

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE BIOLOGICHE,
GEOLOGICHE E AMBIENTALI

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

Spurga delle Cadene: un approccio innovativo
per l'analisi idrogeologica di una cavità carsica

Candidato:
Alessandro Mastella

Relatore:
Prof. Jo De Waele

Correlatori:
Prof. Francesco Sauro
Prof.ssa Maria Filippini

Sessione Ottobre 2024
Anno Accademico 2023-2024

INDICE

ABSTRACT	1
1. INTRODUZIONE	3
Obiettivi dello studio	3
Inquadramento geografico.....	4
Storia delle esplorazioni	6
Descrizione morfologica della cavità	7
L'inquinamento della grotta	9
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO	11
Introduzione	11
La successione stratigrafica	12
Inquadramento tettonico.....	15
Inquadramento geomorfologico	19
Le glaciazioni in Val d'Adige	21
3. METODOLOGIE DI RILEVAMENTO	25
Metodi di analisi dei campioni prelevati	25
Monitoraggio acustico e idrogeologico.....	28
4. ANALISI CAMPIONATURE	31
Presentazione dati e risultati delle analisi delle campionature	31
Discussione e interpretazione paleoambientale.....	42
5. MONITORAGGIO IDROGEOLOGICO-ACUSTICO	53
Prima parte del monitoraggio settembre-gennaio	53
-Introduzione	53
-Presentazione dati	53
-Piena di fine ottobre 2023	58
-Piena del 2 dicembre	66
-Piena del 14 dicembre	74
Seconda parte del monitoraggio gennaio-maggio	79
-Introduzione	79
-Presentazione dati	79
-Piena del 23 febbraio	84
-Piena del 10 febbraio	90
-Piena del 28 marzo	97

Piena del 21 maggio 2024	103
6. <i>INTERPRETAZIONE DEI DATI DI MONITORAGGIO</i>	109
Bacino idrogeologico.....	109
Meccanismo a stantuffo	115
La conservazione dell'energia	128
La voce che chiama.....	130
-Fase di carico	130
-Fase di scarico	133
-Un primo passo per comprendere la “voce” degli acquiferi carsici.....	138
Cavitazione	140
7. <i>CONCLUSIONI</i>	149
Il meccanismo	149
I suoni	150
Considerazioni suppletive	151
Ipotesi speleogenetica:	151
Depositi	151
8. <i>BIBLIOGRAFIA</i>.....	153
SITOGRAFIA.....	156

ABSTRACT

Spurga delle Cadene: an innovative approach for the hydrogeological analysis of a karstic cave

The Spurga delle Cadene is a cave situated in the Lessini Mountains plateau, on the left bank of the Adige River in Lagarina Valley. This cave possesses unique characteristics that distinguish it as a remarkable feature within the karst landscape. The internal stream is observed to be drained by a fault located in the lower channel, approximately 150 meters from the cave entrance. The entrance area is elevated by 7 meters compared to the lower channel and is inundated only during flood events following substantial rainfall in the recharge area. Historically, the cave has attracted the curiosity of local inhabitants due to the loud sounds it produces during floods, which can be heard from considerable distances. To investigate the hydrogeological role of the perennial stream within the cave, a nine month monitoring study was conducted, enabling an analysis of the dynamics following intense precipitation in the recharge basin. During this period, from September 2023 to June 2024, a total of 24 flood episodes were documented. The data analysis revealed that atmospheric pressure within the cave chambers, isolated by the rising water levels, acts as the primary mechanism driving the so called "piston effect," which governs cave behavior during flood events. Furthermore, significant findings emerged from pioneering acoustic monitoring carried out within the cave. Using a bioacoustic sensor, sounds produced during flood events were recorded, revealing that the low-frequency intensity spectrum remained exactly the same across all flood episodes analyzed. This study demonstrated that the sounds generated are solely dependent on water height and the cave's morphology. Moreover, the distance between specific peaks in the spectrum was found to correlate with the rate of increase in water levels, while the maximum intensity of certain peaks corresponded to the rate of water level rise and consequently, with appropriate calibration, to flood discharge.

The acoustic monitoring also suggested the potential presence of cavitation, a physical phenomenon previously unobserved in natural cavities. Another significant aspect discussed in this thesis is the increase in air temperature due to adiabatic compression within pressurized chambers following the rise in piezometric levels, exemplifying the first principle of thermodynamics in a natural setting.

Additionally, the thesis also investigates into the evolution of the cave. Analysis of cave sediments revealed that the cave was entirely submerged during the last glacial phase. Cave sediments are characterized by glacial varves, consisting of dense laminae deposited through sedimentation, and completely filled the upper channel, with thicknesses exceeding 8 meters. Thus, it was shown the Adige Valley glacier in the past influenced the evolution of Spurga delle Cadene.

RIASSUNTO

Spurga delle Cadene: un approccio innovativo per l'analisi idrogeologica di una cavità carsica

La Spurga delle Cadene è una grotta ubicata nell'altopiano dei Monti Lessini, si apre sul versante alla sinistra idrografica del Fiume Adige, in Vallagarina. La grotta presenta diverse peculiarità che la rendono una rarità nel panorama carsico: il torrente interno viene drenato da una faglia presente nel canale inferiore a 150 metri dall'ingresso della grotta. La zona di ingresso risulta essere sopraelevata di 7 metri rispetto al canale inferiore e viene attraversata dall'acqua solamente durante i periodi di piena a seguito di abbondanti precipitazioni nell'area di ricarica. Fin dai tempi antichi la grotta è stata oggetto di curiosità da parte degli abitanti delle aree limitrofe in quanto, durante le piene, produceva suoni molto forti e udibili a distanza. Si è perciò analizzato il ruolo idrogeologico del torrente perenne presente all'interno della cavità tramite l'esecuzione di un monitoraggio della durata di 9 mesi che ha dato la possibilità di interpretare ciò che accade a seguito di intense precipitazioni registrate nel bacino di alimentazione. Durante la rilevazione, compresa tra inizio settembre 2023 e inizio giugno 2024, si sono registrati in totale 24 episodi di piena. Analizzando i dati rilevati si è potuto constatare come la pressione atmosferica, che si instaura all'interno delle sale del condotto isolate dall'incremento del livello dell'acqua, risulta essere il motore principale del così battezzato "effetto stantuffo", ovvero il meccanismo che governa la grotta nei periodi di piena. Altri notevoli risultati sono conseguiti da un rilevamento innovativo eseguito all'interno della cavità, ovvero il monitoraggio acustico. Tramite un rilevatore bioacustico si sono registrati i suoni prodotti all'interno della grotta durante i periodi di piena. Lo spettro di intensità relativo alle basse frequenze, nelle fasi di carico e di scarico, risulta essere il medesimo per ognuno degli episodi di piena registrati. Si è dimostrato come i suoni prodotti siano dipendenti solamente dall'altezza dell'acqua e dalla morfologia della grotta. È possibile correlare la distanza fra certi picchi dello spettro con la velocità dell'incremento del livello dell'acqua. È possibile inoltre correlare l'intensità massima di alcuni picchi con la velocità di incremento del livello dell'acqua, e così, con un'adeguata calibrazione, con la portata della piena.

Tramite il monitoraggio acustico è stata ipotizzata anche la possibile presenza di un fenomeno fisico mai osservato in precedenza all'interno di una cavità naturale, ovvero la cavitazione. Un altro aspetto evidenziato risulta essere l'aumento di temperatura dell'aria per compressione adiabatica all'interno delle sale pressurizzate in seguito all'aumento del livello piezometrico, mostrando quindi un perfetto esempio naturale del primo principio della termodinamica.

Un'ulteriore tematica approfondita durante la tesi riguarda l'evoluzione della grotta. Dalle analisi sui sedimenti prelevati dalla grotta si è evinto come la cavità carsica sia stata per lungo tempo completamente sommersa durante l'ultima fase glaciale. Le varve glaciali, costituite da fitte lamine depositate per decantazione, caratterizzano i sedimenti che occupavano completamente il canale superiore, con spessori superiori agli 8 metri. Si è dimostrato così come il ghiacciaio della Val d'Adige in passato abbia influenzato l'evoluzione della grotta.

1. INTRODUZIONE

La Spurga delle Cadene, con oltre un chilometro di sviluppo, è una delle più lunghe cavità carsiche esplorate nei Monti Lessini veronesi e una delle grotte più spettacolari del Veneto. Si apre con un grande portale sulla sinistra orografica della Vallagarina sviluppato al nucleo di una notevole sinclinale nella Formazione dei Calcari Grigi. L'ingresso è ubicato a 525 m s.l.m. lungo il Vaio della Spurga, incisione che discende linearmente il versante della Val d'Adige, dal paese di Fosse, sull'altopiano lessinico, a quello di Peri situato sul fondovalle. La grotta si comporta come una grande sorgente carsica di natura temporanea, ovvero l'acqua fuoriesce dal varco d'entrata solo durante i periodi di piena, che coincidono con periodi di forte precipitazione nell'area di ricarica idrogeologica. Durante i periodi di magra invece il torrente perenne, presente all'interno della cavità, viene drenato interamente da una importante faglia che intercetta la grotta a 150 metri dall'ingresso. La storia di questa grotta è purtroppo segnata da almeno due decenni di inquinamento del torrente interno a causa dello sversamento di liquami suini negli inghiottitoi carsici dell'altopiano sovrastante. L'inquinamento ha causato danni alla fauna sotterranea, alla qualità delle acque e dei suoli e in generale alla fruibilità della grotta, non solo per il proseguo delle esplorazioni, ma anche per la ricerca scientifica. Per questo motivo, diversi sono i quesiti irrisolti e mai studiati su questa grotta così eccezionale.

Obiettivi dello studio

La ricerca qui presentata si è posta come obiettivo approfondire e analizzare la grotta basandosi su un approccio sperimentale, acquisendo dati e osservazioni relative ad un'ampia gamma di ambiti geologici: elementi mineralogici, strutturali, morfologici e idrogeologici. In base a come verrà esposta la presente relazione si possono dividere gli obiettivi inizialmente prefissati in due filoni principali. Il primo obiettivo riguarda la ricerca di informazioni e dati relativi all'evoluzione della cavità carsica, basandosi sull'osservazione della morfologia interna, che risulta molto peculiare, e delle morfologie presenti nel relativo bacino idrogeologico. Si sono ipotizzate correlazioni fra i depositi presenti nella cavità e i paleoambienti che si sono succeduti nel tempo nell'area di studio, come le lingue glaciali che hanno inciso la Vallagarina su cui insiste la Spurga. Si è analizzato il suo ruolo nella circolazione idrogeologica attuale all'interno dell'altopiano di Fosse, con l'obiettivo di ipotizzare una possibile evoluzione della grotta e l'importanza che ha rivestito in passato.

Il secondo obiettivo che ci si è posti durante la fase di progettazione è stata l'analisi idrogeologica della cavità. Per questo motivo si è svolto un monitoraggio del torrente presente all'interno, registrandone in continuo l'altezza del livello dell'acqua, la conducibilità elettrica e la temperatura. Un'altra importante peculiarità della Spurga delle Cadene, su cui questo studio si è proposto di fare chiarezza, è la presenza di rumori molto forti durante le piene. Viene dimostrato nella relazione infatti come, durante le piene, la porzione iniziale della grotta, che in magra risulta asciutta, viene percorsa da enormi quantità di acqua pari a diverse centinaia di litri al secondo, ed è proprio in questi casi che vengono uditi rumori molto forti, come boati e gorgoglii. Gli abitanti della zona hanno, in tempi antichi, assimilato questi suoni a rumori di catene, scegliendo così di battezzare la grotta con il nome "Spurga delle Cadene", inserendo questo modo entrambe le caratteristiche distintive del condotto carsico. Con un approccio pionieristico si è quindi provveduto ad installare un registratore ad ultrasuoni in grado di monitorare in continuo ogni

suono presente in grotta. Durante le piene lo strumento è stato in grado di registrare dati mai riportati nella letteratura scientifica prodotta fino ad oggi. Durante la fase preliminare ci si è posti come finalità anche l'individuazione del bacino di alimentazione della grotta sorgente, cercando di correlare i dati registrati con osservazioni eseguite sul campo. Da settembre 2023 fino a maggio 2024 si sono collocati nella cavità 7 diversi strumenti di misurazione, ubicati in diverse aree della grotta, con il fine primario di comprendere il meccanismo di funzionamento della grotta durante gli eventi di piena. Negli anni si sono accumulate varie osservazioni riguardo la Spurga delle Cadene da parte di decine di gruppi speleologici che si sono avventurati al suo interno, ma solo nel 2011 si è realizzato uno studio idrogeologico sulla grotta diretto dal Dr. Guido Rossi, che si è rivelato molto disponibile ad aiutare in prima persona durante la raccolta di informazioni e lo svolgimento delle ricerche. Lo studio realizzato nel 2011 è stato utile come base di partenza e introduzione alla grotta. I ricercatori, al tempo, provarono ad eseguire tracciamenti sia dalla zona dell'altipiano soprastante la grotta sia dalla grotta stessa, per trovare l'area di emergenza dell'acqua circolante, ma entrambi i test non diedero risultati. Con la presente ricerca ci si è posti l'obiettivo di analizzare la grotta tramite informazioni riguardanti varie discipline geologiche, con il fine ultimo di caratterizzare nel miglior modo possibile il ruolo della Spurga delle Cadene nella circolazione idrogeologica dell'area, nelle condizioni attuali e provare ad interpretare il suo sviluppo nel tempo passato.

Inquadramento geografico

La Spurga delle Cadene si trova all'interno dell'altopiano dei Monti Lessini. Il territorio lessinico si estende per oltre 820 km² tra la Provincia di Verona, Vicenza e Trento; geograficamente si situa nella parte sudorientale della catena alpina ovvero nelle Prealpi Venete.

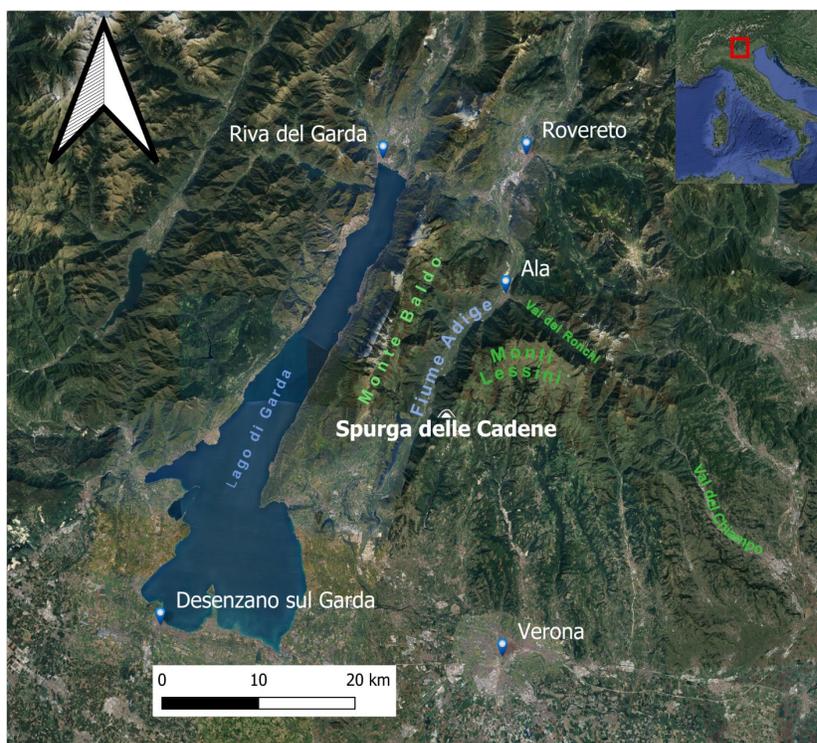


Figura 1.1 - Localizzazione della grotta.

I suoi confini sono ben delineati con il solco della valle glaciale dell'Adige ad Ovest, con la profonda incisione della Val dei Ronchi a Nord e con i centri urbani e le aree agricole della pianura veronese a Sud, verso i quali si adagiano le dorsali collinari che sovrastano le principali vallate. Il confine orientale, meno netto dei precedenti, si delinea lungo la dorsale che separa la Val d'Alpone dalla vicentina Valle del Chiampo (Fig. 1.1).

La grotta si apre lungo il versante della Val d'Adige che dal paese di Fosse, ubicato sull'altopiano a 930 metri s.l.m., scende verso il paese di Peri, in fondovalle a 140 m s.l.m. L'ingresso del condotto si imposta ad una quota di 525 m s.l.m. lungo il Vaio Fontane. Fosse si trova nel comune di Sant'Anna d'Alfaedo e all'interno del medesimo comune si ubica anche il bacino idrologico della grotta ipotizzato in fase preliminare, che si estende dai piedi di una delle cime più importanti della Lessinia, ovvero il Corno d'Aquilio (1545 m s.l.m.), e l'abitato di Fosse. Peri e l'ingresso della grotta stesso si ubicano invece all'interno del comune di Dolcè, municipalità appartenente alla Vallagarina, il tratto più meridionale della Val d'Adige (Fig. 1.2).

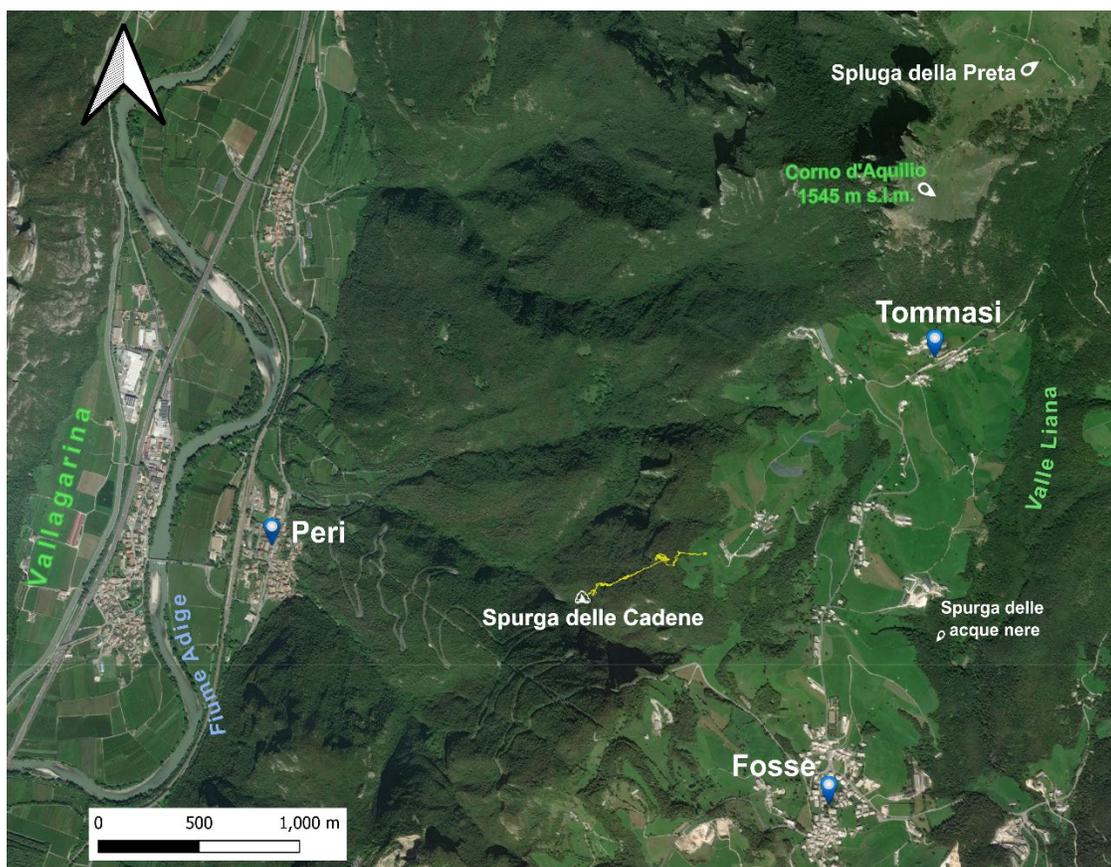


Figura 1.2 - Localizzazione della grotta all'interno dell'altopiano di Fosse.

La Spurga delle Cadene si apre sulla sinistra orografica della Vallagarina e quindi si affaccia sull'incisione del fiume Adige, elemento geomorfologico che sicuramente ha avuto un'influenza sull'evoluzione della cavità carsica. L'Adige è uno dei principali fiumi d'Italia e dell'intero versante settentrionale del Mediterraneo, per lunghezza del corso d'acqua (410 km) e per estensione del bacino idrografico (12160 km²). Esso divide la dorsale del Monte Baldo ad ovest dal gruppo dei

Lessini ad est. Il fiume nasce a quota 1550 metri s.l.m. vicino al Lago di Resia, percorre la Val Venosta in direzione circa E-W fino a Merano, dove piega a SE verso la conca di Bolzano, alla quota di circa 240 metri s.l.m. Dopo Bolzano la valle assume nel complesso una direzione NNE-SSW, trasversale all'orientamento della catena alpina, fino alla gola della Chiusa di Ceraino (VR) che si trova a circa 10 km verso Sud rispetto alla grotta, dove il fiume sbocca definitivamente nella Pianura Padana. L'intensa erosione effettuata dai ghiacciai pleistocenici, che a più riprese hanno solcato la profonda incisione, ha modellato la morfologia che oggi si può apprezzare in Val d'Adige.

Storia delle esplorazioni

La grotta è conosciuta dagli abitanti della zona fin dai tempi antichi, all'ingresso è visibile una scritta parzialmente illeggibile affiancata dalla data 1918, mentre altre scritte risultano ricoperte da colate di calcite, suggerendo una frequentazione antica di questo primo settore della grotta, probabilmente da parte di viaggiatori o contrabbandieri di passaggio che risalivano il versante dalla Vallagarina per raggiungere l'altopiano lessinico. Tuttavia, le prime esplorazioni documentate si registrano solo dagli anni Venti del Novecento quando il gruppo grotte S.U.C.A.I., guidate da Luigi De Battisti, esplora la grotta fino al raggiungimento del Lago Pensile a 150 metri dall'entrata. Negli anni seguenti le esplorazioni procedono grazie al Gruppo Grotte 'Falchi' di Verona, nella speranza di un collegamento con la Spluga della Preta, un importante abisso di 877 metri di profondità ubicato nei Monti Lessini famoso per essere stato considerato per 26 anni, a meta '900, la cavità naturale più profonda della Terra (Fig. 1.2). Il 17 ottobre 1954 il gruppo supera il Lago Pensile, entra nella Sala delle Meraviglie ed effettua un balzo esplorativo di 110 metri fino ad un passaggio completamente sommerso in un piccolo ambiente denominato Sala Forlani (Fig. 1.3). Nel 1963 alcuni sub di Trieste provano a superare il passaggio in immersione ma giudicano l'impresa troppo rischiosa in quelle condizioni. Per procedere perciò viene studiato un piano per abbassare il livello del sifone. I successivi 6 anni saranno quindi impiegati nello scavo di un canale nella roccia lungo 8 metri e alto 80 cm che aveva come obiettivo l'abbassamento del livello dell'acqua nei laghi più interni, rendendo così possibile l'avanzamento esplorativo (Cargnel,

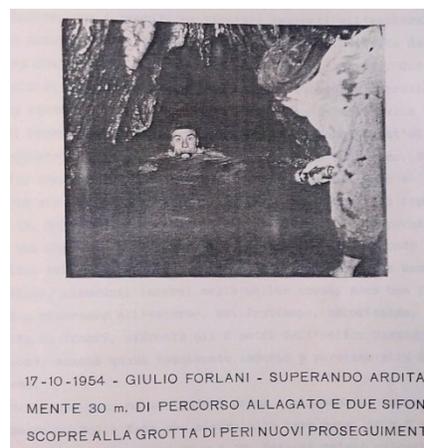


Figura 1.3 - Immagine tratta da Cargnel (1969).

