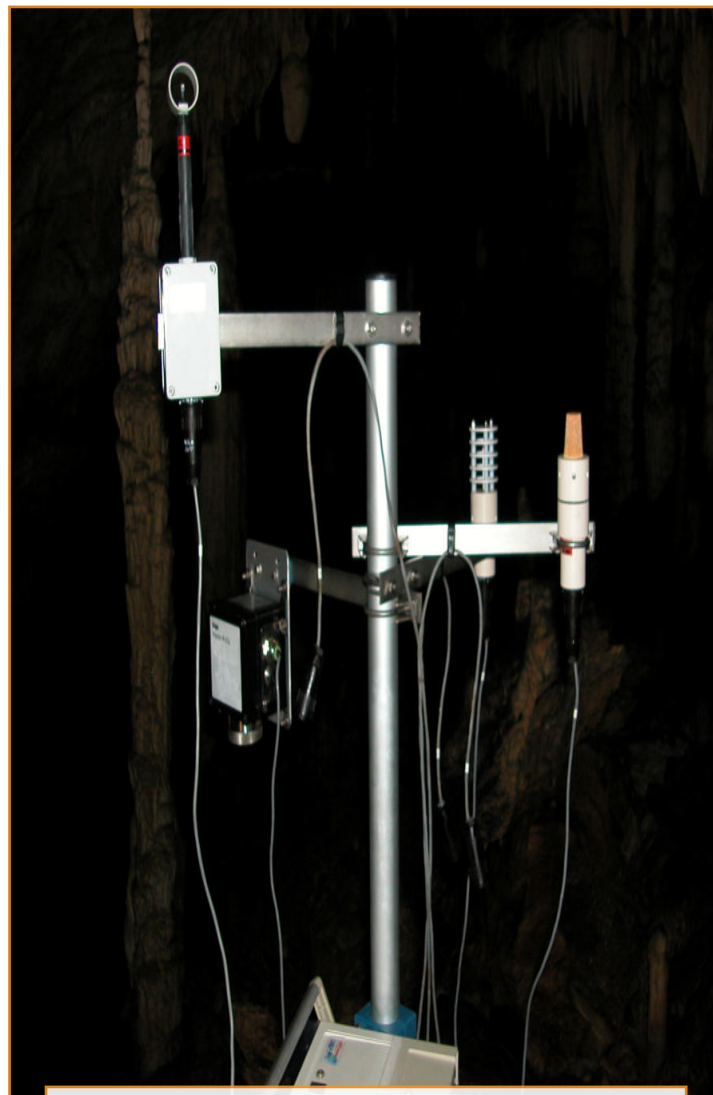


Fig. 2.14 - Sonde per la misurazione di vari parametri microclimatici ancora attive lungo il percorso turistico dell'Antro del Corchia.



Fig. 2.15 - Sistemazione definitiva del percorso turistico in un tratto della Galleria del Venerdì, Antro del Corchia.

I termine “monitoraggio” si utilizza correttamente tutte le volte che un fenomeno è seguito nel tempo con continuità per rilevarne delle variazioni di carattere transitorio o permanente. Il monitoraggio prevede che siano eseguite misure con strumenti simili, modalità rigorose, periodicità stabilite e in punti prefissati. Una campagna di misure eseguita a scopo conoscitivo può essere necessaria prima di un monitoraggio per stabilire dove, cosa, quando e come misurare.

Il monitoraggio di una parte dell’Antro del Corchia è stato motivato dalla volontà, manifestata negli anni

’90, di destinare una porzione della grotta al turismo. La fase conoscitiva si è conclusa il 29 gennaio 1998 con l’installazione di tre stazioni meteorologiche in tre punti all’interno dell’Antro; a questo punto è iniziato il monitoraggio ante operam vero e proprio. Questa prima fase di monitoraggio si è conclusa nel giugno 2000 quando ha cominciato a essere importante la presenza dei tecnici all’interno del settore di grotta destinato a fruizione turistica per l’allestimento delle passerelle e degli impianti ed è servito a registrare lo stato naturale della grotta nei punti prescelti.

Nell'estate del 2002 è stata installata l'attuale rete di monitoraggio che ha cominciato a funzionare dal 12 settembre 2002.

Attualmente (anno 2021), le centraline all'interno dell'Antro del Corchia sono tuttora in funzione e registrano i seguenti parametri: temperatura dell'aria, velocità del vento e verso del flusso, umidità relativa.

All'esterno era presente una centralina che registrava i seguenti parametri meteorologici: mm di pioggia, temperatura dell'aria, velocità e direzione del vento. La centralina posta in alto sul monte

Corchia, non lontano dalla cava dei Tavolini, fu tolta dopo che nel corso degli anni alcune scariche elettriche avevano irrimediabilmente danneggiato il sistema.

Per quanto riguarda il monitoraggio delle acque, nel laghetto del torrente Vianello-Vidal venne posizionata una sonda multiparametrica che registrava in continuo i seguenti parametri: temperatura dell'acqua, conducibilità, livello dell'acqua e torbidità. Purtroppo questa sonda ha avuto un funzionamento discontinuo nel corso degli anni.



Fig. 2.16 - Il percorso turistico nei dintorni del laghetto del Venerdì.

In sostituzione di questa sonda, attualmente (anno 2021) nello stesso laghetto del torrente Vianello-Vidal, è inserita una nuova sonda multiparametrica che misura in continuo i seguenti parametri: temperatura acqua, conducibilità, torbidità, livello dell'acqua. I relativi valori sono trasmessi in continuo ad ARPAT che provvede alla loro pubblicazione.

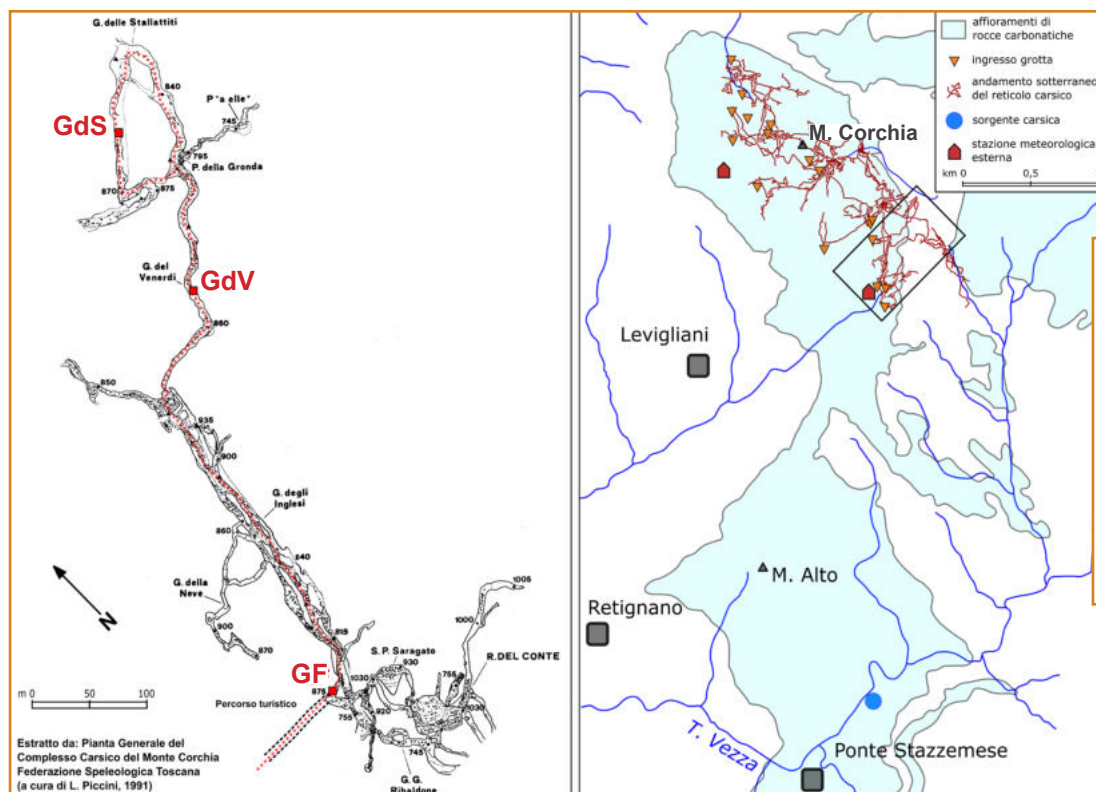


Fig. 2.17 - Settore inattivo del Complesso carsico del monte Corchia (zona alla base della Galleria Franosa).

Aspetti della meteorologia ipogea

L'aria riempie gli spazi presenti nel suolo, nei detriti e nelle rocce del sottosuolo, quando questi non sono già riempiti di acqua delle falde idriche. Esiste quindi una vera e propria atmosfera sotterranea, in genere in diretta comunicazione con quella esterna, oggetto di fenomeni “meteorologici” fisicamente analoghi, anche se molto meno vistosi, a quelli che governano il cielo sopra le nostre teste. L'interesse scientifico per questa atmosfera è relativamente recente e si deve a pochi ricercatori che hanno iniziato a compiere

misurazioni dei parametri atmosferici in grotta allo scopo di capirne la dinamica. Tra questi ci preme ricordare il fisico e speleologo Giovanni Badino (1953-2017), dell'Università di Torino, che è stato uno dei più importanti ricercatori a livello mondiale sull'argomento, nonché instancabile esploratore del Complesso carsico del monte Corchia, e che proprio in questo straordinario sistema sotterraneo ha tratto spunto per molte delle sue ricerche e delle sue intuizioni sulla meteorologia ipogea.



Il monitoraggio di una parte dell'Antro del Corchia, settore di grotta appartenente al Complesso carsico del monte Corchia (CCMC), è stato motivato dalla volontà, manifestata negli anni '90, di destinare una porzione della grotta al turismo. A partire dal 29 gennaio 1998 si è provveduto a installare tre stazioni meteorologiche in tre punti all'interno dell'Antro del Corchia e in particolare: lungo la Galleria Franosa (GF), nel punto più alto della Galleria del Venerdi (GdV) e nel piano superiore della Galleria delle Stalattiti (GdS) (Fig. 3.1). La prima fase di monitoraggio, destinata a ricavare i dati di base in condizioni naturali, cioè "ante operam", si è conclusa nel giugno 2000 quando ha cominciato a essere importante la presenza degli operai all'interno per l'allestimento delle passerelle e degli impianti di illuminazione.

Inizialmente le campagne di misura duravano ventiquattro ore o poco più, corrispondenti alla durata delle batterie, e i dati erano trasferiti manualmente per evitare perdite d'informazioni. Solo a fine gennaio 1998 si resero disponibili degli strumenti registratori dotati di sonde per la determinazione della temperatura, del contenuto di anidride carbonica e della velocità dell'aria. Successivamente, completato l'allestimento turistico, furono installate nella estate del 2002 le nuove centraline fisse di misurazione. Le stazioni di monitoraggio erano dotate di strumenti per la misura in continuo di alcune variabili meteorologiche sia

all'interno, sia all'esterno della grotta, nei punti previsti dal piano di monitoraggio presentato da ARPAT e dalla Federazione Speleologica Toscana (FST). La rete di monitoraggio definitiva ha cominciato a funzionare nei giorni 11 e 12 settembre 2002 e continua tuttora a fornire dei dati, seppure con discontinuità e non pochi problemi tecnici dovuti all'inevitabile deterioramento e invecchiamento della strumentazione.

La rete di monitoraggio comprendeva anche due stazioni meteorologiche esterne (Fig. 3.2a): una in prossimità dell'ingresso turistico (850 m s.l.m.) (Fig. 3.2b) e una abbastanza in quota sul versante ovest del monte Corchia (1.470 m s.l.m.). I parametri misurati all'interno sono: temperatura dell'aria, umidità relativa, CO₂, velocità e direzione del flusso d'aria (ma solo come senso di percorrenza nella galleria), e pressione (solo nella stazione Galleria Franosa); all'esterno: temperatura dell'aria, velocità e direzione del vento, mm di pioggia caduta in un'ora e pressione atmosferica. I parametri sono misurati e memorizzati con cadenza oraria. Dopo la trasformazione turistica (2002) sono state installate unità di acquisizione fornite dalla ditta SIAP-Micros, modello OLM2-220, per tutte e cinque le postazioni. Le caratteristiche tecniche delle sonde della serie di misure ancora in loco sono descritte in Tab. 3.1. Dopo il 2011 i dati raccolti dalla rete, per motivi vari, sia prevalentemente tecnici, sia logistici, sono

purtroppo pochi e molto discontinui; in particolare i sensori di CO₂ non hanno più fornito dati o i dati non erano sufficientemente attendibili.



Fig. 3.2b - Stazione interna situata alla Galleria delle Stalattiti.



Fig. 3.2a - Stazione meteorologica esterna situata lungo la strada che conduce alla cava dei Tavolini, sul versante sud-occidentale del monte Corchia, a quota 1470 m.

Sonda	Descrizione
Analizzatore CO ₂	Elemento sensibile: cella ad assorbimento d'infrarosso; ripetibilità 1% del campo; stabilità <0,5% del fondo scala/mese; tolleranza ±3% fondo scala; campo nominale: 0-3000 ppm.
Anemometro in grotta	Sensore costituito da un ponte di misura con due termoresistenze di precisione, monodirezionale; elemento sensibile: termoelemento; soglia: 0,01 m/s; precisione ± 3% del fondo scala.
Direzione del vento esterno	Sensore costituito da una banderuola con potenziometro; elemento sensibile: potenziometro; soglia: 0,1°; risoluzione 0,1°; precisione 1°.
Velocità del vento esterno	Sensore costituito da un mulinello di Robinson a 3 coppe; campo di misura 0-50 m/s; sensibilità 0,25 m/s; precisione 0,1 m/s (tra 0 e 1 m/s) 0,25 m/s (tra 1 e 10 m/s).
Barometro	Elemento sensibile: piezoresistivo; precisione 0,5 hPa; risoluzione 0,1 hPa; campo nominale: 600-1.100 hP.
Temperatura	Elemento sensibile Pt100 1/3 Din-43760 classe A; ventilazione naturale; temp. di esercizio -50+80 °C; precisione 0,01 °C; risoluzione 0,1 °C; umidità relativa tra 0 e 100%.
Umidità relativa	Elemento sensibile capacitivo: campo di misura 0-100%; risoluzione 0,1%; temperatura di funzionamento -30+70 °C.
Pluviometro esterno	Trasduttore a bascula oscillante; max. intensità misurabile 0-300 mm/h; risoluzione 0,2 mm/h; precisione ± 0,1 mm/h a 10 mm/h e ± 0,3 mm/h a 60 mm/h.

Tab. 3.1 - caratteristiche tecniche degli strumenti installati dopo il 2002.

Termometria

Temperatura dell'aria

La temperatura dell'aria, sia esterna sia interna, è, tra i parametri misurati, quello che presenta la maggior continuità e che si presta a considerazioni più interessanti sulla dinamica meteorologica del sistema carsico del Corchia. Per quanto riguarda le stazioni interne, la prima serie di misure, eseguita con sensori portatili, ha interessato il periodo precedente all'installazione delle stazioni fisse e si riferisce ai seguenti periodi:

✓ **Galleria Franosa:** 3.176 misure tra il 29/1/1998 e l'1/12/1998;

✓ **Galleria delle Stalattiti:** 7.273 misure tra l'11/9/1997 e il 5/3/2000;

✓ **Galleria del Venerdì:** 7.017 misure tra il 3/4/1998 e il 6/7/2000 di cui 3.145 prima dell'apertura del tunnel di accesso e 3.872 dopo.

Dal settembre 2002, cioè dall'entrata in funzione delle stazioni fisse, sino al 2010 si hanno registrazioni più continue ma non prive d'interruzioni anche prolungate dovute a problemi tecnici di varia natura.

La discontinuità dei dati rende difficile il calcolo di valori medi giornalieri che permetterebbero una rappresentazione grafica priva del "rumore"

dovuto alle variazioni orarie, soprattutto per le due stazioni esterne. I dati non sono continui per tutti gli otto anni, ma sono comunque numerosi: le medie sono state ottenute con più di 44.000 dati orari, ad eccezione della postazione della Galleria delle Stalattiti, dove i dati orari disponibili sono solo 12.160. I valori medi relativi al periodo settembre 2002 - agosto 2010 riportati in **Tab. 3.2** sono stati calcolati raggruppando prima i dati su base mensile al fine di minimizzare gli effetti dei periodi privi di misure.

	M. Corchia (1470 m)	Ingresso turistico (850 m)	Galleria Franosa (875 m)	Galleria del Venerdi (870 m)	Galleria delle Stalattiti (875 m)
temperatura media	8,3	11,9	7,6	8,3	8,4
deviazione standard	7,0	6,7	1,1	0,3	0,3
temperatura massima	26,1	30,9	8,9	8,4	8,6
temperatura minima	-14,3	-8,4	3,8	6,1	7,1

Tab. 3.2 - Valori medi, con relativa deviazione standard, massimi e minimi registrati dalle 5 stazioni meteorologiche esterne e interne. I valori massimi delle stazioni interne non considerano alcune misure "anomale" registrate durante la presenza degli operatori.

Il valore medio giornaliero della temperatura dell'aria misurata nelle postazioni più interne al sistema carsico (GdV e GdS), mostra una bassa variabilità stagionale. Al contrario, nella postazione della Galleria Franosa si è riscontrata una elevata variabilità derivante dal fatto che in inverno l'aria fredda esterna entra dagli ingressi bassi (situati a poche centinaia di metri di distanza) e arriva nella zona di misura prima di aver raggiunto un equilibrio termico con la roccia e l'acqua presente in grotta. Durante il periodo estivo in quella postazione il flusso di aria, che circola in senso inverso, proviene invece dalle zone più interne del complesso, pertanto con una temperatura in equilibrio con il sistema.

Si osserva che le temperature medie delle stazioni interne, situate tutte e tre a circa 870 m di quota, sono molto simili alla temperatura medie della stazione alta, situata a 1470 m di quota sul monte Corchia. Ciò dipende dal fatto che la temperatura che si rileva in grotta dipende soprattutto dalla temperatura media delle acque d'infiltrazione che nel caso del Corchia sono particolarmente fredde (probabilmente in media intorno a 6-7 °C) perché legate soprattutto alla stagione autunnale e in modo rilevante dalla fusione primaverile della neve che persiste sui versanti settentrionali e che immette nel sistema acque con temperatura intorno a 0 °C, cioè la temperatura di liquefazione del ghiaccio.

La **Fig. 3.3** riporta l'andamento delle temperature medie mensili delle cinque stazioni di monitoraggio nel periodo 2002-2010. Per permettere un migliore confronto tra le temperature esterne e quelle interne sono state utilizzate due scale verticali diverse. Le due stazioni esterne mostrano le stesse variazioni stagionali con una differenza che è in media di circa 4 °C, in linea quindi con un gradiente termico esterno di 6,7 °C/km, essendo la differenza di quota tra le due stazioni pari a circa 600 m. Tra le stazioni interne, Galleria del Venerdì e Galleria delle Stalattiti mostrano oscillazioni molto piccole, dell'ordine di qualche decimo di °C, e comportamenti simili. Da notare che le due stazioni mostrano temperature

leggermente superiori in pieno inverno (dicembre, gennaio e febbraio) che in estate. Ciò è dovuto al fatto che negli altri mesi e soprattutto in estate l'aria in grotta si muove dagli ingressi alti verso quelli bassi e quindi nelle due stazioni in oggetto l'aria arriva dalle porzioni superiori e leggermente più fredde del sistema carsico. In inverno, l'aria arriva invece da ingressi bassi ed entra con temperature inferiori a quelle interne ma si porta in equilibrio termico con roccia e acqua prima di arrivare alle due stazioni, che si trovano a circa 600 e 900 m dall'ingresso inferiore più vicino. Nella stazione Galleria Franosa, invece, si osserva una forte influenza delle temperature esterne in inverno

poiché, come già detto, l'aria che arriva dall'esterno non si trova ancora in una condizione di equilibrio termico con la grotta.

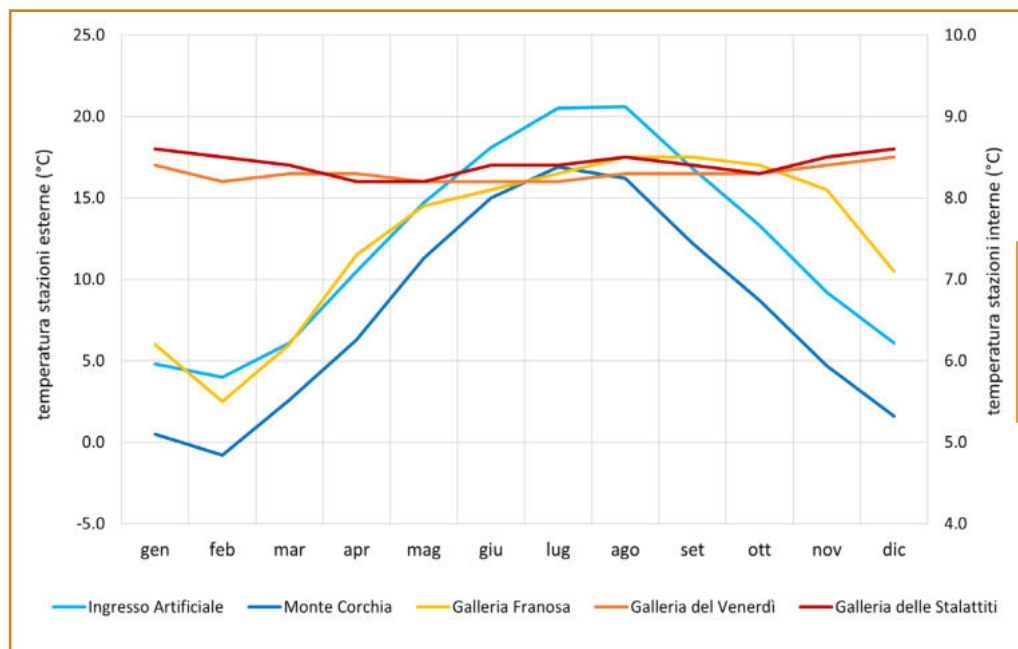


Fig. 3.3 – Variazione stagionale ricavata dalle temperature medie mensili misurate nelle 5 stazioni meteorologiche della rete di monitoraggio.

Questo comportamento risalta in modo più dettagliato dal grafico di *Fig.3.4*, che riporta l'andamento delle temperature misurate nelle due stazioni esterne e nelle stazioni interne della Galleria Franosa e della Galleria del Venerdì per il periodo dal 1° gennaio al 31 agosto 2005. Il grafico mostra in modo accurato la stretta correlazione tra le due stazioni esterne. La stazione Galleria Franosa, più vicina all'esterno, risente parzialmente dell'andamento stagionale ma solo nel periodo invernale, per le ragioni già descritte in precedenza. In questo grafico si nota però un sensibile decremento delle temperature durante l'inverno anche nella stazione Galleria del Venerdì, che non risultava dal grafico ottenuto con

le temperature medie mensili. Ciò è probabilmente dovuto al periodo in oggetto con temperature esterne molto rigide (sino a $-8,4^{\circ}\text{C}$ alla stazione presso l'ingresso turistico). Quando molto fredda, l'aria in entrata dal basso non riesce evidentemente a raggiungere l'equilibrio termico con la montagna neanche dopo 600 m di percorso, tenuto anche conto del fatto che più basse sono le temperature esterne maggiore è la velocità del flusso d'aria. Il cambio di circolazione da regime invernale a regime estivo avviene probabilmente a metà aprile e si stabilizza da maggio. In queste condizioni le temperature risalgono portandosi intorno ai valori medi. In estate si osserva una stabilizzazione della temperatura alla Galleria del Venerdì, mentre

quella della Galleria Franosa continua ad aumentare sino a metà/fine agosto. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che la GdV riceve aria dai settori più alti del sistema carsico, mentre la GF riceve aria anche da settori più bassi e localizzati non lontano dai ripidi versanti esterni meridionali del monte Corchia e quindi più caldi, in quanto maggiormente esposti al sole, di quelli settentrionali in cui si sviluppano invece i settori più alti del sistema carsico.

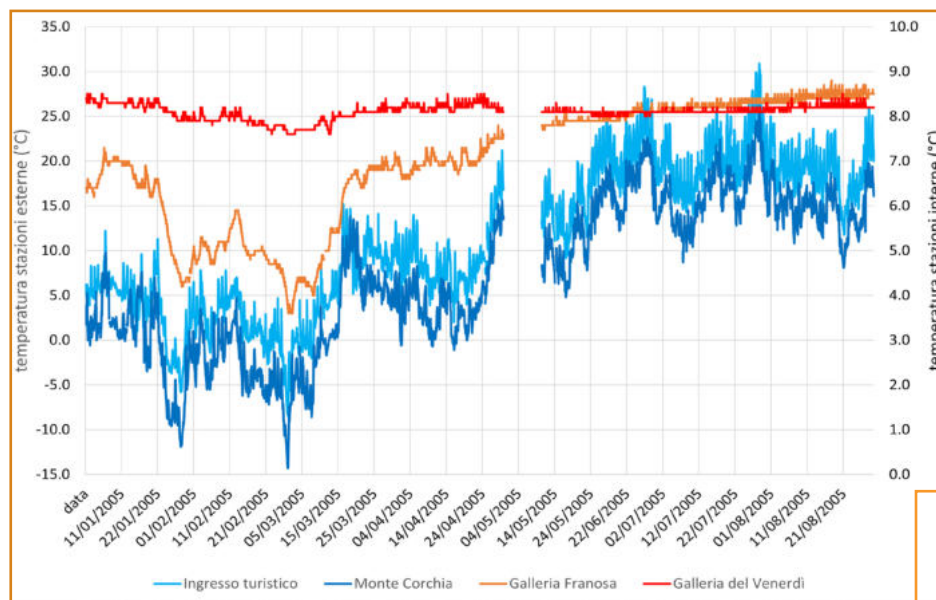


Fig. 3.4 – Andamento della temperatura nelle 5 stazioni di monitoraggio nel periodo tra gennaio e agosto del 2005.

Temperatura del sistema aria-roccia

Allo scopo di ricavare informazioni sugli scambi termici tra aria e roccia lungo il tratto destinato a fruizione turistica, furono eseguite nel corso degli anni 1998-1999 una serie di misure di temperatura in parallelo di aria e roccia. A tale scopo furono effettuati dei fori profondi 22 cm (diametro 12 mm) e con frequenza mensile, furono effettuate le misure sul fondo degli stessi e contemporaneamente dell'aria dell'ambiente ipogeo nelle immediate vicinanze. Da queste misure si osserva che la roccia costituisce una sorta di "volano" termico che acquista o cede calore all'aria con tempi lunghi.

I risultati delle misure sono riportati nella **Tab. 3.3**. Nella postazione A (Galleria Franosa), dove l'escursione termica dell'aria è maggiore (3,3 °C), si osserva anche nella roccia una variazione nel corso dell'anno di circa 2,0 °C.

Nelle postazioni più interne B (Trivio, punto d'incontro fra Galleria del Venerdi e galleria che porta al Lago Nero) si ha una variazione della temperatura della roccia di 1,1 °C a fronte di una variazione della temperatura dell'aria di 1,5 °C. Nella postazione C (Galleria del Venerdi) la variazione della temperatura della roccia è di soli 0,5 °C mentre quella dell'aria è pari a 0,9 °C. Questi dati sono stati ottenuti con l'impiego di un termometro con incertezza di circa 0,2 °C, quindi non estremamente preciso. Va poi considerato che la temperatura della roccia è condizionata dalla profondità dei fori. I fori praticati nella roccia sono stati chiusi con tappi di gomma durante le misure per evitare anche la minima circolazione d'aria e d'acqua.

Data	Temperatura della roccia			Temperatura dell'aria		
	Galleria del Venerdi	Trivio	Galleria Franosa	Galleria del Venerdi	Trivio	Galleria Franosa
03/04/98	7,6	7,4	6,2	7,7	7,5	6,3
16/04/98	7,7	7,5	6,0	7,7	7,5	5,9
14/05/98	7,8	7,6	7,0	7,8	7,6	7,7
26/05/98	7,8	7,7	7,2	7,9	7,8	7,6
03/06/98	7,7	7,7	7,3	7,7	7,7	7,3
13/07/98	7,7	7,7	7,5	7,7	7,8	7,5
23/07/98	7,7	7,8	7,6	7,7	7,9	7,6
10/09/98	7,7	7,9	7,8	7,8	8,0	7,9
18/09/98	7,8	7,9	7,8	7,9	7,9	7,8
02/11/98	7,9	8,0	8,0	8,0	8,3	8,2
18/11/98	7,7	7,7	6,8	7,7	7,7	5,8
22/12/98	7,5	7,2	5,9	7,4	6,9	5,0
22/01/99	7,6	7,3	5,9	7,5	7,1	5,5
15/03/99	7,4	7,5	5,7	7,6	7,5	6,5
12/04/99	7,4	7,2	6,1	7,5	7,5	6,0
12/05/99	7,6	7,4	6,9	7,7	7,6	7,2
16/06/99	7,5	7,5	7,1	7,4	7,7	7,2
29/09/99	7,9	8,3	7,8	8,3	8,1	8,3

Tab.3.3 – Temperatura della roccia e dell'aria, misurate tra il 3 aprile 1998 ed il 29 settembre 1999 in tre diverse postazioni lungo l'attuale percorso turistico.

La **Fig. 3.5** mostra le differenze di temperatura tra roccia e aria nelle tre postazioni misurate con cadenza mensile tra aprile 1998 e settembre 1999. Al di là della incertezza delle misure, dovuta anche alle difficoltà operative, ed alla presenza di alcuni valori anomali e non facilmente spiegabili, si osserva in generale che in tutte e tre le postazioni

in inverno la temperatura della roccia è superiore a quella dell'aria determinando un flusso di calore dalla prima alla seconda, mentre in estate avviene l'inverso anche se le differenze sono assai più contenute.

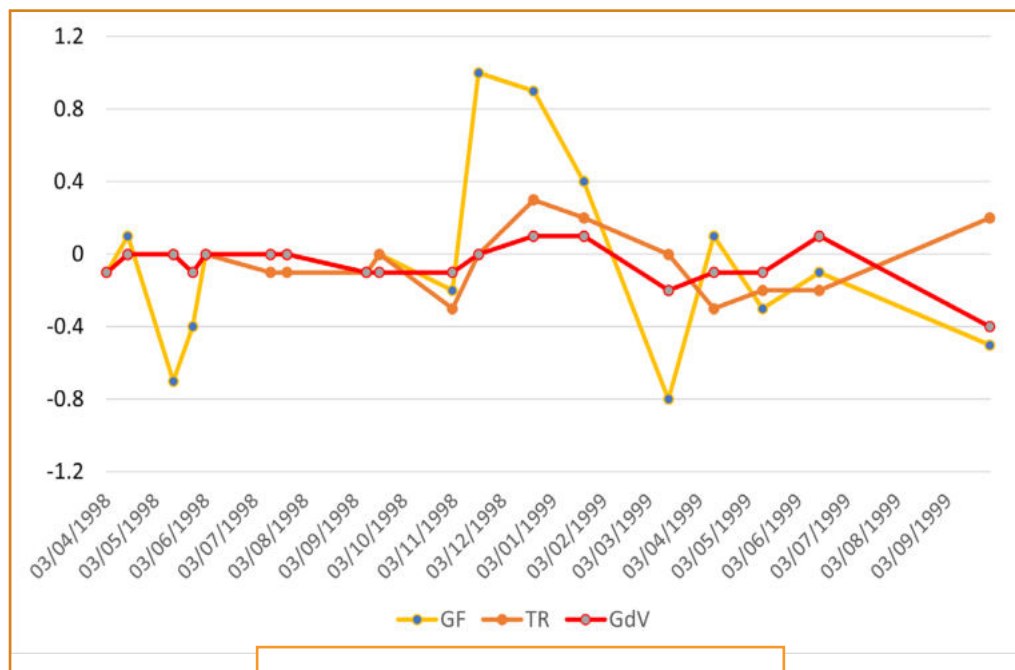


Fig. 3.5 – Differenza tra la temperatura della roccia e quella dell'aria nelle tre postazioni di misura.

Umidità interna

In grotta, la misura dell'umidità relativa è un'operazione molto complessa poiché i valori sono sempre molto vicini alla saturazione. I normali psicometri, progettati per un uso nelle centraline meteorologiche esterne, non sono quindi idonei a tale scopo, essendo costruiti per variazioni molto più ampie, in genere comprese tra il 20 e l'80%. La sensibilità dei sensori utilizzati non è quindi del tutto adeguata a rilevare variazioni di qualche

per cento o anche inferiori all'unità, che invece avvengono negli ambienti sotterranei. A riprova di ciò, i valori di umidità relativa misurati nelle stazioni interne sono solitamente compresi fra 98 e 100%, cioè prossimi al fondo scala. Nella zona più influenzata dalla vicinanza agli ingressi, si registra una maggiore variabilità di questo parametro (Fig. 3.6), nelle altre zone il valore rilevato è costante e vicino alla saturazione.

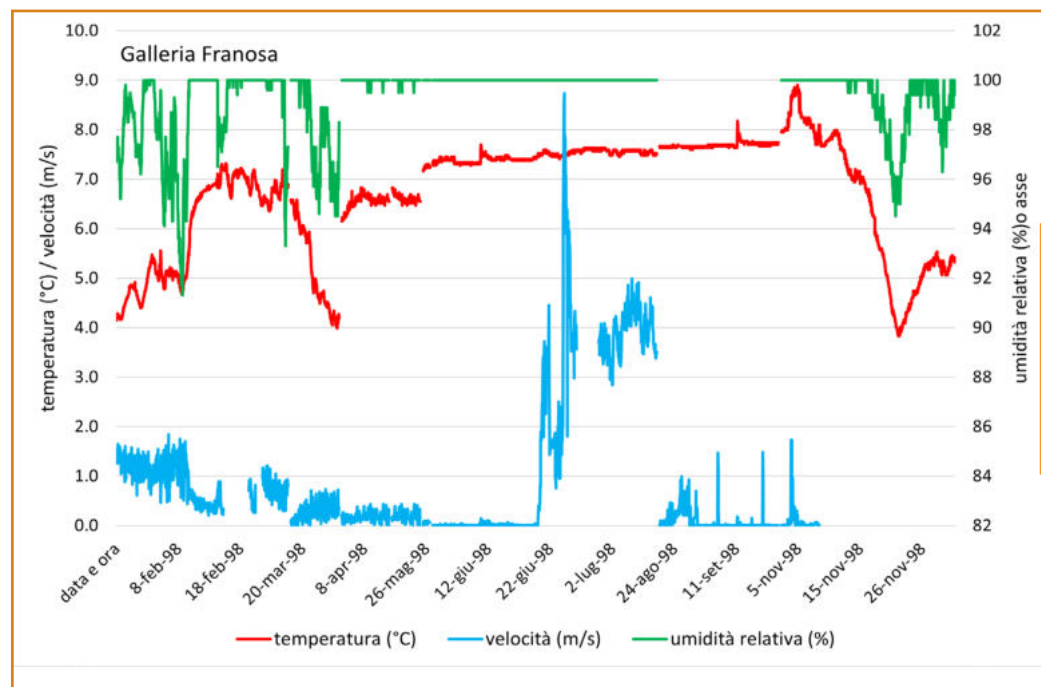


Fig. 3.6 – Andamento della temperatura, velocità dell'aria e umidità relativa alla centralina della Galleria Franosa tra febbraio e novembre 1998. Le misure presentano diverse interruzioni e pertanto la scala dei tempi non è continua.

La **Fig. 3.6** mostra alcune serie di misurazioni discontinue di temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria compiute alla Galleria Franosa tra febbraio e novembre 1998. Il grafico evidenzia le condizioni di elevata variabilità di questa stazione relativamente ai tre parametri meteorologici. L'umidità, in particolare, scende talvolta sino al 91%. Tali condizioni si verificano in inverno quando entra aria fredda dall'esterno che, riscaldandosi, abbassa di molto la sua umidità relativa. Quest'aria, comunque, quando arriva a questa stazione ha già raggiunto valori superiori al 90% ma è ancora in grado di produrre fenomeni di evaporazione sulle pareti, grazie anche alla sua velocità che arriva spesso a superare il metro al secondo. In estate, invece, l'aria proviene dai settori alti del sistema carsico e la sua umidità è prossima al 100%. Per quanto riguarda la velocità, gli elevati valori centrali visibili nel grafico, che arrivano a velocità di picco di 6-9 m/s, sono probabilmente dovuti ad una staratura dello strumento, ma possono anche essere legati a giornate particolarmente calde (essendo relativi al periodo tra giugno e agosto 1998) o a fenomeni meteorologici particolari. Ben diversa è la situazione alla centralina della Galleria delle Stalattiti. Come già evidenziato in precedenza qui la temperatura è molto più stabile, oscillando di pochi decimi di grado intorno al valore medio. L'umidità è sempre prossima alla saturazione,

essendo compresa tra 98 e 100%. Anche qui i valori maggiori si hanno in estate, quando l'aria arriva dalle porzioni alte del complesso carsico. La presenza di laghetti e stillicidio, perenne e poco sensibile alle precipitazioni, sono la probabile causa di tali valori elevati. La velocità dell'aria non mostra significative variazioni stagionali, nonostante la diversa direzione tra estate e inverno.

Nei dati riguardanti l'umidità relativa post operam non si sono registrate variazioni rispetto a quanto determinato in precedenza. Anche la presenza di visitatori non fa registrare variazioni apprezzabili nelle medie orarie e non sono stati segnalati fenomeni di sovra-saturazione dell'aria con la conseguente condensazione e formazione di nebbia sul percorso turistico.

Anemometria interna

Le stazioni di monitoraggio interne si trovano tutte intorno a circa 870 m s.l.m., cioè in un settore basso e relativamente vicine all'ingresso situato a quota inferiore, tra quelli conosciuti, dell'intero sistema del Corchia, che si sviluppa tra 1650 e 450 m di quota. Questo ingresso, conosciuto dagli speleologi come Buca del Serpente, si apre nel canale delle Volte a 930 m di quota, poche decine di metri sopra l'ingresso artificiale turistico. In questo settore di grotta i flussi sono pertanto abbastanza omogenei ed hanno un andamento tipicamente stagionale, con poche variazioni occasionali, come invece si possono avere nei settori intermedi del Corchia, collegati con l'esterno da più ingressi vicini e più prossimi la superficie.

Come già detto a giustificazione delle variazioni di temperatura stagionali, il flusso d'aria è per tutte e tre le stazioni discendente in estate e ascendente in inverno. La Buca del Serpente soffia quindi in estate e aspira in inverno con velocità che, a causa delle sue ridotte dimensioni, arrivano a superare frequentemente i 20 m/s. Non lontano dalla Buca del Serpente esiste anche un altro ingresso inferiore, noto come Buca dei Pompieri, che si comporta nello stesso modo e con portate d'aria e velocità di poco inferiori. In corrispondenza delle stazioni di misura le velocità sono nettamente inferiori, poiché queste si trovano in gallerie di grandi dimensioni,

con sezioni superiori a 20 m².

Nelle gallerie la velocità dei flussi d'aria non è uniforme, pertanto i valori misurati sono condizionati dalla posizione della sonda nella sezione della galleria. Le sonde sono state collocate a 1,2 m circa da terra, posizione facilmente accessibile, ma tale da non ostacolare il passaggio. I valori sono stati misurati con un anemometro a filo caldo e per questo i dati sono privi di segno (non era registrata la direzione dell'aria).

Nella postazione alla Galleria Franosa, si è osservata una velocità del vento compresa fra 0,1 e 3,9 m/s. I valori elevati sono correlabili ai momenti di massima intensità dei flussi d'aria in entrata e uscita nel sistema carsico corrispondenti ai valori massimi e minimi di temperatura registrata all'esterno (estate e inverno). Nelle stagioni intermedie i valori sono nettamente più bassi. I valori di velocità più alti registrati non sono però da considerarsi particolarmente attendibili a causa delle difficili condizioni operative. Le maggiori velocità dell'aria sono state comunque rilevate alla stazione Galleria Franosa in ragione della minore sezione trasversale (circa 20 m²) rispetto alle altre due stazioni. In inverno, quando l'aria entra dai vicini ingressi bassi (Buca del Serpente e Buca dei Pompieri), sono stati registrati valori generalmente compresi tra 1 e 2 m/s. In estate si hanno valori

anche nettamente superiori ma si ha ragione di credere che non siano del tutto attendibili, arrivando anche a 8,7 m/s.

Nella postazione Galleria del Venerdì è stato possibile osservare che dopo la connessione del tunnel artificiale con la Galleria Franosa (novembre – dicembre 1999) il valore medio e la variabilità del vento sono aumentati, seppur di poco, rispetto alle condizioni “ante operam”.

La determinazione della velocità può essere utilizzata per stimare la portata, ovvero la quantità

d’aria che fluisce in queste gallerie. Per avere stime più affidabili bisognerebbe però eseguire delle misure abbastanza precise della sezione delle gallerie nel punto dove sono installate le centraline; solo con la determinazione della sezione e con misure distribuite uniformemente su di essa si potrebbe avere una stima accurata delle portate. Ad ogni modo, stime approssimative dell’ordine di grandezza lasciano ipotizzate flussi che in questo settore di grotta possono arrivare anche a 50-60 m³/s nei momenti di massima circolazione dell’aria.

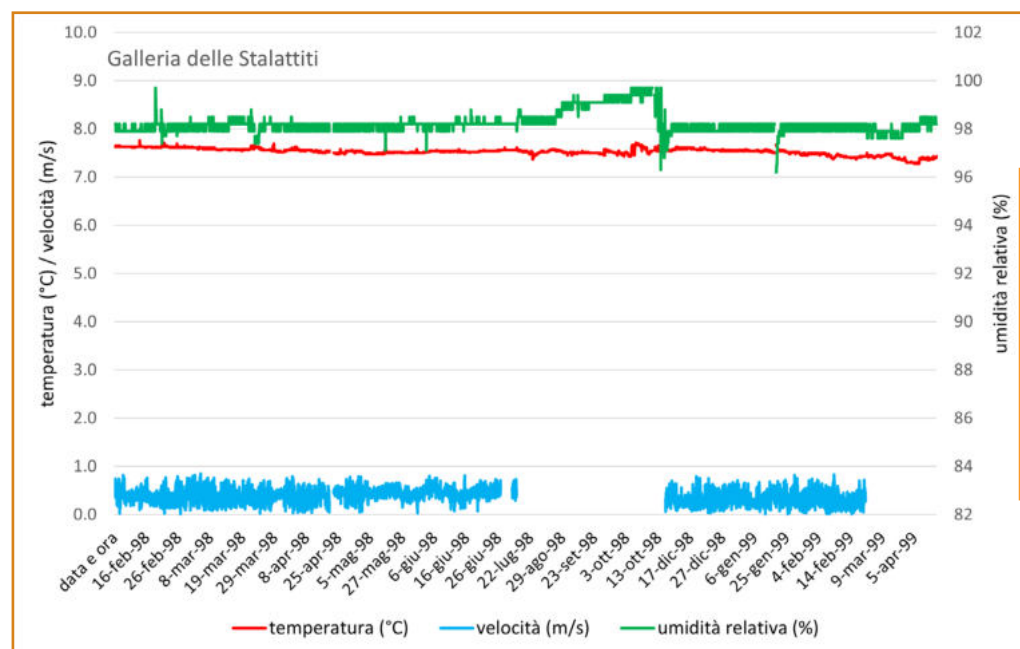


Fig. 3.7 - Andamento della temperatura, velocità dell'aria e umidità relativa alla centralina della Galleria delle Stalattiti tra febbraio 1998 e aprile 1999. Le misure presentano diverse interruzioni e pertanto la scala dei tempi non è continua.

Pressione atmosferica

La Fig. 3.8 mostrale le variazioni di pressione atmosferica registrate alla centralina della stazione Galleria Franosa, l'unica dotata di barometro tra quelle interne, tra febbraio e novembre 1998. I valori oscillano tra 870 e 950 millibar e sono strettamente legati con le variazioni barometriche esterne dovute alla dinamica meteorologica dell'atmosfera. È interessante notare che le maggiori velocità dell'aria, al di là dei valori assoluti che non sono da ritenere molto attendibili, si hanno talvolta in corrispondenza di una brusca caduta di pressione. È quindi possibile che il sistema del Corchia si comporti come una sorta di "polmone" in grado di accumulare aria durante i periodi di alta

pressione, per poi rilasciarla velocemente se questa diminuisce rapidamente per il sopraggiungere di una perturbazione. Del resto, fenomeni simili sono ben conosciuti anche relativamente a miniere e alle reti fognarie, che a volte rilasciano cattivo odore quando la pressione atmosferica diminuisce.

La mancanza di serie continue su lunghi periodi di tempo dei parametri di pressione interna e esterna a varie quote, nonché di registrazioni più accurate della velocità dell'aria, non permettono purtroppo di indagare il fenomeno in modo più preciso. La vastità del sistema del Corchia il cui volume della sola parte nota si aggira probabilmente intorno a due milioni di metri cubi, e la presenza di numerosi punti

di comunicazione tra esterno e interno (gli ingressi accessibili all'uomo sono attualmente 21, cui se ne aggiungono molti altri non accessibili), rendono comunque ragione di un comportamento molto complesso da un punto di vista barometrico e anemometrico.

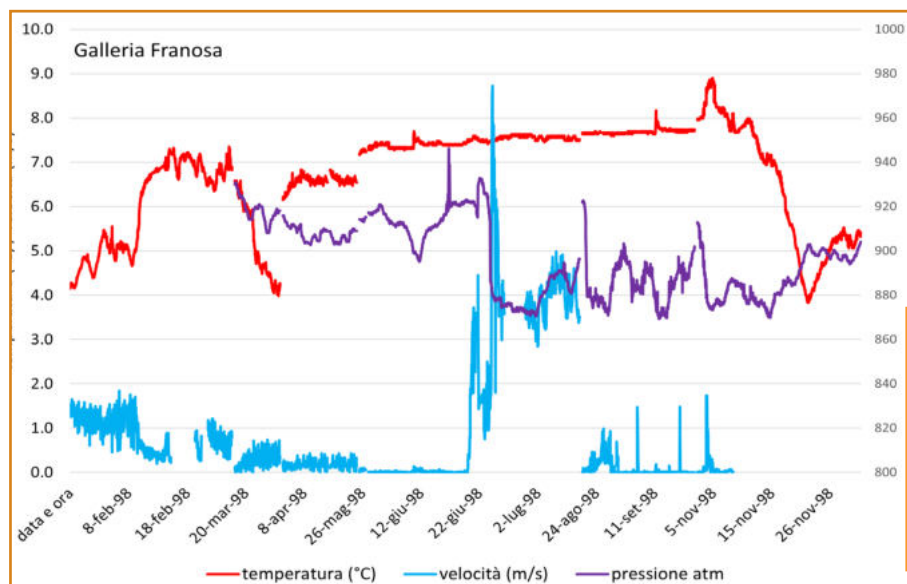


Fig. 3.8 - Andamento della temperatura, velocità dell'aria e pressione atmosferica alla centralina della Galleria Franosa tra febbraio e novembre 1998. Le misure presentano diverse interruzioni e pertanto la scala dei tempi non è continua.

Contenuto di anidride carbonica (CO₂) nell'aria

I dati disponibili sulla concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera ipogea sono purtroppo non molti e relativi ad un breve periodo: 4.971 misurati presso la Galleria delle Stalattiti e 5.179 misurati presso la Galleria del Venerdi. Anche in questo caso si tratta di brevi serie discontinue e affette da una bassa attendibilità dei valori assoluti a causa della delicatezza della strumentazione utilizzata, che richiedeva frequenti tarature da eseguire sul posto e quindi con non poche difficoltà tecniche e logistiche.

Presso la Galleria del Venerdi si sono misurati valori compresi tra 210 e 760 ppm, con una media

di 503 ppm (deviazione standard 82). Presso la Galleria delle Stalattiti si sono misurati valori compresi tra 160 e 1.320 ppm, con una media di 624 (deviazione standard 196). Considerando che l'incertezza strumentale di misure di questo tipo è dell'ordine di 100 ppm, i valori misurati alla Galleria del Venerdi non sono molto distanti da quelli misurati all'esterno. In entrambi i casi, i valori inferiori a 400 ppm sono più bassi a quelli dell'atmosfera esterna e quindi non attendibili.

I valori riscontrati appaiono coerenti con quelli che comunemente si osservano in grotte con buon ricambio di aria. La maggiore variabilità della concentrazione riscontrata nella Galleria delle Stalattiti può essere dovuta al maggiore isolamento di questa zona rispetto agli ingressi.



Fig. 3. 9 - Variazioni del contenuto di biossido di carbonio (CO₂) nell'aria alle centraline della Galleria del Venerdi (GdV) e della galleria delle Stalattiti (GdS). Le misure sono soggette a diverse interruzioni, pertanto la scala dei tempi non è continua.

Conclusioni

Per le caratteristiche dell'ambiente ipogeo, i dati rilevati all'interno dell'Antro del Corchia sono nel complesso molto regolari, soprattutto nelle due stazioni più interne (Galleria del Venerdì e Galleria delle Stalattiti). La grotta reagisce in modo assai attenuato alle variazioni meteorologiche esterne, con l'eccezione dei settori vicini agli ingressi bassi, dove, per un certo tratto nella stagione in cui l'ingresso aspira (inverno), si risente dell'umidità e della temperatura esterne.

Nel suo insieme, il Complesso carsico del monte Corchia può essere perciò considerato come una "grotta ad alta energia"; cioè una grotta dove la presenza dello speleologo, o del turista, non provoca significativi effetti sulla meteorologia ipogea. Naturalmente sono escluse da questa considerazione zone particolari, dove le gallerie sono di dimensioni più contenute o sono chiuse da frane o concrezioni e pertanto escluse dalla circolazione d'aria.

La Galleria Franosa risente in modo significativo della vicinanza con l'ambiente esterno e delle grandi quantità d'aria che entrano dagli ingressi naturali. In inverno, quando l'aria fredda entra dagli ingressi bassi, occorre percorrere alcune centinaia di metri all'interno della grotta, prima che la temperatura

ritorni a essere quella tipica della grotta a quella altitudine e a quella quota. La Galleria del Venerdì è la principale via di comunicazione tra gli ingressi storici dell'Antro del Corchia (Buca d'Eolo) e gli ingressi bassi (Buca del Serpente e Pompieri), ma essendo molto più interna al complesso, ha variazioni di temperatura minime in funzione della stagione. La Galleria delle Stalattiti è invece quasi isolata dalle condizioni meteorologiche esterne, solo l'inversione di direzione della leggera brezza, mai molto forte, consente di apprezzare le variazioni stagionali in questo tratto.

Per quanto riguarda infine gli effetti della fruizione turistica sul clima ipogeo, gli andamenti delle temperature misurati ante operam e post operam non mostrano comportamenti significativamente diversi e modifiche indotte dalla fruizione turistica della grotta. Il leggero scostamento in valore assoluto delle medie ante operam e post operam è determinato dal diverso principio di funzionamento della strumentazione utilizzata nelle due fasi; infatti, la differenza tra i valori medi delle diverse grandezze misurate è maggiore alla Galleria delle Stalattiti dove la ventilazione naturale è più bassa e le variazioni sono più contenute e non nascondono le differenze strumentali.

Le acque dell'Antro del Corchia

Aspetti chimici e microbiologici

Tipologia delle acque in ingresso nel Complesso carsico del monte Corchia - Lo studio delle piogge



Fig.. 4.1 - A: Cresta sud del monte Corchia. B: Postazione di campionamento delle piogge sullo sperone sud-ovest del monte Corchia (quota 1074 m, destra orografica del Canale delle Volte). C: Pania della Croce.

Lo studio delle acque del Complesso carsico del monte Corchia è in larga parte limitato al settore denominato Antro del Corchia dove dal 1997 è iniziata l'attività di monitoraggio ante-operam, in

previsione della fruizione turistica di una piccola parte di questo settore di grotta, come riportato nei precedenti capitoli. Sono state comunque effettuate analisi di acque di altre parti di tale complesso.

Per lo studio delle acque dell'Antro del Corchia, si è ritenuto opportuno analizzare le caratteristiche chimiche e chimico-fisiche delle acque di pioggia per valutare il loro contributo alla composizione chimica delle acque correnti ipogee in concorso con quello legato all'interazione acqua-roccia. Sulle piogge sono stati ricercati anche i componenti minori: metalli ed elementi di natura non metallica. Dal 1997 fino al 2011 è stato in funzione un sistema di raccolta delle piogge sullo sperone sud-ovest sovrastante la Buca del Serpente (quota 1074 m, destra orografica del Canale delle Volte, posizione: 44° 01' 27" nord; 10° 18' 05" est.), un evidente rilievo piramidale ben in vista dai dintorni dell'ingresso al settore turistico dell'Antro del Corchia (Fig. 4.1 e 4.2).

Il sistema era costituito da un flacone di raccolta per il campionamento dei macrocostituenti, e talvolta da un secondo flacone di raccolta per il campionamento dei metalli ed altri elementi di natura non metallica, accoppiato ad un pluviometro per misurare la quantità di pioggia caduta (Fig. 4.3 e 4.4).

Per minimizzare gli effetti della lunga permanenza delle piogge campionate nei flaconi di raccolta, vennero adottate le seguenti procedure di stabilizzazione dei componenti in soluzione:

a) aliquota destinata all'analisi dei componenti principali:

nel flacone di campionamento si aggiungono 3 ml di cloroformio a 50 ml di acqua ad elevata purezza. Il cloroformio, comunemente impiegato per stabilizzare soluzioni di riferimento di ione nitrato, riduce il metabolismo microbico delle forme di azoto, ma non sempre è efficace nei confronti della proliferazione di forme algali. Per gli altri macrocostituenti (solfati, cloruri, sodio, ecc.), si ritiene che questi siano poco influenzati dalla lunga permanenza nel flacone di campionamento.

b) aliquota per metalli ed elementi di natura non metallica:

nel flacone di campionamento si aggiungono 2 ml di acido nitrico a 50 ml di acqua ad elevata purezza. La presenza di acido evita la formazione di alghe, mantiene i metalli nella forma solubile e minimizza gli effetti dell'adsorbimento di questi sulle pareti del recipiente.

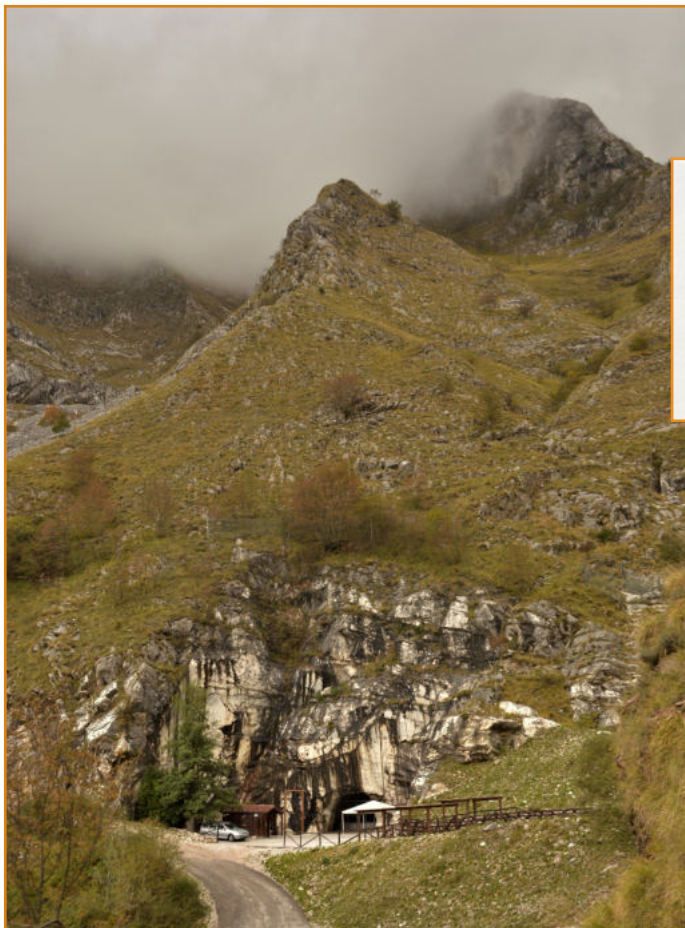


Fig. 4.2 - Lo sperone sud-ovest del monte Corchia (quota 1074 m), alla cui sommità sono stati posti i campionatori per le piogge dal 1997 al 2011. Localizzato sulla destra orografica del Canale delle Volte, costituisce un evidente rilievo piramidale al di sopra dell'ingresso turistico all'Antro del Corchia.

Fig. 4.3 - Campionatori per le piogge posizionati sulla sommità dello sperone sud-ovest del monte Corchia.



Il recupero dei flaconi di campionamento veniva effettuato ogni tre mesi in corrispondenza del cambio di stagione. La tecnica di campionamento non permetteva di cogliere le caratteristiche chimiche di ogni singolo evento piovoso; i campioni raccolti erano pertanto rappresentativi delle caratteristiche chimiche medie delle precipitazioni meteoriche di ogni stagione. Ciò è stato ritenuto

sufficiente a determinare il contributo delle piogge alla composizione delle acque sotterranee del monte Corchia: certi ioni (sodio, cloruro, nitrato e altri), provengono prevalentemente dalle piogge. Nonostante qualche difficoltà, talvolta, per avverse condizioni meteorologiche durante le fasi di installazione e recupero, il sistema di campionamento, in circa 15 anni di stazionamento sulla sommità dello Sperone delle Volte, non ha mai subito alcun danneggiamento.

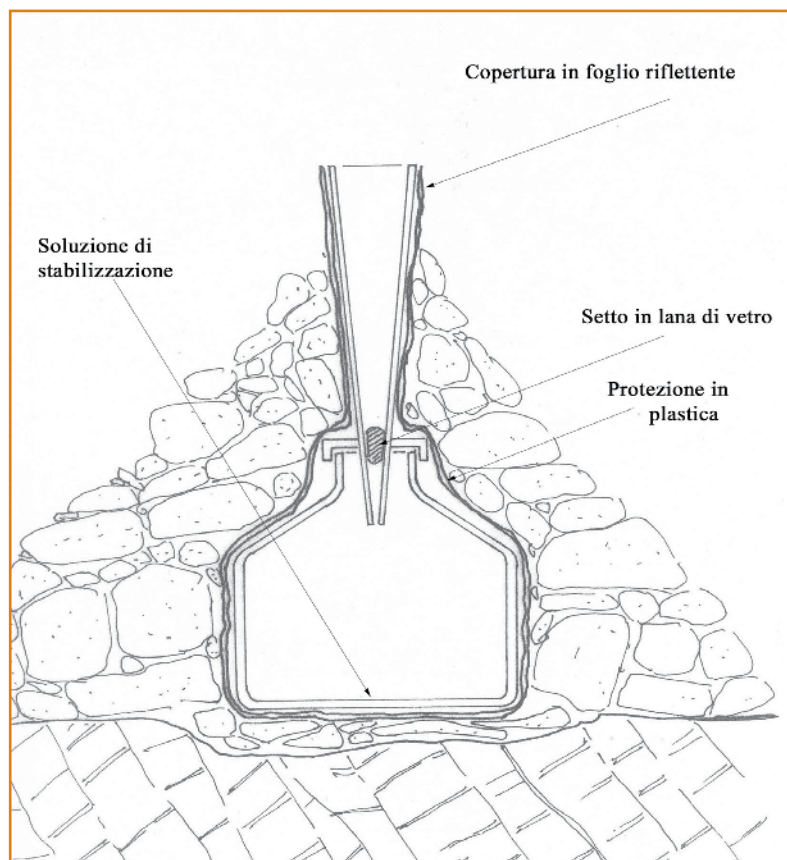


Fig. 4.4 – Sezione di un campionatore per le piogge posizionato sulla sommità dello sperone sud-ovest del monte Corchia.

Nelle piogge gli ioni sodio, cloruro, solfato e magnesio sono dovuti ad aerosol marino.

Lo ione solfato nell'atmosfera deriva inoltre dall'ossidazione fotochimica di SO_2 con trasformazione a SO_3 e successiva idratazione con formazione di acido solforico per la presenza di umidità nell'atmosfera. Gli ossidi di zolfo SO_x (SO_2 e SO_3) presenti nell'atmosfera derivano sia da fonti naturali (attività biogenica, eruzioni vulcaniche, talvolta assieme a idrogeno solforato H_2S , e da incendi di foreste) che da fonti antropiche, principalmente dall'impiego dei combustibili fossili, soprattutto carbone. I solfati vengono rimossi dall'atmosfera mediante "deposizione secca" (in assenza di pioggia) o mediante "deposizione umida" con le piogge, pertanto concentrazioni variabili, comunque basse si riscontrano sempre nelle piogge. Nell'atmosfera è inoltre presente acido metansolfonico (MSA), proveniente dall'ossidazione del dimetilsolfuro, sostanza derivante dall'attività biologica marina, e acidi carbossilici, sostanze che non sono state oggetto di analisi.

Nell'atmosfera, assieme all'azoto che è presente principalmente come N_2 , si trovano altre forme di questo elemento, pur in basse concentrazioni; tra queste si trova l'ossido di azoto (NO), il biossido di azoto (NO_2), l'ammoniaca (NH_3), gli acidi nitrico (HNO_3) e nitroso (HNO_2). Le fonti che producono le due forme di ossidi di azoto (identificati come NO_x)

sono molteplici, riconducibili in parte ad origine naturale (es., scariche elettriche dei temporali, eruzioni vulcaniche, incendi di foreste, ecc.) in parte ad attività umane attraverso i processi di combustione di biomasse, carbone e petrolio. Nella atmosfera si hanno fenomeni ossidativi che portano alla formazione dello ione nitrato che successivamente viene trascinato al suolo con le piogge.

L'idrogenocarbonato in concentrazioni significative nelle piogge si trova solo in casi particolari, talvolta in seguito al trasporto di polveri sahariane.

Data posizionamento campionatore		02/07/1997	04/12/1997	03/04/1998	20/06/1998	18/09/1998	22/12/1998	15/03/1999	16/06/1999	29/09/1999
Data ritiro campionatore		04/12/1997	03/04/1998	20/06/1998	18/09/1998	22/12/1998	15/03/1999	16/06/1999	29/09/1999	29/12/1999
Quantitativo pioggia campionata	mm	444	552	357	137	466	240	483	381	845
Conducibilità Elettrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ 25 °C	28,0	24,0	26,0	70,0	57,0	29,0	27,0	44,4	52,0
pH	Unità pH	6,1	5,0	6,1	7,6	6,6	5,4	5,5	6,7	7,4
Ammonio	mg/L NH_4	0,31	1,15	<0,1	6,4	0,76	0,31	0,4	3,6	<0,1
Nitrito	mg/L NO_2	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,06	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cloruro	mg/L Cl	3,9	3,6	2,6	2,5	9,8	4,1	3,6	1,1	9,9
Nitrato	mg/L NO_3	1,2	1,6	1,7	0,8	1,5	1,4	1,9	1,3	1,9
Solfato	mg/L SO_4	2,9	2,9	2,4	2,9	3,3	2,3	2,7	2,0	2,8
Idrogenocarbonato	mg/L HCO_3	1,5	<0,5	0,5	24,7	4,3	0,7	0,7	16,1	1,0
Sodio	mg/L Na	1,9	1,0	1,7	1,8	5,1	2,5	2,1	0,6	5,7
Potassio	mg/L K	0,1	0,1	0,1	0,8	0,5	0,1	0,2	0,9	0,3
Calcio	mg/L Ca	2,1	1,6	1,1	2,4	1,7	0,8	1,1	4,2	2,7
Magnesio	mg/L Mg	0,2	<0,1	0,3	0,4	0,7	0,4	0,3	<0,1	<0,1

Tab. 4.1

Data posizionamento campionatore		29/12/1999	24/03/2000	15/06/2000	17/09/2000	01/01/2001	24/03/2001	24/03/2001	21/06/2001	16/09/2001
Data ritiro campionatore		24/03/2000	15/06/2000	17/09/2000	01/01/2001	24/03/2001	21/06/2001	21/06/2001	16/09/2001	05/01/2002
Quantitativo pioggia campionata	mm	123	351	297	575	457	350	309	198	515
Conducibilità Elettrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ 25 °C	39,0	31,0	27,5	21,5	27,0	35,7	42,1	68,5	49,5
pH	Unità pH	6,1	6,7	6,6	6,6	6,4	7,6	6,7	6,8	7,9
Ammonio	mg/L NH_4	0,9	0,7	1,2	0,6	1,1	2,0	1,3	1,3	1,3
Nitrito	mg/L NO_2	0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,02	0,03	0,02	< 0,01	-
Cloruro	mg/L Cl	5,4	3,3	2,4	3,5	4,0	4,0	3,5	4,3	6,8
Nitrato	mg/L NO_3	2,9	1,9	2,2	1,4	1,4	2,8	2,6	2,0	2,4
Solfato	mg/L SO_4	3,8	3,6	2,6	2,2	2,7	3,5	3,4	2,9	3,1
Idrogenocarbonato	mg/L HCO_3	3,3	3,8	8,0	4,5	4,9	8,7	11,9	22,0	-
Sodio	mg/L Na	3,4	1,5	1,2	2,1	2,3	2,9	3,2	5,6	5,0
Potassio	mg/L K	0,2	0,3	0,5	0,2	0,2	0,4	0,4	1,0	1,2
Calcio	mg/L Ca	1,7	2,8	3,1	1,8	2,4	4,2	3,8	4,3	4,8
Magnesio	mg/L Mg	0,5	0,2	0,2	0,3	0,6	0,2	0,4	0,8	0,9

Tab. 4.2

Data posizionamento campionatore		05/01/2002	23/03/2002	22/06/2002	13/09/2002	12/12/2002	29/03/2003	02/07/2003	29/09/2003	23/03/2004
Data ritiro campionatore		23/03/2002	22/06/2002	13/09/2002	12/12/2002	29/03/2003	02/07/2003	29/09/2003	27/12/2003	09/06/2004
Quantitativo pioggia campionata	mm	188	423	273	311	305	180	221	264	318
Conducibilità Elettrica	$\mu\text{S}/\text{cm } 25^\circ\text{C}$	55,3	65,6	50,2	36,0	33,3	38,9	76,8	44,0	30,6
pH	Unità pH	7,3	7,4	6,8	7,0	6,5	8,1	7,9	7,3	6,2
Ammonio	mg/L NH_4	0,2	1,0	0,3	1,2	0,7	11,1	1,2	1,5	0,8
Nitrito	mg/L NO_2	-	-	-	-	<0,01	0,17	0,09	<0,01	<0,01
Cloruro	mg/L Cl	5,7	4,6	1,1	3,0	4,8	3,9	3,2	5,4	3,3
Nitrato	mg/L NO_3	3,6	1,9	1,8	1,7	1,6	3,2	2,5	1,7	1,3
Solfato	mg/L SO_4	4,1	4,8	2,0	2,0	2,3	7,3	3,5	2,5	2,3
Idrogenocarbonato	mg/L HCO_3	-	-	-	-	-	-	-	15,0	-
Sodio	mg/L Na	9,5	3,4	6,0	2,6	3,1	4,4	4,5	3,9	1,9
Potassio	mg/L K	0,8	1,0	0,2	0,4	0,7	-	1,6	0,4	0,4
Calcio	mg/L Ca	3,7	6,3	3,7	2,3	6,0	4,6	9,0	3,5	7,7
Magnesio	mg/L Mg	2,4	0,9	0,9	0,3	0,8	1,4	1,2	0,5	0,3

Tab. 4.3

Data posizionamento campionatore		29/09/2004	02/01/2005	30/08/2005	07/03/2006	30/11/2006	20/11/2008	13/11/2009	08/10/2010
Data ritiro campionatore		02/01/2005	16/03/2005	07/03/2006	23/05/2006	09/05/2007	15/04/2009	03/05/2010	09/03/2011
Quantitativo pioggia campionata	mm	317	-	-	-	-	-	-	-
Conducibilità Elettrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ 25 °C	19,2	63,3	25,0	57,6	42,6	15,7	25,0	18,3
pH	Unità pH	6,3	6,8	6,8	6,7	5,5	6,3	-	7,0
Ammonio	mg/L NH_4	-	0,6	0,9	4,1	0,6	-	0,7	1,0
Nitrito	mg/L NO_2	-	0,02	0,02	0,1	0,02	-	0,04	-
Cloruro	mg/L Cl	3,4	9,1	4,1	3,2	7,3	2,5	2,6	1,7
Nitrato	mg/L NO_3	2,7	5,7	1,5	2,9	3,3	0,9	1,7	1,5
Solfato	mg/L SO_4	2,0	4,9	2,1	3,5	3,7	1,1	1,5	4,6
Idrogenocarbonato	mg/L HCO_3	4,9	8,5	9,8	26,0	3,7	-	-	-
Sodio	mg/L Na	2,5	6,2	2,7	2,7	4,5	1,5	1,5	0,8
Potassio	mg/L K	0,1	0,6	0,6	1,1	0,5	<0,3	<0,3	0,3
Calcio	mg/L Ca	5,7	6,8	3,2	5,4	3,2	<1	2,6	0,9
Magnesio	mg/L Mg	1,7	1,0	0,4	0,5	1,0	<0,5	<0,5	0,14

Tab. 4.4

Tabelle 4.1 - 4.2 - 4.3 e 4.4 – Composizione chimica delle piogge campionate dal 1997 al 2011 sullo sperone sud-ovest del monte Corchia (quota 1074 m).

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	6,4	26,0
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

Tab. 4.5 - 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).

Rispetto alla consuete tecniche tradizionali di prelievo (wet and dry), il campione in bulk, come in questo caso, non consente confronti con le caratteristiche di precipitazioni in aree differenti dove generalmente vengono campionati separatamente i vari eventi meteorici e separata la parte umida (costituita prevalentemente dagli acidi derivati da ossidi di zolfo e ossidi di azoto, cioè acido solforico e nitrico, ma anche da metalli e inquinanti organici, rimossi dall'atmosfera da pioggia, neve e nebbia) dalla precipitazione secca; questa è costituita da ossidi di zolfo e ossidi di azoto che danno luogo a dei particolati acidi che poi raggiungono il suolo per gravità. La deposizione secca determina la rimozione di gas e aerosol e vari inquinanti chimici dall'atmosfera, con loro deposizione al suolo, anche in assenza di precipitazioni.

Infine l'aggiunta di cloroformio come stabilizzante delle forme di azoto nei flaconi di raccolta impedisce l'analisi della componente organica delle piogge. Il sistema è stato comunque utilizzato per acquisire informazioni sulle piogge in relazione ad una specifica tematica come quella del controllo e dello studio delle acque dell'Antro del Corchia e non per confronti con sistemi di campionamento già in atto nel territorio nazionale.

Per quando riguarda la stabilità degli analiti nelle condizioni di campionamento, le sperimentazioni condotte indicano che per i metalli e gli elementi

di natura non metallica, a livelli di concentrazioni comprese fra 2,5 e 250 µg/L, seguendo le modalità previste per la stabilizzazione, non si determinano variazioni evidenti delle relative concentrazioni per almeno 5 mesi. Per quanto riguarda i macrocostituenti, non si prevedono influenze per i principali metalli alcalini e alcalino-terrosi (sodio, potassio, calcio e magnesio). Prove condotte su soluzioni a concentrazioni note di nitrato e ammonio indicano che il sistema di stabilizzazione adottato consente un mantenimento soddisfacente dei livelli delle concentrazioni iniziali (Mantelli F., et al., 2000). Pur con i vari limiti, tra cui quello di disporre al momento di una sola stazione di campionamento, i dati raccolti sono gli unici disponibili sulle piogge in ingresso in questo complesso carsico.

Nella **Tab. 4.6** sono riportati i risultati relativi ai metalli e agli elementi di natura non metallica contenuti nelle piogge campionate. Le concentrazioni di questi elementi possono rappresentare il fondo naturale in ambienti dove sono scarse le influenze antropiche: nonostante l'intensa attività estrattiva presente sulla montagna, non si ritiene che essa possa determinare contaminazione delle piogge così come la presenza di estesi insediamenti abitativi e l'attività industriali lungo la costa apuana.

Data posizionamento campionatore	29/12/1999	24/03/2000	17/09/2000	01/01/2001	20/11/2008	13/11/2009	08/11/2010	Valori
Data ritiro campionatore	24/03/2000	15/06/2000	01/01/2001	24/03/2001	15/04/2009	03/05/2010	06/05/2011	Mediani
Tecniche di analisi	AAS-GF	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	AAS-GF	ICP-MS	
Alluminio	-	137	74	51,7	48,6	63,3	104	68
Antimonio	-	0,34	0,08	0,14	<0,1	<2	<0,1	0,14
Arsenico	-	0,3	<0,1	0,1	0,1	<1	0,1	0,1
Bario	6,0	5,5	3,2	2,2	0,5	<5	2,4	2,4
Cadmio	<0,1	<0,1	0,15	0,15	<0,05	<0,1	0,1	<0,1
Cromo	<1	<1	1,5	<1	<0,1	<1	0,2	<1
Ferro	38	51	27,3	24	33	67	93	38
Manganese	5,0	9,9	5,5	3,1	4,9	12,0	28,0	5,5
Mercurio	-	-	<0,05	-	0,008	-	0,009	-
Piombo	3,0	1,8	1,7	1,9	0,8	<0,1	0,6	1,7
Nichel	-	0,7	0,5	1,0	0,3	<2	0,3	0,5
Rame	-	1,1	1,2	0,2	0,7	0,9	5,1	1,0
Stronzio	-	7,5	6,3	3,6	2,0	-	3,9	3,9
Selenio	-	-	<2	<2	-	<2	0,2	<2
Vanadio	-	1,2	0,8	1,3	1,2	<5	1,3	1,2

Tab. 4.6 - Metalli ed elementi di natura non metallica contenuti nelle piogge campionate dal 1999 al 2011 sullo sperone sud ovest (quota 1074 m) del monte Corchia. Valori espressi in µg/L. (Limiti di rivelabilità variabili in funzione delle differenti tecniche analitiche).

Da un confronto con le concentrazioni degli stessi elementi riscontrati nelle piogge in un'area con influenza antropica molto più bassa, come quella appenninica lucchese – modenese (Fig. 4.5), non

si riscontrano differenze significative (Tab.4.7; osservare i valori mediani). Si osserva anche una distribuzione simile nel tempo dei valori di pH (Fig. 4.6).

Elementi	Valore minimo	Valore mediano	Valore massimo
Alluminio	65	113	208
Antimonio	0,1	0,1	0,5
Arsenico	0,1	0,2	0,4
Bario	1,9	5,0	11,3
Cadmio	<0,05	0,1	0,2
Cromo	<0,1	<0,1	0,3
Ferro	41	99	184
Manganese	5,9	8,0	44,8
Piombo	<0,1	0,8	2,0
Nichel	0,3	0,5	1,0
Rame	0,8	1,5	3,7
Stronzio	1,9	3,3	6,8
Selenio	<0,1	0,1	0,2

Tab. 4.7 - Elementi in traccia contenuti nelle piogge campionate dal 1995 al 2012 con frequenza annuale sullo sperone sud-est m 1880 monte Rondinaio (Appennino lucchese-modenese). Valori espressi in µg/L

Fig. 4.5 – Postazione di campionamento delle piogge a quota m 1880 sullo sperone sud-est del monte Rondinaio (Appennino lucchese-modenese).

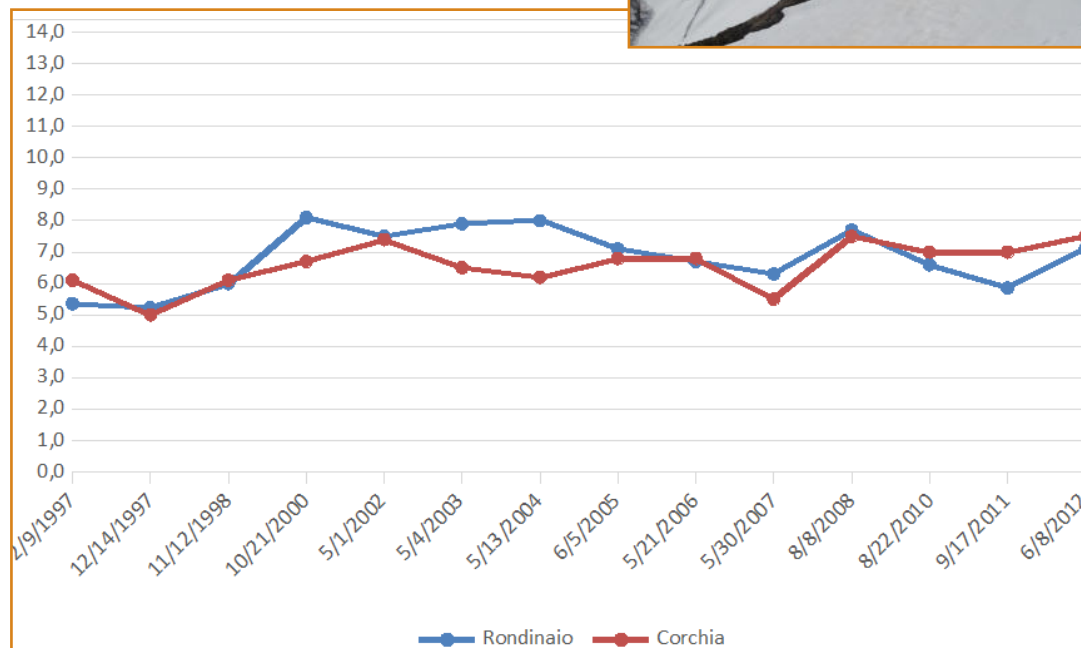


Fig. 4.6 – Andamento del pH nei campioni di pioggia raccolti sullo sperone sud-est del monte Rondinaio e sullo sperone sud-ovest del monte Corchia dal 1997 al 2012.

Il monitoraggio chimico delle acque

Le acque all'interno dell'Antro del Corchia sono rappresentate da acque correnti (il torrente Gronda e il torrente Vianello-Vidal), alimentate principalmente dalle piogge, e da acque confinate (laghetto del Venerdì, laghetto della Galleria Alta e laghetto Galleria Bassa delle Stalattiti) le quali derivano principalmente da infiltrazioni dall'esterno attraverso microfratture o da stillicidi prodotti dalla condensazione dell'acqua contenuta nell'aria umida che entra nel sistema dall'esterno. Inoltre, in caso di piogge intense si ha la formazione di cascatelle temporanee in vari punti del sistema, flussi idrici comunque di breve durata.

Il controllo dei parametri relativi alle acque è fondamentale all'interno di un sistema carsico, poiché l'acqua, oltre a determinare la formazione delle gallerie ed i fenomeni di concrezionamento o dissoluzione, può essere portatrice di informazioni su quanto accade all'esterno del complesso.

La qualità delle acque, attraverso la determinazione dei parametri chimici e microbiologici, indica quanto il sistema carsico sia esposto a eventuali contaminazioni dovute ad attività antropica o anche a fenomeni naturali.

I parametri chimici e chimico-fisici individuati per la valutazione dello stato dell'ambiente in relazione alla matrice acqua sono i seguenti:

temperatura aria, temperatura acqua, conducibilità

elettrica, anidride carbonica disciolta, ossigeno disciolto, solidi totali disciolti, torbidità, pH, ammonio, nitrito, cloruro, nitrato, solfato, calcio, magnesio, idrogenocarbonato, fosfato, sodio, potassio, ferro, manganese, cadmio, cromo, piombo, nichel, rame, zinco, carbonio organico totale (T.O.C.), silice, idrocarburi e composti organoalogenati.

Tra questi, i parametri che sono ritenuti principali indicatori, ciascuno con un peso diverso, sia in relazione alle modifiche legate ai processi naturali (ad es. variazione della portata delle acque, alterazione da minerali accessori, ecc.) sia a quelle legate agli impatti antropici presenti e prevedibili, sono:

↘ conducibilità elettrica specifica (in seguito denominata conducibilità elettrica)⁽¹⁾ e componenti principali (cloruro, nitrato, solfato, bicarbonato, sodio, potassio, calcio, magnesio, ecc.);

↘ torbidità⁽²⁾: introduzione di acque torbide e/o mobilitazione del sedimento in seguito a piene dei corsi ipogei;

↘ idrocarburi e solventi (alifatici, aromatici, alogenati): dispersione di solventi, lubrificanti, oli minerali da macchinari o mezzi meccanici in movimento, ecc.;

↘ Ammonio e nitriti: possibile lisciviazione dei rifiuti sepolti, introduzione di acque di scarico di tipo civile (vedi microbiologia acque Fontane di Cardoso);

↘ Metalli pesanti: abbandono di rifiuti o dispersione di reflui che possono rilasciare metalli. I metalli di origine naturale non sono presenti in concentrazioni significative nelle rocce carbonatiche che costituiscono il sistema carsico. Fa eccezione il ferro, metallo presente con mineralizzazioni accessorie nel marmo e nelle dolomie (Grezzoni), come pirite o altro solfuro (FeS_2 , FeS) o ossido e idrossido;

↘ Parametri microbiologici: nel corso del monitoraggio ante-operam sono stati ricercati quelli previsti dall'allora in vigore DPR 236/1988 sulle acque potabili. In seguito sono stati determinati anche i parametri previsti dal D. lgs. 31/2001.

(1) Conducibilità elettrica. In una soluzione, le sostanze ioniche presenti consentono il passaggio della corrente elettrica; poiché aumenta la conducibilità elettrica in modo proporzionale alla concentrazione delle sostanze disciolte, la conducibilità elettrica è un parametro utile per ottenere una misura, seppur approssimativa, del contenuto salino di un'acqua. Quando la misura della conducibilità elettrica viene effettuata con elettrodi con superficie di 1 cm^2 posti alla distanza di 1 cm si ricava la conducibilità elettrica specifica. L'unità di misura della conducibilità elettrica è il Siemens per centimetro ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Per le acque con mineralizzazione comunemente compresa fra 50 e 2000 mg/L viene utilizzato un sottomultiplo: il microSiemens per centimetro ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Ioni diversi, a parità di concentrazione, determinano una conducibilità elettrica diversa. La conducibilità dipende dalla temperatura e quindi occorre riportare i valori misurati a quelli teorici che si avrebbero alla temperatura standard di $25\text{ }^\circ\text{C}$ (oppure di $18\text{ }^\circ\text{C}$ o $20\text{ }^\circ\text{C}$). Ciò è possibile tramite formule o automaticamente da parte dello stesso strumento di misura.

(2) La torbidità, comunemente definita come la riduzione della trasparenza di un liquido a causa della presenza di sostanze in sospensione, è prodotta dall'interazione della luce con particelle con diametro generalmente compreso fra 10 nm e 1mm. Non esiste una precisa correlazione fra torbidità e concentrazione dei solidi sospesi, poiché le proprietà ottiche della sospensione sono influenzate dalla dimensione e dalla forma delle particelle, oltre che dalla lunghezza d'onda della luce incidente e dall'indice di rifrazione della fase liquida. Le sostanze che principalmente provocano la torbidità sono spesso costituite da argille.

Frequenza dei campionamenti

Durante i primi due anni i principali corpi idrici sono stati campionati con frequenza trimestrale per cercare di individuare le possibili variazioni indotte dal mutare delle stagioni. Alcuni corpi idrici sono stati campionati con maggior frequenza sia per la loro diretta relazione con il tracciato turistico, sia per individuare correlazioni fra le concentrazioni dei parametri chimici e variazione delle portate.

Postazioni di campionamento delle acque

I punti di prelievo sono stati individuati all'interno del tratto di grotta destinato all'opera di sistemazione turistica e in alcune zone limitrofe (Fig. 4.7).

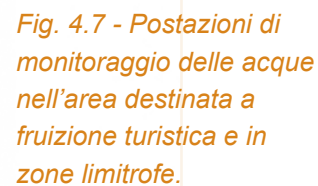
- ↘ Cascata della Risalita dei Romani: nei pressi del percorso turistico;
- ↘ Laghetto del Venerdì: attraversato dal percorso turistico;
- ↘ Torrente della Gronda: attraversato dal percorso turistico;
- ↘ Cascata Risalita dei Lucchesi: nei pressi della zona della galleria delle Stalattiti;
- ↘ Laghetto Galleria Bassa delle Stalattiti: lambito dal percorso turistico;
- ↘ Laghetto Galleria Alta delle Stalattiti: nelle vicinanze del percorso turistico;

↘ Torrente Vianello-Vidal (in direzione del lago Nero): a circa 350 metri dall'intersezione con il percorso turistico (nei pressi della cascata della Risalita dei Romani);

↘ Lago Nero: a circa 500 metri dall'intersezione con il percorso turistico (nei pressi della cascata della Risalita dei Romani);

↘ Fontane di Cardoso: postazione di prelievo circa 500 m a monte di Ponte Stazzemese, lungo il margine destro della strada che conduce a Cardoso.

Sono state inoltre campionate alcune acque di piccoli rivoli che sono attivi solo in occasione di piogge intense (zona della Galleria Dipinta lungo il percorso turistico) e acque di stillicidio di stalattiti in alcuni punti del tratto della grotta interessato dal percorso turistico.



Metodi di campionamento e analisi

Per l'espletamento delle analisi sono stati utilizzati i metodi per le acque destinate al consumo umano facendo prevalentemente riferimento, in un primo tempo, a quelli descritti nei manuali UNICHIM n° 167, n° 169 parte I e II e successivamente ai metodi IRSA CNR 2003 e a quelli dei RAPPORTI ISTISAN 2007/31 per le acque.

Per il campionamento sono state seguite le indicazioni relative alle acque destinate al consumo umano del manuale UNICHIM n. 157; in particolare per ogni campione sono state prelevate le seguenti aliquote:

- 1) 1 litro in flacone di plastica per la determinazione dei parametri relativi all'idrochimica;
- 2) 1 litro in bottiglia di vetro per la determinazione degli idrocarburi e composti organoalogenati;
- 3) 125 mL in plastica (polietilene) per la determinazione dei metalli e altri elementi in traccia;
- 4) 200 mL in bottiglia di vetro per la determinazione del carbonio organico totale (T.O.C.);
- 5) 200 mL in flacone di plastica per analisi dell'anidride carbonica disciolta.

Il campionamento dell'acqua destinata ad analisi microbiologica è stato effettuato con bottiglie sterili.

In sede di prelievo sono state effettuate le seguenti operazioni:

- ✓ stabilizzazione delle aliquote destinate all'analisi degli elementi in traccia con aggiunta di 0,2 mL di acido nitrico ad elevata purezza; eventuale filtrazione della relativa aliquota;
- ✓ stabilizzazione delle aliquote destinate all'analisi del T.O.C.;
- ✓ misura delle temperature dell'aria e dell'acqua;
- ✓ stima e/o misura della portata;
- ✓ misura dell'ossigeno disciolto;
- ✓ misura del pH;
- ✓ misura dell'anidride carbonica libera disciolta (mediante titolazione).

Nella **Tab. 4.8** sono riportate le tecniche analitiche e i relativi limiti di rivelabilità per i parametri chimici e chimico-fisici determinati nelle acque e nelle piogge.

Parametro	Tecnica analitica	Limite di rivelabilità o risoluzione
Temperatura	Termometria	0,01 - 0,1 °C
Anidride carbonica	Volumetria	2 mg/L
Conducibilità elettrica	Conduttometria	0,1 µS/cm
pH	Potenziometria	0,1
Torbidità	Turbidimetria	0,05 NTU
Ossigeno disciolto	Potenziometria	0,1 mg/L
Ammonio	Analisi colorimetrica in flusso	0,05 mg/L
Nitrito	Analisi colorimetrica in flusso	0,05 mg/L
Fluoruro	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Cloruro	Cromatografia ionica	0,1 mg/L
Bromuro	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Nitrato	Cromatografia ionica	0,02 mg/L
Solfato	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Idrogenocarbonato	Volumetria	5 mg/L
Sodio	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Potassio	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Sodio	Cromatografia ionica	0,01 mg/L
Potassio	Cromatografia ionica	0,01 mg/L
Calcio	Cromatografia ionica	0,25 mg/L
Magnesio	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Silice	Colorimetria	0,5 mg/L SiO ₂
Carbonio Organico Tot.	Ossidazione ad umido con persolfato e UV	0,1 mg/L di C

Tab. 4.8 - Tecniche analitiche comunemente impiegate per la determinazione dei componenti principali in acque di tipo carsico. Nota: i limiti di rivelabilità indicati sono quelli riportati nei metodi di riferimento. Questi possono variare anche di 1 o 2 ordini di grandezza in funzione della tecnica analitica impiegata e dell'evoluzione delle apparecchiature di misura.



Fig. 4.8 – Misura dell'anidride carbonica libera disciolta mediante titolazione nelle acque oggetto di monitoraggio.



Fig. 4.9 – Misura del pH nelle acque del laghetto della Galleria Bassa delle Stalattiti.

Composizione delle acque

Le acque dell'Antro del Corchia che fluiscono nella zona destinata a fruizione turistica e in aree limitrofe sono state oggetto di monitoraggio in quanto riconducibili alle seguenti situazioni:

- a) acque prossime in alcune zone al percorso frequentato da turisti;
- b) acque in parte connesse a possibili impatti da attività estrattiva;
- c) acque oggetto di studio per quanto riguarda gli aspetti di potabilità sia per un loro uso limitato nell'ambito dello stesso sistema ipogeo, sia per un generale e diffuso interesse da parte dei vari soggetti che gravitano nell'ambito del complesso carsico (Parco delle Alpi Apuane, Federazione Speleologica Toscana, Gestore della parte turistica dell'Antro del Corchia, Comune di Stazzema).

Per quanto concerne la matrice acqua si è proceduto a considerare la portata delle acque correnti e la relativa variabilità. Per ciascuna tipologia di acque si è quindi effettuata la determinazione delle caratteristiche chimico-fisiche e della composizione chimica. Si è ricercata la presenza di sostanze tossiche e contaminazioni di tipo microbiologico eventualmente presenti in seguito ad impatti di origine antropica o naturale.

Si sono considerate le variazioni della conducibilità nelle acque dei corsi idrici in relazione al variare

della loro portata, effettuando campionamenti in fase di magra, morbida e piena allo scopo di acquisire una migliore conoscenza dell'idrologia sotterranea e della risposta del sistema carsico alle precipitazioni, nonché dei meccanismi di interazione acqua-roccia.

Per le varie tipologie di acque analizzate durante il lungo periodo di monitoraggio, si riassumono nei paragrafi seguenti le caratteristiche ed i risultati analitici più significativi.

Origine della mineralizzazione delle acque ipogee

L'acqua circolante nel sistema carsico del monte Corchia è sia di origine piovana, sia prodotta dalla condensazione dell'umidità dell'aria che entra nel sistema. Non è stato fatto finora un bilancio quantitativo dei due apporti; certamente il contributo dell'acqua di condensazione è più rilevante di quanto si possa immaginare in ragione dei grandi volumi d'aria che entrano nel complesso durante il periodo estivo. Sulla base di misure dei flussi uscenti di aria dai principali ingressi bassi del complesso carsico (Buca d'Eolo e Buca del Serpente) durante il periodo estivo si stima un apporto di acqua di condensazione di almeno 10 L/minuto.

L'acqua di pioggia, sulla base dei dati acquisiti nel corso di 15 anni di campionamenti, presenta una conducibilità elettrica da (circa) 20 a 60 μS /

cm. Come riportato in letteratura (Defrancesco, et al.1991), anche nel caso del Corchia si osserva che la mineralizzazione dell'acqua in ingresso nel sistema ipogeo avviene prevalentemente nelle aree superficiali della montagna o almeno nei primi strati calcarei dove il maggior contenuto di anidride carbonica proveniente dal suolo rende l'acqua più aggressiva nei confronti della roccia carbonatica. La conducibilità intorno a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ di alcune acque fluenti all'esterno, campionate subito dopo una precipitazione, è sovrapponibile a quella di alcune acque ipogee.

Sulla base di studi condotti sui processi di mineralizzazione delle acque (Defrancesco, et al.,1991) e, in particolare, da prove condotte per lo studio della geochemica delle acque di circolazione del Complesso carsico del monte Corchia (Mantelli, et al., 2005), si possono fare le seguenti ipotesi:

- 1) la roccia calcarea è prevalentemente attaccata chimicamente dall'anidride carbonica disciolta in acqua che libera ioni calcio e idrogenocarbonato;
- 2) alcune specie chimiche si sciolgono in acqua per solubilizzazione diretta: fra queste il solfato di calcio (gesso), sali di metalli alcalini (sodio e potassio);
- 3) lo ione magnesio deriva principalmente dall'alterazione delle dolomie (Grezzoni del monte Corchia);
- 4) un'acqua già significativamente mineralizzata

a ioni calcio e idrogenocarbonato si forma immediatamente al primo contatto della pioggia con la roccia esterna della montagna: la superficie della roccia è modificata dal contatto con umidità e anidride carbonica che nel tempo determina la formazione di idrogenocarbonato di calcio e in quantità molto minori altri sali (solfato di calcio) che restano "residenti in posto" fino all'arrivo delle piogge;

5) I metalli alcalini possono essere presenti come mineralizzazioni secondarie (impurezze della roccia calcarea) in forme direttamente solubili o prevalentemente in strutture reticolari stabili; in questo secondo caso il metallo alcalino passa in soluzione solo con la disgregazione del reticolo cristallino. Tuttavia è significativo il contributo in ioni sodio, magnesio, potassio e cloruri da aerosol marino;

6) Lo ione solfato deriva prevalentemente dalle piogge quando le acque ipogee non hanno contatti con mineralizzazione a pirite. L'ossidazione dei solfuri contribuisce al contenuto dei solfati nelle acque; l'acidità prodotta viene rapidamente compensata dalla reazione con le rocce carbonatiche, mentre il ferro si trasforma in idrossido ferrico, composto insolubile, e direttamente precipitato o adsorbito alle particelle in sospensione e precipitato successivamente.

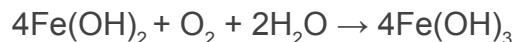
- a) $\text{FeS} + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{+2} + \text{SO}_4^{-2}$
 b) $\text{Fe}^{+2} (\text{aq.}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeOH}^+ (\text{aq.}) + \text{H}_3\text{O}^+$

Reazione di ossidazione dei solfuri presenti come minerali accessori nelle rocce del sistema carsico Antro del Corchia.



Reazione di neutralizzazione dell'acidità liberata dall'ossidazione dei solfuri.

Gli ioni ferrosi Fe^{+2} vengono successivamente ossidati a Fe^{+3} per contatto con l'ossigeno disciolto nelle acque con formazione di idrossido ferrico insolubile:



All'interno del sistema carsico, ma anche in alcune zone superficiali della montagna, le acque circolanti possono incontrare filladi, calcescisti e porfiroidi. Queste rocce sono poco solubili, tuttavia i lenti processi di alterazione chimica possono mettere in circolo piccole quantità di sodio e di silice.

Una delle reazioni di alterazione di un minerale contenente sodio e silice (Albite), presente in rocce vulcaniche e metamorfiche, è la seguente:

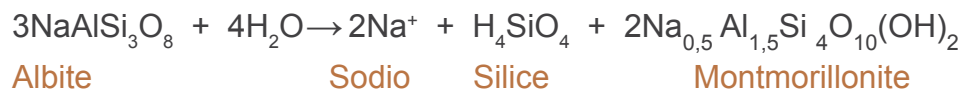


Fig. 4.10 – Cristalli di pirite entro un livello di marmo provenienti dal monte Corchia.

Caratteristiche chimiche delle acque dell'ambiente ipogeo e di quelle delle sue sorgenti

Dai dati sul chimismo delle piogge è possibile valutare il loro contributo ionico alla composizione delle acque di scorrimento superficiale e soprattutto delle acque ipogee. Generalmente le acque stagnanti e quelle correnti presentano una tipologia bicarbonato calcica e talvolta bicarbonato calcica magnesiacca in relazione ai litotipi con cui queste vengono in contatto. Sodio, potassio e nitrati presentano concentrazioni frequentemente simili a quelle delle piogge; i solfati sono talvolta riconducibili ai valori caratteristici delle piogge, ma in alcuni corpi idrici il solfato è in concentrazioni relativamente elevate e conseguente alla sua formazione in situ per alterazione della pirite, come in precedenza esposto.

Nella zona oggetto di studio sono presenti in un ambito non molto esteso e di facile accesso i principali collettori del complesso carsico. Le acque maggiormente studiate sono poco distanti dal ramo turistico o sono direttamente interessate dal percorso.

I corsi idrici oggetto di monitoraggio (torrente Vianello-Vidal e torrente della Gronda) non sono influenzati dalla frequentazione turistica e la variazione del chimismo delle acque è funzione delle variazioni di portata.

La variazione della composizione chimica come riportato in seguito (dati ricavati dai controlli dal 1997 al 2012), riscontrata nello stesso punto di campionamento, è comunque modesta.

Sono principalmente gli ioni idrogenocarbonato e calcio che subiscono variazioni in funzione della portata e che determinano le variazioni di conducibilità elettrica. Un arricchimento di questi ioni si osserva inoltre durante la discesa di queste acque entro il complesso carsico fino alla loro fuoriuscita dalle Fontane di Cardoso; la *Tab. 4.9* mostra come nelle acque di quella sorgente la mineralizzazione, e di conseguenza il valore della conducibilità elettrica, sia più alta rispetto a quella delle acque che l'alimentano.

Data	29/02/2012	02/08/2012	20/08/2012	10/08/2011	29/02/2012	20/08/2012	29/02/2012	02/08/2012	20/08/2012
Parametri	Torrente Vianello-Vidal	Torrente Vianello-Vidal	Torrente Vianello-Vidal	Torrente Gronda	Torrente Gronda	Torrente Gronda	Fontane di Cardoso	Fontane di Cardoso	Fontane di Cardoso
mg/L Cl	6,1	4,8	5,0	5,0	7,8	5,7	6,7	6,8	6,7
mg/L NO ₃	1,8	1,1	1,2	1,2	1,2	1,4	1,4	1,5	1,6
mg/L SO ₄	7,9	11,6	11,0	11,0	4,5	7,3	16,5	16,3	16,3
mg/L HCO ₃	125	125	124	124	134	143	144	150	154
mg/L Na	3,1	3,0	2,9	2,9	3,5	3,5	4,4	4,7	4,9
mg/L K	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,5	0,6
mg/L Ca	30,8	28,9	29,3	29,3	29,3	28,7	38,2	41,1	40,8
mg/L Mg	9,4	10,5	10,2	10,2	13,1	14,8	10,0	9,3	9,3
μS/cm 25 °C	199	207	206	217	-	232	264	278	280

Tab. 4.9 - Confronto fra la composizione dei maggiori corsi idrici sotterranei e la principale sorgente del Complesso carsico del monte Corchia (Fontane di Cardoso).

Cascata della Risalita dei Romani

Localizzazione: pressi del Trivio, Galleria degli Inglesi, lungo il percorso turistico.

Portata: da 4 L/min a 300 L/min.

Costituisce il primo punto di arrivo di acqua lungo il percorso turistico dopo l'ingresso e suscita una significativa manifestazione di interesse per la notevole portata in occasione di forti piogge.

In seguito a varie osservazioni si ipotizza un tempo di arrivo delle acque di pioggia in circa 2 ore.

La conducibilità mostra una moderata variabilità: val. min. 188, val. mediano 210, val. max. 225 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (a 25 °C) calcolati sull'intero periodo di monitoraggio e relativo ad un totale di 27 campionamenti. Cloruri, nitrati e solfati presentano concentrazioni simili a quelle delle piogge. Il grafico in *Fig. 4.11* mette in evidenza gli ioni calcio e idrogenocarbonato come ioni principali.

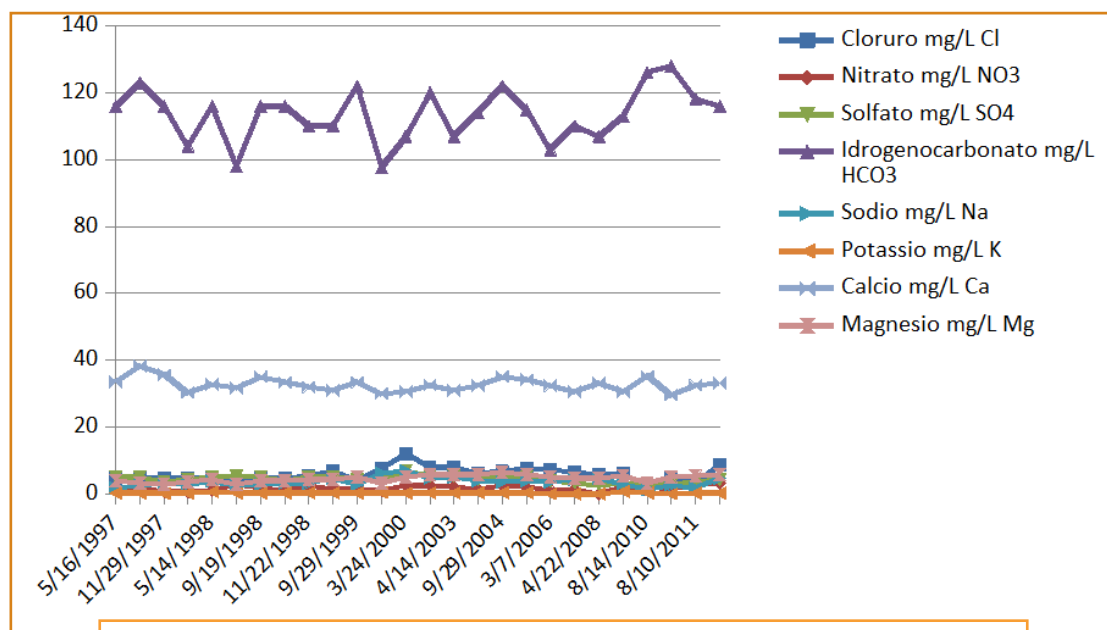


Fig. 4.11 - Andamento dei valori di concentrazione dei componenti principali nelle acque della cascata della Risalita dei Romani (anni 1997-2012).

Il grafico in *Fig. 4.12*, derivante dalla stessa serie analitica relativa alle acque della cascata della Risalita dei Romani, privata del calcio e dell'idrogenocarbonato, mette in evidenza i valori di concentrazione dei componenti minori.

Per alcuni di questi si osserva una certa variabilità (dell'ordine di alcuni mg/L), probabilmente in funzione della variabilità delle piogge che arrivano rapidamente all'interno del sistema nella zona della cascata in oggetto.

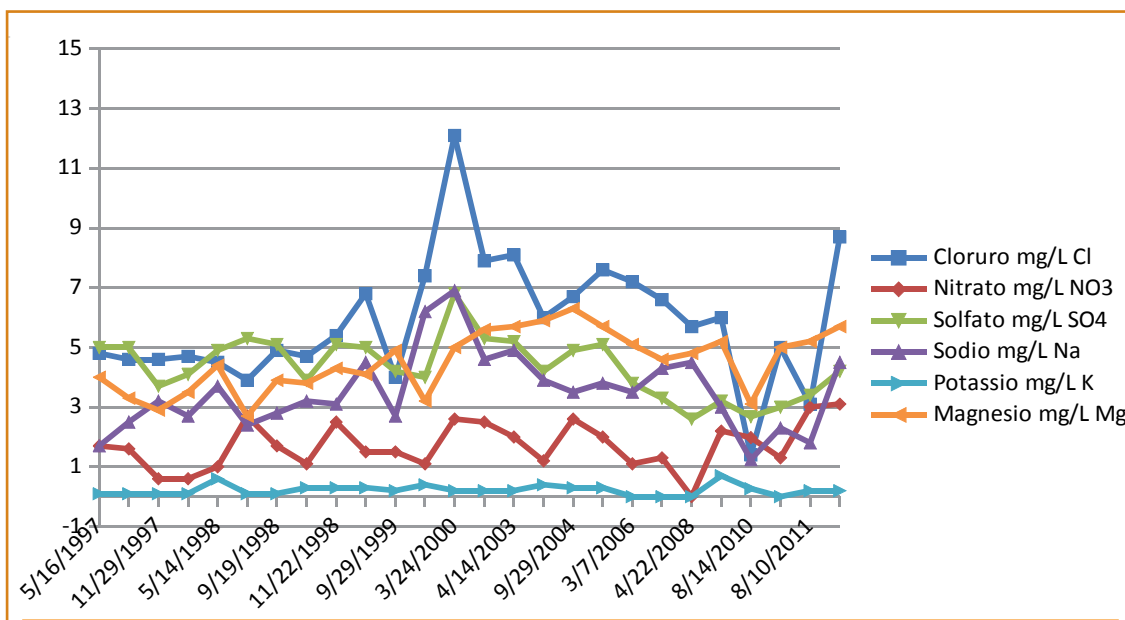


Fig. 4.12 – Andamento dei valori di concentrazione dei componenti minori nelle acque della cascata della Risalita dei Romani (anni 1997-2012). Sono stati esclusi calcio e idrogenocarbonato per rendere leggibili gli ioni presenti in concentrazioni minori.



*Fig. 4.13 – Cascata della Risalita dei Romani
in un momento di bassa portata.*

Laghetto del Venerdì

Localizzazione: Galleria del Venerdì.

Le acque presentano una mineralizzazione mediamente più alta (conducibilità elettrica media 275 $\mu\text{S}/\text{cm}$) rispetto a quella delle acque correnti (conducibilità elettrica nell'intervallo di 200 - 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$). L'alimentazione è da stillicidio, comunque molto modesto. Si è osservato nel corso di un ventennio una diminuzione del livello di questo corpo idrico, diminuzione comunque non quantificata.

Si presume che la concentrazione relativamente elevata del nitrato (intorno a 5 mg/L NO_3) rilevata durante i primi anni di monitoraggio (*Fig. 4.14*) sia imputabile a fenomeni di nitrificazione delle sostanze organiche azotate provenienti dai rifiuti che erano interrati nei pressi del laghetto che successivamente sono stati rimossi con una campagna di pulizia nel settembre 2001.

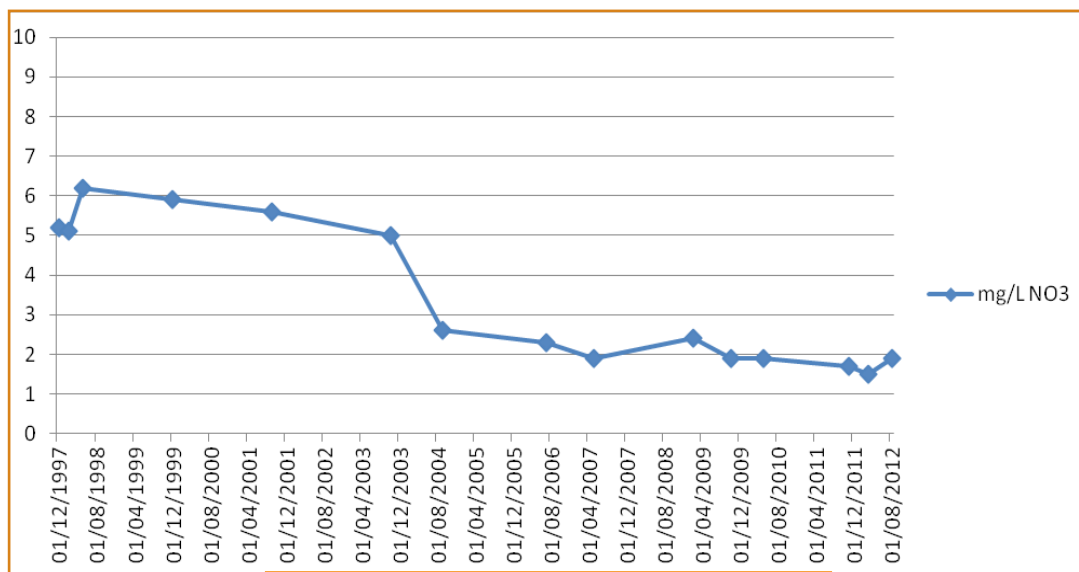


Fig.4.14 - Andamento delle concentrazioni dello ione nitrato nell'acqua del laghetto del Venerdì.

Nel corso del monitoraggio non si osservano variazioni significative di composizione (conducibilità elettrica: valore minimo 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$; valore massimo 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$; tenendo conto dell'incertezza di misura, intorno al 10 %, non si osserva significativa variabilità di questo dato). Le acque di questo laghetto presentano una torbidità variabile (da 0,1 a 1,4 NTU); la torbidità di queste acque è connessa alla frequentazione turistica. La passerella che attraversa il lago determina ricaduta nel laghetto del fango che è rimasto adeso alle scarpe dei visitatori in altre zone del percorso; al momento non si è trovata una soluzione soddisfacente per rimuovere in modo adeguato dalla passerella tali depositi; il lavaggio della passerella con acqua corrente determina arrivo di acqua torbida nel laghetto e non sembra pertanto costituire una soluzione adeguata a tale criticità.

Fig.4.15 - Operazioni di misura dell'ossigeno disciolto entro l'acqua del laghetto del Venerdì.



La composizione delle acque è bicarbonato calcico magnesiaca come si può osservare nella *Fig.4.16*. Le acque presentano una sostanziale costanza di composizione; ad esempio lo ione idrogenocarbonato presenta un intervallo di

concentrazione da 143 a 156 mg/L; tenendo conto dell'incertezza di misura, stimabile intorno al 15%, i valori esprimono una costanza di composizione. Migliore evidenza della costanza di composizione si ha nel grafico riportato in *Fig. 4.17*.

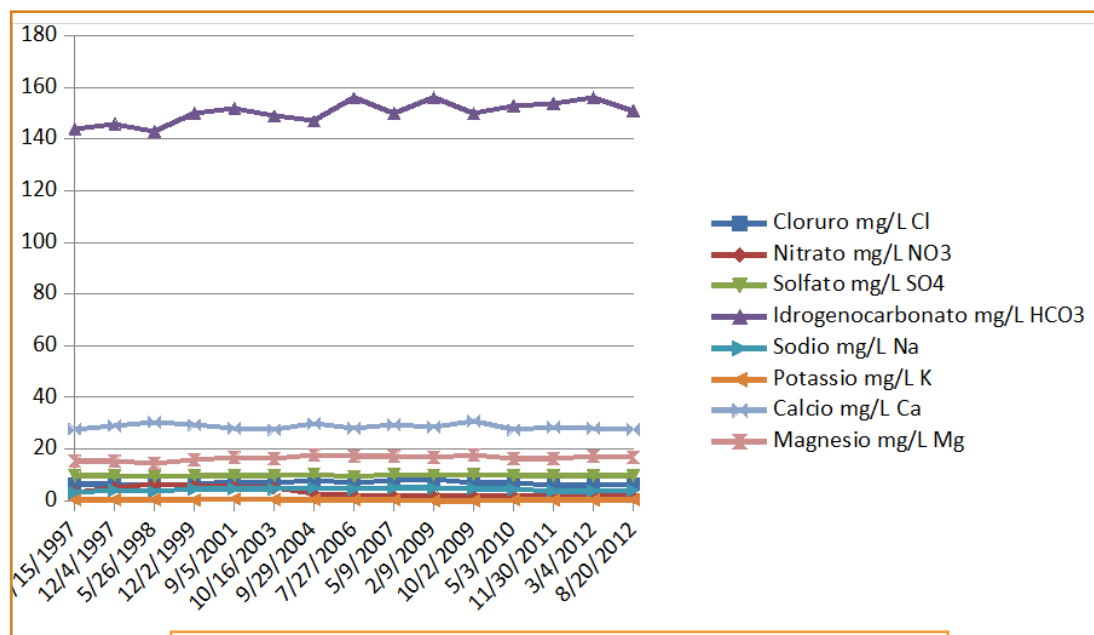


Fig. 4.16 – Andamento dei valori di concentrazione dei componenti principali nelle acque del Laghetto del Venerdì nel corso degli anni 1997-2012.

Il grafico in *Fig. 4.17*, dove sono stati omessi gli ioni calcio e idrogenocarbonato, mette in evidenza i valori di concentrazione dei componenti minori nelle acque del Laghetto del Venerdi. Per questi ioni, tenendo conto dell'incertezza di misura, ad eccezione dello ione nitrato come in precedenza riportato, si osserva una sostanziale costanza di

composizione conseguente ad un'alimentazione tramite stillicidio. Analisi condotte nel corso degli anni su varie acque di stillicidio nelle gallerie interessate dal percorso turistico e in zone prossime mostrano costanza di composizione di queste acque.

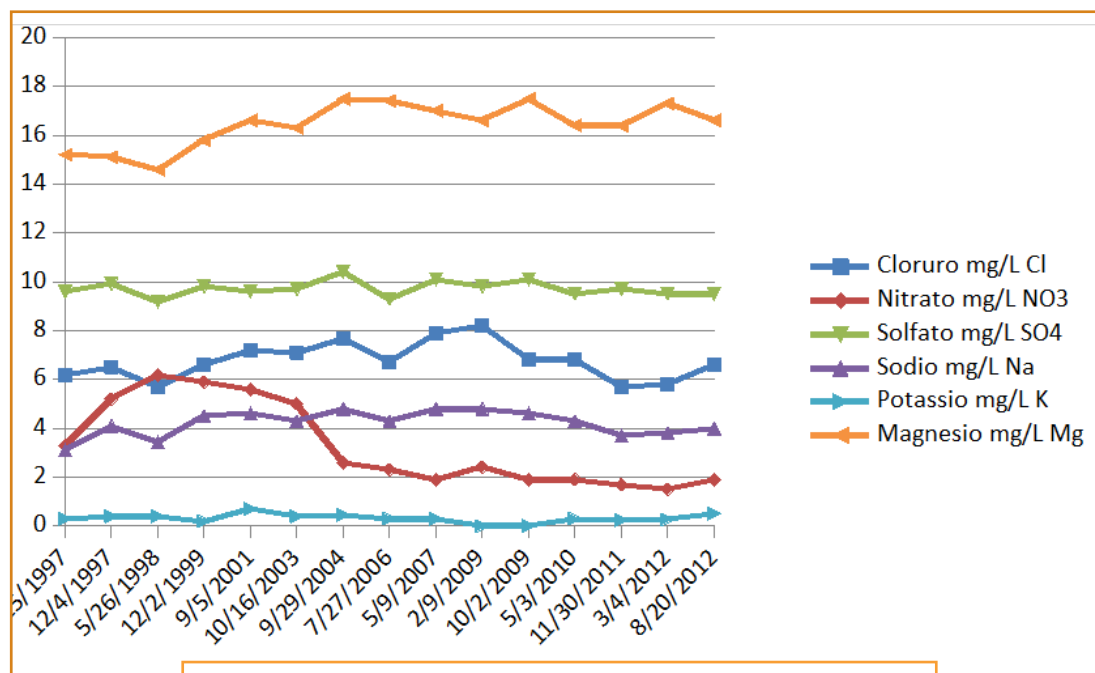


Fig. 4.17 – Andamento dei valori di concentrazione dei componenti minori nelle acque del Laghetto del Venerdi (anni 1997-2012). Sono stati esclusi calcio e idrogenocarbonato per rendere leggibili i valori di concentrazione degli altri ioni.



Fig. 4.18 – Campionamento delle acque del laghetto del Venerdì in tempi recenti. Si noti la presenza della passerella del percorso turistico che l'attraversa (anno 2019).



Fig. 4.19 – Lungo il percorso turistico, Galleria del Venerdì nei pressi del laghetto omonimo.

Cascata della Risalita dei Lucchesi

Trattasi di una piccola cascata che lambisce il percorso turistico quasi a metà; è localizzata nei pressi di una risalita di circa cento metri, effettuata dal gruppo Speleologico Lucchese vari anni fa, che conduce in un'area dove sono presenti importanti speleotemi (Ramo dei Lucchesi). Dall'alto del pozzo cade un modesto arrivo di acqua che confluisce in un piccolo ruscello scavato nella roccia dal

passaggio delle acque; la portata è molto variabile, generalmente bassa (da 3 a 220 L/min); si tratta comunque di un flusso perenne.

Il grafico riportato in *Fig. 4.20* indica una modesta variabilità di composizione, mentre la tipologia di acqua bicarbonato calcica, con un significativo contenuto di magnesio, indica una provenienza da zone con rocce di natura dolomitica.

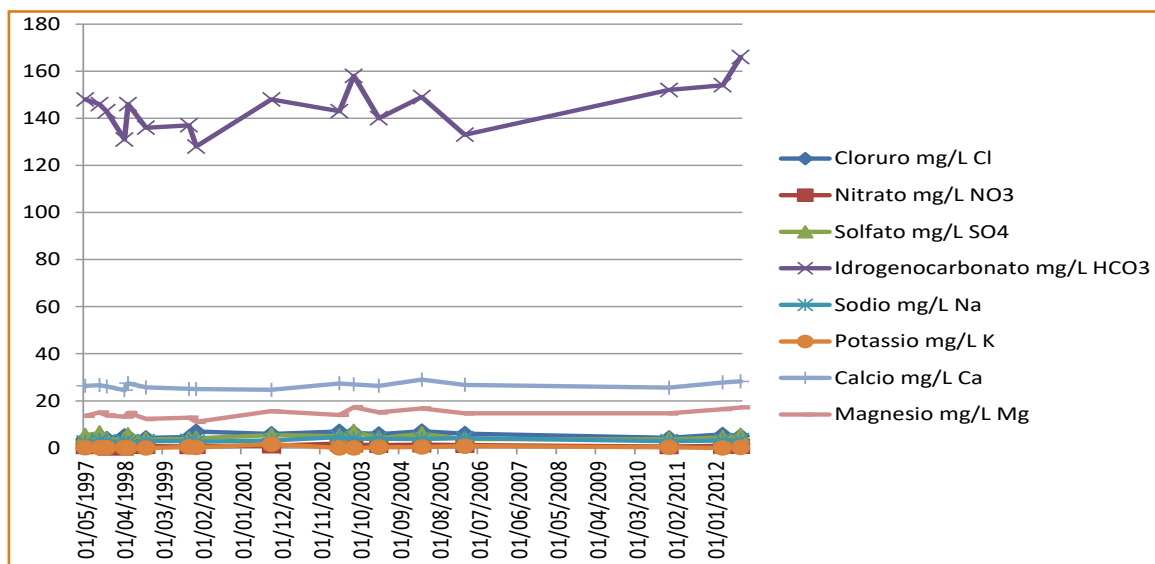
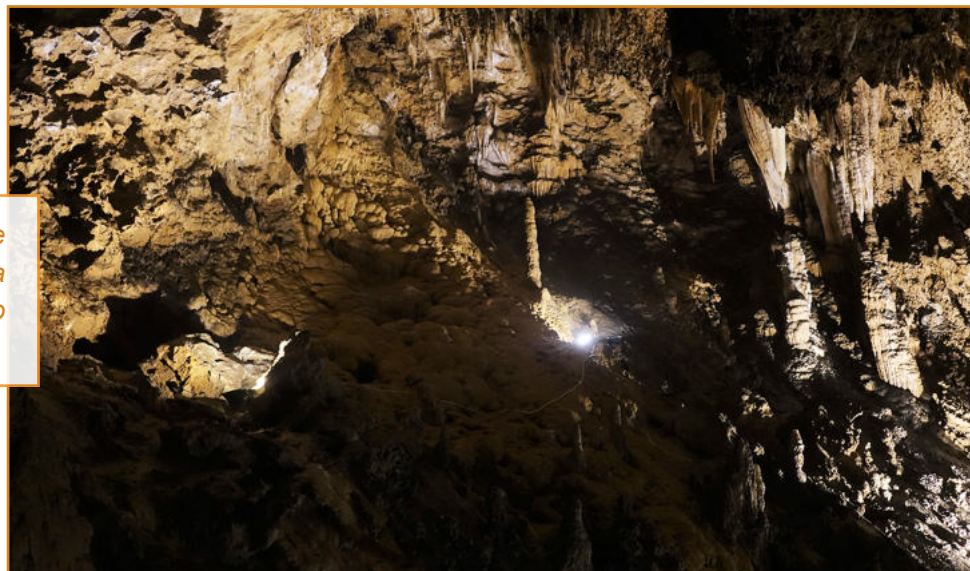


Fig. 4.20 – Andamento dei valori dei componenti principali nelle acque della cascata della Risalita dei Lucchesi (anni 1997-2012).

Fig. 4.21 – Salone alla cui base parte la Risalita dei Lucchesi e dove una piccola cascata alimenta un ruscello con portata perenne.



Nel grafico in *Fig. 4.22*, ancora relativo alle acque della cascata della Risalita dei Lucchesi, come nel grafico precedente si osserva una modesta variabilità di composizione.

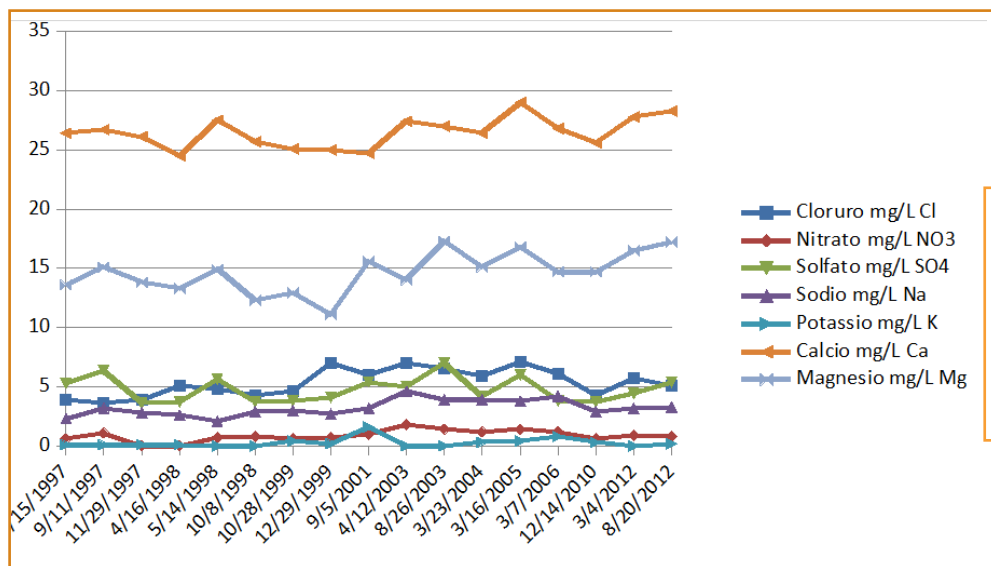


Fig. 4.22 - Andamento dei valori dei componenti principali nelle acque della cascata della Risalita dei Lucchesi (anni 1997-2012) dopo la sottrazione della serie relativa all'idrogenocarbonato.

Torrente della Gronda

Il torrente della Gronda è un corso d'acqua attraversato dal percorso turistico in un punto in cui forma una cascata di circa 5 metri; lo stesso percorso passa accanto anche al pozzo della Gronda dove il torrente, successivamente, si riversa dando luogo ad una cascata di circa 30 metri. Il torrente della Gronda è un importante collettore del Complesso carsico del monte Corchia posto sulla direttrice principale verso il fondo di tale complesso. Il torrente Gronda presenta portate molto variabili: in momenti di forti precipitazioni si sono osservati valori di portata fino a 1400 L/min (Fig. 4.23) per

arrivare nei periodi di massima siccità a valori molto bassi, fino a 8 L/min (dati relativi alla siccità dell'estate 2012: assenza di piogge da fine maggio fino al 31/8/2012).

Le variazioni di portata, molto elevate nel corso dell'anno, influenzano, comunque modestamente, la composizione delle acque che mostrano una modesta diminuzione della mineralizzazione in relazione alla diluizione apportata dalle piogge

(Fig. 4.24).

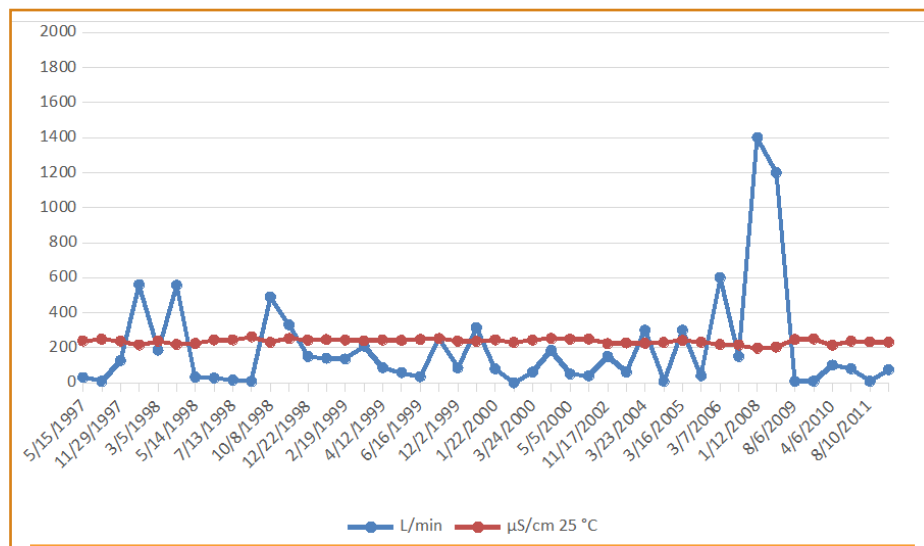


Fig.4.24 – Variazione della conducibilità elettrica delle acque del torrente della Gronda in relazione alla variazione delle portate.

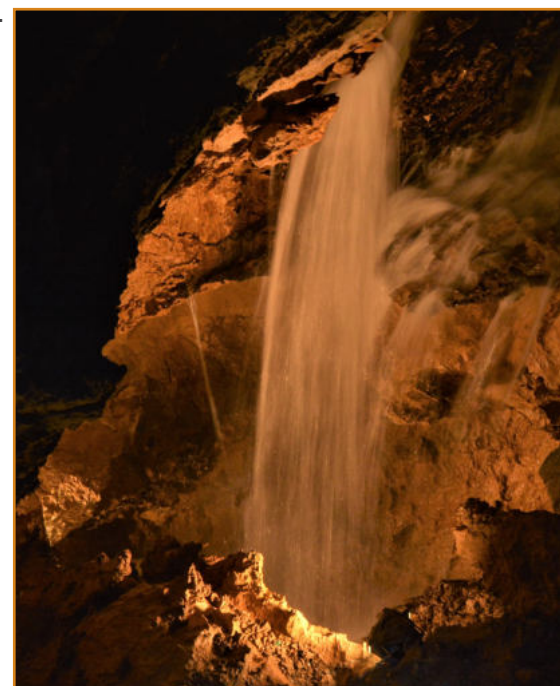


Fig.4.23 – Torrente Gronda, zona superiore della cascata nei pressi del percorso turistico, in un momento di alta portata (14-6-2016).

Il grafico in **Fig. 4.25** mette in evidenza la composizione prevalentemente bicarbonato calcica di questa acqua; è comunque presente anche una componente magnesiaca dell'ordine di 11 mg/L come valore mediano.

Il grafico in **Fig. 4.26**, relativo alle serie analitiche della figura precedente, indica una certa variabilità

di composizione in funzione delle portate, tipica delle acque correnti.

Si riscontra un valore particolarmente basso per lo ione nitrato (dell'ordine di 1 mg/L) che costituisce il valore di fondo di questa forma di azoto in acque che fluiscono in ambienti indisturbati.

Fig.4.25 – Andamento dei valori di concentrazione degli ioni principali nelle acque del torrente della Gronda.

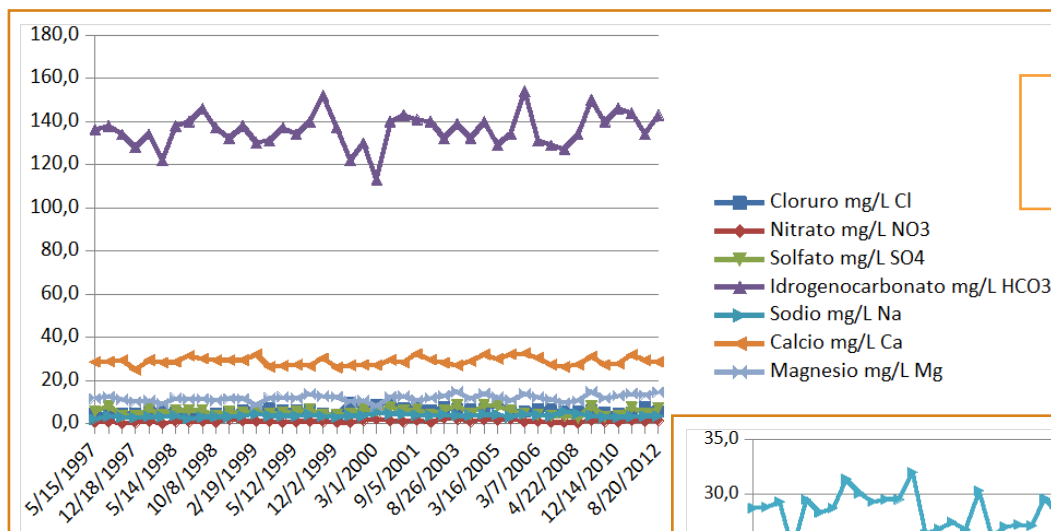


Fig.4.26 – Andamento dei valori di concentrazione degli ioni principali (ad esclusione dell'idrogenocarbonato) nelle acque del torrente della Gronda.

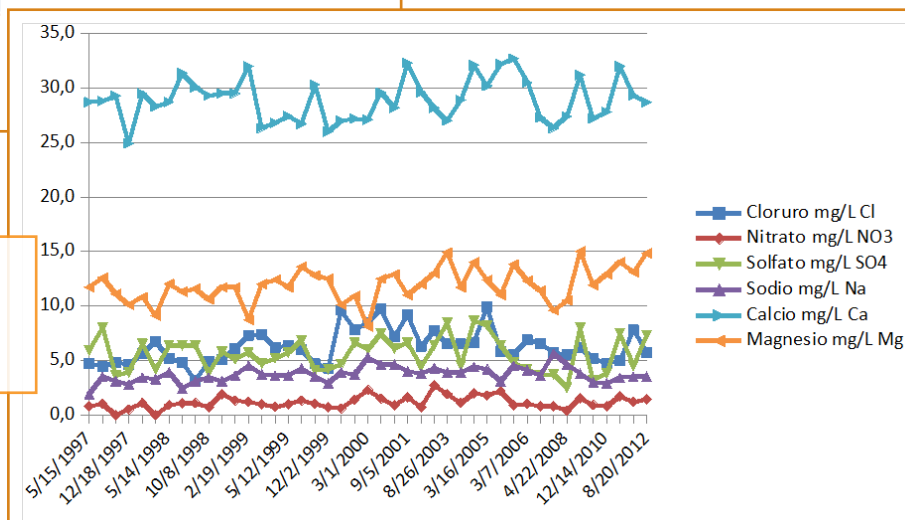




Fig. 4.27 – Torrente Gronda, zona della cascata nei pressi del percorso turistico, in un momento di portata media (06 ottobre 2020).

Laghetto della Galleria Bassa delle Stalattiti

Localizzazione: Galleria Bassa delle Stalattiti (Fig.4.28).

Comprende due corpi idrici contigui, con acque di identica composizione, uno dei quali attraversato da un ramo delle scalette del percorso turistico. L'alimentazione è da stillicidio. Le acque di questi laghetti sono costantemente molto limpide (0,1-0,3 NTU).

Queste acque sono caratterizzate da una più elevata concentrazione in solfati e magnesio in confronto agli altri corpi idrici (Fig. 4.29).

Il valore mediano della conducibilità è 317 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con le seguenti concentrazioni mediane degli ioni caratterizzanti: solfati 31,3 mg/L, calcio 30,9 mg/L; magnesio 21,5 mg/L, idrogenocarbonato 144 mg/L, nitrato 2,6 mg/L.

Questi due laghetti presentano il rapporto calcio/magnesio di 1,4 quindi un valore più basso rispetto agli altri corpi idrici, indice di una litologia (quella interessata dalle acque di alimentazione di stillicidio), costituita da rocce carbonatiche con maggior contenuto in dolomie. Il laghetto è infatti localizzato nella zona dei Grezzoni che, come già riportato, contengono pirite come mineralizzazione accessoria; l'alterazione di questo minerale produce solfato che determina l'arricchimento in questo ione delle acque.



Fig. 4.28 – Laghetto della Galleria Bassa delle Stalattiti.

Nella **Fig. 4.30** è riportato l'andamento degli ioni principali nel corso degli anni: lo ione idrogenocarbonato presenta un intervallo di concentrazione da 148 a 165 mg/L; tenendo conto dell'incertezza di misura, stimabile intorno al 15%, i valori esprimono costanza di composizione.

Fig. 4.29 – Evidenza del maggior contenuto in solfati nei due laghetti della Galleria delle Stalattiti rispetto al contenuto negli altri corpi idrici.

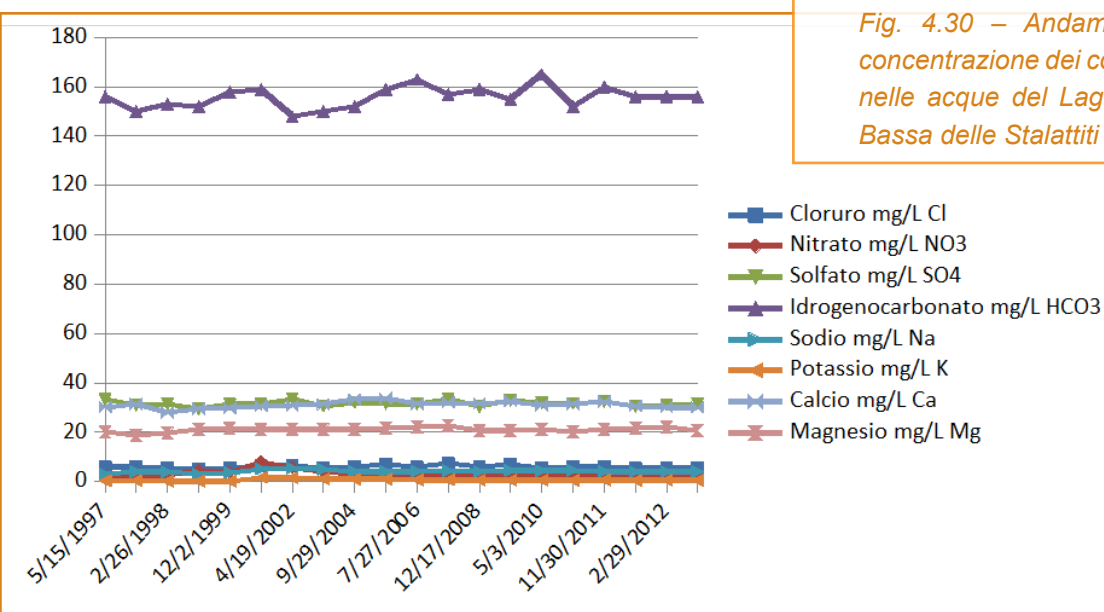
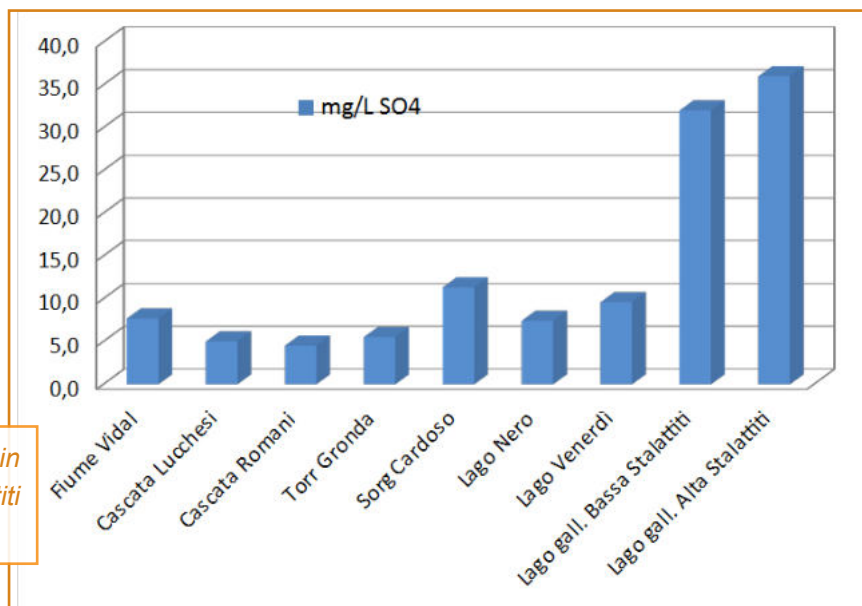


Fig. 4.30 – Andamento dei valori di concentrazione dei componenti principali nelle acque del Lago gall. Bassa delle Stalattiti (anni 1997-2012).

Nel grafico di **Fig. 4.31** la costanza di composizione di queste acque; solo per il nitrato si riscontra un picco in corrispondenza dei prelievi dal 2001 al 2003; di tale incremento di concentrazione non sono state individuate le cause. In questo grafico è bene in evidenza la serie analitica dei solfati, presenti in concentrazioni

elevate, e simili a quelle del calcio, tanto che le rispettive linee appaiono sovrapposte. Nella Galleria Bassa delle Stalattiti è presente un secondo laghetto con composizione sostanzialmente uguale al laghetto oggetto di monitoraggio (**Fig. 4.32**).

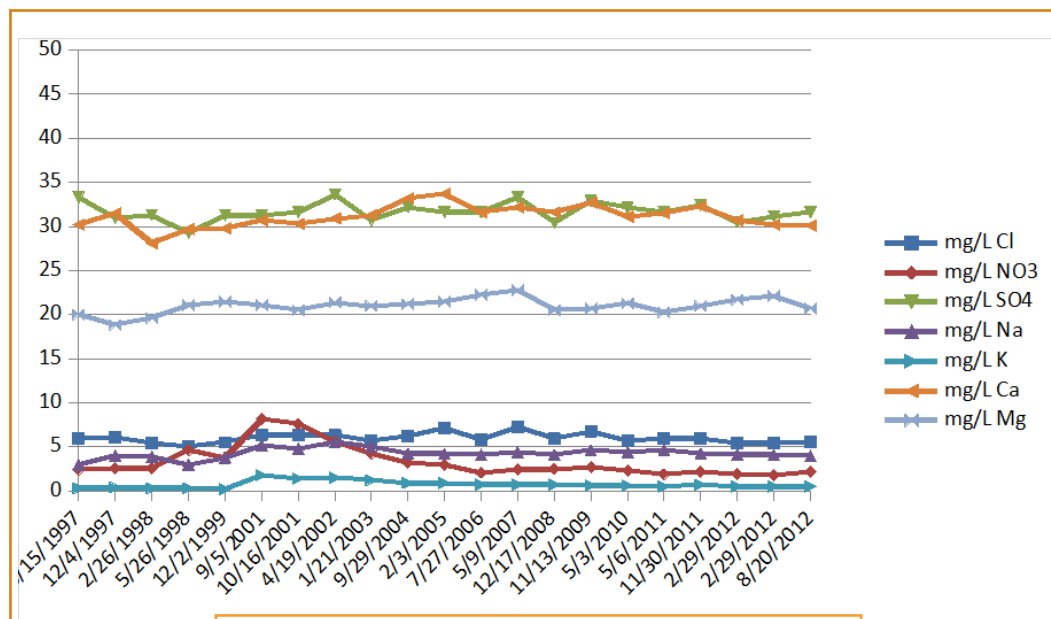


Fig. 4.31 – Andamento dei valori di concentrazione dei componenti principali (ad esclusione dell'idrogenocarbonato) nelle acque del Laghetto della Galleria Bassa delle Stalattiti.

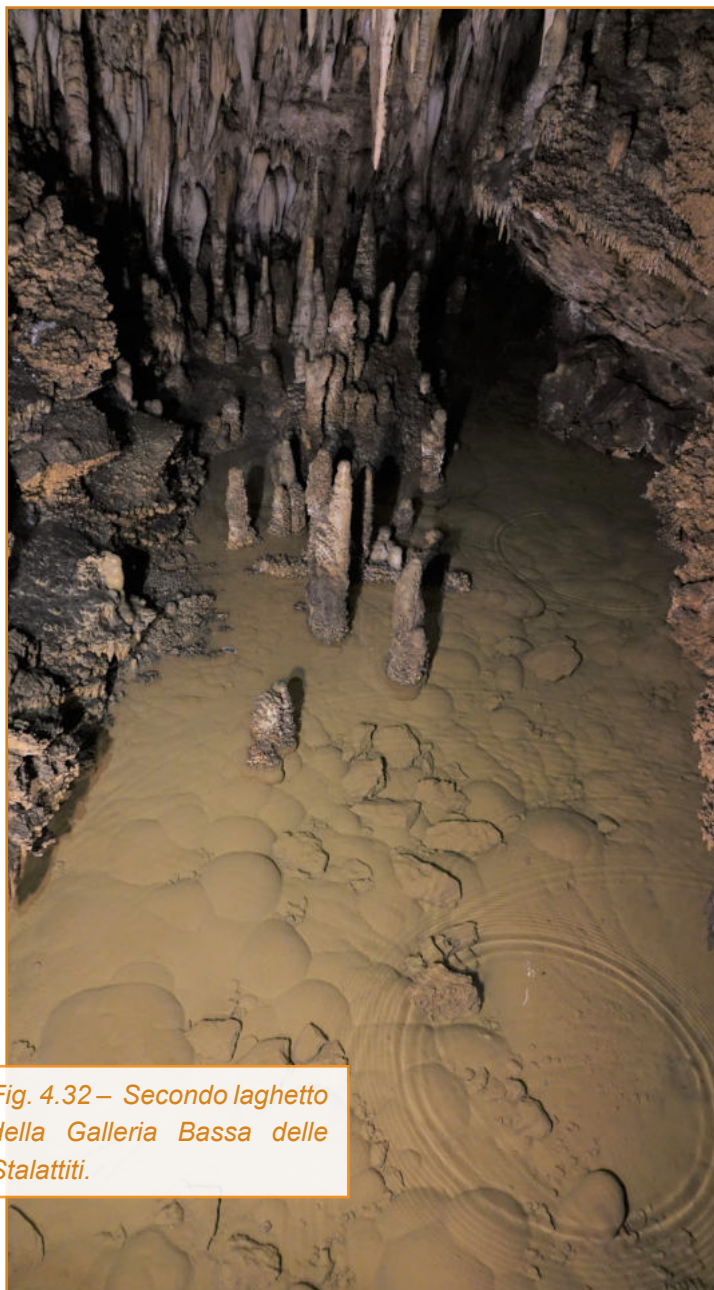


Fig. 4.32 – Secondo laghetto della Galleria Bassa delle Stalattiti.

Laghetto della Galleria Alta delle Stalattiti

Localizzazione: Galleria Alta delle Stalattiti.

Alimentazione: stillicidio.

Le acque presentano una mineralizzazione fra le più elevate di quelle oggetto di monitoraggio nel sistema carsico: il valore mediano della conducibilità è infatti $323 \mu\text{S}/\text{cm}$. Queste acque sono caratterizzate da una maggiore concentrazione in solfati (relativamente agli altri corpi idrici, vedi *Fig. 4.32*). Il valore mediano è di $35,6 \text{ mg/L SO}_4$. L'acqua del laghetto presenta la stessa composizione dell'acqua di stillicidio raccolta in un punto della sommità della volta (*Tab. 4.10*).

La differenza di concentrazione del nitrato (sempre molto bassa) nell'acqua di stillicidio con i valori relativamente elevati durante i primi anni di campionamento delle acque del laghetto (vedi Allegato 2), era conseguente ad un periodo in cui questa fonte d'azoto era dovuta alla mineralizzazione di deiezioni umane abbandonate nei dintorni; la concentrazione di nitrato ha poi subito una progressiva diminuzione nel corso del tempo, in conseguenza ad opere di pulizia effettuate dal Gruppo di monitoraggio ARPAT. Pur avendo effettuato l'operazione di rimozione della causa fino dai primi tempi del monitoraggio, sono trascorsi anni prima di riscontrare una diminuzione significativa dello ione nitrato.

Per lo ione solfato, anche in questo caso si presume che sia prevalentemente originato dall'alterazione

di pirite presente in tracce nei Grezzoni, rocce in cui sono scavate le gallerie in questo settore del sistema carsico. Durante il lungo periodo di monitoraggio sono stati prelevati 20 campioni che hanno messo in evidenza la stabilità di composizione di queste acque; anche le acque di stillicidio, campionate più saltuariamente, hanno mostrato completa stabilità

nel tempo (conducibilità elettrica: valore minimo 305 $\mu\text{S/cm}$ e valore massimo 343 $\mu\text{S/cm}$), così come la stessa portata. Le differenze sono imputabili prevalentemente all'incertezza di misura. Le acque di questo laghetto sono molto limpide (0,1 NTU) e non presentano evidenti contaminazioni da scorretti comportamenti durante la frequentazione turistica.

Tab. 4.10 - Confronto dei principali parametri chimici e chimico - fisici dell'acqua di stillicidio nella zona della Galleria Alta delle Stalattiti con l'acqua del laghetto della Galleria Alta delle Stalattiti.

Parametri	Unità di misura	Stillicidio Galleria Alta delle Stalattiti				Laghetto Galleria Alta Stalattiti
		11/09/1997	18/03/1998	29/09/1999	09/05/2007	09/05/2007
Portata	gocce/min	5	5	6	5	-
Conducibilità elettrica	$\mu\text{S/cm}$ 25 °C	336	338	337	336	339
Torbidità	N.T.U.	0,1	0,1	0,2	<0,1	<0,1
pH	Unità pH	8,1	8,2	8,1	8,3	8,1
Ammonio	mg/L NH_4	< 0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05
Nitrito	mg/L NO_2	< 0,05	<0,05	<0,05	<0,01	<0,01
Fluoruro	mg/L F	0,21	0,24	0,20	0,26	0,42
Cloruro	mg/L Cl	5,3	4,5	5,5	5,9	6,4
Nitrato	mg/L NO_3	0,25	<0,5	0,6	0,5	1,9
Solfato	mg/L SO_4	36,1	33,6	33,0	35,4	37,6
Iidrogenocarbonato	mg/L HCO_3	165	171	167	169	168
Sodio	mg/L Na	4,3	3,5	3,6	4,1	4,8
Potassio	mg/L K	0,2	0,2	0,3	<0,3	0,5
Calcio	mg/L Ca	32,0	32,4	31,9	33,7	30,5
Magnesio	mg/L Mg	22,1	21,9	22,3	23,5	25,5

Il grafico in *Fig. 4.34* mostra l'andamento dei componenti principali nelle acque del laghetto della Galleria Alta delle Stalattiti. Lo ione idrogenocarbonato presenta un intervallo di concentrazione da 146 a 171 mg/L; anche per queste acque, tenendo conto dell'incertezza di misura, stimabile intorno al 15%, i valori esprimono costanza di composizione.

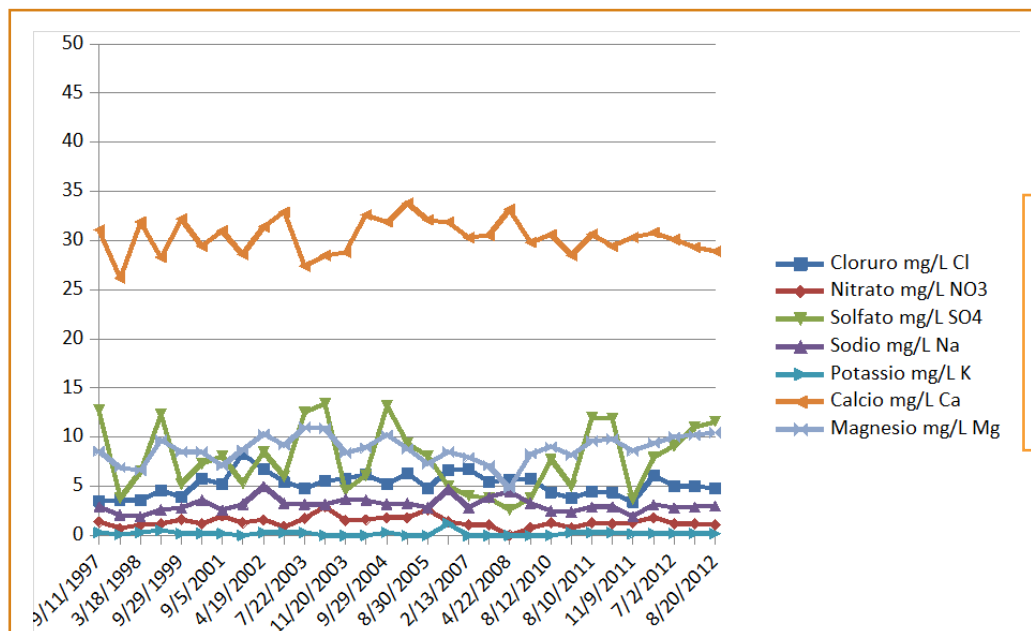
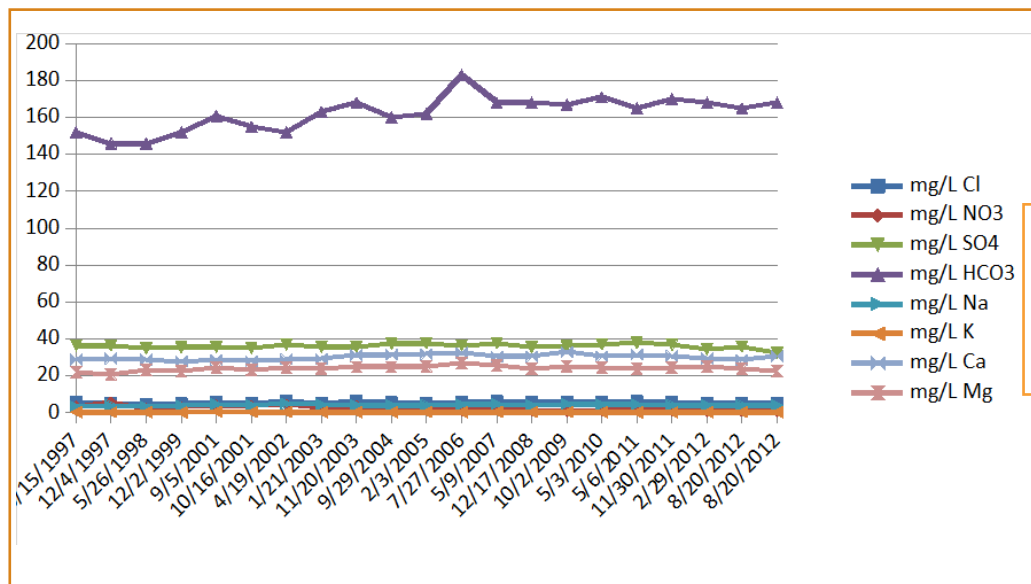
Le acque dei due laghetti mostrano una composizione molto simile; ne risultano valori di conducibilità elettrica quasi sovrapponibili (*Tab. 4.11*). Il laghetto della Galleria Alta presenta comunque una maggiore concentrazione in solfati come è messo in evidenza nel grafico riportato nella *Fig. 4.35*.



Fig. 4.33 - Laghetto della Galleria Alta delle Stalattiti.

	Valore minimo	Valore mediano	Valore massimo
Laghetto Galleria Alta Stalattiti	305	323	343
Laghetto Galleria Bassa Stalattiti	302	315	328

Tab. 4.11 - Valori minimi, mediani e massimi della conducibilità elettrica a 25 °C espressa in $\mu\text{S}/\text{cm}$ nelle acque dei due laghetti nella Galleria delle Stalattiti.



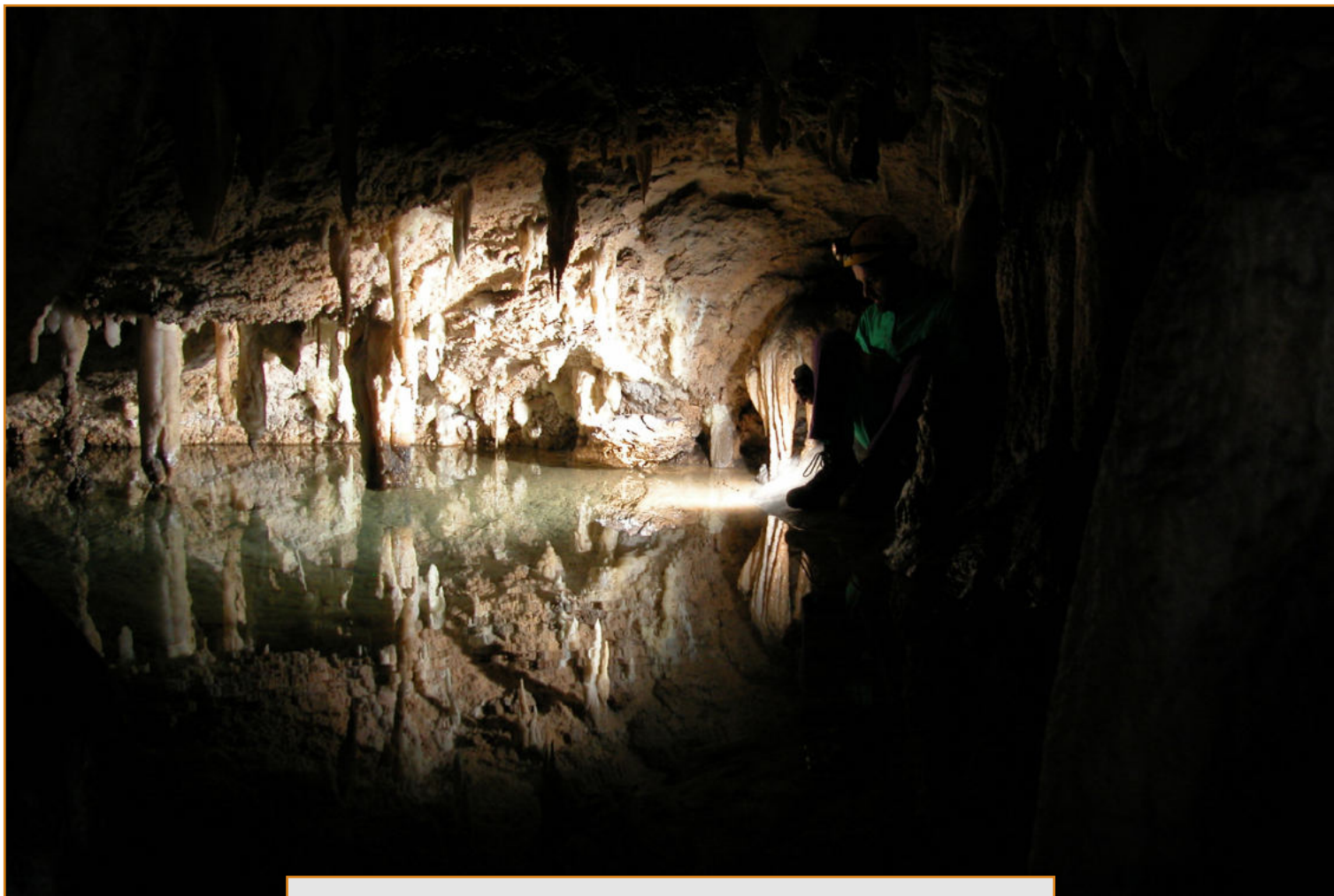


Fig. 4.36 – Altra visuale del laghetto della Galleria Alta delle Stalattiti.

Torrente Vianello-Vidal

Localizzazione: Ramo del Fiume; uno dei più importanti collettori del complesso carsico, a circa 350 m di distanza dal percorso turistico (zona della Galleria degli Inglesi). Portata: da 5 L/sec a oltre 2 m³/sec.

Il torrente Vianello-Vidal proviene da un settore del monte Corchia che è interessato dall'attività di escavazione del marmo, pertanto si tratta di un corpo idrico utilizzabile per verificare gli impatti di questa attività in quel settore di ambiente ipogeo. Nel corso di 15 anni di frequentazione dei vari operatori ARPAT per le attività di monitoraggio nell'area vicina a dove scorre questo torrente, sono state evidenziate forti criticità dovute all'attività di cava, fra queste la ripetuta presenza di odori di idrocarburi fino a un evidente fenomeno di inquinamento da marmettola, cioè fango proveniente dall'escavazione del marmo, avvenuto nel 2011⁽³⁾.

Il Vianello-Vidal, oltre che torrente connesso alle pressioni ambientali sopra indicate, resta un corso idrico di particolare interesse per verificare le dinamiche dei flussi idrici nel complesso carsico e i processi di interazione acqua-roccia. Questo torrente, più di altri, ha una grande variabilità di portata: mentre nei periodi di massima siccità la portata arriva a 5 L/s (dati relativi alla siccità dell'estate 2003: assenza di pioggia da inizio maggio a fine agosto; siccità 2012: assenza di

piogge da fine maggio fino al 31/8/2012), dopo intense piogge può arrivare ad almeno 2-3 m³/s.

Si è osservato che anche con portate molto elevate il contenuto di solidi disciolti (chiamato anche residuo fisso) subisce una modesta diminuzione per effetto di diluizione delle piogge (valore minimo dei solidi totali disciolti 104 mg/L). (Tab. 4.12, dati da 33 campioni prelevati dal 1997 al 2012).

Solidi totali disciolti (TDS)	Valore minimo	Valore mediano	Valore massimo
mg/L	104	120	130

Tab. 4.12 - Valore minimo, mediano e massimo del contenuto dei solidi disciolti misurati nel corso di circa 15 anni di monitoraggio delle acque del fiume Vianello- Vidal.

⁽³⁾ Mantelli F., Lotti L., Masini M., D'Elia A., Bucci P., De Sio F., Occhini F. - *Il Complesso carsico del monte Corchia: gli impatti conseguenti all'attività estrattiva*, Bollettino degli esperti ambientali, n. 4, p. 38-51, 2013.

*Fig. 4.37 – Il torrente Vianello-Vidal
in una fase di portata elevata.*



*Fig. 4.38 – Il torrente Vianello-Vidal
in una fase di bassa portata.*

Nella **Fig. 4.39** è riportato l'andamento del contenuto dei solidi disciolti (TDS) durante il periodo di monitoraggio durante il quale si sono effettuati campioni con differenti valori di portata del torrente

Vianello-Vidal. Il grafico mostra che anche in condizioni di portate particolarmente elevate, si ha solo una modesta flessione nei valori del contenuto dei solidi totali disciolti.