1969). Questa operazione è risultata molto onerosa in termini di tempo ed energie, ma è stata anche necessaria per migliorare le condizioni di sicurezza, soprattutto tenendo conto della strumentazione in dotazione al tempo. Nell'ottobre 1969 i Falchi riescono a procedere nella scoperta di tratti inediti di grotta (Sala dell'Orso, due laghi e un lungo condotto che termina in un altro sifone allagato, Fig. 1.4) rilevando fino a uno sviluppo pari a 600 metri, profondità in cui si presenta un ulteriore passaggio allagato. Nel 1970 il nuovo sifone, lungo oltre 50 metri, viene superato da una squadra di quattro speleosubacquei Belgi coordinati da Etienne Lamaire, coadiuvati da speleologi piemontesi e veronesi. L'anno successivo gli speleosub dell'Unione Speleologica Bolognese, in collaborazione con la Commissione Grotte E. Boegan di Trieste e i Falchi, tornano oltre il sifone e portano lo sviluppo della grotta a 1250 metri, valore rimasto immutato fino a oggi. Nel nuovo settore la cavità assume un andamento decisamente ascendente, anche con forti dislivelli in frana localizzati in corrispondenza dei vani di maggiori

dimensioni. Da qui prosegue in un enorme salone (Salone Faccioli) con alcuni arrivi di acqua dall'alto, mai raggiunti durante le esplorazioni. La parte finale della grotta è costituita da un lungo condotto di interstrato che si restringe ma presenta promettenti possibilità di prosecuzione. Per questa ragione agli inizi degli anni '80 l'Unione Speleologica Veronese intraprese una serie di spedizioni con l'obiettivo di svuotare i tre sifoni tramite l'utilizzo di tubi idraulici per rendere possibile l'esplorazione delle possibili vie di prosecuzione della grotta. Nella primavera del 1982, proprio quando il sistema di pompaggio era stato messo a punto, la grotta venne trovata fortemente inquinata da materiale fecale. Ciò rese l'ambiente assolutamente non idoneo alla prosecuzione, di conseguenza l'operazione venne abbandonata, e anche i tubi rimasero all'interno della grotta. La loro rimozione, sempre a opera dell'Unione Speleologica Veronese, è stata completata nell'autunno 2023. Nel corso degli anni le esplorazioni descritte hanno consentito di mappare circa 1250 metri di condotti carsici con un dislivello positivo di 85 metri, tra spettacolari concrezioni, laghi, cascate e grandi sale.

Descrizione morfologica della cavità

La Spurga delle Cadene (Fig. 1.4) è una grande grotta-sorgente, percorsa da un torrente interno perenne che rappresenta la più importante emergenza presente nell'area. Si apre nella Formazione dei Calcari Grigi con direzione ENE per una lunghezza esplorata di circa 1250 m.

SPURGA DELLE CADENE 11-V-VR

C.G.E.B. - Commissione Grotte E. Boegan TS
G.S. Falchi - Gruppo Speleologico Falchi VR
U.S.B. - Unione Speleologica Bolognese

Sviluppo: 1200 metri
Profondità: +85 metri
Posizione WSG: 10°55'20,4" - lat 45°39'17,4"
Rilievo 01/11/1971

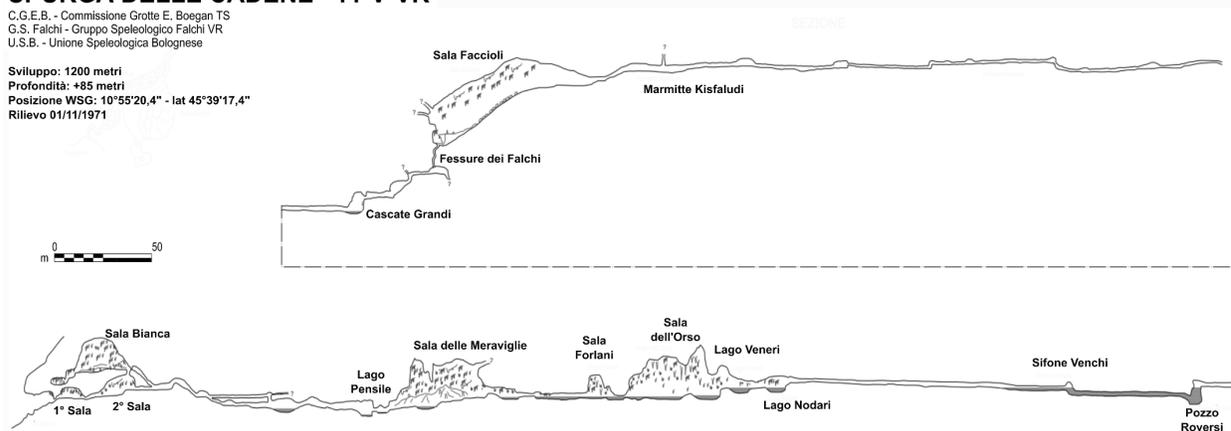


Figura 1.4 - Rilievo della grotta eseguito dal G.S. Falchi nel 1971

Come è evidente all'ingresso, la grotta è localizzata in una sinclinale schiacciata nella quale si sviluppa in direzione complanare al suo piano assiale utilizzando i giunti subverticalizzati del suo fianco orientale. A circa 60 m dall'ingresso la grotta attraversa una prima faglia (Fig. 1.7) che delimita il blocco fortemente deformato a cui la sinclinale appartiene. Dall'intercettazione della prima faglia la cavità cambia morfologia ed assume sezioni trasversali larghe ed appiattite evidentemente impostate lungo giaciture suborizzontali, sviluppandosi così in roccia relativamente indisturbata che sottende l'altopiano di Fosse. Il condotto scende tramite un corridoio stretto e obliquo verso il basso fino a raggiungere il Lago Pensile, dove si incontra il torrente perenne. In questo punto il condotto intercetta una seconda faglia, a 150 metri dall'ingresso, la quale viene utilizzata dal torrente interno come principale via di deflusso durante i periodi di magra (Fig. 1.6). I primi 150 metri della grotta sono normalmente in condizioni inattive,

infatti costituiscono uno sfioratore di troppo pieno attivo solo dopo intense precipitazioni, ovvero quando la faglia intercettata non riesce a smaltire tutta l'acqua proveniente da monte (Rossi & Zorzin, 2011).

Oltrepassando il Lago Pensile e risalendo il torrente sotterraneo si raggiunge poi la Sala delle Meraviglie, un luogo ricco di concrezioni e speleotemi ma che ha purtroppo vissuto il terribile periodo di inquinamento della grotta.

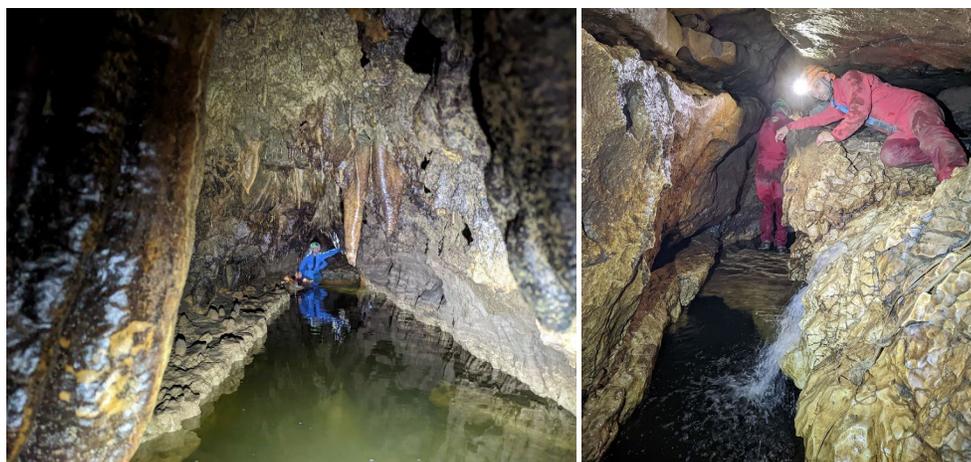


Figura 1.5 a sx - Condotto successivo a Sala delle Meraviglie.

Figura 1.6 a dx - Area a valle del Lago Pensile dove il torrente interno viene drenato dalla faglia.

Poco oltre Sala delle Meraviglie inizia un lungo condotto semiallargato che si comporta da sifone in periodi con abbondanza di acqua (Fig. 1.5), fino a raggiungere Sala Forlani e Sala dell'Orso per poi svilupparsi in un lungo condotto che infine diventa completamente allagato in prossimità del Sifone Venchi. Sembra evidente dal rilievo (Fig. 1.4) che la linearità del tratto di grotta compreso tra tale Sala delle Meraviglie e Sifone Venchi (circa 400 m) sia imputabile ad una lineazione orientata ENE. Le osservazioni eseguibili in prima persona durante la presente tesi finiscono all'altezza del Sifone Venchi (lungo 50 metri), a monte di questo le esplorazioni speleosubacquee hanno rilevato che la cavità ritorna aerea e assume un andamento ascendente aprendosi nella vasta Sala Faccioli seguita da un lungo condotto che raggiunge una quota di +85 m relativamente all'ingresso (610 m s.l.m.). Questa parte di cavità, raggiunta per la prima volta nel 1971, è stata recentemente rivisitata grazie alla migliorata qualità dell'acqua.



Figura 1.7 - Modello schematico dei primi 200 metri di grotta

In Figura 1.7 viene schematizzata la struttura dei primi 200 metri di grotta, tra l'ingresso e la zona di perdita del Lago Pensile dove si sono concentrati il monitoraggio e i vari rilievi durante il periodo di preparazione della presente tesi. Da Sala delle Meraviglie il torrente sotterraneo scende di circa 8 metri fino alla perdita del Lago Pensile (Fig. 1.7). Da qui il condotto, senza scorrimento in condizioni di magra, risale per circa 7 metri fino a fuoriuscire in prossimità della 1° faglia nella serie di sale superiori che afferiscono all'ingresso della Spurga. Questa zona di grotta "superiore", percorsa solo in condizioni di troppo pieno, è articolata in due diramazioni sovrastanti costituite da brevi condotti che raccordano tre sale: Sala Bianca, 1° Sala e 2° Sala. A partire dalla prima faglia la diramazione superiore è caratterizzata da un condotto freatico ellittico ascendente, in contropendenza relativamente al verso di circolazione, che sbucca in un vasto ambiente, noto come Sala Bianca. La Sala è riccamente concrezionata ed ospita diverse colonne, colate e una coppia di massicci edifici stalagmitici. L'intensa litogenesi è favorita dalla notevole permeabilità dei giunti subverticalizzati e decompressi della sinclinale, l'unica acqua che giunge nel vano è di stillicidio che si intensifica nei periodi di precipitazione. L'asimmetria della sala è certamente imputabile alle condizioni a franapoggio del suo fianco orientale, ma non vi sono testimonianze significative di processi gravitativi (Rossi & Zorzini, 2011). La sala Bianca è comunicante con la sottostante 2° Sala tramite uno sfondamento; queste due sale sono separate da un diaframma costituito da una breccia altamente cementata, perciò esse, un tempo, risultavano essere una sola grande sala. La diramazione inferiore, ad andamento discendente, si stacca dalla precedente in prossimità della faglia riallacciandosi nella forra di ingresso (Fig. 1.7); essa ha determinato lo svuotamento a monte di una consistente parte dei condotti. È caratterizzato da brevi segmenti vadosi interposti tra due sale: la 1° e la 2° Sala sono divise da un restringimento del condotto costituito sempre dalla breccia precedentemente citata. Dalla 1° Sala all'ingresso si passa attraverso una strettoia di poco più di 1 m² di larghezza, anch'essa allargatasi per erosione attraverso un deposito di breccia consolidato da una grande colata concrezionale.

La portata del torrente interno varia molto in base alle condizioni di saturazione del terreno e di episodi di precipitazioni precedenti alla misura. Misurazioni storiche e recenti riportano dati che variano dai 0,8 ai 5 l/s durante periodi di magra, fino a una stima dai 500 ai 2000 l/s durante i periodi di piena.

L'inquinamento della grotta

La storia della Spurga delle Cadene è purtroppo segnata, a partire dagli anni '70, da più di due decenni di continuo inquinamento del torrente sotterraneo a causa dello sversamento di liquami suini negli inghiottitoi dell'altopiano sovrastante. Secondo alcuni speleologi attivi nel periodo, l'inizio del degrado si attesta intorno al 1972-1973, prima con sporadiche segnalazioni di acque torbide e con odore cattivo dopo le piene, poi nel tempo la situazione è peggiorata, compromettendo del tutto le acque sotterranee intorno al 1982. Il fenomeno fu coevo con lo sviluppo di impianti di allevamento intensivo di suini nella zona di Fosse, dove venivano smaltiti illegalmente i liquami all'interno di condotti carsici superficiali collegati con la Spurga delle Cadene. Al suo interno si trovavano materiali fecali grossolani, oltre che crusca e frustoli, indice inequivocabile di sversamenti in condotti carsici beanti e a diretto contatto con il reticolo idrogeologico della grotta. L'area della grotta più gravemente colpita dall'inquinamento è individuata in Sala delle Meraviglie, nome che voleva rappresentare la bellezza originale dell'area, e che invece, in questo periodo, era caratterizzata da un deposito di fondo decimetrico costituito

da fango organico maleodorante gremito di Oligocheti tubificidi e lumbricidi. L'aria, in questa fase, era satura dall'odore di liquami e sulla superficie dell'acqua, in tutta la cavità, era presente una schiuma biancastra e grossi frammenti di materiale fecale suino. Nella porzione iniziale della grotta, non percorsa dal corso d'acqua perenne, si notava (e si nota tutt'ora) uno strato nerastro incrostato sulle pareti, portato dalle ondate di piena durante precipitazioni copiose nella zona di ricarica idrogeologica. Le pozze stagnanti erano pervase da colonie di Oligocheti del genere Tubifex (tipici di ambienti inquinati), che proliferavano al di sopra dei fanghi liquamosi sedimentati. L'inquinamento fece molto clamore al tempo, attirando attenzione sul tema della vulnerabilità delle falde nella provincia di Verona. In seguito all'allarme degli speleologi venne promossa una campagna di sensibilizzazione e controlli che investì tutta l'area provinciale (Fig. 1.8). Si trovarono decine e decine di pozzi, soprattutto nell'area urbana di Verona utilizzati anche per l'acquedotto, con livelli di nitrati e presenza batterica decisamente più elevata rispetto alla soglia di potabilità. Il pozzo ad uso idropotabile situato a Peri, nel fondovalle sottostante la grotta, venne chiuso per un livello di inquinamento da nitrati centinaia di volte superiore al limite di legge. Nei sistemi carsici come quello della Spurga delle Cadene, le acque passano direttamente dalla superficie alla grotta, e da questa alla falda acquifera senza attraversare nessun mezzo poroso che possa agire come filtro e che avrebbe potuto rallentare la diffusione delle sostanze tossiche facilitandone lo smaltimento. A partire dai primi anni 2000 le condizioni della grotta sono progressivamente migliorate, sia per la chiusura di diversi allevamenti suinicoli, sia per la messa in funzione del biodigestore comunale. Dal 2010 l'odore e i depositi organici sul fondo grotta non sono più presenti e, con il passare del tempo, l'ambiente sta recuperando la bellezza e l'armonia precedente al sopraggiunto distruttivo intervento antropico. È evidente come le forti piene, che si materializzano a seguito di precipitazioni intense, conseguono una pulizia profonda delle superfici interne; anche grazie a questo processo di depurazione naturale la grotta si presenta oggi in buone condizioni. Alcuni segni all'interno non potranno essere cancellati e rimarranno nel record stratigrafico delle concrezioni della grotta: strati millimetrici di materiale organico nerastro hanno ricoperto e incrostato pareti, concrezioni e depositi. Questi strati di fosfati dovuti all'inquinamento entreranno così ufficialmente nella storia geologica della grotta a ricordare la parentesi più triste mai sedimentata.



Figura 1.8 - Giornale veronese della metà degli anni '80 che sensibilizza la popolazione riguardo l'inquinamento utilizzando come esempio la Spurga delle Cadene (gentile concessione archivio G. Rossi).

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Introduzione

L'area di studio è ubicata nei Monti Lessini, estrema propaggine meridionale del dominio Sudalpino orientale, considerati come l'avampaese debolmente deformato della Catena Sudalpina neogenica-quadernaria (Fig. 2.1). La Lessinia si trova quindi all'interno del dominio Sudalpino, un dominio geologico caratterizzato da strutture Sud-vergenti (Doglioni, 1987), formatosi in un processo di indentazione progressiva del promontorio africano Adria in collisione con la placca Europea. Il limite superiore del Sudalpino è definito dalla linea Insubrica (o lineamento Periadriatico), ovvero un lineamento tettonico di ordine gerarchico superiore che separa la catena alpina settentrionale Nord-vergente da quella meridionale Sud-vergente. Il Sudalpino è un tipico esempio di margine continentale passivo deformato successivamente in un orogene. Si sviluppa strutturalmente durante il Neogene propagandosi progressivamente verso l'avampaese adriatico (cioè verso sud) invertendo perlopiù faglie normali mesozoiche. Il fronte deformativo è sepolto dalle alluvioni della Pianura Padana appena a Sud di Verona.

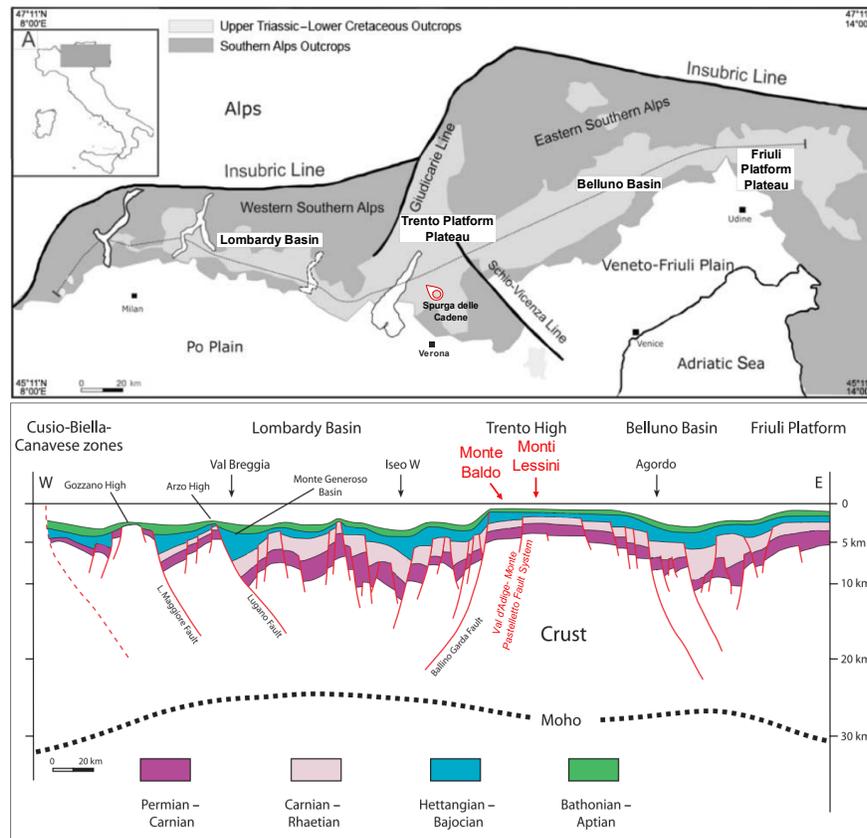


Figura 2.1 - Geometrie tettoniche e paleoambientali nel Sudalpino (modif. da Bertotti et al., 1993).

La placca adriatica subì una fase di rifting a partire dal Permo-mesozoico che evolve nella oceanizzazione (Tetide occidentale) a partire dal Giurassico Medio (Carminati et al., 2010). La tettonica estensionale, sin dall'Anisico inferiore, ha generato strutture a horst e graben, delimitate da lineamenti orientati N-S, NNW-SSE (Bertotti et al., 1993). La Lessinia si localizza in questo contesto paleogeografico all'interno del horst di Trento. Alla fine del Cretaceo inferiore avvenne

un cambiamento nella cinematica delle placche che invertirono il loro moto. Questo periodo corrisponde con l'inizio della convergenza dei margini continentali africano ed europeo, responsabile dell'evoluzione alpina che continua fino ad oggi. Oggi i Monti Lessini presentano un assetto strutturale prevalentemente monoclinale caratterizzato da uno scarso numero di deformazioni tettoniche per lo più di debole entità. I vari eventi tettonici che hanno caratterizzato l'evoluzione geologica del Sudalpino sono registrati nelle rocce della Lessinia.

In Figura 2.2 viene presentata una carta geologica sviluppata e modificata a partire da una carta gentilmente offerta dal professor Menichetti e pubblicata nell'articolo Menichetti et al.(2011).

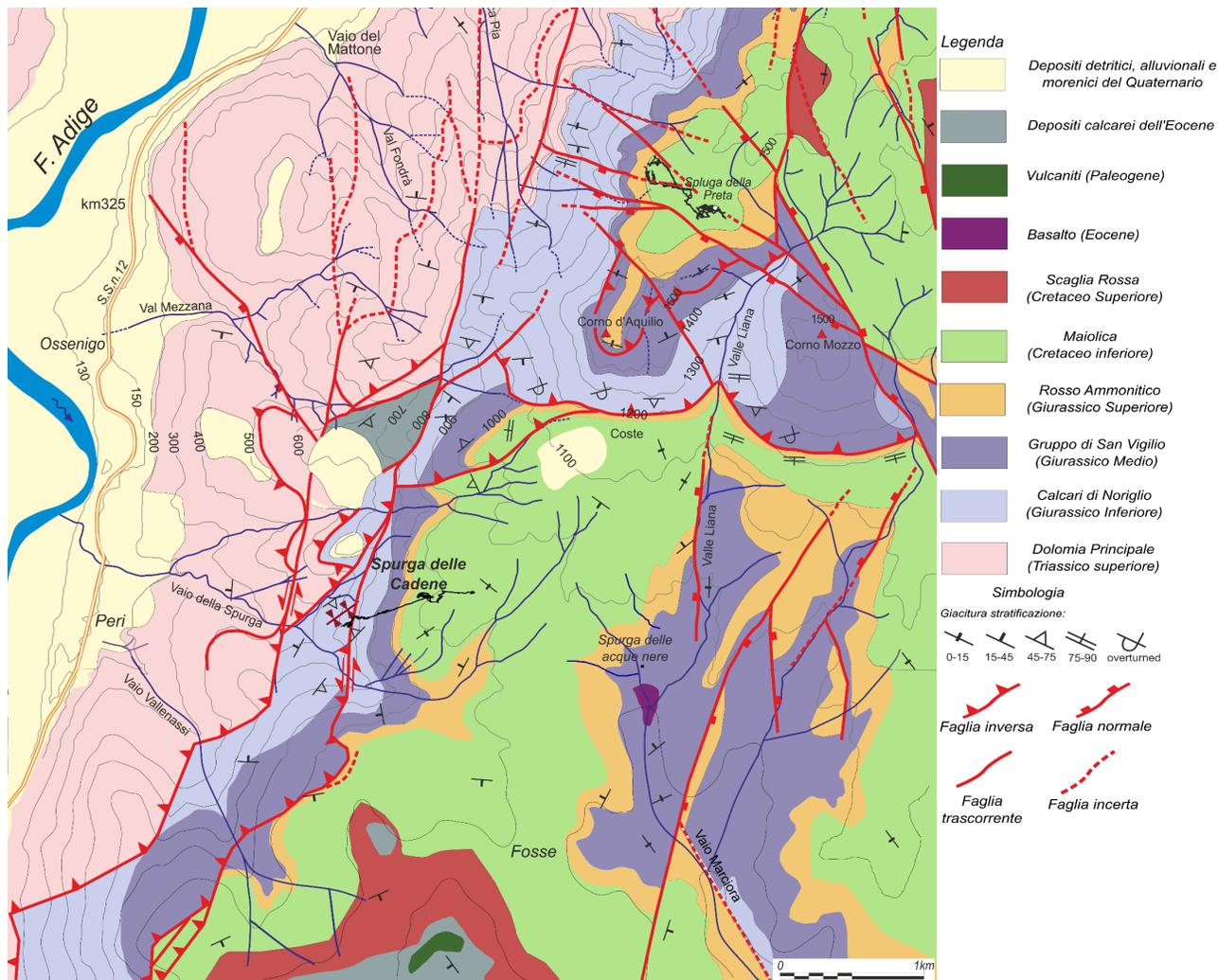


Figura 2.2 – Carta geologica dell'area di studio in cui insiste la Spurga delle Cadene e dov'è localizzato il relativo bacino di ricarica (modif. da Menichetti et al., 2011).