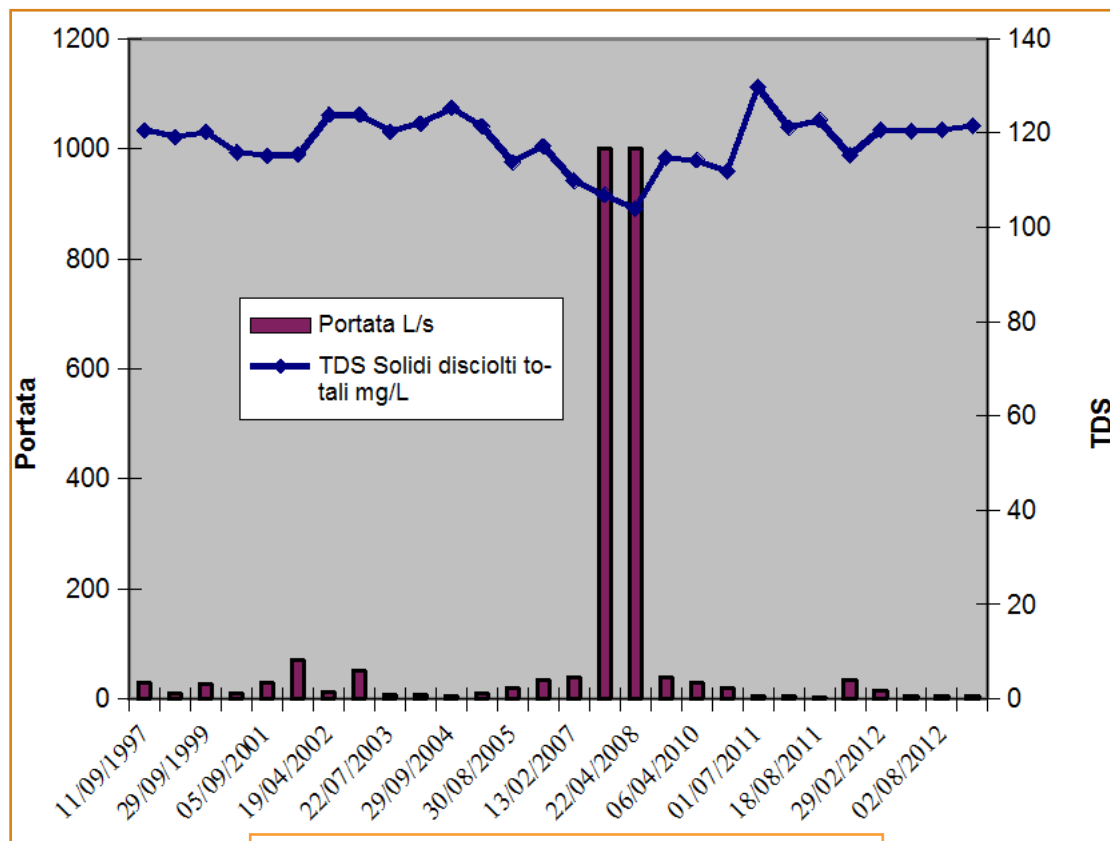


Fig. 4.39 – Confronto fra il contenuto dei solidi totali disciolti e la portata nelle acque del torrente Vianello-Vidal.

Nella **Fig. 4.40** è riportato l'andamento degli ioni principali nelle acque del torrente Vianello-Vidal da 1997 al 2012. Il grafico mette in evidenza la prevalente componente idrogenocarbonato calcica. Nella **Fig. 4.41** è riportato l'andamento dei valori di concentrazione dei componenti principali nelle

acque del torrente Vianello-Vidal. Il grafico indica una certa variabilità delle concentrazioni dei vari ioni come comunemente avviene nelle acque correnti ipogee.

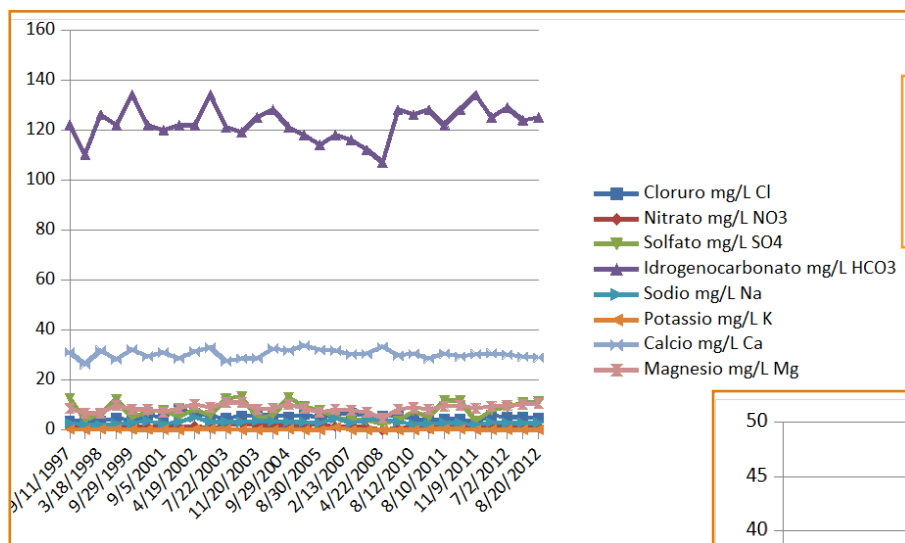
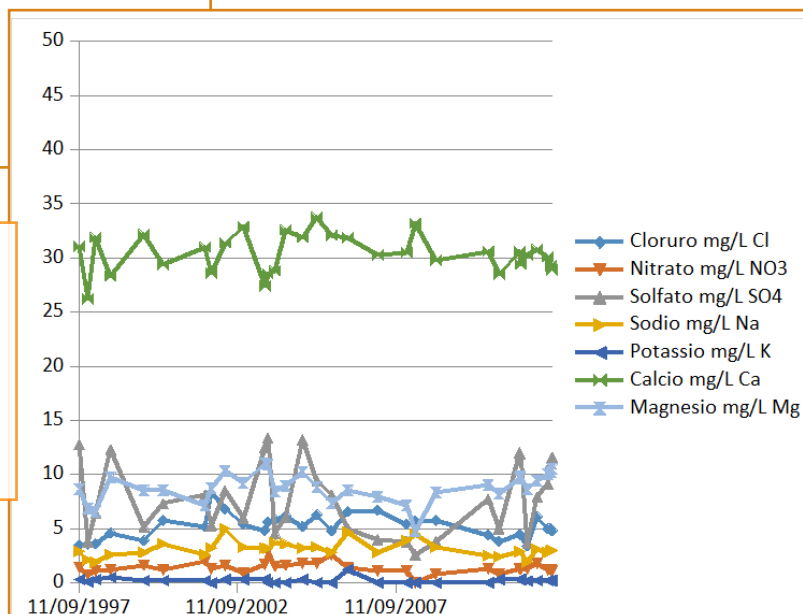


Fig. 4.40 – Andamento dei valori delle concentrazioni dei componenti principali nelle acque del torrente Vianello-Vidal dal 1997 al 2012.

Fig. 4.41 – Andamento dei valori delle concentrazioni dei componenti principali (con esclusione dell'idrogenocarbonato per rendere più leggibili le altre serie analitiche) nelle acque del torrente Vianello-Vidal.



Nella *Fig. 4.42* è riportato l'andamento dello ione nitrato nelle acque del torrente Vianello-Vidal e nelle piogge campionate sullo sperone sud - ovest del monte Corchia dal 1997 al 2010. La maggiore concentrazione di questo ione nelle piogge può essere dovuta ai processi di nitrificazione di altre forme di azoto presenti nell'atmosfera (azoto ammoniacale) dato il tempo lungo di permanenza del campionatore prima di ogni ritiro ai fini dell'analisi. Durante tutto il lungo periodo di campionamento si è riscontrata una concentrazione del nitrato costantemente bassa nelle acque del torrente Vianello-Vidal.

Di un certo interesse è l'andamento dello ione solfato nelle acque dello stesso corpo idrico in quanto solo in parte è correlabile al contenuto nelle piogge dove si riscontrano valori compresi fra 0,2 e 7,3 mg/L con un valore mediano di 2,8 mg/L. Nella *Fig. 4.43* è riportato l'andamento dello ione solfato nelle acque del torrente Vianello-Vidal da 1997 al 2012.

La componente aggiuntiva di solfato può essere correlata al contatto con pirite alterata.

Generalmente si osserva un aumento del solfato in situazioni di scarce portate.



Fig. 4.44 - Altra immagine del torrente Vianello - Vidal.

Fig. 4.42 - Andamento dello ione nitrato nelle acque del torrente Vianello-Vidal e nelle piogge campionate sullo sperone sud-ovest del monte Corchia dal 1997 al 2010.

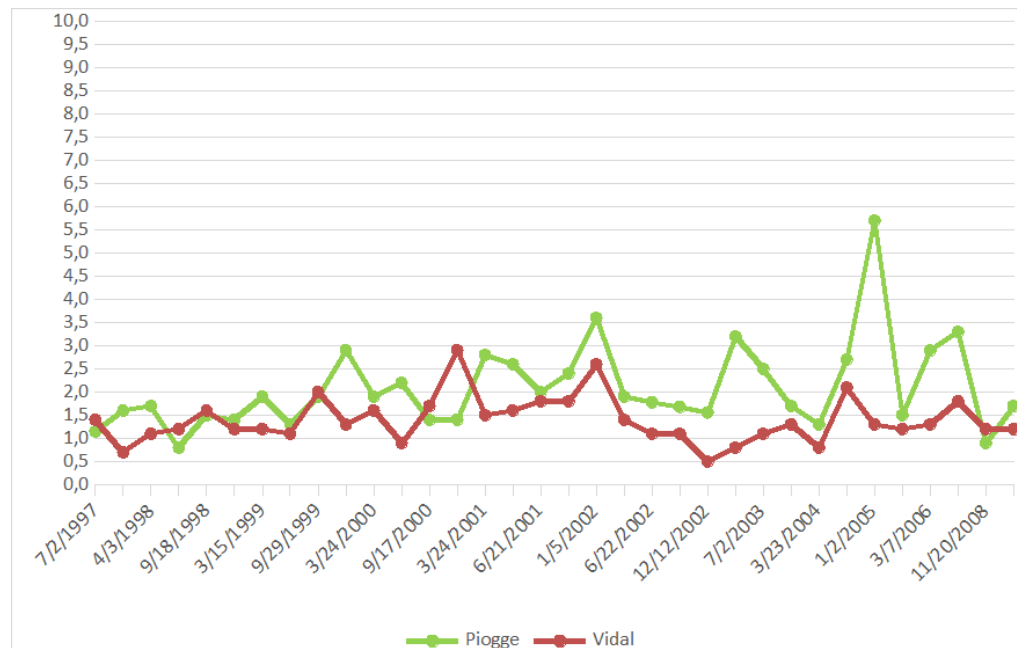
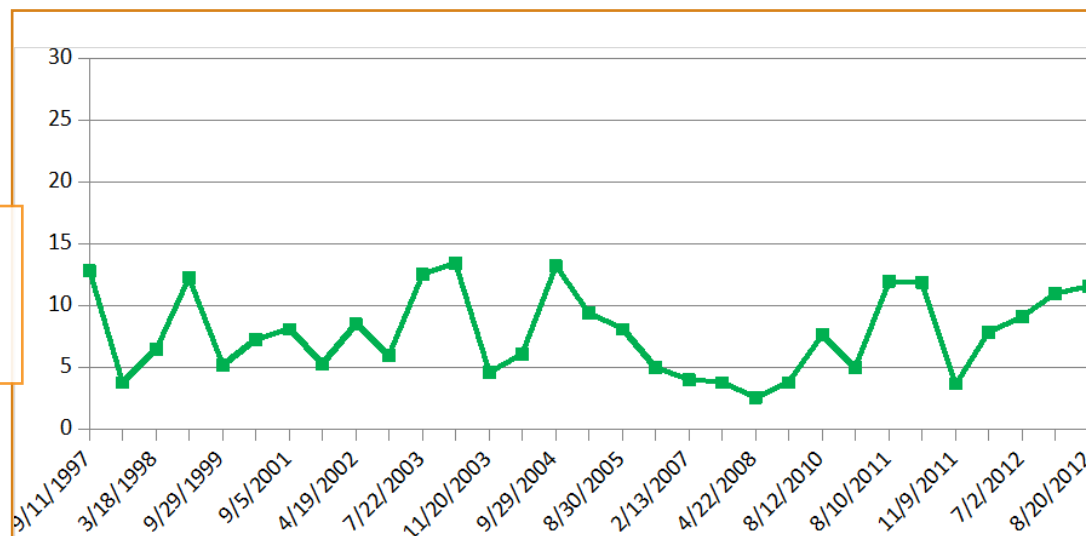


Fig. 4.43 - Andamento dello ione solfato nelle acque del torrente Vianello-Vidal da 1997 al 2012.



Lago Nero

Localizzazione: questo lago si trova abbastanza distante dal percorso turistico, tuttavia raggiungibile da una deviazione dalla Galleria degli Inglesi (*Fig. 4.45 e 4.46*). Le acque che lo alimentano sono quelle che poi danno origine al torrente Vianello - Vidal; il lago Nero presenta quindi una composizione più simile a quella delle acque correnti che a quelle di tre laghetti alimentati da acqua di stillicidio.

Nella *Tab. 4.13* sono riportati i componenti principali delle acque del lago Nero; si evita di riportare i

grafici dell'andamento dei valori per il basso numero di serie analitiche e perché sostanzialmente molto simili alle acque del torrente Vianello-Vidal data la stretta relazione fra questi due corpi idrici.

L'acqua ha presentato talvolta una modesta torbidità, imputabile al sollevamento dei sedimenti prodotto dalle acque dell'immissario in momenti di elevata portata.

Data prelievo		16/05/1997	14/05/1998	05/05/2000	03/02/2005	01/04/2006	08/11/2007	09/02/2009	14/12/2010
Cloruro	mg/L Cl	3,8	4,2	5,7	6,9	4,9	8,9	4,3	4,1
Nitrato	mg/L NO ₃	1,0	1,0	1,0	1,7	1,2	2,0	1,4	0,8
Solfato	mg/L SO ₄	7,4	7,6	6,8	10,1	4,3	10,0	4,2	5,1
Idrogenocarbonato	mg/L HCO ₃	120	118	124	131	122	128	128	122
Sodio	mg/L Na	1,6	1,9	3,6	3,5	2,9	4,0	3,0	3,3
Potassio	mg/L K	0,2	0,2	0,2	1,4	<0,3	0,7	<0,3	0,3
Calcio	mg/L Ca	29,4	30,8	29,0	31,5	32,2	33,7	29,0	27,9
Magnesio	mg/L Mg	7,7	7,5	8,9	11,5	8,9	9,9	8,7	8,6

Tab. 4.13 - Componenti principali delle acque del lago Nero.



Fig. 4.45 - Il lago Nero dalla forra di accesso.



Fig. 4.46 - Il lago Nero.

Fontane di Cardoso

Le Fontane di Cardoso, come in precedenza riportato, sono tre sorgenti lungo la riva sinistra del torrente Vezza. La sorgente più attiva è quella a monte; analisi effettuate in passato indicano che le tre sorgenti forniscono la stessa acqua e costituiscono la più importante sorgente conosciuta del Complesso carsico del monte Corchia.

L'acqua delle Fontane di Cardoso presenta una mineralizzazione poco più elevata rispetto a quella delle acque correnti ipogee che la alimentano (Tab. 4.14).

La Fig. 4.48 mette in evidenza la componente prevalentemente idrogenocarbonato calcica di questa acqua che nel corso del tempo presenta una certa variazione dei componenti principali (calcio e idrogenocarbonato) ed una maggiore variabilità dei solfati, più facilmente osservabile nel grafico di Fig. 4.49, dove è stato sottratto l'idrogenocarbonato.

Lo ione nitrato, come in molte acque ipogee del Complesso carsico del monte Corchia, si mantiene su valori bassi. L'ammonio e i nitriti sono stati sempre non rilevati (da $<0,05$ a $<0,1$ mg/L NH_4^+ , da $<0,01$ a $<0,05$ mg/L NO_2^- ; limiti di rivelabilità variabili in funzione dei metodi analitici adottati). In queste acque, costantemente contaminate dal punto di vista batteriologico come riportato in seguito, le forme di azoto restano comunque molto basse.



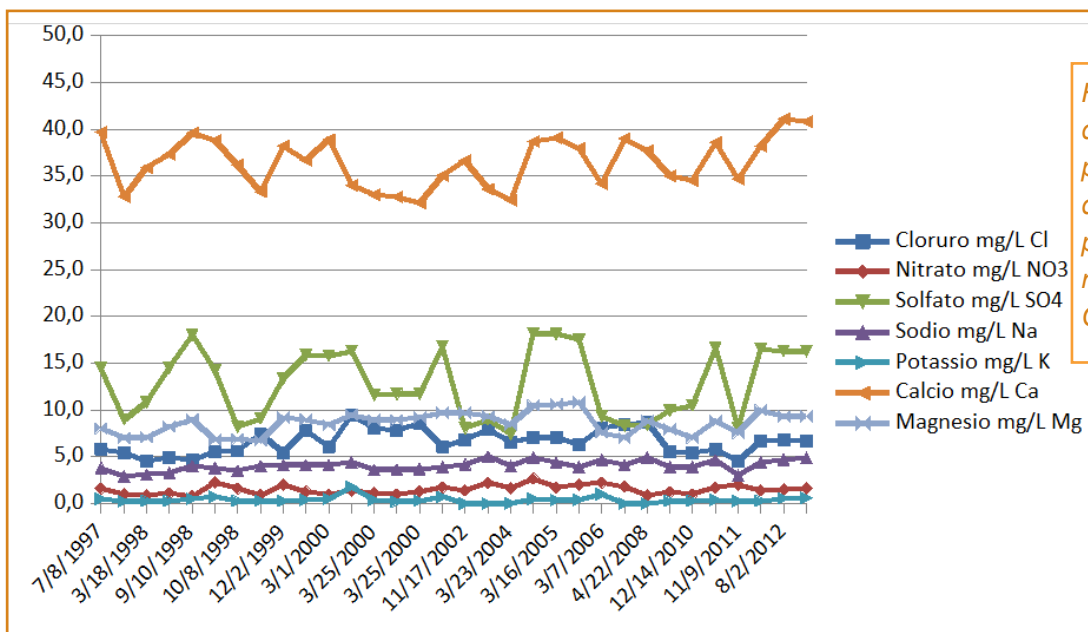
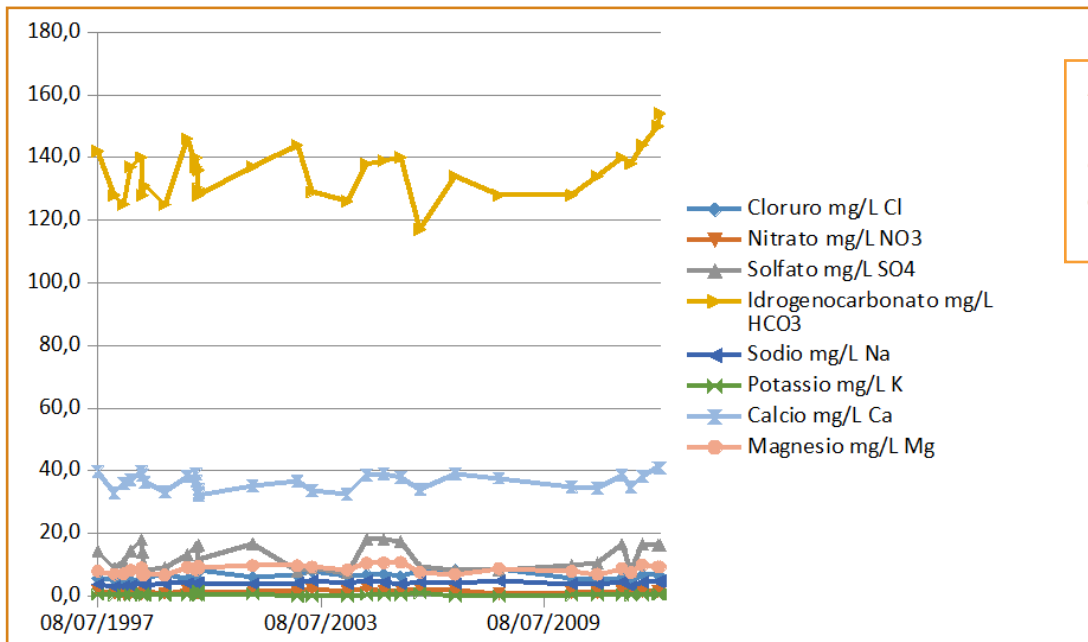
Fig. 4.47 - La principale sorgente delle Fontane di Cardoso in un momento di elevata portata.

Acque ipogee correnti	Valore minimo	Valore mediano	Valore massimo
Torrente Vidal	184	206	240
Torrente Gronda	197	238	263
Fontane di Cardoso	221	246	280

Tab. 4.14 - Confronto fra i valori della conducibilità elettrica (a 25 °C) espressi in $\mu\text{S/cm}$ fra le acque del torrente Vianello-Vidal, del torrente della Gronda e delle Fontane di Cardoso.

Fontane di Cardoso		Periodo di magra	Siccità dell'estate 2012	Grandi piogge nella notte	Grandi piogge in corso
Data prelievo	Unità di misura	29/09/2004	02/08/2012	13/02/2007	22/04/2008
Portata	L/min	85	120	circa 6000	400-500 L/s
Conducibilità elettrica	$\mu\text{S/cm}$ 25 °C	278	276	242	245
Residuo fisso 180 °C	mg/L	150	154	134	132
pH	unità pH	7,8	8,0	7,3	7,8
Cloruro	mg/L Cl	7,0	6,8	8,4	8,7
Nitrato	mg/L NO_3	2,7	1,5	1,8	0,9
Solfato	mg/L SO_4	18,2	16,3	8,3	8,4
Idrogenocarbonato	mg/L HCO_3	138	150	134	128
Sodio	mg/L Na	4,9	4,7	4,1	4,9
Potassio	mg/L K	0,5	0,5	<0,3	<0,3
Calcio	mg/L Ca	38,7	41,1	39,0	37,7
Magnesio	mg/L Mg	10,5	9,3	7,0	8,8

Tab. 4.15 - Variazione del chimismo delle acque delle Fontane di Cardoso in relazione alla variazione delle portate.



L'acqua ipogea durante il percorso verso le sorgenti si arricchisce progressivamente di ioni calcio e idrogenocarbonato; la mineralizzazione è comunque variabile in funzione degli apporti meteorici. Le variazioni di portata, spesso di alcuni ordini di grandezza, influenzano sempre

modestamente la composizione delle acque e, analogamente a quanto osservato per il torrente della Gronda, presentano diminuzioni modeste della mineralizzazione in relazione alla diluizione apportata dalle piogge (*Tab. 4.15*).



Fig. 4.50 - Campionamento della principale sorgente delle Fontane di Cardoso (Anno 1999).

Altre acque dei dintorni del settore destinato a fruizione turistica

Nel corso degli anni sono state analizzate altre acque presenti nei dintorni del settore destinato a fruizione turistica.

Zona della Galleria della Neve

La Galleria della Neve è strutturata come un condotto di sezione circolare che si origina da due rami che risalgono ambedue a poca distanza dalla Galleria degli Inglesi. Nella parte terminale della Galleria della Neve è presente una piccola sorgente di tipo perenne; nella stessa zona sono presenti inoltre alcune piccole pozze di acqua stagnante.

La **Tab.4.16** riporta la composizione di queste acque in relazione ai componenti principali. Queste acque presentano composizione simile a quelle oggetto di monitoraggio; il contenuto in nitrati molto basso mette in evidenza acque di elevata purezza in relazione a questo indicatore e quindi una notevole protezione rispetto all'ambiente esterno.

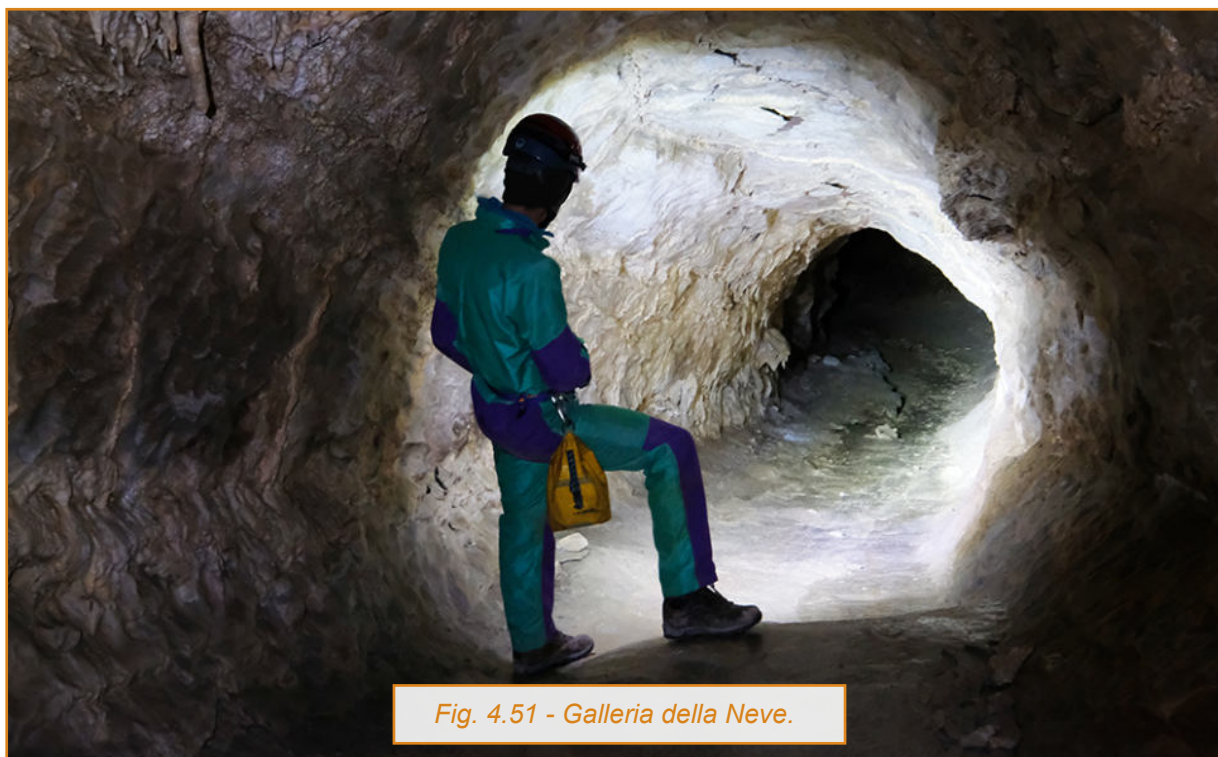


Fig. 4.51 - Galleria della Neve.

Parametri	Unità misura	Pozza parte alta Galleria della Neve	Sorgente parte alta Galleria della Neve	Pozza-Inizio Galleria della Neve
Data prelievo		02/11/1998	22/04/2008	14/04/2003
Temperatura aria	°C	9,7	-	-
Temperatura acqua	°C	9,5	8,0	9,1
Conducibilità elettrica	μS/cm 25 °C	241	206	228
Torbidità	N.T.U.	0,2	<0,1	0,6
pH	Unità pH	7,4	7,7	8,3
Ammonio	mg/L NH ₄	<0,1	-	<0,1
Nitrito	mg/L NO ₂	<0,05	<0,05	<0,05
Fluoruro	mg/L F	-	<0,1	<0,1
Cloruro	mg/L Cl	6,5	5,1	10,1
Nitrato	mg/L NO ₃	1,3	0,5	2,1
Solfato	mg/L SO ₄	5,1	2,7	6,6
Idrogenocarbonato	mg/L HCO ₃	129	128	125
Sodio	mg/L Na	3,4	5,6	5,1
Potassio	mg/L K	0,2	<0,3	<0,5
Calcio	mg/L Ca	43,8	40,6	34,2
Magnesio	mg/L Mg	1,3	2,1	7,7

Tab. 4.16 - Caratteristiche chimiche e chimico-fisiche delle acque nella zona della Galleria della Neve.

Cascata della Fangaia

La cascata della Fangaia si trova poco a valle della forra che immette nel lago Nero. Rispetto alle acque correnti oggetto di monitoraggio, questa acqua presenta un maggior contenuto in solfati e una similitudine di composizione in relazione alla

componente idrogenocarbonato calcica (Tab. 4.17). Si segnala l'elevata torbidità in occasione del campionamento del 16 maggio 1997, fenomeno di cui non risalimmo alle cause.



Fig.4.52 - Zona della cascata della Fangaia.

Parametri	Unità di misura	16/05/1997	14/05/1998	10/09/1998	05/05/2000
Portata	L/min	30	-	18	75
Temperatura aria	°C	-	8,5	8,2	-
Temperatura acqua	°C	8,1	8,2	8,3	-
Conducibilità elettrica	μS/cm 25 °C	217	238	253	245
Torbidità	N.T.U.	64	1,1	0,6	3,3
pH	Unità pH	8,2	8,2	8,4	8,0
Ammonio	mg/L NH ₄	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Nitrito	mg/L NO ₂	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Fluoruro	mg/L F	0,06	<0,1	<0,1	<0,1
Cloruro	mg/L Cl	4,2	4,8	5,3	7,8
Nitrato	mg/L NO ₃	2,1	2,9	3,9	3,1
Solfato	mg/L SO ₄	12,8	17,0	21,5	15,5
Idrogenocarbonato	mg/L HCO ₃	116	116	113	112
Sodio	mg/L Na	2,0	2,1	2,7	4,6
Potassio	mg/L K	0,5	0,3	0,5	0,4
Calcio	mg/L Ca	39,1	42,7	43,4	38,5
Magnesio	mg/L Mg	2,5	2,0	1,8	3,3

Tab. 4.17 - Caratteristiche chimiche e chimico-fisiche delle acque della Cascata della Fangaia.

Zona della Galleria Franosa

La cascata che si origina nella parte alta della Galleria Franosa è a carattere saltuario e si attiva in occasione di importanti eventi meteorici. Da tempo è stata installata una tettoia lungo la scala metallica che la discende per evitare di interrompere le visite turistiche in occasione di eventi di pioggia particolarmente intensi. L'acqua viene subito assorbita dal detrito che pavimenta la Galleria Franosa.

Al termine della Galleria Franosa, tramite una storica corda a nodi di alcuni metri, è possibile scendere in una forra (lasciando sulla destra la grande galleria che conduce verso il pozzo Suzanne e il pozzo del Pendolo) che corre per qualche centinaio di metri parallela alla Galleria degli Inglesi ad una quota più bassa di circa venti metri.

Le analisi dell'acqua della cascata della Galleria Franosa evidenziano una mineralizzazione simile a quelle correnti (Torrenti Gronda e Vianello-Vidal) confermando ancora una volta che l'acqua di pioggia, che dall'esterno arriva rapidamente in quel punto, si mineralizza in tempi molto brevi, fino dai primi contatti con la roccia della montagna.

L'acqua che scorre nella forra bassa della Galleria degli Inglesi si incontra saltuariamente, in occasione di periodi particolarmente piovosi e mostra l'ordinaria tipologia idrogenocarbonato calcica con una mineralizzazione più elevata per un maggior contenuto in solfati.



Fig. 4.53 - Cascata nella parte superiore della Galleria Franosa attivatasi in occasione di una intensa perturbazione sulle Apuane (12 novembre 1997). In questa galleria discende ora la lunga scala del percorso turistico con adeguata protezione dalla cascata.

Parametri	Unità di misura	Cascata Galleria Franosa	Torrente nella forra bassa della Galleria degli Inglesi
		12/01/2008	27/04/1998
Portata	L/min	> 100 L/min	0,5
Temperatura acqua	°C	8,1	-
Conducibilità elettrica	µS/cm 25 °C	209	243
Torbidità	N.T.U.	0,4	0,1
pH	Unità pH	8,1	8,3
Ammonio	mg/L NH ₄	<0,05	<0,1
Nitrito	mg/L NO ₂	-	<0,05
Fluoruro	mg/L F	<0,1	-
Cloruro	mg/L Cl	4,5	6,1
Nitrato	mg/L NO ₃	0,7	0,8
Solfato	mg/L SO ₄	3,2	10,7
Idrogenocarbonato	mg/L HCO ₃	136	128
Sodio	mg/L Na	7,0	3,9
Potassio	mg/L K	<0,3	0,16
Calcio	mg/L Ca	41,3	31,5
Magnesio	mg/L Mg	1,0	9,1

Tab. 4.18 - Caratteristiche chimiche e chimico-fisiche delle acque nella zona della Galleria Franosa.

Altre acque del Complesso carsico del monte Corchia

Nel corso degli anni sono state analizzate acque campionate in alcuni dei differenti settori del Complesso carsico del monte Corchia.

Nella **Tab. 4.19** sono riportate le analisi di alcune di queste acque; nell'Allegato 2 sono riportate serie più estese.

Nell'insieme queste acque presentano la ricorrente tipologia idrogenocarbonato calcica con basse concentrazioni delle forme di azoto; il campione E (Buca d'Eolo: forra bassa allagata, inizio percorso

del Canyon) mostra un notevole arricchimento in solfati. Le acque che provengono dal sistema Farolfi-Fighiera presentano una temperatura più bassa: ci troviamo in una parte più elevata del monte Corchia e pertanto l'acqua e l'aria in equilibrio con la roccia sono più fredde rispetto alla zona dell'Antro del Corchia che ha una temperatura intorno agli 8 gradi. Tale differenza è ben evidente a coloro che hanno esplorato, percorso e trascorso qualche notte in quel settore del Complesso carsico.

Parametri	Unità di misura	A	B	C	D	E	F	G
		24/05/1998	01/08/1998	01/08/1998	25/04/1999	25/04/1999	05/02/2000	01/12/2007
Portata	L/min	-	0,5	0,2	1,0	-	-	-
Temperatura aria	°C	-	6,3	5,8	8,7	5,4	-	-
Temperatura acqua	°C	-	6,2	5,5	8,7	6,0	-	-
Conducibilità elettrica	μS/cm 25 °C	172	181	186	249	232	245	258
Torbidità	N.T.U.	0,2	1,2	12,6	0,1	0,1	0,2	-
pH	Unità pH	8,3	8,1	8,3	8,1	8,2	6,8	7,7
Ammonio	mg/L NH ₄	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-
Nitrito	mg/L NO ₂	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-
Fluoruro	mg/L F	-	<0,05	<0,05	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cloruro	mg/L Cl	2,8	2,6	3,5	7,9	6,6	11,2	8,5
Nitrato	mg/L NO ₃	1,7	1,6	0,7	0,9	3,8	0,8	0,6
Solfato	mg/L SO ₄	3,4	3,1	2,6	8,7	31,0	5,8	3,3
Idrogenocarbonato	mg/L HCO ₃	97,6	107	104	128	119	120	141
Sodio	mg/L Na	1,5	1,7	1,9	4,7	4,4	4,3	3,9
Potassio	mg/L K	<0,1	0,08	0,3	0,3	0,2	0,5	<0,3
Calcio	mg/L Ca	34,8	34,7	34,9	41,5	46,3	43,1	25,3
Magnesio	mg/L Mg	0,5	0,5	0,4	2,3	3,5	0,4	14,9
SiO ₂	mg/L SiO ₂	1,1	1,3	1,0	-	-	-	-

Tab. 4.19 - Caratteristiche chimiche e chimico-fisiche di acque campionate in differenti settori del Complesso carsico del monte Corchia (limiti di rivelabilità variabili in funzione dell'aggiornamento delle apparecchiature di analisi).

Tab. 4.19 - Legenda postazioni di campionamento:

- A:** Stillicidio Abisso Fighiera (campo a quota - 120 dalla Buca del Cacciatore)
- B:** Sistema Farolfi - Fighiera: cascata del pozzo presso Campo Base (C.B.) Erica (Fighiera) Caposaldo 34 FST (Federazione Speleologica Toscana)
- C:** Sistema Farolfi - Fighiera: Galleria dei Maremmani - Cascatella presso grande stalagmite
- D:** Buca d'Eolo: a 200 dall'ingresso; cascata sopra scalette incise (davanti alle scritte storiche)
- E:** Buca d'Eolo: forra bassa allagata (inizio percorso del Canyon)
- F:** Rami dei Fiorentini (I° salto al Campo base dei Fiorentini: confluenza con torrente di alimentazione della Fangaia)
- G:** Rami di Valinor - ER 01

I componenti minori

Assieme ai macrocostituenti delle acque (sodio, potassio, solfato, cloruro, ecc.) sono di interesse anche i componenti minori; fra questi le forme di azoto che, quando presenti in concentrazioni elevate e non correlabili a fenomeni naturali⁽⁴⁾, sono indicatori di inquinamento.

I nitrati, come riportato nei grafici presentati e in alcune tabelle, in tutte le acque si mantengono costantemente su valori molto bassi. In alcuni casi, in precedenza descritti, si sono avute oscillazioni di alcuni valori di concentrazione in alcuni laghetti. La sorgente di Cardoso, che può rappresentare una “sintesi” di composizione di gran parte delle acque correnti all'interno del Complesso carsico del monte Corchia, presenta valori compresi fra 0,8 e 2,3 mg/L NO₃, valori che di solito costituiscono il fondo

naturale dei nitrati in acque di elevata purezza. In particolare, in questa sorgente, ad una evidente e persistente contaminazione microbiologica, come riportato di seguito, non corrispondono valori significativi delle forme di azoto che si presentano invece costantemente in concentrazioni tipiche di acque non contaminate.

⁽⁴⁾ L'ammoniaca (o ammonio) in alcune acque sotterranee può raggiungere valori superiori anche a 10 mg/L ed è dovuta a cessioni da parte di sostanze organiche sepolte in seguito a sedimentazione naturale. Nei terreni pliocenici della Valdelsa (provincia di Firenze) in un'antica acqua minerale (Fonte Ilaria), quindi batteriologicamente pura, si sono ripetutamente trovati nel corso dei vari controlli valori di ammoniaca da 10,5 a 12,8 mg/L (come NH₄⁺).

L'ammonio, in tutte le acque, sia in quelle dei laghetti, sia quelle correnti, risulta non rivelabile (da $<0,01$ a $<0,1$ mg/L NH_4); anche i nitriti risultano non rivelabili (da $<0,01$ a $<0,05$ mg/L NO_2^-). - (limiti di rivelabilità variabili in funzione dei metodi analitici adottati e dell'evoluzione delle apparecchiature analitiche).

Il fluoruro nelle acque presenta differenti valori. Nei tre laghetti si hanno le seguenti distribuzioni dei valori:

- laghetto della Galleria Bassa della Stalattiti: fra 0,4 e 0,6 mg/L F;
- laghetto della Galleria Alta delle Stalattiti: fra 0,2 e 0,4 mg/L F;
- laghetto del Venerdì: fra 0,2 e 0,4 mg/L F.

In tutte le altre acque il fluoruro risulta compreso fra $<0,05$ a 0,15 mg/L. Il fluoro si trova come minerale in alcune rocce vulcaniche, è inoltre un componente della lepidolite $\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Al},\text{Si},\text{Rb})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$, un fillosilicato. Fluorite in cristalli (CaF_2) è stata trovata entro il marmo delle Apuane; si tratta comunque di un minerale accessorio molto raro.

La silice nelle acque correnti (compreso il laghetto del Venerdì) presenta valori compresi fra 1,5 e 3,5 mg/L SiO_2 ; nei due laghetti della Galleria delle Stalattiti è compresa fra 5,0 e 5,9 mg/L SiO_2 . La silice deriva dall'alterazione di rocce silicatiche (scisti, argilloscisti, filladi, porfiroidi).

Nota sul residuo fisso

Il residuo fisso o residuo totale a 180°C , corrisponde alla parte solida che rimane dopo aver evaporato ed essiccato alla temperatura di 180°C , una quantità nota di acqua, in genere 1 litro. Esso esprime la quantità totale di sali contenuti, oltre a sostanze non saline, comunque disciolte, come la silice.

Questo parametro non è stato riportato nelle tabelle delle analisi delle acque. E' possibile ricavare il valore del residuo fisso dalla conducibilità elettrica secondo quanto segue:

residuo fisso a 180°C = conducibilità elettrica in $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ x 0,59. Il fattore moltiplicativo 0,59, ricavato sperimentalmente, vale solo per le acque del Complesso carsico del monte Corchia, cioè acque con bassa mineralizzazione e con una tipologia prevalentemente idrogenocarbonato calcico magnesiaci.

Metalli ed elementi di natura non metallica nelle acque

La circolazione delle acque entro le rocce carbonatiche del monte Corchia non determina significativi arricchimenti in metalli ed elementi di natura non metallica nelle acque stesse.

Le Alpi Apuane sono particolarmente interessate da fenomeni di mineralizzazione a metalli pesanti, da molto tempo oggetto di sfruttamento attraverso numerose miniere, ma queste sono scavate nel

basamento paleozoico, formazione geologica sottostante alla copertura di natura carbonatica dove si sviluppa il complesso carsico.

Fenomeni di inquinamento da metalli pesanti sono conosciuti nell'area apuana in conseguenza della circolazione dell'acqua di pioggia in aree minerarie dismesse dove l'ossidazione dei solfuri metallici, presenti nei residui minerari (discariche) o dei filoni minerari affioranti nelle gallerie abbandonate, trasforma vari elementi in forma solubile.

Si ha così la formazione e la deposizione di fanghi ricchi in ferro e vistose circolazioni di acque colorate in giallo, ricche delle forme solubili di questo metallo; in tali acque non è da escludere la presenza di altri metalli pesanti, molti dei quali di natura tossica.

I processi ossidativi dei solfuri (zinco, ferro, rame ed altri, tra cui antimonio, arsenico) producono acque ad elevata acidità che consente una notevole mobilità di questi elementi, presenti talvolta in concentrazioni piuttosto elevate.



Fig. 4.54 - Cristallo di fluorite in un piccolo geode nel marmo delle Apuane.



Fig. 4.55 - Buca della Vena, miniera abbandonata nel comune di Stazzema. Galleria contenente un elevato spessore di fanghi prevalentemente costituiti da composti di ferro derivante dall'alterazione dei relativi minerali. La mineralizzazione a magnetite, pirite e barite è impostata fra tra le filladi del basamento paleozoico (Scisti di Fornovolasco) e la copertura carbonatica triassica (Dolomia "Grezzoni").

Nello stesso Antro del Corchia sono presenti in differenti gallerie zone caratterizzate da depositi⁽⁵⁾ di colore bruno-nero, prevalentemente costituiti da ossidi di ferro e manganese comunque accompagnati da nichel, piombo e rame. Tali depositi, la cui genesi non è al momento conosciuta, non determinano contaminazione delle acque: essi sono spesso in rami fossili, fuori da aree interessate dalla circolazione idrica, inoltre i metalli costituenti tali depositi sono in una forma chimica insolubile.

Altra possibile fonte di inquinamento risiede nella persistenza di rifiuti di differente tipologia abbandonati in differenti zone del monte Corchia, prevalentemente in aree dismesse di cava. Spesso trattasi di rifiuti pericolosi, costituiti cioè da oli combustibili, da vecchie batterie, da molto materiale metallico. Tuttavia la contaminazione da metalli delle acque sotterranee è improbabile perché trattasi prevalentemente di strutture ferrose, quindi metalli e leghe metalliche in forma non solubile (ad eccezione di quelli contenuti nei liquidi componenti le batterie). Resta alto il pericolo indotto da idrocarburi e oli di differente tipologia, tra cui oli dielettrici, che in seguito a piogge possono venire trasportati facilmente entro il complesso carsico come più volte si è verificato.

Resta poi diffusa l'abitudine di gettare rifiuti solidi urbani e scarti di materiali di differente lavorazione (prevalentemente di natura edile) nei valloni dei torrenti che scendono dal monte Corchia.

Tutto ciò mette in evidenza come un complesso carsico fra i più importanti di Italia sia attualmente ben poco tutelato ed esposto ad elevati rischi di degrado.

In relazione alla presenza dei metalli pesanti ed altri elementi di natura non metallica, nel corso degli anni sono state fatte varie analisi con l'impiego di tecniche analitiche tradizionali come l'assorbimento atomico in fornello di grafite (AAGF) e tecniche più avanzate come la spettrometria di emissione al plasma induttivo con rivelatore di massa (ICP-MS). In tutte queste acque si sono riscontrati valori di concentrazione di questi elementi che possono essere ricondotti a quelli del fondo naturale; solo l'uranio, come è riportato nel paragrafo che segue, mostra concentrazioni da ritenersi anomale.

E' stata riportata solo una parte dei dati relativi a tali elementi, data la similitudine dei risultati nel corso degli anni (*Tab. 4.20 e 4.21*).

Mentre la frequentazione turistica non può indurre in alcun modo modifiche di questo quadro, tutto il sistema di cave che insiste sul monte Corchia costituisce una fonte permanente di rischio di possibili contaminazioni.

⁽⁵⁾ F. Mantelli, L. Piccini, A. d'Elia, A. Montigiani - *Risultati di analisi chimiche preliminari sulle patine nere nel Complesso carsico del Monte Corchia e in altre grotte italiane*, Acta apuana, XI, p.63-72, 2012.



Fig. 4.56 - Acque ricche in ferro e altri metalli in fuoriuscita dalle miniere abbandonate nella zona di Valdicastello Carducci (Pietrasanta).

	Alluminio	Arsenico	Boro	Bario	Antimonio	Vanadio
Fontane di Cardoso	<5	0,29	3,4	9,1	0,55	0,08
Laghetto del Venerdì	10,4	0,28	1,2	10,4	0,70	0,20
Laghetto Galleria Alta Stalattiti	<5	0,11	0,3	7,7	0,50	0,09
Stillicidio - Galleria Alta Stalattiti	<5	<0,1	0,3	7,2	0,46	0,08
Laghetto Galleria Bassa Stalattiti	15,7	0,20	0,4	15,7	0,92	0,19
Cascata dei Lucchesi	<5	0,44	0,2	2,2	0,48	0,04
Torrente della Gronda	<5	0,24	0,3	2,0	0,48	0,11
Torrente Vianello-Vidal	<5	0,15	<0,5	8,3	0,45	0,09

Tab. 4.20 - Metalli ed elementi di natura non metallica determinati mediante spettrometria di emissione al plasma induttivo con rivelatore di massa (ICP-MS) nelle acque interessate dal percorso turistico (e dintorni) entro l'Antro del Corchia. Dati relativi ai prelievi del 20-8-2012. Valori espressi in µg/L. Inferiori ai rispettivi limiti di rivelabilità i seguenti elementi: B <5; Cd <0,4; Cr <2; Cu <2; Fe <3; Hg <0,3; Mn <1; Ni <2; Pb <0,5; Se <2; Zn <2.

Postazioni	Alluminio	Bario	Boro	Cromo	Ferro	Manganese	Postazioni	Rame	Zinco	Molibdeno	Stronzio	Uranio
Torrente Vianello-Vidal	<20	7,6	3,9	<1	<10	<5	Torrente Vianello-Vidal	<2	<10	<1,0	47,4	<0,5
Cascata Galleria Lucchesi	62	5,5	3,7	<1	65	15	Cascata Galleria Lucchesi	<2	<10	<1,0	24,7	<0,5
Laghetto Galleria Bassa Stalattiti	31	19,7	5,0	<1	<10	<5	Laghetto Galleria Bassa Stalattiti	<2	<10	6,5	61,4	8,5
Laghetto Galleria Bassa Stalattiti storica	27	19,3	4,4	1,1	<10	<5	Laghetto Galleria Bassa Stalattiti storica	<2	<10	6,0	61,5	8,5
Laghetto Galleria Alta Stalattiti	<20	12,0	3,8	<1	<10	<5	Laghetto Galleria Alta Stalattiti	<2	<10	3,5	60,4	6,9
Torrente della Gronda	<20	2,9	4,4	<1	<10	<5	Torrente della Gronda	<2	<10	<1,0	21,7	0,7
Laghetto del Venerdi	55	13,1	3,4	<1	28	8,3	Laghetto del Venerdi	2,7	<10	2,0	39,8	1,7
Galleria della Neve	<20	19,3	3,5	<1	<10	<5	Galleria della Neve	<2	<10	<1,0	36,9	<0,5
Cascata Risalita dei Romani	113	12,4	3,0	<1	74	19	Cascata Risalita dei Romani	<2	<10	<1,0	25,8	<0,5

Tab. 4.21 e 4.22 - Metalli ed elementi di natura non metallica determinati mediante spettrometria di emissione al plasma induttivo con rivelatore di massa (ICP-MS) nelle acque interessate dal percorso turistico e dintorni entro l'Antro del Corchia. Dati relativi al prelievo del 7 maggio 2019. Valori espressi in µg/L. Inferiori ai rispettivi limiti di rivelabilità i seguenti elementi: Ag <0,5; As <0,5; B <20; Be <0,5; Cd <0,2; Co <0,5; Ni <1; Pb <1; Sb <2; Se <0,5; Sn <0,5; Ti <0,5; V <0,5; Zn <10.

Nella **Tab. 4.23** sono riportati metalli ed elementi di natura non metallica determinati nelle acque nelle gallerie che si originano dall'ingresso storico dell'Antro del Corchia (Buca d'Eolo) e nella zona dell'abisso Fighiera-Farolfi. Anche questa serie di dati indica valori che possono essere ricondotti

a quelli del fondo naturale; restano anomali, ma comunque scarsamente significativi, i dati dell'alluminio nelle acque della cascata del campo base dei Maremmani e della cascata al fondo della Galleria dei Maremmani, valori che comunque non sono connessi a fenomeni di inquinamento.

Corchia Farolfi - Fighiera								
Elemento	Litio	Boro	Alluminio	Titanio	Manganese	Cobalto	Rame	Arsenico
Data	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998
Cascata C. B. Maremmani	0,94	1,9	36,8	1,3	16,5	0,40	2,0	0,2
Cascata fondo Galleria Maremmani	0,21	<0,1	164	1,6	72,2	0,21	2,5	0,3
Cascata Pozzo al C. B. Erica	<0,05	<0,1	<0,1	<0,2	3,7	<0,01	0,3	<0,1
Corchia Buca d'Eolo								
Data	25/04/1999	25/04/1999	25/04/1999	25/04/1999	25/04/1999			
Cascata Scalette di Pietra	0,3	<0,1	<0,1	<0,2	0,4			
Laghetto Sifone Canyon	0,2	<0,1	<0,1	<0,2	0,7			
Forra allagata Canyon	0,7	<0,1	<0,1	0,2	0,6			
Corchia Farolfi - Fighiera								
Elemento	Rubidio	Stronzio	Lantanio	Molibdeno	Antimonio	Mercurio	Bario	Zinco
Data	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998	31/07/1998
Cascata C. B. Maremmani	0,42	59,8	0,5	0,20	0,46	0,6	24,4	15,0
Cascata fondo Galleria. Maremmani	0,23	27,2	0,7	<0,05	0,37	0,6	5,7	11,3
Pozzo al C. B. Erica	<0,02	20,1	<0,2	<0,05	0,34	0,7	0,9	0,1
Corchia Buca d'Eolo								
Data	25/04/1999	25/04/1999	25/04/1999	25/04/1999	25/04/1999	25/04/1999	25/04/1999	25/04/1999
Cascata Scalette di Pietra	0,07	32,1	<0,2	0,20	0,36	0,4	30,2	<0,1
Laghetto Sifone Canyon	0,05	73,2	<0,2	<0,05	0,34	0,3	39,5	0,4
Forra allagata Canyon	0,04	39,4	<0,2	0,08	0,38	<0,1	27,0	2,5
Elementi inferiori ai limiti rivelabilità								
	Be <0,05	Cd <0,05	Ag <0,2	Bi <0,05	Pb <0,05	Sn <0,05		

Tab. 4.23 - Metalli ed elementi di natura non metallica determinati mediante spettrometria di emissione al plasma induttivo con rivelatore di massa (ICP-MS) nelle acque delle gallerie prospicienti alla Buca d'Eolo (Ingresso storico) e nella zona dell'abisso Fighiera-Farolfi. Valori espressi in µg/L.

L'uranio in alcune acque dell'Antro del Corchia

In anni recenti, grazie alla possibilità di impiego di tecniche analitiche evolute, l'uranio è stato oggetto di analisi in alcune acque dell'Antro del Corchia. I dati attualmente disponibili indicano concentrazioni ben al di sopra dei limiti di rivelabilità di questo elemento nelle acque dei laghetti della Galleria delle Stalattiti, come si può osservare nella *Tab. 4.24*.

Sulla presenza di questo elemento in concentrazioni significative in alcune acque non si dispone al momento di informazioni, se non l'ipotesi che le acque dei laghetti nella Galleria delle Stalattiti siano alimentati da acqua che percola attraverso il basamento che in quel settore è localizzato al di sopra delle formazioni carbonatiche (*Fig.4.57 e 4.58*). Il basamento è composto da differenti tipi litologici, alcuni dei quali potrebbero avere un particolare arricchimento in uranio.

I valori riscontrati sono inferiori al valore limite della concentrazione di uranio pari a 30 µg/L indicato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità per le acque potabili, tuttavia sono valori ben superiori a quelli riscontrati nelle altre acque oggetto di monitoraggio.

Postazioni Corchia	12/07/2012	07/05/2019
Bianco (acqua Milli-Q + HNO ₃)	<0,1	<0,5
Torrente Gronda	1,0	0,7
Cascata Risalita dei Romani	0,2	<0,5
Cascata Galleria Lucchesi	-	<0,5
Torrente Vianello-Vidal	0,8	<0,5
Lago Nero	0,8	-
Lago Venerdì	2,5	1,7
Laghetto Galleria Bassa Stalattiti	13,7	8,5
Laghetto Galleria Bassa Stalattiti storica	-	8,5
Laghetto Galleria Alta Stalattiti	9,6	6,9
Galleria della Neve	-	<0,5
Fontane di Cardoso	0,9	-

Tab. 4.24 - Contenuto di uranio (²³⁸U) espresso in µg/L nelle acque di alcuni corpi idrici dell'Antro del Corchia, in aree prossime al percorso turistico e nella principale risorgente del Complesso carsico del monte Corchia.

Fig. 4.58 - Localizzazione dell'area dei laghetti presenti nella Galleria delle Stalattiti al di sotto del basamento paleozoico (in bianco la formazione carbonatica, in colore il basamento paleozoico).

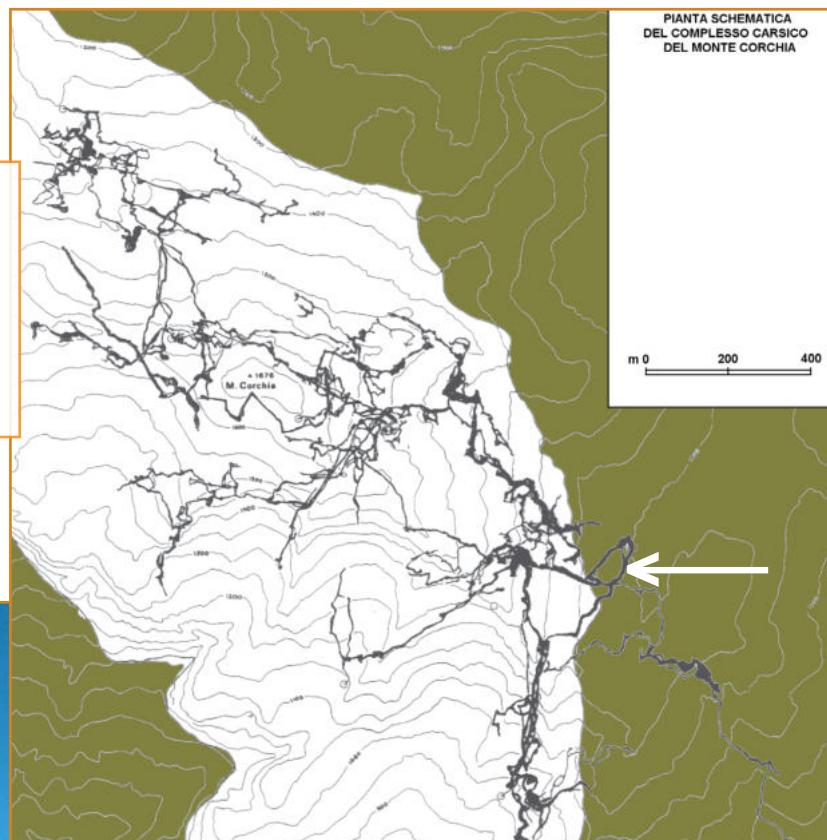


Fig. 4.57 - Rocce del basamento paleozoico sovrapposte alle rocce carbonatiche (zona del Passo dell'Alpino, monte Corchia).

Aspetti microbiologici delle acque dell'Antro del Corchia

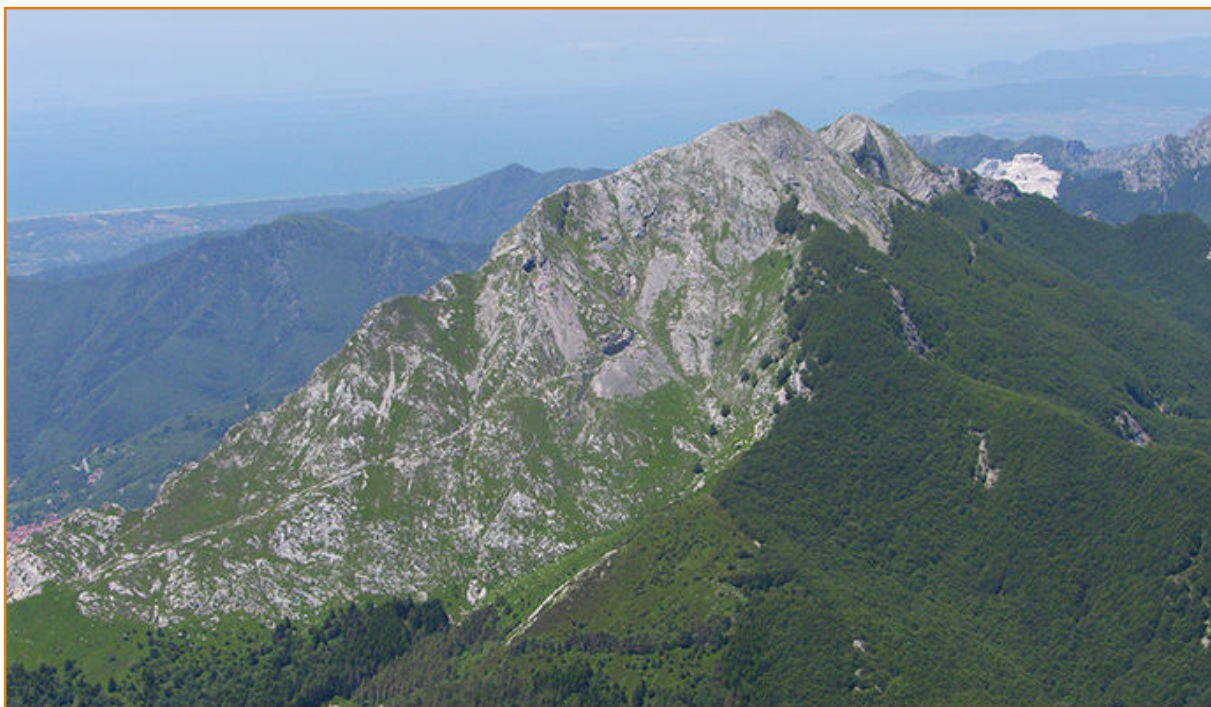


Fig. 4.59 - Il monte Corchia da sud-est. Trattasi di una montagna costituita da rocce ad elevata permeabilità per fratturazione e carsismo, quindi con scarsa capacità filtrante del suolo, che non proteggono l'acquifero da infiltrazioni di acque che possono essere contaminate per la componente microbiologica.

La contaminazione delle acque dovuta a microrganismi è ricorrente nelle acque ipogee a causa della scarsa capacità filtrante del suolo carsico: il dilavamento, in seguito alle piogge, trasporta i microrganismi presenti sul suolo dalla superficie esterna della montagna nei corsi idrici ipogei. I microrganismi possono avere origine dalle deiezioni della fauna selvatica, dalla presenza di insediamenti abitativi (depurazione non adeguata

di acque reflue, perdita da fognature); anche la presenza di attività di estrazione del marmo, con la conseguente frequentazione umana, può costituire un rischio di possibile inquinamento da acque reflue.

Nel corso degli anni sono state fatte varie analisi microbiologiche delle acque interessate dalla zona destinata alla fruizione turistica e in aree limitrofe.

Quando era ancora in vigore il Dpr 236/88, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano (acque potabili), i controlli erano stati indirizzati alla ricerca dei coliformi totali e fecali e degli streptococchi fecali nonché, al conteggio delle colonie a 22 °C a 36 °C. Le analisi furono finalizzate principalmente alla ricerca dei comuni indicatori di inquinamento fecale, pertanto i parametri determinati furono principalmente i seguenti.

- Coliformi totali, microrganismi del tipo “coli” non patogeni o poco patogeni, con caratteristiche simili a quelle possedute da *Escherichia coli* di origine umana, animale ed ambientale.
- Coliformi fecali, microrganismi che costituiscono gran parte della flora intestinale dell’uomo e degli animali. La loro presenza nell’acqua indica correlazione con scarichi fognari o con flussi idrici di percolazione venuti a contatto con deiezioni.
- Streptococchi fecali, microrganismi che fanno parte della normale flora intestinale dell’uomo e degli animali. Nell’uomo il rapporto fra coliformi fecali e streptococchi fecali è circa 4 a 1 e tende ad invertirsi nelle feci di origine animale; rispetto ai coliformi fecali, questi batteri possiedono una maggiore resistenza in ambiente esterno.

La carica batterica o conteggio delle colonie a 22 °C fornisce una valutazione sommaria della qualità microbiologica di un’acqua in quanto rileva in modo non specifico un insieme di differenti e numerose

specie batteriche; si tratta di microrganismi presenti negli strati superficiali del suolo e che si adattano all’ambiente idrico. La carica batterica o conteggio delle colonie a 37 °C è un parametro che consente di evidenziare i batteri di origine umana o animale rilevabili anche negli strati superficiali del terreno.

Una carica batterica elevata non è necessariamente correlabile ad un rischio sanitario diretto, ma è indice di alterazione della qualità dell’acqua.

Il conteggio delle colonie è un indicatore utile nel controllo delle acque di acquedotto per valutare l’efficacia della disinfezione, ma ha perduto progressivamente di importanza per valutare un’acqua ai fini potabili. Come vedremo in questo contesto, a valori elevati della carica batterica non necessariamente compaiono indici di fecalizzazione nelle acque.

Con l’entrata in vigore del decreto legislativo 31/2001 (di seguito indicato: DL.vo 31/2001, e s.m.i.

- con successive modifiche e integrazioni, in seguito all’entrata in vigore del decreto 14 giugno 2017), che sostanzialmente sostituisce il precedente Dpr 236/88, per la valutazione delle caratteristiche microbiologiche si sono ricercati i parametri riportati nella **Tab. 4.25**. In questa tabella, rispetto a quelle del precedente decreto, il parametro coliformi fecali è stato sostituito da *Escherichia coli* come indicatore specifico di fecalizzazione; inoltre gli enterococchi sostituiscono gli streptococchi fecali.

L’ *Escherichia coli* è una delle principali specie di

batteri che vivono nella parte inferiore dell'intestino dell'uomo e degli animali a sangue caldo. Poiché questo batterio viene espulso ogni giorno con le feci (nell'ordine di 100 milioni di unità formanti colonia, UFC, per grammo di feci), diviene il principale indicatore di contaminazione fecale.

Parametro	Valore di parametro
	(numero/100mL)
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	0
Enterococchi	0
Parametro - Per le acque messe in vendita in bottiglie o contenitori sono applicati i seguenti valori:	Valore di parametro
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	0/250 mL
Enterococchi	0/250 mL
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0/250 mL
Conteggio delle colonie a 22 °C	100/mL
Conteggio delle colonie a 37 °C	20/mL

Tab. 4.25 - Parametri e valori di parametro microbiologici e relativi volumi di riferimento impiegati nella definizione dei requisiti minimi di qualità delle acque destinate al consumo umano secondo quanto indicato nell'Allegato I, parte A del DL.vo 31/2001 e s.m.i.

In casi particolari, e per quanto riguarda le acque di acquedotto, a giudizio dell'autorità sanitaria competente, possono essere oggetto di controllo vari parametri accessori (*Tab. 4.26*).

Parametro	Volume di riferimento
Alghe	1 L
Batteriofagi anti- <i>E. coli</i>	100 L
Nematodi a vita libera	1 L
Enterobatteri patogeni	1 L
Enterovirus	100 L
Funghi	100 mL
Protozoi	100 L
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	250 mL
Stafilococchi patogeni	250 mL

Tab. 4.26 - Parametri microbiologici accessori ricercati a giudizio dell'autorità sanitaria.

Le analisi microbiologiche hanno lo scopo di assicurare che l'acqua non contenga germi patogeni; questi microrganismi, quando sono presenti nelle acque, sono spesso in piccola quantità e poco resistenti. Per questa ragione il loro numero diminuisce rapidamente ed è facile che sfuggano al controllo, pertanto la loro ricerca diretta è in genere piuttosto complessa. L'esame microbiologico non è quindi diretto alla loro individuazione, ma è volto a rilevare la presenza di altri batteri che sono utilizzati come indicatori della possibile contaminazione. Questi microrganismi devono rispondere a precise condizioni e in particolare, rispetto all'agente patogeno, devono:

- 1) essere presenti contemporaneamente e in numero molto elevato;
- 2) avere una maggiore sopravvivenza nell'ambiente idrico;
- 3) avere una più alta resistenza all'azione dei disinfettanti.

Nella normale pratica analitica microbiologica si ricercano quindi i parametri riportati in **Tab. 4.25** secondo quanto previsto dal DL.vo 31/2001 e s.m.i.; solo in casi particolari si procede all'analisi dei parametri previsti nella **Tab. 4.26**.

Per quanto riguarda l'Antro del Corchia, nell'insieme si dispone di un numero limitato di campagne di prelievo finalizzate alle analisi microbiologiche realizzate nel corso degli anni; questo rende

preferibile fare valutazioni caso per caso per cercare poi di trarre conclusioni, pur sommarie, di carattere generale.

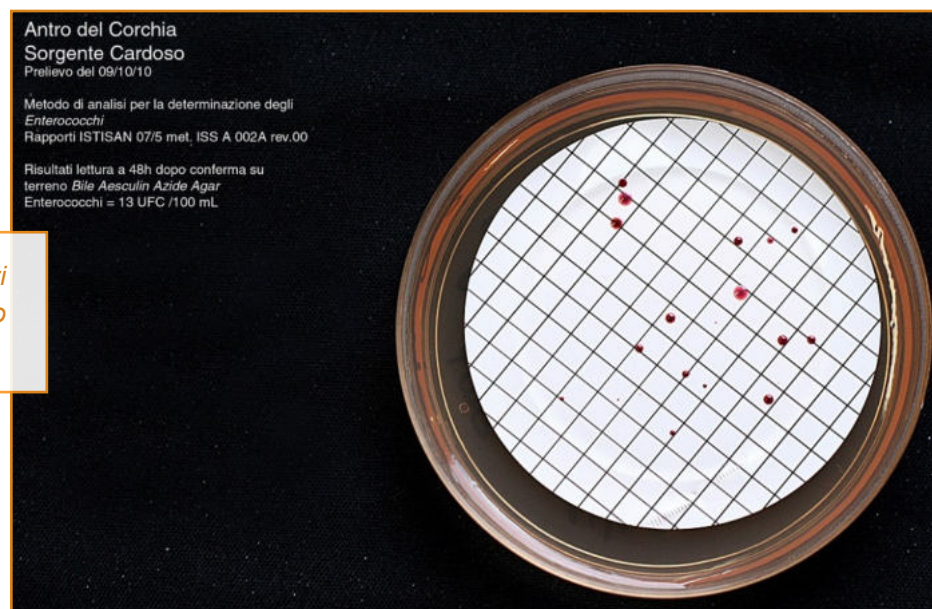
Nella **Tab. 4.27** è riportato lo stato microbiologico delle acque delle Fontane di Cardoso, oggetto di monitoraggio fin da quando sono iniziati i controlli (anno 1997). In questa sorgente si è costantemente rilevata la presenza di indicatori di inquinamento fecale in quantità abbastanza elevata; questo quadro di contaminazione si è mantenuto costante fino all'ottobre 2016, ultimo anno in cui sono stati effettuati i controlli.

La contaminazione delle acque delle Fontane di Cardoso potrebbe essere riconducibile ad infiltrazioni persistenti dovute a scarichi civili di abitati a monte e, più in generale, a flussi idrici interessati da attività umane. Anche in occasione di portate elevate si è notata persistenza degli indicatori di contaminazione microbiologica, non si sono osservati cioè fenomeni di diluizione dovuti all'aumento di portata.

Data	Coliformi totali UFC/100ml	Coliformi fecali UFC/100ml	Streptococchi fecali UFC/100ml
16/07/1997	65	47	14
08/10/1998	33	14	8
04/12/1999	17	19	2
01/03/2000	25	18	8
05/09/2001	108	18	200
16/05/2002	9	5	2
09/10/2010	77	11	13
	Coliformi totali UFC/100ml	<i>Escherichia coli</i> UFC/100ml	Enterococchi UFC/100ml
10/08/2011	165	32	86
13/10/2016	248	19	19

Tab. 4.27 - Contaminazione microbiologica delle acque delle Fontane di Cardoso.

Fig. 4.60 - Coltura di Enterococchi riscontrati nelle acque delle Fontane di Cardoso (prelievo del 09/10/2010).



Nella **Tab. 4.28** è riportato lo stato microbiologico delle acque dei principali corpi idrici connessi al settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica oltre a quello delle Fontane di Cardoso (campionamenti del 23 marzo 2004).

Quel giorno erano state campionate le acque durante una fase di portata media, conseguente a piogge cadute pochi giorni prima; il torrente Vianello-Vidal aveva infatti una portata di 420 L/min, il torrente Gronda di 300 L/min e le Fontane di Cardoso di circa 1000 L/min. Mentre le Fontane di Cardoso mostravano ancora indici di

fecalizzazione, gli altri corpi idrici presentavano gli indicatori microbiologici entro i limiti di legge. Per i corsi d'acqua Vianello-Vidal e Gronda, i loro buoni requisiti microbiologici erano coerenti con la torbidità molto bassa; in ambedue i corsi d'acqua la torbidità era 0,1 NTU, indice di acque molto limpide e quindi con assenza di materiale sospeso a sua volta veicolo di microrganismi.

Nella stessa Tabella si osservano i valori elevati della carica batterica a 22 °C (confronta con il valore di parametro **Tab. 4.25**) alla quale, comunque, non corrispondono significativi indici di fecalizzazione.

Parametri Campione	Coliformi totali (UFC/100 ml)	Coliformi fecali (UFC/100 ml)	Streptococchi fecali (UFC/100 ml)	Carica batterica a 22 °C (UFC/1 ml)	Carica batterica a 37 °C (UFC/1 ml)
Fontane di Cardoso	9	7	0	109	3
Torrente Vianello-Vidal	0	0	0	28	0
Laghetto Galleria Bassa Stalattiti	0	0	0	145	1
Laghetto Galleria Alta Stalattiti	0	0	0	60	1
Torrente Gronda	0	0	0	10	1
Laghetto Venerdi	0	0	0	200	8
Cascata Risalita Romani	0	0	0	9	0

Tab. 4.28 - Valori dei parametri microbiologici nelle acque dei principali corpi idrici connessi al settore dell'Antro del Corchia destinato fruizione turistica. Prelievi del 23 marzo 2004.

Tuttavia vedremo di seguito che a situazioni di basse portate e con torbidità molto bassa non corrisponde sempre un quadro di assenza di contaminazione come si evince dalla **Tab. 4.29** dove è riportato lo stato microbiologico delle acque relative al prelievo del 29 settembre 2004.

In quella data erano state campionate le acque durante una fase di magra dei vari corsi idrici.

Mentre le Fontane di Cardoso mostravano i consueti indici di contaminazione, può sorprendere che in una situazione di flussi stabili e con bassissima torbidità si siano osservati indici di fecalizzazione anche nelle acque del torrente Vianello-Vidal, torrente

della Gronda e cascata dei Romani. Occorre inoltre tenere presente che i corsi ipogei dei sistemi carsici strutturati prevalentemente in condotti come nel Complesso carsico del monte Corchia presentano, dal punto di vista microbiologico, notevoli similitudini con le acque superficiali; in questi casi, a causa delle numerose fratture del complesso carsico, ci troviamo di fronte ad un acquifero che non è mai adeguatamente protetto. Si può spiegare in questo modo la presenza di alcuni indici di contaminazione delle acque correnti, comunque sempre con valori non elevati, anche in situazioni di stabilità dei flussi.

Parametri Campione	Coliformi totali (UFC/100ml)	Coliformi fecali (UFC/100ml)	Streptococchi fecali (UFC/100ml)	Escherichia coli (UFC/100ml)	Conteggio delle colonie a 22 °C (UFC/1ml)	Conteggio delle colonie a 37°C (UFC/1ml)
Fontane di Cardoso	31	19	12	13	1	34
Torrente Vianello-Vidal	20	4	1	2	98	23
Cascata Risalita dei Lucchesi	0	0	2	0	6	2
Laghetto Galleria Bassa Stalattiti	1	0	0	0	0	1
Laghetto Galleria Alta Stalattiti	0	0	0	0	0	1
Torrente Gronda	3	0	1	0	13	3
Laghetto del Venerdi	0	0	0	0	150	8
Cascata Risalita dei Romani	2	0	3	0	8	2

Tab. 4.29 - Valori dei parametri microbiologici nelle acque dei principali corpi idrici connessi al settore dell'Antro del Corchia destinato fruizione turistica. Prelievi del 29 settembre 2004.

Una situazione simile si osserva con il campionamento del 9 ottobre 2010 (*Tab. 4.30*) in occasione del quale si è ampliato il campo dei parametri microbiologici ricercati (*Pseudomonas aeruginosa* e clostridi), batteri che continuano a

confermare lo stato di elevato inquinamento delle Fontane di Cardoso e ad indicare per le acque correnti una situazione analoga a quella espressa dagli altri indicatori.

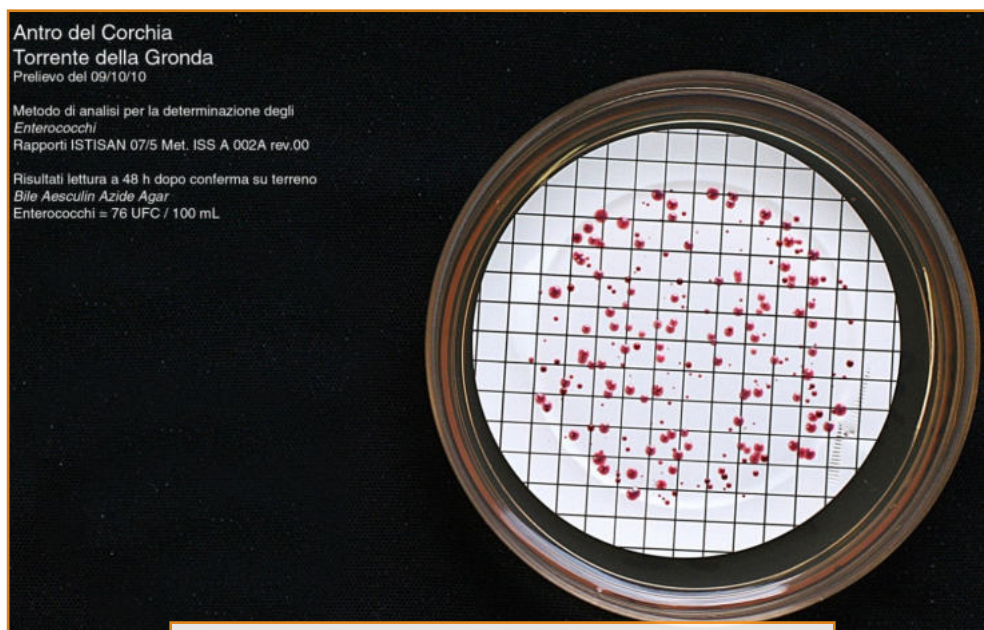
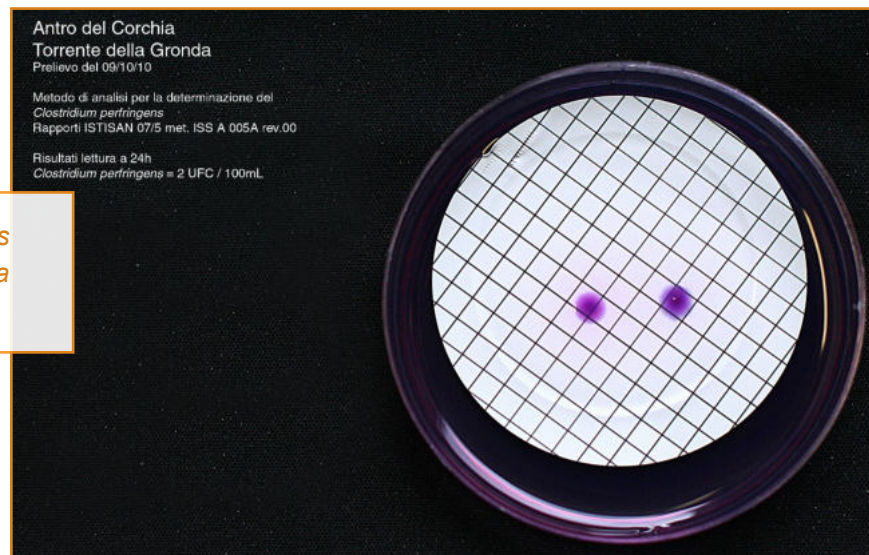


Fig. 4.61 - Coltura di Enterococchi riscontrati nelle acque del torrente della Gronda (prelievi del 09/10/2010).

Denominazione campione	Carica batterica totale 22 °C	Carica batterica totale 36 °C	Batteri coliformi	<i>Escherichia coli</i>
	UFC/mL	UFC/mL	UFC/100 mL	UFC/100 mL
Fontane di Cardoso	200	10	77	11
Laghetto Galleria Alta delle Stalattiti	120	<10	5	0
Laghetto Galleria Bassa delle Stalattiti	20	<10	5	0
Torrente Vianello-Vidal	120	10	9	0
Torrente della Gronda	70	30	30	3
Laghetto del Venerdì	220	<10	5	0
Cascata Risalita dei Lucchesi	<10	<10	16	4
Cascata Risalita dei Romani	30	50	5	1
	Enterococchi	<i>Pseudomonas</i>	<i>Pseudomonas</i> specie	<i>Clostridium perfringens</i>
	UFC/100 mL	UFC/250 mL	UFC/250 mL	UFC/100 mL
Fontane di Cardoso	13	0	100	1
Laghetto Galleria Alta delle Stalattiti	0	0	1	0
Laghetto Galleria Bassa delle Stalattiti	0	0	0	0
Torrente Vianello-Vidal	3	0	2	0
Torrente della Gronda	76	0	15	2
Laghetto del Venerdì	0	0	4	0
Cascata Risalita dei Lucchesi	0	0	-	0
Cascata Risalita dei Romani	1	0	-	0

Tab. 4.30 - 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.

Fig. 4.62 - Coltura di *Clostridium perfringens* riscontrati nelle acque del torrente Gronda (prelievo del 09/10/2010).



Nella **Tab. 4.31** è riportato lo stato microbiologico delle acque relative al prelievo del 20 agosto 2011 in una fase di magra dei vari corpi idrici (non si erano infatti registrate piogge da almeno 20 giorni). Si riscontra una situazione non diversa da quanto descritto in relazione alla precedente **Tab. 4.30**.

Si osservi l'elevato numero delle colonie a 22 e 37 °C nel torrente Vianello-Vidal e nella cascata della Risalita dei Romani, indice di una situazione di vulnerabilità tipica degli ambienti carsici, pur in assenza dell'*Escherichia coli*.

Denominazione campione	Colonie a 22 °C UFC/mL 22 °C	Colonie a 37 °C UFC/mL 37 °C	Batteri coliformi UFC/100mL	<i>Escherichia coli</i> UFC/100 mL	Enterococchi UFC/100mL	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> UFC/250mL	<i>Clostridium perfringens</i> UFC/100mL
Torrente della Gronda	25	0	1	0	19	0	0
Torrente Vianello-Vidal	300	300	3	0	1	0	0
Cascata Risalita dei Romani	300	140	0	0	0	0	1

Tab. 4.31- Andamento dei parametri microbiologici nelle acque dei principali corsi idrici connessi all'area del Complesso carsico destinata fruizione turistica. Prelievi del 20 agosto 2011.

I risultati analitici riportati nella **Tab. 4.32**, relativi all'ultimo campionamento microbiologico effettuato, durante un periodo di medie portate, confermano quanto rilevato negli anni precedenti e sembrano permettere una sintesi dello stato di questi copri

idrici: il perenne inquinamento delle Fontane di Cardoso, l'assenza di indici di inquinamento nei laghetti, la saltuaria presenza di indici di inquinamento nelle acque correnti.

Punti di prelievo	Coliformi totali MPN/100mL	Coliformi fecali MPN/100 mL	<i>Escherichia coli</i> MPN/100 mL	Enterococchi MPN/100 mL
Fontane di Cardoso	248	23	-	19
Laghetto del Venerdi	1	<1	19	<1
Lagh. Galleria Bassa delle Stalattiti	<1	<1	<1	<1
Lagh. Galleria Alta delle Stalattiti	2	<1	<1	<1
Torrente Gronda	26	<1	<1	3
Torrente Vianello-Vidal	52	9	<1	3

Tab. 4.32 - Valori dei parametri microbiologici nelle acque dei principali corsi idrici connessi al settore dell'Antro del Corchia destinato fruizione turistica. Prelievi del 13 ottobre 2016.

Valutazioni sulle caratteristiche di potabilità delle acque dell'Antro del Corchia

Il lavoro svolto sulle acque del Complesso carsico del monte Corchia ha riguardato prevalentemente l'Antro del Corchia, cioè il sistema di grotte dove è allestito il percorso che permette la fruizione turistica, oltre ad alcuni dintorni. Anche se sono riportate le analisi chimiche di differenti settori di tale sistema (Sistema Farolfi-Fighiera, Rami di Valinor, Buca d'Eolo), le analisi microbiologiche, decisive in relazione all'espressione di un giudizio di potabilità, riguardano nel loro insieme solo l'area sopra indicata, oggetto di controllo e monitoraggio per circa due decenni.

Un'acqua può definirsi potabile se risponde ai requisiti indicati dalla legislazione vigente in materia. Il decreto legislativo 2 febbraio 2001 n. 31 e s.m.i. costituisce il riferimento a cui attenersi per valutare la potabilità delle acque.

Valutazioni sulle caratteristiche chimiche delle acque

Per quanto riguarda gli aspetti chimici, le analisi condotte nel corso di circa un ventennio mostrano acque che hanno i requisiti che soddisfano i valori di riferimento indicati nella legislazione vigente, condizione necessaria ma non sufficiente per esprimere un giudizio di potabilità in assenza di valutazioni di tipo microbiologico.

Fanno eccezione alcune situazioni, comunque transitorie, seppur gravi, di inquinamento da marmettola che rendono ovviamente le acque non potabili. I fanghi derivanti dal taglio del marmo sul monte Corchia hanno più volte reso torbide le acque nel torrente Vianello-Vidal, uno dei corsi idrici ipogei più importanti del Complesso carsico del monte Corchia.

L'inquinamento da idrocarburi, derivante dall'attività estrattiva contigua, ha interessato principalmente la matrice aria e comunque trattasi di un inquinamento con scarsa permanenza nelle acque correnti ipogee dato il veloce trascinarsi di tali contaminanti all'esterno.

I parametri di tipo chimico e chimico-fisico indicati nel DL.vo 31/2001 e s.m.i., oggetto di analisi, sono stati prevalentemente quelli di composizione, in larga parte indicati nella Parametri indicatori dell'Allegato 1 del citato decreto.

Parametro	Valore di parametro	Unità di misura
Alluminio	200	µg/L
Ammonio	0,50	mg/L
Cloruro	250	mg/L
Clostridium perfringens (spore comprese)	0	Numero/100 mL
Colore	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale	
Conduttività	2500	µScm ⁻¹ a 20°C
Concentrazione ioni idrogeno	≥6,5 e ≤9,5	Unità pH
Ferro	200	µg/L
Manganese	50	µg/L
Odore	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale	
Ossidabilità	5,0	mg/L O ₂
Solfato	250	mg/L
Sodio	200	mg/L
Sapore	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale	
Conteggio delle colonie a 22 °C	Senza variazioni anomale	-
Batteri coliformi a 37 °C	0	Numero/100 mL
Carbonio organico totale (TOC)	Senza variazioni anomale	-
Torbidità	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale	
Durezza	Valori consigliati: 15-50 °F	°F
Residuo secco a 180°C	Valore massimo consigliato: 1500	mg/L
Disinfettante residuo	Valore consigliato 0,2 (se impiegato).	mg/L

Tab. 4.33 - Parametri indicatori indicati nella parte C dell'Allegato 1 del decreto 31/2001 (tabella semplificata in quanto non riportate le note aggiuntive).

Sono stati oggetto di analisi anche i parametri chimici riportati nella *Tab. 4.34*. Si tratta di sostanze contaminanti che possono essere di origine naturale o antropica.

Fra queste si sono escluse dal monitoraggio quelle che non hanno alcuna probabilità di essere presenti nelle acque sotterranee del monte Corchia (antiparassitari, clorito, acrilammide, bromato e altri); tuttavia, data la presenza dell'intensa attività estrattiva con scavi in progressiva profondità, e i conseguenti inquinamenti già determinatisi, sono stati saltuariamente analizzati: idrocarburi, composti clorurati organici (trielina e tricloroetilene), idrocarburi policiclici aromatici.

Particolare attenzione dovrebbe venire posta sui bifenili policlorurati (PCB), sostanze diffuse nell'ambiente esclusivamente per attività umane: non esistono fonti naturali di questi prodotti. Il principale uso dei PCB è stato nei sistemi chiusi come fluidi dielettrici in apparecchiature elettriche; le cause maggiori di contaminazione sono dovute a incidenti, smaltimenti inadeguati, scarichi non corretti. Essendo sostanze ad elevata tossicità e di lunghissima persistenza nell'ambiente, la loro produzione è cessata nel 1993. Purtroppo viaggiando attraverso aree estrattive dismesse nell'area apuana si è notato talvolta l'abbondanza di trasformatori contenenti queste pericolose sostanze, materiale che si presume che nessuno

abbia provveduto a rimuovere in modo adeguato (nonostante il problema fosse stato segnalato).

I PCB sono esclusi al momento fra i parametri di controllo stabiliti dalla normativa relativa alle acque potabili, questo non esclude la loro ricerca in situazioni di rischio. Tuttavia la non rivelabilità di queste sostanze in seguito ad analisi chimiche, non può garantire una situazione di sicurezza nel tempo: l'analisi costituisce una valutazione puntiforme in un sistema in continuo mutamento.

Per quanto riguarda il tallio, elemento che dal 2014 fino a tempi recenti ha determinato forti criticità in relazione all'approvvigionamento idrico nel territorio di Pietrasanta, questo è risultato presente in una sorgente captata a fini potabili (sorgente Molini di Sant'Anna, che ha alimentato gli acquedotti Pietrasanta e Valdicastello) che si presume avere connessioni con aree minerarie dismesse (area mineraria di Valdicastello). Anche in questo caso ssi ritiene che residui di lavorazioni minerarie ricche in numerosi metalli, tra cui il tallio, siano venuti in contatto con acque meteoriche e che fenomeni ossidativi sulle mineralizzazioni a solfuri abbiano reso molto mobile tale elemento.

Il tallio resta comunque un elemento che non può generare criticità nelle acque del Complesso carsico del monte Corchia in quanto struttura ben separata dalle formazioni dove sono localizzate aree minerarie. Analisi effettuate in relazione a

questo elemento indicato la non rivelabilità ai livelli della sensibilità della strumentazione analitica (Analisi del 7 maggio 2019, tallio < 0,5 µg/L; tecnica analitica ICP-MS).

In relazione all'uso potabile delle acque, il valore limite di concentrazione per il parametro tallio nelle acque potabili è pari a 2 µg/L, valore proposto dall'Istituto Superiore di Sanità e adottato come limite normativo (ai sensi dell'art. 11, comma 1(b) del DL.vo 31/2001, e s.m.i.) nel territorio dell'area apuana dove si è verificata questa grave criticità. L'uranio resta un elemento di interesse in alcune acque dell'Antro del Corchia date le significative concentrazioni riscontrate (acque dei laghetti delle Gallerie delle Stalattiti).

L'uranio è un elemento non previsto fra i parametri riportati nel DL.vo 31/2001 e s.m.i.

Tab. 4.34 - Parametri chimici e relativi valori limite indicati nella parte B dell'Allegato 1 del decreto 31/2001 (Tabella semplificate in quanto non riportate le note aggiuntive).

Parametro	Valore di parametro	Unità di misura
Acrilammide	0,10	µg/L
Antimonio	5,0	µg/L
Arsenico	10	µg/L
Benzene	1,0	µg/L
Benzo(a)pirene	0,010	µg/L
Boro	1,0	mg/L
Bromato	10	µg/L
Cadmio	5,0	µg/L
Cromo	50	µg/L
Cromo esavalente	10	µg/L
Rame	1,0	mg/L
Cianuro	50	µg/L
1.2 dicloroetano	3,0	µg/L
Epicloridrina	0,10	µg/L
Fluoruro	1,50	mg/L
Piombo	10	µg/L
Mercurio	1,0	µg/L
Nichel	20	µg/L
Nitrato (come NO3)	50	mg/L
Nitrito (come NO2)	0,50	mg/L
Antiparassitari	0,10	µg/L
Antiparassitari-Totale	0,50	µg/L
Idrocarburi policiclici aromatici	0,10	µg/L
Selenio	10	µg/L
Tetracloroetilene Tricloroetilene	10	µg/L
Triometani-Totale	30	µg/L
Cloruro di vinile	0,5	µg/L
Clorito	200	µg/L
Vanadio	50	µg/L

In relazione alla normativa europea, questo elemento è stato inserito nel testo della nuova Direttiva (UE) 2020/2184 del Parlamento europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2020. Il valore parametrico (valore limite) indicato è 30 µg/L, come suggerito dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2011). Il WHO aveva infatti indicato un provisional guideline value (valore indicativo provvisorio) di 30 µg/L; si tratta di un valore che diviene cogente quando recepito nelle normative di nazioni o di comunità di nazioni.

In Italia, a seguito dei monitoraggi relativi a tale elemento è emersa la presenza di uranio in un numero non trascurabile di siti di approvvigionamento idrico. Nel caso in cui la concentrazione risulti superiore o prossima a 30 µg/L, l'Istituto Superiore di Sanità ha chiesto ai vari enti gestori di acquedotti di intensificare le attività di monitoraggio e di attivarsi per individuare una misura correttiva (abbandono della captazione, abbattimento dell'uranio e/o diluizione con altra fonte di approvvigionamento).

Le analisi dei principali corpi idrici connessi all'area dell'Antro del Corchia in cui è installato il percorso turistico e ai dintorni, ripetute nel corso degli anni, (vedi Allegato 2), offrono un quadro da ritenersi abbastanza approfondito della composizione chimica di queste acque.

Nell'insieme le acque del Complesso carsico del monte Corchia, comprese quelle ad una certa

distanza dall'area turistica, sono inquadrabili come acque con bassa mineralizzazione, con composizione prevalentemente idrogenocarbonato calcica, in alcuni casi con presenza di solfati e magnesio.

In relazione alla possibile presenza delle sostanze contaminanti, oltre alla ricerca di idrocarburi e composti clorurati organici, si è posta attenzione sulle forme di azoto (ammoniaca, nitriti e nitrati), sui metalli (ferro, rame, piombo, ecc.) e su gli elementi di natura non metallica (arsenico, antimonio, selenio, ecc.). Le analisi condotte nel corso degli anni indicano una loro concentrazione ripetutamente molto inferiore ai relativi valori di parametro (da intendersi come valori limite) indicati nella parte B dell'Allegato 1 del DL.vo 31/2001 e s.m.i. (Tab. 4.34).

Valutazioni sulle caratteristiche microbiologiche delle acque

I controlli di tipo microbiologico nelle acque dell'Antro del Corchia e della principale sorgente mettono in evidenza un sistema molto vulnerabile: le acque sotterranee correnti sono assimilabili ad acque superficiali e come tali esposte a fenomeni di contaminazione in occasioni delle piogge che trasportano all'interno della grotta i microrganismi presenti sul suolo della montagna.

Le rocce del monte Corchia, in relazione alla loro natura calcarea e caratterizzate anche da esteso carsismo di superficie (numerosi fratture e fessure), a differenza della non lontana catena appenninica costituita da rocce marnose e arenacee, non possiedono alcuna capacità di filtrazione delle acque di scorrimento superficiale.

Le Fontane di Cardoso, 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 di Cardoso e dintorni dove è possibile che il sistema fognario non garantisca adeguata protezione delle acque sotterranee; comunque tali ipotesi dovrebbe venire verificata; inoltre, sulla base delle analisi effettuate nel corso degli anni, le acque circolanti all'interno del monte Corchia, almeno i principali collettori fino ad oggi monitorati (Torrente Gronda e torrente Vianello-

Vidal), non presentano mai gli elevati indici di inquinamento che si riscontrano nelle acque che scaturiscono dalle Fontane di Cardoso.

Per quanto riguarda i laghetti, si osserva costantemente assenza di indici di fecalizzazione (assenza di Streptococchi fecali e di *Escherichia coli*). Le acque di alimentazione dei laghetti derivano da stillicidi, cioè da acqua che, grazie ad un lungo percorso attraverso imponenti spessori di roccia, subisce una filtrazione, a differenza delle acque correnti che sono alimentate da acqua di pioggia che arriva rapidamente all'interno della montagna. Solo nel campione del laghetto della Galleria Bassa delle Stalattiti del 29 settembre 2004 è stato rilevato 1 coliforme totale; si può comunque considerare una situazione di non contaminazione essendo i coliformi totali indicatori connessi all'ambiente e non batteri indicatori di fecalizzazione.

Conclusioni

Sulla base delle analisi chimiche e microbiologiche condotte fino a tempi recenti, è possibile esprimere un giudizio di idoneità all'uso potabile solo per i piccoli laghi presenti lungo il tratto destinato a fruizione turistica entro l'Antro del Corchia, tale condizione non può essere acquisita una volta per tutte ma dovrebbe venire verificata almeno una volta all'anno (per gli aspetti microbiologici) soprattutto a causa del passaggio dei turisti nelle vicinanze di tali corpi idrici.

Per i valori dei parametri di tipo chimico si ritiene che non ci possano essere nel tempo modifiche tali da rendere l'acqua non potabile, se non in occasione di evidenti contaminazioni conseguenti all'attività estrattiva.

Fig. 4.63 - Campionamento finalizzato alle analisi microbiologiche nei pressi della cascata del torrente Vianello-Vidal mediante l'uso di bottiglie in vetro sterili (aprile 2002).



Nota: Si precisa che in alcune cartine il torrente Vianello-Vidal è indicato semplicemente come Vidal.



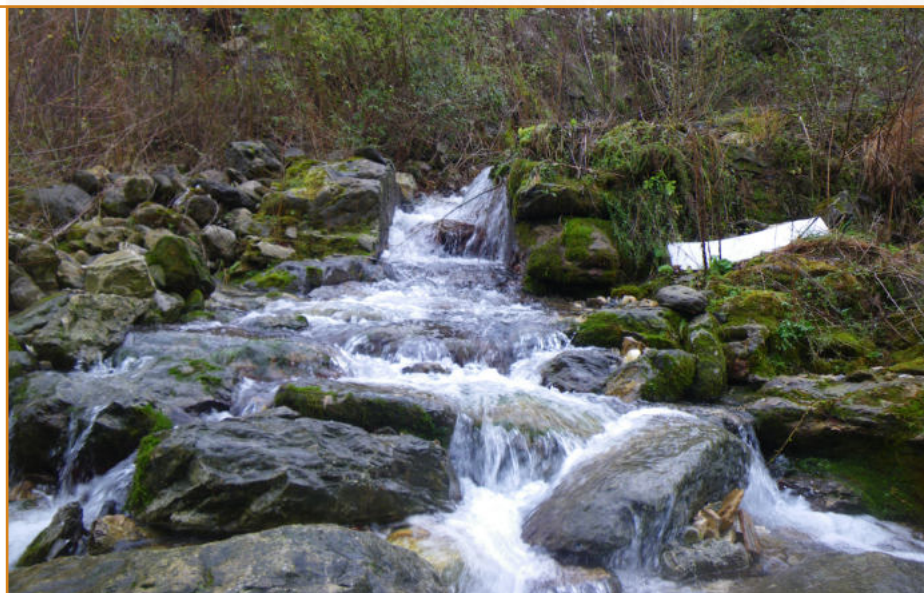
Tunnel di accesso al percorso attrezzato per consentire la fruizione turistica e scientifico-culturale di un piccolo settore del Complesso carsico del monte Corchia.

Idrologia del sistema carsico del monte Corchia

Il monte Corchia rappresenta la parte più settentrionale di una struttura idrogeologica relativamente isolata, circondata dalle rocce impermeabili del basamento. La sorgente principale alimentata da questo sistema si trova nella vallata di Cardoso ed è rappresentata da più emergenze tra loro vicine situate intorno a 175 m di quota, poco a monte del paese di Pontestazzemese (Fig. 5.1). La portata media complessiva è stimata intorno ai 180-200 L/s, ma le condizioni della sorgente non consentono di eseguire misure accurate, specie in

condizioni di portata medio-alta. Nella zona sono presenti altre sorgenti minori, che fanno parte della stessa struttura idrogeologica. Tra queste ricordiamo la sorgente Risvolta (190 m s.l.m.), poco a valle della omonima località lungo la strada che sale verso il passo del Cipollaio, e la Polla del Muglione (450 m s.l.m.), non lontano dall'abitato di Vologno. Le portate di queste due sorgenti non sono note con precisione. In base alle portate misurate in occasione di alcuni sopralluoghi si possono stimare medie di circa 25 L/s e 10 L/s rispettivamente.

Fig. 5.1 - Le Fontane (o Fontanacce) di Cardoso sono una sorgente multipla che sgorga in prossimità e parzialmente sotto alla strada che collega Pontestazzemese con le frazioni di Cardoso e Pruno.



Limitatamente al Complesso carsico del monte Corchia, cioè la parte del sistema nota grazie alle esplorazioni speleologiche, questo è interessato da una fitta rete di vie di percolazione e di ruscellamento concentrato, che si raccoglie in un unico collettore che può essere seguito dal settore nord-occidentale del complesso carsico (Retrocorchia), sino al fondo

della grotta, a quota 450 m s.l.m. Qui il torrente scompare tra grandi blocchi di crollo e prosegue per un percorso sconosciuto in direzione sud, verso la valle di Cardoso (*Fig.5.2*). Dal fondo del Corchia mancano ancora 2,7 km di percorso sino alle sorgenti delle Fontanacce e 275 m di dislivello.

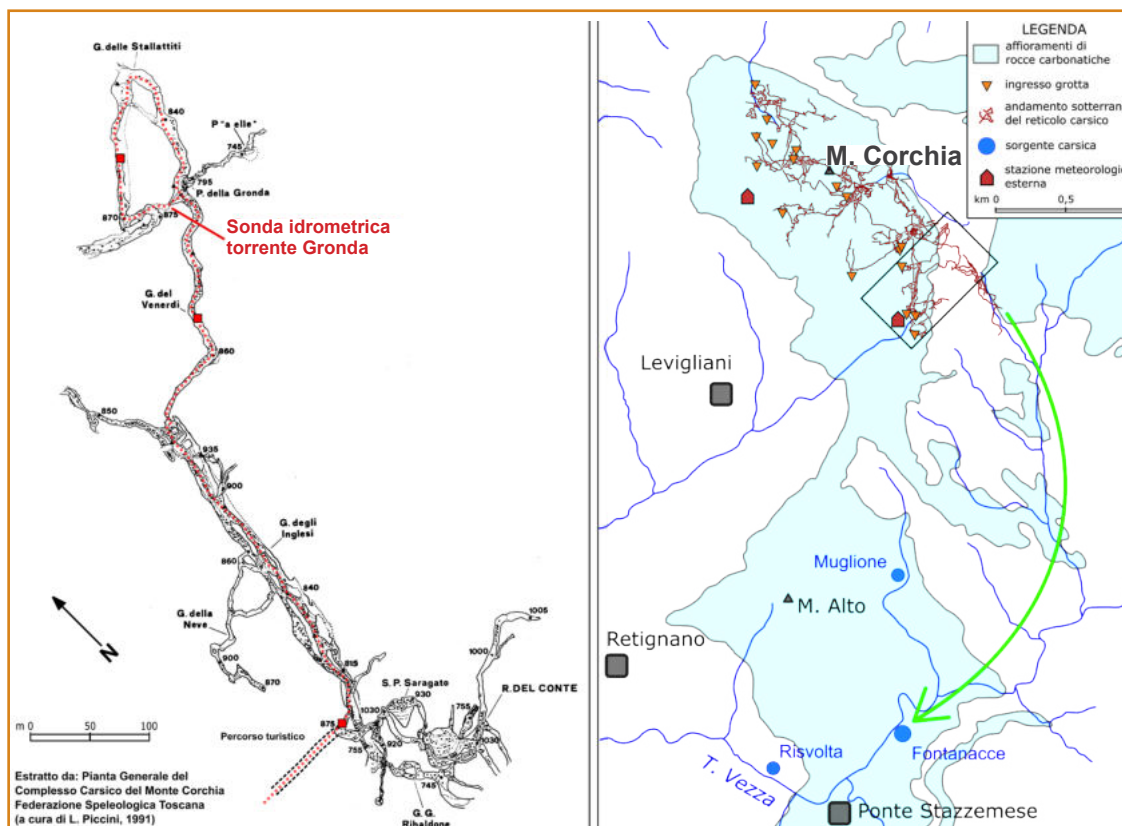


Fig. 5.2 – A sinistra: posizione della sonda idrometrica sul torrente Gronda. A destra: schema del sistema idro-carsico del Monte Corchia, con indicate le sorgenti di recapito della circolazione sotterranea; la freccia verde indica la connessione tra collettore principale e sorgente delle Fontanacce accertata con traccianti.

Nella parte alta del sistema questo collettore scorre prevalentemente a pelo libero ricevendo numerosi piccoli affluenti praticamente dal solo lato destro (idrografico). Nella parte media del percorso sono presenti tre grandi bacini con tratti anche sommersi, noti come Lago Nero, Lago Paola e Lagosifone (Fig. 5.3). Questo sistema di drenaggio interno è attivo tutto l'anno sin dalle zone più prossime alla superficie, il che suggerisce l'esistenza di uno stoccaggio idrico a livello dell'epicarso che probabilmente rappresenta la principale fonte di alimentazione del sistema durante la stagione secca. La portata media del collettore nella sua parte più profonda è stimata in circa 100 L/s, pari quindi al 50 % di quella delle sorgenti. Circa la metà dell'acqua emergente alle sorgenti proviene quindi da altri settori del sistema diversi da quello di stretta competenza del complesso carsico noto.

Nel corso delle campagne di monitoraggio eseguite da ARPAT è stata installata una sonda multi-parametrica (Fig. 5.4) su un affluente del collettore principale, di portata media intorno a qualche litro al secondo, in corrispondenza del percorso turistico e che si getta nel Pozzo della Gronda. Sul torrente è stato realizzato un piccolo bacino di raccolta e in esso è stata immersa una sonda dotata di sensori per la misura del livello idrico, temperatura, conducibilità elettrica, pH, ossigeno disciolto e torbidità.

La registrazione è andata avanti dal 23/01/2007 sino al 06/08/2010, pur con diverse interruzioni dovute a problemi tecnici.



Fig. 5.3 – Il collettore Vianello-Vidal poco a valle del Lago Nero in condizioni di portata elevata.



Si tratta di un periodo sufficiente a determinare alcune caratteristiche della rete di percolazione-ruscellamento che alimenta questo importante affluente, che comunque rappresenta non più del 5-10% della portata complessiva del collettore principale. A causa della conformazione del bacino in cui si trovava immersa la sonda, non è possibile ottenere una stima attendibile delle portate dalle misure di livello idrico e pertanto l'interpretazione può limitarsi solo ad un confronto qualitativo tra variazioni dei parametri chimico-fisici e livello idrico.

Fig. 5.4 – La sonda multiparametrica installata in via temporanea nel collettore sotterraneo Vianello-Vidal (nella foto) è stata poi spostata sul torrente che si getta nel Pozzo della Gronda presso il percorso turistico.

Idrodinamica del torrente Gronda

Il grafico di **Fig. 5.5** mostra la registrazione completa da fine 2008 sino ad aprile del 2009 dei valori di livello, temperatura e conducibilità elettrica. La temperatura mostra variazioni davvero minime, a indicare che le acque di scorrimento sono in equilibrio con la roccia e quindi non risentono delle temperature esterne. Livello idrico e conducibilità mostrano invece il tipico andamento in opposizione di fase dei flussi caratterizzati da uno scorrimento

veloce ed esclusivamente a pelo libero, come del resto è ovvio aspettarsi in un canale di scorrimento in piena zona vadosa. La caduta della conducibilità durante le piene è nettissima e la curva di decrescita, in mancanza di ulteriori eventi di pioggia, segue una regolare legge di tipo esponenziale, il che sembra indicare un sistema di alimentazione ben strutturato e gerarchizzato.

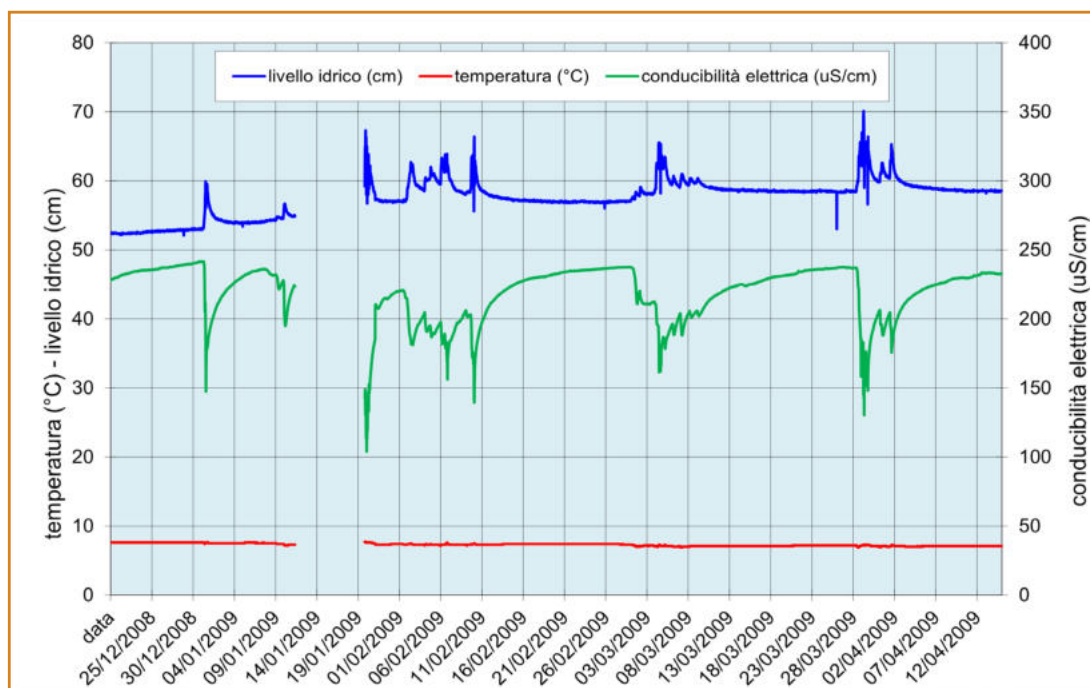


Fig. 5.5 – Andamento del livello idrico, temperatura e conducibilità elettrica misurati lungo il torrente Gronda, nei pressi del percorso turistico dell'Antro del Corchia, da dicembre 2008 ad aprile 2009.

Il grafico di **Fig. 5.6** mette invece in relazione il livello idrico e la torbidità con l'andamento delle piogge registrate al pluviometro della stazione meteorologica collocata all'ingresso turistico dell'Antro del Corchia. Come si può vedere, la risposta alle piogge è molto rapida, ad esclusione di alcuni eventi di precipitazione che, in considerazione del periodo di registrazione, dovevano essere in forma di neve e quindi non immediatamente disponibili per l'infiltrazione.

La torbidità si mantiene abbastanza bassa ad esclusione di eventi piovosi particolarmente intensi e duraturi. Ciò è dovuto alla natura carbonatica delle rocce con cui vengono in contatto le acque di scorrimento, che non rilasciano materiale fine idoneo al trasporto in sospensione, e alla scarsa presenza di suolo sulla superficie esterna.

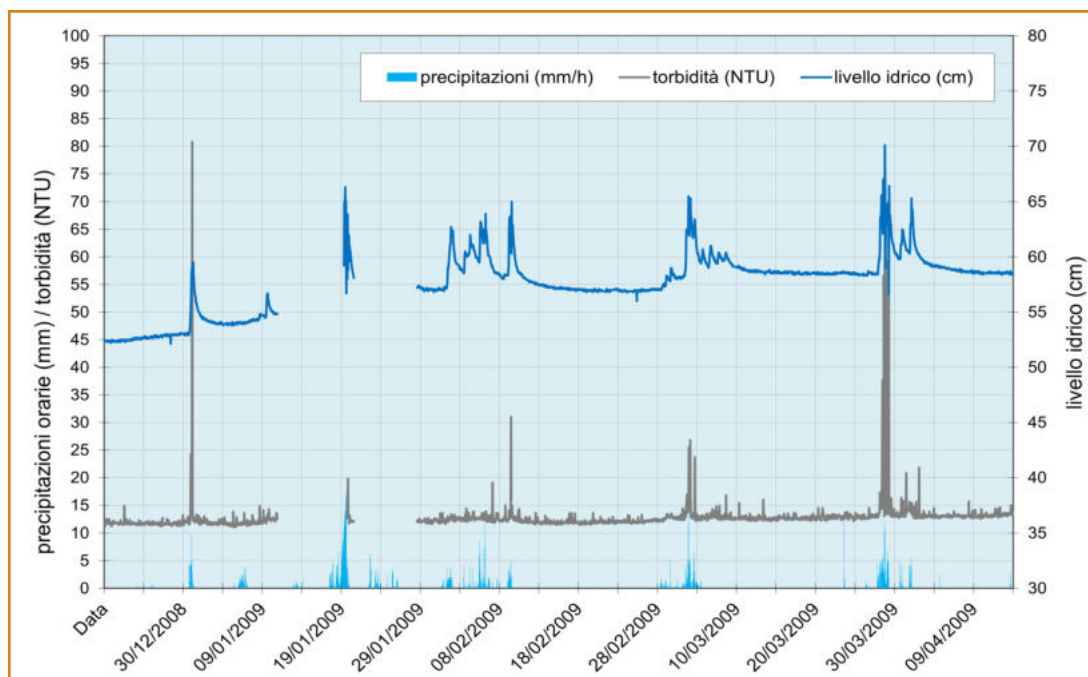


Fig. 5.6 – Andamento del livello idrico e torbidità misurati lungo il torrente Gronda, in rapporto alle precipitazioni misurate nella stazione di vetta, da dicembre 2008 ad aprile 2009.

Di particolare interesse risulta il grafico di *Fig. 5.7* che mostra il dettaglio di un evento di piena di fine marzo 2009. A questa scala è infatti possibile

vedere le variazioni di temperatura che, sebbene di lieve entità (0,3 °C di escursione), sono in stretta relazione con le variazioni di conducibilità.

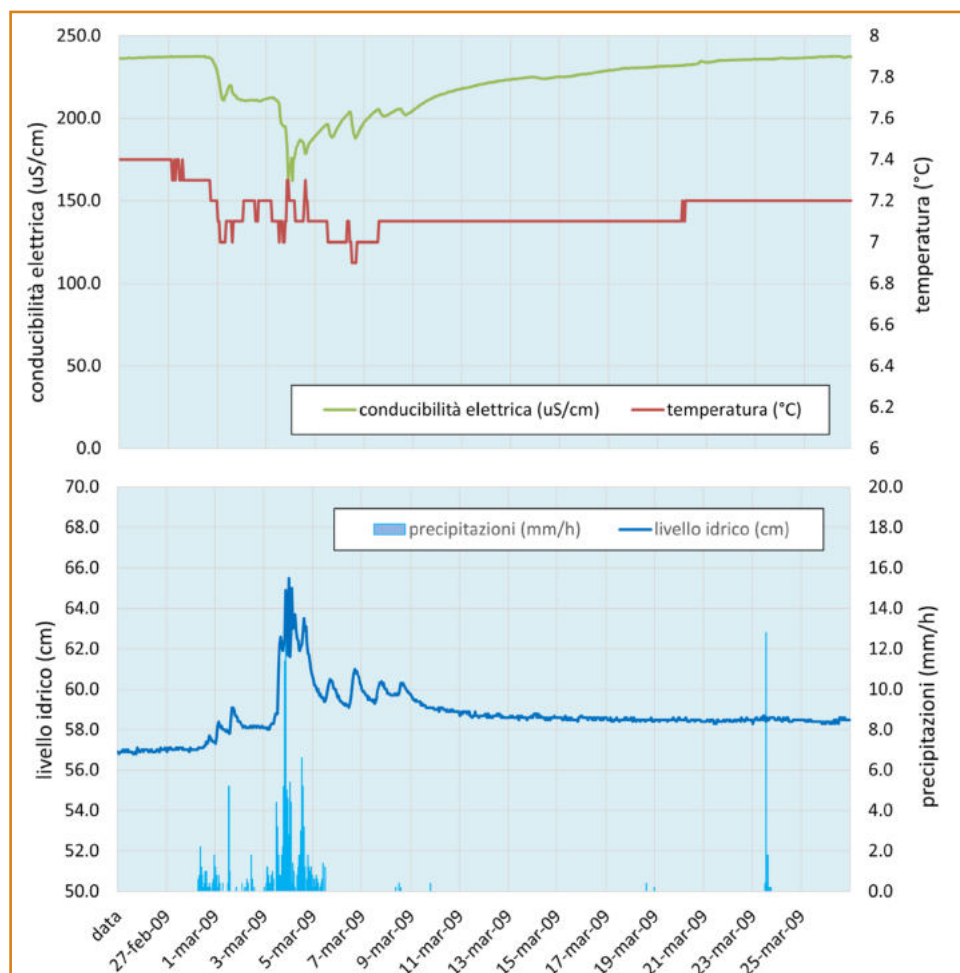


Fig. 5.7 – In alto: variazione della temperatura e della conducibilità elettrica registrate alla stazione lungo il torrente Gronda da fine febbraio a fine marzo 2009. In basso: andamento del livello idrico in rapporto alle precipitazioni misurate nella stazione sul versante sud-ovest del monte Corchia.

Nel dettaglio si osserva che il livello idrico presenta vari picchi secondari legati a singoli eventi di precipitazione, evidenziando quindi una elevata sensibilità del sistema di drenaggio sotterraneo alle precipitazioni. Il tempo di risposta varia in genere da 2 a 5 ore a seconda dell'entità delle precipitazioni e delle condizioni di saturazione del terreno. Se la pioggia segue a un lungo periodo secco, serve ovviamente più tempo prima che ad essa segua una effettiva infiltrazione in grado di alimentare la rete sotterranea di fessure e condotti carsici. Interessante notare i quattro picchi secondari che seguono il gruppo principale a partire dal 6 marzo e che non risultano associati a precipitazioni.

Se consideriamo la regolarità di questi tre lievi picchi distanziati di circa 24 ore, e il fatto che indicano un aumento della portata a partire dalle ore pomeridiane, è probabile che si tratti di aumenti di portata legati alla fusione del manto nevoso, che a marzo è generalmente ancora presente nelle zone alte del Corchia del versante settentrionale da dove viene almeno in parte l'acqua del torrente Gronda. Manto nevoso che evidentemente, data la stagione, si esaurisce quasi completamente nell'arco di quattro giorni. A riprova di ciò c'è il fatto che anche alla stazione meteorologica situata presso l'ingresso turistico in quei giorni non si registrano piogge (Fig. 5.8).

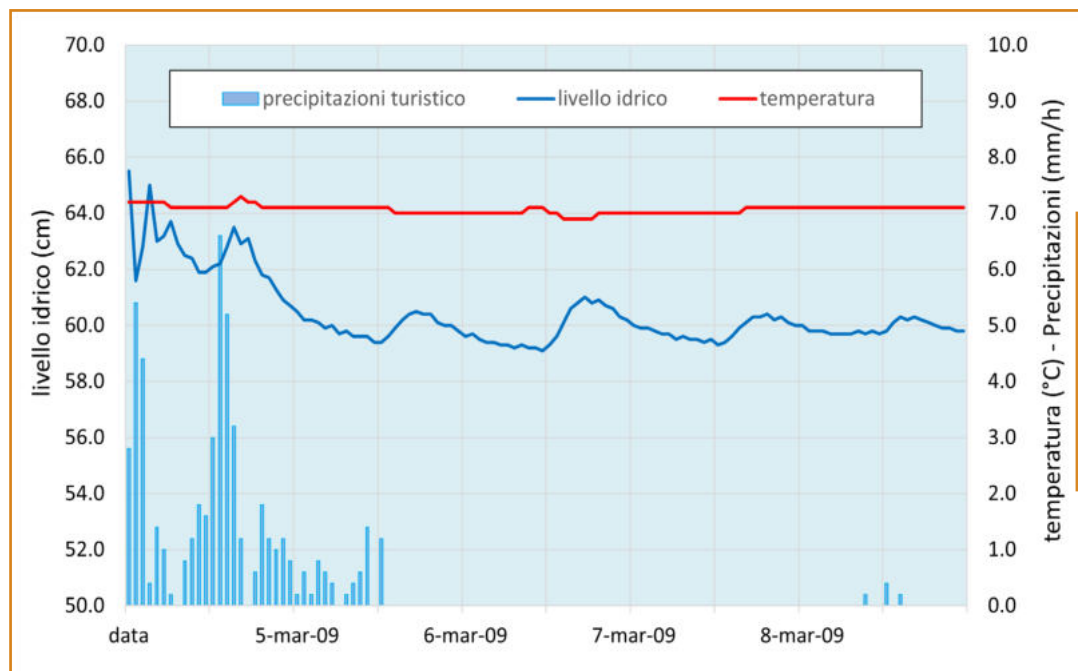


Fig. 5.8 - Andamento del livello idrico e della temperatura registrate alla stazione lungo il torrente Gronda da 5 al 9 marzo 2009, in rapporto alle precipitazioni misurate nella stazione presso l'ingresso turistico.

Considerazioni conclusive

Tra tutti i sistemi idrogeologici delle Apuane, il monte Corchia è sicuramente quello dai confini meglio delineati e meglio conosciuto, per quanto riguarda la rete di drenaggio sotterranea. Si tratta anche dell'unico sistema carsico apuano del quale esiste un monitoraggio, per quanto limitato nel tempo e discontinuo, del flusso sotterraneo. I dati presentati permettono di delineare solo alcune delle caratteristiche idrodinamiche del sistema carsico del monte Corchia e non del suo collettore principale. Nel complesso si può dire che il torrente sotterraneo monitorato mostra una rapida risposta agli eventi infiltrativi ed è caratterizzato da un flusso a pelo libero.

Da aprile 2018 è in funzione una nuova stazione di monitoraggio dei principali parametri idro-fisici (portata, temperatura, conducibilità elettrica e torbidità), posizionata sul collettore principale Vianello-Vidal poco a valle del Lago Nero. L'analisi di questi dati, ancora in corso, potrà sicuramente fornire precise indicazioni sulla dinamica del settore medio-alto di questo sistema carsico.

Fig. 5.9 - Dintorni del lago Nero.





Concrezioni dell'Antro del Corchia.

Inquinamento da idrocarburi di un settore dell'Antro del Corchia (2010)

Nel corso dell'attività di monitoraggio svolta dal Gruppo Operativo di monitoraggio ARPAT, iniziata nel 1997, alcuni speleologi che stavano frequentando settori di grotta limitrofi a quello dedicato alla fruizione turistica, avevano segnalato più volte presenza di odore di idrocarburi.

Spesso le segnalazioni si riferivano ad un'area che viene comunemente identificata come Sala delle Sabbie, un tratto di galleria non lontano dal percorso turistico: questa zona è localizzata ad alcune centinaia di metri di distanza dalla cascata della Risalita dei Romani in direzione del torrente Vianello-Vidal. Quel tratto di galleria è stato così chiamato per la presenza di estesi depositi di sabbia di colorazione biancastra.

Il 20 aprile 2002 gli stessi componenti del Gruppo Operativo di monitoraggio ARPAT, con altro personale di supporto dell'Agenzia, avevano avvertito un odore che fu riconosciuto, di comune accordo, come odore di gasolio.

Ritenendo che il veicolo di trasporto della contaminazione da idrocarburi fosse l'acqua del torrente Vianello-Vidal, pochi giorni dopo furono posizionati dei campionatori (trappole con carbone attivo) direttamente nell'acqua lungo questo fiume.

Per confronto, campionatori analoghi erano stati installati lungo il torrente Gronda.

Nel tentativo di identificare la presenza del contaminante nell'aria, furono anche sistemati dei campionatori passivi (Fig. 6.1) in alcuni punti del percorso: Sala delle Sabbie, cascata del torrente Vianello-Vidal, cascata della Gronda (Fig. 6.2). Le campagne di misura furono ripetute più volte, dal maggio 2002 fino all'ottobre 2004.

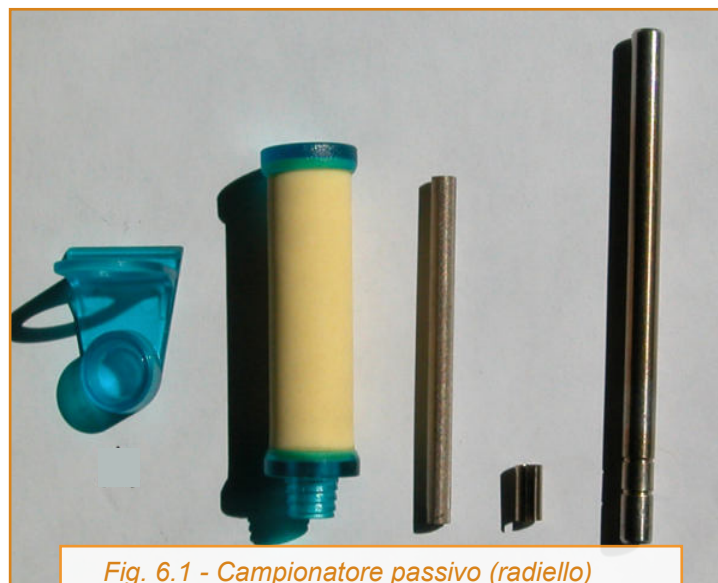


Fig. 6.1 - Campionatore passivo (radiello) installato nella zona del fiume Vida (Antro del Corchia) utilizzato per verificare la presenza di idrocarburi nell'aria.

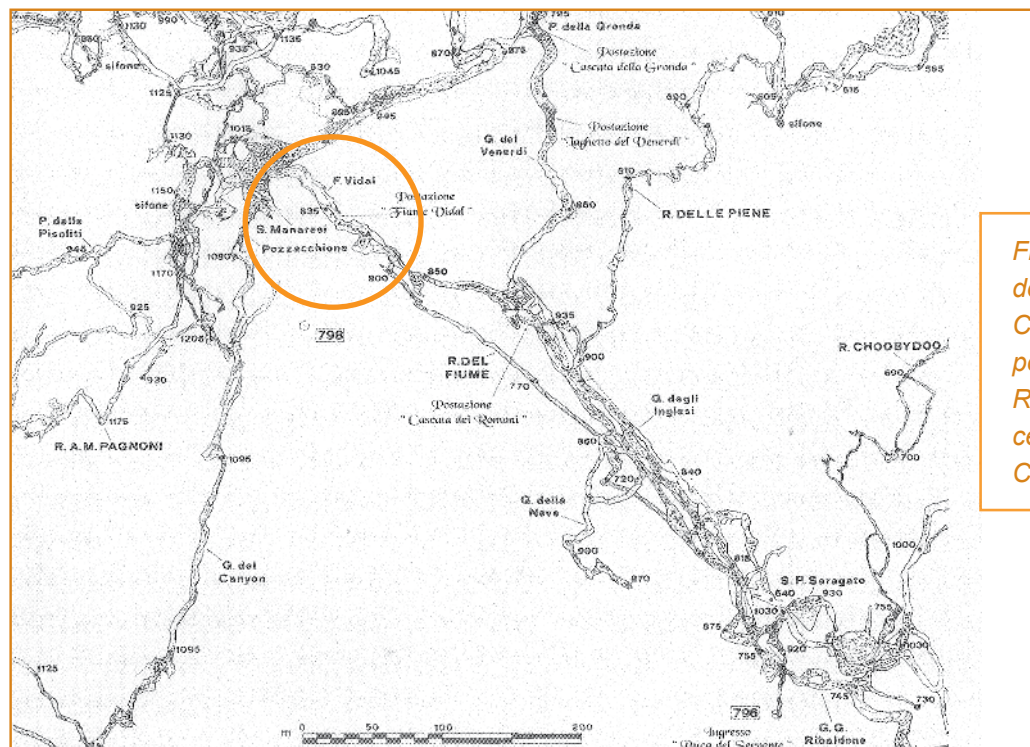


Fig. 6.2 - Cartografia di una parte del Complesso carsico Antro del Corchia in cui sono riportate le postazioni Vidal e Cascata dei Romani. E' messa in evidenza nel cerchio la zona Sala delle Sabbie – Cascata del torrente Vianello-Vidal.

Fra i campionatori posti nelle acque non fu riscontrato alcun risultato degno di nota, nei campionatori posti in aria, fu riscontrato (una sola volta) possibile presenza di sostanze idrocarburiche in un campionario. Questo era localizzato nella Sala delle Sabbie, nei pressi della Galleria che conduce alla cascata del torrente Vianello-Vidal; installato il 23 marzo 2004 e ritirato il 9 giugno 2004, presso la cascata della Gronda e presso la cascata del torrente Vianello-Vidal, sulla base di analisi gascromatografica con rivelazione in fiamma aveva rivelato infatti presenza di benzene, toluene e xilene (orto, meta e para) (Fig. 6.3).

Nella successiva campagna di misurazione, i campionatori passivi posizionati il 23 marzo 2004 e ritirati il 9 giugno 2004, presso la cascata della Gronda e presso la cascata del Vidal, sulla base di analisi in gascromatografia, non rivelarono presenza di composti di natura idrocarburica, né altre sostanze.

In sintesi, nel corso di 2 anni di monitoraggio, 2002-2004, una sola volta è stata rilevata presenza di sostanze idrocarburiche; in considerazioni delle modalità e dei tempi di campionamento non c'è stata la possibilità di fare una stima del quantitativo in aria di queste sostanze, né di approfondire le possibili cause di tale presenza.

In seguito furono ricevute altre segnalazioni relative alla presenza di odori in Corchia: una del 2 ottobre 2005, ancora odore ritenuto di gasolio nella solita zona del torrente Vianello-Vidal (1), l'altra il 7 marzo 2006 quando l'allora gruppo di monitoraggio ARPAT rilevò forte odore di gasolio sempre nella stessa zona della Sala delle Sabbie - Cascata del torrente Vianello-Vidal.

Pochi giorni dopo questo episodio fu nuovamente preparato un campionatore a carbone attivo, collocato direttamente nell'acqua lungo il torrente Vianello-Vidal, a monte della cascata, mentre furono sistemati sulla volta della galleria 2 campionatori passivi per valutare la presenza di eventuali sostanze presenti nell'aria.

Dai vari campioni prelevati non vennero riscontrati segnali analitici degni di nota.

La mancata individuazione di sostanze raccolte mediante campionamento in aria e in acqua è facilmente spiegabile con il fatto che gli eventi di dispersione di sostanze gassose nei due mezzi (aria e acqua), sulla base della nostra esperienza, sono abbastanza sporadici nel tempo: passato l'evento, può continuare a fluire acqua del tutto pulita fino a quando l'evento non si presenta di nuovo.

E' pertanto molto difficile intercettare la fase di passaggio dell'acqua contaminata, stimabile comunque nell'ordine di poche ore.

Per quanto riguarda l'aria, il "lavaggio" prodotto dall'elevata ventilazione che caratterizza gran parte del sistema carsico rimuove rapidamente eventuali sacche di sostanze diffuse nell'aria.

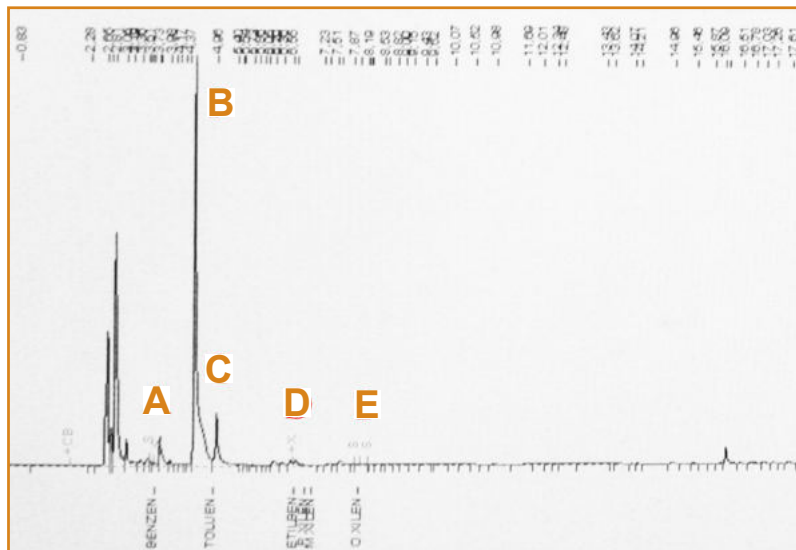


Fig. 6.3 - Cromatogramma in cui è evidenziata presenza di idrocarburi aromatici nell'aria della Sala delle Sabbie (Anno 2004).
A benzene; B standard; C toluene;
D etilbenzene, meta e para-xilene; E o-xilene.

(1) Segnalazione del 2 ottobre 2005, ricevuta da Maurizio Lazzoni, guida del Parco Apuane, specializzato in speleologica:
"Ciao Francesco [rif. Francesco Mantelli], ti scrivo, seppure in ritardo, per portare a tua conoscenza (se utile) che in data 2 ottobre 2005, in occasione di una visita con clienti al ramo del fiume in Corchia (--- fiume Vidal---), il fiume era in piena, con una discreta portata (non si riusciva ad attraversarlo!). Nell'aria c'era un forte odore di idrocarburi, avvertibile già nel salone, tale da far esclamare ad un partecipante "ma questo cos'è, gasolio?". Penso di avere fatto cosa utile a comunicarlo".

Solo un episodio di particolare intensità e con tempi di permanenza dell'ordine dei giorni avrebbe avuto la possibilità di essere registrato. Tale episodio si verificò il 1 agosto 2010 quando fu segnalata da vari speleologi e dai turisti in visita all'Antro del Corchia la presenza di un odore, ritenuto di idrocarburi, in un settore del ramo turistico. L'odore, avvertito in modo molto intenso, era stato univocamente definito "odore di gasolio" da molte persone che si trovavano presenti quel giorno in quell'area.

Questo fenomeno si era verificato in seguito all'intenso evento di pioggia del 29 luglio: i dati pluviometrici della stazione meteorologica posta all'ingresso turistico del Corchia indicarono 177 mm

di pioggia nella giornata del 29 luglio, concentrata tra le 7 e le 15 quando risultavano caduti 122 mm. Il gruppo di monitoraggio ARPAT, dopo avere preso contatto con il dipartimento di Lucca, svolse un primo intervento con sopralluogo e campionamenti il 3 agosto. Quello stesso mattino, intorno alle ore 9:40, con tutte le porte aperte dell'ingresso turistico, con un flusso di aria in uscita molto forte, l'odore di gasolio era chiaramente avvertibile fino sul piazzale antistante l'ingresso (*Fig. 6.4*). Le visite al settore turistico del Corchia erano state intanto sospese per iniziativa dei gestori.



Fig. 6.4 - Galleria artificiale di accesso al ramo turistico dell'Antro del Corchia; il giorno 3 agosto 2010 tutte e tre le porte della galleria erano aperte per favorire il ricambio di aria nell'area contaminata da vapori ritenuti di gasolio.

Sulla base delle passate esperienze e della marcata traccia odorosa, si individuò rapidamente la provenienza dell'odore: al bivio presso la cascata della Risalita dei Romani, il gruppo di intervento non avvertì nel proseguo del ramo turistico odore di gasolio e pertanto si diresse verso la zona del torrente Vianello-Vidal. In quel settore l'odore sempre molto forte era avvertibile nella zona della Sala delle Sabbie dove le sabbie stesse apparivano recentemente lisce e rimaneggiate dalla tracimazione del vicino torrente Vianello-Vidal avvenuta, presumibilmente, in seguito all'evento di pioggia del 29 luglio.

L'ipotesi formulata sul momento fu quella di ritenere che, durante la fase di piena del fiume, il liquido contaminante sia stato trascinato dall'acqua e confluito nel torrente Vianello-Vidal, ma che per la grande portata del fiume nei giorni precedenti ed in quello stesso giorno, non si sarebbe trovata presenza di idrocarburi in quelle acque correnti. Invece le pozze presenti nella Sala delle Sabbie avrebbero potuto costituire una "trappola naturale" per conservare tracce di idrocarburi. Si presumeva che le acque del torrente in piena (Fig. 6.5), che furono conseguenti all'intensa precipitazione (probabilmente diversi m³/sec), potevano avere trascinato il liquido contaminante anche in aree normalmente non soggette al passaggio delle acque e lì avrebbe potuto permanere fino ad un



Fig. 6.5 - Una fase di piena del torrente Vianello-Vidal; in situazioni di piene molto più intense l'acqua arriva quasi alla volta della galleria.

evento successivo e in parte diffondersi lentamente nell'atmosfera del sistema carsico.

All'ispezione visiva non era presente nessun alone riconducibile ad idrocarburi sulla superficie dell'acqua delle pozze, né era avvertibile l'odore sul pelo dell'acqua stagnante, mentre l'acqua appariva molto torbida, segno evidente del recente evento di piena.

Si procedette, quindi, al campionamento di sedimenti (per lo più sabbia molto fine) in alcune zone della Sala delle Sabbie e lungo il torrente Vianello-Vidal (in zone laterali occasionalmente bagnate) ipotizzando la capacità di questo materiale

di trattenere eventuale traccia di idrocarburi (Fig. 6.6).

Si effettuò anche il campionamento delle acque stagnanti nelle pozze e dell'acqua corrente del torrente Vianello-Vidal.

Analisi chimiche dei parametri di composizione dell'acqua, avevano dimostrato che la pozza entro la strettoia che conduce alla cascata del torrente Vianello-Vidal viene alimentata dalla tracimazione dello stesso fiume nei momenti di piena: si osserva infatti la similitudine di composizione fra le acque della pozza e del torrente. Si era quindi risalito il fiume fino alla zona della Fangaia-lago Nero

Fig. 6.6 - Campionamento di sedimento depositato dal torrente Vianello-Vidal nella Sala delle Sabbie (3 agosto 2010).





Fig. 6.7 - Allestimento del sistema di campionamento dell'aria mediante fiala con carbone attivo e pompa volumetrica (4 agosto 2010) alla sommità della Galleria Franosa (Ramo turistico del complesso carsico Antro del Corchia).

avvertendo sempre odore di gasolio.

Successivamente fu percorso completamente il rimanente ramo turistico dove non fu avvertito alcun odore: pochi metri dopo la cascata della Risalita dei Romani, in direzione dell'interno della grotta, l'odore era cessato immediatamente e pertanto tutto il tratto che comprende la Galleria del Venerdì, la sommità del pozzo della Gronda e la Galleria delle Stalattiti, non era stato interessato da circolazione di aria contenente sostanze idrocarburiche.

Durante la stessa giornata del 3 agosto furono effettuati campioni di acqua del laghetto della Galleria Alta delle Stalattiti e del torrente della Gronda. Pur ritenendo completamente estraneo

questo settore della grotta all'evento di diffusione degli odori, i campioni avrebbero avuto lo scopo di disporre dei "bianchi" di riferimento ipotizzando la necessità di determinare quantità di idrocarburi estremamente piccole nelle acque della zona interessata dagli odori (zona Sala delle Sabbie - torrente Vianello-Vidal).

Il giorno 4 agosto alle ore 21:30 furono trasportate due pompe volumetriche all'interno della parte turistica del Corchia. Una pompa fu posizionata sulla piattaforma accanto alla centralina ARPAT, alla sommità della Galleria Franosa, mentre l'altra fu sistemata presso la cascata della Risalita dei Romani, qualche metro fuori dal percorso turistico

verso il ramo che conduce al torrente Vianello-Vidal. Le pompe, collegate all'impianto elettrico della grotta permisero il prelievo dell'aria ambiente con portata di 1 litro/minuto; la sostanza adsorbente degli idrocarburi presenti nell'aria era carbone attivo (*Fig. 6.7*).

Queste attrezzature, comunemente impiegate per campionare sostanze idrocarburiche nell'aria, sono state posizionate solo sul percorso turistico perché necessitavano dell'alimentazione elettrica per funzionare. Trascorsa la notte in grotta per verificare al mattino il buon andamento del campionamento (problemi di blocco ad una pompa in seguito ad interruzione dell'elettricità per una nuova ondata di maltempo già da giorni prevista), gli operatori erano usciti intorno alle 9:00 all'inizio della prima manifestazione di intenso maltempo che faceva registrare alla stazione meteorologica, all'ingresso dell'antro, 129 mm di pioggia nella giornata del 5 agosto di cui 79 mm caduti tra le ore 7:00 e le ore 10:00 e 26 mm caduti tra le 17:00 e le 18:00.

Il giorno 6 agosto fu effettuato un sopralluogo per verificare lo stato delle pompe: quella posizionata presso la cascata della Risalita dei Romani si era di nuovo fermata a causa dell'interruzione dell'energia elettrica e fu quindi riattivata. Al di là di questi inconvenienti, le pompe avevano poi lavorato ininterrottamente fino al giorno in cui furono rimosse (12 agosto) e i campioni raccolti portati in laboratorio.

Il percorso turistico dell'Antro del Corchia fu regolarmente riaperto al pubblico alcuni giorni dopo l'evento, mentre l'odore di gasolio rimase avvertibile a livello molto modesto nella zona della cascata dei Romani. Nella sala delle Sabbie e presso il torrente Vianello-Vidal l'odore non era più percepibile.

Risultati analitici e valutazioni

Furono i campioni prelevati in aria quelli che più chiaramente dimostrarono la presenza di sostanze idrocarburiche nell'ambiente ipogeo.

Campioni di aria

Rapporto di analisi 85/2010 - Campione di aeriforme per la determinazione di composti organici volatili - postazione Galleria Franosa – periodo di campionamento 4-12 agosto 2010.

Rapporto di analisi 86/2010 - Campione di aeriforme per la determinazione di composti organici volatili - postazione zona cascata dei Romani – periodo di campionamento 4-12 agosto 2010

I risultati analitici indicano presenza di sostanze di natura idrocarburica; valore medio 15 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ nella zona cascata della Risalita dei Romani e valore medio 55 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ postazione Galleria Franosa. I risultati sono espressi in n-esano. Questi valori indicano presenza misurabile di sostanze organiche nell'aria, campionate comunque in una fase di evidente diminuzione; già il primo giorno di inizio prelievo di aria (notte del 4 agosto), a livello organolettico l'odore di gasolio era fortemente

diminuito rispetto al giorno precedente.

Nelle **Fig. 6.8, 6.9 e 6.10** sono riportati i tracciati analitici delle determinazioni eseguite sull'aria campionata dal 4 al 12 agosto, nelle postazioni Galleria Franosa e zona cascata della Risalita dei Romani.

L'analisi in gascromatografia con rivelazione in massa (GC-MS) mostra la presenza di idrocarburi riconducibili almeno in gran parte a quelli costituenti il gasolio.

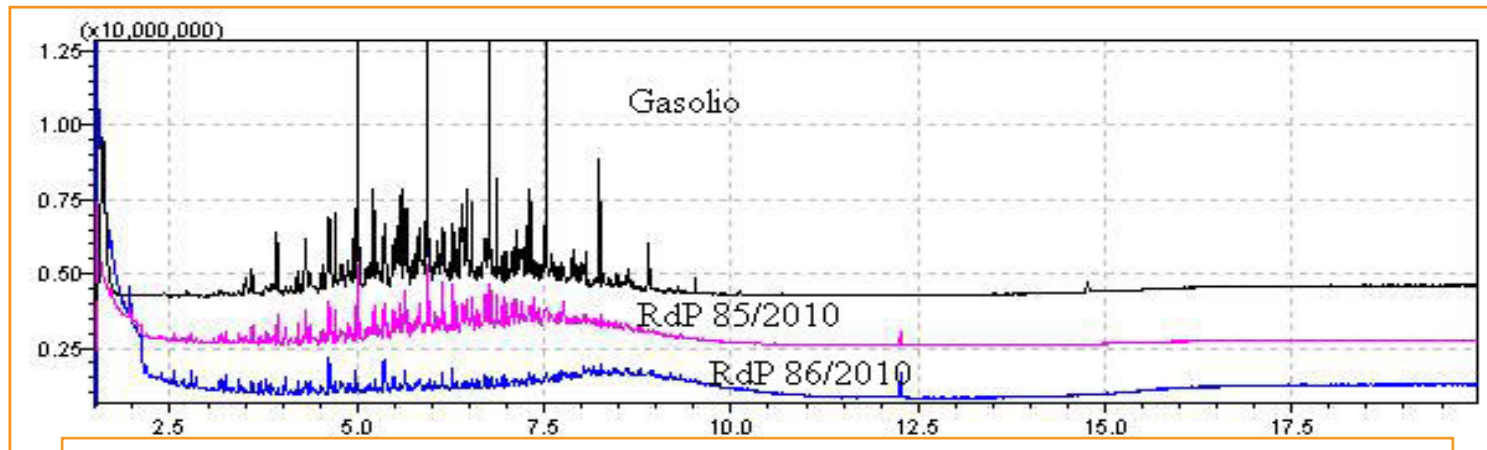


Fig. 6.8 - Tracciato in gascromatografia con rivelazione in massa (TIC – Total ion chromatography) dei due campioni relativi ai rapporti di analisi 85/2010 e 86/2010. E' riportato per confronto uno standard di vapori di gasolio.

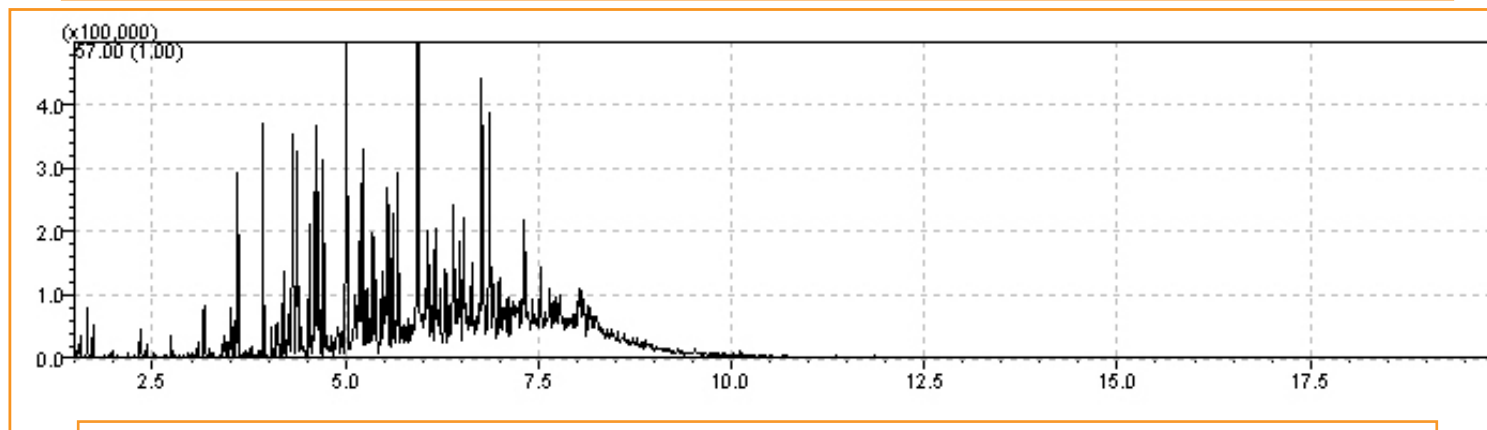


Fig. 6.9 - Selezione dello ione 57 relativo agli idrocarburi lineari del campione di aria prelevato alla sommità della Galleria Franosa (Gascromatografia con rivelazione in massa).

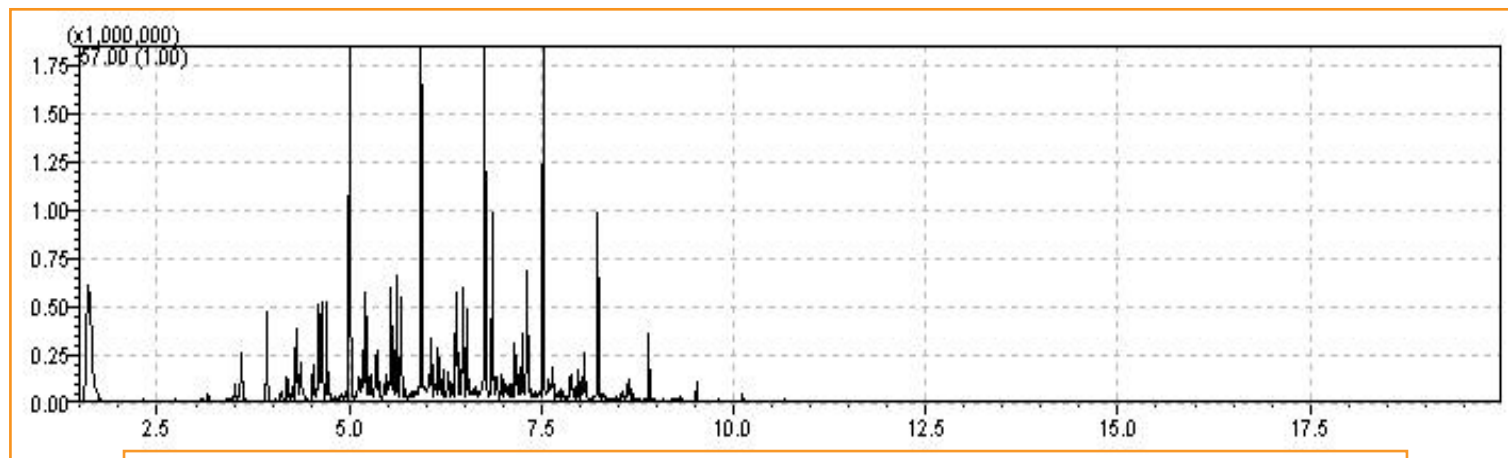


Fig. 6.10 - Selezione dello ione 57 relativo agli idrocarburi lineari di un campione di vapori di gasolio impiegato come sostanza di riferimento (Gascromatografia con rivelazione in massa). Si osservi la similitudine con il tracciato riportato nella figura 6.9.

Campioni di acque

Le analisi condotte sulle acque correnti nello stesso torrente Vianello-Vidal e anche in altre acque fuori da tale area non avevano mostrato presenza di idrocarburi neppure in tracce.

Di interesse analitico erano risultate le acque delle pozze stagnanti nei pressi del torrente Vianello-Vidal dove si pensò che fosse arrivata acqua di tracimazione durante gli eventi di piena che, presumibilmente, avevano trascinato il contaminante. In questo caso l'analisi in Purge & Trap GC-MS aveva evidenziato segnali, seppur inferiori ai limiti, di quantificazione del metodo, i cui tempi di ritenzione erano compatibili con

quelli di segnali idrocarburi aromatici (1,3,5 trimetilbenzene; 1,2,4 trimetilbenzene). Si precisa che si trattava comunque di concentrazioni molto basse, dell'ordine dei nanogrammi/litro.

Questi risultati non avevano consentito di esprimere un parere in relazione ad un possibile inquinamento da idrocarburi di queste acque, tuttavia si era riscontrata una reale differenza fra il tracciato analitico completamente privo di segnali relativo all'acqua corrente del torrente Vianello-Vidal e il tracciato relativi all'acqua delle pozze.

Le differenze fra i due campioni sono facilmente osservabili mettendo a confronto i tracciati analitici riportati nelle due seguenti figure (*Fig. 6.11 e 6.12*).

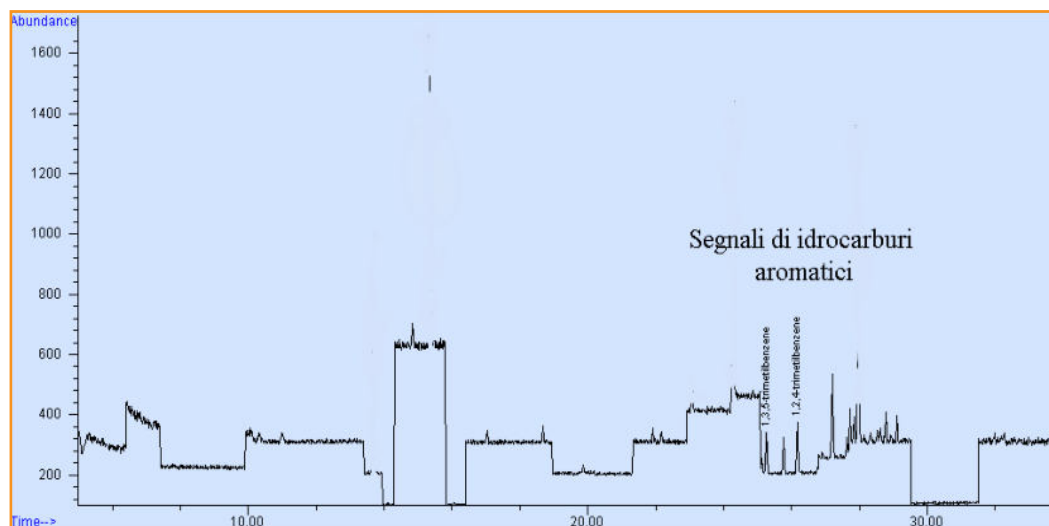


Fig. 6.11 - Tracciato in Purge & Trap GC-MS del campione n. 1 del 03/8/2010 (pozza stagnante davanti strettoia per cascata del torrente Vianello-Vidal - Sala delle Sabbie). Sono evidenziati segnali, tuttavia relativi a concentrazioni molto basse, di idrocarburi aromatici (1, 3, 5 trimetilbenzene; 1, 2, 4 trimetilbenzene).

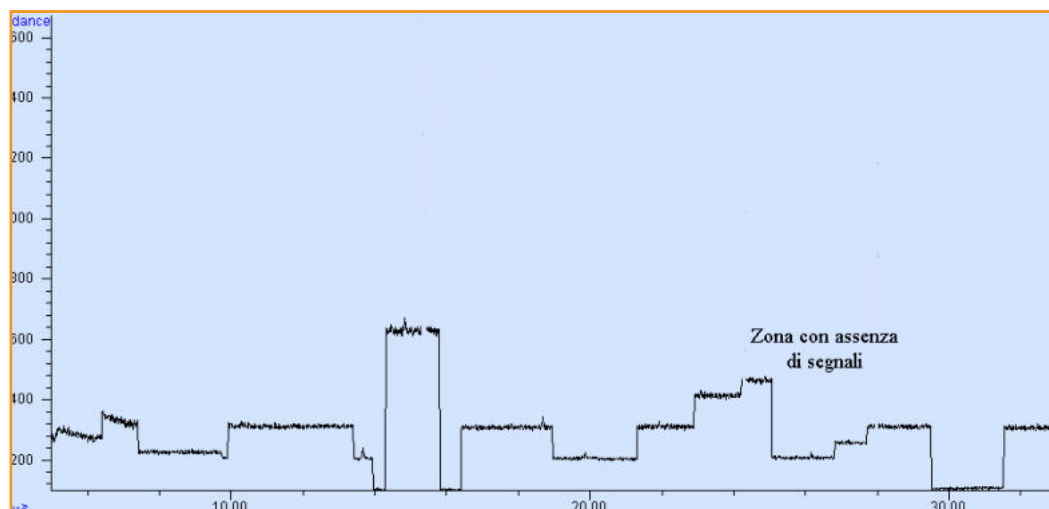


Fig. 6.12 - Tracciato in Purge & Trap GC-MS, campione del 03/8/2010 (torrente Vianello-Vidal). Si confronti questa figura con la 6.11: questo cromatogramma non mostra alcuna presenza di segnali.

Campioni di sedimenti

I rapporti di analisi riportavano la seguente nota: *“L’analisi in GC-FID evidenzia segnali compatibili alla presenza di idrocarburi in concentrazione inferiore al LOQ – Il metodo di campionamento non permette la determinazione degli idrocarburi volatili”*.

Questo stava a significare la presenza di segnali nel tracciato analitico, tuttavia la presenza di sostanze organiche di natura idrocarburica non era quantificabile né confermabile qualitativamente con ragionevole certezza in questi sedimenti; inoltre la tipologia stessa del sedimento (scarsa presenza di materiale molto fine e di sostanza organica) non aveva favorito il legame con eventuali sostanze idrocarburiche cedibili dall’acqua.

Conclusioni

Dal primo episodio di diffusione di sostanze ritenute di natura idrocarburica nell’aria del Complesso carsico del monte Corchia, riconducibile al 2002, episodio rilevato solo attraverso valutazioni di natura organolettica, comunque documentato da una relazione da parte dell’allora Gruppo Operativo di monitoraggio ARPAT, e dopo altri episodi simili, seguiti anche da interventi di campionamento e misura, per la prima volta, in seguito all’evento del 2010, si ottennero dati analitici che avevano dimostrato la presenza dei contaminanti, principalmente nell’aria, e stabilita la loro tipologia.

L’episodio che aveva scatenato l’evento registrato, era avvenuto probabilmente il 29 luglio 2010 in seguito alle forti piogge di quel giorno.

L’evento fu segnalato il 1 agosto ai dipartimenti ARPAT di Massa e di Lucca e alle autorità del Parco Apuane. Questo episodio, che ha prodotto una diffusione di odore molto intensa, tanto che c’è stata sospensione delle visite turistiche per un certo tempo, è durato fino a circa il 10-12 agosto 2010.

Solo per la particolare intensità del fenomeno e la lunga permanenza delle sostanze idrocarburiche nell’aria fu possibile rilevarle.

I dati analitici attestarono segnali corrispondenti ad una complessa miscela di idrocarburi fra cui prevaleva la componente costituente il gasolio.

Questo ulteriore episodio di diffusione degli odori riconducibili a sostanze chimiche di natura idrocarburica, sembrava avere confermato la tipologia dei precedenti eventi, cioè il trascinarsi di queste sostanze all’interno del Complesso carsico del monte Corchia in seguito a flussi idrici conseguenti a forti precipitazioni, sostanze idrocarburiche la cui origine non poteva che essere individuata nel loro uso nell’ambito dell’attività estrattiva.



Fig. 6.13 - Sala delle Sabbie, in direzione del torrente Vianello-Vidal, luogo dove più frequentemente si è avvertito odore di idrocarburi.

L'inquinamento da marmettola delle acque di un settore dell'Antro del Corchia (2011)

Il 1 luglio 2011 fu segnalato un forte intorbidamento, con materiale sospeso di colore biancastro, delle acque del torrente Vianello-Vidal. Poco dopo iniziò una lunga campagna di controlli delle acque e dei fanghi di cava in quanto sembrava trattarsi evidentemente di marmettola, cioè fango proveniente dal taglio del marmo entro le cave soprastanti larga parte del Complesso carsico del monte Corchia.

Il 10 agosto 2011, F. Mantelli (ARPAT) e F. Occhini (GSAVF), effettuarono un sopralluogo sul torrente Vianello- Vidal e partendo dalla Sala delle Sabbie fino al punto in cui il corso si allarga (pochi metri a monte della cascata); l'acqua era apparsa visibilmente torbida, di un'intensità mai osservata durante i precedenti anni di frequentazione di questa zona dell'Antro del Corchia. Furono prelevati campioni di acqua e di fango depositato sulle rive e sul fondo del corpo idrico.

F. Occhini, segnalò in seguito la permanenza dello stato di intorbidamento delle acque e di deposizione di fango il 16 agosto durante la discesa verso il fondo del Complesso carsico del monte Corchia nella zona dei Saloni Fossili. In relazione alla presenza di fanghi in questa zona, si precisa che il 23 giugno L. Lotti, con altri speleologi, erano presenti nella stessa zona dei Saloni Fossili e non avevano notato alcuna presenza di deposizioni bianche.

E' quindi da presumere che l'episodio di arrivo del fango bianco, probabilmente veicolato da una piena dei corsi d'acqua sotterranei, sia avvenuto fra quella data e il 1 luglio. Durante quel periodo di tempo, solo in data 29 giugno nell'area del monte Corchia si era verificato un episodio temporalesco, tuttavia non di grande intensità. Si tenga presente la morfologia e la localizzazione geografica del sistema montuoso apuano che determinano una estrema variabilità in termini di precipitazioni su distanze di pochi chilometri.

Il 18 agosto 2011 L. Lotti e F. Mantelli, F. Occhini e F. De Sio effettuarono un ulteriore sopralluogo nella zona del torrente Vianello-Vidal e in una zona a monte mediante la risalita del pozzo della Fangaia e, attraverso un breve meandro, fin sotto il pozzo delle Pisoliti.

Fu riscontrata ancora presenza di fango bianco lungo tutte le zone pianeggianti del corso idrico.

Il 1 settembre 2011, presenti vari soggetti istituzionali, fu effettuato un sopralluogo alle cave dei Tavolini B (Alta) e A (Bassa) localizzate sul versante S-O del monte Corchia.

In quella occasione, venne, tra l'altro, effettuato da ARPAT il campionamento di alcuni depositi di marmettola sui piani di cava.

In data 28 settembre 2011, in occasione di un ulteriore sopralluogo ARPAT furono prelevati 3 campioni di fango, in differenti zone entro il complesso carsico Antro del Corchia, la cui presenza non era in relazione con l'episodio di inquinamento, ma riconducibile a processi naturali (fango autoctono). Il campionamento fu realizzato allo scopo di confrontare le diverse tipologie dei fanghi presenti. Si osservò inoltre una situazione immutata in relazione alla presenza del fango

bianco nell'area del torrente Vianello-Vidal. Il maggior intorbidamento si osservava subito a monte della cascata, in un punto dove il fiume si allarga, ma anche a valle si mostravano gli stessi fenomeni di intorbidamento.

Nella **Fig. 6.14** è riportato il settore del complesso carsico Antro del Corchia dove sono indicate le zone (lettere A e B) interessate dai depositi di fango bianco.

Zona **A**: zona della cascata del torrente Vianello-Vidal.

Zona **B**: zona a monte della cascata della Fangaia (fin sotto il pozzo delle Pisoliti).

Si ritenne che, a monte e a valle della zona documentata da foto e oggetto di campionamenti del corpo idrico (torrente Vianello-Vidal), era da presumere una situazione analoga di deposizione di fango.

Le figure da **Fig. 6.15** a **Fig. 6.23** costituiscono documentazione fotografica del fenomeno descritto come inquinamento da fango bianco.