La successione stratigrafica

Le rocce che costituiscono i Monti Lessini sono prevalentemente carbonatiche di età compresa fra il Triassico e il Miocene medio (da 225 a 11 milioni di anni). La successione delle rocce sedimentarie e vulcaniche presenti nei Lessini ha uno spessore totale di quasi 2000 metri, comprende, dal basso verso l'alto:

- Dolomia principale (Norico-Retico): alternanze cicliche di dolomie in strati spessi e molto spessi. Formatasi in un mare poco profondo e con lento sprofondamento (subsidenza) del fondale, tale da consentire una sedimentazione omogenea [potenza: circa 800 metri in affioramento, ma non è visibile la base];

Nell'area di studio questa formazione forma un ampio affioramento lungo il versante della Val d'Adige compreso tra il fondovalle e i 500 metri di quota. La dolomia è delimitata, nel versante sulla sinistra orografica dell'Adige, da un'importante faglia inversa a causa della quale la roccia si presenta come brecciata e localmente fratturata in modo pervasivo.

- Calcari grigi di Noriglio: (Hettangiano-Pliensbachiano) formazione caratterizzata da una grande varietà di litofacies. Alla base sono presenti calcari e dolomie organizzati in cicli, nella parte intermedia un corpo di calcari oolitici e nella parte superiore strati calcarei alternati con strati argilloso-marnosi più sottili sovrastati da un cuneo oolitico che si assottiglia verso est [potenza: nella Spluga della Preta è stata calcolata circa pari a 500 m];

Nell'area di studio la formazione si presenta ben stratificata con banchi variabili da pochi centimetri a qualche metro. Notevole continuità litologica con la sovrastante formazione. L'entrata della grotta si apre all'interno di questa formazione.

- Oolite di San Vigilio (Aaleniano): calcareniti ad ooliti e bioclasti passanti lateralmente e superiormente a calcari biocostruiti. Sedimentazione marina di piattaforma ma con forti correnti di marea [potenza: diverse decine di metri che si riducono verso est, nella Spluga della Preta ammonta a 200 m];

- Rosso Ammonitico Veronese (Bajociano sup.-Titaniano medio): calcari micritici nodulari in strati di medio spessore, più sottili e selciferi nella porzione intermedia. Deposizione di mare aperto e mediamente profondo, le cui testimonianze sono palesi nelle tracce fossili (ammonite). La marcata presenza di ferro ne caratterizza la colorazione rossastra, e la resistenza opposta all'erosione ne fa assumere un notevole risalto morfologico [potenza: 25 m];

- Maiolica (Titaniano superiore-Cenomaniano): viene volgarmente chiamata Biancone ed è costituita da calcari micritici fittamente stratificati passanti superiormente ad alternanze di calcari micritici e marne con peliti nerastre, da sottolineare l'abbondante presenza di noduli di selce bruna.

Deposizione in condizioni marine profonde, il contatto litologico con la formazione sottostante è graduale [potenza: nell'area di studio supera il centinaio di metri]; L'area del bacino idrogeologico, localizzato sull'altopiano di Fosse e ipotizzato al principio di questa ricerca, si localizza all'interno di questa formazione.

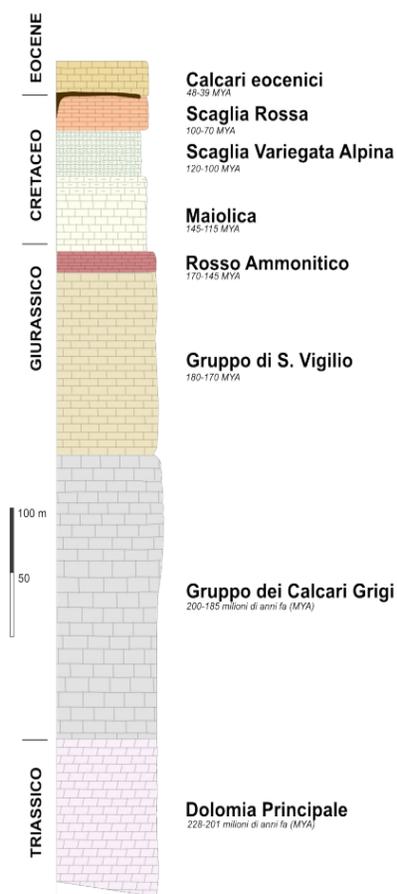


Figura 2.3 - Colonna stratigrafica Monti Lessini (G. Gonzato).

- Scaglia Rossa (Turoniano-Maastrichtiano): calcari micritici più o meno marnosi talora selciferi con al tetto un caratteristico hardground. Condizioni paleoambientali di mare pelagico ma meno profondo, sintomo della fase iniziale della convergenza fra il continente europeo e la placca adriatica [potenza: circa 50-60 metri, nell'area di studio è però quasi totalmente assente];

- Unità eoceniche: alla base calcari marnosi del Paleocene superiore-Eocene inferiore, associati a prodotti di effusioni vulcaniche dovuti ad una fase tettonica estensionale; nell'area di ricarica del torrente interno alla grotta è presente un camino vulcanico riferibile a questa fase di rifting continentale. Superiormente passa a calcareniti dell'Eocene medio con intercalati livelli argilloso-sabbiosi [potenza: circa 150 metri];

- Unità oligoceniche: arenarie carbonatiche ed in parte silicee (Castellarin, 1974) [potenza: poche decine di metri].

È importante anche menzionare la presenza, nella zona di studio, della provincia magmatica Sudalpina cenozoica nota in letteratura come Provincia Vulcanica Veneta (VVP) (Visonà et al., 2007), uno dei più vasti distretti magmatici della placca Adriatica (Beccaluva et al., 2007). Dal tardo Paleocene all'inizio del Miocene, le attività magmatiche della VVP si sono sviluppate lungo una serie di centri eruttivi orientati NNW-SSE: Val d'Adige, Monti Lessini, Marosticano, Colli Berici e Colli Euganei. La generazione di magma sembra essere stata innescata da effetti decompressivi legati alla deformazione estensionale che ha interessato l'avampaese sudalpino in risposta alle fasi compressive dell'orogenesi alpina. I prodotti vulcanici legati a questa attività si trovano ora intercalati a vari livelli nelle rocce sedimentarie del Sudalpino. Le vulcaniti della Provincia Veneta si estendono dal lago di Garda (a Ovest) al fiume Brenta (ad Est), dall'area di Trento (a Nord) fino ai Colli Euganei (a Sud) e sono prevalentemente distribuite nei Monti Lessini. Quest'area del Sudalpino è caratterizzata da un assottigliamento litosferico arealmente limitato, con la Moho localizzata ad una profondità di circa 28 km che si approfondisce rapidamente nelle aree circostanti. Tale assottigliamento crostale viene considerato coevo con l'attività vulcanica della Provincia Vulcanica Veneta. I basalti, neri e molto compatti, quando non alterati, si presentano spesso in grandi corpi cilindrici detti neck, corrispondenti ad antichi camini vulcanici; sono molto diffusi anche filoni basaltici (dicchi) di dimensioni talvolta ridottissime, spessi anche pochi decimetri. Le tufiti, di colore scuro e piuttosto incoerenti, formano corpi sedimentari anche di alcune decine di metri di spessore ed estesi fino a qualche chilometro. Nell'area di studio sono presenti depositi tufacei, formate da piroclastiti e ceneri, nella zona appena a Sud di Fosse (Fig. 2.2).

Come si può osservare dalla Figura 2.2, nell'area dove insiste la Spurga delle Cadene si individuano prevalentemente rocce di età giurassica e cretacea. Immediatamente ad Ovest e a quote leggermente inferiori rispetto all'entrata della grotta affiorano estesamente dolomie triassiche, coperte parzialmente da depositi quaternari da sciolti a cementati: detriti di versante, depositi alluvionali e abbondante materiale morenico la cui estensione aumenta scendendo lungo il versante della Vallagarina. L'altopiano di Fosse risulta essere costituito principalmente da calcari micritici e marne facenti parte della Formazione della Maiolica, mentre all'interno delle valli si possono notare estesi affioramenti delle formazioni sottostanti, appartenenti a litotipi più carsificabili.

Inquadramento tettonico

La Lessinia, nell'ambito del sistema alpino, è parte delle Alpi Meridionali, costituite da un intreccio strutturale di almeno tre principali sistemi di deformazione. A Sud del Lineamento Periadriatico che separa la catena Nordalpina, a falde di ricoprimento Europa-vergente, da un esteso sistema di embricazione a polarità opposta (Africa-vergente), si sviluppa un sistema strutturale caratterizzato da associazioni tettoniche diverse sia per direzione, sia per andamento generale e sia per l'età delle strutture. La Lessinia, con la sua peculiare forma triangolare, è compresa tra il sistema delle Giudicarie con andamento NNE-SSW a Ovest e il sistema Scledense di faglie di trasferimento Schio-Vicenza con andamento NW-SE a Est (Viganò et al., 2008). L'altopiano è inciso da profonde valli che sono strettamente guidate da questi due sistemi tettonici.

I due principali sistemi di faglie registrano una fase estensionale del Paleogene associata alla messa in posto di dicchi e colate basaltiche. Una successiva fase compressiva alpina con direzione N-S, di età neogenica-quadernaria, ha invece generato movimenti trasversali, solo localmente estensionali, degli stessi sistemi di faglie ereditati. Questa fase ha inoltre generato nuove strutture come la piega anticlinale Sud-vergente del Corno d'Aquilio, diverse sinclinali come quella di Tinazzo, Masselli e Malga Campo e poi il sistema di faglie coniugate trascorrenti ad orientazione NNE-SSW e NNW-SSE (Artoni &



Figura 2.4 - Faglia trascorrente sinistra individuata all'interno della Spurga delle Cadene e relativa alla riattivazione neogenica. (Imm. 100° incl. 52°, pitch 18°).

Rebesco, 1990). Riguardo a quest'ultimo sistema sono presenti prove anche all'interno della Spurga delle Cadene (Fig 2.4), dove è stata individuata una faglia trascorrente sinistra con direzione NNE-SSW. Come è stato registrato nella totalità delle Alpi meridionali infatti, anche i Monti Lessini sono stati interessati da una fase compressiva, certamente a partire dal Miocene, quando il sollevamento ha portato l'altopiano calcareo alla sua definitiva emersione e ha dato inizio ai processi carsici. A partire dal Pliocene invece la regione è interessata da sistemi di faglie trascorrenti ed estensionali che hanno dato luogo a basculamenti dei diversi blocchi tettonici (Zampieri, 2000).

Oggi il territorio dei Monti Lessini presenta un assetto strutturale prevalentemente monoclinale caratterizzato da deformazioni tettoniche per lo più di debole entità (Fig. 2.5). Fa eccezione in questo quadro l'ampia fascia orientata circa Est-Ovest (ENE-WSW) del pronunciato sovrascorrimento della Linea della Valsugana, di età Miocene medio-superiore, situata nel settore settentrionale, accompagnato da pronunciati sistemi di pieghe e di accavallamenti minori, di direzione circa Est-Ovest, che si propagano con evidenza verso Sud, nei settori settentrionali e centrali dei Monti Lessini (Castellarin & Cantelli, 2000). A questa fascia di deformazioni appartiene anche l'anticlinale del Corno d'Aquilio che ha avuto un ruolo primario nella genesi e sviluppo dei più importanti condotti carsici presenti sull'altopiano. Le porzioni meridionali dell'altopiano lessinico mantengono un assetto monoclinale piuttosto regolare, caratterizzato da modeste inclinazioni degli strati rocciosi (5 - 10°) verso Sud; tale struttura sembra proseguire anche al di sotto delle coperture plio-pleistoceniche situate in corrispondenza della pianura veronese. In generale, il complesso dei Monti Lessini rappresenta l'elemento crostale meno deformato della

struttura delle Alpi Meridionali e ciò può essere collegato al comportamento più rigido di questo settore, caratteristica acquisita in seguito ai molteplici eventi magmatici verificatisi soprattutto nel Permiano, nel Triassico e nel Paleogene.

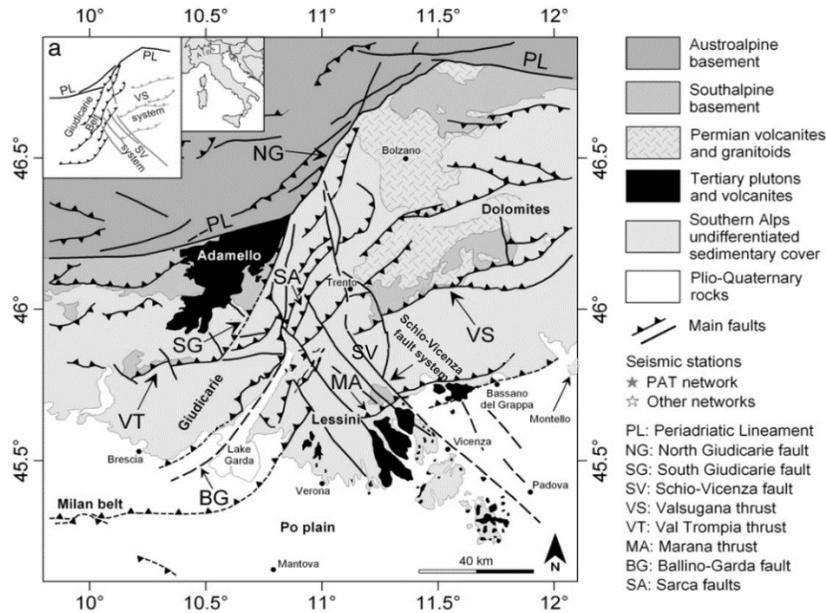


Figura 2.5 - Lineamenti tettonici principali nel Sudalpino orientale (modif. da Viganò et al., 2008).

La zona di frattura che delimita ad Ovest il tavolato lessinico è quindi il Sistema delle Giudicarie; esso presenta un notevole risalto morfologico e si sviluppa tra la Linea delle Giudicarie Sud e la Val d'Adige, attenuandosi sensibilmente verso Nord. Le strutture in oggetto sono dominate da sovrascorrimenti a vergenza SSE, di età compresa nell'intervallo Miocene superiore-Pliocene inferiore. Nell'area di studio,

localizzata nel margine occidentale dell'altipiano lessinico, è presente la linea di sovrascorrimento posta più ad Est del sistema delle Giudicarie orientata NNE-SSO. Essa è caratterizzata da un marcato sovrascorrimento delle Dolomie triassiche sulle formazioni del Cretacico e dell'Eocene, e viene chiamata la fascia di deformazione della Val d'Adige-Monte Pastelletto. Lungo questa fascia risultano molto chiari i rapporti geometrici fra le associazioni strutturali di due dei principali sistemi tettonici rappresentati nel tavolato; infatti le strutture tettoniche giudicariensi (Fig. 2.6) troncano e deformano le strutture tettoniche di piegamento (le pieghe a ginocchio del Corno d'Aquilio e Corno Mozzo a Nord del paese di Fosse) ad assi E-W riferibili al Sistema Valsuganese, che pertanto risultano generate da una fase deformativa antecedente (Artoni & Rebesco, 1990). Nell'area di studio (Fig. 2.2), il sistema tettonico della Val d'Adige è formato da due faglie subparallele principali con direzione NNE-SSW distanti circa 300 metri l'una dall'altra che, verso Nord, tendono a convergere in un'unica struttura mentre, verso S, chiudono all'altezza della Chiusa di Ceraino. Le faglie presentano una cinematica inversa con componente



Figura 2.6 - Faglia inversa con andamento giudicariense (imm. 326° incl. 50°) individuata all'interno della Spurga delle Cadene.

trascorrente, l'inclinazione è di poco maggiore rispetto a quella del versante orientale della Vallagarina. Le due faglie delimitano una zolla tettonica pervasivamente deformata e piegata in sinclinali e anticlinali con assi direzionati N50°E, dove, al nucleo di una splendida sinclinale, si apre la Spurga delle Cadene (Fig. 2.7).

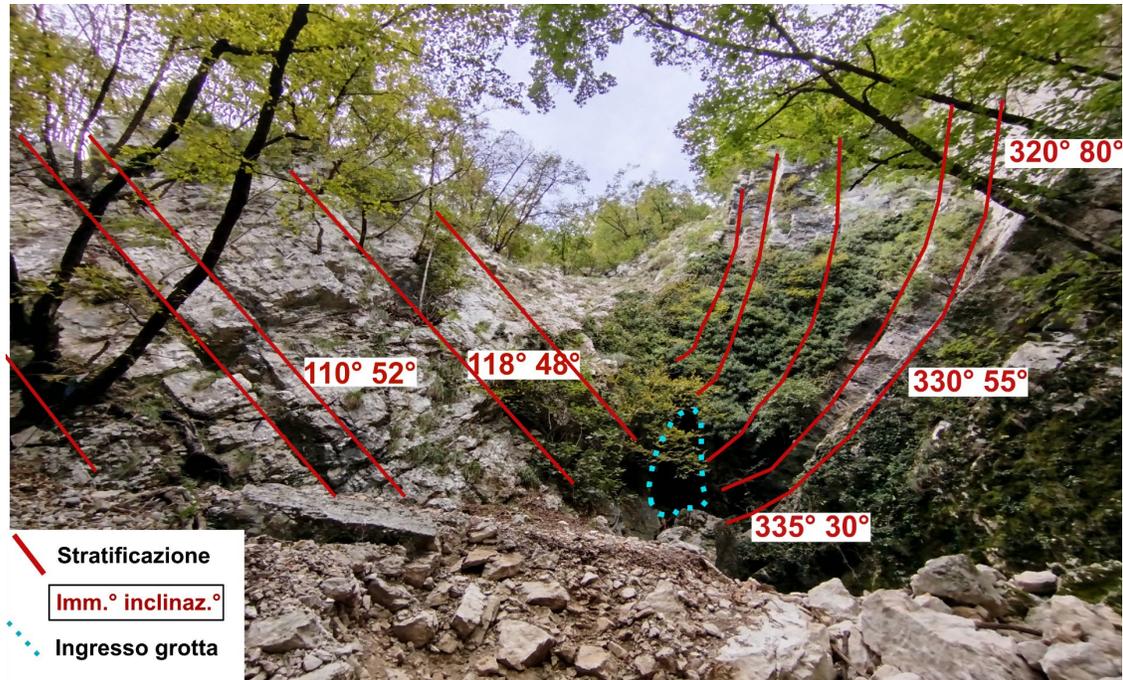


Figura 2.7 - Sinclinale di ingresso alla Spurga delle Cadene con dati di misurazione delle stratificazioni (immersione, inclinazione).

La sinclinale in cui si apre la grotta mostra un angolo, formato fra i due fianchi, pari a 70° e presenta un asse inclinato di circa 20° rispetto alla verticale con direzione N60°E. La piega si conclude bruscamente all'intercettazione della faglia con direzione NNE-SSW appartenente alla fascia di deformazione della Val d'Adige-Monte Pastelletto (Fig. 2.2).

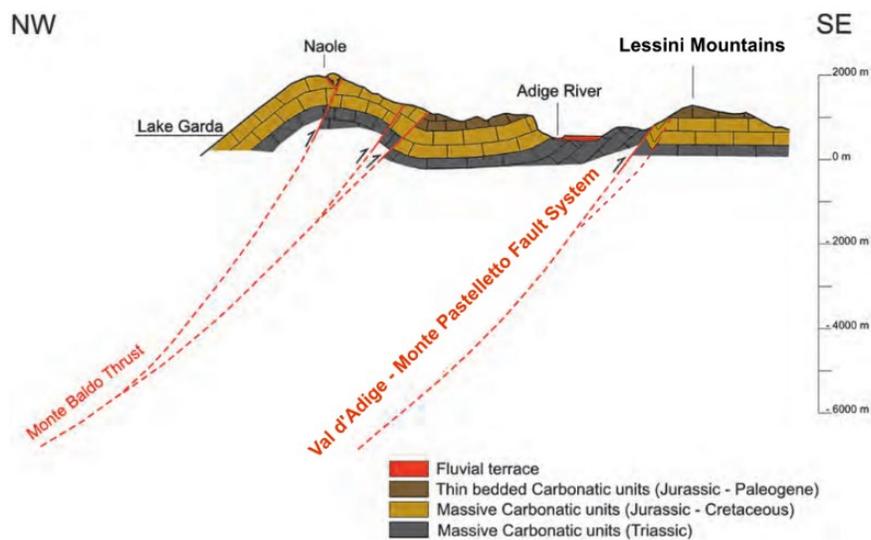


Figura 2.8 - Schema semplificato della fascia tettonica a occidente dei Monti Lessini (modif. da Berlusconi et al., 2013).

Il lineamento presenta caratteristiche di sovrascorrimento nell'area intorno alla grotta, tende ad avere un comportamento di piega-faglia invece più a Sud (Monte Pastelletto) (Fig. 2.8). Il raccorciamento complessivo accomodato da queste strutture è stimato nell'ordine di una decina di chilometri (Picotti et al., 1995). Va aggiunto che la faglia non ha andamento rettilineo, ma si esplica in più settori, l'entità del rigetto è di difficile valutazione, ma può essere mediamente stimato intorno ai 500 metri nella zona esaminata. Secondo Berlusconi (2013) le grandi frane riconoscibili lungo la Valle dell'Adige potrebbero essere infine riferite alla riattivazione del sistema di faglie di Monte Pastello come suggerito da scarpate "fresche" osservate nell'area. L'intera struttura del fascio tettonico, situato nell'area che ha subito i maggiori danni durante il terremoto del 1117, è stata considerata "potenzialmente sismogenetica". Inoltre, una piccola crisi sismica, con eventi fino ad una magnitudo 4,2, si è verificata durante l'autunno e l'inverno del 2011 lungo la Valle dell'Adige. La struttura tettonica della Val d'Adige-Monte Pastelletto è il sistema di faglie capaci più vicina all'epicentro veronese del catastrofico terremoto del 1117 e inoltre le relative dimensioni e geometrie sono consistenti con i rilasci di energia avuti durante l'evento (Berlusconi et al., 2013).

La flessura del Corno d'Aquilio è una delle strutture più importanti e visibili della Lessinia, formata durante la fase compressiva del Neogene (Artoni & Rebesco, 1990). Essa è caratterizzata da un'ampia piega anticlinale asimmetrica, vergente a sud con asse E-W immergente di pochi gradi verso E; il piano assiale immerge a nord inclinato di 60°. L'anticlinale del Corno d'Aquilio presenta il fianco meridionale verticalizzato che raccorda la zona degli Alti Lessini con l'area collinare della zona di Fosse, maggiormente accentuata nel settore occidentale dove provoca un salto altimetrico di 500 metri (Fig. 2.9). La presenza di evidenti scorrimenti lungo strato sul fianco verticalizzato della flessura, suggerisce un meccanismo di piegamento di tipo scivolamento flessurale (Artoni & Rebesco, 1990).

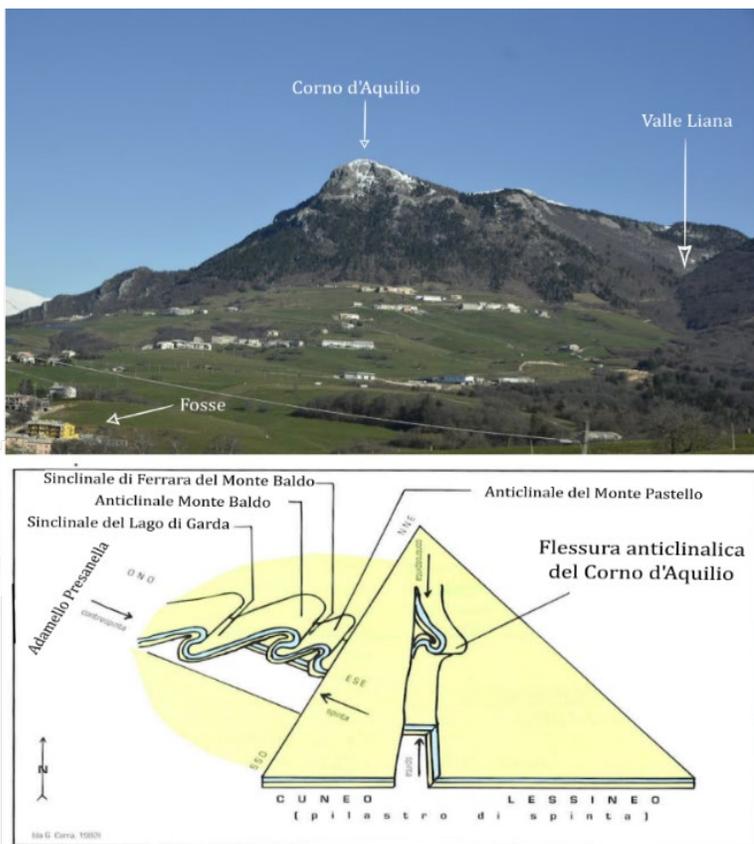


Figura 2.9 - Flessura del Corno d'Aquilio (modif. Da Corrà 1969).

Inquadramento geomorfologico

La morfologia dei Monti Lessini è varia: sono costituiti da un altopiano centrale che scende verso Sud con dorsali separate da vallate direzionate Nord-Sud e raggiungono la pianura sotto forma di dolci colline. La parte più elevata, l'alta Lessinia oltre i 1200-1300 metri, è costituita da ampi prati e pascoli, mentre la parte intermedia, dagli 800 ai 1200 metri, è caratterizzata principalmente da marcate pendenze e vai arricchiti dalla presenza del faggio, del carpino nero e dell'abete rosso. I vai, profondi e ricchi di boschi, verso la pianura diventano ampie vallate con colline coltivate a ciliegio, vite ed olivo. La Lessinia custodisce ambienti e paesaggi incontaminati; i suoi caratteri naturalistici, storici, ambientali ed etnici la rendono un territorio ricco di testimonianze e di luoghi di elevato interesse turistico. L'azione di erosione del suolo e del sottosuolo da parte dei fenomeni meteorici, dall'acqua, dal vento e dall'ingombrante presenza dei ghiacciai lungo le centinaia di migliaia di anni hanno mutato il paesaggio dei Lessini. Oggi si presenta con vistosi fenomeni carsici di superficie: doline, conche, inghiottitoi, erosioni superficiali come la Valle delle Sfingi. Al di sotto di questo paesaggio esiste un altro carsismo meno visibile a prima vista, con grotte, condotti e grandi sale. I Monti Lessini sono una delle zone carsiche più importanti d'Italia, vi sono state mappate oltre 850 grotte (Mietto & Sauro, 2000). Le grotte lessiniche si sono formate principalmente per carsismo epigenico: la forma di carsismo più comune, originato dalle acque meteoriche in ambiente continentale.

L'area dove si è concentrato lo studio presentato in questa relazione spazia dal ripido versante sulla sinistra orografica della Vallagarina all'altopiano di Fosse, dove è localizzato il bacino idrologico del torrente perenne della Spurga delle Cadene, alla flessura del Corno d'Aquilio a Nord. Nell'ambito di questi domini l'erosione ha agito selettivamente in conformità con le caratteristiche litologiche dei terreni. Le formazioni giurassiche determinano una marcata asprezza nelle morfologie, presentando rotture di pendenza, cenge e declivi notevolmente inclinati, oltre che possedendo al loro interno i principali condotti carsici. La zona superficiale dell'altopiano di Fosse è impostata principalmente nella Formazione della Maiolica, litologia che si comporta come una roccia semipermeabile a causa delle frequenti intercalazioni marnoso-argillose. Viene chiamata anche "roccia serbatoio" in quanto riesce a trattenere l'acqua all'interno dei pori e fratture e restituirla dilazionata nel tempo (Sauro, 1974). Come già detto, l'altopiano di interesse ha una debole inclinazione verso SW, bordato ad occidente dalla profonda incisione della Valle Liana. La Valle Liana è un profondo solco N-S sviluppata lungo un lineamento tettonico con uguale direzione; nella parte settentrionale essa separa il Corno Mozzo dal Corno d'Aquilio, verso Sud invece mostra morfologie più evolute caratteristiche dei canyon. I Monti Lessini sono infatti fratturati da numerose faglie con direzione generale N-S su cui sono impostate le vallate principali. I blocchi separati dalle faglie sono anche tettonicamente sfasati tra loro lungo la verticale (Fig. 2.10).

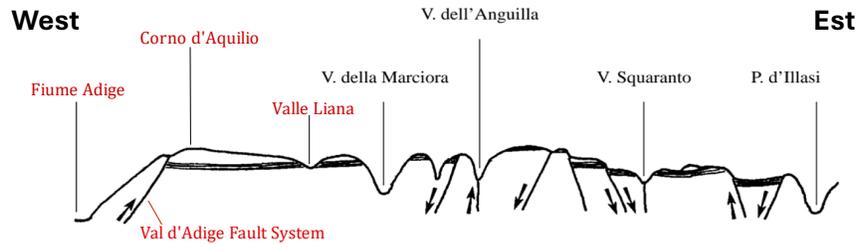


Figura 2.10 - Schema strutturale semplificato dei Monti Lessini.

La Valle Liana è scavata principalmente nelle formazioni calcaree giurassiche e si presenta secca se non nei periodi di intensa precipitazione. In tutta la Lessinia l'idrografia superficiale è intensamente condizionata dalla presenza del carsismo, la circolazione idrica infatti avviene principalmente in senso verticale. Le acque meteoriche, dopo un breve percorso in superficie, tendono ad infiltrarsi in profondità quando entrano in contatto con zone altamente assorbenti, andando così ad alimentare l'acquifero carsico. L'altopiano termina improvvisamente sulla scarpata occidentale, caratterizzata da falesie verticali, che lo raccorda con il fondovalle dell'Adige posto a quote intorno ai 100 m s.l.m. Alcuni impluvi si fanno spazio sul margine dell'altopiano, tra questi il più importante risulta essere il Vaio della Spurga solcato dal Rio Fontane. All'interno di questa incisione valliva, a 525 m s.l.m., si apre la Spurga delle Cadene.

La distribuzione delle morfologie carsiche, sia superficiali sia profonde, è condizionata in primo luogo dalla litologia, la formazione dei calcari oolitici risulta essere la più favorevole al loro sviluppo. Nell'altopiano le morfologie carsiche superficiali non sono molto frequenti, si possono trovare nella zona orientale lungo il Vaio dei Mattoni alcune doline o isolate "città" di roccia formate nel Rosso ammonitico. La morfologia carsica superficiale è poco sviluppata, sono presenti piccole doline localizzate soprattutto al passaggio stratigrafico fra la Maiolica e le formazioni sottostanti. Le forme carsiche profonde più sviluppate in zona però sono riscontrabili nella Valle Liana, dove sono presenti diverse grotte di piccola entità e un largo inghiottitoio verticale chiamato Spurga delle Acque Nere profondo più di 20 metri e ostruito da detrito.

Tra le grotte presenti in Lessinia la più famosa e importante è senza nessun dubbio la Spluga della Preta. Essa si trova a 3,5 km di distanza in linea d'aria dalla grotta oggetto della presente tesi. L'ingresso della Spluga della Preta è ubicato nell'area soprastante il Corno d'Aquilio, ad una quota di 1483 m s.l.m. (Fig. 2.2), è una grotta ad andamento verticale che veste un ruolo di primo piano nella storia mondiale della speleologia. È certamente l'abisso più conosciuto nel Veneto e uno dei maggiori esempi di carsismo ipogeo di tutte le Alpi. L'ingresso è costituito da una dolina a forma di imbuto impostata nel Biancone dal quale si succedono ampi e profondi pozzi collegati da condotte localizzate lungo strato fino a raggiungere i -875 metri di profondità (Sauro, 2011). È l'unica grotta della Lessinia che attraversa completamente l'intera colonna stratigrafica mesozoica aprendosi nel Biancone e raggiungendo la Dolomia Triassica in prossimità del fondo dell'abisso. Nell'area intorno a questo importantissimo abisso si aprono diverse altre cavità carsiche minori con sviluppi modesti come la Grotta del Ciabattino, Grotta Morava, Abisso Marisa Bolla ecc.. Ma dopo la Spluga della Preta la cavità carsica più importante nell'area è la Spurga delle Cadene.

Le glaciazioni in Val d'Adige

Un aspetto relativamente poco studiato della geologia dei Monti Lessini è il Quaternario. Le formazioni carbonatiche marine, le rocce vulcaniche, i fossili e il carsismo hanno fornito materiale di studio per centinaia di articoli scientifici; molti meno sono i lavori disponibili sui depositi sedimentari di origine fluviale, glaciale ed eolica che caratterizzano gli ultimi 2,6 milioni di anni, corrispondenti alla cosiddetta Era Quaternaria.

La prima ricostruzione dell'espansione glaciale alpina nel Quaternario si deve al monumentale lavoro di Penk e Brückner pubblicato tra il 1901 e il 1909. Gli autori, in base alla distribuzione altimetrica dei depositi glaciali e, soprattutto, delle morene laterali e terminali, hanno stabilito che vi siano state, nell'ultimo milione di anni, quattro glaciazioni, denominate a partire dalla più antica, che inoltre corrisponde all'ordine alfabetico: Günz, Mindel, Riss e Würm. Essi hanno accertato che durante l'ultima glaciazione Wurmiana la massa glaciale ricopriva quasi interamente i rilievi della Val d'Adige con una quota del ghiacciaio atesino di 2000 m s.l.m. presso Bolzano e di circa 1650 metri s.l.m. a Trento. Questo modello a quattro glaciazioni rappresentò una grande rivoluzione per l'epoca poiché permise di passare dal modello iniziale di un'unica glaciazione a un modello a più glaciazioni. Inoltre queste glaciazioni erano diffuse e riconoscibili in tutte le Alpi. In seguito il modello è stato completato con altre due glaciazioni più vecchie, Biber e Donau, sempre in ordine alfabetico, con l'aggiunta anche di sottodivisioni in stadi dei vari periodi glaciali, ovvero singole avanzate glaciali separate da marcati ritiri (Würm, 3 stadi; Riss, 2 stadi; Mindel, 2 stadi; Günz, 2 stadi; Donau, 3 stadi; Biber). Questo sistema quadripartito proposto da Penk & Brückner, seppur rappresenta un lavoro pionieristico e una pietra miliare nella storia dello studio delle glaciazioni, oggi è considerato superato; l'unico termine ancora in uso tra quelli proposti dai due ricercatori tedeschi è Würm, tuttora utilizzato per indicare l'ultimo ciclo glaciale. Durante il Quaternario, infatti, si sono succeduti molti più cicli glaciali la cui riconoscibilità è limitata a causa della parziale incompletezza del record stratigrafico continentale. I dati oggi disponibili, in particolare quelli relativi alla cronologia (grazie alle moderne tecniche di datazione), alla stratigrafia (grazie alle nuove metodologie di rilievo e documentazione) e al clima del passato (dai cosiddetti proxy-data), hanno portato alla costruzione di una nuova classificazione stratigrafica del Quaternario.

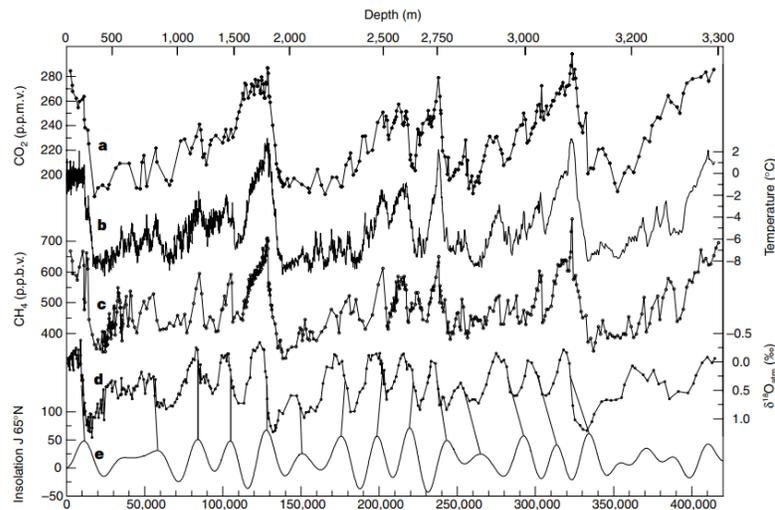


Figura 2.11 - Variazioni climatiche negli ultimi 400000 anni ricavate da carote di ghiaccio antartico (da Petit J.R., 1999).

Essa si fonda su suddivisioni cronostratigrafiche ufficializzate a scala globale e sulla suddivisione in stadi derivati dal trattamento statistico dei dati relativi alle variazioni degli isotopi stabili, che hanno permesso di suddividere l'intera durata del Quaternario in stadi isotopici dell'ossigeno (detti OIS, Oxygen Isotope Stage, o MIS, Marine Isotope Stage) (Angelucci, 2016). La variabilità climatica del Quaternario si è concretizzata su scale temporali differenti, con cicli di durata e intensità diversa. I dati paleoclimatici mostrano l'esistenza di variazioni climatiche a scala plurimillennaria, millennaria, secolare e decennale, ai quali si possono sovrapporre eventi particolari definiti ACC (Abrupt Climatic Change). Nell'ultimo milione di anni circa, le variazioni climatiche a scala plurimillennaria, le più intense tra quelle sopra indicate, si sono susseguite in modo pressoché regolare ogni 100 mila anni circa, secondo un ritmo controllato da una serie di cofattori, tra questi le variazioni di eccentricità dell'orbita terrestre, dell'inclinazione dell'asse di rotazione e della precessione (Fig. 2.11). Questa ritmicità si traduce, in termini ambientali e geomorfologici, nell'alternanza tra fasi fredde durante le quali i ghiacciai si espandono, le glaciazioni, e fasi temperate durante le quali si verifica il ritiro dei ghiacciai, ovvero gli interglaciali. Glaciazioni e interglaciali sono a loro volta modulati da fasi tendenzialmente più fredde o più temperate, indicate rispettivamente come stadi e interstadi. Il meccanismo dell'alternanza glaciale-interglaciale è regolato da dinamiche complesse (Angelucci, 2016).

Le Alpi furono massicciamente investite dagli effetti delle glaciazioni quaternarie. I ghiacciai alpini, come detto, subirono tante fasi di espansione durante il Pleistocene, portando le loro fronti fino alla fascia pedemontana sia a Nord sia a Sud delle Alpi. Durante il Quaternario si sono verificate numerose glaciazioni e negli ultimi 400 mila anni circa si riconoscono quattro cicli glaciale-interglaciale ben definiti. Durante l'Ultimo Massimo Glaciale il grande volume d'acqua immobilizzato negli inlandsis causò l'abbassamento di circa 120 metri del livello marino globale e la conseguente estensione della pianura alluvionale nel Mar Adriatico fino all'altezza di Pescara (Correggiari et al., 1996). I bacini dei maggiori sistemi fluviali del versante meridionale delle Alpi erano occupati da ghiacciai vallivi che spesso raggiungevano la Pianura Padana (Castiglioni, 1940). Il ghiacciaio dell'Adige, nelle sue discese, è stato più volte costretto a diverse defluenze che hanno prodotto lingue vallive di dimensioni ragguardevoli sia verso Sud-Ovest, lungo il solco occupato attualmente dal Lago di Garda attraverso la valle di Loppio dove si univa con il ghiacciaio del Sarca e dilagava così in pianura con l'ampio lobo dell'anfiteatro del Garda, sia ancora più a Ovest, dove scendeva attraverso la conca di Stenico nelle Giudicarie fino a raggiungere la Val Sabbia e il Lago d'Idro (Figur 2.12). A Est altre lingue vallive, sempre



Figura 2.12 - Probabile disposizione delle lingue glaciali durante l'Ultimo Massimo Glaciale (modif. da Vailati, 2017).

transfluenti dal bacino dell'Adige, scendevano lungo la Valdastico e la Vallarsa, circondando i massicci del Carega-Pasubio e dell'altopiano dei Sette Comuni. La massa glaciale principale atesina defluiva quindi dall'attuale spartiacque alpino verso Sud attraverso la Vallagarina e l'asse gardesano. Lungo quest'ultimo avveniva il principale deflusso glaciale, come testimonia la minor ampiezza dell'arco morenico di Rivoli che misura 15 km a fronte dei 60 km del Garda (Cremaschi, 1994). In Vallagarina durante l'Ultimo Massimo Glaciale, per motivi morfologici, defluiva una modesta lingua glaciale che si arrestava all'altezza di Rivoli, alla Chiusa di Ceraino (Sauro, 2005). I dati recenti sulla posizione degli apparati morenici in Vallagarina mostrano quote inferiori di oltre 100 m della copertura glaciale rispetto a quanto sostenuto in passato (Penk & Brückner, 1909) e come riportato nelle suggestive carte di Castiglioni (1940) e di Habbe (1960). Depositi glaciali precedenti all'ultima glaciazione sono riconosciuti a varie quote più elevate di quelle raggiunte durante l'Ultimo Massimo Glaciale nel sistema del Garda, a testimonianza delle ripetute transfluenze avvenute attraverso tale valle durante tutto il Pleistocene (Bassetti & Borsato, 2007). I dati sulla cronologia della massima espansione dei ghiacciaio würmiano dell'Adige suggeriscono che questa sia avvenuta tra circa 25000 e 22000 anni fa.

Dall'analisi dei dati presenti in letteratura sembra però che i Lessini non siano stati coperti totalmente dalle lingue glaciali dell'Adige. I depositi morenici atesini, infatti, si fermano sul lato sinistro orografico della Val d'Adige, fino a circa 960 m di quota (Gonzato & Ferrari, 2022), comunque ben al di sopra della Spurga delle Cadene. Le osservazioni e il riconoscimento dei sedimenti glaciali di origine atesina risulta essere abbastanza immediato. A differenza dei sedimenti di origine locale, costituiti da dolomie, calcari, selci e basalti della successione litostratigrafica lessinica, i sedimenti di origine atesina provengono dall'intera area del bacino idrografico dell'Adige, che si estende fino al confine con l'Austria e comprende formazioni sedimentarie, magmatiche e metamorfiche. Di conseguenza, nei sedimenti di origine atesina si possono rinvenire frammenti di rocce come porfidi, graniti, filladi, gneiss, quarzo, dolomie e calcari provenienti dalle formazioni del Trentino e dell'Alto Adige. La mancata presenza di sedimenti provenienti dall'area atesina nelle zone più elevate dell'altopiano lessinico ha portato la comunità scientifica ad escludere la sopraggiunta del ghiacciaio dell'Adige nell'area sommitale. Durante l'ultima glaciazione il limite delle nevi perenni era posto a circa 1500 m s.l.m. sui Lessini (Pasa, 1940). In Val d'Adige la superficie dei ghiacciaio scendeva da circa 1200 m s.l.m. in Val dei Ronchi sino al fronte di Rivoli; sulle vette e sull'altopiano lessinico stazionavano quindi ghiacciai locali che scendevano lungo le valli laterali e si congiungevano poi con le lingue glaciali principali.

La bontà delle ricostruzioni degli eventi glaciali e la possibilità di attribuire un'età certa alle diverse fasi evolutive sono fortemente inibite dagli intensi fenomeni di erosione che hanno accompagnato la storia geologica recente delle Alpi. I progressivi eventi glaciali tendono ad eliminare i dati e reiterare eventuali depositi morenici precedenti, creando grossi disturbi all'interpretazione dell'evoluzione delle valli. Durante le fasi di ritiro dei ghiacciai, le aree dominate dalle dinamiche alluvionali (valli laterali e fondivalle principali) sono altresì soggette a significativi fenomeni di erosione, trasporto e, soprattutto, rielaborazione. C'è da aggiungere però che le moderne tecniche di analisi e gli innovativi metodi di datazione aprono nuove possibilità di elaborazioni e scoperte che potrebbero rivoluzionare le nozioni fin qui conosciute delle ultime glaciazioni nell'ambito alpino.

3. METODOLOGIE DI RILEVAMENTO

Gli obiettivi iniziali del progetto di tesi erano vari e per ognuno si è proceduto con diversi metodi di rilevamento. Il presente capitolo, per descrivere al meglio i metodi di rilevamento, è stato suddiviso in due parti: la prima riguarda l'analisi sedimentologica e mineralogica di alcuni campioni prelevati durante le fasi di rilevamento, mentre la seconda riguarda invece il monitoraggio acustico e idrogeologico della cavità.

Metodi di analisi dei campioni prelevati

La prima parte del rilevamento si è concentrata sull'analisi di campioni prelevati sia all'interno della cavità carsica, sia nell'area del bacino idrogeologico del torrente perenne interno alla grotta.

Per ciò che riguarda i sedimenti prelevati all'interno della grotta vengono presentate in Figura 3.1 le ubicazioni delle campionature eseguite.

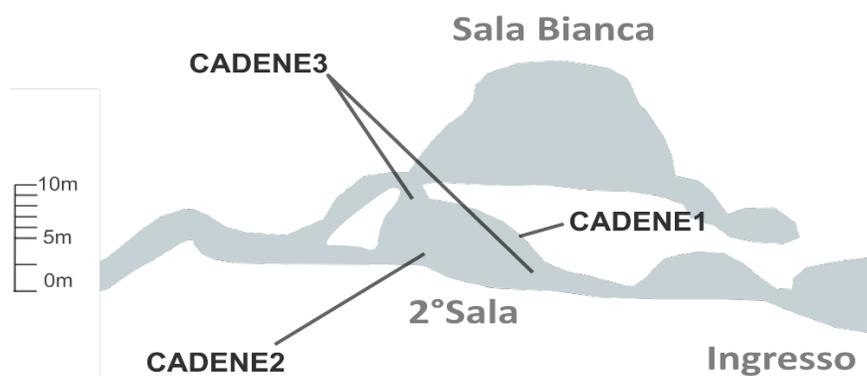


Figura 3.1 - Posizione delle campionature effettuate all'interno della Spurga delle Cadene.

Il primo sedimento che si è analizzato riguarda un deposito di breccia presente tra la 2° Sala e la Sala Bianca, è stato catalogato come CADENE1. Questi due vani, infatti, sono interrotti da un enorme accumulo di clasti fortemente cementati che ne costituisce il diaframma di separazione. Si è quindi prelevato un modesto quantitativo di materiale privilegiando la raccolta della matrice della breccia rispetto ai clasti che lo compongono (Fig. 3.2). Una volta portato in laboratorio si è proceduto con lo scioglimento del campione prelevato tramite una soluzione di acido cloridrico con concentrazione pari al 10%. Ciò che è rimasto, a seguito dell'aggressione con l'acido, è stato osservato e fotografato tramite il microscopio ottico nel laboratorio di Mineralogia dell'Università di Bologna.



Figura 3.2 - Prelievo del campione di breccia CADENE1.