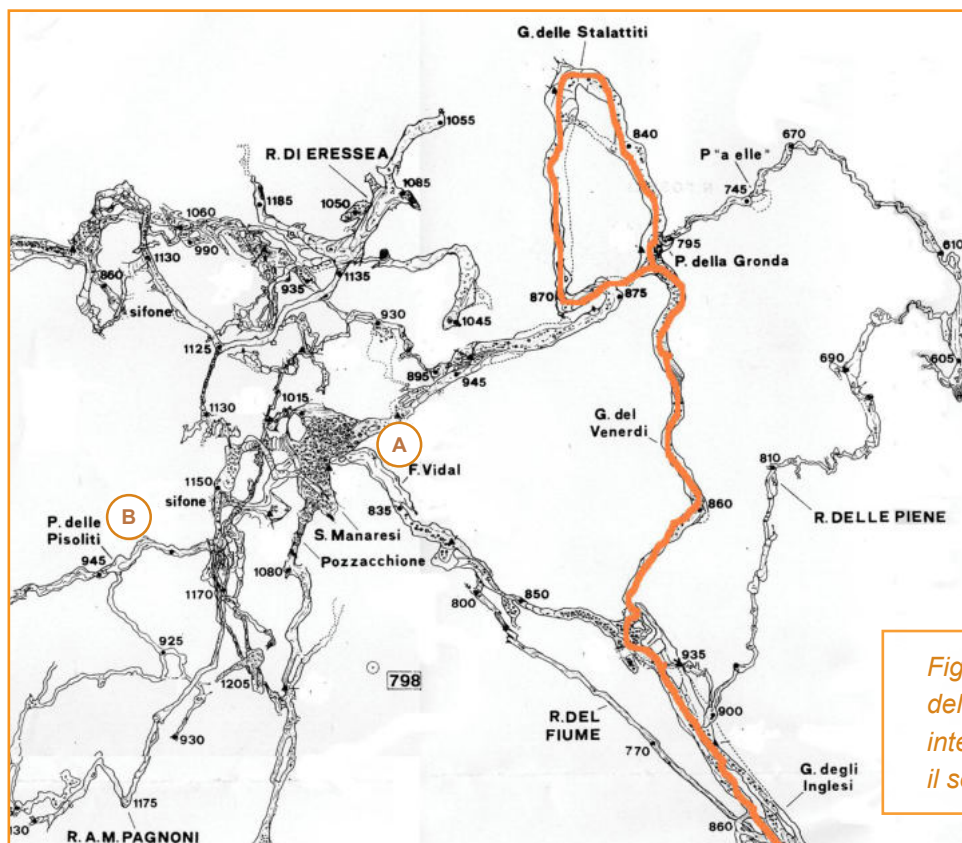


Fig. 6.14 - Cartografia del settore dell'Antro del Corchia con indicate le zone (lettere A e B) interessate dai depositi di fango bianco; in colore il settore destinato fruizione turistica.



Fig. 6.15 - Acqua torbida e depositi di fango bianco ai bordi e sul fondo del torrente Vianello-Vidal, 10 agosto 2011 (Zona A).



Fig. 6.16 - Particolare del fango bianco ai bordi e sul fondo del torrente Vianello-Vidal, 10 agosto 2011 (Zona A).

Fig. 6.17 - Acqua torbida con affioramento di roccia ricoperta di fango lungo il torrente Vianello-Vidal, 10 agosto 2011 (Zona A).





Fig. 6.18 - Depositi di fango bianco ai bordi e sul fondo del torrente Vianello-Vidal, 18 agosto 2011 (Zona A). L'acqua è tornata limpida ma permane sul fondo del laghetto a monte della cascata uno spesso deposito di fango.

Fig. 6.19 - Particolare del fango bianco nella piccola forra a valle del pozzo delle Pisoliti, 18 agosto 2011 (Zona B).





Fig. 6.20 – Depositi di fango bianco lungo il corso del torrente Vianello-Vidal a monte del laghetto.



Fig. 6.21 - Riempimento del letto del torrente della piccola forra a valle del pozzo delle Pisoliti - 18 agosto 2011(Zona B).



Fig. 6.22 - Caratteristica del fango di lavorazione sul piano di lavoro della cava dei Tavolini B - 1 settembre 2011.

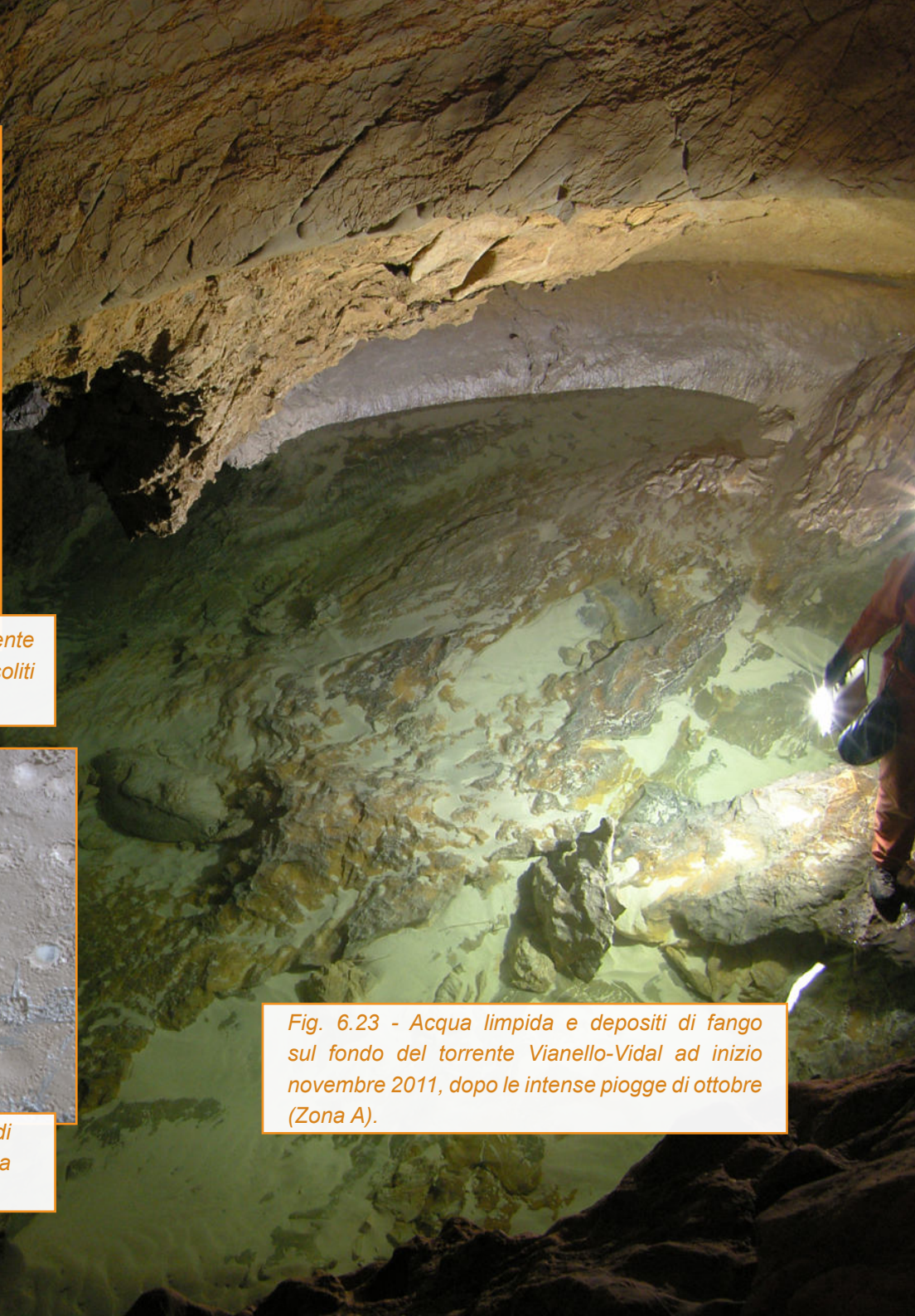


Fig. 6.23 - Acqua limpida e depositi di fango sul fondo del torrente Vianello-Vidal ad inizio novembre 2011, dopo le intense piogge di ottobre (Zona A).

Parte analitica

Chimismo delle acque

Nella zona interessata dalla deposizione di fango bianco e nell'area limitrofa, furono effettuati campionamenti delle acque e dei depositi solidi fino dal primo rilevamento del fenomeno. I risultati delle analisi chimiche e chimico-fisiche delle acque sono riportati nella **Tab.6.1**.

Per quanto riguarda la torbidità, parametro significativo in questo contesto, si precisa che il valore di 1 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) corrisponde ad una situazione in cui la torbidità è già osservabile ad occhio nudo (ad esempio in bottiglia in vetro da 1litro); le acque cosiddette limpide hanno torbidità non superiore a 0,5 NTU. Situazioni di torbidità superiori ad 1 NTU si verificano nel torrente Vianello-Vidal (e in altri corsi ipogei dello stesso sistema carsico) solo in condizioni di piogge intense e per una durata di pochi giorni; generalmente questo torrente ipogeo, in situazioni di stabilità meteorologica o durante la copertura nevosa invernale del monte Corchia, presenta torbidità <0,5 NTU.

In relazione al parametro torbidità nelle acque del settore dell'Antro del Corchia destinato fruizione turistica, nel primo report sullo stato dell'ambiente di questo settore del Complesso carsico del monte Corchia (Montigiani A., et all., 1998), era stato riportato quanto segue:

“Quasi tutte le acque presentano un'elevata trasparenza e, nella maggior parte delle osservazioni, assenza di materiale in sospensione; in questo senso non si riscontrano sostanziali differenze fra le acque correnti e quelle confinate nei laghetti. Le acque dei principali torrenti, anche durante i periodi di piena non eccezionale, non mostrano sostanziali variazioni della torbidità; ciò si spiega con la scarsità di materiale fine, sia nei suoli dell'area di alimentazione, sia nei vari condotti ipogei. La torbidità costituisce in genere un parametro importante per valutare lo stato di protezione di una risorsa idrica sotterranea; nel caso di un sistema carsico, però, la bassa torbidità delle acque circolanti non è generalmente indice della capacità filtrante del suolo bensì della bassa torbidità delle acque in ingresso e della scarsità di sedimenti fini che possano essere rimossi e trasportati in sospensione. Nel caso del sistema ipogeo del Corchia questo parametro rimane comunque un elemento di interesse per verificare possibili impatti antropici prodotti dall'attività di estrazione del marmo presente nella parte alta della montagna (veicolazione di marmettola nelle acque)”.

Il campione di acqua prelevato al torrente Vianello-Vidal il 01 luglio 2011 (*Tab.6.1, campione 2*) conteneva 1710 mg/L di materiale sospeso (conseguentemente una torbidità non misurabile perché fuori scala di misura). Nell'ambito della tipologia delle acque di questo corso idrico, sulla base delle conoscenze acquisite in circa 15 anni di controllo e monitoraggio, la deposizione di questi fanghi aveva rappresentato un fenomeno molto anomalo, soprattutto se si considerano le condizioni meteorologiche stabili di quei giorni.

Il chimismo dell'acqua durante la fase di torbida non appare modificato dal materiale sospeso (almeno nei macrocostituenti): rispetto alle analisi precedenti (*Tab.6.1, campione 1*) si nota solo un innalzamento della concentrazione dei solfati, modifica scarsamente significativa perché il confronto è effettuato con acqua circolante in regime di alte portate; inoltre valori simili si sono riscontrati anche in passato.

Il materiale sospeso, come riportato in dettaglio nel paragrafo che segue, è costituito interamente da fango carbonatico (prevalentemente carbonato di calcio), materiale scarsamente solubile; questo spiega la scarsa influenza sul chimismo delle acque venute a contatto con i fanghi. La presenza di questi fanghi inerti determina comunque una modifica evidente dell'ambiente ipogeo in senso visivo, sia per l'impatto sulla fauna ipogea (privata

dei possibili microambienti), sia su quella epigea e sulla flora dei corpi idrici superficiali alimentati dalle sorgenti di questo complesso carsico; nella *Fig. 6.24* è indicata la sorgente principale del Complesso carsico del monte Corchia in località "Fontane di Cardoso", nei pressi di Stazzema ⁽²⁾.

Il campione di acqua prelevato al torrente Vianello-Vidal il 10 agosto 2011 (*Tab.6.1*), appariva ancora interessato da torbidità elevata, sempre da considerare anomala in relazione all'assenza di precipitazioni. Solo in seguito, il 18 agosto si riscontrava un ritorno ad una situazione nella norma in relazione alla torbidità (Campione del 18-8-2011, zona a monte della cascata del torrente Vianello-Vidal). Tuttavia, come da documentazione fotografica (*Fig. 6.18*), permaneva uno spesso letto di deposito di fango bianco nel punto di maggior larghezza del torrente Vianello-Vidal (a monte della cascata omonima).

Il sopralluogo del 28 settembre 2011 aveva mostrato ancora una situazione immutata in relazione alla presenza del fango bianco nell'area del torrente Vianello-Vidal, con presenza di acqua con basse portate e con torbidità dell'acqua <0,5 NTU.

⁽²⁾ La risorgiva del Corchia si presenta come tre distinte sorgenti vicine fra loro; trattasi della stessa acqua.

	Torrente Vianello-Vidal - Zona a monte cascata (Zona A)					Alla base pozzo delle Pisoliti (Zona B)	Alla base cascata Galleria Quadrata (Zona B)
Data prelievo		14/12/10	01/07/11	10/08/11	18/08/11	18/08/11	18/08/11
Situazione meteorologica		Assenza di piogge da 10 gg	Modeste precipitazioni nei 15 gg precedenti	Assenza di piogge da 20 gg	Assenza di piogge da 20 gg	Assenza di piogge da 20 gg	Assenza di piogge da 20 gg
Campione numero		1	2	3	4	5	6
Parametri	Unità di misura						
Torbidità	NTU	0,5 Acqua limpida	>>100 Molto materiale sospeso: 1710 mg/L	40 Torbidità elevata	0,4 Acqua limpida	3,0 Acqua con moderata torbidità	0,5 Acqua limpida
temperatura acqua	°C	7,2	-	7,2	7,2	7,2	7,2
Portata	L/min	1200	240	250	150	15	8
Conducibilità elettrica	μS/cm 25 °C	184	205	201	201	201	201
Residuo fisso	mg/L	112	130	121	125	124	134
pH		7,8	8	8	7,8	7,8	7,8
Ammonio	mg/L NH ₄	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Fluoruro	mg/L F	0,1	0,1	0,15	0,15	<0,10	<0,10
Cloruro	mg/L Cl	3,8	4,7	4,5	4,4	4,2	3,5
Nitrato	mg/L NO ₃	0,8	2,1	1,3	1,2	1,4	3,7
Solfato	mg/L SO ₄	5	11,7	12	11,9	8,2	19,6
Idrogenocarbonato	mg/L HCO ₃	128	134	122	128	128	122
Sodio	mg/L Na	2,4	3,2	2,9	2,9	2,9	2,6
Potassio	mg/L K	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3
Calcio	mg/L Ca	28,5	32,6	30,6	29,4	38,6	41,1
Magnesio	mg/L Mg	8,2	9,3	9,6	9,8	2	2,9

Tab. 6.1 – Composizione delle acque nelle zone dove si è verificata deposizione di fango bianco.

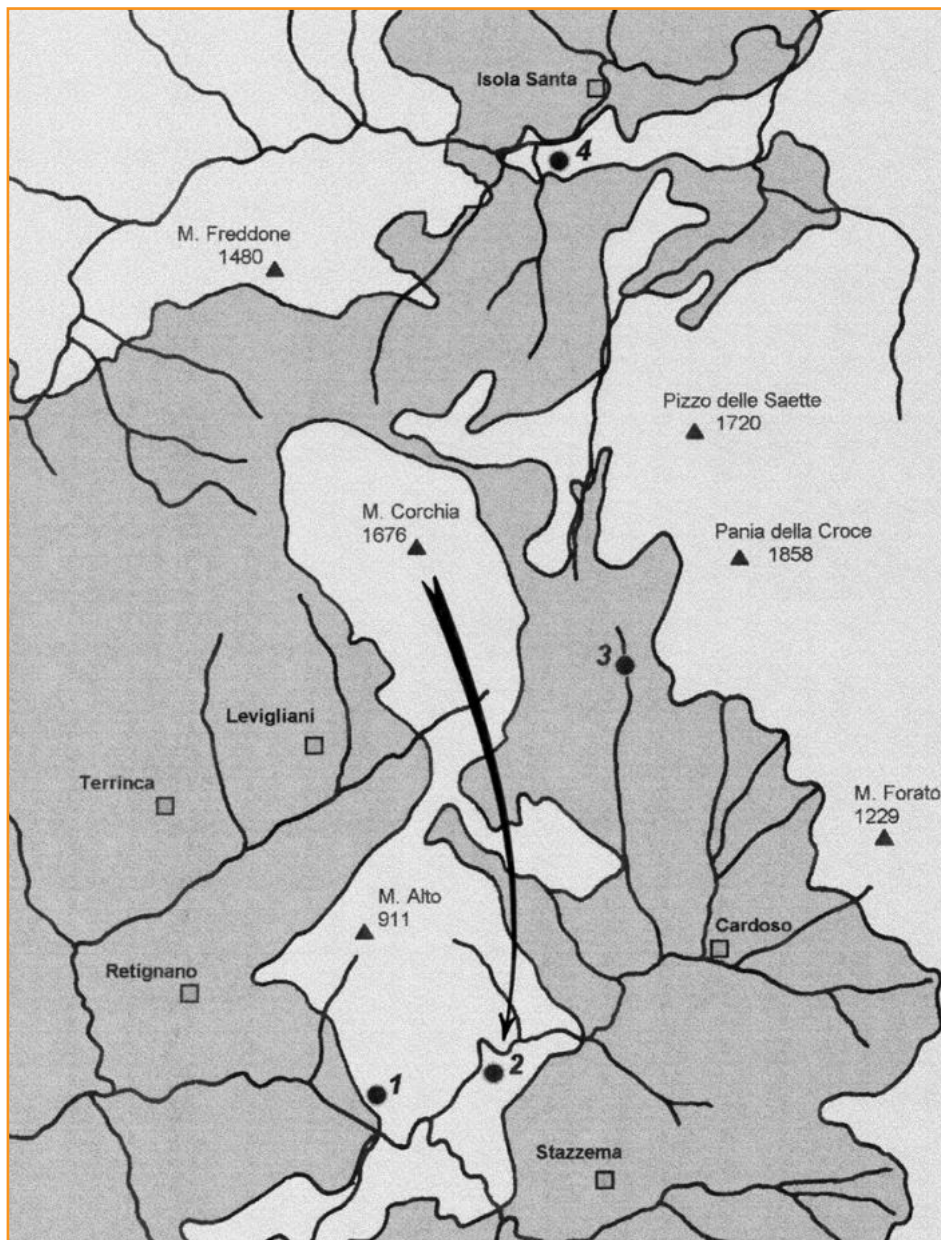


Fig. 6.24 – Rappresentazione della direzione di scorrimento del principale flusso idrico sotterraneo del Complesso carsico del monte Corchia: le acque sotterranee scorrono dall'area del monte Corchia fino alle sorgenti denominate "Fontane di Cardoso" che a loro volta confluiscono nel torrente Vezza. Sono indicate in grigio chiaro le rocce carbonatiche che rappresentano la parte permeabile dell'area e in grigio scuro la zona impermeabile costituita dalle filladi e altre rocce poco permeabili del basamento paleozoico apuano.

Analisi dei fanghi

Componenti principali

L'analisi dei fanghi è stata effettuata mediante loro dissoluzione in acido cloridrico e determinazione dei componenti principali mediante cromatografia ionica. La composizione chimica del fango in sospensione raccolto nell'acqua del torrente Vianello-Vidal e di quello depositato sul fondo di questo corpo idrico presenta similitudine con la composizione dei fanghi di lavorazione campionati nelle aree di cava che interessano il versante sud-ovest del monte Corchia (*Tab. 6.2*). I fanghi raccolti nell'area del torrente Vianello-Vidal sono caratterizzati da composizione completamente carbonatica (100 % solubilità in HCl) con tenore di calcio intorno al 98% (98,5-98,9); i fanghi raccolti in alcune aree di cava sul versante sud-ovest del monte Corchia presentano una composizione molto simile: lo stesso tenore di calcio intorno al 98% (98,8) e una frazione carbonatica dal 98 al 99 %. Quindi la tipologia carbonatica dei fanghi è riconducibile prevalentemente a carbonato di calcio così come lo sono alcuni campioni prelevati nelle aree di cava indagate.

In differenti aree del monte Corchia la tipologia delle rocce carbonatiche è diversa, ad esempio, dove sono presenti i Grezzoni (rocce metamorfiche

carbonatiche con composizione dolomitica, carbonato di calcio e magnesio, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. In misura minore nel monte Corchia sono anche presenti altre tipologie di rocce: Calcari Selciferi, Brecce di Seravezza, Scisti a Cloritoide, alcune delle quali poco alterabili. Si hanno, conseguentemente, differenti tipologie di fanghi prodotti dai processi naturali di degrado delle rocce: nella *Tab. 6.3* viene pertanto riportata la composizione di fanghi prelevati in differenti aree del Complesso carsico del monte Corchia.

I fanghi naturali costituiscono comunque un deposito poco diffuso, almeno nell'area interessata dalla deposizione del fango bianco e in zone limitrofe, vista la litologia della serie carbonatica in quella parte del monte Corchia, formata in prevalenza da rocce carbonatiche che, in seguito al pur lento processo di dissoluzione chimica operato dalle acque circolanti, contenenti anidride carbonica, lasciano piccoli quantitativi di residuo insolubile (rocce silicatiche come argille, sabbie, filladi e altro).

Fanghi	Data prelievo	Tipologia fango	Ca %	Mg %	Note
Fango in sospensione acqua torrente Vianello- Vidal	01/07/11	CaCO ₃ e CaMg (CO ₃) ₂ : 100%	98,86	1,14	Fango impalpabile
Fango sul fondo torrente Vianello- Vidal	10/08/11	CaCO ₃ e CaMg (CO ₃) ₂ : 100%	98,49	1,51	Fango impalpabile
Fango di lavorazione (marmettola) - Cava dei Tavolini B, punto 1	01/09/11	CaCO ₃ e CaMg (CO ₃) ₂ : 98,03	98,8	1,2	Fango impalpabile
Fango di lavorazione (marmettola) - Cava dei Tavolini B, punto 2	01/09/11	CaCO ₃ e CaMg (CO ₃) ₂ : 98,52	98,8	1,2	Fango impalpabile
Fango di lavorazione (marmettola) - Cava dei Tavolini A	01/09/11	CaCO ₃ e CaMg (CO ₃) ₂ : 99,05	98,84	1,16	Fango impalpabile
Polvere di marmo - Cava dei Tavolini A	01/09/11	CaCO ₃ e CaMg (CO ₃) ₂ : 98,01	99,23	0,77	Polvere di marmo

Tab. 6.2 – Composizione dei fanghi raccolti nell'area del torrente Vianello-Vidal durante il periodo luglio – agosto 2011 [CaCO₃ calcio carbonato e CaMg(CO₃)₂ dolomite] e dei fanghi raccolti in alcune aree di cava sul versante sud-ovest del monte Corchia (01 settembre 2011).

Fanghi	Data prelievo	Tipologia fango	Ca %	Mg %
1-- Fango lungo il torrente Gronda	28/09/11	CaCO ₃ e CaMg (CO ₃) ₂ : 93%; materiale insolubile (argilla e altri minerali): 7%	85	15
2-- Limo al vecchio Campo Base - A monte della Foresta Pietrificata	28/09/11	CaCO ₃ e CaMg (CO ₃) ₂ : 94%; materiale insolubile (argilla e altri minerali): 6%	79,8	20,2
3-- Fango sotto la cascata della Risalita dei Lucchesi	28/09/11	CaCO ₃ e CaMg (CO ₃) ₂ : 73%; materiale insolubile (argilla e altri minerali): 27%	77,2	22,8

Tab. 6.3 – Composizione dei fanghi raccolti in differenti aree del Complesso carsico del monte Corchia.

Dettagli: 1-- Fango lungo il torrente Gronda (poco sotto la cascata del torrente Gronda, nei pressi del percorso turistico; fango poco diffuso); 2 -- Limo al vecchio Campo Base - A monte della Foresta Pietrificata (ingenti depositi di limo antico); 3 -- Fango sotto la cascata della Risalita dei Lucchesi (piccoli depositi di limo).

Metalli ed elementi di natura non metallica

Successivamente alla prima raccolta di fanghi da ritenersi autoctoni, cioè tipici e formati nell'ambiente ipogeo, fu effettuata un'ulteriore campagna di

prelievo di questa tipologia di fanghi. L'insieme dei fanghi raccolti, sia fanghi bianchi che fanghi di differenti aree del complesso carsico, è riportato in

Tab. 6.4.

Postazioni di raccolta fanghi
1 - Cava Tavolini B - punto 1 - Marmettola
2 - Cava Tavolini B - punto 2 - Marmettola
3 - Cava Tavolini A - Marmettola
4 - Cava Tavolini A - Polvere marmo
5 - Sabbia della sala delle Sabbie (Diramazione per il torrente Vianello-Vidal)
6 - Cengia verso pozzo Pisoliti - Fango bianco
7 - Torrente Vianello-Vidal – Fango in sospensione
8 - Alveo torrente Gronda - Fango
9 - Campo Base storico (a monte Foresta Pietrificata) - Fango
10 - Sotto cascata Lucchesi - Fango
11 - Buca d'Eolo - Fango sulla parete opposta scalette scolpite nella pietra
12 - Buca d'Eolo - Fango di alterazione di alcune rocce in parete. A 100m dall'ingresso.
13 - Galleria del Venerdì - Fango al suolo davanti alla diramazione per il torrente Vianello-Vidal
14 - Galleria artificiale - Fango in una frattura del marmo in parete

Tab. 6.4 – Denominazione e localizzazione dei fanghi raccolti in differenti aree del Complesso carsico del monte Corchia. Dal n. 1 al n. 7: tipologia dei fanghi (o altro materiale) assimilabili o connessi al fenomeno dei fanghi bianchi (in corsivo). Dal n. 8 al n. 14: fanghi da ritenersi autoctoni.

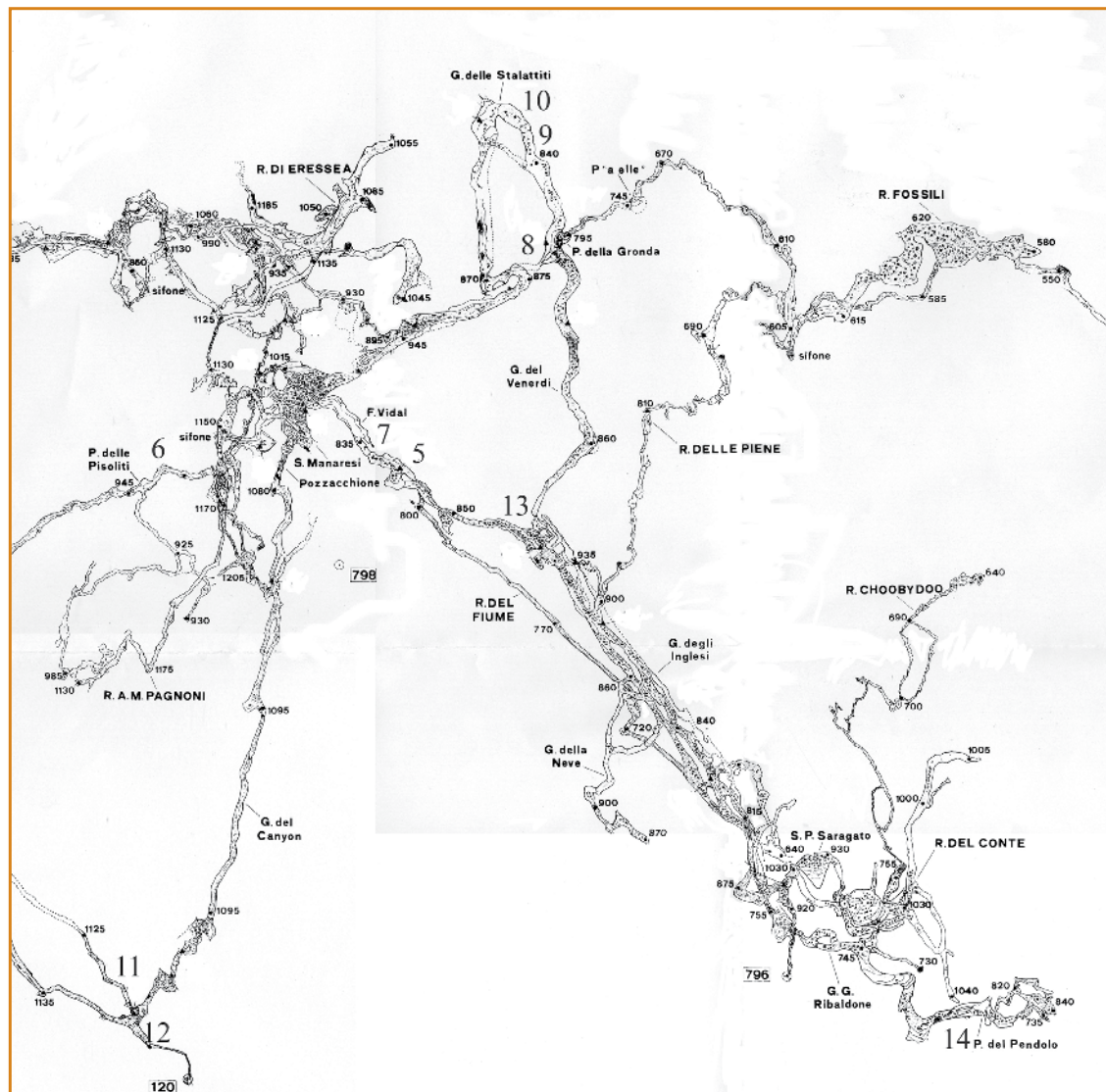


Fig. 6.25 – Localizzazione dei fanghi raccolti nelle varie zone del Complesso carsico del monte Corchia. Dal n. 1 al n. 4: marmettola e polvere di marmo raccolti all'esterno;
Dal n. 5 al n. 7: fanghi bianchi;
Dal n. 8 al n. 14: fanghi autoctoni.

L'analisi dei metalli ed elementi di natura non metallica nei fanghi indica:

1) per ferro e manganese, elementi presenti in concentrazioni più elevate: un maggior arricchimento nei fanghi autoctoni (essi sono spesso colorati - dal giallo al marrone - per presenza di ferro) (*Tab. 6.5, Fig. 6.26*).

2) per metalli ed elementi di natura non metallica, presenti in concentrazioni minori nelle varie tipologie di fango raccolto in differenti aree del Complesso carsico del monte Corchia, si osserva una similitudine nei valori di concentrazioni dei fanghi bianchi che si differenziano con evidenza dai fanghi autoctoni più ricchi in questi elementi (*Tab.6.6, Fig.6.27*). Ciò sembra ulteriormente confermare la stessa natura dei fanghi rappresentati dai campioni 1-7.

Postazioni di raccolta fanghi	Fe	Mn
1	0,69	0,07
2	0,62	0,07
3	0,77	0,11
4	0,31	0,27
5	0,79	0,09
6	0,52	0,09
7	0,07	0,58
8	6,7	0,3
9	5,5	0,3
10	36,3	1,7
11	0,32	0,12
12	2,10	0,98
13	5,84	1,58
14	7,12	1,46

Tab. 6.5 - Presenza di ferro e manganese nei fanghi raccolti in differenti aree del Complesso carsico del monte Corchia. Concentrazioni in mg/g.

Luogo raccolta fango	Cadmio	Cromo	Piombo	Rame	Arsenico	Bario	Nichel	Stronzio
1	0,5	0,7	1,6	2,2	0,8	6,2	1,2	74,5
2	0,5	0,5	1,3	1,5	0,3	4,8	<0,5	62,2
3	0,5	0,7	2,1	1,7	0,4	6,4	1,3	72,0
4	0,6	0,4	1,7	0,2	0,2	6,1	<0,5	76,2
5	0,4	0,4	0,9	1,2	0,4	13,4	1,0	84,3
6	0,2	<0,1	2,0	0,9	0,4	7,5	2,1	66,6
7	0,5	<0,1	1,8	5,7	0,6	9,9	3,5	74,0
8	0,1	85,4	29,9	11,6	14,6	11,0	140	160
9	0,1	0,9	0,5	4,0	5,2	16,4	9,8	119
10	0,9	18,5	1,3	34,9	12,3	13,7	5,6	73,5
11	0,5	1,8	1,1	2,0	0,2	9,9	2,5	162
12	8,0	3,3	9,1	9,4	3,6	47,5	36,6	269
13	0,9	14,3	40,6	46,9	16,1	187	46,4	144
14	1,3	10,2	62,7	17,6	68,8	46,3	39,4	208

Tab. 6.6 - Presenza di metalli ed elementi di natura non metallica nei fanghi bianchi e in quelli raccolti in differenti aree del complesso carsico Antro del Corchia. Concentrazioni in µg/g.

Fig. 6.26 - Ferro e manganese, elementi presenti in concentrazioni più elevate (fra i componenti minori) in tutte le tipologie di fango: un maggior arricchimento si osserva nei fanghi autoctoni.

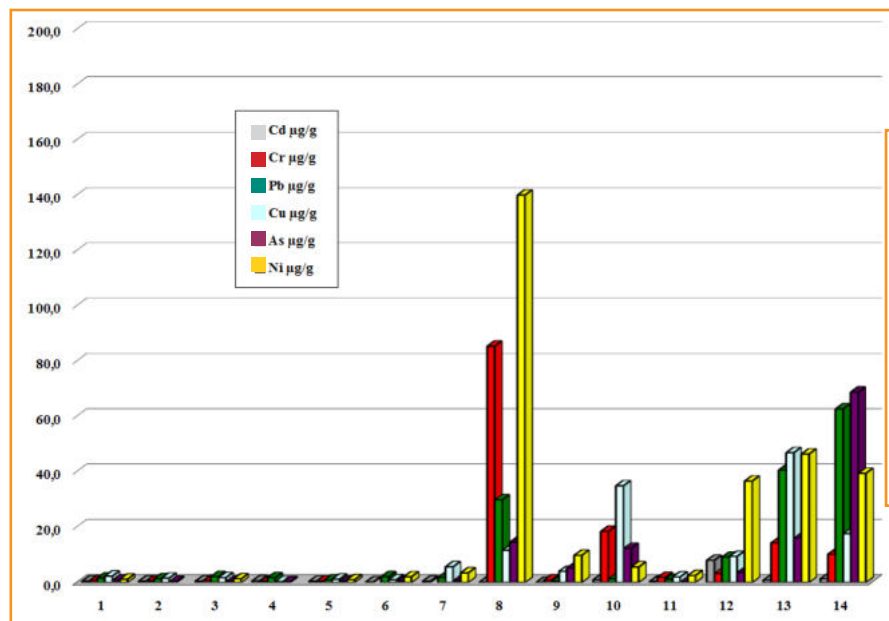
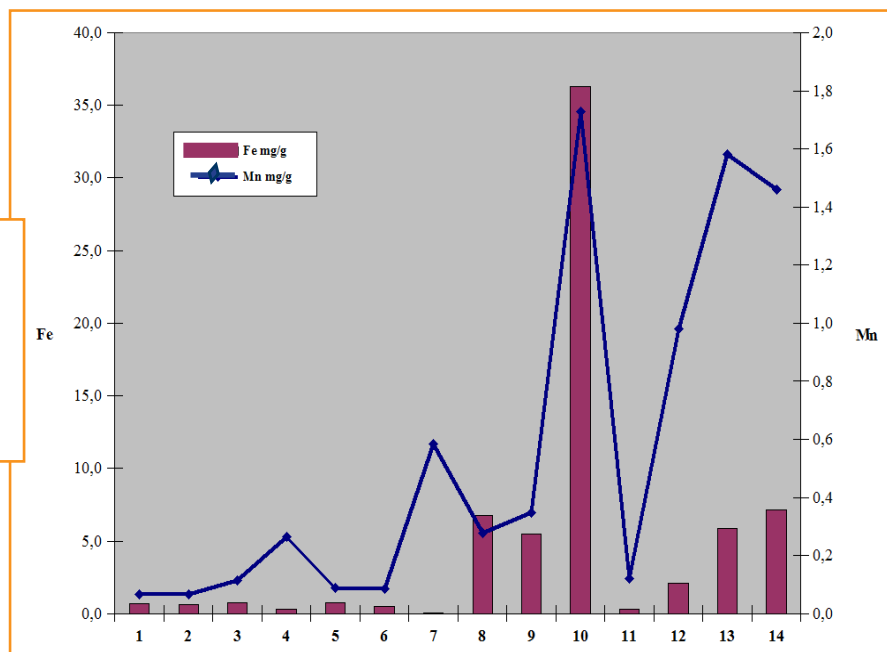


Fig. 6.27 - Metalli pesanti ed elementi di natura non metallica nelle varie tipologie di fango raccolto in differenti aree del Complesso carsico del monte Corchia. Si osserva una similitudine nei valori di concentrazioni dei fanghi bianchi che si differenziano dai fanghi autoctoni più ricchi in questi elementi.

Valutazioni finali

La deposizione di grandi quantità di fango bianco verificatosi nel luglio 2011 in uno dei principali collettori ipogei del sistema carsico Antro del Corchia, sulla base dell'esperienza di almeno 15 anni di frequentazione di questa area e di altre zone limitrofe del complesso, costituisce un fatto abbastanza unico per intensità e persistenza.

Gli occasionali episodi di torbidità delle acque nel corso dei recenti 15 anni sono sempre stati riconducibili agli alti flussi idrici conseguenti a fenomeni meteorologici particolarmente intensi e quindi a processi naturali.

Il fango disperso nel torrente Vianello-Vidal sembra corrispondere, sulla base dei dati fino ad oggi disponibili, a fango di lavorazione del marmo (marmettola). Considerando che lo spessore medio delle deposizioni di fango bianco sui fondali del torrente Vianello-Vidal e degli affluenti a monte è circa 1 cm e che le zone visitate e documentate sono almeno di una lunghezza di 500 m con una larghezza media di 1 m, si conclude che il volume di fango rilasciato sia stimabile in almeno 5 m³. Tuttavia è documentata la presenza di questo fango verso la zona del fondo del Corchia e presumibilmente per altre centinaia di metri a

monte del pozzo delle Pisoliti, alla cui base si è arrestata la nostra esplorazione; ciò induce a ritenere una dispersione di volumi ben più elevati di fango rispetto a quanto calcolato sulla base delle misure effettuate.

Dopo circa 1 anno dall'episodio di inquinamento, le occasionali piene del torrente Vianello-Vidal e degli affluenti superiori (comunque sporadiche, in considerazione della scarsità di precipitazioni dall'agosto 2011 all'agosto 2012), avevano rimosso una buona parte delle deposizioni di fango bianco. Tuttavia, da come si può osservare dalle immagini di seguito riportate e relative alla documentazione realizzata il 02 agosto 2012 nel corso idrico a monte del torrente Vianello-Vidal (forra a monte della cascata della Fangaia, sotto pozzo delle Pisoliti), zone dove ancora sono presenti significativi depositi di fango bianco (*Fig. 6.28*).

A distanza di 8 anni dall'evento di immissione di marmettola, si osservavano ancora resti di questo materiale in alcuni punti delle gallerie che conducono nella zona del torrente Vianello-Vidal. In *fig. 6.29* è riportata un'immagine del letto del torrente della piccola forra a valle del pozzo delle Pisoliti (7 agosto 2019).



Fig. 6.28 - Significativi depositi di fango bianco in alcuni tratti lungo la forra a valle del pozzo delle Pisoliti a distanza di 1 anno dalla manifestazione del fenomeno. Sopralluogo del 02 agosto 2012.

Fig. 6.29 - Deposito di marmettola nel letto del torrente della piccola forra a valle del pozzo delle Pisoliti, 7 agosto 2019.



Abbandono di rifiuti sul monte Corchia

L'attività di estrazione del marmo, oltre alla possibilità di intercettare rami dell'esteso sistema carsico diffuso nella parte carbonatica del monte Corchia, comporta una serie aggiuntiva di rischi ambientali, fra questi l'abbandono di rifiuti in aree prossime all'escavazione o in zone dove sono stati effettuati saggi di estrazione.

Sono tuttora presenti (data 10 ottobre 2019) rifiuti nella zona chiamata Retrocorchia che risalgono ad

un saggio di oltre due decenni fa (*Fig. 6.30 e 6.31*), mentre evidenti intercettazioni con rami del sistema carsico sono osservabili a vista in alcune zone dei fronti di scavo che sono esposti all'esterno della montagna (*Fig. 6.32*).

Pur in seguito a numerose segnalazioni intercorse durante molti anni, non risulta che alcuna istituzione sia stata in grado di far rimuovere il materiale abbandonato in varie aree del monte Corchia.

Fig. 6.30 - Rifiuti abbandonati da oltre due decenni nella zona denominata Retrocorchia nei pressi di un saggio di cava.



Fig. 6.31 - Resti di batterie fra i rifiuti abbandonati nella zona denominata Retrocorchia nei pressi di un saggio di cava.



*Fig. 6.32 - Intercettazione di una
cavità carsica su un fronte di
taglio di marmo nella zona delle
cave alte sul monte Corchia.*



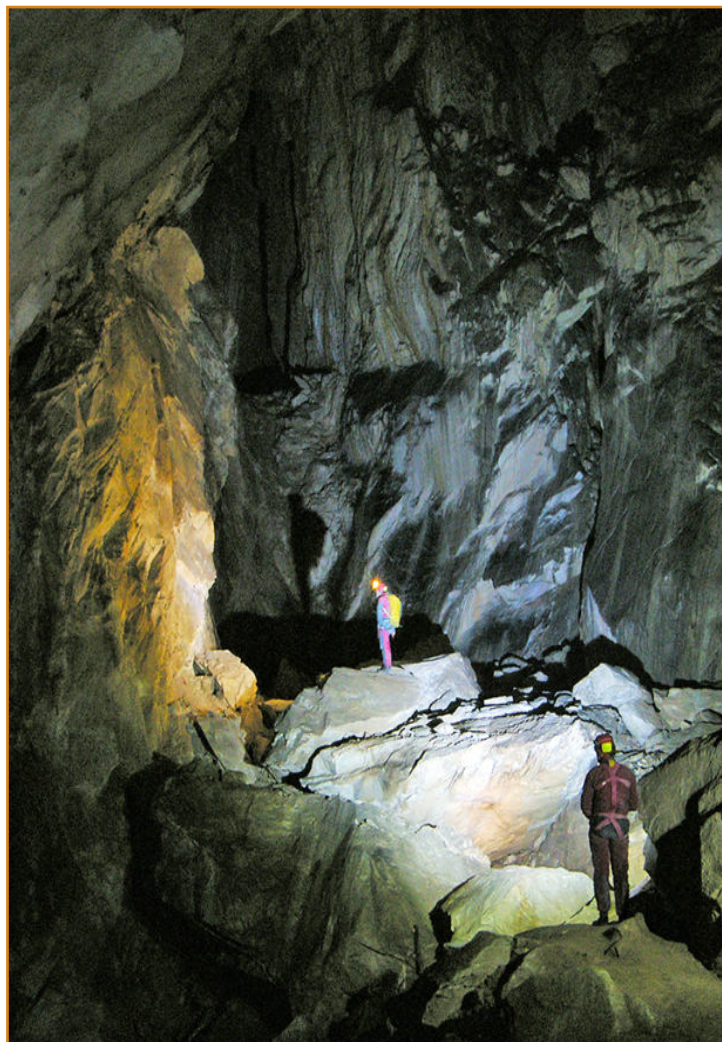


Fig. 7.1 - Il salone Manaresi, dove è stata allestita una postazione di monitoraggio del radon, rappresenta un caratteristico ambiente del Complesso carsico del monte Corchia.

Il radon negli ambienti carsici ipogei

Il radon è un gas radioattivo di origine naturale che deriva dalla famiglia dell'uranio.

Gli isotopi del radon presenti in natura sono: ^{222}Rn (Radon), ^{220}Rn (toron) ^{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 il gas di maggiore interesse in quanto l'emivita di questo isotopo è maggiore rispetto a quella del ^{220}Rn e del ^{219}Rn : ciò ne determina una mobilità molto superiore che consente il raggiungimento di distanze relativamente elevate rispetto al luogo di formazione. Chimicamente il radon è un gas nobile, solubile in acqua, incolore, inodore e insapore, con un tempo di dimezzamento di circa 3,8 giorni.

Il ^{222}Rn a sua volta decade generando una catena di nuclei instabili (*"prodotti di decadimento del radon"*) ed emettendo particelle α .

In natura esistono tre famiglie radioattive principali: la famiglia dell'uranio, quella dell'attinio e quella del torio. I radionuclidi delle famiglie radioattive naturali sono presenti nella crosta terrestre in modo differente nelle varie formazioni geologiche; le rocce con elevate concentrazioni di uranio sono il granito e le argilliti, con concentrazioni medie di circa 50 Bq/kg. L'uranio si trova inoltre in alcuni tipi di roccia di origine vulcanica (lave, pozzolane, tufi e altre), tanto più se ricchi in ossidi di ferro e manganese,

ma è possibile trovarlo in concentrazioni non trascurabili in rocce sedimentarie costituite da resti di microrganismi animali come calcari e marne.

Il decadimento radioattivo consiste in un processo di trasformazione nucleare in cui si ha liberazione di energia e produzione da un radionuclide padre di un nuclide figlio, o progenie, il quale può essere a sua volta stabile o instabile; il decadimento del ^{222}Rn , assieme all'emissione di particelle α , produce a sua volta elementi radioattivi, chiamati prodotti di decadimento o *"figli del radon"* (fino ad arrivare al nucleo stabile del ^{206}Pb), importanti dal punto di vista del rischio radiologico perché solidi. Una volta inalato, il radon può decadere prima di venire espirato; i figli del radon, radioattivi e solidi, che hanno tempi di emivita molto brevi (da qualche ora fino a un giorno), possono decadere, a loro volta, prima di essere rimossi dai meccanismi di eliminazione da parte dei polmoni, danneggiandone quindi i tessuti.

Il radon costituisce un parametro che può, come altri parametri della meteorologia ipogea, caratterizzare una specifica grotta, soprattutto quelle connesse ad aree vulcaniche dove talvolta i valori di radon possono essere molto elevati, tuttavia tali valori si riscontrano anche in sistemi carsici di tipo carbonatico dove talvolta non sono note le cause di tali anomalie di concentrazione.

Molte grotte in Italia e non solo, sono state monitorate in relazione alla presenza di questo gas.

I dati fino ad oggi disponibili indicano situazioni caratterizzate da estrema variabilità. In un lavoro di Hakl J. (1997) si riscontra che su 220 differenti grotte nel mondo, si ha una variabilità di concentrazione estremamente ampia: si va da 10 Bq/m^3 fino a valori di circa 50.000 Bq/m^3 con un dato mediano collocabile intorno a 2000 Bq/m^3 .

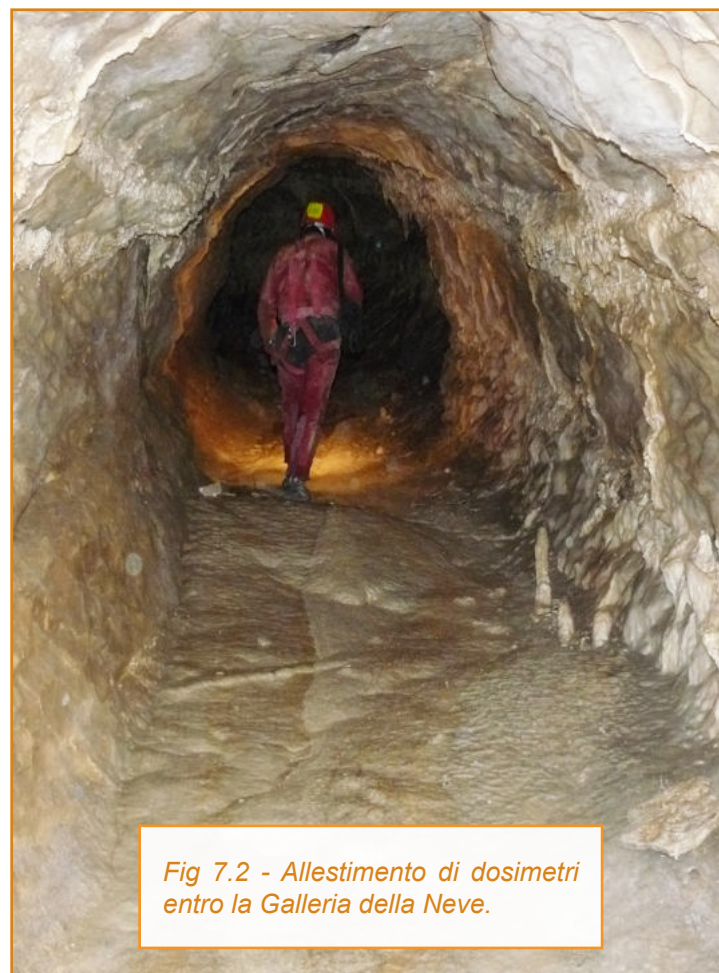


Fig 7.2 - Allestimento di dosimetri entro la Galleria della Neve.

I riferimenti normativi e i valori limite

In Italia il riferimento normativo per il radon (ma solo per i luoghi di lavoro) è il Decreto Legislativo n. 241/00, che ha recepito la Direttiva 96/29/Euratom, modificando e integrando il D. Lgs. n. 230/95.

Questa normativa prevede l'obbligo alla determinazione dell'esposizione al gas radon dei lavoratori che svolgono attività in luoghi di lavoro sotterranei, principalmente tunnel, varie tipologie di cavità sotterranee, tra cui le grotte turistiche.

Il Decreto n. 241/00 introduce un livello di azione per la concentrazione media annua di radon nei luoghi di lavoro e scuole pari a 500 Bq/m^3 , il superamento del quale obbliga il datore di lavoro a fare valutazioni dosimetriche per i lavoratori e/o mettere in atto

interventi per ridurre la concentrazione del gas.

Nel 2013, inoltre, è stata emanata la Direttiva 2013/59/Euratom, pubblicata il 17 Gennaio 2014, ancora non recepita dalla normativa italiana, che introduce limitazioni del radon anche nelle abitazioni e riduce in modo significativo il livello di riferimento della concentrazione di radon nei luoghi di lavoro (art. 54), che non dovrà superare 300 Bq/m^3 .

In attesa che l'Italia recepisca con proprio decreto la nuova Direttiva, resta in vigore il livello di azione di 500 Bq/m^3 previsto dal D.Lgs. 230/95 e modificato dal D.Lgs. 241/00.

Metodi

Nel periodo 2008-2010 la concentrazione di radon è stata misurata con rivelatori a tracce nucleari CR39, normalmente utilizzati per le misure in aria indoor. Il CR39 è un particolare materiale polimerico che è sensibile alle radiazioni emesse dal radon e dai suoi prodotti di decadimento. Il radon penetra nel contenitore dove è presente il rivelatore CR39 e provoca con le sue emissioni dei difetti nella plastica, questi difetti (tracce) vengono amplificati tramite un processo chimico; dalla lettura del numero delle tracce e dalla conoscenza del tempo in cui il rivelatore è stato esposto, si ottiene

la concentrazione media di radon nel periodo di esposizione.

E' da sottolineare il fatto che la situazione ambientale che si ha all'interno di una grotta è molto diversa rispetto a quella che si ha in un edificio. Le grotte sono caratterizzate da elevata umidità, una temperatura praticamente costante, caratteristica della quota e della latitudine della grotta, variabile solo nelle zone vicine agli ingressi, situazioni di ventilazione naturale mutevoli in ciascun punto in funzione delle escursioni termiche esterne e della posizione degli ingressi. Per questo motivo in ciascun punto di

misura sono stati collocati 4 dosimetri, di cui due posizionati all'interno di una busta impermeabile all'umidità, ma permeabile al radon, con lo scopo di proteggerli dall'umidità, sempre presente, e gli altri

due senza alcuna protezione, per la valutazione appunto dell'impatto dell'umidità sulla misura (Fig. 7.3 e 7.4), oltre a verificare la ripetibilità della misura stessa.



Fig. 7.3 - Rivelatori a tracce nucleari CR39 utilizzati per il monitoraggio del radon entro il Complesso carsico del monte Corchia.

Fig. 7.4 - Rivelatori a tracce nucleari CR39 posizionati lungo una galleria del Complesso carsico del monte Corchia (sommità pozzo della Gronda).



I punti di campionamento sono stati distribuiti in un'area disposta su livelli di profondità fra loro diversi, stimabili in circa 400 metri di dislivello totale. E' stato oggetto di monitoraggio un settore del complesso carsico abbastanza esteso, comunque piccolo rispetto all'intero complesso presente nell'interno del monte Corchia ed è stato escluso dal monitoraggio il settore destinato alla fruizione turistica della grotta, per motivi legati alle disposizioni normative cui devono sottostare i datori di lavoro (Fig. 7.5). Il posizionamento dei dosimetri ha richiesto elevate competenze speleologiche da parte degli operatori in quanto i diversi settori del complesso carsico sono accessibili solo tramite pozzi talvolta profondi alcune decine di metri (Fig. 7.6 e 7.7).

Da ciascun punto di misura è stato ricavato un solo dato in quanto dal confronto dei risultati ottenuti dai dosimetri protetti e da quelli non protetti non si sono riscontrate differenze apprezzabili.

Complessivamente all'interno del settore oggetto di monitoraggio sono stati collocati 98 dosimetri da cui sono stati ricavati 27 dati analitici.

Fig. 7.5 – Cartografia di un settore del Complesso carsico del monte Corchia dove sono stati posizionati i dosimetri per il radon; in colore il percorso destinato a fruizione turistica.

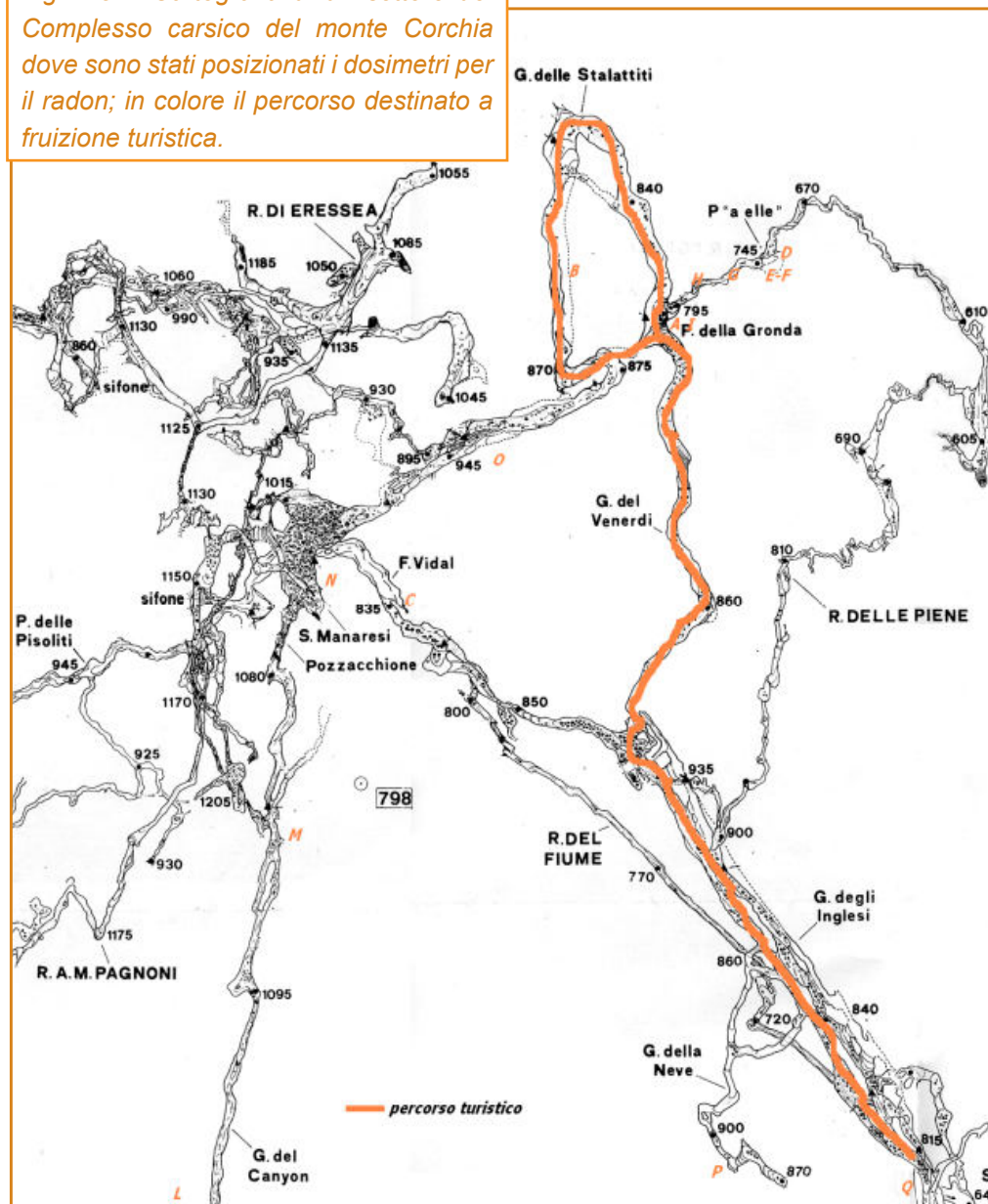




Fig. 7.6 – Discesa nella zona del pozzo a Elle, verso il fondo del Complesso carsico del monte Corchia, durante il posizionamento dei dosimetri per il radon.



Fig. 7.7 – Inizio della discesa del pozzo delle Lame durante il posizionamento dei dosimetri per il radon entro il Complesso carsico del monte Corchia.

Risultati

Nella **Tab. 7.1** è riportata la concentrazione media di radon misurata in ciascun punto ed il relativo periodo di misura, da cui è possibile avere

un'indicazione sull'andamento temporale della concentrazione di radon all'interno del settore indagato del complesso carsico.

Posizionamento	Postazione cartina	Data collocamento	Data recupero	Concentrazione radon Bq/m ³	Incertezza (k=2) Bq/m ³
Sommità del Pozzo della Gronda	A	17/12/2008	15/04/2009	900	200
		13/11/2009	03/05/2010	950	210
Galleria Alta delle Stalattiti	B	17/12/2008	15/04/2009	480	110
		13/11/2009	03/05/2010	530	120
A monte della cascata del Vianello-Vidal	C	17/12/2008	15/04/2009	190	50
		13/11/2009	03/05/2010	180	40
Alla base del Pozzo a Elle - Quota m 658	D	06/08/2009	13/11/2009	680	150
		13/11/2009	03/05/2010	1200	270
Pianoro sopra Pozzo a Elle - Saltino a quota m 707- Post. 2A	E	06/08/2009	13/11/2009	690	150
		13/11/2009	03/05/2010	1220	270
Pianoro sopra Pozzo a Elle - Saltino a quota m 707- Post. 2B	F	06/08/2009	13/11/2009	690	150
Zona Pozzo a Elle-Saletta del meandro - Quota m 731	G	13/11/2009	13/11/2009	660	150
		06/08/2009	03/05/2010	770	240

Posizionamento	Postazione cartina	Data collocamento	Data recupero	Concentrazione radon Bq/m ³	Incertezza (k=2) Bq/m ³
Base pozzo della Gronda -Terrazzino inizio ramo delle eccentriche Quota m 743	H	06/08/2009	13/11/2009	680	150
		13/11/2009	03/05/2010	1300	280
Base del Pozzo della Gronda Quota m 753	I	06/08/2009	16/09/2009	460	110
		13/11/2009	03/05/2010	1000	220
Zona del Canyon-Grande galleria dopo discesa zona scisti a cloritoide	L	03/12/2009	23/04/2010	40	10
		23/04/2010	15/11/2010	320	70
Zona del Canyon Anfratto a sin., 6 m prima del bivio pozzo Bertarelli	M	03/12/2009	23/04/2010	80	20
		23/04/2010	15/11/2010	360	80
Salone Manaresi (Ripiano sabbioso verso il Valinor)	N	03/12/2009	23/04/2010	80	20
		23/04/2010	15/11/2010	350	80
Sommità del pozzo del Portello	O	03/12/2009	23/04/2010	190	50
		23/04/2010	15/11/2010	360	80
Galleria delle Neve Sommità della galleria	P	15/02/2010	27/10/2010	230	50
Piccolo anfratto sotto Pozzo Empoli	Q	15/02/2010	27/10/2010	310	70

Tab. 7.1 - Concentrazione di radon nei punti di campionamento nei vari periodi di misura.

Nella successiva **Tab. 7.2**, sono riportati i medesimi valori di concentrazione di radon divisi nelle diverse stagioni ed alle differenti quote dei punti di campionamento. Si noti che nei punti che si trovano a quote inferiori alla quota della galleria turistica,

evidenziati in Tab. con uno sfondo in colore, durante il periodo invernale la concentrazione è più elevata che in quello estivo, mentre il comportamento si inverte nei punti situati a quote più elevate del percorso turistico.

Posizionamento	Postazione cartina	Quota stimata (m s.l.m)	Concentrazione periodo estivo (Bq/m ³)	Concentrazione periodo invernale (Bq/m ³)
Sommità del Pozzo della Gronda	A	795	-	900±200
			-	950±210
Galleria Alta delle Stalattiti	B	840	-	480±110
			-	530±120
A monte della cascata del torrente Vianello-Vidal	C	790	-	190±50
			-	180±40
Alla base del Pozzo a Elle - Quota m 658	D	658	680±150	-
			-	1200±270
Pianoro sopra Pozzo a Elle Saltino a quota m 707-Post. 2A	E	707	690±150	-
			-	1220±270
Pianoro sopra Pozzo a Elle Saltino a quota m 707-Post. 2B	F	707	690±150	-
Zona Pozzo a Elle Saletta del meandro - Quota m 731	G	731	660±150	-
			-	770±240
Base pozzo della Gronda - Terrazzino inizio ramo delle eccentriche - Quota m 743	H	743	680±150	-
			-	1300±280
Base del Pozzo della Gronda - Quota m 753	I	753	460±110	-
			-	1000±220
Zona del Canyon - Grande galleria dopo discesa zona scisti a cloritoide	L	1090	-	40±10
			320±70	-
Zona del Canyon - Anfratto a sin, 6 m prima del bivio pozzo Bertarelli	M	1080	-	80±20
			360±80	-
Salone Manaresi (ripiano sabbioso verso il Valinor)	N	1020	-	80±20
			350±80	-
Sommità del pozzo del Portello	O	855	-	190±50
			360±80	-
Galleria delle Neve - Sommità della galleria	P	825	230±50	-
Piccolo anfratto sotto Pozzo Empoli	Q	832	310±70	-

Tab. 7.2 - Concentrazione di radon nei punti di campionamento con indicazione della stagione e della quota in metri slm.

Valutazioni dei risultati

Nei settori oggetto di misura del radon, pur avendo escluso le zone vicine agli ingressi, si ha una marcata variazione della ventilazione fra l'estate e l'inverno, sia come verso che come intensità. La ventilazione del Complesso carsico del monte Corchia è determinata dalla posizione dei numerosi ingressi (circa 20) dislocati a quote altimetriche molto differenti, tanto da essere differenziati in ingressi alti ed in ingressi bassi. La differenziazione è di natura sostanziale, in quanto, ad esempio, negli ingressi bassi fluisce aria verso l'interno della grotta durante il periodo invernale e fuoriesce durante il periodo estivo.

Si definisce quindi regime invernale della grotta la circolazione che si instaura con l'aria entrante attraverso gli ingressi bassi e con la sua fuoriuscita dagli ingressi alti localizzati nella parte più elevata della montagna.

Durante il periodo estivo avviene il processo inverso. In funzione della temperatura esterna, si osservano flussi di aria, sia in ingresso che in uscita, anche di forte intensità; in giornate particolarmente fredde, l'aria che entra riesce a far abbassare la temperatura all'interno della grotta per lunghi tratti, fino anche a 500 m dall'ingresso, ovvero per tutta la Galleria degli Inglesi. Quindi, per quanto riguarda i movimenti dell'aria entro il Complesso carsico del monte Corchia, questo è quello che avviene in linea generale, tuttavia in relazione alle particolarità

stagionali non è da escludere che, in alcuni periodi dell'anno, soprattutto nei mesi di novembre o dicembre, la grotta presenti un'alternanza del regime estivo ed invernale che addirittura può verificarsi nell'arco delle 24 ore. La circolazione dell'aria ipogea è quindi molto complessa e ciò influisce sulla distribuzione del radon entro il complesso carsico.

Le prime misure di radon entro il Complesso carsico del monte Corchia risalgono alla fine degli anni '90 (Montigiani A., et al., 2002). La concentrazione di radon nell'aria, fu misurata in due periodi della durata di circa 3 mesi ciascuno, nel corso dell'estate 1997 e dell'inverno 1997/98. Le misure furono effettuate con l'impiego di rivelatori a tracce del tipo LR-115 in 25 postazioni dislocate lungo le gallerie che sarebbero poi divenute oggetto del percorso turistico della grotta.

Fu riscontrato che nel periodo estivo la concentrazione di radon era praticamente costante in tutto il percorso, invece nel periodo invernale si osservò un andamento decrescente della concentrazione a partire dalla postazione più interna. Si ritenne pertanto che l'origine del radon fosse riconducibile alla presenza di rocce contenenti uranio, prevalentemente localizzate nella formazione del basamento paleozoico (porfiroidi, scisti porfirici) sopra cui poggia la formazione carbonatica oggetto del carsismo che

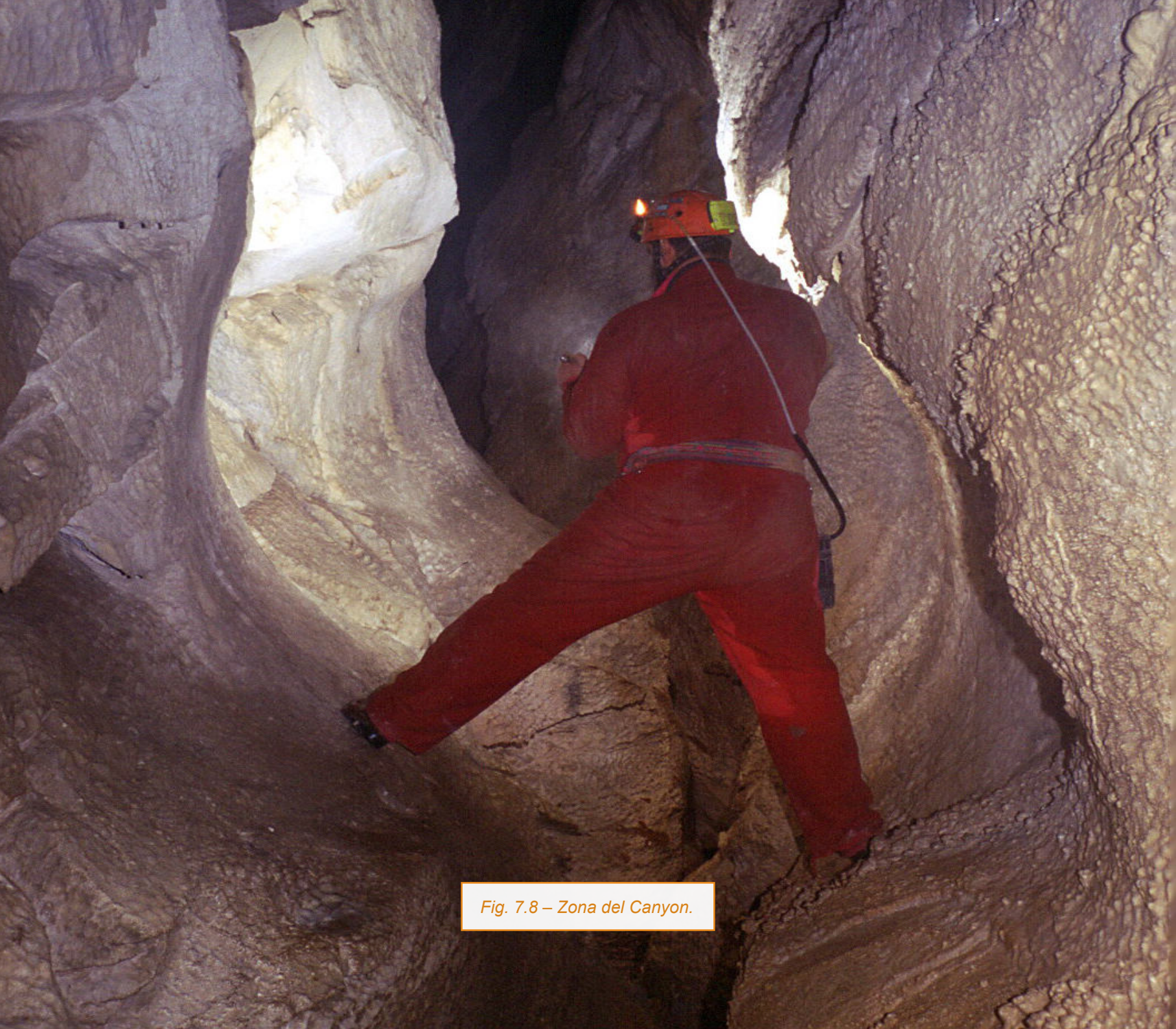


Fig. 7.8 – Zona del Canyon.

ha prodotto la rete di gallerie: da ciò deriva che maggiori concentrazioni di radon si riscontrino nella parte più profonda della grotta.

I risultati ricavati erano, ad una prima analisi, coerenti con gli schemi della circolazione dell'aria nei due periodi corrispondenti. Infatti si osserva che durante il periodo estivo, con circolazione discendente, il tratto esaminato non riceve aria dalle parti profonde, mentre in inverno, con circolazione ascendente, si ha risalita di aria dalle parti profonde del complesso carsico. Il livello medio di concentrazione di radon misurato all'epoca fu circa 300 Bq/m³ nelle 2 stagioni indagate, con un valore massimo di 450 Bq/m³ e un valore minimo di 140 Bq/m³.

I dati ricavati dalla campagna del 2008-2010 confermano la presenza di concentrazioni più elevate di radon nelle zone più profonde della grotta (stazioni di misura D, E, F, G, H, I), lungo quella che costituisce la direttrice principale verso il fondo del complesso carsico (pozzo della Gronda - pozzo a Elle) con una marcata variabilità stagionale (*Tab. 7.2*) ed una concentrazione maggiore di radon durante il periodo invernale. La concentrazione media di radon su tutto il periodo di esposizione in questa area è costantemente superiore a 500 Bq/m³, valore limite per ambienti dove vengono svolte attività lavorative, fino ad un massimo di 1300 Bq/m³; tuttavia il superamento del valore limite, applicabile in ambienti lavorativi/abitativi, in

un ambiente carsico frequentato esclusivamente da speleologi non costituisce un fattore di rischio di esposizione in quanto i tempi di permanenza sono molto ridotti.

Valori costantemente più bassi (valore medio intorno a 250 Bq/m³) si osservano nell'area superiore del complesso carsico (zona del Canyon e pozzi da lì discendenti); tali bassi valori sono imputabili sia alla distanza dalle zone più profonde, da cui si presume l'origine della risalita del radon, sia alla notevole ventilazione di quel settore; non a caso l'ingresso relativo di questo settore del complesso carsico si chiama Buca d'Eolo. È comprensibile che nei punti L, M, N e O la concentrazione minore venga riscontrata durante il periodo invernale in quanto è il periodo in cui si hanno intensi flussi di aria esterna entranti nella grotta.

I punti denominati A, B, C, P e Q non sono molto distanti dalle gallerie del percorso turistico; ad eccezione del punto A (sommità pozzo della Gronda) dove è stato trovato costantemente un valore di circa 900 Bq/m³ durante i differenti periodi di monitoraggio, gli altri valori registrati nei punti prossimi al percorso turistico, compresi fra 180 e 510 Bq/m³, non si discostano da quelli ricavati durante la campagna negli anni 1997-98 che fu effettuata esclusivamente nel settore che poi sarebbe stato destinato alla fruizione turistica.

Conclusioni

Il radon nell'atmosfera delle grotte costituisce un parametro di notevole interesse, soprattutto per verificare l'esposizione dei soggetti che devono permanervi a lungo, come le guide che svolgono attività nelle grotte turistiche, infatti la maggior parte di queste grotte è oggetto di misurazioni.

Per quanto riguarda il Complesso carsico del monte Corchia, i dati fino ad oggi disponibili derivano sia dalla campagna del 1997-1998, sia da quella del 2008-2010.

Nel settore dove è allestito il percorso turistico, che interessa solo 1,4 km della grotta, i dati ricavati dalla campagna del 1997-1998 indicano valori compresi fra 140 Bq/m³ e 450 Bq/m³ con un valore medio di circa 300 Bq/m³.

Durante la campagna 2008-2010 sono stati monitorati settori della grotta posti alcune centinaia di metri sia più in alto che più in basso rispetto al percorso turistico.

Nella zona superiore sono state misurate basse concentrazioni di radon (200 - 300 Bq/m³), mentre valori mediamente più elevati (circa 700 - 1000 Bq/m³) sono state registrati man mano che si scende nelle zone più profonde.

I dati fino ad oggi disponibili sul radon entro il Complesso carsico del monte Corchia sono relativi ad una fascia fra 650 m s.l.m e 1100 m s.l.m, un intervallo comunque non molto ampio se si pensa alla profondità della grotta che è quasi 1200 metri. Per una comprensione maggiore della distribuzione di questo gas resta indispensabile un'estensione del monitoraggio ad altri settori, dislocati soprattutto su differenti altitudini.

*Il testo del capitolo è tratto da: 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)*, Bollettino degli esperti ambientali, n. 1, p. 24-34, 2016.

Pubblicazione autorizzata da: Unione italiana degli Esperti Ambientali (UnIdea).

I ciottoli della Galleria Franosa

Entro il Complesso carsico del monte Corchia, prevalentemente nella parte di grotta destinata a fruizione turistica e in settori limitrofi, sono state fatte ricerche sui paleociottoli, cioè sui frammenti di roccia che sono stati sottoposti a prolungati fenomeni di rotolamento entro gli antichi corsi d'acqua (*paleoflussi*) ed hanno pertanto assunto

forme rotondeggianti.

Sulla base delle caratteristiche morfologiche dei ciottoli si è cercato di ottenere informazioni sul tipo di processo idraulico, in termini di energia del paleoflusso, che ha portato alle strutture morfometriche attualmente rilevabili.



Fig. 8.1 - Grande ciottolo in marmo raccolto nel giacimento alla base della Galleria Franosa, che porta in direzione del pozzo Suzanne.

I ciottoli in Corchia rivestono un sicuro interesse, non solo per le loro caratteristiche morfologiche riconducibili ai paleoflussi idrici trascorsi, ma anche e soprattutto per la loro natura litologica.

Ad esempio è noto il Ramo dei Conglomerati, una zona del complesso carsico del monte Corchia a quota intorno a quota 1450 m dove sono frequenti ciottoli alloctoni riconducibili ad arenarie non metamorfiche: si tratta di un tipo di rocce, non presenti attualmente sul monte Corchia e nei dintorni (Piccini, 2011), il che suscita interrogativi sulla loro origine.

Nel settore di grotta destinato a fruizione turistica e dintorni, i ciottoli appaiono scarsamente diffusi; ad esempio nell'area del torrente Vianello-Vidal i ciottoli trovati, di formazione in tempi recenti, sono di dimensioni molto piccole ed irregolari, quindi di scarso utilizzo per un confronto con quelli dei depositi più antichi, mentre quelli di un certo interesse erano spesso concrezionati al suolo. Situazione analoga è stata trovata nella zona sottostante la zona del pozzo del Portello. In gran parte delle gallerie percorse in questa area si trovano depositi di rocce a spigoli vivi in quanto connessi a frane avvenute in ambienti privi di circolazione d'acqua. L'unica zona che al momento ha dato interessanti riscontri è solo un piccolo tratto distante circa 10 metri dalla base di un piccolo salto attrezzato con corda a nodi che si origina poco dopo il termine delle passerelle in discesa della Galleria Franosa e l'inizio del tratto

di passerella orizzontale che permette di superare alcune voragini che interrompono il percorso della Galleria degli Inglesi (Fig. 8.2 e 8.3).



Fig. 8.2 - Affioramento di ciottoli ad inizio galleria che conduce al pozzo Suzanne (base della Galleria Franosa).

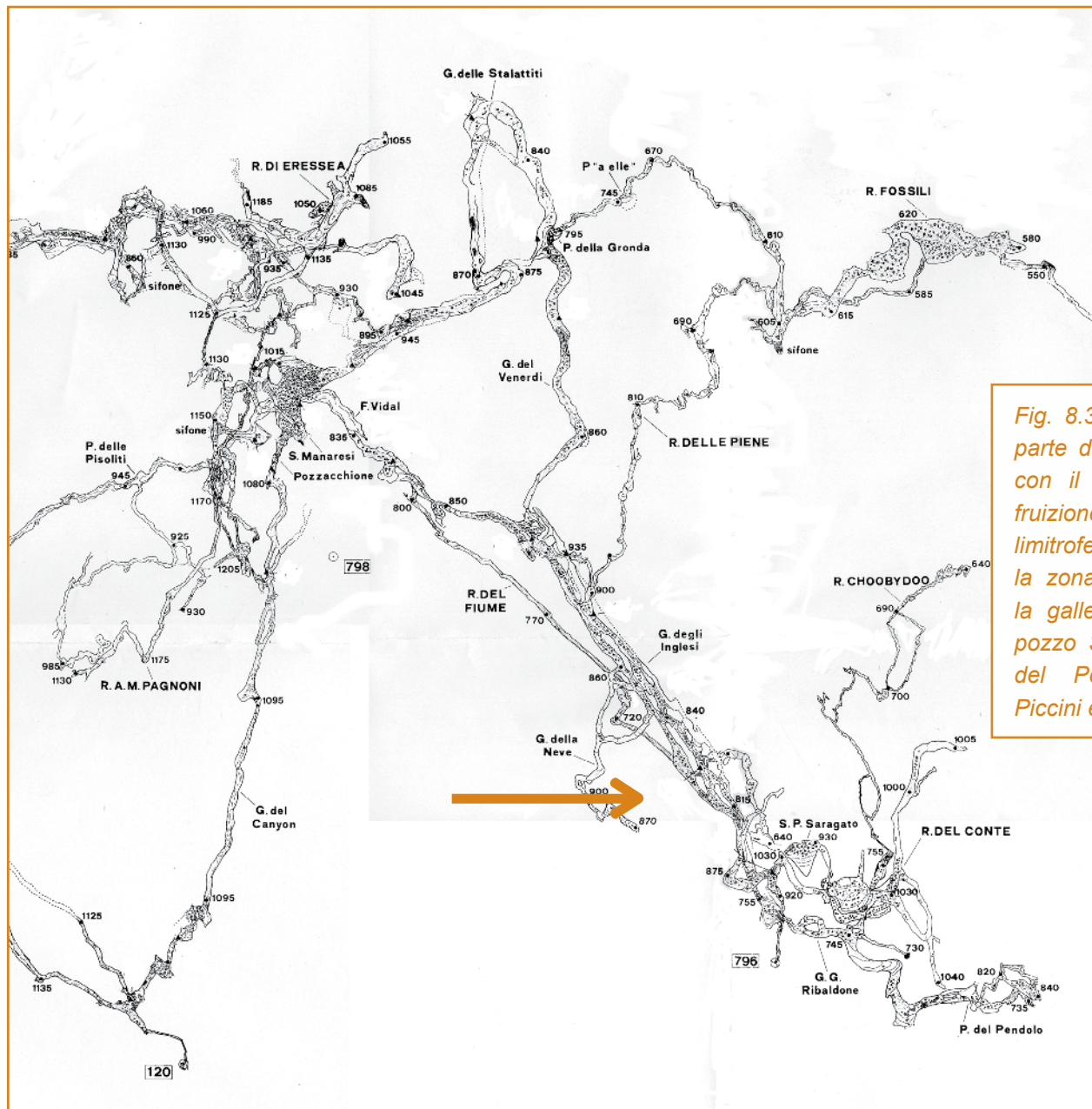


Fig. 8.3 - Cartografia di una parte dell'Antro del Corchia con il settore destinato a fruizione turistica e aree limitrofe. La freccia indica la zona dove è localizzata la galleria che conduce al pozzo Suzanne e al pozzo del Pendolo (Cartografia Piccini e Fallani, 1990).