All'interno della Spurga delle Cadene è stata prelevata inoltre una porzione di sedimento ubicato in una zona laterale della Seconda Sala, dove era presente materiale stratificato e leggermente cementato (Fig. 3.3). Il materiale è stato dapprima osservato e caratterizzato, per poi essere opportunamente prelevato e catalogato come CADENE2. Anche in questo caso il sedimento è stato disciolto in una soluzione acida e successivamente osservato tramite microscopio ottico nel laboratorio di Mineralogia dell'Università di Bologna.



Figura 3.3 - Prelievo del campione CADENE 2.

Un ulteriore sedimento è stato campionato in grotta. Questo è stato notato per la sua morfologia peculiare e la sua abbondante presenza nella cavità. I sedimenti prelevati si presentano come clasti apparentemente fragili ma in realtà molto competenti, dalla forma rotondeggiante o più precisamente botrioidale (Fig. 3.4), è stato catalogato come CADENE3. Per investigare in modo

più approfondito la genesi e lo sviluppo di questi sedimenti così particolari si è provveduto ad analizzare le polveri tramite spettrofotometria XRF. La spettrofotometria XRF (X-ray fluorescence spectroscopy) è una tecnica di analisi che permette di conoscere la composizione elementare di un campione attraverso lo studio della radiazione di fluorescenza X. Tale radiazione è emessa dagli atomi del campione in seguito a eccitazione che si ottiene tipicamente irraggiando il campione con raggi X ad alta energia. I campioni inizialmente sono stati polverizzati tramite una pressa meccanica manuale (Fig. 3.5). Poi, prima di passare all'analisi, i campioni sono stati sottoposti alla calcinazione per determinare la perdita al fuoco ponendoli in una muffola e scaldandoli a 950°C, così da definire la frazione di contenuto



Figura 3.4 - Sedimenti CADENE3 con la caratteristica forma botrioidale.

volatile all'interno. L'analisi spettrometrica è stata eseguita poi dal Professor Dinelli tramite lo spettrometro XRF WDXRF Axios Panalytical in dotazione presso il dipartimento BiGeA dell'Università di Bologna. La precisione analitica, in base ad analisi precedenti presenti in letteratura ed eseguite su materiali standard certificati, risulta essere, per gli elementi maggiori, migliore del 4 % tranne che per il MgO (8 %) e P₂O₅ (7 %). Per quanto riguarda gli elementi in traccia la precisione è migliore del 14 % per la totalità degli elementi misurati.



Figura 3.5 a dx - Pressa meccanica.

Figura 3.6 a sx - Spettrometro WDXRF Axios Panalytical utilizzato per le analisi.

Un'ulteriore analisi effettuata su CADENE3 è stata l'esecuzione di 3 sezioni sottili, con l'obiettivo di caratterizzare mineralogicamente il campione. In petrografia per sezione sottile si intende una preparazione di laboratorio cui vengono sottoposti campioni di roccia, minerali o suolo al fine di renderli analizzabili con un microscopio petrografico. Per preparare una sezione sottile una scaglia di roccia viene tagliata dal campione tramite una troncatrice petrografica, viene montata su di un vetrino portaoggetti da laboratorio e quindi lavorata con mole diamantate o abrasivi fino a ridurre il suo spessore a 0,03 millimetri. Questa elaborazione è stata eseguita all'interno del laboratorio Sezioni Sottili presente, all'interno dell'edificio di Geologia dell'Università di Bologna. Questo approfondimento risulta fondamentale per poter caratterizzare mineralogicamente il sedimento rinvenuto.

L'ultimo campione su cui è stata eseguita un'analisi specifica è stato prelevato dall'area di ricarica del torrente perenne interno alla grotta. All'interno della Valle Liana infatti, durante un rilievo eseguito per la caratterizzazione del bacino idrogeologico, è stato individuato un affioramento di materiale magmatico (Fig. 3.7). Anche in questo caso si è proceduto con un approfondimento mineralogico del campione così da correlarlo all'evoluzione geologica dei Monti Lessini. Il materiale magmatico è stato catalogato come LIANA1, e si è deciso di eseguire, anche in questo caso, tre sezioni sottili con l'obiettivo di caratterizzare mineralogicamente la roccia. La procedura di esecuzione delle sezioni sottili coincide con quella operata per CADENE3. Dopo aver eseguito le sezioni si sono osservate e fotografate tramite microscopio petrografico all'interno del laboratorio di Petrografia dell'Università di Bologna.



Figura 3.7 - Prelievo del campione magmatico Liana1.

Monitoraggio acustico e idrogeologico

La Spurga delle Cadene è una rarità nel panorama delle grotte italiane, presenta caratteristiche uniche e per investigare il meccanismo idraulico di funzionamento si è reso necessario un monitoraggio in continuo di vari parametri. La caratteristica più peculiare che esibisce la grotta è insita nel nome che gli è stato attribuito in tempi remoti dagli abitanti della zona. Essi hanno denominato così la grotta per la caratteristica di produrre suoni forti e udibili anche a distanza durante i periodi di piena. Per interpretare e dare una spiegazione fisica ai suoni riscontrati e capire il funzionamento della grotta sorgente, si è progettato un monitoraggio acustico e idrogeologico, composto da vari strumenti ubicati all'interno del condotto, per un periodo di 9 mesi, dai primi giorni di settembre 2023 ai primi giorni di Giugno 2024.

I parametri misurati e gli strumenti inseriti all'interno della Spurga delle Cadene durante il monitoraggio idrogeologico e acustico sono i seguenti:

-I livelli dell'altezza dell'acqua del torrente perenne. Sono stati posizionati a questo riguardo due trasduttori di pressione HOBO modello U20L con un limite di sensibilità pari a 9 metri di acqua il primo e 4 metri il secondo (Fig. 3.8). Gli strumenti sono stati settati per misurare un valore ogni 15 minuti, scelta indotta dalla necessità di preservare la memoria del trasduttore e per la sufficiente cadenza dei dati per gli scopi previsti.



Figura 3.8 a sx - Trasduttore di pressione Hobo.



Figura 3.9 a dx - Ubicazione del trasduttore di pressione nel Lago Pensile.

L'accuratezza della misura di altezza del livello dell'acqua risulta essere ± 1 cm. I due trasduttori sono stati in grado anche di misurare in continuo la temperatura dell'acqua. Viene mostrata l'ubicazione del trasduttore di pressione nella prima metà di monitoraggio al di sotto del Lago Pensile (Fig. 3.9). Esso è stato assicurato tramite fascette ad un elemento metallico ancorato saldamente alla roccia.

-Un ulteriore trasduttore di pressione, con limite di sensibilità di 4 metri e avente medesime caratteristiche e settaggio dei precedenti, è stato utilizzato per misurare la pressione atmosferica che si instaura all'interno del condotto carsico. Oltre alla pressione atmosferica lo strumento è stato in grado di misurare la temperatura atmosferica e le sue relative variazioni. Come mostrato nell'immagine il trasduttore è stato inserito per l'intero periodo di monitoraggio all'interno di Sala delle Meraviglie, in una posizione sopraelevata al sicuro dal sopraggiungere dell'ondata di piena (Fig. 3.10). Nel secondo periodo di monitoraggio è stato inserito un'ulteriore trasduttore in Sala Bianca.



Figura 3.10 - Posizionamento dello strumento per la misura della pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie.

-Temperatura e umidità. Sono stati inseriti due strumenti di marca TinyTag modello TGP-4505 (Fig. 3.11), con l'obiettivo di misurare le diverse condizioni ambientali che si instaurano all'interno della grotta nei periodi di magra e le differenze con i periodi di piena. Gli strumenti sono stati settati per acquisire un dato ogni 15 minuti.



Figura 3.11 - Strumento TinyTag.

Lo strumento può misurare, con elevata precisione di $\pm 0,3^\circ$, la temperatura ambientale tra i -25° e $+85^\circ$. L'umidità invece spazia dai 0 ai 100% con una precisione di $\pm 3\%$.

-I rumori che si instaurano all'interno della cavità, prima durante e dopo le piene. A questo proposito si è inserito un registratore bioacustico specializzato per ambienti estremi, ubicato in aree al sicuro dall'arrivo dell'acqua. Il microfono è prodotto dalla Wildlife Acoustics, modello Song Meter SM4 (Fig. 3.12).



Figura 3.12 - Microfono Song Meter SM4.

Il registratore è impermeabile ed ha incorporati due microfoni progettati per effettuare registrazioni di alta qualità. Lo strumento è in grado di registrare enormi quantità di dati fino a 1 terabyte e con livelli molto bassi di consumo di energia, ha infatti rilevato in continuo per mesi senza nessun bisogno di intervento.

L'immensa quantità di suoni registrati è poi stata rielaborata e trasformata in dati usufruibili ed analizzabili, per la presente tesi, grazie alla preziosa collaborazione con il professor Michel André, direttore del Laboratorio di Bioacustica applicata all'Università della Catalogna a Barcellona (LAB). Il professor André e i suoi collaboratori, tramite specifici sistemi informatici, hanno potuto suddividere e trasformare i suoni registrati in dati Excel di intensità per 33 frequenze. Ogni frequenza è stata campionata per un valore ogni 10 secondi, accumulando per l'intero periodo di monitoraggio un'enorme mole di dati. Per l'obiettivo di questo progetto si è scelto di studiare ed approfondire in particolare 3 frequenze tra le più basse registrate dal microfono, ovvero <10 Hz, 15,8 Hz e 31,6 Hz.

-Conducibilità, altro parametro utile per investigare il reticolo idrogeologico che alimenta la grotta. Si è inserito, a questo proposito, un datalogger per misure di conducibilità a contatto con il torrente interno. Lo strumento, di marca STS e modello DL/N 70 (Fig. 3.13), ha misurato anche il livello di altezza della colonna d'acqua, con limite fino a 5 metri, e la temperatura dell'acqua.



Figura 3.13 - Conduttivimetro DL/N 70.

La temperatura presenta un campo di misura tra -5° e 50° con un'incertezza di $\pm 0,25^{\circ}$, la misura di conducibilità invece può spaziare tra $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ e $20 \text{mS}/\text{cm}$ con un'incertezza pari a $\pm 2\%$ del valore misurato. Anche questo strumento è stato settato per misurare un valore ogni 15 minuti.

Il monitoraggio idrogeologico e acustico è stato suddiviso in due parti, la prima parte ha coperto un periodo che spazia da settembre 2023 a gennaio 2024, la seconda invece da gennaio 2024 a giugno 2024. Questa suddivisione è stata effettuata per due motivi principali, il primo di natura pratica in quanto alcuni strumenti avevano necessità di scaricare i dati per liberare la memoria interna e cambiare eventuali batterie. La seconda motivazione consisteva invece nell'investigare nuove zone della grotta, quindi si è cambiata l'ubicazione di alcuni strumenti così da poter raccogliere un maggior numero di dati e di informazioni, potendo, in questo modo, interpretare meglio i processi che avvengono in questa grotta.

4. ANALISI CAMPIONATURE

Presentazione dati e risultati delle analisi delle campionature

CADENE 1

Il campione prelevato dalla breccia, che funge da separatore tra la 2° Sala e Sala delle Meraviglie, ha riservato risultati interessanti. Dopo aver sciolto con soluzione acida le componenti carbonatiche presenti all'interno del materiale si è osservato la rimanente parte. Vengono presentate di seguito le immagini fotografate al microscopio ottico.

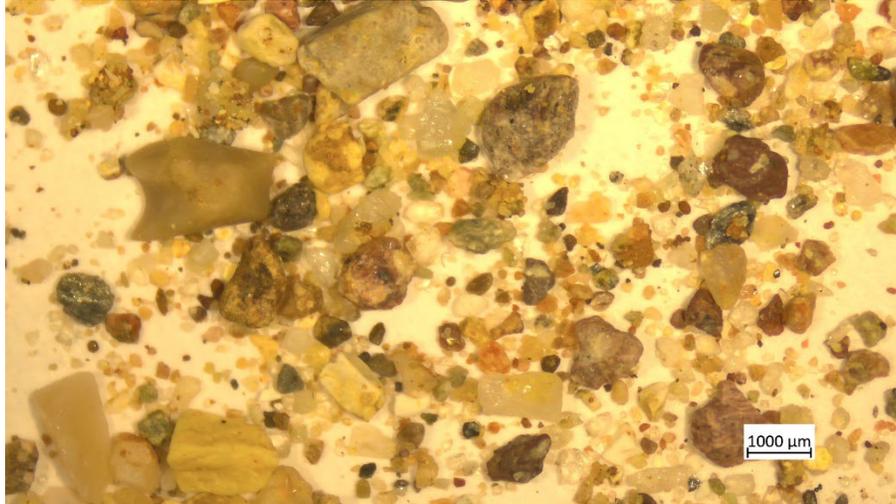


Figura 4.1 - Presentazione generale del campione CADENE1.

A piccola scala il sedimento si presenta come eterogranulare e eterolitologico, i granuli presentano diversi gradi di arrotondamento, da molto evidente ad assente. Le dimensioni spaziano da 2 mm a qualche µm (Fig. 4.1).

Aumentando l'ingrandimento al microscopio invece si riescono a riconoscere specifiche litologie.

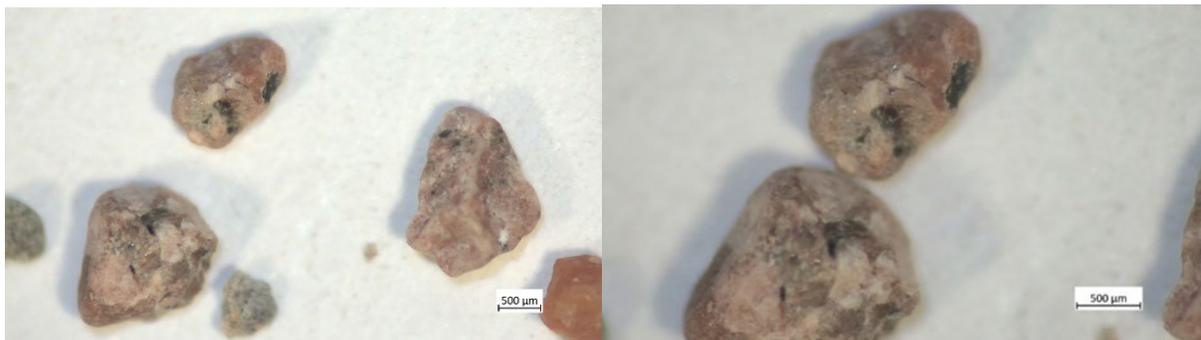


Figura 4.2 a sx - Granuli cristallini appartenenti al campione CADENE1.

Figura 4.2 a dx - Granuli cristallini a più alto ingrandimento appartenenti al campione CADENE1.

Nelle immagini presentate (Fig. 4.2) si osservano granuli di 2 mm di grandezza con un grado di arrotondamento medio. I granuli si presentano di colore roseo e con struttura porfirica. Evidente è la presenza di fenocristalli di grana medi (0,5 mm) immersi in una pasta di fondo vetrosa. La

componente cristallina osservabile dal microscopio ottico è data da quarzo, K-feldspato, plagioclasio e biotite. Si tratta quindi di materiale magmatico felsico, è probabile che il riconoscimento dei granuli coincida con il porfido riolitico.

Altri granuli presenti all'interno del campione CADENE1 presentano litotipi differenti.

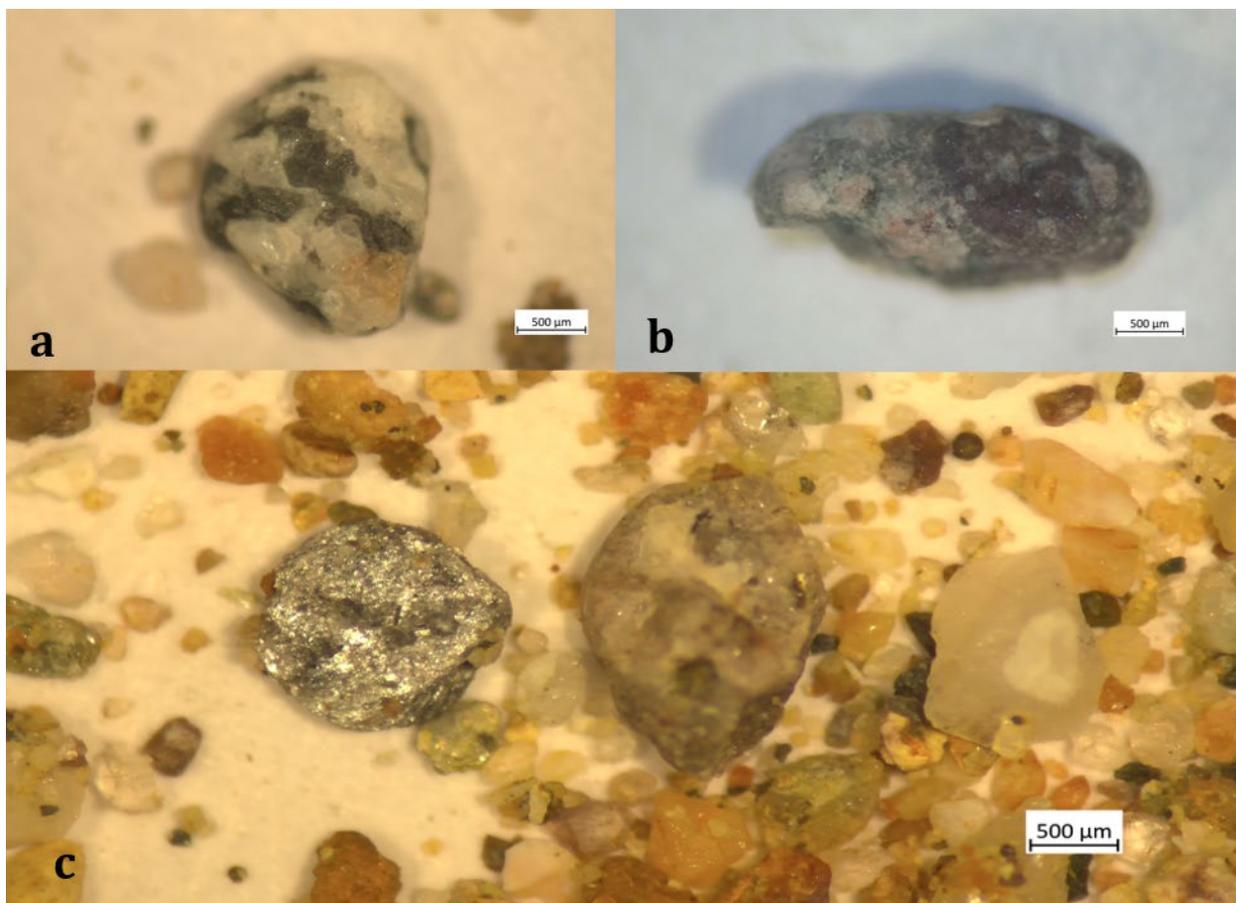


Figura 4.3 - Granuli presenti all'interno del campione CADENE1.

Nelle immagini sono mostrati alcuni dei litotipi rinvenuti all'interno del sedimento approfondito. In Figura 4.3a è mostrato un granulo di 2 mm di larghezza, decisamente arrotondato con struttura olocrystallina formata da cristalli di plagioclasio, quarzo e un probabile anfibolo. Si tratta di una roccia magmatica intrusiva.

In Figura 4.3b è presente un granulo con dimensione, nella direzione di allungamento, pari a 3 mm. Per ciò che è stato possibile riconoscere si tratta di una scaglia di una roccia olocrystallina formata da cristalli di K-feldspato, plagioclasio e quarzo, mentre sulla destra è presente un evidente cristallo di granato parzialmente alterato. Si tratta di una roccia che ha probabilmente subito una fase di metamorfismo in facies anfibolitica, quindi è stata sottoposta a temperature intorno ai 500°C in un periodo posteriore rispetto alla sua iniziale genesi.

In Figura 4.3c vengono mostrati diversi granuli, tra cui spicca quello più a sinistra che presenta una tessitura estremamente foliata di facile riconoscimento. Si tratta infatti di un granulo di micascisto con grana media e tessitura scistosa irregolare. I minerali presenti sono miche (muscovite, biotite,

paragonite) e quarzo. La scistosità, tipica degli scisti, è un tipo di foliazione caratterizzata dall'orientazione preferenziale di minerali ad abito micaceo e/o allungato. La scistosità si sviluppa a seguito di pressioni unidirezionali (ad esempio durante il seppellimento) che provocano una disposizione dei minerali micacei e prismatici, perpendicolarmente alla direzione della pressione. La roccia è quindi di origine metamorfica, derivante in particolare dal metamorfismo regionale di protoliti pelitici (argille), con temperature comprese fra i 500° e i 700°. Osservando gli altri granuli presenti in Figura 4.3c, si notano alcuni frammenti di quarzo e alcune piccole particelle di materiale metamorfico verdastro probabilmente cloritoscisti oltre che abbondanti granuli di porfido riolitico.

CADENE2

Il sedimento raccolto a lato della 2° Sala è stato processato tramite aggressione acida, quel che è rimasto rappresenta tutto ciò che non reagisce con sostanze acide, è quindi fortemente limitata la presenza di rocce esclusivamente carbonatiche. Vengono presentate di seguito le foto scattate al microscopio ottico:



Figura 4.4 - Presentazione generale del campione CADENE2.

Quella presentata in Figura 4.4 è una panoramica generale di come si presenta il sedimento. È largamente presente il litotipo appartenente alla Formazione della Maiolica, quindi marne con abbondante presenza di selce. Vengono presentate di seguito altre immagini del sedimento in questione.



Figura 4.5 - Granuli eterolitologici all'interno del campione CADENE2.

In Figura 4.5 si nota la presenza, in centro all'immagine, di materiale simile a ciò che è stato osservato in precedenza (Fig. 4.3c). Si tratta anche in questo caso infatti di materiale metamorfico ascrivibile a metamorfismo regionale di medio grado, si tratta di frammenti di micascisto. Gli altri granuli sono invece in maggioranza marne e selce.

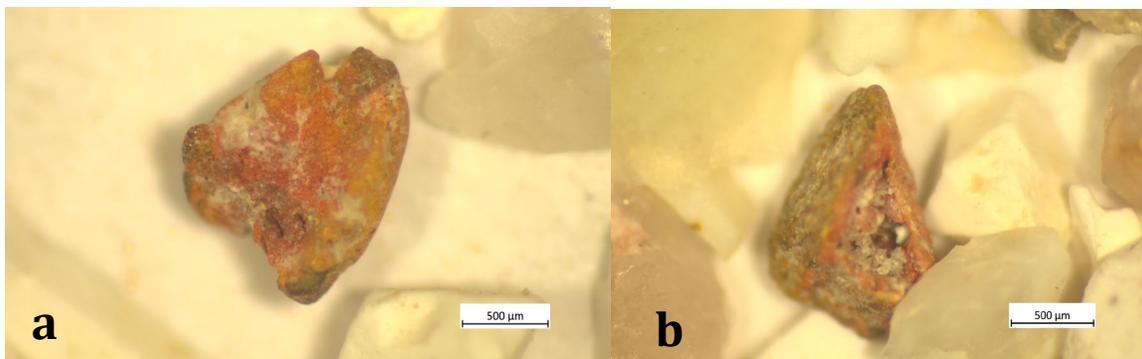


Figura 4.6 - Granuli alterati appartenenti al campione CADENE2.

Le ultime due immagini riguardanti il sedimento CADENE2 (Fig. 4.6 a,b) mostrano due facce del medesimo granulo, esso presenta una forte alterazione visibile sia lungo i lati, dove la precedente colorazione mostra un evidente stato di deterioramento, sia all'interno dove l'acqua ha scavato un pertugio ed eroso profondamente il frammento. Anche se di difficile identificazione, è probabile che il granulo appartenesse in origine ad un litotipo magmatico.

CADENE3

Il terzo campione analizzato riguarda un sedimento particolare presente abbondantemente in certe zone della cavità carsica. Si tratta di sedimenti con forme tondeggianti e con un'elevata cementazione che conferisce loro una impressionante resistenza agli urti. Questa caratteristica conferisce ai sedimenti la possibilità di formare morfologie a prima vista fragili, ma in realtà estremamente resistenti alle forze esterne. I sedimenti botrioidali all'interno della Spurga delle Cadene possono essere rinvenuti saldati alle pareti oppure come clasti sul fondo della grotta.

Sono state eseguite analisi spettrofotometriche su due campioni di CADENE3 per investigare possibili provenienze del sedimento e il relativo processo di formazione, vengono mostrati i risultati nelle due tabelle seguenti.

Campione	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	LOI (%)
CADENE3a	19,33	0,19	4,62	1,64	0,03	0,86	34,94	0,26	1,35	0,14	36,63
CADENE3b	17,31	0,20	4,64	1,95	0,04	0,76	37,02	0,18	1,27	0,20	36,44

Tabella 1 - Risultati XRF sui campioni CADENE3a e CADENE3b riguardo gli elementi maggiori.

Con LOI si intende la perdita al fuoco, ovvero il contenuto di umidità posseduto dal campione, in entrambi i sedimenti analizzati l'umidità corrisponde al 36%. I valori percentuali dei due campioni

sono coerenti fra loro e non presentano grosse variazioni. Il calcio è l'elemento più abbondante, seguito da silicio e alluminio.

Campione	Ba (ppm)	Cl (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Rb (ppm)	S (ppm)	Sc (ppm)	Sr (ppm)	Th (ppm)	V (ppm)
CADENE3a	140	150	43	28	60	40	18	67	24	26
CADENE3b	148	160	39	30	63	50	13	60	22	27

Tabella 2 - Risultati XRF sui campioni CADENE3a e CADENE3b riguardo gli elementi in traccia.

Per quanto riguarda gli elementi in traccia invece gli elementi più presenti in entrambi i campioni sono il cloro, il bario, lo stronzio e il rubidio.

Le sezioni sottili eseguite per CADENE3 vengono presentate di seguito.

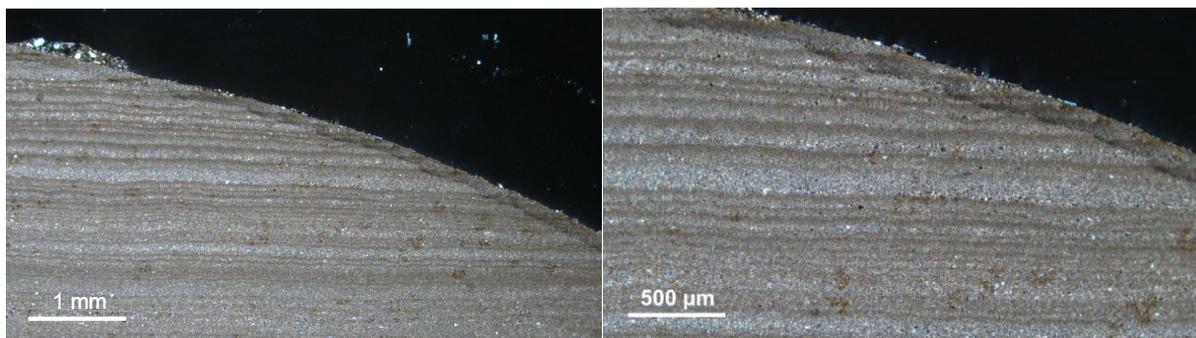


Figura 4.7 a sx - Immagine al microscopio del sedimento CADENE3.

Figura 4.8 a dx - Immagine al microscopio a più alto ingrandimento del campione CADENE3.

Si può osservare come internamente il sedimento botroidale presenti una fitta laminazione piano parallela con spessori variabili tra le poche decine di micron alle centinaia (Fig. 4.8). I granuli sono visibili al microscopio, con il massimo ingrandimento, solo in certe porzioni, ma si nota come le granulometrie varino all'interno delle lamine. La parte basale è più chiara, la granulometria si presenta superiore agli 0,002 mm e viene perciò identificata come limo, al suo interno si riescono a scorgere e identificare alcuni granuli, come quarzo e calcite. La parte sommitale della laminazione, con un colore più scuro, presenta invece una granulometria più fine al di sotto degli 0,002 mm, si tratta quindi di argilla. Si può osservare come, attorno al sedimento, sia presente uno strato più scuro di alterazione, molto resistente, che funge da guscio protettivo del botrioide. Un'ulteriore osservazione è che gli strati vengono troncati nettamente lungo il bordo del clasto.

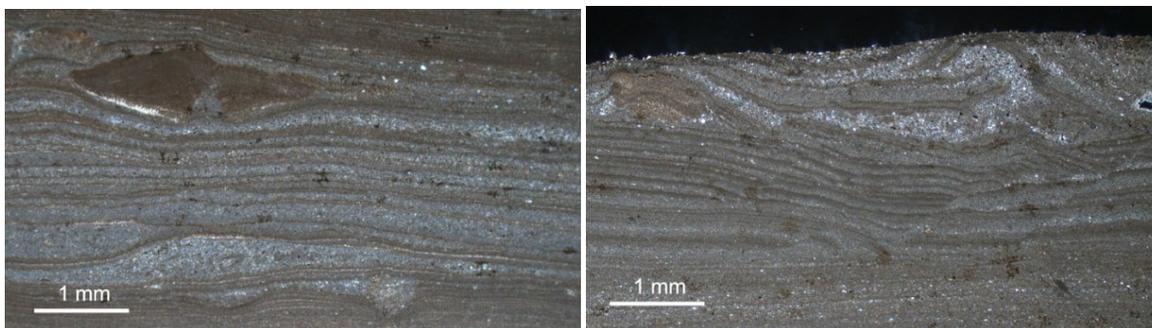


Figura 4.9 a sx - Immagine al microscopio del sedimento CADENE3, presenza di granuli alloctoni.

Figura 4.10 a dx - Immagine al microscopio del sedimento CADENE3, presenza di erosione fra lamine e liquefazione.

Nella sezione, in alcune zone particolari, si possono notare strutture sedimentarie di erosione e troncamento delle lamine e risedimentazione, quindi trasgressione fra i livelli (Fig. 4.10). Sono presenti anche frammenti alloctoni inglobati all'interno del flusso durante la sedimentazione (Fig. 4.9). In questi casi si osserva come le lamine superiori tendano a scavalcare ed evitare l'ostacolo mentre le lamine inferiori si flettono per il peso caricatogli. Alcuni dei frammenti identificati come alloctoni presentano un colore completamente diverso dal sedimento incassante, seppur con simile granulometria, evidenza di diverse condizioni di genesi interne alla grotta. Sparsi nella matrice argillosa, lungo le lamine, si notano anche alcuni minerali di varia dimensione, da appena scrutabili a relativamente di grandi dimensioni, alcuni di essi sono stati riconosciuti come quarzo e plagioclasio. In Figura 4.10 si nota anche un accenno di liquefazione del limo che tende a muoversi verso la superficie tagliando di netto le lamine superiori.

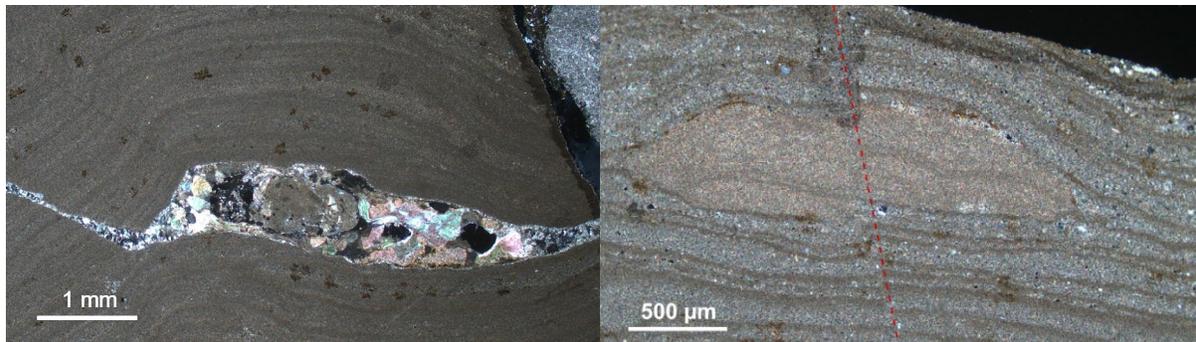


Figura 4.11 a sx - Immagine al microscopio del sedimento CADENE3, presenza di fratture riempite da mineralizzazioni secondarie.

Figura 4.12 a dx - Immagine al microscopio del sedimento CADENE3, presenza di deformazione plastica con rigetto.

Si osserva la presenza di ossidi all'interno del botrioide, sia di manganese sia di ferro, oltre che quarzo e tracce di plagioclasio e biotite. Il sedimento è completamente e finemente cementato da carbonato di calcio lungo le lamine. Nelle immagini è interessante notare la presenza di fratture colmate da carbonato di calcio macrocristallino (Fig. 4.11) e deformazioni plastiche arricchite dalla presenza di rigetto (Fig. 4.12), seppur nell'ordine di poche decine di μm .

LIANA1

In Valle Liana, durante il rilevamento geologico dell'area di ricarica della grotta, è stata rinvenuta una zona ricca di affioramenti di materiale magmatico. La posizione del ritrovamento è nella bassa Valle Liana, coincidente con la parte finale del canyon che dagli Alti Lessini giunge fino sull'altopiano di Fosse. Vista la quasi totale assenza di dati riguardo la presenza dell'affioramento all'interno delle carte regionali e nazionali, si è proceduto ad un approfondimento di tipo mineralogico con il fine di correlarlo con altri affioramenti nella zona lessinica, potendo stabilire così una probabile età al materiale e provare a collocarlo in una più ampia visione geomorfologica dell'area d'interesse. Si sono perciò prelevati due campioni a mano, il primo chiamato LIANA1a, si presenta parzialmente alterato esternamente, a frattura fresca invece si nota



Figura 4.13 - Affioramento magmatico in Valle Liana.

la tessitura porfirica con fenocristalli millimetrici immersi in una pasta di fondo scura tendente al nero (Fig. 4.13). Ad occhio nudo si riescono a riconoscere alcune vescicole. Il secondo campione, chiamato LIANA1b, si presenta invece decisamente più alterato, pervasivamente fratturato e permeato da presenza di carbonato di calcio. In un particolare campione si è potuto notare addirittura l'incorporamento di un frammento della roccia carbonatica incassante all'interno del materiale magmatico. Il campione è ricco di vescicole e vuoti in cui si sono depositati in un secondo momento minerali secondari. I due campioni, anche se recuperati ad una distanza minore di 50 metri l'uno dall'altro, presentano ad occhio nudo importanti e nette differenze.

Vengono riportate di seguito alcune immagini riguardanti il campione LIANA1a fotografate tramite microscopio ottico polarizzatore a luce trasmessa (Fig 4.14 - 4.15).

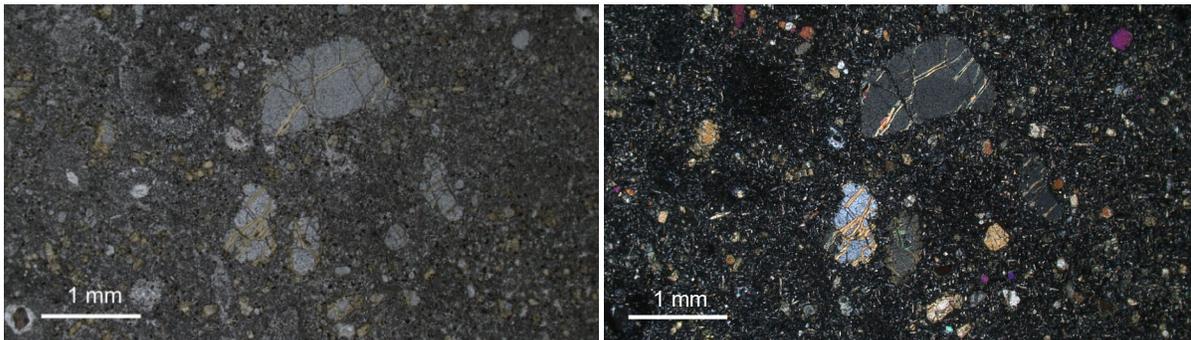


Figura 4.14 a sx - Immagine al microscopio polarizzatori paralleli del campione magmatico LIANA1a.

Figura 4.15 a dx - Immagine al microscopio con nicol incrociati del campione magmatico LIANA1a.

Le immagini coprono la medesima porzione della sezione sottile con ingrandimento 2X. A questa scala si possono notare minerali con dimensione pari ad 1 mm, visibili anche ad occhio nudo, di olivina parzialmente alterata. Altri minerali visibili al microscopio sono clinopirosseni, immersi in una pasta di fondo con grana molto fine formata da olivina, plagioclasti e pirosseni. La struttura del campione è olocristallina, composta interamente da cristalli, la tessitura è porfirica seriata, quindi la roccia presenta cristalli di dimensione variabile immersi all'interno di una pasta di fondo

criptocristallina e vacuolare dove i cristalli, detti microliti, sono riconoscibili solo al microscopio ottico.

Le seguenti figure mostrano con più dettaglio una zona della sezione sottile LIANA1a (Fig. 4.16 - 4.17).

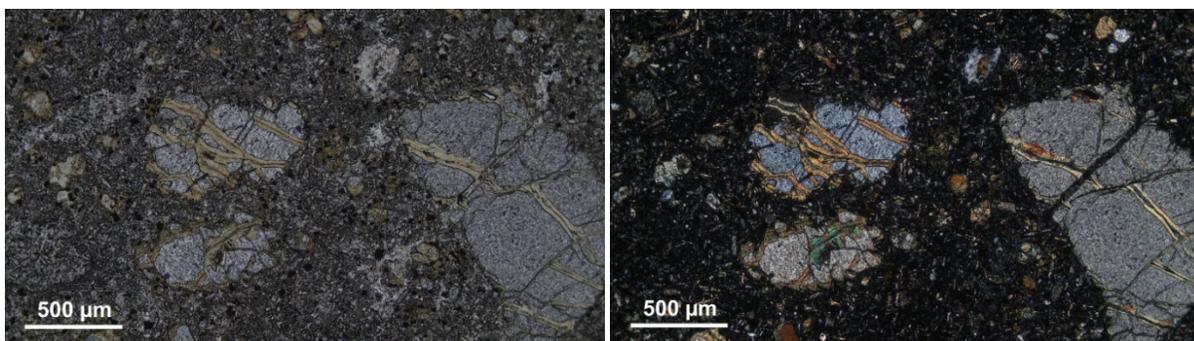


Figura 4.16 a sx - Immagine al microscopio con nicol paralleli del campione magmatico LIANA1a.

Figura 4.17 a dx - Immagine al microscopio con nicol incrociati del campione magmatico LIANA1a.

Con un ingrandimento 4X si possono osservare con più dettaglio i minerali e le strutture presenti all'interno del campione. Si nota come alcune zone, a polarizzatori incrociati, si estinguono; è probabile ci siano alcune intrusioni vetrose all'interno della pasta di fondo. L'olivina mostra una forma pseudo esagonale con colori di birifrangenza stranamente bassi (sezione sottile di spessore non preciso), risulta alterata lungo le superfici di frattura presenti all'interno del cristallo.

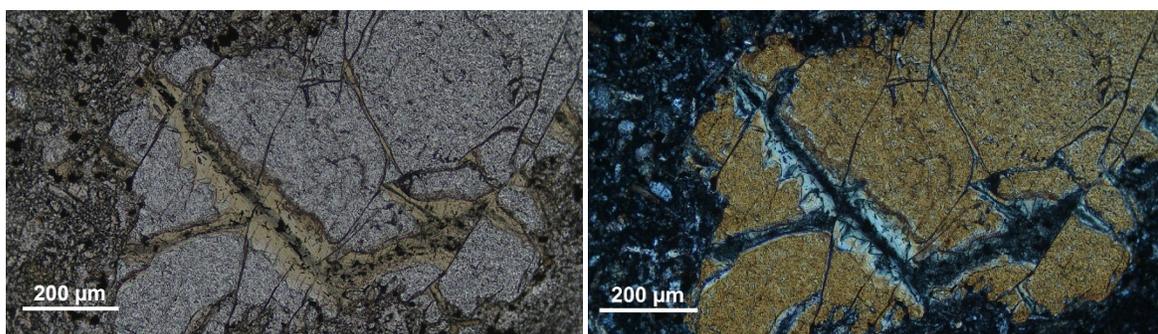


Figura 4.18 a sx - Immagine al microscopio al massimo ingrandimento con nicol paralleli del campione magmatico LIANA1a.

Figura 4.19 a dx - Immagine al microscopio al massimo ingrandimento con nicol incrociati del campione magmatico LIANA1a.

Aumentando l'ingrandimento su un cristallo di olivina è possibile notare come essa sia alterata lungo le fratture esistenti (Fig 4.18 - 4.19). In condizioni superficiali l'olivina, infatti, è comunemente soggetta ad una veloce alterazione; il principale prodotto di alterazione visibile in sezione sottile è la bowlingite che in realtà è un aggregato a grana molto fine di smectite, clorite, serpentino e talco. L'alterazione bowlingitica, in termini di chimismo, comporta l'aggiunta di Fe e H₂O e la sottrazione di Mg all'olivina.

Per quanto riguarda invece LIANA2 vengono presentate le immagini catturate al microscopio (Fig. 4.20 - 4.21).

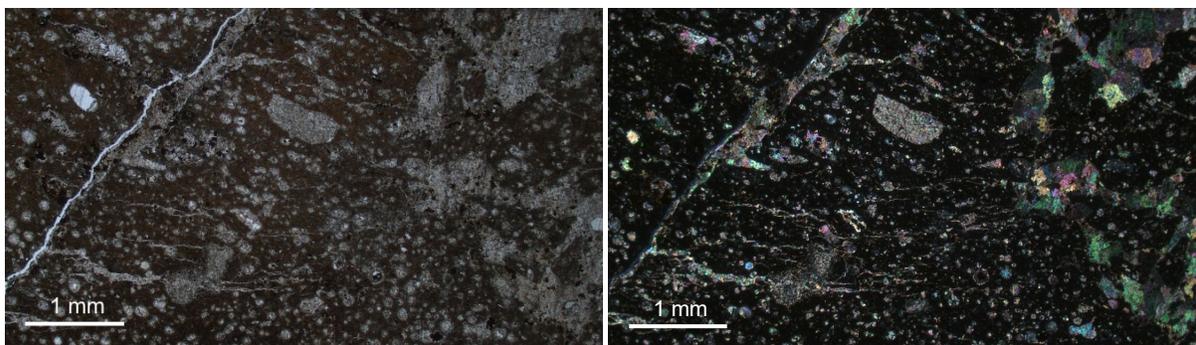


Figura 4.20 a sx - Immagine al microscopio con nicol paralleli del campione magmatico LIANA1b.

Figura 4.21 a dx - Immagine al microscopio con nicol incrociati del campione magmatico LIANA1b.

Questo secondo campione presenta caratteristiche molto diverse rispetto al precedente anche da un punto di osservazione microscopica. Dall'immagine (Fig. 4.20) si osserva come la roccia sia ialina, presentando vetro vulcanico come pasta di fondo, si è in grado di notare come esso si presenti rossastro e quindi sia leggermente ossidato. La tessitura del campione è amigdaloide, le amigdale si formano quando le bolle di gas o vescicole, presenti nel magma raffreddato, sono riempite con minerali secondari che possono variare a seconda del chimismo delle acque sotterranee in contatto con il magma. Le amigdale si formano dopo che la roccia è stata messa in posto e sono spesso associate con alterazione di bassa temperatura. Si possono notare set di fratture ben marcate, nella maggior parte dei casi regolari e quasi planari. Le fratture sono riempite da calcite con cristalli ben sviluppati (Fig. 4.21).

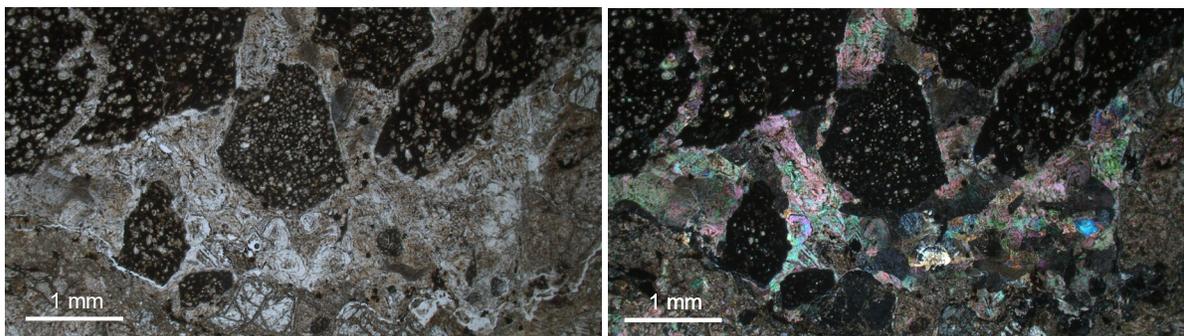


Figura 4.22 a sx - Immagine al microscopio con nicol paralleli del campione magmatico LIANA1b.

Figura 4.23 a dx - Immagine al microscopio con nicol incrociati del campione magmatico LIANA1b.

Nelle Figure 4.22 e 4.23 sono presentate altre immagini estrapolate dalla sezione sottile del campione LIANA1b, si riesce ad osservare la presenza di vescicole riempite da mineralizzazioni secondarie. È evidente una grande frattura centrale, di larghezza pari a qualche millimetro, che ingloba alcune porzioni di basalto che presentano, lungo i relativi margini, le caratteristiche classiche della fratturazione; questi frammenti sono stati rotti e assimilati all'interno della vena. All'interno della frattura si possono osservare anche delle particolari morfologie concentriche o angolari, esse potrebbero essere confuse con materiale biocostruito, si tratta in realtà di accrescimento progressivo di cristalli di calcite (Fig. 4.23).

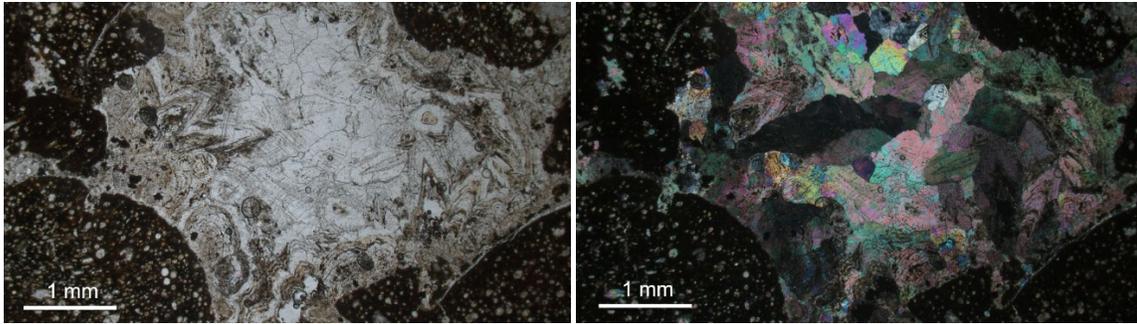


Figura 4.24 a sx - Immagine al microscopio con nicol paralleli del riempimento di una frattura all'interno del campione LIANA1b.

Figura 4.25 a dx - Immagine al microscopio con nicol incrociati del riempimento di una frattura all'interno del campione LIANA1b.

Le due immagini (Fig. 4.24 - 4.25) sono state inserite per sottolineare l'accrescimento progressivo dei minerali di calcite all'interno della frattura. Dai polarizzatori incrociati si nota come i cristalli siano separati, mostrano infatti diversi colori di interferenza. Alcuni livelli di accrescimento risultano più scuri, coincidono molto probabilmente a livelli di calcite ferrifera successivamente ossidati.