La galleria di interesse presenta pareti dove sono evidenti estese serie di scallops che indicano importanti flussi di acqua in passato in quella zona. I ciottoli sono mescolati a terreno incoerente di tipologia calcareo-argillosa (Fig. 8.4).

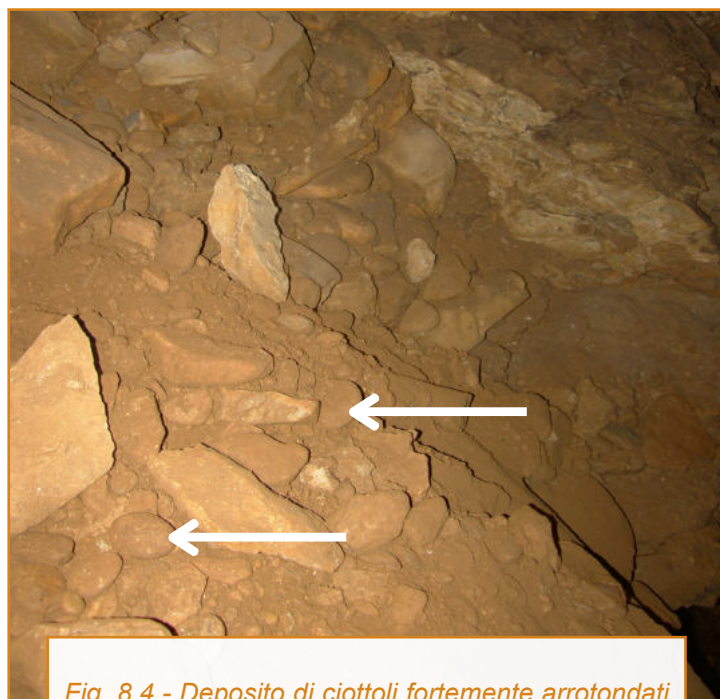


Fig. 8.4 - Deposito di ciottoli fortemente arrotondati entro un sedimento a granulometria variabile formato da materiale di natura calcareo - argilloso.

I ciottoli raccolti nella galleria sono stati oggetto di misurazione e attualmente si trovano nello stesso posto della raccolta (Fig. 8.5). I ciottoli oggetto del presente lavoro sono prevalentemente di natura carbonatica (marmi e grezzoni); sono comunque presenti anche ciottoli formati da scisti e arenarie.

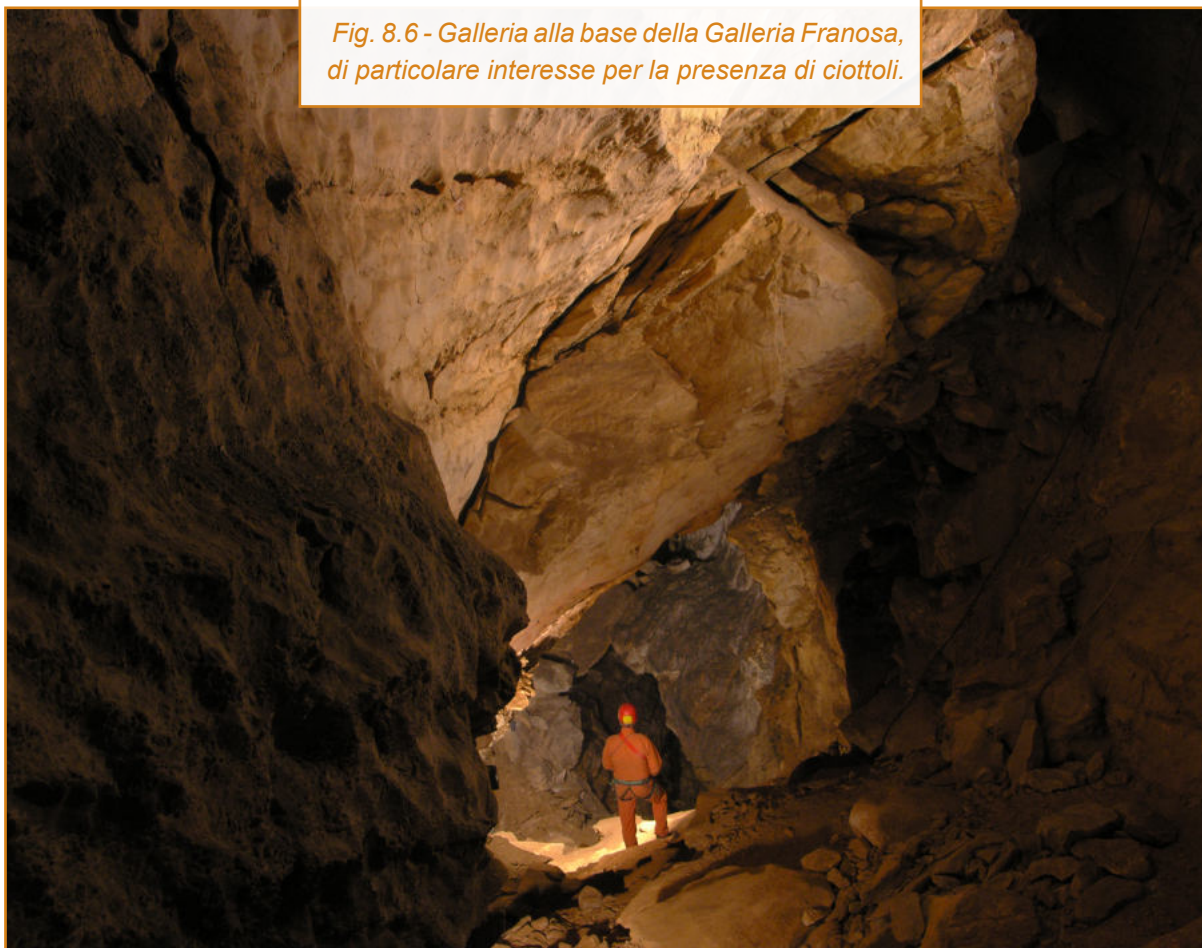


Fig. 8.5 - Alcuni dei ciottoli di natura prevalentemente carbonatica raccolti nella galleria e oggetto di misurazione (sono comunque presenti anche ciottoli formati da scisti e arenarie).

Nell'allegato 1 - "Note di metodo in tema di morfometria dei ciottoli fluitati della Galleria Franosa", al di là della fondamentale indagine sulla provenienza e sulla litologia dei paleociottoli, si propone un paradigma interpretativo relativo al contenuto energetico dei processi fluviali che hanno

condotto alla morfometria attualmente leggibile. Si tratta di un tentativo di interpretazione fondato sulla teorizzazione del processo che ha prodotto le forme arrotondate e quindi di un tentativo di estrarre utili informazioni sul processo genetico nel suo complesso.

Fig. 8.6 - Galleria alla base della Galleria Franosa, di particolare interesse per la presenza di ciottoli.





Tratto di galleria che, dalla base della Galleria Franosa, si porta in direzione del pozzo Suzanne dove sono stati rivenuti ciottoli.

Concluso il periodo di monitoraggio ante e post operam, negli anni successivi il sistema di acquisizione dei parametri meteorologici installato nell'Antro del Corchia è stato comunque mantenuto in funzione, grazie alla volontà ed al lavoro di due appassionati speleologi come Franco Occhini e Francesco De Sio che hanno provveduto, nei limiti delle risorse, alla manutenzione e sorveglianza della strumentazione installata e destinata allo studio e protezione del sistema ipogeo.

Una nuova acquisizione sistematica dei dati microclimatici interni è stata quindi resa possibile, a partire dal 2018, in occasione dell'installazione da parte di ARPAT nell'ambito del Progetto CAVE di una stazione ipogea di monitoraggio della qualità delle acque lungo il Torrente Vianello-Vidal, con interventi di aggiornamento sul sistema di acquisizione e di trasmissione dei dati.



Fig. 9.1 - Postazione stazione meteorologica Galleria Alta Stalattiti.

I dati registrati ogni 15 minuti dalle tre stazioni microclimatiche interne ad oggi disponibili sono riassunti nella **Tab. 9.1**.

Come osservazione generale si può rilevare come la variabilità diminuisca, come atteso, procedendo dalla Galleria Franosa a quella del Venerdi e delle Stalattiti, verso l'interno della grotta.

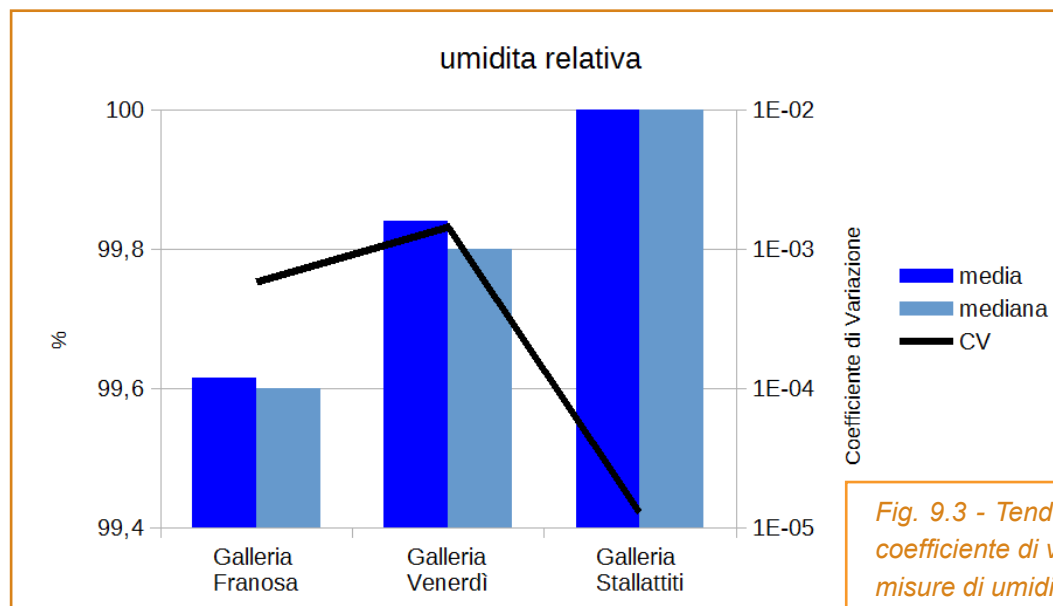
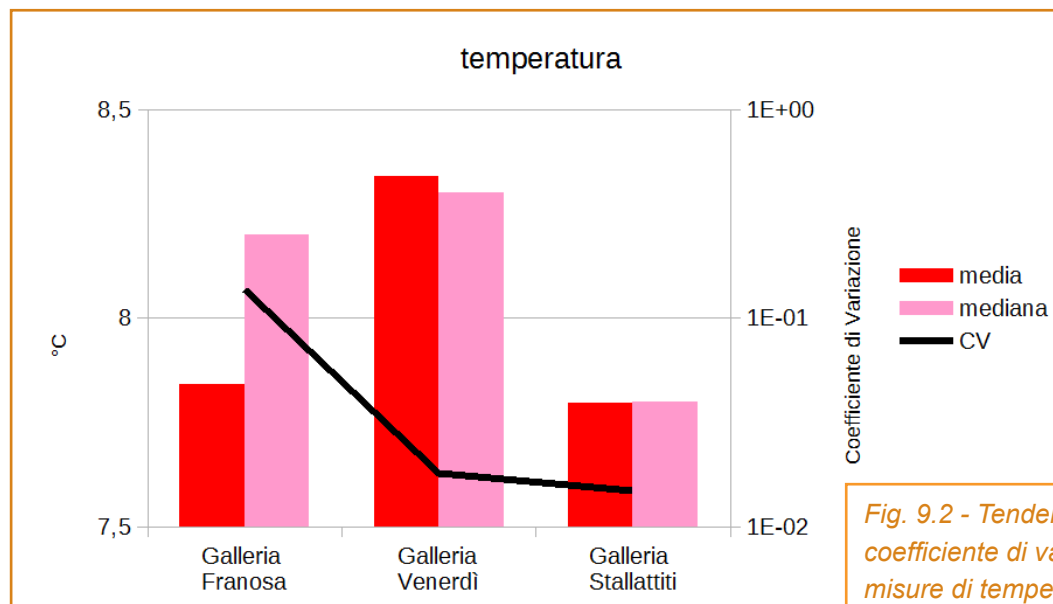
Il coefficiente di variazione della temperatura, dato dal rapporto tra deviazione standard e media aritmetica, diminuisce da 0,1 a 0,02 a 0,01 come per la velocità dell'aria con $5 > 1,6 > 1,3$ e, in definitiva,

per l'umidità che presenta i valori del coefficiente di variazione CV più bassi in assoluto per la Galleria delle Stalattiti. L'interpretazione di queste piccole differenze di umidità, per quanto rese robuste dalla numerosità, richiede una certa cautela tenuto conto della prossimità alla saturazione e dell'errore strumentale.

I grafici, con la parziale eccezione dell'umidità, evidenziano la variabilità distintamente alta per la prima stazione della Galleria Franosa e più bassa e comparabile per le altre due (**Fig. 9.2; 9.3 e 9.4**).

Stazione	Parametro	Anni	da	a	N	min	max	media	mediana	CV
Galleria Franosa	temperatura	12	2006	2020	505069	4,0	10,0	8,2	7,8	0,1
	umidità	12	2006	2020	508981	99,5	100,0	99,6	99,6	0,0006
	velocità aria	12	2006	2020	508717	-0,3	1,0	-0,06	-0,02	5,0
Galleria del Venerdi	temperatura	12	2006	2020	455080	8,1	9,0	8,3	8,3	0,02
	umidità	12	2006	2020	455095	99,5	100,0	99,8	99,8	0,001
	velocità aria	12	2006	2020	455095	-0,6	1,0	-0,07	-0,06	1,6
Galleria delle Stalattiti	temperatura	9	2006	2020	209926	7,3	8,4	7,8	7,8	0,01
	umidità	7	2006	2020	184078	99,7	100,0	100	100,0	0,00001
	velocità aria	9	2006	2020	209915	-0,40	0,36	-0,08	-0,08	1,3

Tab. 9.1 - Statistiche descrittive dei dati a 15' acquisiti dalle stazioni microclimatiche interne nel periodo 2006-2020: temperatura aria °C, umidità relativa %, velocità dell'aria m/s (positiva flusso entrante, negativa flusso uscente), N numero di misure, CV coefficiente di variazione.



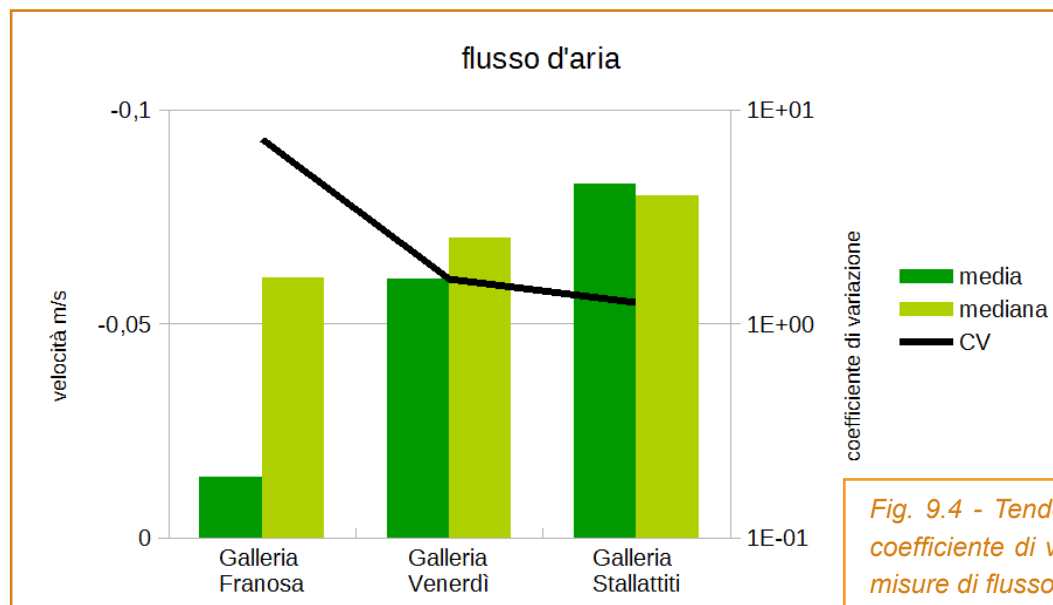


Fig. 9.4 - Tendenze centrali e coefficiente di variazione delle misure di flusso d'aria m/s.

Dal settembre 2018 è stata nuovamente resa operativa una stazione mobile pluviometrica fornita da ARPAT e installata sopra l'ingresso artificiale della grotta turistica alla quota di 884 m. La stazione dispone attualmente di dati come aggregati giornalieri (Tab. 9.2).

Nella (Fig. 9.5) sono riportati gli andamenti di pioggia e temperatura registrati alla stazione tra il 14/08/2018 ed il 9/12/2020. La serie delle temperature risulta continua mentre la serie delle precipitazioni evidenzia una lunga interruzione da febbraio a luglio 2020.

Stazione	Parametro	Anni	da	a	N	min	max	media-na	media	CV
Ingresso turistico	Pioggia	3	2018	2020	779	0	161	0	3,6	3,3
	Temperatura	3	2018	2020	770	0	26,3	10,1	12	0,5

Tab. 9.2 - Statistiche descrittive dei dati giornalieri derivati dalla stazione Ingresso Turistico dell'Antro del Corchia nel periodo 2018-2020: pioggia mm/giorno, temperatura media giornaliera °C, N numero di misure, CV coefficiente di variazione.

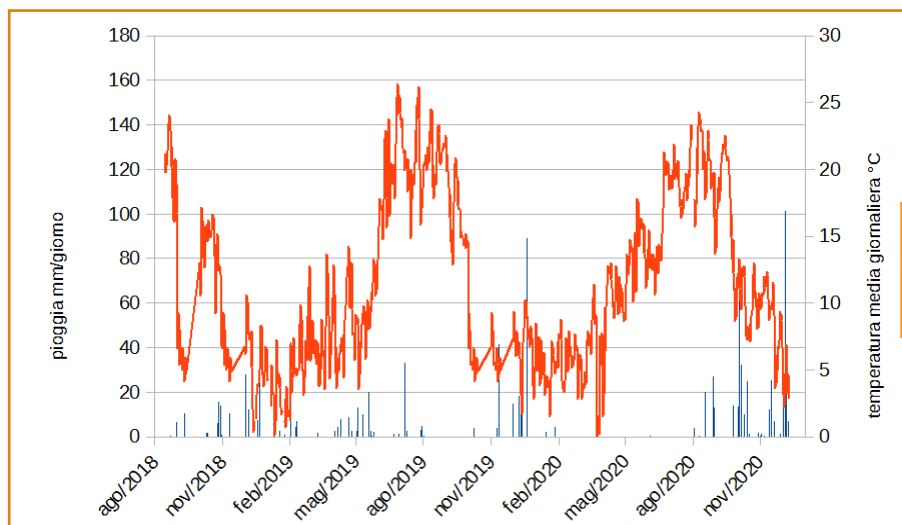
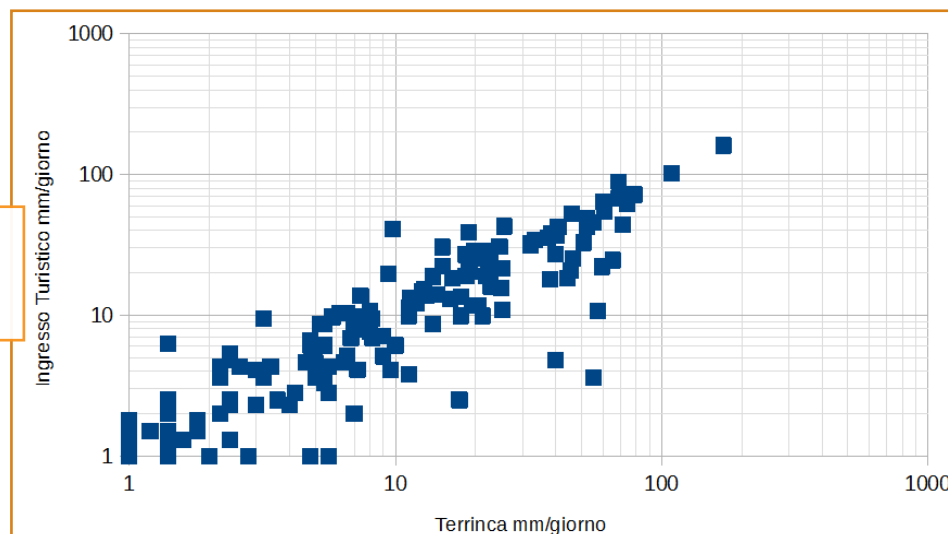


Fig. 9.5 - Precipitazioni e temperature giornaliere alla stazione Ingresso Turistico.

L'importanza di una stazione meteo di prossimità per il sistema di monitoraggio dell'Antro del Corchia è resa evidente dalla **Fig. 9.6** di correlazione tra le precipitazioni giornaliere misurate dalla stazione

dell'Ingresso turistico con le precipitazioni della stazione del Servizio Idrologico Regionale di Terrinca. Valori dispersi si riscontrano soprattutto per eventi con intensità < 60 mm/giorno.

Fig. 9.6 - Confronto precipitazioni giornaliere Terrinca - Ingresso Turistico Corchia.



Le stazioni pluviometriche di Terrinca e termometrica di Campagrina qui utilizzate come riferimento dispongono, infine, dei dati riportati nella **Tab. 9.3**.

L'analisi delle serie temporali ha previsto innanzitutto la derivazione degli aggregati giornalieri e mensili per le stazioni interne oltre che per l'ingresso turistico e le stazioni pluviometriche e termometriche di Terrinca e Campagrina.

L'analisi è stata condotta attraverso il software statistico R⁽¹⁾ che mette a disposizione una serie di strumenti per estrarre preziose informazioni dai dati

raccolti e soprattutto la tecnica di “*decomposizione*” delle serie temporali.

La procedura di decomposizione della serie permette di derivare tre distinte componenti indicate come *trend*, *seasonal* e *random*. La componente di tendenza generale (*trend*) descrive l'andamento pluriennale, semplificato ed isolato dalle altre due componenti stagionale (*seasonal*) e di disturbo o casuali (*random*). Stagionalità e tendenze generali sono state confrontate tra loro e con le stazioni di riferimento del Servizio Idrologico Regionale.

Stazione	Parametro	Anni	da	a	N	min	max	media	mediana	CV
Campagrina	Temperatura	20	2001	2020	6593	-9,6	27,15	9,75	10	0,66
Terrinca	Pioggia	17	2004	2020	6208	0	207	0	6,2	2,6

Tab. 9.3 - Statistiche descrittive dei dati giornalieri delle stazioni regionali Terrinca e Campagrina nel periodo 2001-2021: pioggia mm/giorno, temperatura media giornaliera °C, N numero di misure, CV coefficiente di variazione.

Temperatura

Nelle figure seguenti (**Fig. 9.7; 9.8; 9.9; 9.10 e 9.11**) sono riportate le elaborazioni per le medie mensili del parametro temperatura relative alle tre stazioni interne, la stazione esterna locale Ingresso Turistico e la stazione esterna di riferimento di Campagrina. Le ordinate dei grafici temporali delle stazioni interne rendono evidente la maggiore escursione termometrica della Galleria Franosa (3 °C tra 6 e 9

°C) rispetto alla Galleria del Venerdì (0,5 °C tra 8,1 ed 8,6) ed alla Galleria delle Stalattiti (0,4 °C tra 7,6 ed 8,0 °C), quest'ultima limitatamente al periodo recente 2018-2020.

La stazione locale esterna Ingresso Turistico dispone ancora di poche annualità mentre una ben più consistente serie è offerta dalla stazione termometrica di Campagrina.

⁽¹⁾The R Project for Statistical Computing <https://www.r-project.org/>

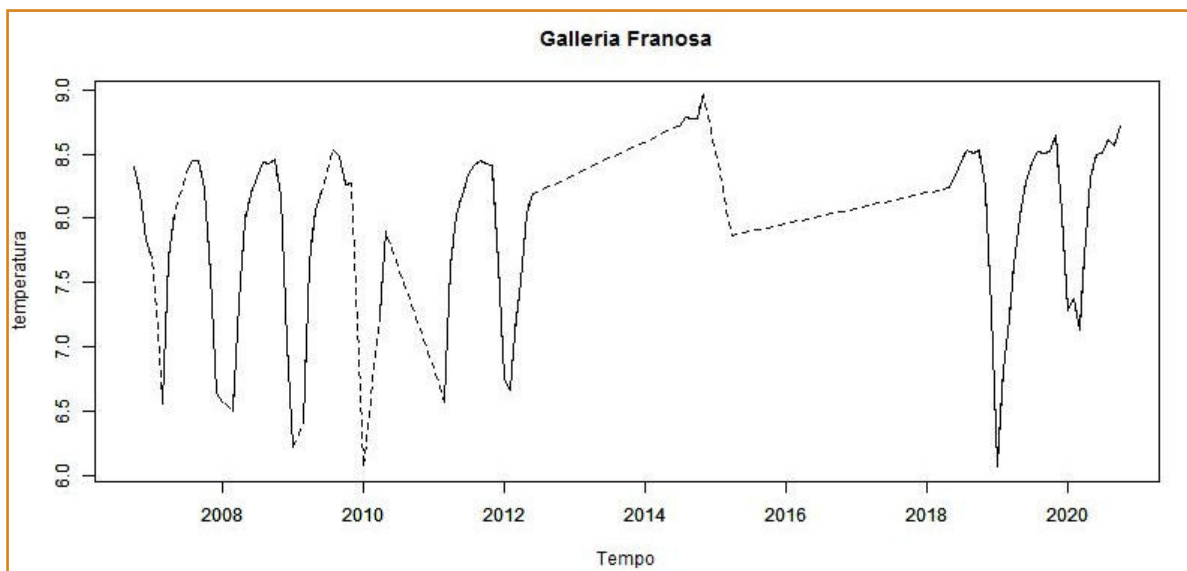


Fig. 9.7 - Galleria Franosa - serie temporale della temperatura media mensile.

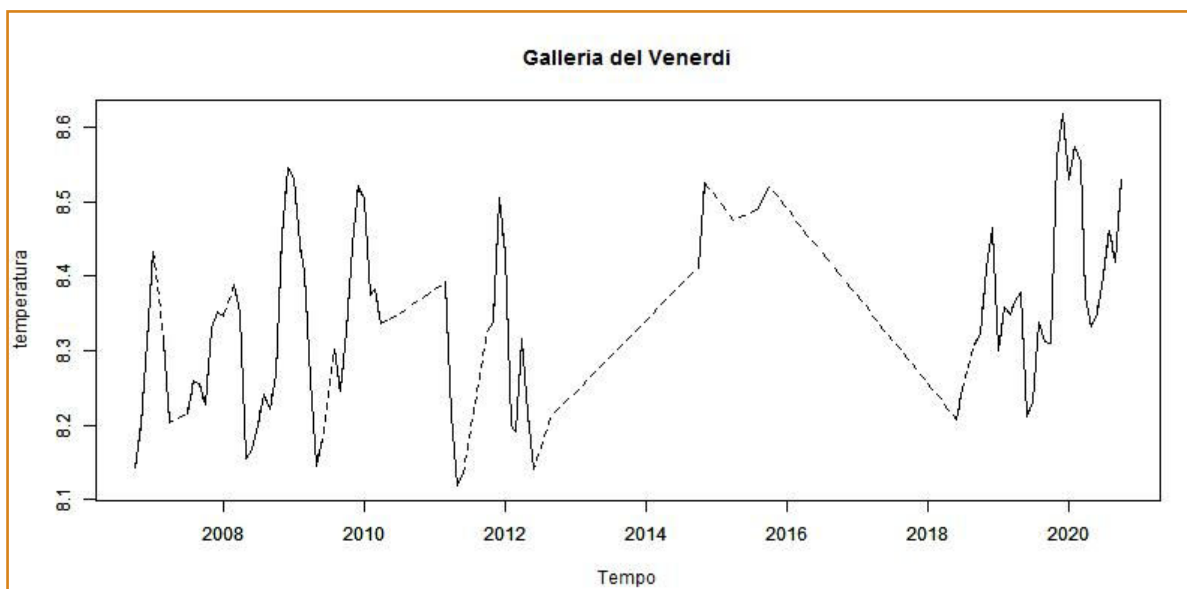


Fig. 9.8 - Galleria del Venerdì - serie temporale della temperatura media mensile.

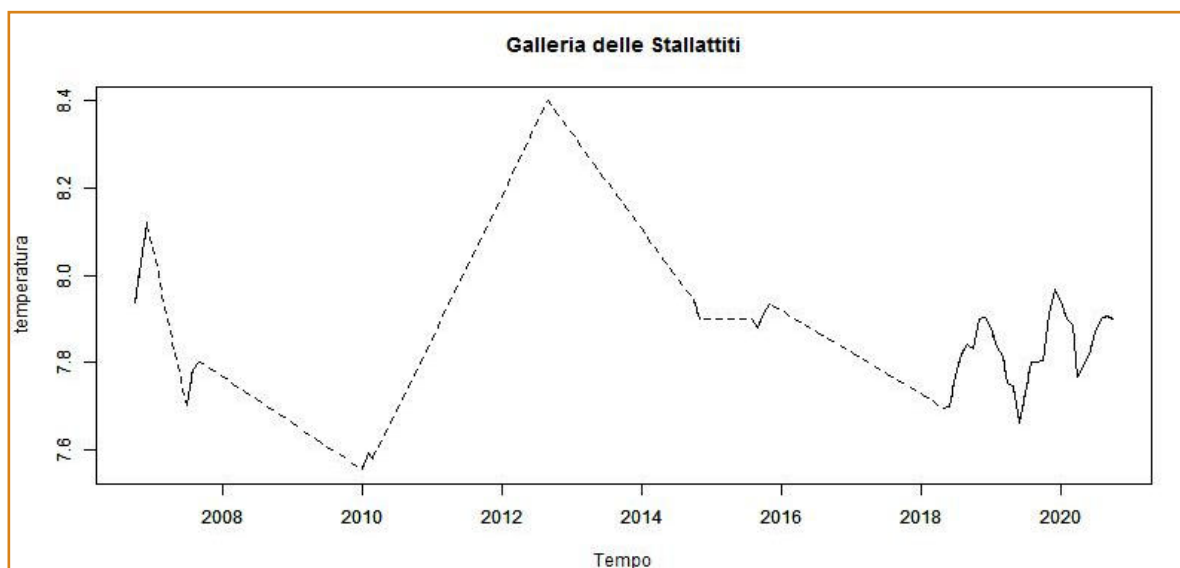


Fig. 9.9 - Galleria delle Stalattiti - serie temporale della temperatura media mensile.

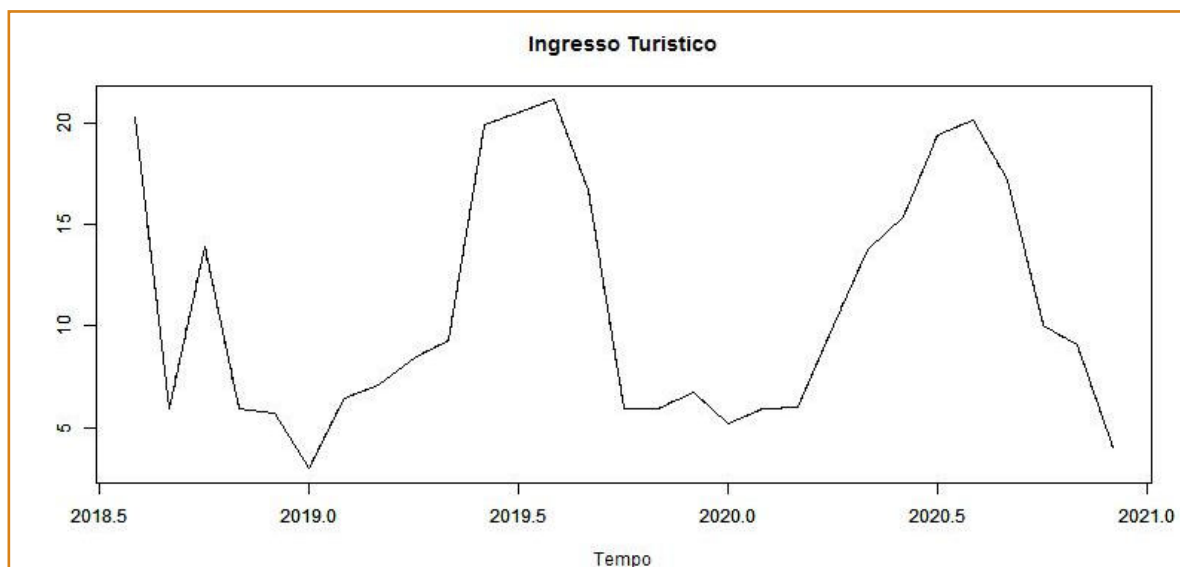


Fig. 9.10 - Ingresso Turistico Antro del Corchia - serie temporale della temperatura media mensile.

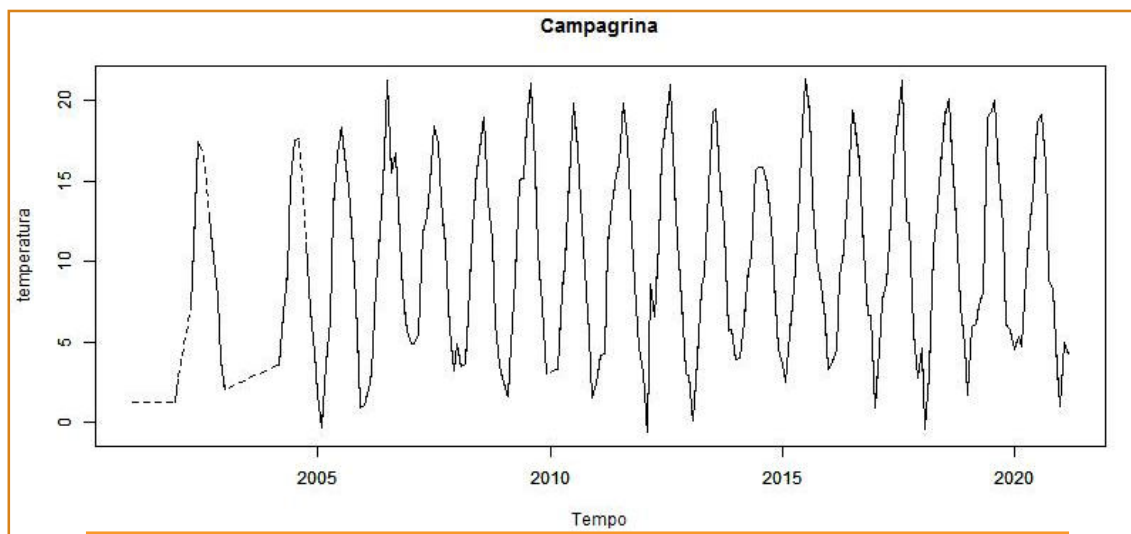


Fig. 9.11 - Campagrina - serie temporale della temperatura media mensile.

Decomposizione

Nel periodo 2012–2018 i dati per le stazioni interne sono purtroppo scarsi e le frequenti interruzioni separano irrimediabilmente la serie in due porzioni. Le elaborazioni dei grafici di decomposizione ed autocorrelazione sono state così limitate al periodo 2006-2012 per le sole Galleria Franosa e del Venerdì. Anche nel periodo iniziale, infatti, la Galleria delle Stalattiti ha dati non sufficienti.

La serie ristretta analizzata da ottobre 2006 a settembre 2012 per la Galleria Franosa e la Galleria Venerdì presenta ancora una vistosa lacuna da giugno 2010 a febbraio 2011 che l'algoritmo della decomposizione sembra, in parte, assorbire.

Per la Galleria delle Stalattiti la serie analizzata riguarda le sole acquisizioni recenti dal maggio 2018 ad ottobre 2020.

Nella **Galleria Franosa** la decomposizione della serie mette in evidenza, nella componente trend, un decremento iniziale da 7,9 a 7,6 °C fino a metà 2007 cui segue un andamento stazionario fino al 2010 da qui una brusca ed importante diminuzione, in parte dubbia data la coincidenza con la lacuna prima notata, fino ad un minimo pronunciato nel maggio 2010 di 7,1 °C. Segue una risalita rapida fino a recuperare con 7,8 °C i valori iniziali del 2006. La stagionalità ha nel complesso un'escursione di 2 °C con massimi estivi (+ 0,7 °C agosto) e minimi invernali (-1,3 °C febbraio). La componente random varia tra - 0,5 a + 0,5 °C segnando i valori massimi, com'era da attendersi, in coincidenza della lacuna prima vista tra 2010 e 2011 (*Fig. 9.12*).

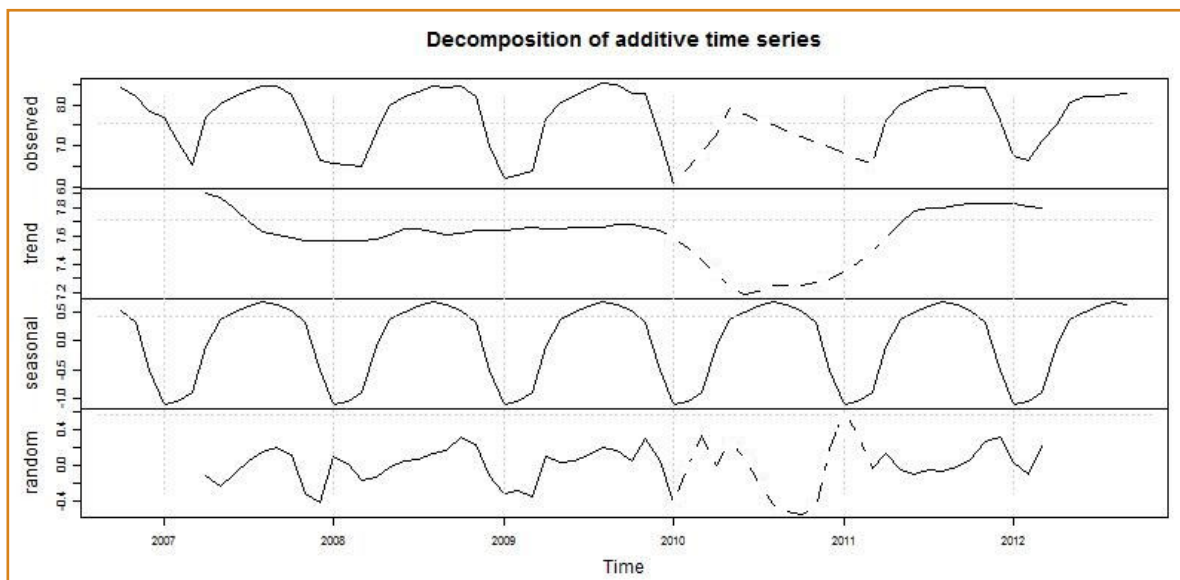


Fig. 9.12 - Decomposizione temperature medie mensili Galleria Franosa.



Fig. 9.13 - Postazione centralina meteorologica all'inizio della Galleria Franosa.

La decomposizione della serie temporale delle temperature medie mensili della **Galleria del Venerdì** descrive nella componente trend un'escursione minore della precedente pari a un decimo di grado ($0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) e secondo un ampio ciclo. Un primo tratto ascendente procede dagli iniziali $8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ fino a un massimo di $8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ nel marzo 2010 cui segue una discesa delle temperature che riporta nel 2012 ai valori iniziali. La stagionalità ha un'escursione di $0,2$

$^{\circ}\text{C}$ ridotta di un decimo rispetto alla Galleria Franosa e con caratteristiche molto diverse. I massimi sono qui tardo autunnali ($+0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ dicembre) e i minimi tardo primaverili ($-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ maggio). La componente random di compensazione ha un'escursione di $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ distribuendosi con oscillazioni simili alla stagionalità (**Fig. 9.14**).

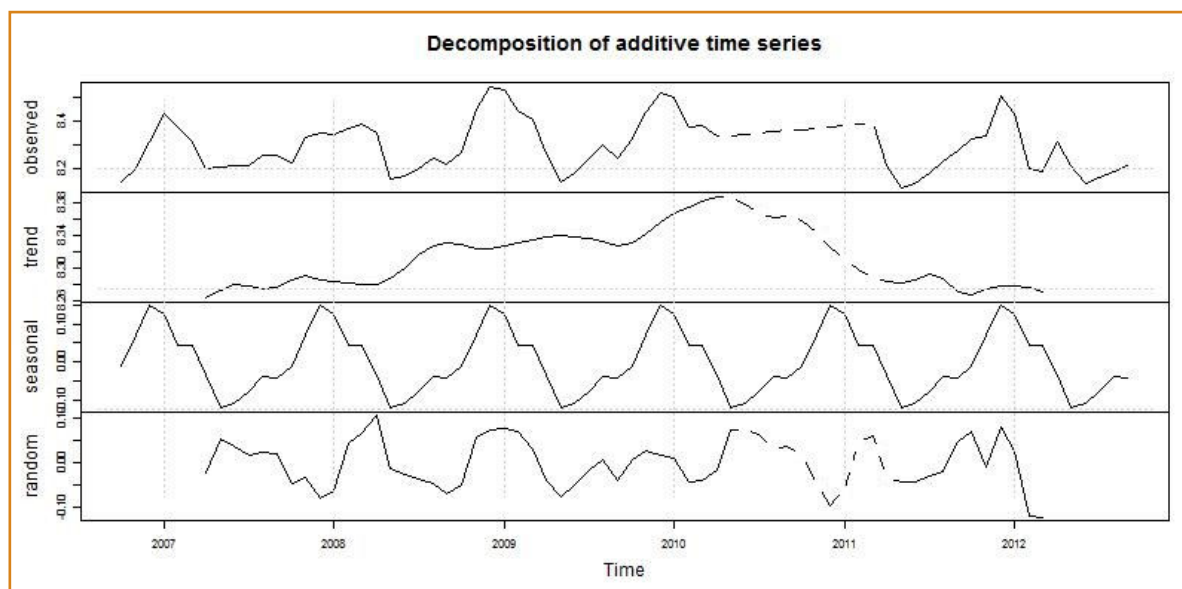


Fig. 9.14 - Decomposizione temperature medie mensili Galleria del Venerdì.



Fig. 9.15 - Operazione di manutenzione centralina meteorologica Galleria del Venerdì.



Fig. 9.16 - Centralina meteorologica postazione Galleria del Venerdì.

Per la **Galleria delle Stalattiti** l'analisi di decomposizione e autocorrelazione si è dovuta limitare al periodo più recente 2018-2020 di tre sole annualità. I pochi dati disponibili sembrano rilevare una componente trend distintamente crescente ed una stagionalità molto simile alla Galleria del Venerdi con pari escursione di $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, massimo tardo autunnale (dicembre) e minimo tardo primaverile, qui in giugno anziché a maggio (*Fig. 9.17*).

La decomposizione della serie temporale delle temperature medie mensili della stazione regionale Campagrina per il periodo 2005-2020 riporta una evidente ciclicità pluriennale con una decisa tendenza alla crescita per la componente trend. La stagionalità ha il minimo in febbraio ($-7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) ed il massimo in luglio ($+8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$). La componente random ha un'escursione tra $-3,9$ e $3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ distribuendosi in modo regolare sul periodo (*Fig. 9.18*).

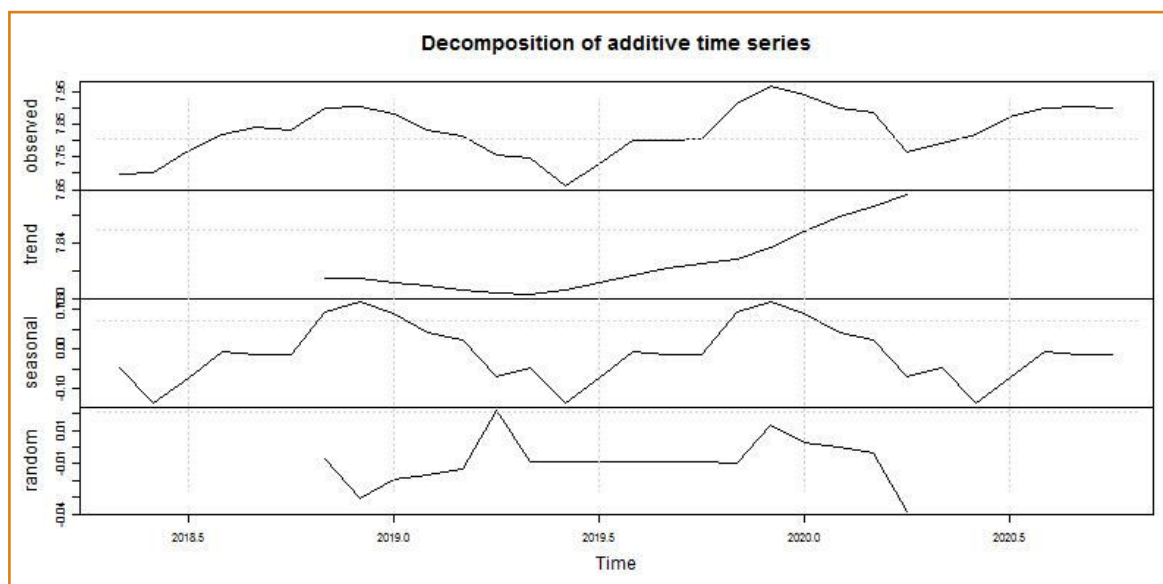


Fig. 9.17 - Decomposizione temperature medie mensili Galleria delle Stalattiti.

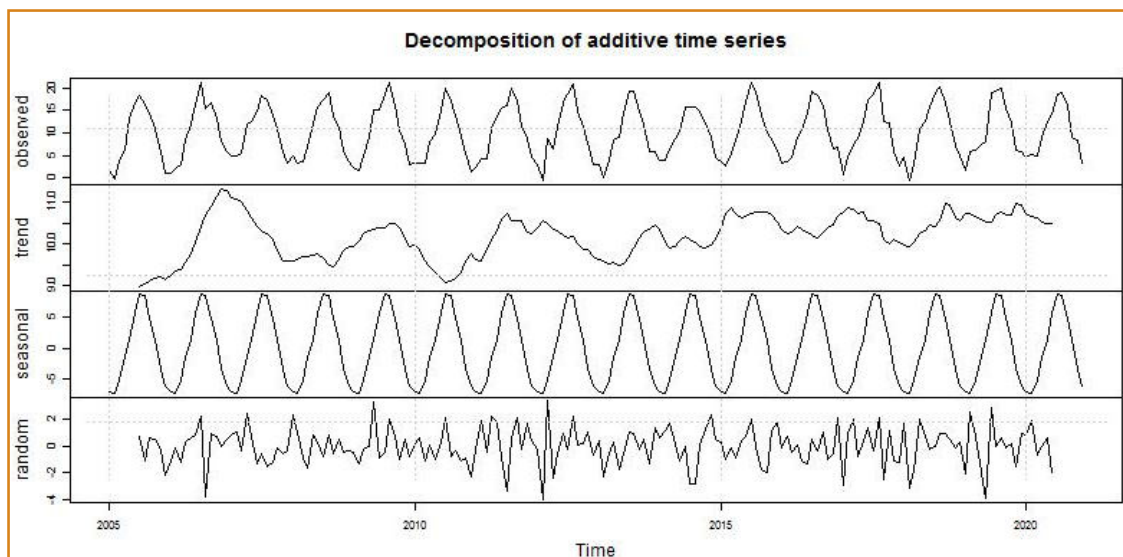


Fig. 9.18 - Decomposizione serie 2005-2020 temperature medie mensili Campagrina.

Conclusioni

In definitiva, dal confronto delle serie temporali delle temperature medie mensili si riconosce una discreta dinamicità all'interno del sistema ipogeo seppur fortemente ridimensionata e con tempi di ritardo variabili tra le varie posizioni.

Procedendo verso l'interno, l'analisi stagionale rivela una traslazione dei mesi di minimo e massimo per quanto riguarda la stagionalità: febbraio-luglio per Campagrina, febbraio-agosto per la Galleria Franosa, maggio-dicembre per la Galleria del Venerdi. Limitatamente al breve periodo analizzato (2018-2020) per la Galleria delle Stalattiti è confermato un ritardo anche qui con minimo e massimo nei mesi di giugno e dicembre rispettivamente.

Come noto in un ambiente ipogeo umido con circolazione d'acqua quale, descritto dal modello concettuale rappresentato nella figura 9.19, è quello del Corchia il regime termometrico interno è governato soprattutto dalle acque di circolazione le quali hanno circa le temperature dell'aria esterne al momento della precipitazione.

I processi conduttivi dovuti all'irraggiamento della superficie esterna riguardano, infatti, uno strato, indicato in letteratura come “*eterotermico*” che non supera i 15 – 20 cm di spessore per quanto riguarda le fluttuazioni giornaliere ed i 3 – 4 metri per quelle stagionali. Al di sotto si sviluppa un ampio settore, indicato come “*omotermico*”, regolato dalle acque

di circolazione che contribuiscono a mantenere pressoché costanti le temperature sotterranee alterando, di conseguenza, il locale gradiente geotermico. Tale strato si estende fino al livello di base della circolazione al di sotto del quale le temperature riprendono a crescere con la profondità secondo il gradiente geotermico naturale.

Quanto osservato indica per la Galleria Franosa, vista la vicinanza agli ingressi naturali, un regime termometrico prossimo a quello esterno (massimo estivo minimo invernale) e dunque influenzato soprattutto dai flussi d'aria, mentre per le stazioni più interne il regime termometrico è simile a quello, sfasato, delle acque circolanti con minimo anche qui primaverile e massimo tardo autunnale come mostrato dalla *Fig. 9.20* dove sono riportate a tal fine le temperature medie mensili calcolate dal monitoraggio in continuo sulla stazione del torrente Vianello-Vidal.

Una nota di rilievo merita, infine, la tendenza all'incremento qui osservata per la stazione termometrica di Campagrina, alla luce delle oramai ripetute evidenze di cambiamento climatico in corso. La tendenza è evidente e preoccupante oltreché statisticamente significativa (test Mann-Kendall $p = 2 \cdot 10^{-11}$). L'incremento annuo di temperatura valutato tramite la retta di Theil-Sen (0,06 °C/anno) si può stimare in quasi 1 °C in un tempo, relativamente contenuto, di 15 anni.

Di estremo interesse sarebbe stata la verifica di una tale influenza sulle stazioni interne, testimoni si pensa di un contesto fragile e che vorremo non influenzato. Purtroppo l'interruzione dal 2012 al 2018 non consente per adesso un tale tipo di accertamento. A maggior ragione è auspicabile il proseguimento del monitoraggio ripreso, anche se ancora non in veste ufficiale, nel 2018.

Fig. 9.19 - Modello concettuale della distribuzione delle temperature negli acquiferi carsici (da Luetscher & Jeannin, 2004 - semplificato).

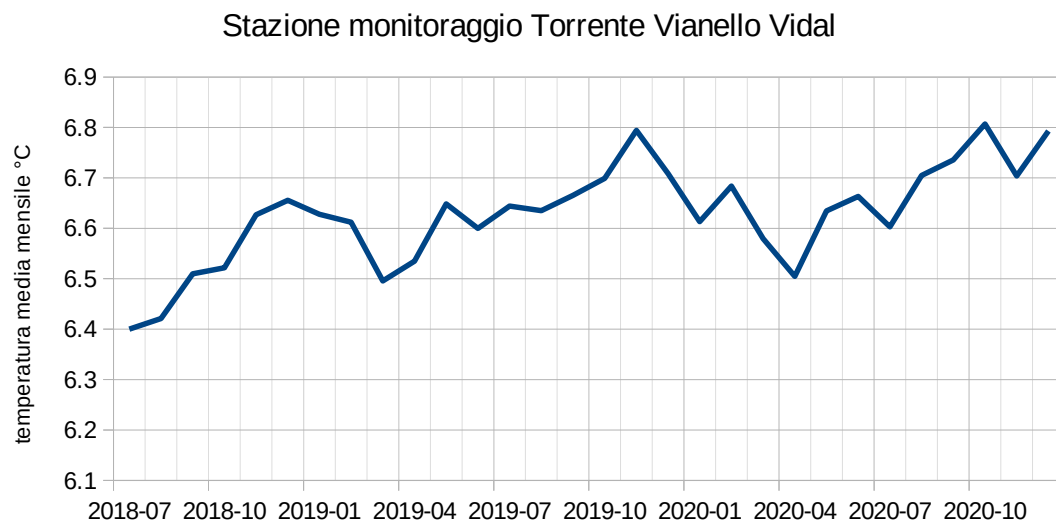
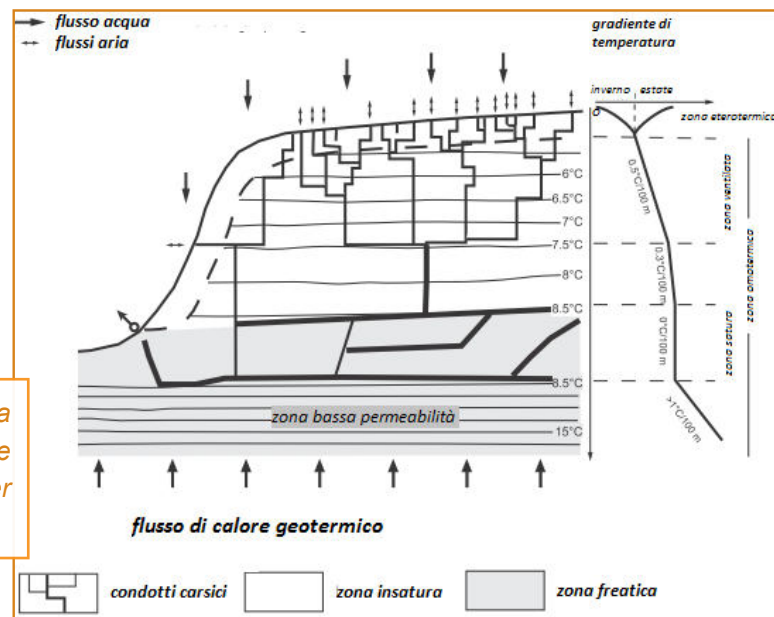


Fig. 9.20 - Stazione di monitoraggio del Torrente Vianello-Vidal.

Umidità

Per quanto ritenuto poco significativo come parametro, in quanto molto prossimo alla saturazione, nelle *Fig. 9.21 e 9.22* sono riportate le elaborazioni per le medie mensili del parametro umidità relativa per le tre stazioni interne.

Anche in questo caso le elaborazioni dei grafici di decomposizione sono limitate al periodo 2006-2012 per le sole Galleria Franosa e del Venerdi.

Per la Galleria delle Stalattiti gli ultimi tre anni non consentono ulteriori elaborazioni risultando in costante saturazione.

La serie temporale dell'umidità relativa media mensile della Galleria Franosa interrotta anche qui dal 2012 al 2018, mostra un andamento nel

complesso monotono sia nella prima che nella seconda porzione. La decomposizione della serie temporale della prima porzione 2006-2012 sembra rivelare un trend discendente fino a metà 2010 da cui riprende un breve recupero. L'escursione stagionale ha un andamento caratteristico a doppio massimo con un primo relativo in dicembre ed un secondo assoluto in marzo cui segue un minimo assoluto in aprile.

La serie temporale dell'umidità relativa media mensile della Galleria del Venerdi, anche questa pressoché interrotta dal 2012 al 2018, mostra un evidente riduzione dei valori nel periodo più recente (*Fig. 9.23*).

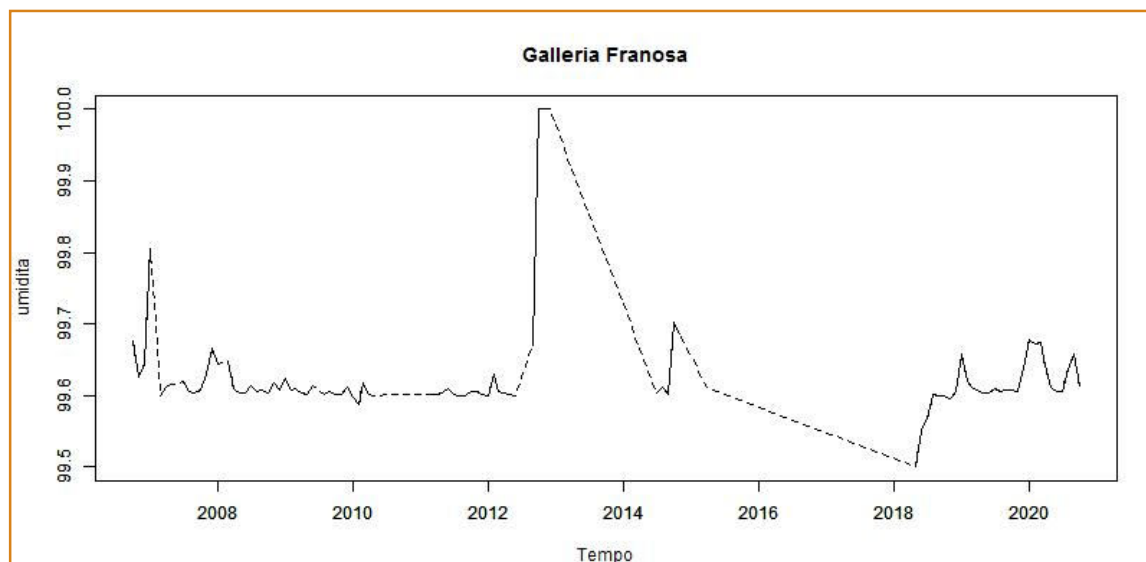


Fig. 9.21 - Galleria Franosa - serie temporale dell'umidità relativa media mensile.

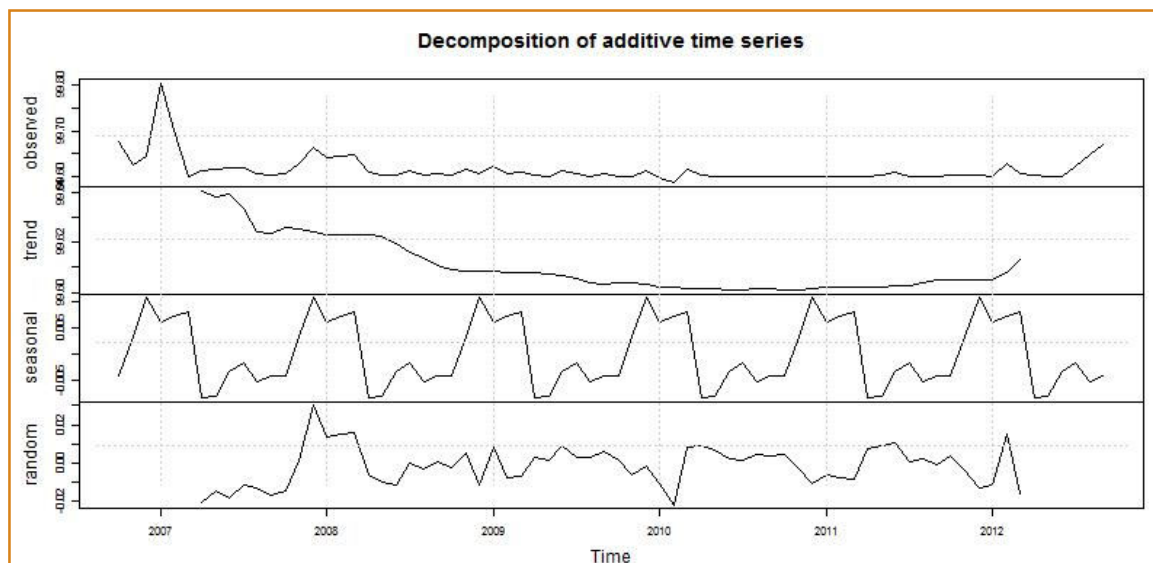


Fig. 9.22 - Decomposizione serie 2006-2012 umidità relativa medie mensili Galleria Franosa.

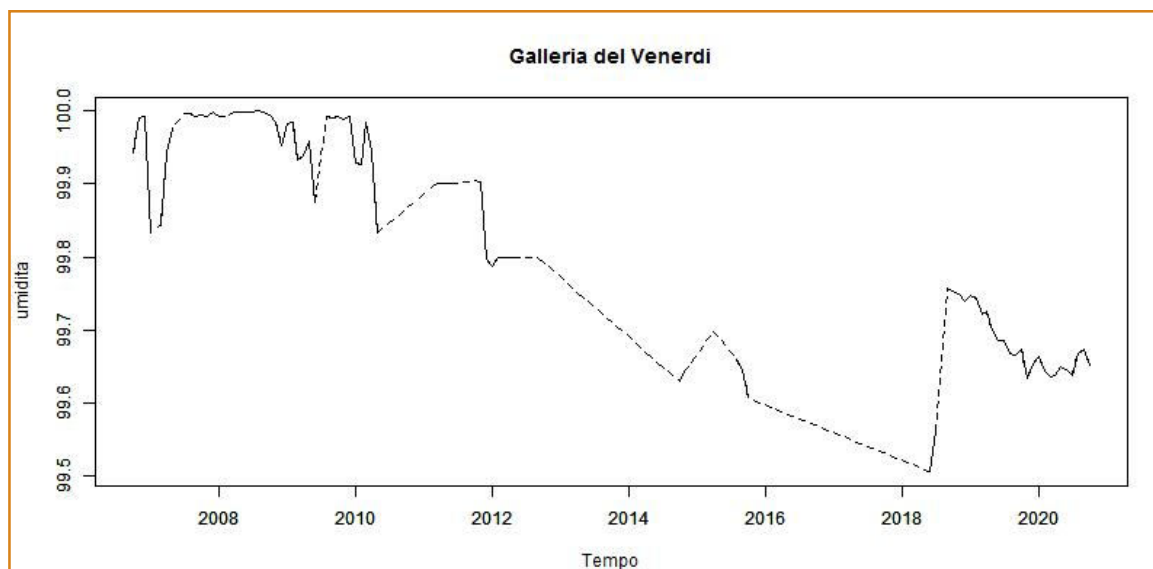


Fig. 9.23 - Galleria del Venerdì - serie temporale dell'umidità relativa media mensile.

La decomposizione della serie temporale denuncia, anche qui, un trend discendente. L'escursione stagionale presenta similmente alla Galleria Franosa l'andamento caratteristico con due massimi, il primo assoluto a novembre il secondo relativo a marzo seguiti da un minimo in giugno (Fig. 9.24).

Come già notato, nessuna variazione di rilievo si ottiene invece per la serie temporale dell'umidità relativa media mensile della Galleria delle Stalattiti costantemente in condizioni di piena saturazione (Fig. 9.25).

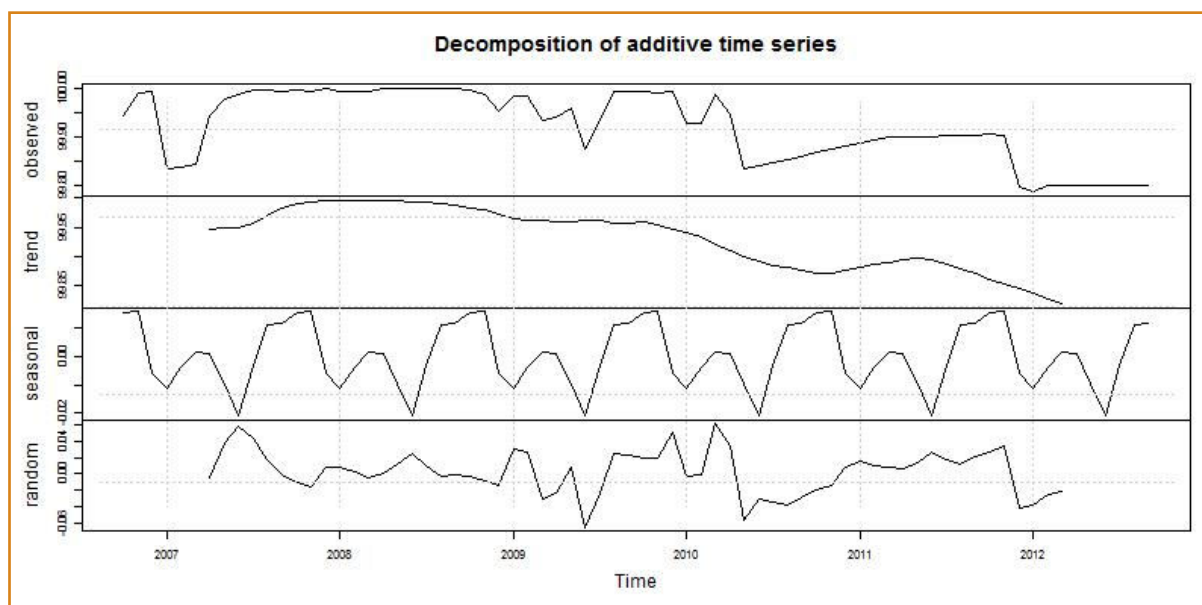


Fig. 9.24 - Decomposizione serie 2006-2012 temperature medie mensili Galleria del Venerdì.

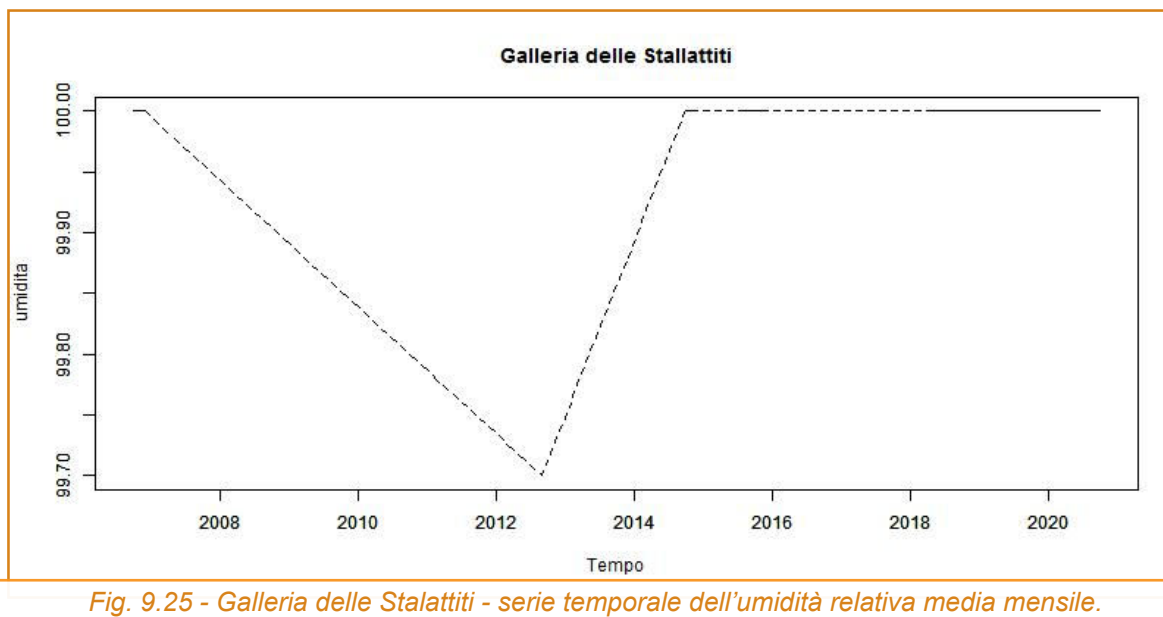


Fig. 9.25 - Galleria delle Stalattiti - serie temporale dell'umidità relativa media mensile.

Conclusioni

L'analisi delle serie temporali dell'umidità relativa, parametro già indicato come scarsamente significativo per lo studio delle dinamiche naturali vista la presenza di valori sempre molto prossimi alla saturazione, sembra comunque portare elementi di interesse.

Sulle stazioni delle Galleria Franosa e Galleria del Venerdì si assiste ad una decisa diminuzione della componente trend. Caratteristica dell'escursione stagionale è la successione di due massimi, primo autunnale (novembre-dicembre) e secondo primaverile (marzo) mentre il minimo è assoluto e segue a breve distanza tra aprile a giugno.

Le escursioni positive, per quanto minime, relative ai periodi piovosi autunnali e primaverili possono essere messe in relazione con maggiori precipitazioni e intensità di percolazioni e stillicidi. L'instaurarsi di condizioni di minimo relativamente precoci, in aprile e giugno, può invece avere qualche dipendenza con il momento d'inversione della circolazione.

Un elemento di rilievo, da meglio approfondire con il proseguimento del monitoraggio negli anni a venire è la decisa tendenza alla diminuzione dei tenori di umidità per le prime due stazioni di Galleria Franosa e Galleria del Venerdì.

Flusso dell'aria

Più significative, rispetto alle misure di umidità, sono certamente le serie temporali delle misure di flusso d'aria unidirezionale. Anche in questo caso le elaborazioni dei grafici di decomposizione ed autocorrelazione sono limitate al periodo 2006-2012 e per le sole Galleria Franosa e del Venerdì. Per la Galleria delle Stalattiti è stato possibile analizzare unicamente l'ultimo triennio 2018-2020.

La serie temporale delle medie mensili del flusso unidirezionale registrato alla Galleria Franosa, interrotta anche qui dal 2012 al 2018, mostra un evidente ciclicità nel primo periodo 2006-2012 non rilevata negli anni recenti (*Fig. 9.26*).

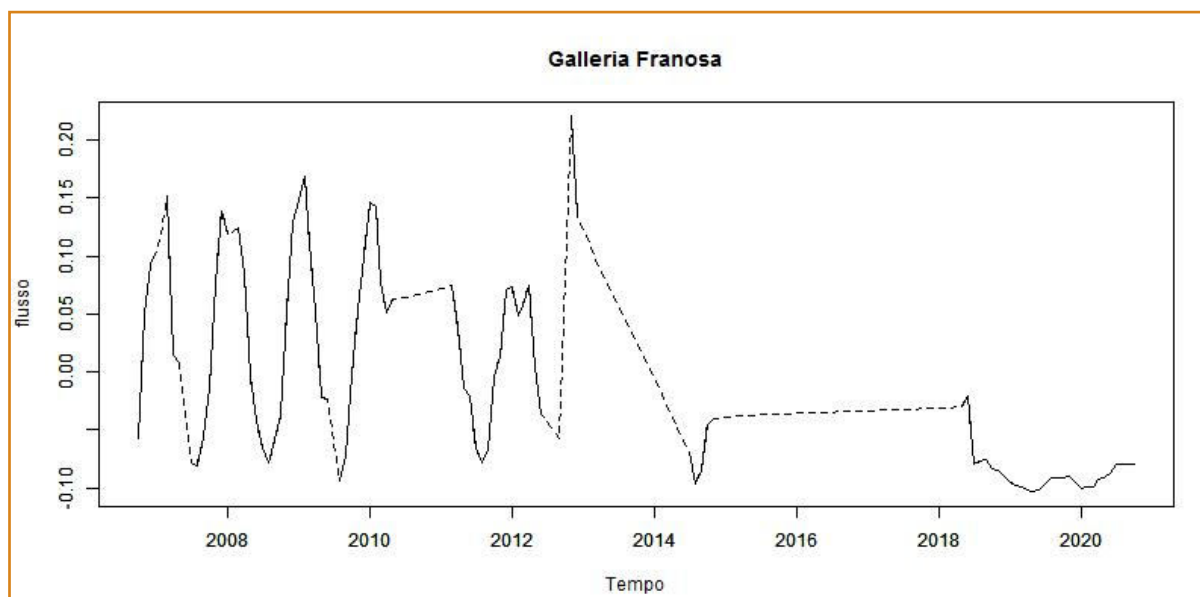


Fig. 9.26 - Galleria Franosa - serie temporale del flusso unidirezionale in m/s, positivo entrante negativo uscente.

La decomposizione della serie temporale della prima porzione 2006-2012 mostra nella componente trend un andamento nel complesso monotono con un massimo, purtroppo dubbio in quanto coincidente con la lacuna tra 2010 e 2011 interpolata dalla procedura di analisi. L'escursione stagionale ha un massimo positivo, con flusso entrante, a febbraio ed un minimo negativo (flusso uscente) ad agosto (Fig. 9.27).

La serie temporale delle medie mensili del flusso unidirezionale registrato alla Galleria del Venerdì anche qui separata in due serie distinte interrotte dal 2012 al 2018 mostra parimenti un evidente ciclicità sia nel primo periodo 2006-2012 sia negli anni recenti (Fig. 9.28).

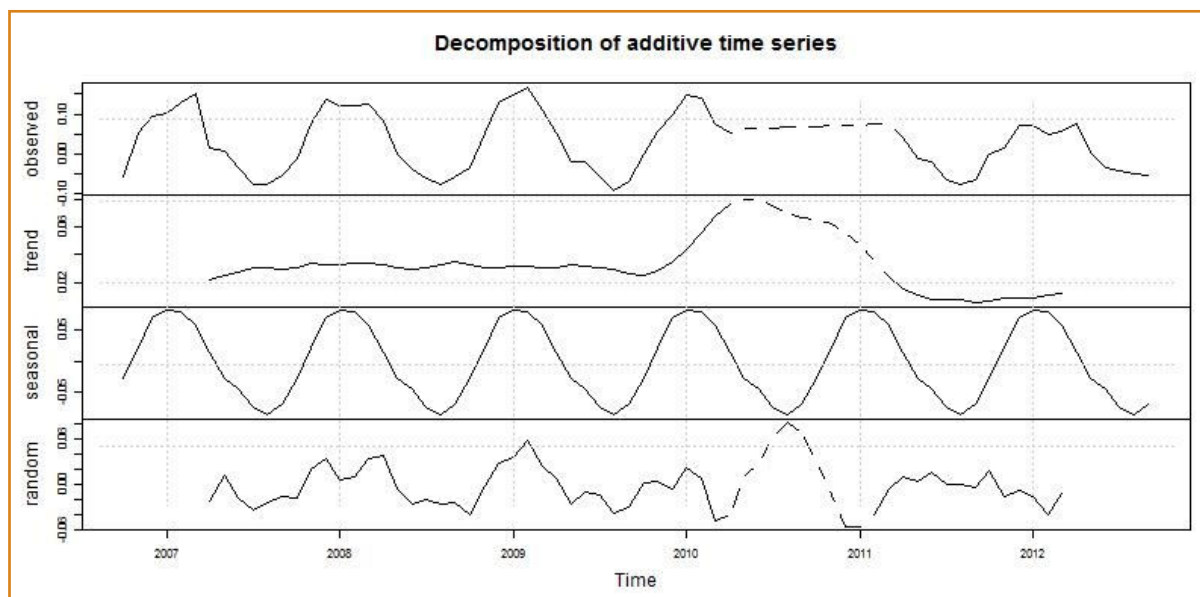


Fig. 9.27 - Decomposizione serie temporale 2006-2012 flusso unidirezionale Galleria Franosa.

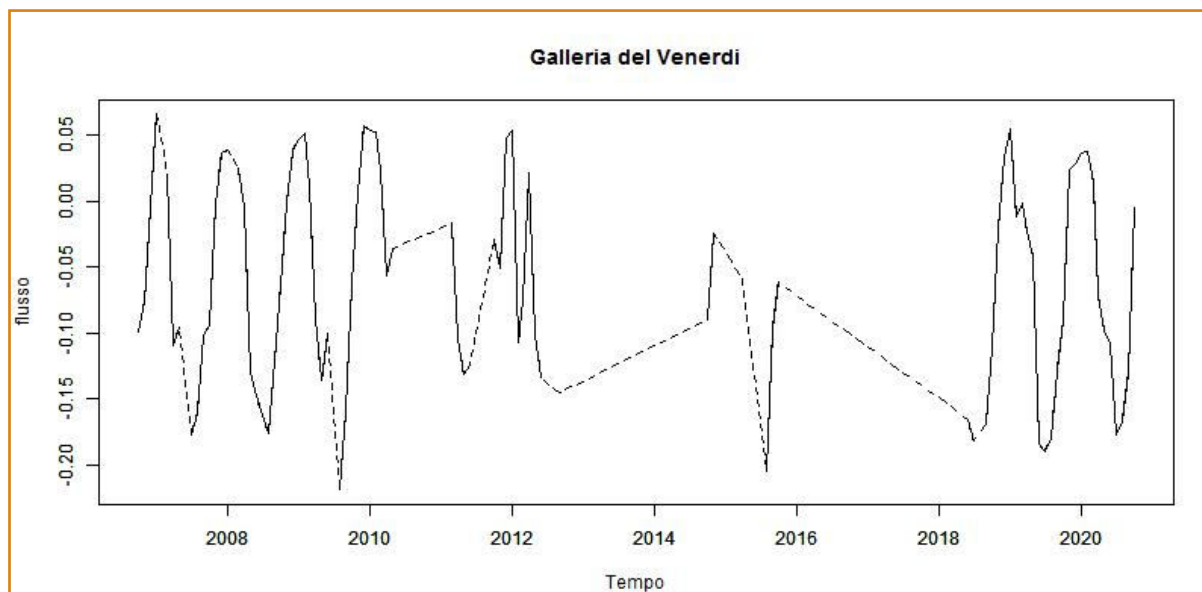


Fig. 9.28 - Galleria del Venerdì - serie temporale del flusso unidirezionale in m/s, positivo entrante negativo uscente.

La decomposizione della serie temporale della prima porzione 2006-2012 mostra nella componente trend un andamento nel complesso monotono o debolmente in crescita con un massimo, anche qui dubbio in quanto coincidente in parte con la lacuna tra 2010 e 2011 comunque interpolata. L'escursione stagionale ha un massimo positivo (flusso entrante) in questo caso a dicembre ed un minimo negativo (flusso uscente) ancora a agosto (Fig. 9.29).

La serie temporale delle medie mensili del flusso unidirezionale registrato alla Galleria delle Stalattiti ha l'unico periodo di acquisizione utile relativo al periodo più recente dal 2018 al 2020 dove rivela una discreta variabilità (Fig. 9.30).

La decomposizione della serie per quanto limitata a tre soli anni mostra nella componente trend una ciclicità annuale con un escursione stagionale identica alla Galleria del Venerdì con un massimo positivo (flusso entrante) a dicembre ed un minimo negativo (flusso uscente) ad agosto (Fig. 9.31).