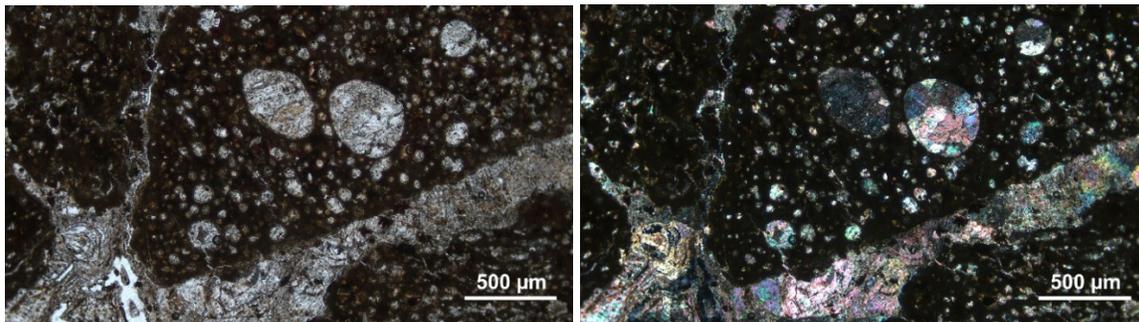


Figura 4.26 a sx - Immagine al microscopio con nicol paralleli la mineralizzazione all'interno dei vacuoli del campione LIANA1b.

Figura 4.27 a dx - Immagine al microscopio con nicol incrociati della mineralizzazione all'interno dei vacuoli del campione LIANA1b.

Le immagini 4.26 e 4.27 mostrano come le vescicole, prodotte dalla presenza di gas all'interno del materiale magmatico, siano state riempite da minerali secondari. I minerali si presentano con forme subeudrali, incolori a polarizzatori paralleli, rilievo variabile a seconda dell'orientazione del cristallo e soprattutto birifrangenza altissima con colori di interferenza che raggiungono il 4° ordine (Fig. 4.27). Il minerale che riempie le vescicole è stato identificato come calcite, la sua presenza forma quindi le amigdale, la mineralizzazione secondaria è coerente con la litologia incassante. Non risulta essere presente nessun minerale argilloso.

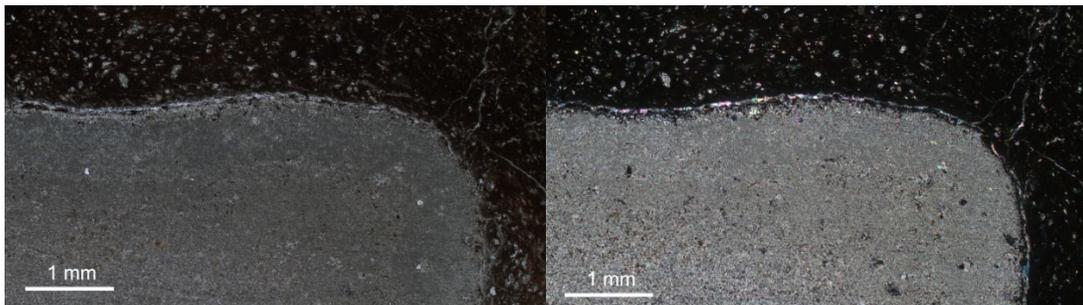


Figura 4.28 a sx - Immagine al microscopio con nicol paralleli di un clasto carbonatico all'interno del campione LIANA1b.

Figura 4.29 a dx - Immagine al microscopio con nicol incrociati di un clasto carbonatico all'interno del campione LIANA1b.

Un altro interessante dettaglio che si può ricavare dalla sezione sottile è mostrato in Figura 4.28. Si nota un grande clasto con bordi smussati formato da calcite criptocristallina di dimensione estremamente piccola da non riuscire a distinguere i cristalli, inoltre risulta essere finemente stratificato. Questo frammento fa parte della roccia incassante ed è stato inglobato all'interno del corpo magmatico durante la sua messa in posto. Il campione è stato tagliato in laboratorio appositamente in modo da avere la possibilità di osservare, utilizzando il microscopio, il relativo rapporto con la roccia magmatica. Si nota un'alterazione superficiale del clasto e un arrotondamento inconsueto per un frammento di roccia fratturato ad alta pressione. Inoltre il clasto sembra abbia subito un leggero metamorfismo di contatto che l'ha reso più simile ad un marmo rispetto ad un carbonato tipico lessinico, ora si presenta come un calcare cristallino (Fig. 4.29). Viene ingrandita la zona di passaggio fra le due litologie (Fig. 4.30 - 4.31).

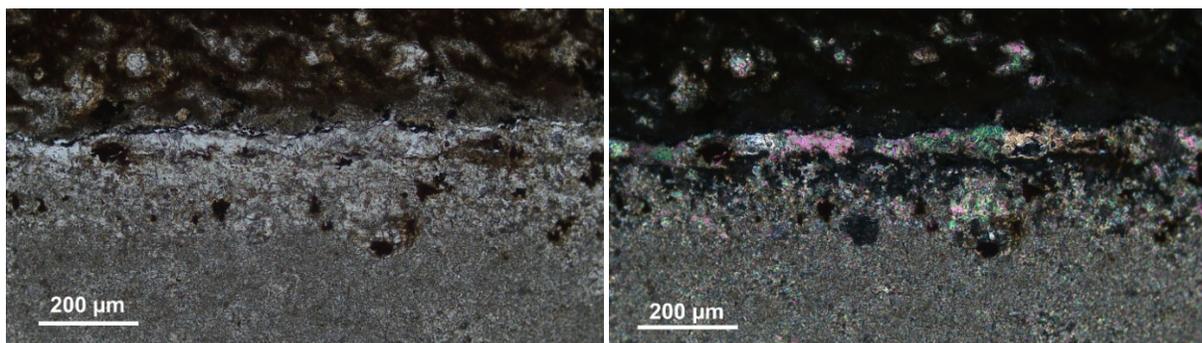


Figura 4.30 a sx - Ingrandimento con nicol paralleli di un'estremità del clasto carbonatico osservato all'interno del campione LIANA1b.

Figura 4.31 a dx - Ingrandimento con nicol incrociati di un'estremità del clasto carbonatico osservato all'interno del campione LIANA1b.

La zona transitoria fra il frammento carbonatico e il prodotto magmatico mostra una bordatura di ricristallizzazione lungo tutto il clasto. Lungo il bordo del frammento sedimentario si nota infatti una fascia larga 50 micrometri, in cui i cristalli di calcite presentano una tessitura faneritica a grana fine (Fig. 4.31). Osservando a partire dalla bordatura verso l'interno del frammento carbonatico si può constatare come la dimensione dei cristalli tenda a diminuire progressivamente, fino a raggiungere una tessitura criptocristallina. Questo pattern può essere interpretato come una ricristallizzazione dei minerali dovuta ad un'alta temperatura avvenuta nel momento del contatto tra la roccia e il materiale magmatico.

Discussione e interpretazione paleoambientale

I dati ricavati dalle analisi svolte sui campioni prelevati sul campo hanno restituito diversi spunti su cui ragionare in chiave speleogenetica ed evolutivistica della Spurga delle Cadene.

Il sedimento CADENE1 è stato campionato all'interno di un ammasso conglomeratico di grandi dimensioni che occupa una buona parte della zona di ingresso. Il sedimento, come è stato presentato in precedenza, mostra particelle metamorfiche e magmatiche ipoabissali come i porfidi riolitici. Queste litologie non sono presenti in Lessinia, è evidente infatti come queste siano di origine glaciale, quindi trasportate dagli enormi ghiacciai che negli ultimi due milioni di anni hanno solcato la Valle dell'Adige ripetutamente. Lungo il versante su cui insiste la grotta sono presenti grossi blocchi di materiale glaciale atesino, così come nel sedimento. Per interpretare al meglio questa informazione risulta fondamentale approfondire meglio il ruolo della breccia da cui è stato campionato CADENE1. La breccia presente nella Spurga delle Cadene si presenta come un ammasso caotico di clasti spigolosi ed eterogranulari, con dimensioni da pochi centimetri a qualche decimetro. La roccia è fortemente cementata e la litologia dei clasti, di cui è possibile riconoscere l'appartenenza, sembra essere coerente con la formazione dei Calcari Grigi in cui la grotta si imposta. Il conglomerato sovrasta la prima e la seconda Sala e si comporta da separatore con la soprastante Sala Bianca. La sua presenza è quindi monopolizzante, senza di esso la zona d'ingresso alla grotta avrebbe una morfologia completamente diversa.

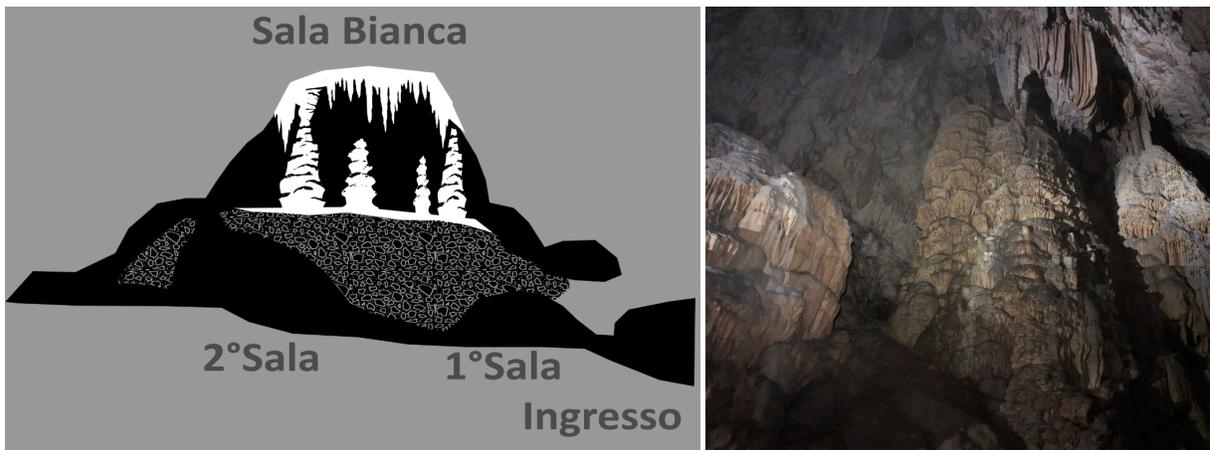


Figura 4.32 a sx - Ricostruzione schematica della struttura che caratterizza la zona d'ingresso della grotta. Viene messa in evidenza l'estesa presenza del conglomerato che controlla la morfologia della prima parte di cavità.

Figura 4.33 a dx - Fotografia degli enormi speleotemi ubicati in Sala Bianca..

Come si può notare dall'immagine in Figura 4.32, in assenza della breccia Sala Bianca, la Seconda Sala e la Prima Sala risulterebbero un solo grande vano formato al nucleo della sinclinale. Sala Bianca si presenta molto concrezionata ed ospita una coppia di notevoli edifici stalagmitici (Fig. 4.33). L'intensa litogenesi è favorita dalla notevole permeabilità dei giunti subverticalizzati e decompressi della sinclinale. I massicci speleotemi presenti nella Sala si poggiano quindi sopra la breccia che, perciò, è presente in quella posizione sicuramente da diverse decine, se non centinaia di migliaia di anni.

Un'altra caratteristica da sottolineare è che il canale superiore attualmente è scavato al limite basale del conglomerato, al contatto con la roccia in posto. Le evidenze indicano che il canale era

già presente prima della deposizione della breccia che poi però, una volta messo in posto, ha occluso il passaggio. L'acqua così si è dovuta fare strada all'interno del deposito tramite la forza erosiva delle piene che, nel tempo, hanno scavato la breccia e costruito così una via di fuga verso l'esterno. Ciò che risulta chiaro a questo punto è come la breccia fosse già cementata quando le ondate di piena lo hanno eroso nella porzione basale. Le possibili interpretazioni delle osservazioni fin qui fatte sono varie. È possibile che il materiale del conglomerato derivi dallo smantellamento della roccia presente al nucleo della piega, e quindi durante la sua evoluzione si sia formato un enorme deposito di clasti ai piedi della sinclinale. Nel caso in cui quest'ipotesi fosse vera però ci si sarebbe aspettato, come costituente della breccia, materiale con granulometria più grossolana, e quindi blocchi metrici immersi in un materiale di granulometria più fine, questo però non è nelle evidenze rilevate. Si nota infatti materiale decisamente più fine, con massima dimensione visibile pari a 30 centimetri circa. È possibile tuttavia che il canale fosse già stato scavato e un crollo, dovuto al movimento delle faglie che limitano la sinclinale, abbia creato l'accumulo di deposito. È altresì possibile che il materiale proveniente dalla piega sia stato trasportato altrove mentre si stava formando il canale in tempi remoti mentre il materiale presente oggi in grotta sia deposito di versante e glaciale portato dal ghiacciaio e cementato all'interno della grotta. Questa ipotesi è corroborata dalla posizione dell'ingresso della grotta, aperta su un versante della Val d'Adige dove, come già presentato nella apposita sezione, il ghiacciaio è transitato lungamente e in diverse riprese. La posizione della grotta, con una zona di ingresso ampia, potrebbe essersi comportata come una scatola, ed aver ospitato così materiale glaciale che ha avuto tempo di cementarsi. Questo spiegherebbe il materiale di ridotte dimensioni e anche la presenza di materiale glaciale all'interno della matrice della breccia. Per capire meglio la storia e l'evoluzione di questa zona sono necessarie però indagini più approfondite riguardanti la litologia della breccia e l'esecuzione di datazioni sugli speleotemi in Sala Bianca, così da poter collocare gli avvenimenti lungo la linea del tempo e dare una spiegazione più precisa di ciò che è stato registrato in questa particolare area della grotta.

Il sedimento CADENE 2 mostra sedimenti trasportati dal torrente sotterraneo durante le piene e stratificati a lato della 2° Sala. Durante il prelievo si è notato come i campioni si presentassero di granulometria principalmente grossolana, con embricatura da trasporto e una parziale cementazione. La presenza di abbondante selce e materiale marnoso sottolineano la provenienza del materiale dall'area di ricarica del torrente interno dove affiora la Formazione della Maiolica. Nel sedimento sono presenti anche clasti glaciali che derivano dall'erosione di morene lungo il versante della Vallagarina e che sono in contatto con la grotta. Il granulo magmatico altamente eroso (Fig. 4.6) è sintomo di una lunga permanenza in condizioni fortemente alteranti come esposizione agli agenti atmosferici o in condizioni subacquee. Il frammento si presenta infatti in condizioni completamente diverse rispetto a quelle osservate per i frammenti presenti all'interno del cemento della breccia. Si può constatare come il sedimento analizzato sia relativamente recente e che sia stato trasportato dal torrente durante gli episodi di grande vigore, tale da trasportare granuli ghiaiosi, anche di qualche centimetro, in contropendenza all'interno del flusso. La stratificazione osservata rappresenta diversi episodi di piena che hanno nel tempo trasportato e embricato i granuli. La posizione laterale e leggermente sopraelevata del punto di campionamento sottolinea come solo episodi di piena molto intensi possono aver depositato il sedimento analizzato.

CADENE3 invece è un sedimento argilloso molto compatto che ha attirato l'attenzione per la sua peculiare morfologia. Esso è stato rinvenuto in diverse zone della grotta, ubicato spesso a ridosso delle pareti. Internamente è fittamente laminato, ogni lamina internamente è divisa da due colori differenti. Il colore inferiore più chiaro presenta una granulometria maggiore, in cui in qualche caso si riescono a riconoscere i minerali costituenti. Il colore superiore più scuro presenta invece uno spessore e una granulometria inferiore. Queste due caratteristiche restituiscono un'idea di come ogni lamina coincida con una variazione registrata all'interno della grotta.

Il sedimento in questione è un particolare tipo di ritmite, verrà identificata in questo capitolo come varva glaciale che viene considerata come la registrazione di eventi alla più piccola scala riconosciuta in stratigrafia. Ciò che verrà presentato in seguito è un'interpretazione del materiale analizzato, in letteratura sono presenti diversi accenni al tema, il più preciso e da cui è stato tratto spunto nella discussione è Ballesteros et al. (2018).

Le analisi svolte, con l'obiettivo di interpretare la formazione di questo sedimento, portano alla conclusione che si sia depositato in condizioni di elevata stagionalità climatica annuale, registrata attraverso la sua fitta laminazione. La combinazione delle informazioni sedimentologiche, mineralogiche, geomorfologiche e paleoclimatiche accumulate nel periodo di ricerca all'interno della grotta indicano, come unica spiegazione ragionevole alla genesi della ritmite, la deposizione durante un periodo glaciale. L'ipotesi che si avanza in questa interpretazione è che la varva glaciale si sia formata a causa delle variazioni climatiche stagionali in cui si è depositata. La deposizione del sedimento si sarebbe verificata nei condotti della Spurga delle Cadene, che si presentavano completamente allagati, in modo continuo, per tutto l'anno. La probabile ubicazione temporale della sedimentazione riguarda una fase fredda registrata durante l'Ultimo Massimo Glaciale. La stagione estiva avrebbe formato le lamine basali grossolane a causa dell'aumento periodico dell'acqua di fusione, mentre durante la stagione fredda solo la polvere glaciale sarebbe stata trasportata nella grotta. I sedimenti si presentano a grana molto fine con laminazione piano parallela e senza evidenze di trasporto, l'ipotesi presentata prevede una deposizione per decantazione di sedimenti sospesi da elevati spessori di acqua in condizioni stagnanti (Bartolomè et al., 2021; Bull, 1981). Per ottenere acqua stagnante all'interno della 2ª Sala nella Spurga delle Cadene è necessario introdurre un aumento della prevalenza idraulica, che implica quindi una qualche forma di ostruzione all'ingresso della grotta. Durante il periodo di deposizione, l'entrata della grotta è stata caratterizzata lungamente dalla presenza del ghiacciaio della Val d'Adige e dalla presenza di morene laterali spinte all'interno della cavità carsica dal ghiacciaio stesso ostacolando così lo scarico della grotta e favorendo importanti inondazioni all'interno. Il modesto scioglimento estivo dei ghiacciai produceva la ricarica dell'acquifero carsico, e innescava l'aumento del livello dell'acqua all'interno della grotta. La lamina a grana più grossa potrebbe essere associata a questa stagione, quando si verificano enormi volumi d'acqua a disposizione con relativo trasporto di materiale limoso sabbioso, mentre la lamina a grana fine rappresenterebbe la sedimentazione di polvere glaciale durante la stagione fredda, in cui il trasporto principale era dovuto dal vento. È ipotizzato che l'ostruzione della grotta possa essere stata agevolata dall'aumento dell'elevazione della falda acquifera dovuta alla presenza del ghiacciaio in Val d'Adige che ha sommerso l'entrata. Secondo alcuni autori infatti (Audra et al., 2006) un grande corpo glaciale può innalzare il livello piezometrico di diverse centinaia di metri, come ad esempio 500-600 m nel Bergerhöhle/Tennengebirge. Tale innalzamento del livello delle

acque carsiche può aver causato velocità di scorrimento molto limitate nei condotti carsici. Come si è notato, la varva indica eventi con inondazione completa all'interno e di lento drenaggio al loro termine. È quindi possibile si tratti di risposte caratteristiche di un sistema a lenta variazione controllata da una falda acquifera esterna.

L'abrasione glaciale sui massicci calcarei lessinici ha eroso particelle di roccia che sono state poi convogliate nel sottosuolo dai torrenti subglaciali. Queste particelle sono composte da scaglie di calcite (non contando il LOI, nei sedimenti analizzati CaCO_3 costituisce il 55% del totale) e da grani di quarzo angolari. I risultati delle analisi XRF su CADENE3 (Tabella 1 e Tabella 2) mostrano un alto contenuto di silicio, alluminio, potassio, bario e rubidio, elementi rispettivamente posseduti in quantità decisamente più contenute nelle rocce carbonatiche della successione sedimentaria lessinea; gli elementi citati è probabile derivino in parte da sedimenti alloctoni e in parte dalle intrusioni magmatiche eoceniche ubicate in zona. Ad ogni modo, la presenza di minerali alloctoni in sezione sottile testimonia che i sedimenti di ritmite provengono, almeno in parte, dallo scioglimento glaciale del ghiacciaio atesino. Lo scioglimento estivo dei ghiacciai rilascia grandi quantità di acqua di dilavamento che travolge i sistemi sotterranei, provocando inondazioni e deposito di particelle grossolane provenienti dai ghiacciai. Le particelle di calcite sono trasportate in una "sospensione uniforme" (Riviere, 1977) che si estende in tutti i condotti allagati. In seguito il deflusso decanta durante il lento drenaggio invernale del sistema. I sedimenti risultanti formano un'alternanza di lamine chiare e scure che corrispondono alle successive fasi idrologiche (Schroeder & Ford, 1983; Ballesteros et al., 2017). Pertanto, questi depositi stagionali di origine glaciale, possono essere considerati a pieno titolo varve (Maire, 1990), che forniscono una prova indiscutibile della passata glaciazione. In assenza di correnti e con la sovrassaturazione della calcite (relativa alla bassa concentrazione di CO_2 presente nell'atmosfera), la capacità erosiva-corrosiva dell'acqua di fusione nelle zone epifreatiche e freatiche è molto debole. Il loro effetto speleogenetico è principalmente quello di sigillare i sistemi di grotte. Ci sono molte prove in letteratura della loro incapacità di erodere le grotte, come la conservazione delle colate più antiche, le cui superfici sono solo leggermente levigate (Audra et al., 2006). In alcuni casi, all'interno di singole lamine, si può notare l'inclusione di frammenti di varva precedentemente formata, distinguibile dal diverso colore. Queste inclusioni derivano dall'asportazione ed erosione del medesimo sedimento, da parte del flusso, generatosi in un'altra zona della grotta e probabilmente in un differente periodo. La mancanza totale di ghiaia o sedimento grossolano e la regolare sedimentazione piano parallela, con la quasi totale assenza di erosione, dà idea della bassa energia che doveva presentare il flusso d'acqua anche durante gli eventi di inondazione estiva. Analizzando ciò che si è detto fino a d'ora si può stabilire che CADENE3 si sia formata al di sotto del livello dell'acqua. La deposizione della ritmite deve essere avvenuta durante un periodo freddo dell'Ultimo Glaciale, periodi caratterizzati da un'elevata stagionalità, e immediatamente dopo la massima estensione dei ghiacciai alpini, in accordo con Ballesteros et al. (2017). In questo periodo la grotta si presentava completamente riempita di sedimenti fittamente laminati, con spessori che localmente potevano raggiungere i 10 metri in base alle osservazioni eseguite sul campo. Dalle sezioni sottili si nota infatti come gli strati siano troncati e la loro continuazione avrebbe coperto l'intera area della grotta. Riassumendo, lamine così orizzontali, regolari e cicliche si possono spiegare solamente con un periodo molto lungo di sedimentazione, con flusso praticamente nullo e al di sotto del livello piezometrico.