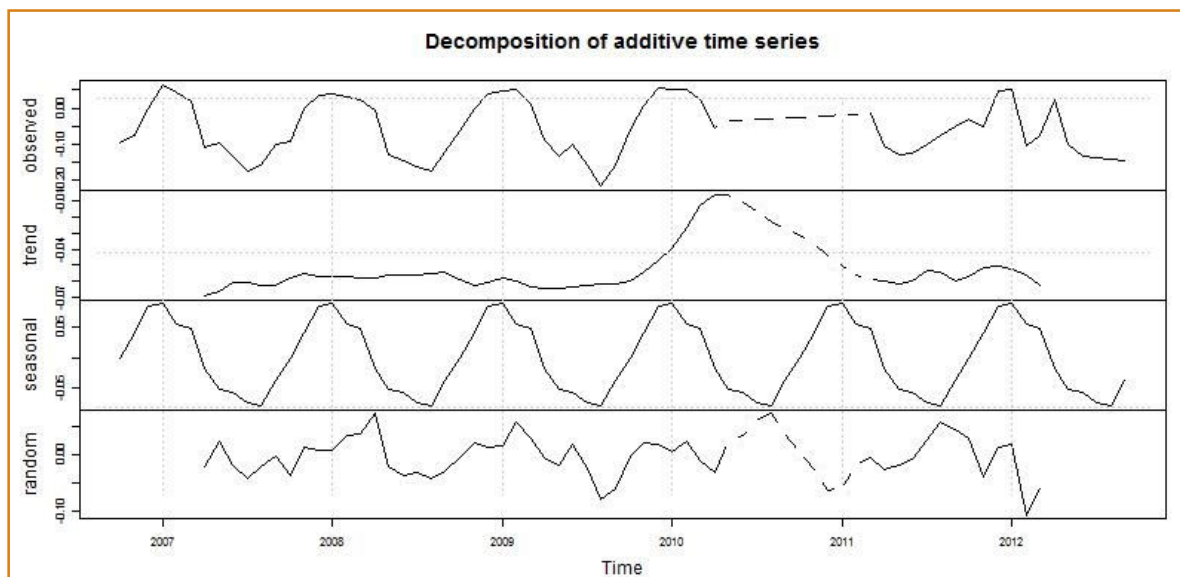


Fig. 9.29 - Decomposizione serie temporale flusso unidirezionale Galleria del Venerdì.

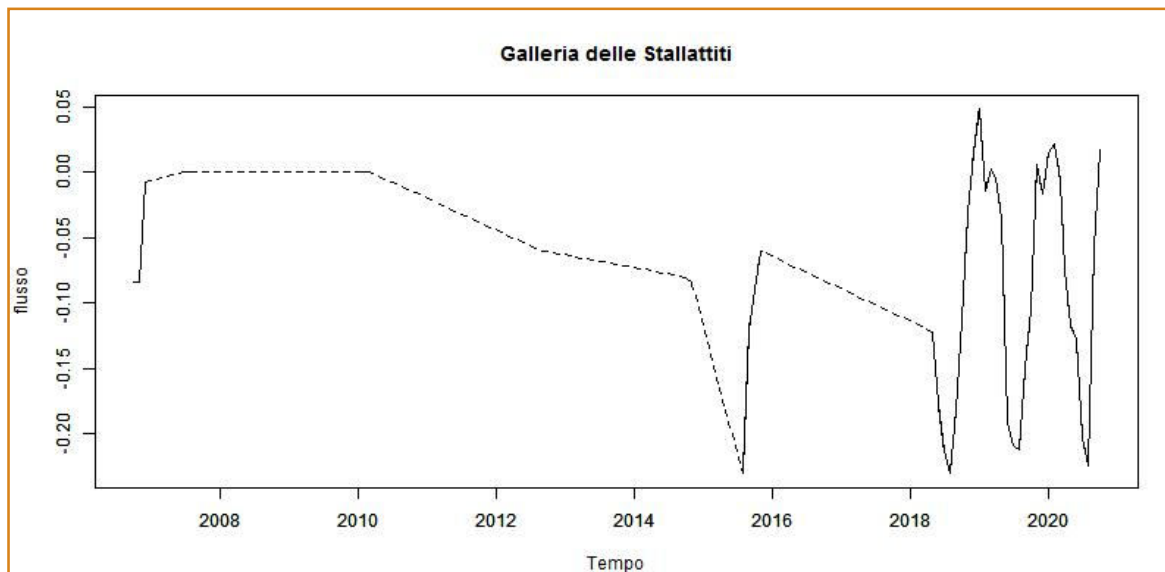


Fig. 9.30 - Galleria delle Stalattiti - serie temporale del flusso unidirezionale in m/s, positivo entrante negativo uscente.

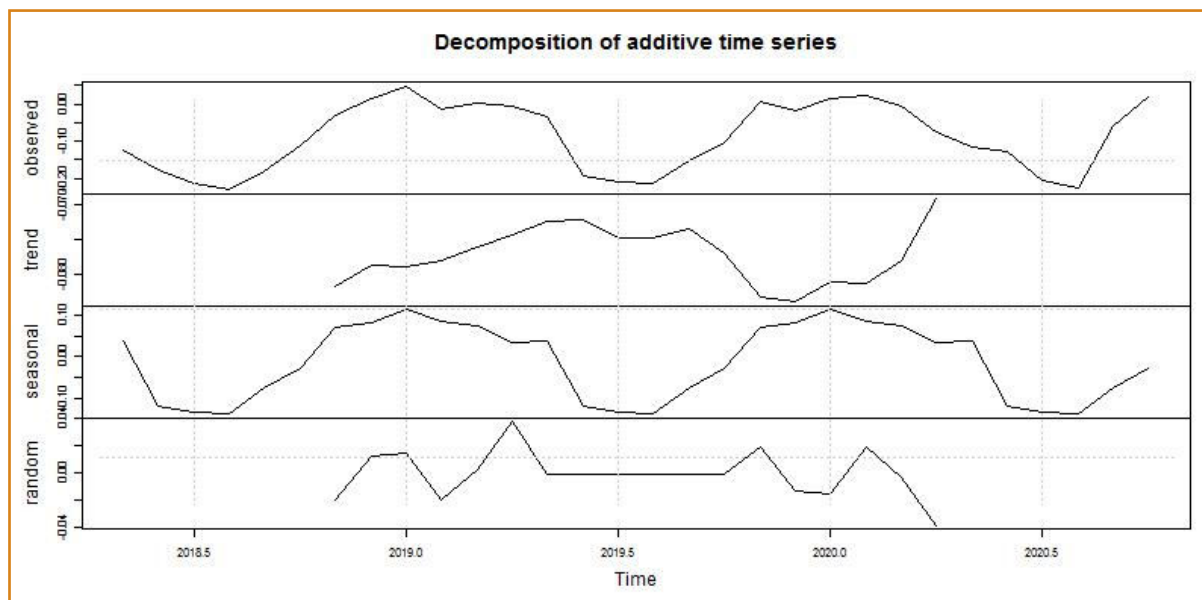


Fig. 9.31 - Decomposizione serie temporale flusso unidirezionale Galleria del Venerdì.

Conclusioni

L'analisi delle serie temporali del flusso unidirezionale nelle stazioni interne conferma, in definitiva, quanto noto circa l'inversione di circolazione che avviene in aprile ed ottobre tra le due diverse modalità, estiva, con flusso uscente dai condotti bassi quali la Buca del Serpente e dei Pompieri prossimi all'ingresso turistico, invernale, con flusso contrario entrante da questi stessi condotti ed uscente dagli imbocchi situati nelle zone alte della montagna. I dati qui emersi sembrano indicare un'influenza sulla temperatura interna da parte della circolazione convettiva dell'aria limitata alle porzioni più vicine agli ingressi.

Procedendo verso l'interno dalla Galleria Franosa verso le gallerie del Venerdì e delle Stalattiti, infatti, si raggiunge presto un equilibrio delle temperature interne con le temperature delle acque circolanti. La stessa circolazione sembra avere, invece, maggiore influenza nella repentina diminuzione dell'umidità notata nel mese di aprile anche per le stazioni più interne a motivo dell'inversione che avviene proprio in questo mese e da cui ha inizio l'ingresso di aria esterna insatura.

Bibliografia

Agnesod G.; Peano G.; Villavecchia E., *Concentrazione atmosferica di 222radon nella grotta di Bossea e relazioni con il regime dei flussi idrici interni*, in *Atti convegno nazionale: L'ambiente carsico e l'uomo, Grotte di Bossea (Frabosa Soprana-CN), 5-8 settembre 2003*. Centro stampa della Provincia, 2005, pp. 39-52.

Uttili F., *L'Antro del Corchia o Buca d'Eolo. La storia e gli avvenimenti*, C&P Adver Effigi editore, 2015.

Amorfini A., Mantelli F., Piccini L., *Editors Acta apuana XI*, Pisa, Pacini, 2012.

Del Maschio F., *Anomalie di Radon in Grotta Gigante [Tesi di laurea]*, Università degli studi di Trieste, a.a. 2010/2011.

Badino G., *Fisica del clima sotterraneo*, Memorie della Società Geologica Italiana, n. 7, serie II, 1995, pp.1-173.

Badino G.; Chignola R., *Fluctuations of atmospheric pressure and the sound of underground karst systems: the Antro del Corchia case (Apuane Alps, Italy)*, "Frontiers in Earth Science", n. 7, 2019, p.147.

Baldacci F. [et al.], *Le risorse idriche del bacino del Fiume Serchio ed il loro contributo all'alimentazione dei bacini idrografici adiacenti*, "Memorie della Società Geologica Italiana", n. 49, 1993, pp. 365-391.

Baneschi I. [et al.], *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", v. 40, 2011, pp. 175-187.

Burian, I.; Stelcl, O., *Radon and its daughters in the touristic caves of the Moravian Karst*, in *Proceedings International Conference of Anthropogenic Impact and Environmental Changes in Karst*, Brno, Czechoslovak Academy of Sciences, 1990 , pp. 27-32.

Cagliero S. [et al.], *Monitoraggio del biossido di carbonio nella grotta di Bossea. Correlazioni della concentrazione del CO2 atmosferico con la frequentazione turistica e il regime del torrente interno*, in *Atti convegno nazionale: L'ambiente carsico e l'uomo, Grotte di Bossea (Frabosa Soprana-CN), 5-8 settembre 2003*. Centro stampa della Provincia, 2005, pp. 399-404.

Bibliografia

Carmignani L., Giglia, R., *Il problema della doppia vergenza sulle Alpi Apuane e la struttura del M. Corchia*, "Memorie Società Geologica Italiana", n. 26, 1983, pp. 515-525.

Casoli C., *Studi di idrogeologia carsica. Prime considerazioni sulle diramazioni fossili presso quota-270 nell'Antro del Corchia (Alpi Apuane-Lucca)*, "Atti della Società Toscana di Scienze Naturali. Memorie", serie A, n. 80, 1973, pp. 282-303.

Cazzante S. [et al.], *Carta delle grotte e delle sorgenti delle Alpi Apuane*. C. N. R., Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, unità di ricerca 4.9, pubbl. n. 105, Firenze, L.A.C., 1988.

Chiesi M., *I principali agenti di degrado nelle grotte turistiche: loro effetti e possibili rimedi*, in *Problemi di inquinamento e salvaguardia delle aree carsiche: metodi di indagine e di studio per la gestione delle aree carsiche e delle cavità naturali*, a cura della Federazione speleologica pugliese, Martina Franca, Nuova Editrice Apulia, 1989, pp. 15-33.

Cigna A.; Forti P., *I fattori di degrado del patrimonio carsico*, in *Problemi di inquinamento e salvaguardia delle aree carsiche: metodi di indagine e di studio per la gestione delle aree carsiche e delle cavità naturali*, a cura della Federazione speleologica pugliese. Martina Franca, Nuova Editrice Apulia, 1989, pp. 47-60.

Cigna A.; Burri E., *Development, management and economy of show caves*, "International Journal of Speleology", 29 B (1-4), 2000, pp. 1-27.

Cigna A., *Il concetto di capacità recettiva e la fruizione delle grotte turistiche*, "Le Grotte d'Italia", s. V., 3 (2002), pp. 25-31.

Cigna A., *The distribution of radon concentration in caves*, "International Journal of Speleology", 32 (1-4), 2003, pp.113 -115.

Cigna A., *Radon in Caves*, "International Journal of Speleology", 34 (1-2), 2005, pp.1-18.

Civita M. [et al.], *Carta della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane 1:25000*, Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, Firenze, C. N. R.,1991.

Ek C., *Carbon dioxide in cave atmospheres. New results in Belgium and comparison with some other countries*, "Earth Surface Processes and Landforms", 10, 1985, pp.173-187.

Fallani F.; Piccini L., *Pianta generale del Complesso Carsico del M. Corchia*, Federazione Speleologica Toscana, Commissione catasto, "Talp", Suppl. n.2,1990.

Bibliografia

Forti P., *Le esplorazioni speleologiche quali strumento di definizione geoidrologica del Monte Corchia*, in *Atti IV Congresso della Federazione Speleologica Toscana, Fiesole, 1-3 maggio 1981*, a cura del Gruppo speleologico Pipistrelli di Fiesole. Fiesole, [S.n.], 1983, pp. 159-168.

Forti P., *Gli acquiferi carsici. Problematiche per il loro studio ed utilizzo*, in *Atti del Convegno nazionale: Inquinamento delle grotte e degli acquiferi carsici e possibili ricadute sulla collettività, Ponte di Brenta (PD), 26 e 27 settembre 1998*, a cura di Michela Crema e Giovanni Ferrarese. Padova, Imprimitur Editrice, 1999, pp. 13-39.

Forti P.; Sauro U., *L'acqua negli ambienti carsici in Italia*, "Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia", serie II, vol. XIX, 2007, pp. 7-20.

Defrancesco F., *Aqua: appunti introduttivi alla scienza, alla tecnica, alla difesa delle acque naturali*. Temi editrice, Trento, 1991.

Hakl J.; Hunyadi I., Várhegyi A., *Radon monitoring in caves*, in *Radon measurements by etched track detectors*, Durrani S.A. & Ilic R. editors. Singapore, World Scientific, 1997, pp. 261-283.

Heaton T., *Caves. A tremendous range in energy environments on Earth*, in "Nat. Spel. Soc. News", 44 (8), 1986, pp. 301-304.

Krawczyk W. E., *Manual for karst water analysis*, "International Journal of Speleology", Handbook 1, december 1996.

Lotti L. [et al.], *Indagine sul microclima di una porzione del Complesso carsico del Monte Corchia*, "Acta Apuana", XI (2012), 2015, pp.47-62.

Mantelli F. [et al.], *Le acque sotterranee del sistema carsico del M. Corchia: valorizzazione, salvaguardia e rischi di inquinamento*, in *Atti del 3° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III millennio, Parma, 13/15 ottobre 1999*. Bologna, Pitagora Editrice, 1999, (Quaderni di geologia applicata, v. 1), pp. 115-125.

Mantelli F.; Ronchi R.; Minoia C., *Campionamento delle piogge in aree montane*, "Bollettino dei Chimici Igienisti", v. 51, 2000, pp. 81-88.

Mantelli F. [et al.], *Stato di qualità delle acque durante la fase ante-operam del settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica*, in *Atti del VII° Congresso della Federazione Speleologica Toscana*, Gavorrano (GR), 31 marzo e 1° aprile. Firenze, Federazione speleologica toscana, 2001, pp. 13-22.

Bibliografia

Mantelli F. [et al.], *Lo stato delle acque dell'Antro del Corchia in relazione alla vulnerabilità degli acquiferi carsici*, in *Atti del convegno: Le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo*, Filanda di Forno, Massa, 22 giugno 2002, a cura della Federazione speleologica toscana. Ponsacco, Nuovastampa, 2003, pp. 105-117.

Mantelli F.[et al.], *Geochimica delle acque di circolazione nel Complesso Carsico del Monte Corchia*, in *Atti del convegno: Le grotte raccontano: un milione d'anni di storia naturale conservato nei sistemi carsici delle Alpi Apuane*, Castelnuovo Garfagnana (LU), 11-12 dicembre 2004. Bologna, Istituto Italiano di Speleologia, 2005, pp. 177-189.

Mantelli F. [et al.], *Il Complesso carsico del monte Corchia: gli impatti conseguenti all'attività estrattiva*, "Bollettino degli esperti ambientali", n. 4, 2013, pp. 38-51.

Mantelli F. [et al.], *L'Antro del Corchia (Alpi Apuane): l'attività di monitoraggio in un settore destinato a fruizione turistica*, "Bollettino degli esperti ambientali," n. 2, 2013, pp. 33-42.

Mantelli F. [et al.], *Chimica delle acque del Complesso carsico del Monte Corchia*, "Acta Apuana", XI (2012), 2015, pp. 33-45.

Mantelli F. [et al.], *Risultati di analisi chimiche preliminari sulle patine nere nel Complesso carsico del Monte Corchia e in altre grotte italiane*, "Acta Apuana", XI (2012), 2015, pp. 63-72.

Mantelli F.[et al.], *Il radon entro il complesso carsico del monte Corchia (Alpi Apuane, Toscana)*, "Bollettino degli esperti ambientali", n. 1, 2016, pp. 24-34.

Mariani S., *Caratterizzazione del contenuto di radioattività naturale nelle rocce del complesso metamorfico delle Alpi Apuane*, [Tesi di dottorato], Università degli Studi di Siena, a.a. 2009-2010.

Masini R., *I bacini costieri delle Alpi Apuane (studi geoidrologici sulle acque sotterranee)*, "Bollettino del Servizio geologico d'Italia", 55, 1960, pp. 657-752.

Masini M., *L'Antro del Corchia: monitoraggio e controllo a tutela dell'ambiente carsico ipogeo* [Tesi di laurea], Università degli Studi di Firenze, a.a. 2012-2013.

Massaro R.M.C., *Studio del Radon nelle cavità naturali della Calvana, Analisi degli esiti dei rilevamenti per la valutazione degli aspetti sanitari correlati* [Tesi di laurea], Università degli Studi di Firenze, a.a. 2009-2010.

Bibliografia

Menichetti M.[et al.], *Monitoraggio ambientale e flusso turistico nella grotta grande del vento a Frasassi (Ancona, Italia)*, in *Atti del Simposio internazionale: Grotte turistiche e monitoraggio ambientale*, Bossea, Frabosa Soprana, Cuneo, 24-26 marzo 1995, a cura di A. Cigna. Savigliano, Tipografia Saviglianese, 1996, pp.193-210.

Menichetti M. [et al.], *Monitoraggio ambientale e flusso turistico nella grotta grande del vento a Frasassi, Ancona, Italia*, in *Atti convegno nazionale: L'ambiente carsico e l'uomo, Grotte di Bossea (Frabosa Soprana-CN)*, 5-8 settembre 2003, Centro stampa della Provincia, 2005, pp.399-404 p. 399-404, 2005.

Montigiani A. [et al.], *Rapporto ARPAT del 30 luglio 1998: Relazione di un anno di attività del gruppo operativo incaricato del monitoraggio dell'Antro del Corchia*, 1998, pp. 1-83.

Montigiani A.; Lotti L.; Mantelli F., *Il monitoraggio delle grotte. L'esperienza dell'Antro del Corchia*, in *Convegno: Il monitoraggio ambientale nelle grotte turistiche. Nuove esperienze e nuove proposte*, Aquila 14, 15 e 16 dicembre 2000, "Le Grotte d'Italia", s. V., 3 (2002), pp.73-87.

Montigiani A., Mantelli F., Lotti L., *Monitoraggio di un geosito: sintesi sull'attività nel settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione scientifico-culturale*, in *Atti del Convegno di studi: Geositi tra valorizzazione e conservazione della natura. La geodiversità delle Alpi Apuane*, Marina di Carrara, 11 ottobre 2001, suppl. "Acta Apuana" V (2006), pp. 107- 115.

Paladini N., *L'esplorazione della Buca del Serpente*. Tramonti, Club Alpino Italiano, Sezione Valdarno Inferiore "Giacomo Toni", 2011, pp. 6-12.

Peano G.; Vigna B. - *Le cavità naturali come via privilegiata per lo studio delle acque sotterranee. I rilevamenti effettuati nella stazione scientifica della Grotta di Bossea*, in *Atti del Simposio internazionale: Grotte turistiche e monitoraggio ambientale*, Bossea, Frabosa Soprana, Cuneo, 24-26 marzo 1995, a cura di A. Cigna. Savigliano, Tipografia Saviglianese, 1996, pp. 333-356.

Peano G. [et al.], *Radon exchange dynamics in a karst system investigated by radon continuous measurements in water: first results*, "Radiation Protection Dosimetry", vol. 145, n. 2-3, 2011, pp.173–177.

Perrone E., *Carta Idrografica d'Italia. Corsi d'acqua del litorale toscano a N del Serchio e della Riviera Ligure*. Roma, Ministero dell'agricoltura, dell'industria e del commercio,1912.

Bibliografia

Piccini L., *Ipotesi sull'evoluzione del Complesso Carsico del Monte Corchia (Alpi Apuane)*, in *Corchia 91: Atti del VI Congresso della Federazione Speleologica Toscana, Stazzema, 1-3 novembre 1991*. Stazzema, Comune di Stazzema, 1994, pp. 59-82.

Piccini L., *Caratteri morfologici ed evoluzione dei fenomeni carsici profondi nelle Alpi Apuane (Toscana- Italia)*, "Natura Bresciana", 30 (1994), 1996, pp. 45-85.

Piccini L., *Le aree carsiche della Toscana*, in *Atti del VII Congresso della Federazione Speleologica Toscana, Gavorrano (GR), 31 marzo-1 aprile 2001*, "Talp" 23, 2001, pp.173-182.

Piccini L., *Acquiferi carbonatici e sorgenti carsiche delle Alpi Apuane*, in *Atti del convegno Le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo, Filanda di Forno, Massa, 22 giugno 2002*, a cura della Federazione Speleologica Toscana. Ponsacco, Nuovastampa, 2003, pp. 41-75.

Piccini L. [et al.], *The environmental features of the Monte Corchia cave system (Apuane Alps, central Italy) and their effects on speleothem growth*, "International Journal of Speleology", v. 37 n. 3, 2008, pp.153-172.

Piccini L.; Malcapi V.; Steinberg B., *La colorazione all'Antro del Corchia*, "Talp", 42, 2011, pp.69-75.

Piccini L., *Speleogenesis in highly geodynamic contexts: The quaternary evolution of Monte Corchia multi-level karst system (Alpi Apuane, Italy)*, "Geomorphology" 134, 2011, pp. 49–61.

Piccini L. [et al.], *Idrogeologia del sistema carsico del Monte Corchia: sintesi dei dati e delle attuali conoscenze*, "Acta Apuana", XI (2012), 2015, pp. 23-32.

Pieroni S. [et al.], *Un gigante ferito: il monte Corchia il suo antro, le sue cave*, in *Atti del II Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee, metodologie, tecnologie e obiettivi, Modena 17/19 maggio 1995*. Bologna, Pitagora Editrice, 1999, (Quaderni di geologia applicata, suppl. 2, v. 1), pp. 2.429-2.434.

Regattieri E.[et al.], *Indagini sulla composizione isotopica e chimica delle acque di stillicidio dell'Antro del Corchia, Lucca*, in *Atti del XX Congresso Nazionale di Speleologia, 27-30 Aprile 2007*, "Memorie della Società Geologica Italiana", Serie II, vol. XXI, 2008, pp. 543-549.

Bibliografia

Roncioni A., *La Federazione Speleologica Toscana e le ricerche idrologiche nelle cavità carsiche delle Alpi Apuane*, in *Atti del convegno Le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo*, Filanda di Forno, Massa, 22 giugno 2002, a cura della Federazione Speleologica Toscana. Ponsacco, Nuovastampa, 2003, pp. 77-104.

Sauro U., *Geoecosistemi carsici, risorsa acqua e impatto umano; esempi in aree carsiche del Veneto*, in *Atti del Convegno nazionale: Inquinamento delle grotte e degli acquiferi carsici e possibili ricadute sulla collettività*, Ponte di Brenta (PD), 26 e 27 settembre 1998, a cura di Michela Crema e Giovanni Ferrarese. Padova, Imprimatur Editrice, 1999, pp. 41-60.

Scala C., *Note di metodo in tema di morfometria dei ciottoli fluitati della Galleria Franosa*, Dipartimento di Economia Politica e Statistica Università di Siena, 2019.

Simi E., *Relazione del Monte Corchia con una memoria sulla costituzione geologica dei monti pietrasantini del professore cav. Paolo Savi*. Massa, Frediani, 1847, pp.18-47.

Trotti F. [et al.], *Misure di concentrazione di ^{222}Rn in alcune grotte del Veneto*, in *Atti del primo convegno Nazionale di Fisica dell'ambiente: ricerca, monitoraggio, prevenzione*, Brescia, 15-17 dicembre 1993, organizzato dall'Associazione fisica biomedica (A.I.F.B.), USSL 41 di Brescia. Brescia, Università degli studi, Facoltà di ingegneria, pp. 359-366.

Vaupotic J.[et al.], *Methodology of radon monitoring and dose estimates*, in *Postojna Cave, Slovenia*, "Health Phys." 80 (2), 2001, pp.142-147.

Vigna B., Pavia R., *L'inquinamento degli acquiferi carsici*, in *Problemi di inquinamento e salvaguardia delle aree carsiche: metodi di indagine e di studio per la gestione delle aree carsiche e delle cavità naturali*, a cura della Federazione speleologica pugliese. Martina Franca, Nuova Editrice Apulia, 1989, pp. 61- 89.

Vigna B., *Monitoraggio e valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi carsici*, in *Atti del convegno Le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo*, Filanda di Forno, Massa, 22 giugno 2002, a cura della Federazione Speleologica Toscana. Ponsacco, Nuovastampa, 2003, pp. 23-36.

Zanchetta G.[et al.], *L'archivio climatico preservato all'interno delle stalagmiti dell' Antro del Corchia (Alpi Apuane, Italia centrale): i dati isotopici*, "Memorie Istituto Italiano di Speleologia", Serie 2, vol. XVIII, 2004, pp.161-176.

Direttiva 96/29/Euratom del Consiglio, del 13 maggio 1996, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti (G.U., n. L. 159, del 29 giugno 1996).

Direttiva (UE) 2020/2184, del Parlamento europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2020, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano (rifusione), (Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, L 435/1, del 23 dicembre 2020)

Legge del 6 dicembre 1991, n. 394. Legge quadro sulle aree protette. (S.O. n. 83, G.U. n. 292, del 13 dicembre 1991.

Decreto legislativo del Governo del 17 marzo 1995, n. 230, attuazione delle direttive 89/618/Euratom; 90/641/Euratom; 92/3/Euratom e 96/29/Euratom in materia di radiazioni ionizzanti.

Decreto legislativo del 26 maggio 2000, n. 241, attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti (G.U. n. 203, del 31 agosto 2000, S.O. n. 140, rettifica Gazzetta Ufficiale n. 68, del 22 marzo 2001)

Decreto legislativo 2 febbraio 2001, n. 31, attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano. (G.U. n. 52, del 3 marzo 2001)

Decreto del Presidente della Repubblica del 24 maggio 1988, n. 236, attuazione della direttiva CEE n. 80/778 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano, ai sensi dell'art. 15, della Legge n. 183, del 16 aprile 1987, (G.U. n.152, del 30 giugno 1988)

Decreto legislativo, n. 152, del 3 aprile 2006, norme in materia ambientale (G.U. n. 88, del 14 aprile 2006)

Decreto legislativo del 14 novembre 2016, modifiche all'allegato I, del decreto legislativo, 2 febbraio 2001, n. 31, recante: attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano, (G.U., serie generale, n.12, del 16-01-2017)

Decreto legislativo del 14 giugno 2017, recepimento della direttiva (UE) 2015/1787, che modifica gli allegati II e III della Direttiva 98/83/CE sulla qualità delle acque destinate al consumo umano, modifica degli allegati II e III, del Decreto legislativo del 2 febbraio 2001, n. 31, (GU n.192, del 18-8-2017)

Legge regionale n. 65, dell'11 agosto 1997, Istituzione dell'Ente per la gestione del "Parco Regionale delle Alpi Apuane", soppressione del relativo Consorzio, (Bollettino Ufficiale Regione Toscana n. 33, parte prima, del 21 agosto 1997)

Legge regionale n. 78, del 3 novembre 1998, testo unico in materia di cave, torbiere, miniere, recupero di aree escavate e riutilizzo di residui recuperabili, (Bollettino Ufficiale Regione Toscana, n. 37, parte prima, del 12 novembre 1998)

Legge regionale n. 10, del 12 febbraio 2010, norme in materia di valutazione ambientale strategica (VAS), di valutazione di impatto ambientale (VIA) e di valutazione di incidenza, (Bollettino Ufficiale Regione Toscana n. 9, parte prima, del 17 febbraio 2010)

Legge regionale n. 35 del 25 marzo 2015, disposizioni in materia di cave, modifiche alla legge regionale 78/1998, legge regionale 10/2010 e legge regionale 65/2014

Deliberazione della Giunta Regione Toscana n. 138, del 11 febbraio 2002, istruzioni tecniche per la formulazione delle domande di autorizzazione all'esercizio dell'attività estrattiva e per la redazione degli elaborati di corredo (ai sensi dell'art. 12, comma 4, della L.R. 78/98), per la redazione degli elaborati di corredo (ai sensi dell'art. 12, comma 4 della L.R. 78/98) e per la comunicazione del trasferimento della autorizzazione (ai sensi dell'art. 14, comma 3, della L.R. 78/98), (Bollettino Ufficiale Regione Toscana n. 10, del 6 marzo 2002)



Torrente Vianello-Vidal

Note di metodo in tema di morfometria dei ciottoli fluitati della Galleria Franosa

Claudio Scala (2019)⁺
Università di Siena
Dipartimento di Economia Politica e Statistica.

L'allegato presenta la versione postuma del contributo di Claudio Scala a questo volume. L'autore ha inteso convalidare in base ai valori empirici dei ciottoli della Galleria Franosa un nuovo modello interpretativo sulla associazione fra contenuto energetico dei processi fluviali e morfometria dei ciottoli. Questo modello di impianto fisico-statistico è stato elaborato utilizzando protocolli di misurazioni omogenee di ciottoli e paleo-ciottoli provenienti da vari siti in Toscana, ma anche da altre regioni italiane e dall'estero (Albania, Croazia, Slovenia, Nigeria, Stati Uniti).

I curatori riconoscono che purtroppo l'editing – che l'autore non ha fatto a tempo a rivedere – non rende piena giustizia alla qualità di questo lavoro.

ABSTRACT

Chapter 2 (C. Scala): Based on considerations of elementary physics, an indicator of aversion to motion Ψ is defined for ellipsoidal pebbles. It is then postulated the existence of a universe of origin of the pebbles (Urwelt), statistically defined as spherical trivariate for the axes a, b, c (diameters of the ellipsoidal body, with $a \geq b \geq c$) and for it, by a Montecarlo procedure, one finds the distribution of the indicator Ψ , which results to be well described by a probability density Beta(4,2). Finally, the indicator of aversion to motion Ψ appears to be closely linked to the extremal ratio c/a (minimum divided by maximum) and it is found that the extremal ratio c/a is sufficient to recognize, in a conjectural way and very suitable in practice, a process of low, medium or high relative energy as generator of the morphology of a pebble under examination. Accepting the deductive and simulatory system of the research, through a mathematized discussion of falsifiability (as defined by POPPER), the practical, interpretative rule appears to be the as follows:

For the field $0 < c/a \leq 0.28170$ → low-energy-level process

For the field $0.28170 < c/a \leq 0.58741$ → middle-energy-level process

For the field $0.58741 < c/a \leq 1$ → high-energy-level process

Dando seguito alle considerazioni sviluppate nel capitolo precedente si procederà ora a costruire un impianto analitico volto a verificare se la morfometria dei ciottoli della Galleria Franosa, percepita tramite i semplici rapporti delle loro tre dimensioni (e quindi a prescindere dal loro volume) possa essere utilizzata per ricavare delle informazioni di fondo su cui basare delle congetture razionali sul processo di cui i ciottoli stessi sono il risultato. Nel corso dell'analisi sono emersi risultati che potrebbero costituire un netto perimetro interpretativo utile per la definizione del processo di cui si è detto. L'impianto della discussione che segue è decisamente di tipo deduttivo, con tutti i limiti (anzitutto l'assenza di un vero e proprio contenuto epistemico) che questa scelta comporta, ma anche con tutte le opportunità offerte da eventuali rivisitazioni e modifiche del sistema di postulati che stanno alla base dell'analisi o, se si vuole, dell'esperimento metodologico di cui si dà qui conto. Si propongono anzitutto due indici relativi al comportamento cinematico di ciottoli fluitati

trattati come ellissoidi scaleni. Tali indici, fondati su considerazioni di fisica elementare, vengono utilizzati per congetture ragionate sul tipo di processo di fluitazione (atto ad indurre alta mobilità, cioè bassa avversione al moto) o bassa mobilità, cioè alta avversione al moto) che costituisce la storia evolutiva *di lungo periodo* dei ciottoli in esame. Viene dedicata in seguito particolare attenzione al trattamento statistico di insiemi di ciottoli al fine di razionalizzare le congetture di cui sopra e di valorizzarne il contenuto interpretativo. I due indici si propongono di cogliere la avversione al moto rotatorio e la avversione al moto traslatorio di ciottoli trattati in termini morfometrici come ellissoidi scaleni di **assi interi** di lunghezze a, b, c con $a \geq b \geq c$ tenendo in considerazione unicamente la geometria intrinseca del corpo ellissoidale, con tutte le limitazioni che ciò comporta.

Ci si convenziona nel senso che la lunghezza a , la b e la c sono adagiate sugli assi cartesiani rispettivamente X, Y, Z e il corpo ellissoidale ha baricentro nel punto $X = Y = Z = 0$.

Indice di avversione al moto rotatorio

Ricordiamo anzitutto le definizioni dei momenti di inerzia, intesi come **avversione al moto rotatorio**, relativi all'ellissoide $\{a, b, c\}$.

Essendo ρ la densità del solido ellissoidale e $Minerzia_{XX}, Minerzia_{YY}, Minerzia_{ZZ}$ i momenti attorno all'asse a , all'asse b , all'asse c rispettivamente, si definiscono, in Fisica elementare:

$$Minerzia_{XX} = \rho \cdot \left(\frac{1}{5}\right) \cdot \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{2}\right) \cdot \left(\frac{b}{2}\right) \cdot \left(\frac{c}{2}\right) \cdot \left(\left(\frac{c}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2\right);$$

$$Minerzia_{YY} = \rho \cdot \left(\frac{1}{5}\right) \cdot \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{2}\right) \cdot \left(\frac{b}{2}\right) \cdot \left(\frac{c}{2}\right) \cdot \left(\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{c}{2}\right)^2\right);$$

$$Minerzia_{ZZ} = \rho \cdot \left(\frac{1}{5}\right) \cdot \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{2}\right) \cdot \left(\frac{b}{2}\right) \cdot \left(\frac{c}{2}\right) \cdot \left(\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2\right),$$

da cui, semplificando, si ottiene:

$$Minerzia_{XX} = \frac{1}{120} \pi abc \rho (b^2 + c^2) \quad ;$$

$$Minerzia_{YY} = \frac{1}{120} \pi abc \rho (a^2 + c^2) \quad ;$$

$$Minerzia_{ZZ} = \frac{1}{120} \pi abc \rho (a^2 + b^2) \quad .$$

Il volume Vol dell'ellissoide $\{a, b, c\}$ è: $Vol = \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{2}\right) \cdot \left(\frac{b}{2}\right) \cdot \left(\frac{c}{2}\right) = \frac{1}{6} \pi abc$ ed il raggio della sfera di volume equivalente è:

$$R = (Vol \div (\pi \cdot \left(\frac{4}{3}\right)))^{\frac{1}{3}} = \left(\left(\frac{1}{6} \pi abc\right) \div (\pi \cdot \left(\frac{4}{3}\right))\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{abc} \quad .$$

Il momento di inerzia proprio di questa sfera (unico per i tre assi di rotazione) è:

$$Msfera = \rho \cdot \left(\frac{2}{5}\right) \cdot \left(4 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \cdot (R^3) \cdot (R^2) =$$

$$= \rho \cdot \left(\frac{2}{5}\right) \cdot \left(4 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \cdot \left(\left(\frac{1}{2} \sqrt[3]{abc}\right)^3\right) \cdot \left(\left(\frac{1}{2} \sqrt[3]{abc}\right)^2\right) = \frac{1}{60} \pi abc \rho (abc)^{\frac{2}{3}}$$

Definiamo ora i momenti di inerzia **relativi**, cioè rapportati a $Msfera$ e quindi adimensionali:

$$Minerzia_{XX_rel_sfera_eq} = \frac{Minerzia_{XX}}{Msfera} \quad ;$$

$$Minerzia_{YY_rel_sfera_eq} = \frac{Minerzia_{YY}}{Msfera} \quad ;$$

$$Minerzia_{ZZ_rel_sfera_eq} = \frac{Minerzia_{ZZ}}{Msfera} ;$$

Sostituendo:

$$\begin{aligned} \text{Minerzia}_{XX_rel_sfera_eq} &= \frac{\frac{1}{120} \pi a b c \varrho (b^2 + c^2)}{\frac{\frac{1}{60} \pi a b c \varrho (a b c)^{\frac{2}{3}}}{2}} = \frac{1}{2} \frac{b^2 + c^2}{(a b c)^{\frac{2}{3}}} \\ \text{Minerzia}_{YY_rel_sfera_eq} &= \frac{\frac{1}{120} \pi a b c \varrho (a^2 + c^2)}{\frac{\frac{1}{60} \pi a b c \varrho (a b c)^{\frac{2}{3}}}{2}} = \frac{1}{2} \frac{a^2 + c^2}{(a b c)^{\frac{2}{3}}} \\ \text{Minerzia}_{ZZ_rel_sfera_eq} &= \frac{\left(\frac{1}{120} \pi a b c \varrho (a^2 + b^2) \right)}{\left(\frac{\frac{1}{60} \pi a b c \varrho (a b c)^{\frac{2}{3}}}{2} \right)} = \frac{1}{2} \frac{a^2 + b^2}{(a b c)^{\frac{2}{3}}} \end{aligned}$$

Questi momenti di inerzia **relativi**, tenendo ben presente che $a \geq b \geq c$, costituiscono un panorama di *propensione al moto rotatorio*.

I loro reciproci costituiscono pertanto e nuovamente un panorama di **avversione al moto rotatorio**.

Una sintesi *AVV_moto_rotatorio* delle **avversioni** al moto rotatorio può essere esprimibile come media geometrica dei reciproci:

$$\Omega_R = \text{AVV_moto_rotatorio} = \left(\frac{1}{\frac{1}{2} \frac{b^2 + c^2}{(a b c)^{\frac{2}{3}}}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{a^2 + c^2}{(a b c)^{\frac{2}{3}}}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{a^2 + b^2}{(a b c)^{\frac{2}{3}}}} \right)^{\frac{1}{3}} = 2 \sqrt[3]{a^2 b^2 \frac{c^2}{(a^2 + b^2)(a^2 + c^2)(b^2 + c^2)}}.$$

In definitiva:

$$\Omega_R = \text{AVV_moto_rotatorio} = 2 \sqrt[3]{\frac{a^2 b^2 c^2}{(a^2 + b^2)(a^2 + c^2)(b^2 + c^2)}}$$

La grandezza Ω_R , vista la sua genesi, è naturalmente adimensionale.

E' importante segnalare che l'indice appena definito (indipendente da ϱ) ha un campo di variazione : $0 < \Omega_R \leq 1$ con un estremo superiore corrispondente alla massima avversione al moto rotatorio, allorché $a = b = c$ cioè nel caso di sfericità perfetta del ciottolo.

Indice di avversione al moto traslatorio

La base fisica di quanto segue poggia sulla circostanza che la avversione al moto rettilineo dipende *anche* dall'area trasversa della sezione ortogonale del corpo sottoposto alla fluitazione.

In questo ordine di idee va esplicitato che le tre superfici ellittiche ortogonali trasverse sono:

$$A_{ab} = \pi \frac{a}{2} \frac{b}{2} ; \quad A_{ac} = \pi \frac{a}{2} \frac{c}{2} ; \quad A_{bc} = \pi \frac{b}{2} \frac{c}{2}.$$

Le superfici dei corrispondenti cerchi circoscriventi riferiti alle sezioni sono:

$$c_{ab} = \pi \frac{a}{2} \frac{a}{2} ; \quad c_{ac} = \pi \frac{a}{2} \frac{a}{2} ; \quad c_{bc} = \pi \frac{b}{2} \frac{b}{2}.$$

Costruiamo i rapporti:

$$\frac{A_{ab}}{c_{ab}} = \frac{\pi \frac{a}{2} \frac{b}{2}}{\pi \frac{a}{2} \frac{a}{2}} ; \quad \frac{A_{ac}}{c_{ac}} = \frac{\pi \frac{a}{2} \frac{c}{2}}{\pi \frac{a}{2} \frac{a}{2}} ; \quad \frac{A_{bc}}{c_{bc}} = \frac{\pi \frac{b}{2} \frac{c}{2}}{\pi \frac{b}{2} \frac{b}{2}}.$$

La loro media geometrica, definita come *AVV_moto_traslatorio* è:

$$\Omega_T = \text{AVV_moto_traslatorio} = \left(\frac{A_{ab}}{c_{ab}} \frac{A_{ac}}{c_{ac}} \frac{A_{bc}}{c_{bc}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\pi \frac{a}{2} \frac{b}{2}}{\pi \frac{a}{2} \frac{a}{2}} \frac{\pi \frac{a}{2} \frac{c}{2}}{\pi \frac{a}{2} \frac{a}{2}} \frac{\pi \frac{b}{2} \frac{c}{2}}{\pi \frac{b}{2} \frac{b}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{c}{a} \right)^{\frac{2}{3}}.$$

La grandezza Ω_T è ovviamente adimensionale.

La semplice interpretazione fisica di questo risultato è che, **all'aumento della sezione trasversa, aumenta l'avversione al moto traslatorio**.

In conclusione:

$$\Omega_T = AVV_{moto_traslatorio} = \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{2}{3}}$$

L'indice è funzione del rapporto notevole minimo/massimo $\frac{c}{a}$, è ovviamente adimensionale ed ha un campo di variazione: $0 < \Omega_T \leq 1$.

L'estremo superiore del campo, corrispondente alla massima avversione al moto traslatorio, si ha allorché $c = a$, condizione necessaria nel caso di sfericità perfetta del ciottolo.

Vale la pena di approfondire il significato della grandezza Ω_T .

Definiamo un *indice elementare di sfericità* come la media geometrica $G = \left(\frac{b}{a} \frac{c}{a} \frac{c}{b}\right)^{\frac{1}{3}}$ che assume il valore 1 in caso di sfericità perfetta.

E' immediato verificare che $\frac{G}{\Omega_T} = 1$ cioè che $\Omega_T = G$: l'avversione al moto traslatorio dipende in definitiva dalla maggiore o minore sfericità del corpo, il che supera la perplessità derivante dal fatto che nella definizione di Ω_T sia assente la variabile b . In realtà quest'ultima, nei suoi effetti, è presente **implicitamente**, dato che, per costruzione, $a \geq b$. Ne segue che la grandezza Ω_T deve necessariamente correlarsi

positivamente con qualsiasi altro immaginabile indice di sfericità

I due indici finora elaborati sono dunque:

$$\Omega_R = AVV_{moto_rotatorio} = 2\sqrt[3]{\frac{a^2 b^2 c^2}{(a^2+b^2)(a^2+c^2)(b^2+c^2)}}$$

$$\Omega_T = AVV_{moto_traslatorio} = \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{2}{3}}$$

ambidue adimensionali e ambedue con campo di variazione Δ tale che $0 < \Delta \leq 1$

Sintesi degli indici Ω_R ed Ω_T

Un indicatore sintetico Ψ globale ed **unico di avversione** al moto può essere definito come media geometrica dei due indici: $\Psi = \sqrt{\Omega_R \cdot \Omega_T}$ immediatamente esplicitabile, dopo lo sviluppo algebrico, in termini di a, b, c come:

$$\Psi = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{(a^2+b^2)(a^2+c^2)(b^2+c^2)}\right)^{\frac{1}{6}}$$

Va ora fatta un'osservazione di un certo interesse: E' facile infatti verificare che il valore di Ψ risulta invariante alle trasformazioni: $[a \rightarrow a_1 = \frac{a}{a}; b \rightarrow b_1 = \frac{b}{a}; c \rightarrow c_1 = \frac{c}{a}]$

Dopo semplici manipolazioni algebriche, si può così scrivere:

$$\Psi = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{1}{\left(1+\left(\frac{b}{a}\right)^2\right) \cdot \left(1+\left(\frac{c}{a}\right)^2\right) \cdot \left(\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \left(\frac{c}{a}\right)^2\right)}\right)^{\frac{1}{6}}$$

che evidenzia il ruolo dei rapporti tipici $\frac{b}{a}$ e $\frac{c}{a}$ e che **mostra nettamente come Ψ sia un numero puro**.

Si osservi infine che, come sottoprodotto delle considerazioni che precedono, la grandezza Ψ può essere senz'altro utilizzata anche come indice di sfericità.

Le definizioni e le analisi finora svolte si collocano essenzialmente in una cornice di STATICA.

E' importante ora individuare la loro valenza in termini di DINAMICA: Soffermiamoci

pertanto su alcune considerazioni relative alla **dinamica** del moto di un ideale ciottolo ellissoidale.

Considerazioni (mutuabili per analogia) di resistenza aerodinamica

Ricordiamo anzitutto che le tre superfici ellittiche ortogonali trasverse del ciottolo sono :

$$A_{ab} = \pi \frac{a}{2} \frac{b}{2} \quad (\text{moto in direzione Z}) \quad ; \quad A_{ac} = \pi \frac{a}{2} \frac{c}{2} \quad (\text{moto in direzione Y}) \quad ;$$

$$A_{bc} = \pi \frac{b}{2} \frac{c}{2} \quad (\text{moto in direzione X}) \quad , \text{ la cui media geometrica è:}$$

$$S_c = \left(\pi \frac{a}{2} \frac{b}{2} \cdot \pi \frac{a}{2} \frac{c}{2} \cdot \pi \frac{b}{2} \frac{c}{2} \right)^{\frac{1}{3}} = \sqrt[3]{\frac{1}{64} \pi^3 a^2 b^2 c^2} = \frac{\pi}{4} (abc)^{\frac{2}{3}}$$

Definiamo ora il raggio R di una sfera tale che l'area della sua sezione sia pari a

$$S_c = \frac{\pi}{4} (abc)^{\frac{2}{3}} .$$

Per definizione vale l'equazione $\pi R^2 = \frac{\pi}{4} (abc)^{\frac{2}{3}}$ da cui $R = \frac{1}{2} \sqrt[3]{abc}$ di cui faremo uso in seguito.

Passando a considerazioni di carattere dinamico ricordiamo ora che la definizione del noto "coefficiente di resistenza aerodinamica" Φ (grandezza adimensionale) molto utilizzato in aeronautica , in balistica esterna, nella valutazione dell'efficienza di carrozzerie automobilistiche etc. e concepita per il moto traslatorio è :

$$\Phi = \frac{F}{\frac{1}{2} \delta V^2 S}$$

in cui:

F =forza **opposta** al movimento rettilineo del corpo immerso in un fluido di densità δ ;

V =velocità del corpo in movimento;

S =superficie della sezione retta del corpo in movimento ;

δ = densità del fluido;

Dalla definizione del coefficiente si ricava :

$$F = \Phi \cdot \frac{1}{2} \delta V^2 S.$$

Esaminiamo ora le due situazioni che si hanno allorché si voglia confrontare il comportamento di due corpi distinti , uno dei quali sia ellissoidale scaleno e l'altro sferico, *ma con lo stesso volume*.

Si abbia dunque un corpo ellissoidale con superficie della sezione pari a $S_{corpo} = \pi R^2$. Sarà,ricordando che il raggio della sfera di volume equivalente a quello del corpo sopra definito è:

$$R = \frac{1}{2} \sqrt[3]{abc}$$

$$F_{sfera} = \Phi_{sfera} \cdot \frac{1}{2} \delta V^2 (\pi R^2) = \Phi_{sfera} \cdot \frac{1}{2} \delta V^2 \pi \left(\frac{1}{2} \sqrt[3]{abc} \right)^2$$

mentre, per il corpo associato con cui confrontarsi:

$$F_{corpo} = \Phi_{corpo} \cdot \frac{1}{2} \delta V^2 S_c = \Phi_{corpo} \cdot \frac{1}{2} \delta V^2 \frac{\pi}{4} (abc)^{\frac{2}{3}}$$

Costruiamo il rapporto:

$$\frac{F_{sfera}}{F_{corpo}} = \frac{\Phi_{sfera} \cdot \frac{1}{2} \delta V^2 \pi \left(\frac{1}{2} \sqrt{abc} \right)^2}{\Phi_{corpo} \cdot \frac{1}{2} \delta V^2 \pi \frac{(abc)^{\frac{2}{3}}}{4}} = \sqrt[3]{abc}^2 \frac{\Phi_{sfera}}{\Phi_{corpo} \cdot (abc)^{\frac{2}{3}}} = \frac{\Phi_{sfera}}{\Phi_{corpo}} \cdot \frac{\sqrt[3]{abc}^2}{(abc)^{\frac{2}{3}}} = \frac{\Phi_{sfera}}{\Phi_{corpo}}$$

Essendo dunque il rapporto di forze pari a $\frac{F_{sfera}}{F_{corpo}} = \frac{\Phi_{sfera}}{\Phi_{corpo}}$ si conclude che il rapporto fra la forza opposta al movimento del corpo sferico immerso in un fluido di densità δ e la forza opposta al movimento del corpo di riferimento, sempre immerso in un fluido di densità δ , allorché si muovono con la stessa velocità V è pari al rapporto dei corrispettivi coefficienti aerodinamici.

Naturalmente, il rapporto può essere invertito: $\frac{F_{corpo}}{F_{sfera}} = \frac{\Phi_{corpo}}{\Phi_{sfera}}$ e, se si disponesse di una quantificazione accettabile di Φ_{sfera} e Φ_{corpo} la comparazione delle forze sarebbe immediata.

Orbene, tale quantificazione è possibile, utilizzando i risultati sulle avversioni al moto di cui ci si è occupati in precedenza e ricordando la loro genesi definitoria.

Utilizzando l'indicatore di avversione $\Omega_T = \left(\frac{c}{a} \right)^{\frac{2}{3}}$ possiamo scrivere: $\Phi_{corpo} = \left(\frac{c}{a} \right)^{\frac{2}{3}}$ e tenendo presente che, per un corpo sferico, $\Omega_T = 1$, sarà $\Phi_{sfera} = \Omega_T = 1$ e potremo scrivere: $\frac{F_{corpo}}{F_{sfera}} = \frac{\Phi_{corpo}}{\Phi_{sfera}} = \frac{\Phi_{corpo}}{1} = \Phi_{corpo} \leq 1$.

In altre parole, $\frac{F_{corpo}}{F_{sfera}} = \Phi_{corpo} = \left(\frac{c}{a} \right)^{\frac{2}{3}}$ ed il risultato può essere interpretato nel senso che, **agli effetti della dinamica delle forze avverse al moto traslativo, esiste un vantaggio relativo dei corpi ellissoidali scaleni rispetto a quelli sferici: la forza necessaria a creare movimento del corpo NON sferico immerso in un fluido assegnato è MINORE della forza necessaria, a parità delle altre condizioni (densità, velocità del fluido e superficie esposta), a creare movimento del corpo sferico.**

A questo proposito va ricordato per esempio che, coerentemente con quanto detto sopra, in balistica delle armi da fuoco i proiettili più convenienti non sono sferici ma di forma allungata e, aggiungiamo, con sezione circolare.

In questo ordine di idee (e nell'ottica della fluitazione) si può dunque indurre che, rinvenendo sul terreno un ciottolo prossimo alla sfericità, nella sua storia evolutiva sia ragionevole riconoscere l'esistenza di un lungo processo in cui la grandezza F_{corpo} sia stata elevata per un percorso dato, cioè di un lungo processo ad alta energia.

In questo senso, tenendo presente che il moto del ciottolo è non solo traslativo ma *anche* rotatorio e riconoscendo una decisa **analogia di ruolo** della grandezza Ψ (comprensiva quest'ultima sia del moto traslatorio sia del moto rotatorio) con la grandezza Φ , la conclusione di cui sopra, ai nostri fini, che sono quelli di **legare la geometria del ciottolo alle sue implicazioni dinamiche**, sarebbe di per sé sufficiente. Poiché, dato il

significato delle variabili, vale la disuguaglianza $\sqrt{2} \left(\frac{c}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{(a^2 + b^2)(a^2 + c^2)(b^2 + c^2)} \right)^{\frac{1}{6}} > \left(\frac{c}{a} \right)^{\frac{2}{3}}$

è lecito concludere che la forza F necessaria per muovere il ciottolo, $F > \Psi \cdot \frac{1}{2} \delta V^2 S$, funzione **anche** di un coefficiente Ψ , deve essere in realtà maggiore per il moto traslativo-rotatorio rispetto ad un moto semplicemente traslativo. Ciò rafforza la conclusione che **rinvenendo sul terreno un ciottolo prossimo alla sfericità, è ragionevole**

congetturare che nella sua storia di movimento un lungo processo ad alta energia sia decisamente probabile.

In tal modo la lettura della grandezza Ψ , da un punto di vista **non dimensionale ma esclusivamente numerico** costituisce un utile ausilio nell'analisi dei processi che modellano il ciottolo che si vuole studiare, nel senso che **un alto valore di Ψ (cioè di elevata avversione al moto) va letto come un indizio di elevata forza mobilitata per indurre il ciottolo al movimento per un percorso dato, il che implica anche un'elevata energia del processo sottostante.**

In definitiva la grandezza Ψ fornisce **numericamente** una (ipersemplificata e meramente indiziaria) **immagine** osculatoria *proxy* dell'energia effettivamente necessaria per indurre e mantenere il ciottolo in movimento su un percorso dato.

Alle facili critiche che possono essere mosse alla "quick and dirty", ipersemplificata e grossolana linea di pensiero che porta alla conclusione di cui sopra, va aggiunta la semplice riflessione che nella realtà fenomenica gli attriti, presenti sia nella traslazione sia nella rotazione, non possono essere trascurati e che quindi, a parità delle altre condizioni, la F necessaria per indurre il ciottolo al movimento dovrà essere maggiore di quella calcolabile con la relazione definitoria $F > \Psi \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 S$ per cui in realtà: $F \gg \Psi \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 S$.

Vale la pena di ricordare e ribadire che la grandezza Ψ (per sua natura grandezza adimensionale) non può ovviamente essere trattata come una *misura*: Essa va vista come un semplice **indicatore convenzionale e indiziario di risposta energetica al protratto moto rotatorio - traslatorio di un ellissoide dato (ciottolo) e di un sottostante processo qualificabile in termini di alta o bassa energia.**

Di qui la **liceità di associare indiziarmente (a parità di condizioni) la presenza di un processo ad alta energia relativa (necessaria all'induzione al moto e al suo mantenimento su un percorso dato) ad un alto valore di Ψ , in sé adimensionale ma da interpretare come una proxy dell'energia presente nel processo di moto.**

Utilizzazione degli indici.

Si tratta ora di avviare un esperimento metodologico volto ad utilizzare **indiziarmente** gli indici di avversione al moto $\Omega_R = AVV_moto_rotatorio$, $\Omega_T = AVV_moto_traslatorio$ e $\Psi = \Omega_{glo}$ (sintesi dei due indici di avversione precedenti), nel contesto di processi di fluitazione di lungo periodo che inducono **alta avversione** (presumibilmente associati ad alte energie e flussi tendenzialmente molto turbolenti) e **bassa avversione** (presumibilmente associati a basse energie e a turbolenza ridotta).

Il trattamento formale delle due situazioni di alta e bassa avversione, applicato ad un **coacervo omogeneo di ciottoli (in pratica, ad un insieme di ciottoli raccolto sul terreno)** viene reso agevole istituendo un insieme di postulati costituenti la base di una teorizzazione di tipo deduttivo. Il coacervo di cui sopra, vale la pena di ricordarlo, non può essere assimilato *stricto sensu* ad un campione statistico bernoulliano. Di qui l'indispensabile cautela nell'utilizzo di strumenti statistico di tipo inferenziale.

Innanzitutto postuliamo l'esistenza di un **processo primordiale** di frammentazione della roccia tale da generare un universo di corpi le cui dimensioni a, b, c siano **indipendenti** fra

di loro ma che nel loro insieme siano tali da costituire una distribuzione trivariata di morfologia opportuna. Le medie di ciascuna dimensione saranno a loro volta indipendenti e la matrice di varianza-covarianza del sistema trivariato sarà diagonale.

Un sottoinsieme di questo universo è costituito dal subuniverso degli elementi sottomessi al vincolo: $a \geq b \geq c$. In tal modo la distribuzione congiunta del sistema trivariato risultante NON sarà più a distribuzioni marginali indipendenti e la matrice di varianza-covarianza NON sarà più diagonale avendo, nel subuniverso, implicitamente introdotto correlazione fra le grandezze a, b, c .

L'**universo primigenio** (*Urwelt*) a cui faremo riferimento, **non ancora caratterizzato dai vincoli** $a \geq b \geq c$, verrà pensato come una sfera di **diametro** unitario (con centro $\{a_o = \frac{1}{2}, b_o = \frac{1}{2}, c_o = \frac{1}{2}\}$) al cui interno sono collocati infiniti corpi indipendenti di generiche dimensioni (tutte positive) a, b, c uniformemente diffusi nello spazio tridimensionale così definito.

E' questa modellazione che costituisce il postulato fondamentale dell'esperimento metodologico di cui si dà qui conto.

I parametri definitori del modello, come si vedrà, e contrariamente alle apparenze, non costituiscono affatto un irrigidimento dello stesso ed una limitazione alla sua generalità. Allo scopo di facilitare la comprensione di quanto segue è conveniente precisare il lessico e definire come **Urwelt_0** l'universo primigenio sferico e come **Urwelt_1** il suo sottoinsieme caratterizzato dai vincoli $a \geq b \geq c$.

Nel momento in cui selezioniamo dall' **Urwelt_0** il subuniverso **Urwelt_1** caratterizzato dai vincoli $a \geq b \geq c$ disponiamo di una **struttura di riferimento** a cui si dovrà chiedere, dopo aver acclarate le sue proprietà matematico-statistiche, di esprimere proprietà e scenari **non manifestamente incoerenti** con le realtà fenomeniche offerte alla nostra esperienza.

La struttura di riferimento in discorso è tale da offrire infinite combinazioni delle terne $\{a, b, c\}$, cioè di infiniti scenari morfologici. Ciò va tenuto presente se si argomenta criticamente che il coacervo sperimentale di riferimento effettivamente rilevato sul terreno non proviene *immediatamente* dall' **Urwelt_1** ma ha già vissuto una sua storia di modifiche morfologiche: quest'ultima è comunque formalmente ravvisabile in un qualche scenario all'interno dell' **Urwelt_1** per cui si può ammettere che il coacervo di riferimento in discorso può essere trattato **come se** la sua storia fosse scontata e identificabile in un insieme (in sé primordiale, senza storia) in **Urwelt_1** già presente e ben definito.

La coerenza dell' **Urwelt_1** con i protocolli sperimentali, da verificare con opportune tecniche statistiche di cui ci occuperemo in seguito, costituisce una **proposizione falsificabile**, in senso popperiano, della teoria (*melius*: dell'esperimento metodologico) che si sta sviluppando. E' importante innanzitutto rilevare e sottolineare che, essendo nostra intenzione, come si è visto, lavorare essenzialmente con *rapporti* fra le varie dimensioni, è **perfettamente irrilevante l'unità di misura di** a, b, c , per cui il diametro **unitario** della sfera costituente l' **Urwelt_0** non costituisce una limitazione ma, al contrario, una comoda convenzione di riferimento e di calcolo.

Un primo passo è quello di calcolare sull' **Urwelt_1** gli indici di avversione alla mobilità che

abbiamo definito sopra, cioè
$$\Omega_R = 2 \sqrt[3]{\frac{a^2 b^2 c^2}{(a^2 + b^2)(a^2 + c^2)(b^2 + c^2)}}$$
, $\Omega_T = \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{2}{3}}$ ed infine la loro media

geometrica, $\sqrt{\Omega_R \cdot \Omega_T}$, cioè

$$\Psi_{Urwelt_1} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{1}{\left(1+\left(\frac{b}{a}\right)^2\right) \cdot \left(1+\left(\frac{c}{a}\right)^2\right) \cdot \left(\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \left(\frac{c}{a}\right)^2\right)}\right)^{\frac{1}{6}}$$

Si aprono a questo punto ampi spazi di esplorazione vuoi matematico-statistica formale, vuoi di tipo euristico supportato da analisi empirico-simulatoria.

Le moderne risorse di calcolo oggi disponibili suggeriscono di iniziare con delle analisi empiriche di tipo simulatorio per mettere a fuoco in via preliminare i problemi meritevoli di rigorosa analisi matematica e statistica da affrontare eventualmente in momenti successivi.

Particolarmente interessante e fondamentale appare essere l'indagine sulla grandezza

Ψ_{Urwelt_1} calcolata su **Urwelt_1**, portatrice di un significato fisico decisamente utile, cioè quello di offrire la possibilità di razionali congetture a proposito dei processi (alta o bassa energia) che portano a morfometrie di ciottoli, o di insiemi di ciottoli, osservabili in un dato sito sotto investigazione: Si pensi ad esempio alla possibilità di inferire informazioni da complessi di paleo-ciottoli rinvenibili sul terreno nel corso di uno studio geologico su paleo-ambienti, oppure di trarre informazioni dalle fotografie di ciottoli sulla superficie di Marte etc.

Simulazioni relative allo sfruttamento dell'indicatore sintetico Ψ di avversione

Riassumendo, dovremo anzitutto, ai fini di analisi simulatoria, costruire l' **Urwelt_0**, cioè un numero molto elevato di determinazioni $\{a, b, c\}$ di una variabile tridimensionale sferica (con raggio unitario ed elementi indipendenti) e da esso selezionare l'insieme definito dalla disuguaglianza $a \geq b \geq c$, mettendoci nella condizione di operare su un **Urwelt_1**, cioè di un sottoinsieme opportuno ma sempre di numerosità molto elevata seppur minore di quella dell' **Urwelt_0** iniziale.

Concretamente, ed utilizzando un algoritmo opportuno (cfr. Appendice 1), si procederà simulando 10^6 valori di **Urwelt_0** ed estraendo da essi (per $a \geq b \geq c$) i valori di **Urwelt_1**, che risulteranno in quantità pari a 166827. Sull'insieme di 166827 terne $\{a, b, c\}$ così costruito si calcolerà la grandezza

$$\Psi_{Urwelt_1} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{1}{\left(1+\left(\frac{b}{a}\right)^2\right) \cdot \left(1+\left(\frac{c}{a}\right)^2\right) \cdot \left(\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \left(\frac{c}{a}\right)^2\right)}\right)^{\frac{1}{6}},$$

la sua distribuzione di probabilità (in effetti, di *frequenza relativa*) e si cercheranno le proprietà statisticamente percettibili della stessa.

Calcolando la **media geometrica** dei Ψ_{Urwelt_1} sui dati simulati di **Urwelt_1** si ottiene il valore 0.62654 prossimo al valore del rapporto aureo $\phi = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0.61803$. Si tratta di risultati certamente meritevoli di ulteriore investigazione ma che non approfondiremo in questa sede.

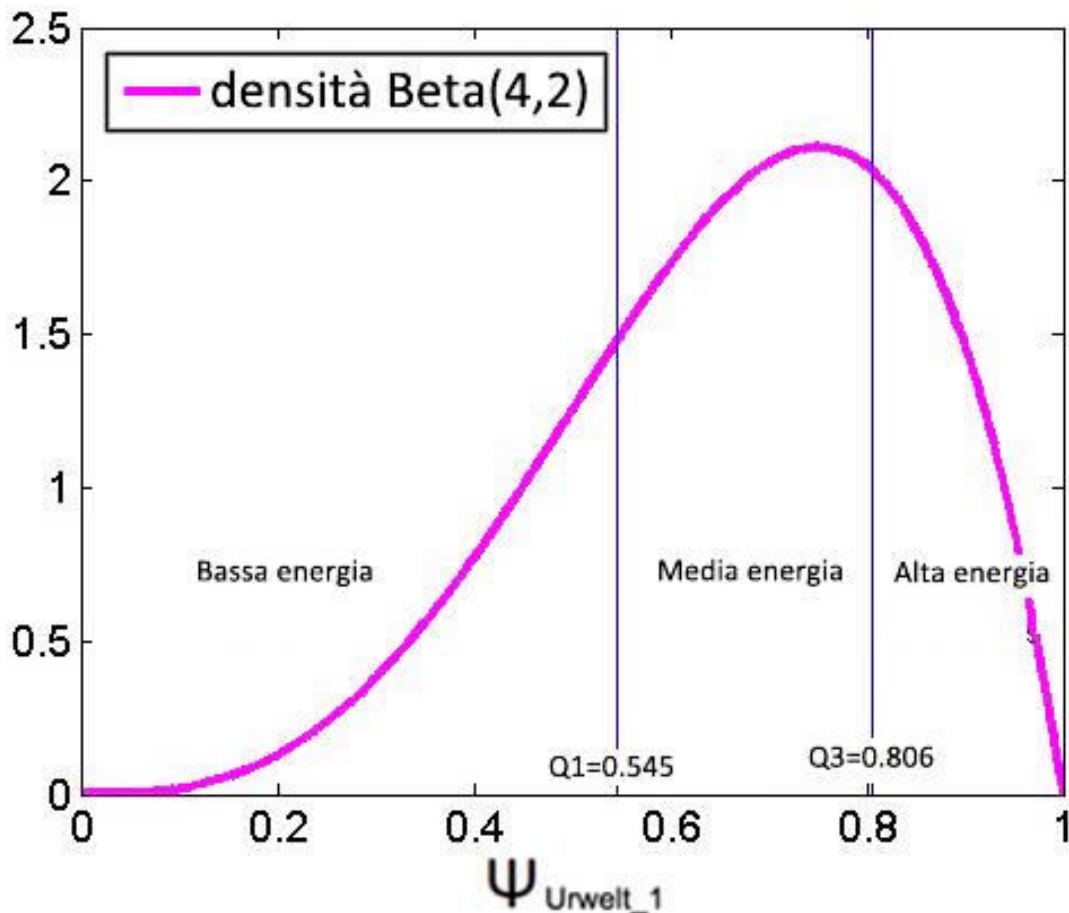
In **Appendice 1** viene esaminata in dettaglio la morfometria dell'universo **Urwelt_1** simulato con 166827 terne $\{a, b, c\}$.

Di fondamentale importanza è **la distribuzione statistica di Ψ_{Urwelt_1}** .

Risulta empiricamente che tale distribuzione può essere molto ben approssimata da una

distribuzione di tipo Beta(4,2).

Essa è rappresentata nella figura che segue, in cui vengono indicate anche le posizioni dei suoi quartili $Q_1 = 0.545$ e $Q_3 = 0.806$.



E' utilizzando questa distribuzione che si potrà impiantare una procedura atta a consentire ragionevoli congetture relative al tipo di processo (**alta energia**, **media energia**, **bassa energia**) generatore della morfometria di un insieme di n ciottoli effettivamente raccolto sul terreno, inteso (*melius*: postulato) come tratto da **Urwelt_1**.

Sarà sufficiente, a tal scopo, confrontare gli n **valori di $\Psi_{coacervo}$ dell'insieme di n elementi con la distribuzione statistica di Ψ_{Urwelt_1}** .

La posizione, per gli n ciottoli del coacervo effettivamente raccolti sul terreno, degli n valori di $\Psi_{coacervo}$ confrontati con la distribuzione statistica di Ψ_{Urwelt_1} consente di **congetturare convenzionalmente un processo ad alta energia se essi sono maggiori del valore Q_3 (terzo quartile della distribuzione di Ψ_{Urwelt_1} , di un processo a bassa energia se essi sono inferiori a Q_1 (primo quartile della stessa distribuzione) ed un processo a media energia se sono compresi fra Q_1 e Q_3** . Si tratta, naturalmente di definizioni convenzionali che possono, se ritenuto opportuno, essere modificate ricorrendo ad altri livelli percentilici di confronto, per esempio facendo ricorso a *decili* anziché a *quartili*. Dato che esiste ovviamente una dispersione dei valori di $\Psi_{coacervo}$ si pone il problema di una loro sintesi.

Quest'ultima potrebbe essere il valore della loro media aritmetica ed il discorso precedente potrebbe essere ad essa riferito, superando l'ambiguità che può insorgere nel caso, perfettamente fisiologico, di valori di $\Psi_{coacervo}$ che compaiono accavallarsi in campi diversi. La media aritmetica non è tuttavia la migliore scelta di sintesi. Per meglio rendersi conto di quanto detto infatti ***è assolutamente essenziale tener presente che ciascun ciottolo dell'insieme effettivamente raccolto sul terreno è titolare di una sua propria vicenda energetica, per cui l'insieme in discorso è composto da elementi non omogenei e l'insieme come tale non può essere trattato come un campione statistico ortodossamente inteso a meno che lo voglia interpretare come un miscuglio di composizione però ignota.***

Ne segue che la media degli n valori di $\Psi_{coacervo}$, non essendo, per le ragioni dette, la media di un campione statistico ortodosso, non può essere intesa altrimenti che come un grossolano indicatore sommario ibrido di vicende energetiche eterogenee e **solo in tal senso** potrebbe essere utilizzata in concreto. Le considerazioni appena fatte precludono l'uso di tecniche statistiche di tipo inferenziale e costringono ad imprigionarci in un discorso meramente descrittivo. La media $E\{\Psi_{coacervo}\}$ degli n valori di $\Psi_{coacervo}$ solo in questo senso (poveramente descrittivo) potrà essere considerata "rappresentativa" della vicenda dell'insieme su cui viene calcolata.

Allo scopo di ottenere una sintesi degli n valori di $\Psi_{coacervo}$ **concettualmente più persuasiva** della semplice media $E\{\Psi_{coacervo}\}$ può essere immaginata l'esistenza di un **ciottolo-immagine** avente come diametri le medie aritmetiche degli n valori dei diametri a : $E\{a\}$, degli n valori dei diametri b : $E\{b\}$, degli n valori dei diametri c : $E\{c\}$.

Associato a questo ciottolo ideale esisterà un valore dell'indice

$$\Psi_{imm} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{E\{c\}}{E\{a\}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{E\{b\}}{E\{a\}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{1}{\left(1 + \left(\frac{E\{b\}}{E\{a\}} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{E\{c\}}{E\{a\}} \right)^2 \right) \cdot \left(\left(\frac{E\{b\}}{E\{a\}} \right)^2 + \left(\frac{E\{c\}}{E\{a\}} \right)^2 \right)} \right)^{\frac{1}{6}}$$

che potrà essere confrontato con le grandezze $Q_1 = 0.545$ e $Q_3 = 0.806$ descritte in precedenza ricavando l'indicazione utile al fine di caratterizzare il processo energetico che ha condotto alla morfometria ellissoidale sotto indagine.

A titolo di esempio consideriamo la Tavola 1, riferita ad un coacervo reale di 46 elementi ragionevolmente ellissoidali raccolto nella Galleria Franosa. I diametri a, b, c , sono in millimetri.

Tavola 1

Protocollo di calcolo dell'avversione al moto Ψ_{coacervo} per ciascun ciottolo

a	b	c	Ω_T	Ω_R	Ψ_{coacervo}	b/a	c/a	c/b
26.850	20.950	3.850	0.274	0.459	0.355	0.780	0.143	0.184
28.520	21.300	7.530	0.412	0.668	0.524	0.747	0.264	0.354
31.020	26.780	7.730	0.396	0.628	0.499	0.863	0.249	0.289
34.990	28.050	8.460	0.388	0.627	0.493	0.802	0.242	0.302
36.020	28.060	9.730	0.418	0.671	0.530	0.779	0.270	0.347
36.700	29.140	10.590	0.437	0.693	0.550	0.794	0.289	0.363
37.980	33.030	11.690	0.456	0.705	0.567	0.870	0.308	0.354
40.250	33.880	12.450	0.457	0.712	0.570	0.842	0.309	0.367
42.370	34.690	12.700	0.448	0.703	0.561	0.819	0.300	0.366
42.560	34.760	13.080	0.455	0.713	0.570	0.817	0.307	0.376
43.350	35.550	13.440	0.458	0.716	0.573	0.820	0.310	0.378
46.160	35.620	13.870	0.449	0.712	0.565	0.772	0.300	0.389
47.710	36.660	14.040	0.442	0.704	0.558	0.768	0.294	0.383
48.960	41.150	14.210	0.438	0.688	0.549	0.840	0.290	0.345
49.730	41.260	14.970	0.449	0.703	0.562	0.830	0.301	0.363
50.240	41.820	14.990	0.447	0.700	0.559	0.832	0.298	0.358
51.030	43.800	15.250	0.447	0.696	0.558	0.858	0.299	0.348
51.840	44.660	15.350	0.444	0.692	0.554	0.861	0.296	0.344
59.120	45.450	15.370	0.407	0.659	0.518	0.769	0.260	0.338
64.100	45.780	16.170	0.399	0.656	0.512	0.714	0.252	0.353
65.510	45.930	16.310	0.396	0.653	0.508	0.701	0.249	0.355
69.460	46.680	16.430	0.382	0.638	0.494	0.672	0.237	0.352
73.970	52.020	17.080	0.376	0.625	0.485	0.703	0.231	0.328
74.660	52.520	17.440	0.379	0.629	0.489	0.703	0.234	0.332
77.280	56.630	17.660	0.374	0.617	0.480	0.733	0.229	0.312
81.640	57.450	17.730	0.361	0.604	0.467	0.704	0.217	0.309
82.500	60.050	19.170	0.378	0.624	0.486	0.728	0.232	0.319
83.170	60.510	20.480	0.393	0.645	0.503	0.728	0.246	0.338
87.200	60.620	22.200	0.402	0.662	0.515	0.695	0.255	0.366
88.240	61.520	22.860	0.406	0.668	0.521	0.697	0.259	0.372
89.150	62.120	23.910	0.416	0.680	0.532	0.697	0.268	0.385
89.200	63.550	24.070	0.418	0.680	0.533	0.712	0.270	0.379
90.520	64.860	24.480	0.418	0.681	0.534	0.717	0.270	0.377
90.700	65.180	24.650	0.420	0.682	0.535	0.719	0.272	0.378
92.220	68.460	24.660	0.415	0.673	0.528	0.742	0.267	0.360
92.710	69.830	25.260	0.420	0.678	0.534	0.753	0.272	0.362
95.420	75.390	25.660	0.417	0.668	0.527	0.790	0.269	0.340
95.940	77.260	25.790	0.417	0.665	0.526	0.805	0.269	0.334
96.090	81.860	28.070	0.440	0.688	0.550	0.852	0.292	0.343
99.960	87.130	31.200	0.460	0.710	0.572	0.872	0.312	0.358
114.720	99.790	32.200	0.429	0.670	0.536	0.870	0.281	0.323
128.940	107.670	32.870	0.402	0.641	0.508	0.835	0.255	0.305
129.530	118.660	43.370	0.482	0.729	0.593	0.916	0.335	0.365
147.070	120.790	43.720	0.445	0.700	0.558	0.821	0.297	0.362
211.370	149.130	48.110	0.373	0.620	0.481	0.706	0.228	0.323
310.820	169.820	51.930	0.303	0.535	0.403	0.546	0.167	0.306

Le prime tre colonne della Tavola 1 registrano le dimensioni a, b, c degli elementi campionari mentre le colonne successive 4,5,6 mostrano i valori delle avversioni al moto

rotatorio ΩR ,

al moto traslatorio ΩT , al moto globale $\Omega_{glob} = \Psi_{coacervo}$, calcolate ciottolo per ciottolo. Le colonne 7,8,9 mostrano i rapporti riferiti alle colonne 1,2,3 e serviranno per ulteriori calcoli di approfondimento.

La media dei valori della colonna 6 è la media sperimentale $m = E\{\Psi_{coacervo}\}$, di cui si è detto in precedenza, calcolata sugli $n = 46$ valori di $\Psi_{coacervo}$.

Nel nostro caso risulta essere $m = 0.52447$. A noi interessano, ai fini di calcolo, i valori

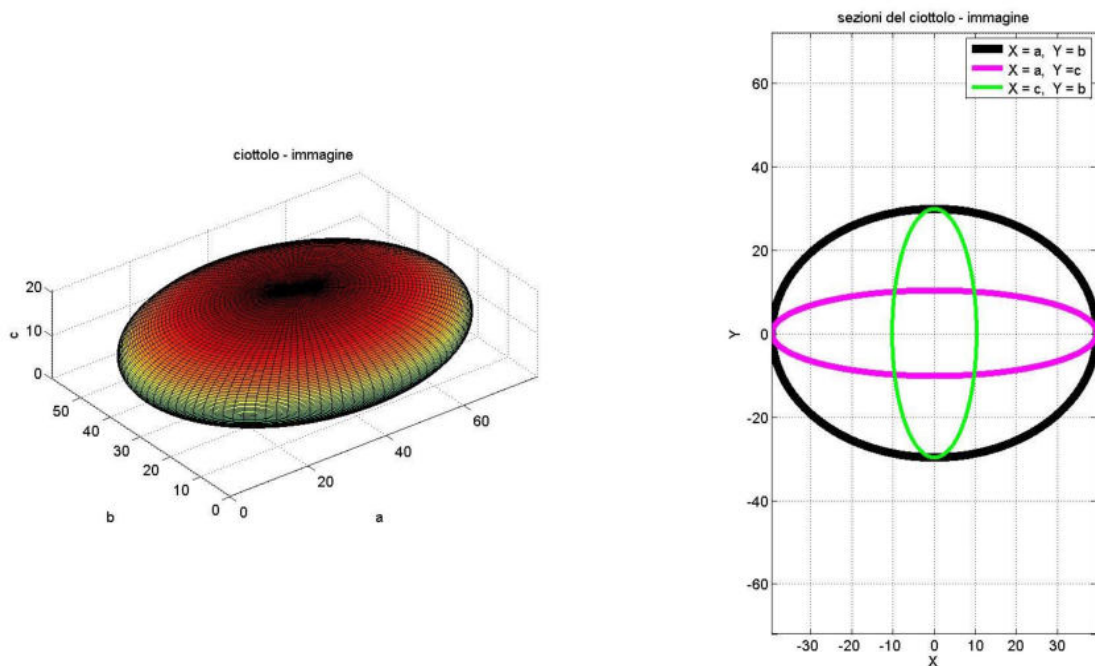
$$E\{a\} = 78.858, E\{b\} = 59.518, E\{c\} = 20.495, \text{ ed i rapporti } \frac{E\{b\}}{E\{a\}} = \frac{59.518}{78.858} = 0.75475 \text{ e } \frac{E\{c\}}{E\{a\}} = \frac{20.495}{78.858} = 0.25990.$$

Il valore di Ψ_{imm} calcolato utilizzando i risultati precedenti sarà:

$$\Psi_{imm} = \sqrt{2} \cdot (0.25990)^{\frac{2}{3}} \cdot (0.75475)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{1}{(1+(0.75475)^2) \cdot (1+(0.25990)^2) \cdot ((0.25990)^2 + (0.75475)^2)} \right)^{\frac{1}{6}} = 0.51869.$$

Quest'ultimo valore, ancorchè non molto dissimile dal valore di m , è il valore a cui è **concettualmente** preferibile fare riferimento.

La struttura del ciottolo-immagine così definita è illustrata nella figura che segue.



Qualora si volesse decidere di ritenere lecito che esiste idealmente **UN** ciottolo-immagine equivalente (in termini di fluitazione) all'insieme degli n ciottoli dell'insieme in esame, il valore Ψ_{imm} a quel ciottolo associato potrebbe essere lecitamente essere visto come una realizzazione *interna* alla distribuzione di Ψ e non come la realizzazione di un valore della distribuzione della grandezza *media campionaria* di campioni tratti dalla distribuzione di Ψ . Va da sé che, optando per questo modo di procedere (*ciottolo-immagine*), si opta purtroppo

anche per la rinunzia a qualsiasi ragionamento di tipo inferenziale : ciò implica che la conclusione di un'investigazione energetica relativa al processo che conduce alla definizione di particolari valori di $\Psi_{coacervo}$ (*melius*, della loro media) avrebbe la stessa credibilità (probabilistica) sia che l'insieme su cui si opera sia composto da n ciottoli sia che esso sia elementarmente composto di UN solo ciottolo. Apparentemente si tratterebbe di schietta blasfemia statistica e certamente lo sarebbe se lo scopo fosse quello di cercare una vera e propria **DIAGNOSI** di processo e non una semplice **CONGETTURA** ed esso relativa, ancorchè ampiamente ragionata.

E' da ribadire che in seguito NON si farà ricorso - deliberatamente - alla distribuzione campionaria delle medie di campioni di n elementi tratti da un universo di tipo $Beta(4,2)$, stante il fatto che l'insieme degli n elementi raccolti sul terreno NON può essere considerato un vero e proprio campione statisticamente trattabile.

Nel caso dell'esempio, $\Psi_{imm} = 0.51869$. Ricordiamo che il primo quartile della distribuzione $Beta(4,2)$ è $Q_1 = 0.54582$.

Poiché nel caso dell'esempio Ψ_{imm} è ceteriore a sinistra di Q_1 (cioè $\Psi_{imm} < Q_1$) si conclude, in via congetturale, che l'insieme dei ciottoli esaminati è il risultato di un processo di fluitazione a bassa energia.

Sulla credibilità di questo risultato torneremo in seguito. Per il momento vale la pena di osservare che seguendo la procedura appena illustrata ed accettandone i limiti, è certamente agevole l'induzione congetturale relativa alla natura dei processi di fluitazione relativi all'insieme che ci interessa: Va tuttavia rilevato che la procedura suggerita è basata bensì sul semplice calcolo numerico degli n valori $\Psi_{coacervo}$ dell'insieme di ciottoli in esame ma anche che tali calcoli sono decisamente fastidiosi : una loro semplificazione sarebbe certamente utile.

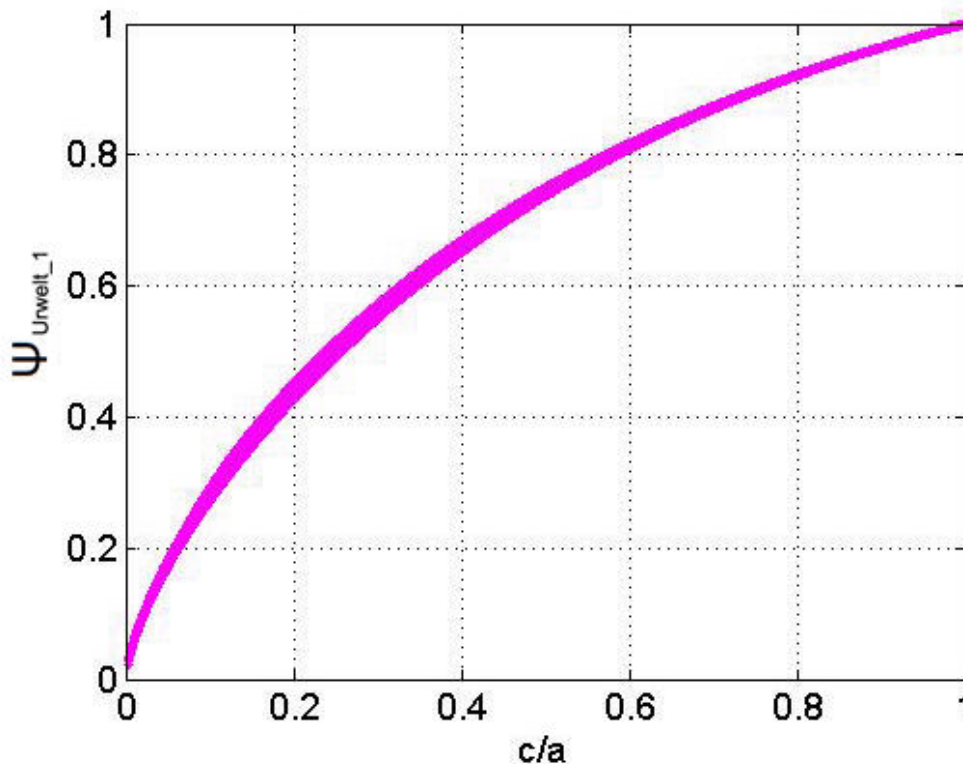
Allo scopo esaminiamo la distribuzione congiunta delle variabili $\frac{c}{a}$ e Ψ_{Urwelt_1}

Ricordiamo che la densità $Beta(4,2)$ è stata candidata in precedenza come modello distributivo di Ψ_{Urwelt_1} .

Ne segue che, per il subuniverso $Urwelt_1$ sono disponibili per simulazione 166827 terne $\{a, b, c\}$. Su di esse si calcoleranno le grandezze $\frac{c}{a}$ e i corrispondenti valori di

$$\Psi_{Urwelt_1} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{c}{a}\right)^2\right) \cdot \left(\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \left(\frac{c}{a}\right)^2\right)} \right)^{\frac{1}{6}}.$$

La loro distribuzione congiunta è illustrata nella figura che segue.



Calcolando numericamente le medie delle distribuzioni condizionali di $\Psi_{Urwelt_1} \triangleleft \frac{c}{a}$ il loro luogo geometrico può essere ben approssimato della funzione di regressione :

$$\Psi_{Urwelt_1} \cong K_A - K_B \cdot e^{-K_C \cdot (\frac{c}{a})^{K_D}}$$

in cui:

$$K_A = 1.3056175$$

$$K_B = 1.2910011$$

$$K_C = 1.4495981$$

$$K_D = 0.7956039$$

calcolati per minimi quadrati.

Al prezzo di un'accettabile approssimazione l'utilità, in termini di calcolo numerico, della funzione di regressione appena descritta è evidente. Calcolandola per il rapporto

$$\frac{E\{c\}}{E\{a\}} = \frac{20.495}{78.858} = 0.25990 \text{ individuato in precedenza per la TAVOLA 1 si ottiene:}$$

$$\Psi_{Urwelt_1} = 1.3056175 - 1.2910011 \cdot e^{-1.4495981 \cdot (0.25990)^{0.7956039}} = 0.51961 \text{ non molto diverso dal valore "esatto" } \Psi_{imm} = 0.55917 \text{ sempre calcolato in precedenza.}$$

Anche qualora volessimo imporre $K_B = K_A$ allo scopo di ottenere una funzione di regressione più persuasiva dal punto di vista formale otterremmo

$$1.3056175 - 1.3056175 \cdot e^{-1.4495981 \cdot (0.25990)^{0.7956039}} = 0.51071, \text{ valore pur esso accettabile.}$$

E' il momento di un'ultima, importante, osservazione.

Data la funzione $\Psi_{Urwelt_1} \cong K_A - K_B \cdot e^{-K_C \cdot (\frac{c}{a})^{K_D}}$ la sua inversa è $\frac{c}{a} \cong e^{\frac{\log\left(\frac{K_A - \Psi_{Urwelt_1}}{K_B}\right)}{-K_C}}^{\frac{1}{K_D}}$.
per cui è lecito scrivere:

$$\frac{E\{c\}}{E\{a\}} \cong e^{\frac{\log\left(\frac{K_A - \Psi_{imm}}{K_B}\right)}{-K_C}}^{\frac{1}{K_D}}$$

Sostituendo a Ψ_{imm} dapprima il valore quartilico $Q_1 = 0.545$ e poi il valore quartilico $Q_3 = 0.806$ otteniamo

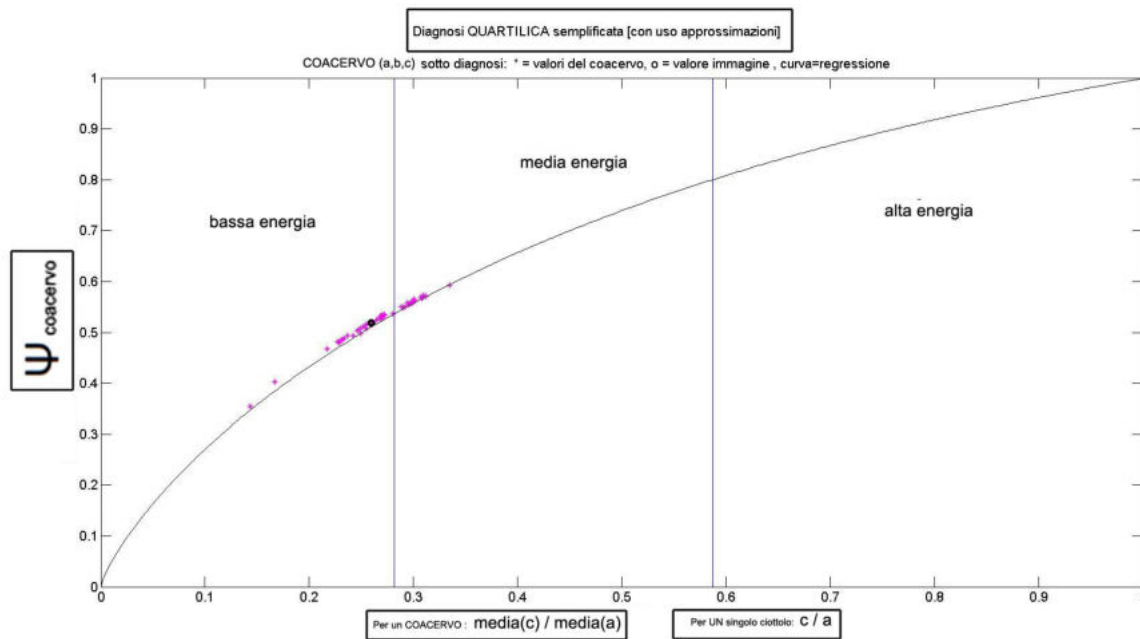
$$\left(\frac{E\{c\}}{E\{a\}}\right)_{Q_1} \cong e^{\frac{\log\left(\frac{K_A - Q_1}{K_B}\right)}{-K_C}}^{\frac{1}{K_D}} \cong e^{\frac{\log\left(\frac{1.3056175 - 0.545}{1.2910011}\right)}{-1.4495981}}^{\frac{1}{0.7956039}} \cong 0.28170$$

$$\left(\frac{E\{c\}}{E\{a\}}\right)_{Q_3} \cong e^{\frac{\log\left(\frac{K_A - Q_3}{K_B}\right)}{-K_C}}^{\frac{1}{K_D}} \cong e^{\frac{\log\left(\frac{1.3056175 - 0.806}{1.2910011}\right)}{-1.4495981}}^{\frac{1}{0.7956039}} \cong 0.58741$$

La conclusione, importante, è che per eseguire congetture razionali relative alla storia energetica di un coacervo dato di ciottoli ellissoidali, è sufficiente, in via approssimata, fare ricorso ai valori del rapporto $\frac{E\{c\}}{E\{a\}}$:

Per il campo processo;	$0 < \frac{E\{c\}}{E\{a\}} \leq 0.28170$	\rightarrow	basso livello energetico di
Per il campo processo;	$0.28170 < \frac{E\{c\}}{E\{a\}} \leq 0.58741$	\rightarrow	medio livello energetico di
Per il campo processo.	$0.58741 < \frac{E\{c\}}{E\{a\}} \leq 1$	\rightarrow	alto livello energetico di

Nel caso dell'esempio relativo al coacervo di Tavola 1 si ha $\frac{E\{c\}}{E\{a\}} = \frac{20.495}{78.858} = 0.25990 < 0.28170$ ed è **quindi lecito congetturare un basso livello energetico del processo**. Il grafico che segue riassume ed epifanizza la procedura adottata.



Attendibilità della procedura adottata

Va ricordato che la conclusione a cui si perviene, dopo aver adottato una qualsiasi delle due procedure appena descritte, poggia essenzialmente sulla postulazione iniziale che porta alla definizione della grandezza fondamentale Ψ_{Urwelt} la quale ha natura squisitamente deduttiva.

Una condizione *necessaria* (ma non *sufficiente*) utile per la verifica della conformità dello stato di natura su cui si opera (coacervo reale di n elementi) alla postulazione di fondo della teoria può essere ravvisata nella conformità dell'insieme di rapporti $\frac{b}{a}, \frac{c}{a}, \frac{c}{b}$

(effettivamente calcolati sul coacervo reale di n elementi) all'insieme dei rapporti

analoghi $\frac{b_1}{a_1}, \frac{c_1}{a_1}, \frac{c_1}{b_1}$ calcolati sull'insieme **Urwelt₁**.

Una tecnica conveniente per accertare la conformità di cui si è detto consiste nel calcolare le componenti principali sulle circa 166827 terne $\{\frac{b}{a}, \frac{c}{a}, \frac{c}{b}\}$ di **Urwelt₁**.

Le componenti principali vengono calcolate sulla matrice di varianza-covarianza delle terne suddette. La matrice risulta essere la seguente:

0.030139	0.013237	-0.008508
0.013237	0.040172	0.040067
-0.008508	0.040067	0.061043

e da essa, allorchè sottoposta ad eigen-analisi, si ottengono i seguenti risultati:

autovalori ordinati:

0.092043	0.038494	0.00081726
----------	----------	------------

autovettori ordinati (a modulo uno, in colonna)

0.02311	0.88145	-0.47172
0.61483	0.35953	0.70194

0.78832 -0.30625 -0.53363

Le percentuali (rispetto al totale) associate alla cumulazione degli autovalori , sono:

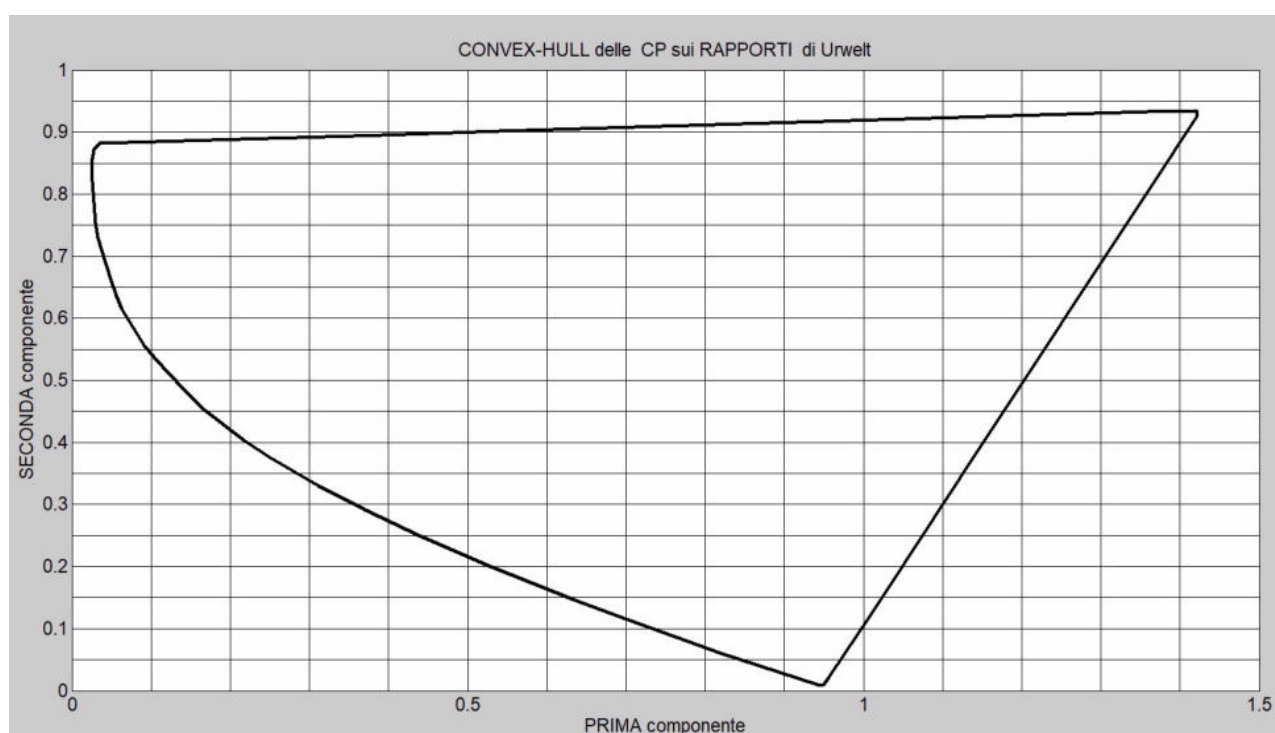
70.072 99.378 100 .

Appare evidente che **le due prime componenti principali (CP1 e CP2 su Urwelt_1) catturano praticamente tutta (99.378 %) l'informazione disponibile** e potranno essere definite , dopo il loro calcolo, come :

$$CP1_{Urwelt} = 0.02311 \cdot \frac{b}{a} + 0.61483 \cdot \frac{c}{a} + 0.78832 \cdot \frac{c}{b}$$

$$CP2_{Urwelt} = 0.88145 \cdot \frac{b}{a} + 0.35953 \cdot \frac{c}{a} - 0.30625 \cdot \frac{c}{b}$$

Il luogo geometrico dei punti-periferia della distribuzione bivariata $\{CP1_{Urwelt}, CP2_{Urwelt}\}$, definito comunemente come **convex-hull** , assume l'aspetto del grafico seguente, che costituisce il riferimento generale ,valido in qualsiasi circostanza, per i controlli di conformità universo-coacervo.



Il controllo di conformità (o tentativo di falsificazione), partendo dal complesso delle terne $\left\{ \frac{b_1}{a_1}, \frac{c_1}{a_1}, \frac{c_1}{b_1} \right\}$ del coacervo si esegue concretamente collocando sul grafico appena costruito i punti di coordinate:

$$CP1_{coacervo} = 0.02311 \cdot \frac{b_1}{a_1} + 0.61483 \cdot \frac{c_1}{a_1} + 0.78832 \cdot \frac{c_1}{b_1}$$

$$CP2_{coacervo} = 0.88145 \cdot \frac{b_1}{a_1} + 0.35953 \cdot \frac{c_1}{a_1} - 0.30625 \cdot \frac{c_1}{b_1}$$

La tavola seguente riassume i dettagli del calcolo ($cp1 = CP1_{coacervo}, cp2 = CP2_{coacervo}$)

TAVOLA 2

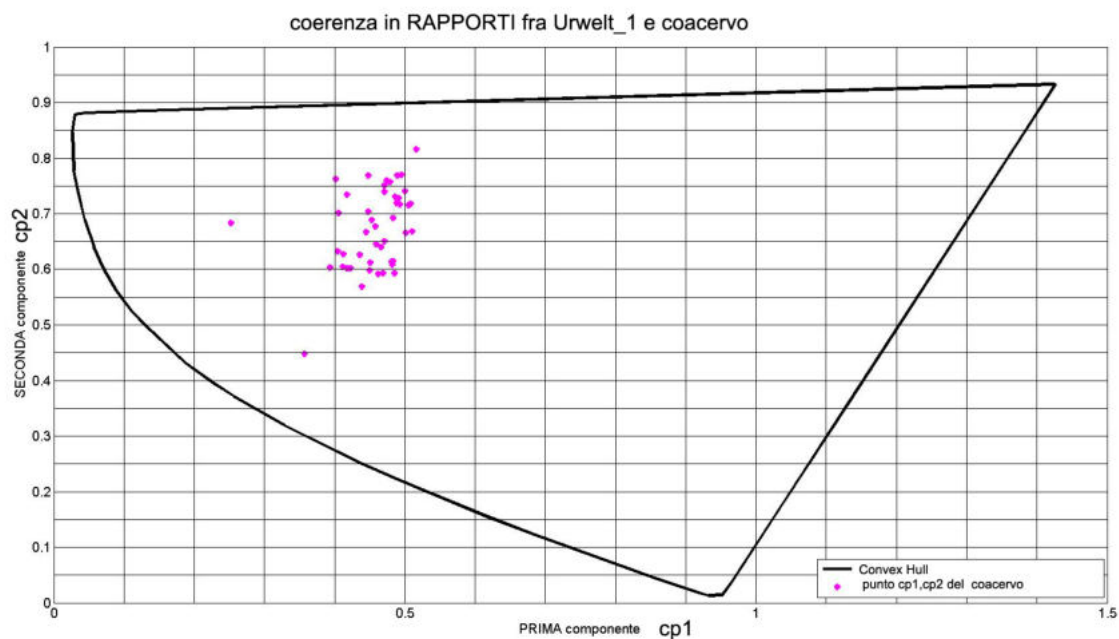
Protocollo per il calcolo delle componenti principali cp1 e cp2

a	b	c	b/a	c/a	c/b	cp1	cp2
26.850	20.950	3.850	0.780	0.143	0.184	0.252	0.683
28.520	21.300	7.530	0.747	0.264	0.354	0.459	0.645
31.020	26.780	7.730	0.863	0.249	0.289	0.402	0.762
34.990	28.050	8.460	0.802	0.242	0.302	0.406	0.701
36.020	28.060	9.730	0.779	0.270	0.347	0.458	0.677
36.700	29.140	10.590	0.794	0.289	0.363	0.483	0.692
37.980	33.030	11.690	0.870	0.308	0.354	0.489	0.769
40.250	33.880	12.450	0.842	0.309	0.367	0.500	0.740
42.370	34.690	12.700	0.819	0.300	0.366	0.493	0.717
42.560	34.760	13.080	0.817	0.307	0.376	0.505	0.715
43.350	35.550	13.440	0.820	0.310	0.378	0.508	0.718
46.160	35.620	13.870	0.772	0.300	0.389	0.510	0.669
47.710	36.660	14.040	0.768	0.294	0.383	0.501	0.665
48.960	41.150	14.210	0.840	0.290	0.345	0.471	0.739
49.730	41.260	14.970	0.830	0.301	0.363	0.491	0.728
50.240	41.820	14.990	0.832	0.298	0.358	0.486	0.731
51.030	43.800	15.250	0.858	0.299	0.348	0.479	0.757
51.840	44.660	15.350	0.861	0.296	0.344	0.474	0.760
59.120	45.450	15.370	0.769	0.260	0.338	0.445	0.667
64.100	45.780	16.170	0.714	0.252	0.353	0.451	0.612
65.510	45.930	16.310	0.701	0.249	0.355	0.450	0.598
69.460	46.680	16.430	0.672	0.237	0.352	0.439	0.569
73.970	52.020	17.080	0.703	0.231	0.328	0.418	0.602
74.660	52.520	17.440	0.703	0.234	0.332	0.422	0.602
77.280	56.630	17.660	0.733	0.229	0.312	0.404	0.632
81.640	57.450	17.730	0.704	0.217	0.309	0.394	0.604
82.500	60.050	19.170	0.728	0.232	0.319	0.412	0.627
83.170	60.510	20.480	0.728	0.246	0.338	0.436	0.626
87.200	60.620	22.200	0.695	0.255	0.366	0.462	0.592
88.240	61.520	22.860	0.697	0.259	0.372	0.469	0.594
89.150	62.120	23.910	0.697	0.268	0.385	0.485	0.592
89.200	63.550	24.070	0.712	0.270	0.379	0.482	0.609
90.520	64.860	24.480	0.717	0.270	0.377	0.481	0.613
90.700	65.180	24.650	0.719	0.272	0.378	0.483	0.615
92.220	68.460	24.660	0.742	0.267	0.360	0.466	0.640
92.710	69.830	25.260	0.753	0.272	0.362	0.471	0.651
95.420	75.390	25.660	0.790	0.269	0.340	0.453	0.689
95.940	77.260	25.790	0.805	0.269	0.334	0.448	0.704
96.090	81.860	28.070	0.852	0.292	0.343	0.470	0.751
99.960	87.130	31.200	0.872	0.312	0.358	0.495	0.771
114.720	99.790	32.200	0.870	0.281	0.323	0.448	0.769
128.940	107.670	32.870	0.835	0.255	0.305	0.418	0.734
129.530	118.660	43.370	0.916	0.335	0.365	0.516	0.816
147.070	120.790	43.720	0.821	0.297	0.362	0.488	0.720
211.370	149.130	48.110	0.706	0.228	0.323	0.411	0.605
310.820	169.820	51.930	0.546	0.167	0.306	0.357	0.448

La condizione necessaria di conformità è accettata allorchè le coppie

$\{CP1_{coacervo}, CP2_{coacervo}\}$ **si collocano tutte all'interno del convex-hull**

$\{CP1_{Urwelt}, CP2_{Urwelt}\}$. Richiamandoci ai valori della Tavola 1 (coacervo della Galleria Franosa), i valori di $CP1_{coacervo}$ e di $CP2_{coacervo}$, collocati all'interno del **convex-hull** danno origine al grafico seguente:



Nel caso in esame la conformità coacervo-universo è verificata, **il sistema di postulazioni NON risulta falsificato in senso popperiano** ed il coacervo pertanto NON è "Weltlos".

Allegato 2 - Tabelle

Nota alle tabelle

I metodi utilizzati per le analisi delle acque del Complesso carsico del monte Corchia sono quelli impiegati presso l'allora laboratorio delle acque potabili, minerali e termali del Dipartimento ARPAT di Firenze dove le analisi sono state effettuate, in quanto tali metodi sono quelli più adeguati per l'analisi della tipologia delle acque circolanti entro questo Complesso carsico.

Per la maggior parte dei parametri determinati sono disponibili i dati di incertezza di misura; nelle tabelle i dati di incertezza non sono stati riportati per rendere più leggibili tali tabelle. I valori di incertezza di misura sono stati talvolta impiegati in particolari lavori di ricerca.

Alcuni valori dei parametri possono presentare differenti limiti di rivelabilità poiché nel corso degli anni alcune metodiche analitiche possono avere subito modifiche; ad esempio per l'ammonio il limite di rivelabilità varia da 0,1 mg/L a <1 ug/L, in quanto si sono usate differenti tecniche analitiche (in relazione all'evoluzione delle apparecchiature di analisi) che hanno permesso un marcato abbassamento di tale limite.

Per quanto riguarda l'espressione dei risultati, questi sono riportati con le cifre significative che derivano dai protocolli del Sistema Qualità del laboratorio del Dipartimento ARPAT di Firenze.

Allegato 2 - Tabelle

Sorgente Cardoso *

Data prelievo	Portata	Temperatura aria	Temperatura acqua	Ossigeno disciolto	% saturazione	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogeno carbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	T.O.C.	Silice
	L/min	°C	°C	mg/L O ₂	%	µS/cm 25 °C	N.T.U.		mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L C	mg/L SiO ₂
08/07/1997	-	24,5	11,4	-	-	272	1,1	8,0	< 0,1	< 0,05	-	5,8	1,6	14,5	142	3,8	0,5	39,7	8,0	2,1	-
18/12/1997	-	10,1	9,8	-	-	239	1,0	8,1	< 0,1	< 0,05	-	5,4	1,0	9,0	128	2,9	0,3	32,8	7,0	1,8	-
18/03/1998	-	11,8	9,7	-	-	248	0,4	8,3	< 0,1	< 0,05	0,05	4,5	0,9	10,8	125	3,1	0,3	35,9	7,1	-	2,8
25/05/1998	-	16,0	10,3	8,0	71	260	0,3	8,2	< 0,1	< 0,05	-	4,9	1,1	14,5	137	3,3	0,3	37,3	8,2	-	2,5
10/09/1998	90	19,4	10,8	-	-	271	0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	-	4,7	0,8	18,0	140	4,0	0,5	39,6	9,0	-	-
19/09/1998	110	13,5	10,5	-	-	250	18,9	8,3	< 0,1	< 0,05	-	5,5	2,3	14,2	128	3,8	0,7	38,8	6,8	-	-
08/10/1998	>500	13,1	10,0	-	-	233	0,2	8,2	< 0,1	< 0,05	-	5,6	1,6	8,2	131	3,5	0,3	36,2	6,9	-	-
25/04/1999	300	9,5	9,5	-	-	239	0,4	7,6	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,4	0,9	9,1	125	4,0	0,3	33,3	6,7	-	-
02/12/1999	250	11,0	10,5	-	-	263	0,1	7,9	< 0,1	< 0,05	< 0,1	5,4	2,0	13,3	146	4,1	0,3	38,2	9,2	-	-
01/03/2000	> 1000	-	10,9	-	-	270	2,8	7,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,8	1,3	15,9	137	4,1	0,4	36,7	9,0	-	-
01/03/2000	> 1000	-	10,9	-	-	274	5,0	7,4	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,1	1,0	15,8	140	4,1	0,5	38,9	8,4	-	-
24/03/2000	170	-	11,2	-	-	267	0,7	7,2	< 0,1	< 0,05	< 0,1	9,5	1,4	16,3	136	4,4	1,8	34,0	9,5	-	-
25/03/2000	> 1000	-	-	-	-	246	1,8	7,2	< 0,1	< 0,05	< 0,1	8,0	1,1	11,6	128	3,6	0,4	33,0	8,9	-	-
25/03/2000	500 ?	-	-	-	-	246	1,4	7,7	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,8	1,0	11,7	130	3,6	0,2	32,8	8,9	-	-
25/03/2000	400 ?	-	-	-	-	247	0,8	7,8	< 0,1	< 0,05	< 0,1	8,5	1,3	11,7	128	3,7	0,3	32,1	9,2	-	-
05/09/2001	600	16,3	11,4	-	-	256	0,3	8,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,1	1,7	16,8	137	3,9	0,7	35,1	9,7	-	-
17/11/2002	0,5 m³/sec	-	10,1	-	-	245	0,2	7,9	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,8	1,4	8,0	144	4,2	< 0,5	36,7	9,7	-	-
12/04/2003	500	-	10,2	-	-	221	0,3	7,9	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,9	2,2	9,0	129	5,0	< 0,5	33,6	9,3	-	-
23/03/2004	> 1000	14,0	10,0	-	-	221	0,2	8,0	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,6	1,6	7,4	126	4,0	< 0,5	32,4	8,4	-	-
29/09/2004	85	-	10,8	-	-	278	0,2	7,8	< 0,1	< 0,05	0,13	7,0	2,7	18,2	138	4,9	0,5	38,7	10,5	-	-
16/03/2005	100	-	10,2	-	-	270	0,4	8,0	< 0,1	< 0,05	0,15	7,1	1,7	18,1	139	4,4	0,4	39,1	10,6	-	-
30/08/2005	150	-	10,9	-	-	269	0,3	7,2	< 0,1	< 0,05	0,14	6,3	2,0	17,5	140	3,9	0,4	38,0	10,8	-	-
07/03/2006	900	-	10,0	-	-	224	0,4	8,1	< 0,02	< 0,01	0,12	8,1	2,2	9,3	117	4,7	1,0	34,2	7,6	-	-
13/02/2007	circa 6000	-	10,1	-	-	242	2,5	7,3	< 0,1	< 0,05	< 0,1	8,4	1,8	8,3	134	4,1	< 0,3	39,0	7,0	-	-
22/04/2008	400-500 L/s	-	10,1	-	-	245	< 0,1	7,8	-	< 0,05	< 0,1	8,7	0,9	8,4	128	4,9	< 0,3	37,7	8,8	-	-
06/04/2010	circa 5000	-	9,7	-	-	240	< 0,1	-	< 0,05	< 0,01	< 0,1	5,5	1,2	9,9	128	3,9	0,3	35,0	7,9	-	-
14/12/2010	100	0,5	10,2	-	-	232	-	7,8	-	-	< 0,1	5,4	1,0	10,5	134	3,9	0,3	34,5	7,0	-	-
10/08/2011	60 L/min	22,0	11,4	-	-	244	-	8,1	-	-	0,10	5,8	1,7	16,6	140	4,6	0,4	38,6	8,8	-	-
09/11/2011	circa 1200 L/min	-	-	-	-	234	-	7,6	< 0,05	-	< 0,10	4,5	2,0	8,0	138	3,0	0,3	34,7	7,5	-	-
29/02/2012	circa 150 L/min	-	9,8	-	-	264	< 0,1	7,7	< 1 ug/L	-	0,12	6,7	1,4	16,5	144	4,4	0,3	38,2	10,0	-	-
02/08/2012	120 L/min	-	-	-	-	278	-	8,0	< 1 ug/L	-	0,08	6,8	1,5	16,3	150	4,7	0,5	41,1	9,3	-	-
20/08/2012	-	-	-	-	-	280	-	8,0	-	-	< 0,10	6,7	1,6	16,3	154	4,9	0,6	40,8	9,3	-	-

* Le misure di portata della Sorgente (o Fontane) di Cardoso, effettuate durante l'intero periodo di monitoraggio, sono state sempre effettuate alla sorgente superiore e non sono rappresentative della portata dell'insieme di tutte le sorgenti.

Cascata della Fangaia

Data prelievo	Portata	Temperatura aria	Temperatura acqua	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogenocarbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	Silice
	L/min	°C	°C	µS/cm 25 °C	N.T.U.		mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L SiO ₂
16/05/1997	30	-	8,1	217	64	8,2	<0,1	<0,05	0,06	4,2	2,1	12,8	116	2,0	0,5	39,1	2,5	1,3
14/05/1998	-	8,5	8,2	238	1,1	8,2	<0,1	<0,05	<0,1	4,8	2,9	17,0	116	2,1	0,3	42,7	2,0	1,0
10/09/1998	18	8,2	8,3	253	0,6	8,4	<0,1	<0,05	<0,1	5,3	3,9	21,5	113	2,7	0,5	43,4	1,8	-
05/05/2000	75	-	-	245	3,3	8,0	<0,1	<0,05	<0,1	7,8	3,1	15,5	112	4,6	0,4	38,5	3,3	1,3

Cascata della Gronda

Torrente della Gronda Caratteristiche chimiche e chimico-fisiche delle acque del sistema carsico del Monte Corchia	Data prelievo	Portata	Anidride carbonica	Temperatura aria	Temperatura acqua	Ossigeno disciolto	% saturazione	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogeno carbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	T.O.C.	Silice
		L/min	mg/L	°C	°C	mg/L O ₂	%	µS/cm 25 °C	N.T.U.		mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L C	mg/L SiO ₂
	15/05/1997	30	< 2	7,9	7,5	10,3	86	239	0,1	8,2	< 0,1	< 0,05	0,10	4,7	0,8	5,9	136	1,9	0,1	28,7	11,7	0,5	1,6
	11/09/1997	8	< 2	7,8	7,6	-	-	249	0,3	8,2	< 0,1	< 0,05	0,14	4,4	1,0	8,0	138	3,5	0,1	28,8	12,6	-	-
	29/11/1997	127	-	7,9	7,8	-	-	238	0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	0,06	4,8	< 0,5	3,6	134	3,1	0,1	29,3	11,1	1,3	-
	18/12/1997	560	-	-	7,7	-	-	216	0,4	8,2	< 0,1	< 0,05	-	4,6	0,5	3,9	128	2,8	0,1	24,9	10,1	-	-
	05/03/1998	186	-	7,8	7,7	11,4	96	238	0,1	8,2	< 0,1	< 0,05	-	5,6	1,1	6,5	134	3,4	0,1	29,5	10,8	-	-
	16/04/1998	556	-	7,7	7,4	-	-	219	0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	-	6,7	< 0,5	4,2	122	3,3	0,1	28,3	9,1	-	-
	14/05/1998	32	-	7,7	7,6	-	-	224	0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	-	5,2	0,9	6,4	138	3,9	0,1	28,7	12,0	-	1,3
	26/05/1998	27	-	7,8	7,7	-	-	245	0,2	8,3	< 0,1	< 0,05	-	4,8	1,1	6,4	140	2,4	0,1	31,4	11,3	-	-
	13/07/1998	15	-	7,7	7,7	-	-	245	0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	< 0,1	3,2	1,1	6,4	146	3,1	0,3	30,1	11,6	-	-
	10/09/1998	7,5	-	7,8	7,8	-	-	263	0,2	8,4	< 0,1	< 0,05	< 0,1	-	-	-	140	3,2	-	28,3	12,7	-	-
	08/10/1998	490	-	8,2	8,1	-	-	230	0,2	8,4	< 0,1	< 0,05	< 0,1	4,9	0,7	3,9	137	3,4	0,2	29,3	10,6	-	-
	02/11/1998	330	-	7,9	8,0	-	-	252	0,3	8,4	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,3	0,7	4,6	137	4,0	0,2	-	-	-	-
	22/12/1998	150	-	7,6	7,5	-	-	243	0,1	7,9	< 0,1	< 0,05	< 0,1	5,1	1,9	5,8	132	3,1	0,3	29,5	11,7	-	-
	22/01/1999	140	-	7,6	7,4	-	-	246	0,1	8,2	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,1	1,3	5,1	138	3,6	0,3	29,5	11,7	-	-
	19/02/1999	135	-	7,5	7,1	-	-	244	0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,3	1,2	5,7	130	4,5	0,2	32,0	8,7	-	-
	15/03/1999	210	-	7,4	7,0	-	-	240	0,4	8,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,4	1,0	4,7	131	3,7	0,2	26,3	12,0	-	-
	12/04/1999	87	-	7,6	7,2	-	-	245	0,3	8,2	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,2	0,75	5,2	137	3,6	0,2	26,8	12,4	-	-
	12/05/1999	58	-	7,4	-	-	-	242	0,5	8,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,4	1,0	5,7	134	3,6	0,2	27,4	11,7	-	-
	16/06/1999	35	-	7,5	7,4	-	-	247	0,7	7,8	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,0	1,3	6,8	140	4,3	0,3	26,7	13,6	-	2,4
	29/09/1999	252	-	8,3	8,0	-	-	252	0,3	7,9	< 0,1	< 0,05	< 0,1	4,7	1,0	4,1	152	3,5	0,1	30,3	12,8	-	-
	02/12/1999	85	-	8,2	8,0	-	-	237	0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	< 0,1	4,3	0,7	4,2	137	2,9	0,1	26,0	12,5	-	-
	29/12/1999	315	-	7,8	7,9	-	-	236	0,1	8,0	< 0,1	< 0,05	< 0,1	9,6	0,6	4,6	122	3,9	0,2	27,0	10,1	-	-
	22/01/2000	80	-	-	-	-	-	245	0,1	7,2	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,8	1,4	6,6	130	3,7	0,5	27,2	10,9	-	-
	01/03/2000	400 (stim)	-	7,8	7,9	-	-	230	0,6	7,6	< 0,1	< 0,05	< 0,1	8,5	2,3	6,0	113	5,3	0,8	27,1	8,1	-	-
Ore 14,00	24/03/2000	60	-	8,2	8,2	-	-	244	0,4	8,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,9	1,1	6,9	139	3,8	0,6	27,8	12,5	-	-
Ore 16,30	24/03/2000	185	-	-	8,3	-	-	253	0,7	8,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	9,7	1,5	7,5	140	4,6	0,2	29,6	12,5	-	-
	05/05/2000	50	-	-	-	-	-	249	0,1	8,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,2	0,9	6,1	143	4,6	0,2	28,2	12,9	-	1,6
	05/09/2001	40	-	-	8,2	-	-	250	0,1	8,0	< 0,1	< 0,05	< 0,1	9,2	1,6	6,6	141	4,0	0,9	32,3	11,0	-	-
	17/11/2002	150	-	-	8,5	-	-	223	0,7	7,9	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,3	0,7	4,4	140	3,8	0,2	29,6	12,0	-	-
	12/04/2003	60	-	-	8,5	-	-	228	0,4	8,5	< 0,1	< 0,05	0,16	7,7	2,7	6,4	132	4,3	0,2	28,2	13,0	-	-
	26/08/2003	-	-	-	-	-	-	239	0,4	8,4	< 0,1	< 0,05	0,20	6,5	1,9	8,5	139	3,9	< 0,1	27,0	14,9	-	-
	23/03/2004	300	-	7,9	7,4	-	-	225	0,1	8,0	< 0,1	< 0,05	0,10	6,5	1,1	4,5	132	3,9	< 0,1	28,9	11,7	-	-
	29/09/2004	8,5	-	-	7,7	-	-	230	0,1	7,7	< 0,1	< 0,05	0,10	6,6	2,0	8,6	140	4,4	0,6	32,1	14,0	-	-
	16/03/2005	300	-	-	7,0	-	-	241	< 0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	< 0,1	9,9	1,8	8,2	129	4,2	< 0,2	30,2	12,4	-	-
	30/08/2005	40	-	-	7,6	-	-	232	< 0,1	7,7	< 0,1	< 0,05	< 0,1	5,8	2,2	6,4	134	3,1	< 0,2	32,2	11,0	-	-
	18/11/2005	-	-	-	-	-	-	251	0,6	8,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	5,5	0,9	4,8	154	4,5	0,3	32,7	13,8	-	-
	Grande innnevamento	07/03/2006	600	-	7,1	-	-	218	0,1	7,6	< 0,02	< 0,01	0,19	6,9	1,0	4,2	131	4,1	0,9	30,5	12,3	-	-
	Grandi piogge nella notte	13/02/2007	150	-	7,7	-	-	216	< 0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,5	0,8	3,6	129	3,6	< 0,3	27,3	11,4	-	-
Grandi piogge in corso-Grande piena	12/01/2008	1400	-	-	8,1	-	-	197	0,1	8,1	< 0,05	-	< 0,1	5,7	0,8	3,7	127	5,6	< 0,3	26,3	9,6	-	-
Grandi piogge in corso-Grande piena	22/04/2008	1200	-	-	7,8	-	-	204	< 0,1	7,8	-	< 0,01	< 0,1	5,5	0,4	2,5	134	4,6	< 0,3	27,4	10,5	-	-
Bassa portata	06/08/2009	8	-	-	7,9	-	-	229	-	8,1	< 0,05	-	0,23	6,2	1,5	8,0	150	3,8	< 0,3	31,2	15,0	-	-
Base pozzo ELLE per confronto	06/08/2009	8	-	-	8,7	-	-	234	-	8,1	< 0,05	-	0,26	5,8	1,1	8,7	150	4,5	< 0,3	31,1	15,8	-	-
Neve in fusione sulla cima	06/04/2010	100	-	-	7,2	-	-	200	0,1	8,0	< 0,05	< 0,01	< 0,1	5,2	0,9	3,2	140	3,0	< 0,1	27,2	11,9	-	-
No piogge da 10 gg	14/12/2010	80	-	8,5	8,0	-	-	223	-	7,8	-	-	0,12	4,7	0,8	3,8	146	2,9	< 0,1	27,8	12,9	-	-
Assenza di piogge da 20 gg	10/08/2011	8 L/min	-	7,7	7,2	-	-	219	0,1	8,0	-	-	0,22	5,0	1,7	7,5	144	3,4	0,2	32,0	14,0	-	-
Neve in fusione sul Corchia	29/02/2012	75 L/min	-	-	7,4	-	-	217	0,1	8,3	4 µg/L	-	0,13	7,8	1,2	4,5	134	3,5	0,1	29,3	13,1	-	-
Siccità dal 8-6-12	20/08/2012	-	-	-	8,2	-	-	232	-	8,2	-	-	0,20	5,7	1,4	7,3	143	3,5	< 0,1	28,7	14,8	-	-

Cascata Risalita dei Lucchesi

Data prelievo	Portata	Temperatura aria	Temperatura acqua	Ossigeno disciolto	% saturazione	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogeno carbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	T.O.C.	Silice
	L/min	°C	°C	mg/L O ₂	%	μS/cm 25 °C	N.T.U.		mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L C	mg/L SiO ₂
15/05/1997	4	-	7,7	9,9	83	244	0,1	8,2	< 0,1	< 0,05	0,10	3,9	0,6	5,3	148	2,3	0,1	26,4	13,6	0,2	3,6
11/09/1997	1	7,9	7,7	-	-	255	0,1	8,2	< 0,1	< 0,05	0,11	3,6	1,1	6,4	146	3,2	0,1	26,7	15,1	-	-
29/11/1997	10	7,8	7,7	-	-	241	0,8	8,3	<0,1	<0,05	0,06	3,9	<0,5	3,6	143	2,8	0,1	26,1	13,8	1,0	-
26/02/1998	-	7,8	7,8	10,5	89	249	0,1	8,3	<0,1	<0,05	-	4,1	0,6	4,5	-	-	-	24,7	14,6	-	-
16/04/1998	30	7,8	7,7	-	-	227	0,5	8,3	<0,1	<0,05	-	5,1	<0,5	3,7	131	2,6	0,1	24,5	13,3	-	-
14/05/1998	3,3	7,8	7,7	12,0	100	251	0,3	8,3	<0,1	<0,05	-	4,8	0,7	5,6	146	2,1	< 0,1	27,5	14,9	-	3,2
08/10/1998	70	7,9	8,0	-	-	225	0,1	8,4	<0,1	<0,05	-	4,3	0,8	3,7	136	2,9	< 0,1	25,7	12,3	-	-
28/10/1999	80	8,6	8,0	-	-	238	0,2	8,2	<0,1	<0,05	-	4,6	0,6	3,8	137	3,0	0,4	25,1	12,9	-	-
29/12/1999	220	8,0	8,2	-	-	231	0,6	8,2	<0,1	<0,05	-	7,0	0,7	4,1	128	2,7	0,2	25,0	11,1	-	-
05/09/2001	5,0	8,6	8,3	-	-	244	0,2	8,3	<0,1	<0,05	<0,1	6,0	1,0	5,4	148	3,2	1,6	24,7	15,6	-	-
12/04/2003	6,0	-	8,3	-	-	234	0,3	8,4	<0,1	<0,05	<0,1	7,0	1,8	5,0	143	4,6	< 0,1	27,4	14,0	-	-
26/08/2003	-	-	8,3	-	-	250	0,1	8,3	<0,1	<0,05	<0,1	6,5	1,4	7,0	158	3,9	< 0,1	27,0	17,3	-	-
23/03/2004	70,0	7,9	7,9	-	-	236	0,1	7,8	<0,1	<0,05	<0,1	5,9	1,2	4,2	140	3,9	0,3	26,4	15,1	-	-
16/03/2005	5,0	-	7,9	-	-	256	0,3	8,3	<0,1	<0,05	<0,1	7,1	1,4	6,0	149	3,8	0,4	29,0	16,8	-	-
07/03/2006	30,0	-	8,1	-	-	224	1,8	8,2	<0,02	<0,01	0,16	6,1	1,2	3,8	133	4,2	0,8	26,8	14,7	-	-
14/12/2010	10,0	8,3	8,2	-	-	227	-	7,8	-	-	<0,1	4,3	0,6	3,7	152	2,9	0,3	25,6	14,7	-	-
04/03/2012	8,0	-	7,8	-	-	241	-	7,9	-	-	0,1	5,7	0,9	4,4	154	3,2	<0,1	27,8	16,5	-	-
20/08/2012	-	-	-	-	-	260	-	7,8	-	-	0,1	5,1	0,8	5,4	166	3,3	0,2	28,3	17,2	-	-

Lago Nero

Data	Anidride carbonica	Temperatura aria	Temperatura acqua	Ossigeno disciolto	% saturazione	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	geno carbo	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	Silice
	mg/L	°C	°C	mg/L O ₂	%	µS/cm 25 °C	N.T.U.	unità pH	mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L SiO ₂
16/05/1997	< 2	-	-	-	-	214	1,7	8,2	< 0,1	< 0,05	< 0,1	3,8	1,0	7,4	120	1,6	0,2	29,4	7,7	1,6
14/05/1998	-	8,5	6,8	-	-	218	1,2	8,3	< 0,1	< 0,05	< 0,1	4,2	1,0	7,6	118	1,9	0,2	30,8	7,5	1,4
05/05/2000	-	-	-	-	-	219	0,9	7,4	< 0,1	< 0,05	< 0,1	5,7	1,0	6,8	124	3,6	0,2	29,0	8,9	1,5
03/02/2005	-	-	7,5	10,0	91,9	230	< 0,5	8,0	< 0,1	< 0,05	< 0,1	6,9	1,7	10,1	131	3,5	1,4	31,5	11,5	-
01/04/2006	-	-	-	-	-	214	1,5	7,9	< 0,1	< 0,05	< 0,1	4,9	1,2	4,3	122	2,9	< 0,3	32,2	8,9	-
08/11/2007	-	-	-	-	-	216	1,0	7,4	-	-	< 0,1	8,9	2,0	10,0	128	4,0	0,7	33,7	9,9	-
09/02/2009	-	-	-	-	-	186	< 0,1	8,2	< 0,05	< 0,01	< 0,1	4,3	1,4	4,2	128	3,0	< 0,3	29,0	8,7	-
14/12/2010	-	8,5	6,9	-	-	185	-	7,8	-	-	< 0,1	4,1	0,8	5,1	122	3,3	0,3	27,9	8,6	-

Cascata Risalita dei Romani

Data prelievo	Portata	Anidride carbonica	Temperatura aria	Temperatura acqua	Ossigeno disciolto	% saturazione	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogenocarbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	Silice
	L/min	mg/L	°C	°C	mg/L O ₂	%	µS/cm 25 °C	N.T.U.		mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L SiO ₂
16/05/1997	4	< 2	-	-	-	-	204	0,8	8,2	< 0,1	< 0,05	<0,05	4,8	1,7	5,0	116	1,7	0,1	33,4	4,0	-
02/07/1997	10	-	-	-	-	-	225	0,2	8,1	<0,1	<0,05	-	4,6	1,6	5,0	123	2,5	0,1	38,1	3,3	-
29/11/1997	>10	-	7,9	8,5	9,7	87	210	0,3	8,3	<0,1	<0,05	<0,05	4,6	0,6	3,7	116	3,2	0,1	35,6	2,9	0,8
18/12/1997	>>10	-	7,5	9,0	-	-	196	0,4	8,2	<0,1	<0,05	-	4,7	0,6	4,1	104	2,7	0,1	30,3	3,5	-
06/02/1998	2	-	6,7	7,6	-	-	192	0,7	8,2	<0,1	<0,05	-	5,2	0,8	4,0	109	-	-	29,9	4,2	-
14/05/1998	2,5 (ore 13)	-	7,8	7,9	-	-	210	0,1	7,8	<0,1	<0,05	-	4,5	1,0	4,9	116	3,7	0,6	32,7	4,4	-
14/05/1998	60 (ore 17)	-	7,8	8,5	-	-	188	0,6	7,8	<0,1	<0,05	-	3,9	2,7	5,3	98	2,4	0,1	31,6	2,7	-
19/09/1998	4,5	-	7,9	8,0	-	-	213	0,6	8,0	<0,1	<0,05	-	4,9	1,7	5,1	116	2,8	0,1	35,1	3,9	-
08/10/1998	50	-	8,5	9,1	-	-	210	0,2	8,3	<0,1	<0,05	<0,1	4,7	1,1	3,9	116	3,2	0,3	33,4	3,8	-
22/11/1998	20	-	6,8	7,8	-	-	216	0,1	8,3	<0,1	<0,05	<0,1	5,4	2,5	5,1	110	3,1	0,3	32,0	4,3	-
12/04/1999	45	-	6,9	7,9	-	-	210	0,1	7,8	<0,1	<0,05	<0,1	6,8	1,5	5,0	110	4,5	0,3	30,9	4,1	-
29/09/1999	75	-	8,1	8,7	-	-	212	1,1	7,8	<0,1	<0,05	<0,1	4,0	1,5	4,2	122	2,7	0,2	33,3	4,9	-
01/03/2000	150	-	-	10,2	-	-	209	0,3	7,5	<0,1	<0,05	<0,1	7,4	1,1	4,0	97,6	6,2	0,4	30,0	3,2	-
24/03/2000	120	-	-	8,9	-	-	223	0,5	8,0	<0,1	<0,05	<0,1	12,1	2,6	6,8	107	6,9	0,2	30,6	5,0	-
05/09/2001	7,5	-	8,3	8,3	-	-	212	0,4	8,3	<0,1	<0,05	<0,1	7,9	2,5	5,3	120	4,6	0,2	32,5	5,6	-
14/04/2003	7,0	-	8,3	9,4	-	-	194	0,2	8,5	<0,1	<0,05	<0,1	8,1	2,0	5,2	107	4,9	0,2	30,9	5,7	-
23/03/2004	480	-	7,5	9,2	-	-	203	0,2	8,1	<0,1	<0,05	<0,1	6,0	1,2	4,2	114	3,9	0,4	32,5	5,9	-
29/09/2004	1,0	-	-	8,0	-	-	220	0,1	8,0	<0,1	<0,05	<0,1	6,7	2,6	4,9	122	3,5	0,3	35,1	6,3	-
16/03/2005	30	-	-	8,4	-	-	211	0,2	8,2	<0,1	<0,05	<0,1	7,6	2,0	5,1	115	3,8	0,3	34,1	5,7	-
07/03/2006	100	-	-	8,6	-	-	203	0,3	8,1	<0,1	<0,05	0,13	7,2	1,1	3,8	103	3,5	<0,3	32,4	5,1	-
13/02/2007	150	-	-	8,7	-	-	205	<0,1	7,5	<0,1	<0,01	<0,1	6,6	1,3	3,3	110	4,3	<0,3	30,5	4,6	-
22/04/2008	720	-	-	9,4	-	-	206	1,5	7,7	-	<0,01	<0,1	5,7	<0,5	2,6	107	4,5	<0,3	33,2	4,8	-
06/04/2010	10	-	-	8,6	-	-	214	<0,1	8,0	<0,05	<0,01	<0,1	6,0	2,2	3,2	113,0	3,0	0,7	30,5	5,2	-
14/08/2010	-	-	-	8,1	-	-	190	-	8,0	-	-	0,1	1,4	2,0	2,7	126	1,2	0,3	35,2	3,1	-
14/12/2010	-	-	7,5	8,8	-	-	185	-	7,8	-	-	<0,1	5,0	1,3	3,0	128	2,3	<0,3	29,5	5,0	-
10/08/2011	0,5	-	7,8	7,6	-	-	181	0,1	8,0	-	-	<0,1	3,1	3,0	3,4	118	1,8	0,2	32,5	5,2	-
04/03/2012	8,0	-	-	8,2	-	-	192	<0,1	8,1	-	-	<0,1	8,7	3,1	4,2	116	4,5	0,2	33,2	5,7	-

Laghetto Galleria Alta delle Stalattiti

Data prelievo	Temperatura aria	Temperatura acqua	Ossigeno disciolto	% saturazione	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogenocarbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	Silice
	°C	°C	mg/L O ₂	%	μS/cm 25 °C	N.T.U.		mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L SiO ₂
15/05/1997	7,8	7,6	9,5	79,2	322	0,1	8,1	< 0,1	< 0,05	0,30	5,7	3,1	36,6	152	3,3	0,4	28,6	22,0	5,9
04/12/1997	7,8	7,7	-	-	323	0,2	8,2	< 0,1	< 0,05	0,25	5,5	5,8	36,4	146	4,2	0,4	29,5	20,9	-
26/02/1998	7,7	7,6	12,0	100	322	0,1	8,2	< 0,1	< 0,05	0,28	5,0	2,2	35,9	-	-	-	27,1	20,9	-
26/05/1998	7,8	7,7	12,0	100	315	0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	-	4,5	2,2	34,8	146	3,2	0,3	29,1	23,4	5,7
02/12/1999	8,2	7,9	-	-	323	0,1	8,3	< 0,1	< 0,05	-	5,0	3,2	35,6	152	3,9	0,2	27,8	22,5	-
05/09/2001	8,3	8,2	-	-	324	0,3	8,2	< 0,1	< 0,02	0,18	5,8	4,1	35,5	161	4,8	0,6	28,6	24,2	-
16/10/2001	-	8,2	-	-	322	0,8	8,3	< 0,1	< 0,02	0,19	5,5	3,8	34,9	155	4,1	0,4	28,0	23,4	-
19/04/2002	-	-	-	-	330	0,1	8,0	< 0,1	< 0,02	0,26	6,6	4,3	36,8	152	5,0	0,5	29,0	24,4	-
21/01/2003	-	-	-	-	316	0,1	8,2	< 0,1	< 0,02	0,18	5,2	3,0	35,6	163	4,5	0,4	29,2	24,1	-
20/11/2003	-	-	-	-	337	0,1	7,8	< 0,1	< 0,02	0,18	6,6	3,5	35,8	168	4,0	0,4	31,4	24,8	-
29/09/2004	-	7,7	-	-	338	-	8,1	< 0,1	< 0,02	0,30	5,6	2,5	37,3	160	4,2	0,4	31,6	24,8	-
03/02/2005	-	8,3	9,1	85,6	334	-	8,2	< 0,1	< 0,02	-	5,2	2,6	37,7	162	4,2	0,5	31,7	25,4	-
27/07/2006	-	-	-	-	343	-	7,8	< 0,1	< 0,02	0,35	5,8	1,7	36,4	183	4,4	0,4	32,3	26,8	-
09/05/2007	-	-	-	-	339	0,1	8,1	< 0,05	< 0,01	0,42	6,4	1,9	37,6	168	4,8	0,5	30,5	25,5	-
17/12/2008	-	8,0	-	-	330	< 0,1	8,1	< 0,05	< 0,01	0,31	5,7	1,4	35,4	168	4,1	0,5	30,5	23,8	-
02/10/2009	-	-	-	-	326	-	8,0	< 0,05		0,33	5,9	0,9	36,2	167	4,9	0,4	32,9	25,3	-
03/05/2010	-	8,0	-	-	320	< 0,1	8,0	< 0,05	< 0,01	0,34	5,6	1,3	37,2	171	4,5	0,4	30,5	24,7	-
06/05/2011	7,6	7,6	-	-	322	< 0,1	-	-	-	0,33	6,2	1,4	37,9	165	4,6	0,3	31,6	23,7	-
30/11/2011	-	-	-	-	305	< 0,1	7,9	< 0,05	0,03	0,32	5,8	1,2	36,7	170	4,2	0,3	31,0	24,5	-
29/02/2012	-	7,7	-	-	316	-	8,3	13 ug/L	-	0,34	5,4	1,0	34,5	168	4,2	0,3	29,6	25,0	-
20/08/2012	-	-	-	-	324	-	7,2	-	-	0,31	5,5	1,0	35,8	165	4,2	0,4	28,7	23,8	-
20/08/2012	-	-	-	-	327	-	8,1	-	-	0,25	5,3	0,6	32,4	168	4,0	0,3	30,6	22,4	-

Laghetto Galleria Bassa delle Stalattiti

Data prelievo	Temp. aria	Temp. acqua	Ossigeno disciolto	% saturazione	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogeno carbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	Silice
	°C	°C	mg/L O ₂	%	µS/cm 25 °C	N.T.U.	Unità pH	mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L SiO ₂
15/05/1997	7,8	7,6	9,6	80	313	0,6	8,2	< 0,1	< 0,05	0,40	5,9	2,4	33,3	156	3,0	0,3	30,2	20,0	5,4
04/12/1997	7,8	7,6	-	-	317	0,2	8,3	< 0,1	< 0,05	0,48	6,1	2,6	31,0	150	4,0	0,4	31,5	18,8	-
26/02/1998	7,7	7,6	10,5	87	315	0,5	8,3	<0,1	<0,05	-	5,4	2,6	31,3	-	3,9	0,3	28,1	19,6	-
26/05/1998	7,8	7,7	12,1	100	319	0,2	8,3	<0,1	<0,05	-	5,1	4,6	29,3	152	3,0	0,3	29,7	21,1	5,3
02/12/1999	8,1	7,9	-	-	320	0,3	8,3	<0,1	<0,05	-	5,5	3,8	31,3	158	3,8	0,2	29,8	21,5	-
05/09/2001	8,4	8,2	-	-	322	0,4	8,2	<0,1	<0,05	0,40	6,4	8,2	31,3	159	5,2	1,8	30,7	21,1	-
16/10/2001	-	8,3	-	-	324	0,9	8,3	<0,1	<0,05	0,36	6,3	7,6	31,6	-	4,8	1,4	30,3	20,5	-
13/03/2002	-	-	-	-	328	-	-	-	-	0,60	6,9	5,9	32,8	-	-	-	-	-	-
19/04/2002	-	-	-	-	320	0,1	8,1	<0,1	<0,05	0,45	6,3	5,6	33,6	148	5,5	1,5	30,9	21,4	-
21/01/2003	-	-	-	-	305	0,1	8,3	<0,1	<0,05	0,40	5,7	4,2	30,7	-	5,1	1,2	31,3	21,0	-
29/09/2004	-	7,7	-	-	322		8,2	<0,1	<0,05	0,47	6,2	3,2	32,2	152	4,2	0,9	33,2	21,2	-
03/02/2005	-	8,3	9,4	88,2	313	0,4	7,5	<0,1	<0,05	0,62	7,1	3,0	31,6	159	4,2	0,9	33,7	21,5	-
27/07/2006	-	-	-	-	311	<0,1	7,7	<0,1	<0,03	0,50	5,8	2,1	31,6	163	4,1	0,7	31,6	22,3	-
09/05/2007	-	-	-	-	317	0,5	8,0	<0,05	<0,01	0,50	7,3	2,5	33,3	157	4,4	0,7	32,2	22,8	-
17/12/2008	-	8,0	-	-	314	<0,1	8,3	<0,05	<0,01	0,45	5,9	2,5	30,4	159	4,1	0,7	31,6	20,5	-
13/11/2009	-		-	-	322	<0,1	-	<0,05	-	0,47	6,8	2,7	32,9	155	4,6	0,6	32,7	20,7	5,0
03/05/2010	-	8,1	-	-	305	<0,1	8,0	<0,05	<0,01	0,50	5,7	2,3	32,1	165	4,4	0,6	31,1	21,3	-
06/05/2011	7,5	7,5	-	-	310	-	-	-	-	0,42	5,9	1,9	31,7	152	4,6	0,5	31,5	20,3	-
30/11/2011	-		-	-	326	-	8,2	0,1	0,03	0,49	5,9	2,2	32,4	160	4,2	0,7	32,3	21,0	-
29/02/2012	-	7,6	-	-	302	-	8,0	<1 µg/L	-	0,44	5,4	1,9	30,5	156	4,1	0,5	30,7	21,7	-
29/02/2012	-	7,7	-	-	303	-	8,1	<1 µg/L	-	0,48	5,4	1,8	31,1	156	4,1	0,5	30,2	22,1	-
20/08/2012	-	-	-	-	308	-	-		-	0,43	5,6	2,2	31,6	156	4,0	0,5	30,1	20,7	-

Allegato 2 - Tabelle

Laghetto del Venerdi

Data prelievo	Temperatura aria	Temperatura acqua	Ossigeno disciolto	% saturazione	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogeno carbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	Silice
	°C	°C	mg/L O ₂	%	µS/cm 25 °C	N.T.U.		mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L SiO ₂
15/05/1997	7,6	7,6	9,5	79	260	1,4	8,1	< 0,1	< 0,05	0,3	6,2	3,3	9,6	144	3,1	0,3	27,7	15,2	2,4
04/12/1997	7,5	7,8	-	-	275	1,0	8,3	< 0,1	< 0,05	0,4	6,5	5,2	9,9	146	4,1	0,4	29,0	15,1	-
26/02/1998	7,8	7,7	10,4	87	271	0,3	8,2	< 0,1	< 0,05	-	6,2	5,1	9,3	-	-	-	26,5	15,0	-
26/05/1998	7,8	7,7	11,5	96	275	0,1	8,4	< 0,1	< 0,05	-	5,7	6,2	9,2	143	3,4	0,4	30,4	14,6	2,4
02/12/1999	8,0	8,4	-	-	280	0,4	8,3	< 0,1	< 0,05	-	6,6	5,9	9,8	150	4,5	0,2	29,2	15,8	-
05/09/2001	8,3	8,3	-	-	265	2,0	8,3	< 0,1	< 0,02	0,22	7,2	5,6	9,6	152	4,6	0,7	28,0	16,6	-
16/10/2003	-	8,3	-	-	269	0,2	8,3	< 0,1	< 0,02	0,22	7,1	5,0	9,7	149	4,3	0,4	27,4	16,3	-
29/09/2004	-	7,9	-	-	276	0,4	8,2	< 0,1	< 0,02	0,34	7,7	2,6	10,4	147	4,8	0,5	29,8	17,5	-
27/07/2006	-	-	-	-	273	0,2	8,1	< 0,1	< 0,02	0,39	6,7	2,3	9,3	156	4,3	0,3	28,0	17,4	-
09/05/2007	-	-	-	-	272	0,4	8,4	< 0,05	< 0,01	0,37	7,9	1,9	10,1	150	4,8	0,3	29,5	17,0	-
09/02/2009	-	8,4	-	-	262	< 0,1	7,4	< 0,05	< 0,01	0,4	8,2	2,4	9,8	156	4,8	< 0,3	28,5	16,6	-
02/10/2009	-	-	-	-	266	-	8,0	< 0,05	-	0,38	6,8	1,9	10,1	150	4,6	< 0,3	30,7	17,5	-
03/05/2010	-	7,9	-	-	254	< 0,1	8,1	< 0,05	< 0,01	0,41	6,8	1,9	9,5	153	4,3	0,30	27,3	16,4	-
30/11/2011	-	7,7	-	-	257	< 0,1	8,0	< 0,05	0,04	0,41	5,7	1,7	9,7	154	3,7	0,25	28,4	16,4	-
04/03/2012	-	7,8	-	-	256	< 0,1	8,3	-	-	0,42	5,8	1,5	9,5	156	3,8	0,26	28,0	17,3	-
20/08/2012	-	8,0	-	-	265	-	-	-	-	0,45	6,6	1,9	9,5	151	4,0	0,5	27,4	16,6	-

Allegato 2 - Tabelle

Torrente Vianello - Vidal

Fiume Vidal - Caratteristiche chimiche e chimico-fisiche delle acque del sistema carsico del M. Corchia	Data prelievo	Portata	Temperatura aria	Temperatura acqua	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogeno carbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	Silice
		L/min	°C	°C	µS/cm 25 °C	N.T.U.		mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L SiO ₂
	11/09/1997	1800	8,0	7,0	229	0,2	8,2	<0,1	<0,01	0,11	3,5	1,4	12,8	122	2,9	0,3	31,1	8,6	-
	18/12/1997	-	7,5	7,0	197	0,3	8,2	<0,1	<0,01	-	3,6	0,7	3,8	110	2,1	0,1	26,2	6,9	-
	18/03/1998	-	7,6	7,1	220	0,1	8,1	<0,1	<0,01	0,05	3,6	1,1	6,5	126	1,9	0,3	31,9	6,6	-
	10/09/1998	600	7,0	8,0	233	0,2	8,4	<0,1	<0,01		4,6	1,2	12,3	122	2,6	0,5	28,3	9,7	-
	29/09/1999	1600	8,1	7,3	235	1,0	7,8	<0,1	<0,01	<0,1	3,9	1,6	5,2	134	2,8	0,2	32,2	8,5	1,8
	24/03/2000	1500	8,5	7,8	227	4,4	8,1	<0,1	<0,01	<0,1	7,5	1,2	8,7	125	3,1	0,9	-	-	-
	05/05/2000	600	-	-	223	1,3	8,1	<0,1	<0,01	<0,1	5,8	1,2	7,3	122	3,6	0,2	29,4	8,5	-
Primi temporali di fine estate	05/09/2001	1800	8,6	7,6	213	3,6	8,4	<0,1	<0,01	<0,1	5,2	2,0	8,1	120	2,6	0,2	31,0	7,1	-
Grandi piogge giorno precedente	11/11/2001	> 1000	-	-	201	0,4	7,7	<0,1	<0,01	<0,1	8,3	1,3	5,3	122	3,2	<0,1	28,6	8,7	-
Grandi piogge giorno precedente	19/04/2002	800	-	-	231	-		<0,1	<0,01	<0,1	6,8	1,6	8,5	122	5,0	0,3	31,4	10,3	-
Grandi piogge giorni precedenti	17/11/2002	> 1000	-	7,6	-	1,9	7,9	<0,1	0,02	<0,1	5,4	0,9	6,0	134	3,3	0,3	32,9	9,2	-
Grande siccità del 2003 (Non piogge da maggio)	22/07/2003	480	-	7,1	219	0,1	8,3	<0,1	<0,01	0,17	4,8	1,7	12,5	121	3,2	0,3	27,4	11,0	-
	26/08/2003	-	-	-	219	0,2	8,1	<0,1	<0,01	0,15	5,6	2,9	13,4	119	3,2	<0,1	28,5	10,9	-
	20/11/2003	-	-	-	211	0,6	7,6	<0,1	<0,01	<0,1	5,8	1,5	4,6	125	3,7	<0,1	28,8	8,4	1,4
Piena media dopo le piogge(non elevata)	23/03/2004	420	7,8	7,1	207	0,1	7,3	<0,1	<0,01	<0,1	6,2	1,6	6,1	128	3,6	<0,1	32,6	8,9	-
Periodo di magra	29/09/2004	300	-	7,2	232	0,1	8,1	<0,1	<0,01	0,11	5,2	1,8	13,2	121	3,2	0,3	31,9	10,2	-
	16/03/2005	600	-	7,4	226	0,3	8,1	<0,1	<0,01	0,12	6,3	1,8	9,4	118	3,3	<0,1	33,8	8,8	-
Piena media dopo la pioggia intensa del 28/8	30/08/2005	1200	-	7,2	240	0,2	7,4	<0,1	<0,01	<0,1	4,8	2,6	8,1	114	2,8	<0,3	32,1	7,3	-
Grande innervamento	07/03/2006	2000	-	7,2	230	0,3	8,2	<0,1	<0,01	0,12	6,6	1,4	5,0	118	4,7	1,2	31,9	8,5	-
Grandi piogge nella notte	13/02/2007	2400	-	6,9	201	4,6	8,1	<0,1	<0,01	<0,1	6,7	1,1	4,0	116	2,8	<0,3	30,3	7,9	-
Grandi piogge in corso-Grande piena	12/01/2008	1000 L/sec	-	-	196	40	8,0	<0,05	-	<0,1	5,4	1,1	3,8	112	3,9	<0,3	30,5	7,1	-
Grandi piogge in corso-Grande piena	22/04/2008	1000 L/sec	-	7,4	189	1,5	7,7	<0,05	-	<0,1	5,7	<0,5	2,6	107	4,5	<0,3	33,2	4,8	-
Grandi piogge i giorni precedenti	17/12/2008	40 L/sec	-	7,4	203	20,1	8,3	<0,05	<0,01	<0,1	5,8	0,8	3,8	128	3,3	<0,3	29,8	8,3	-
Dopo l'evento di piena del 28-7-2010 e immissione di idrocarburi	12/08/2010		-	8,1	195	-	8,1	-	-	<0,10	4,4	1,3	7,7	126	2,5	<0,3	30,6	9,0	-
Assenza di piogge da 10 gg	14/12/2010	1200L/min	7,9	7,2	184	-	7,8	-	-	<0,10	3,8	0,8	5,0	128	2,4	0,3	28,5	8,2	-
Assenza di piogge da 20 gg - Inquinamento da marmettola	01/07/2011	240 L/min	-	-	205	Molto materiale sospeso: 1,71 g/L	8,0	<0,05	-	0,1	4,7	2,1	11,7	134	3,2	0,3	32,6	9,3	-
Assenza di piogge da 20 gg - Inquinamento da marmettola	10/08/2011	200 L/min	7,8	7,2	201	materiale sospeso	8,0	<0,05	-	0,15	4,5	1,3	12,0	122	2,9	0,3	30,6	9,6	-
Assenza di piogge da 20 gg - Inquinamento da marmettola	18/08/2011	150 L/min	-	7,2	201	limpida	7,8	<0,05	-	0,15	4,4	1,2	11,9	128	2,9	0,3	29,4	9,8	-
Grandi piogge nei giorni precedenti	09/11/2011	2100L/min	-	-	192	limpida	7,9	-	-	<0,10	3,4	1,3	3,7	134	1,9	0,2	30,3	8,6	-
Neve in fusione sul Corchia-Grande siccità	29/02/2012	900 L/min	-	7,2	199	limpida	8,3	4 ug/L	-	0,13	6,1	1,8	7,9	125	3,1	0,2	30,8	9,4	-
Assenza di piogge significative da circa 1 mese	02/07/2012	350 L/min	-	-	208	limpida	7,6	-	-	<0,10	5,0	1,2	9,1	129	2,8	0,2	30,1	10,0	-
Assenza di piogge significative dal 8-6-12	02/08/2012	350 L/min	-	-	207	limpida	8,0	10 ug/L	-	0,11	5,0	1,2	11,0	124	2,9	0,2	29,3	10,2	-
Assenza di piogge significative dal 8-6-12	20/08/2012	-	-	-	206	limpida	7,0	-	-	0,14	4,8	1,1	11,6	125	3,0	0,2	28,9	10,5	-

Sorgente la Pollaccia

Data prelievo	Anidride carbonica	Temperatura aria	Temperatura acqua	Ossigeno disciolto	% saturazione	Conducibilità elettrica	Residuo fisso calcolato	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogeno carbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio	Rame	Zinco	T.O.C.	Silice
	mg/L	°C	°C	mg/L O ₂	%	µS/cm 25 °C	mg/L	N.T.U.		mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg	µg/L Cu	µg/L Zn	mg/L C	mg/L SiO ₂
08/07/1997	3,1	18,4	8,6	-	-	209	121	2,4	8,0	< 0,1	< 0,05	-	4,3	1,5	4,9	116	2,9	0,2	38,1	0,9	<5	<5	1,3	-
09/01/1998	-	4,6	8,1	-	-	190	114	0,1	8,0	< 0,1	< 0,05	-	4,2	1,0	4,9	107	2,7	0,2	33,4	1,8	-	-	0,4	-
18/03/1998	-	10,2	7,8	-	-	195	113	0,1	8,2	< 0,1	< 0,05	< 0,05	3,9	0,9	4,1	110	2,3	0,2	32,6	2,3	-	-	-	2,1
25/05/1998	-	12,6	8,2	8,9	75	205	123	0,3	8,3	< 0,1	< 0,05	-	4,5	1,1	4,3	119	2,4	0,2	35,6	3,6	<50	<20	-	1,7
19/09/1998	-	10,8	8,8	-	-	212	127	2,3	8,2	< 0,1	< 0,05	< 0,1	4,2	2,6	4,9	116	2,73	0,3	39,6	1,0	-	-	-	-
16/09/2001	-	-	-	-	-	210	126	1,5	7,9	< 0,1	< 0,05	< 0,1	7,5	2,5	5,6	120	3,8	0,3	37,7	3,9	-	-	-	-

Altre acque del Corchia

Punti di prelievo	Data prelievo	Portata	Temperatura aria	Temperatura acqua	Conducibilità elettrica	Torbidità	pH	Ammonio	Nitrito	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Solfato	Idrogenocarbonato	Sodio	Potassio	Calcio	Magnesio
		L/min	°C	°C	µS/cm 25 °C	N.T.U.	Unità pH	mg/L NH ₄	mg/L NO ₂	mg/L F	mg/L Cl	mg/L NO ₃	mg/L SO ₄	mg/L HCO ₃	mg/L Na	mg/L K	mg/L Ca	mg/L Mg
1	24/05/1998	-	-	-	172	0,2	8,3	<0,1	<0,05	-	2,8	1,7	3,4	97,6	1,5	<0,1	34,8	0,5
2	31/07/1998	0,5	6,1	6,1	296	3,4	8,1	<0,1	<0,05	<0,05	3,8	6,5	53,6	94,6	3,0	0,5	50,1	2,9
3	01/08/1998	0,2	5,8	5,5	186	12,6	8,3	<0,1	<0,05	<0,05	3,5	0,7	2,6	104	1,9	0,3	34,9	0,4
4	01/08/1998	0,5	6,3	6,2	181	1,2	8,1	<0,1	<0,05	<0,05	2,6	1,6	3,1	107	1,7	0,08	34,7	0,5
5	05/05/2012	-	5,6	5,1	212	-	8,2	-	-	-	6,9	<0,5	2,1	-	3,0	0,1	36,3	3,6
6	05/05/2012	-	5,5	5,4	235	-	8,0	-	-	-	5,9	3,2	2,0	-	2,6	0,1	26,9	13,1
7	25/04/1999	1,0	8,7	8,7	249	0,1	8,1	<0,1	<0,05	<0,1	7,9	0,9	8,7	128	4,7	0,3	41,5	2,3
8	25/04/1999	<0,5	-	-	279	0,1	8,1	<0,1	<0,05	<0,1	7,3	3,0	21,0	131	4,2	0,5	48,8	1,7
9	25/04/1999	-	5,9	6,3	232	0,1	8,2	<0,1	<0,05	<0,1	8,5	0,7	7,5	119	4,2	0,2	38,5	2,1
10	25/04/1999	-	5,4	6,0	232	0,1	8,2	<0,1	<0,05	<0,1	6,6	3,8	31,0	119	4,4	0,2	46,3	3,5
11	05/02/2000	-	-	-	245	0,2	6,8	<0,1	<0,05	<0,1	11,2	0,8	5,8	120	4,3	0,5	43,1	0,4
12	01/12/2007	-	-	-	258	-	7,7	-	-	<0,10	8,5	0,6	3,3	141	3,9	<0,3	25,3	14,9
13	01/12/2007	-	-	-	236	-	7,8	-	-	0,37	6,0	0,9	16,3	110	3,4	<0,3	28,7	15,2
14	01/12/2007	-	-	-	221	-	7,7	-	-	<0,1	8,1	1,5	3,7	130	3,8	<0,3	25,6	12,7

Legenda tabella

1. Stillicidio Abisso Fighiera (campo a quota – 120 m dalla Buca del Cacciatore).
2. Sistema Farolfi - Fighiera: Galleria dei Maremmani – Piccola cascata presso Campo Base.
3. Sistema Farolfi - Fighiera: Galleria Maremmani – Piccola cascata presso grande stalagmite.
4. Sistema Farolfi - Fighiera: cascata al pozzo presso Campo Base Erica. Caposaldo 34 FST.
5. Sistema Farolfi - Fighiera: acqua corrente uscita by-pass Strettoia del Cobra.
6. Sistema Farolfi - Fighiera: pozza presso il Ramo Lilliput.
7. Buca d'Eolo: a 200 dall'ingresso; cascatella sopra scalette incise nella roccia (Davanti scritte storiche).
8. Corchia da Buca d'Eolo: piccole cascate dall'alto del pozzo iniziale.
9. Buca d'Eolo: piccolo lago sifone (a metà percorso del Canyon).
10. Buca d'Eolo: forra bassa allagata (inizio percorso del Canyon).
11. Ramo dei Fiorentini (I° salto al Campo Base dei Fiorentini: torrente confluenza Fangaia).
12. Ramo di Valinor-ER 01
13. Ramo di Valinor- GD 01
14. Ramo di Valinor-VL 01

**Limiti di rivelabilità dei principali parametri chimici e
chimico-fisici delle acque e loro variazione**

Parametri	Unità di misura	valore minimo	valore massimo
Conducibilità elettrica	$\mu\text{S/cm } 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	5	-
Torbidità	N.T.U.	0,1	-
pH	unità pH	0,1	-
Ammonio	mg/L NH_4	0,001	0,1
Nitrito	mg/L NO_2	0,01	0,05
Fluoruro	mg/L F	0,05	0,1
Cloruro	mg/L Cl	0,1	-
Nitrato	mg/L NO_3	0,1	-
Solfato	mg/L SO_4	0,1	-
Idrogenocarbonato	mg/L HCO_3	0,5	5
Sodio	mg/L Na	0,1	-
Potassio	mg/L K	0,1	0,5
Calcio	mg/L Ca	0,1	1
Magnesio	mg/L Mg	0,1	-
Silice	mg/L SiO_2	0,5	-



ISBN 9788896693278



9 788896 693278 >