Un'altra particolarità del sedimento CADENE3 è la presenza di morfologie legate a processi deformativi. Come mostrato nelle immagini al microscopio, internamente il sedimento mostra segni di fratturazione e liquefazione (Fig. 4.10). Questi, secondo Szczygiel et al. (2020), possono essere spiegati ancora una volta dalla posizione e dalle condizioni geomorfologiche della grotta. All'interno di una grotta posizionata in un contesto tettonicamente attivo e che ha subito intensi fenomeni glaciali nel passato, i sedimenti mostrano le deformazioni osservate di conseguenza a precisi processi: le fratture si possono spiegare tramite la crioturbazione legata alle glaciazioni, mentre la liquefazione e fluidizzazione può essere innescata dallo scuotimento del terreno o dalla sovrappressione dell'acqua dei pori legata a sollecitazioni. Le crioturbazioni sono fenomeni osservati nei sedimenti fini delle grotte che hanno subito intensi episodi glaciali (Luetscher, 2022; Mihevc, 2018). Si formano come risultato della fessurazione da gelo e del disgelo/congelamento dei sedimenti di grotta saturi d'acqua. Le crioturbazioni si verificano invece prevalentemente in prossimità degli ingressi delle grotte (Mihevc, 2009) e formano diverse strutture, tra cui la fratturazione per gelo di cui si è discusso. Queste descrizioni combaciano esattamente con ciò che è stato osservato in sezione sottile. È quindi molto probabile che il sedimento sia stato fratturato in seguito a episodi di congelamento e scongelamento, e poi le fratture siano state sigillate dalla precipitazione di carbonato di calcio. Per quanto riguarda la liquefazione del limo sabbioso è invece più difficile definire una causa esatta, anche perché si tratta di evidenze molto limitate. Potrebbe essere stata causata da un evento sismico o da movimenti improvvisi del ghiaccio ("icequake"), o più verosimilmente da un aumento di pressione verticale. Per esempio un aumento improvviso dello spessore dei sedimenti soprastanti, con un relativo aumento di pressione dei pori all'interno del sedimento, può portare alla liquefazione del limo sabbioso e la sua migrazione verso una zona con meno pressione all'interno della laminazione. È possibile che questo aumento di pressione verticale sia dovuto ad un crollo nella grotta, o alla presenza di una solidificazione rapida dell'acqua presente al di sopra dei sedimenti.

Oggi rimangono solo alcune limitate prove di questo evento che ha contraddistinto la grotta per decine di migliaia di anni e probabilmente ciclicamente per diversi periodi glaciali. Alcuni frammenti sono stati preservati dalla brutalità dello scioglimento glaciale e dalle improvvise piene, che si registrano frequentemente nella Spurga delle Cadene, grazie alla cementazione operata dal carbonato di calcio. I frammenti che si osservano oggi, infatti, si trovano in zone relativamente protette dalle ondate di piena, si sono conservati grazie alla circolazione subacquea e capillare di acque ricche di carbonato di calcio che si è depositato all'interno degli interstizi del sedimento; così cementato, il sedimento, è stato in grado di preservarsi e giungere oggi alla presente discussione.

La presenza di questi tipi di depositi fornisce una solida prova dell'influenza glaciale sulla deposizione nella grotta, aprendo la strada a future ricerche sull'influenza dell'ultimo ciclo glaciale sull'evoluzione del carsismo in Lessinia.

LIANA1

I calcari non sono l'unica litologia riscontrabile sui Monti Lessini: sono infatti piuttosto diffusi anche alcuni tipi di rocce vulcaniche, che diventano addirittura prevalenti nei Lessini orientali, ad Est di una linea tettonica chiamata Faglia di Castelvero. Si tratta di basalti e tufiti, rocce originate rispettivamente dal consolidamento di lave e dalla sedimentazione di prodotti di esplosioni

vulcaniche appartenenti alla Provincia Vulcanica Veneta VVP. Queste rocce sono legate a episodi di vulcanesimo in ambiente prevalentemente sottomarino, che nella zona lessinica ebbero luogo in un intervallo di tempo compreso tra il Paleocene (65 Ma) e l'Oligocene (circa 30 Ma) (De Vecchi & Sedeà, 1995).

Il ridotto volume dei prodotti emessi associato all'alta percentuale di magmi indifferenziati (e caratterizzati da un ampio spettro composizionale) è coerente con un ambiente di rift continentale a ridotta attività vulcanica. Il magmatismo che ha prodotto la Provincia Vulcanica Veneta può quindi essere considerato come il risultato di un rift passivo legato alla collisione Africa-Europa. Il campione prelevato nell'area di ricarica del sistema carsico (Fig. 4.35) si trova all'interno di un'area con caratteristiche tettoniche e magmatiche particolari. L'attività vulcanica in questa zona ha una età Paleocene superiore-Eocene medio ed è prevalentemente di tipo subacqueo, con la messa in posto di ialoclastiti, tufi e lave a cuscino. Dal punto di vista composizionale questi prodotti sono prevalentemente nefeliniti, basaniti e basalti alcalini (Brombin, 2019).

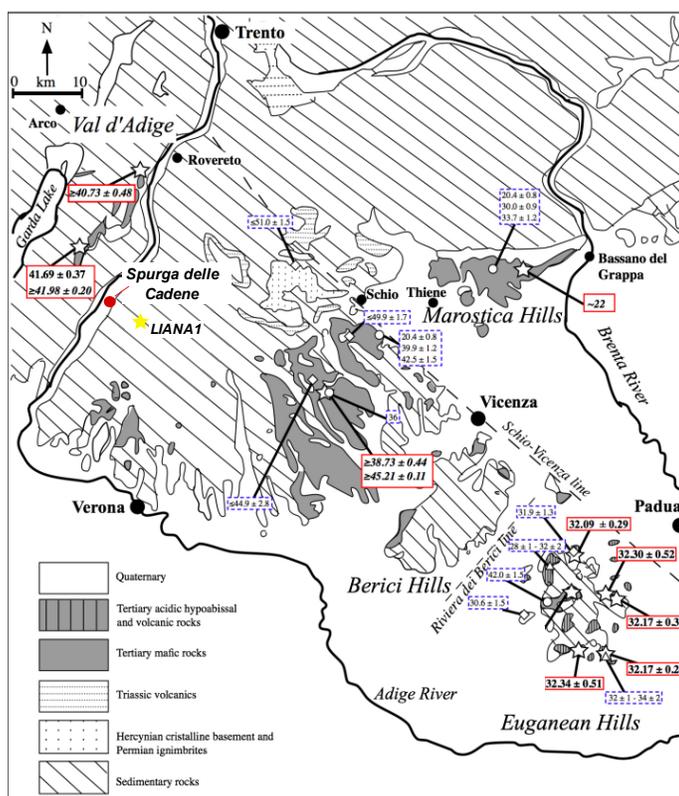


Figura 4.34 - Età delle rocce magmatiche presenti nella VVP. Le età presenti derivano da numerose ricerche (Visonà et al., 2007; Savelli & Lipparini, 1979; Borsi et al., 1969; Zantedeschi, 1994; Bartoli et al., 2014; Brombin, 2019) (modif. da Brombin, 2019).

Analizzando la carta riportata in Figura 4.34, si nota come il vulcanismo più antico è ubicato nell'area della Val d'Adige e Lessinia occidentale e diventa progressivamente più recente in direzione Sud-Est verso i Colli Euganei. La prima eruzione di cui si ha informazioni è avvenuta nel distretto occidentale della provincia magmatica durante il Paleocene. All'inizio dell'Eocene l'attività magmatica è registrata solamente nei Monti Lessini mentre nell'Oligocene esclusivamente nei Colli Euganei. Diversi studi petrologici sono stati eseguiti sul magmatismo del VVP, che presenta principalmente prodotti basici. Essi comprendono un ampio spettro di

composizione, generalmente nepheliniti e basaniti nella zona occidentale dei Lessini-Val d'Adige e basalti alcalini, di transizione e tholeiitici verso Est (Macera et al., 2003).



Figura 4.35 - L'immagine mostra a sx il campione a mano di LIANA1a e a dx il campione a mano di LIANA1b.

I due campioni analizzati, sia ad occhio nudo sia al microscopio, mostrano caratteristiche diverse (Fig. 4.35). LIANA1a è costituito da fenocristalli di olivina e subordinato pirosseno immersi in una pasta di fondo formato da plagioclasio, viene identificato come basalto alcalino, chimismo classico dei Monti Lessini. L'olivina è leggermente alterata in bowlingite, una miscela di smectite, quarzo, clorite, serpentino e talco, con un aspetto verdastro in nicols piano-paralleli. Questa alterazione nuclea nelle fratture dei minerali di olivina e poi si estende all'intero grano del minerale. L'olivina generalmente può alterarsi in bowlingite o iddingsite, a seconda della fugacità di O_2 ; in questo specifico campione è ipotizzabile che nella fase seguente alla sua genesi ci fossero condizioni idrotermali che rendessero l'ambiente leggermente riducente.

LIANA1b mostra invece una tessitura amigdaloide in cui i vuoti e le fratture sono riempiti da minerali secondari. I minerali secondari, presenti nelle amigdale e nelle vene delle lave basaltiche, sono comunemente considerati il risultato di eventi di alterazione idrotermale (Markússon & Stefánsson, 2011). Le vulcaniti lessiniche sono spesso alterate per effetto di intense manifestazioni idrotermali responsabili di estesi fenomeni di mineralizzazione secondaria che hanno provocato il riempimento, da parte di nuove fasi minerali, di numerose cavità, amigdale e fratture presenti nelle rocce vulcaniche. I meccanismi che controllano la formazione e lo sviluppo dei fenomeni di mineralizzazione che avvengono nelle cavità di rocce vulcaniche sono ancora oggetto di studi e ricerche. In alcuni casi questi fenomeni sono riferibili agli stadi finali della genesi magmatica, cioè alla fase pneumatolitica. In questa fase una parte delle soluzioni calde provenienti dalla massa magmatica in raffreddamento può risalire lungo fratture e/o fessure presenti nelle rocce incassanti e raggiungere la superficie terrestre, oppure può rimanere intrappolata in cavità o amigdale all'interno delle rocce stesse. Quando i suddetti fluidi restano intrappolati possono dare origine ad una fase di nucleazione e crescita di minerali all'interno delle cavità, interagendo spesso con i costituenti originali della roccia e arricchendosi di nuovi elementi chimici. In altri casi, invece, le mineralizzazioni sono successive alla fase pneumatolitica e le soluzioni calde possono non essere geneticamente legate ad un magma in via di solidificazione ma costituire fluidi di altra origine, successivamente riscaldati da corpi caldi presenti nella crosta (Mattioli et al., 2008). Alterazione e mineralizzazioni secondarie sono fenomeni tipici di espansioni basaltici. Questi fenomeni, poi, diventano particolarmente intensi ed estesi quando l'area vulcanica è associata ad una grande disponibilità di fluidi, come può essere nel caso di

studio quella legata ad ambienti marini. I sistemi vulcanici nei quali vengono emessi grandi volumi di magma in condizioni subacquee (non profonde) sono, infatti, quelli caratterizzati dalla maggiore presenza di fenomeni di alterazione e conseguenti mineralizzazioni secondarie.

Gli elementi chimici trasportati dalle soluzioni idrotermali possono derivare da un magma originario, provenire dalla roccia attraversata o avere origine dai minerali preesistenti con cui le soluzioni vengono a contatto durante la loro circolazione nel sistema. Allo stesso modo, l'acqua del sistema idrotermale può essere un'acqua juvenile o magmatica (cioè dovuta a processi di raffreddamento di masse fuse), può derivare da acque superficiali, marine e continentali penetrate attraverso fratture nella crosta, oppure può derivare da masse d'acqua originariamente intrappolate nei sedimenti e successivamente riscaldate e rimobilizzate. Anche nella genesi idrotermale la notevole disponibilità di fluidi acquosi può condurre alla formazione di cristalli ben formati e spesso di notevoli dimensioni. La natura dei cristalli che si formano dipende da complicati meccanismi e da delicati equilibri chimico-fisici che si instaurano tra la roccia ospitante ed il convoglio mineralizzante. In relazione a questi fattori si potranno generare associazioni di minerali anche molto diverse tra loro. Possiamo trovare vene a minerali metallici, vene a barite e fluorite, vene a quarzo oppure vene "di tipo alpino" con quarzo, titanite, epidoto, anatasio e rutilo. In base al tipo di minerali presenti possono essere identificate diverse facies di alterazione idrotermale, rappresentate da carbonati (calcite, siderite, dolomite), solfati (barite, alunite, anidrite), alogenuri (fluorite) e silicati (feldspati alcalini, quarzo, miche, epidoto, minerali argillosi, cloriti, anfiboli, zeoliti) (Mattioli et al, 2008). Nel caso di studio i minerali riconosciuti all'interno delle vescicole sono omogenei e si tratta semplicemente di calcite macrocristallina. Questo rende l'idea di un'alterazione idrotermale con acqua che si è arricchita di carbonato di calcio tramite il passaggio attraverso la roccia incassante. Lungo le vene si riconoscono nitidamente morfologie di accrescimento del carbonato di calcio, evidenza di crescita polifasica. In generale il campione LIANA1b ha subito un'attività idrotermale intensa, con brecciazione pervasiva del materiale basaltico.

L'affioramento basaltico in Valle Liana fa quindi parte della Provincia Magmatica Veneta, è un grande corpo cilindrico detto in gergo neck, corrispondente ad un antico camino vulcanico che ha raggiunto la superficie con un'eruzione subacquea. Le datazioni eseguite su materiale magmatico nell'area occidentale della Provincia consentono di valutare, con una buona probabilità, l'impostarsi del basalto tra i 42 e i 38 milioni di anni fa (Fig. 4.34). È quindi una manifestazione magmatica solidale con ciò che è presente in letteratura, anche se nell'area occidentale dei Lessini le manifestazioni vulcaniche mappate sono molto rare. Anche l'alterazione idrotermale osservata in LIANA2 sembra essere coerente con la ricostruzione paleoambientale, la grande presenza d'acqua ha reagito con il magma creando una deposizione secondaria calcitica all'interno delle amigdale. L'attività idrotermale non ha però formato minerali argillosi, perciò il basalto non era, probabilmente, a contatto diretto con l'acqua marina, situazione che avrebbe invece formato una ialoclastite. È più probabile che questo tipo di effetto sia il risultato di alterazione idrotermale derivante dal passaggio di fluidi tramite frattura provenienti dai sedimenti saturi presenti al di sotto del pavimento oceanico.

Il ruolo speleogenetico del neck magmatico rinvenuto in Valle Liana è stato oggetto di approfondimento durante il periodo di tesi. Vista la posizione risulta ipotizzabile un suo ruolo all'interno della circolazione idrogeologica dell'altopiano di Fosse. È presumibile che attualmente abbia solo un ruolo marginale come barriera idrogeologica per l'acqua proveniente dagli Alti Lessini, ma è tuttavia possibile abbia avuto un ruolo idrogeologico determinante in epoche passate. I ghiacciai locali, presenti nella zona soprastante la flessura del Corno d'Aquilio, durante le fasi di deglaciazione hanno liberato enormi quantità di acqua, parte della quale ha corso per lungo tempo in Valle Liana. A



Figura 4.36 - Fotografia del canyon impostato in Valle Liana.

prova di ciò è stato eseguito un rilevamento all'interno della valle ed è stato appurato l'avanzato stato di evoluzione del canyon forgiato lungo le centinaia di migliaia di anni (Fig. 4.36). Le ripide pareti che bordano il canyon raggiungono dimensioni verticali superiori ai 50 metri. Lungo i periodi con alta variabilità climatica che si sono susseguiti in questa fascia climatica, i ghiacciai e il loro conseguente scioglimento hanno modellato la valle. Attualmente il canyon si arresta a quota 920 m s.l.m. dove esibisce una vistosa rottura di pendio, introducendo morfologie più orizzontali e dolci. All'interno di quest'area relativamente pianeggiante affiora il neck basaltico discusso che, analizzando la morfologia del paesaggio, sembra evidente abbia avuto un ruolo

Atualmente il canyon si arresta a quota 920 m s.l.m. dove esibisce una vistosa rottura di pendio, introducendo morfologie più orizzontali e dolci. All'interno di quest'area relativamente pianeggiante affiora il neck basaltico discusso che, analizzando la morfologia del paesaggio, sembra evidente abbia avuto un ruolo

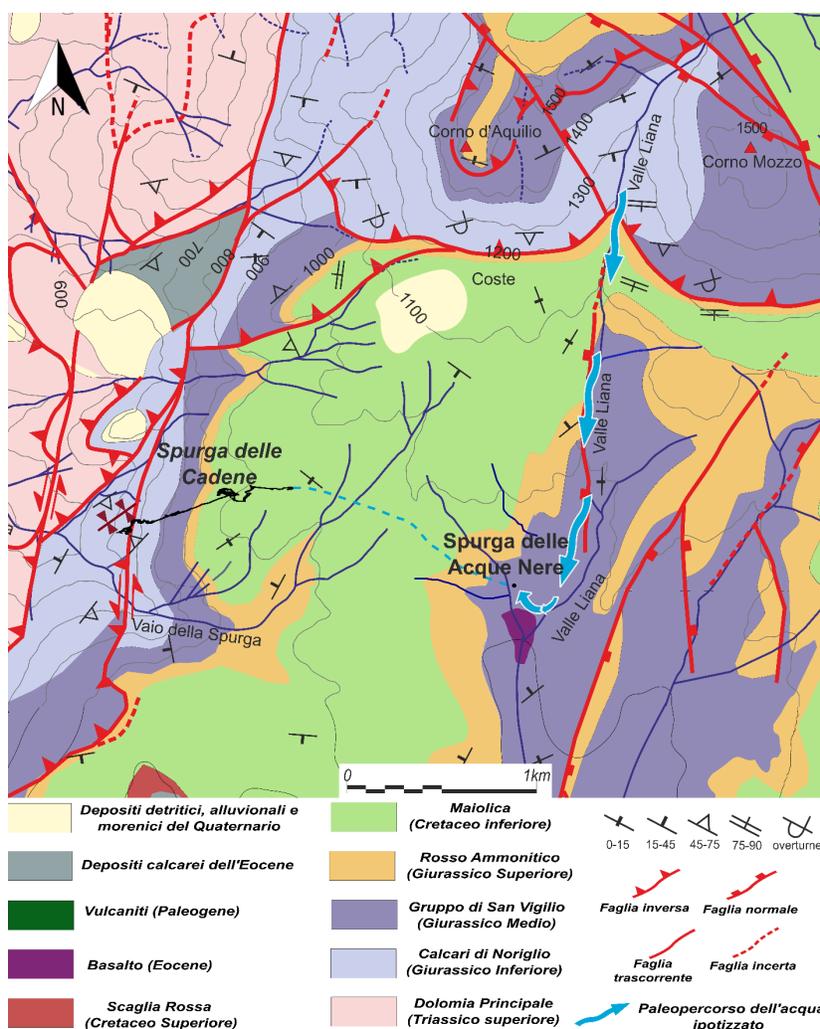


Figura 4.37 - Stralcio della carta geologica della zona di studio con appuntata l'ipotesi di paleopercorso dell'acqua durante i periodi di deglaciazione.



Figura 4.38 - Discesa all'interno della Spurga delle Acque Nere.

nella modellazione dell'attuale valle. L'ipotesi, non ancora dimostrata, è che esso possa avere condizionato le direzioni di deflusso idrologico, indirizzando l'acqua proveniente dallo scioglimento dei ghiacciai dell'Alta Lessinia all'interno dell'altopiano di Fosse. Durante il rilevamento infatti è stato individuato anche l'ingresso di un enorme inghiottitoio che si apre 30 metri a Nord rispetto all'affioramento magmatico. Questo condotto carsico è presente nel catasto delle grotte venete come Spurga delle Acque Nere: si apre ad una quota di 940 metri s.l.m. e affianca la Valle Liana. Esso si presenta con un'apertura di 15 metri allungata in direzione N-S perciò, vista l'orientazione, è probabile che si sia generato a partire da una frattura tettonica. La profondità attualmente raggiungibile si attesta sui 24 metri dove si presenta occlusa da blocchi di roccia messi in posto probabilmente in seguito ad accumulo di materiale proveniente dalle aree limitrofe, o da un crollo interno (Fig. 4.38). Attualmente nell'inghiottitoio non circola più acqua e può così essere considerato fossile, ma è possibile che esso potesse rivestire un ruolo primario nel deflusso idrogeologico durante i periodi glaciali. Quest'idea ha spinto ad immaginare un suo collegamento con la Spurga delle Cadene, viste le grandi dimensioni delle due cavità e la loro posizione. Le due cavità si trovano infatti ad una distanza pari a 1,3 km in linea d'aria, con un potenziale verticale di 400 metri. È quindi stato ipotizzato che la presenza del neck basaltico, a valle dell'inghiottitoio, abbia agito da barriera idraulica e idrogeologica favorendo così il deflusso dell'acqua di scioglimento proveniente da nord all'interno della Spurga delle Acque Nere. Il flusso d'acqua quindi avrebbe poi proseguito il suo tragitto tagliando per intero l'altopiano di Fosse e raggiungendo la fuoriuscita sul versante della Val d'Adige tramite la Spurga delle Cadene. A questo proposito è stato organizzato un tracciamento idrogeologico tramite cloruro di sodio. La Spurga delle Acque Nere purtroppo si trova in una posizione non raggiungibile tramite veicoli a motore, l'attuazione del progetto è risultata perciò logisticamente scomoda. Il tracciamento è stato eseguito il 26 agosto 2024 utilizzando 60 litri di acqua, in taniche trasportate a mano, e 20 kg di NaCl. Un conducimetro, posto sopra il Lago Pensile, era incaricato invece di monitorare, con cadenza di un minuto, il possibile passaggio del tracciante. Purtroppo però i risultati ottenuti non sono netti, è stata registrata un'anomalia di conducibilità difficile da interpretare e perciò non sufficiente per provare il collegamento fra i due condotti carsici.

Il 5 settembre 2024 infatti, 10 giorni dopo l'immissione, è stato registrato un aumento di conducibilità che ha anticipato di 24 ore la piena, evidenziato in Figura 4.39 dalla freccia. È un comportamento mai osservato fin qui: nelle piene ordinarie infatti la conducibilità cresce bruscamente solo al sopraggiungere della piena. Il dato però non restituisce una chiara evidenza del passaggio, l'aumento potrebbe infatti essere legato alla mancanza del picco di conducibilità nella piena registrata il 3 settembre (Fig. 4.39).

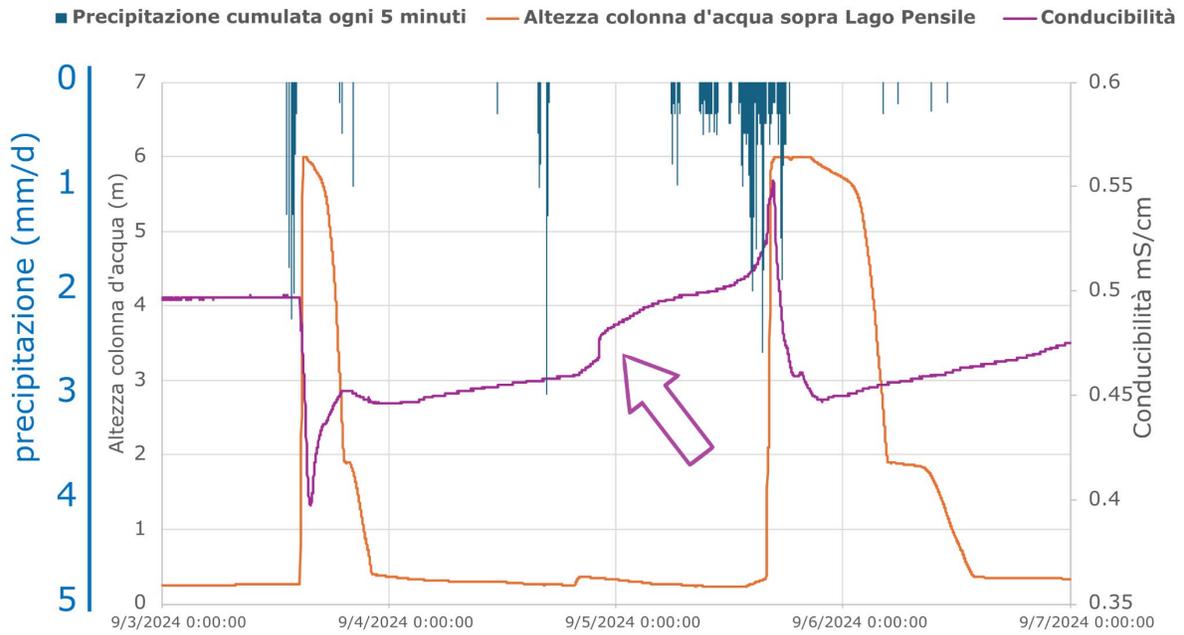


Figura 4.39 – Grafico di conducibilità registrato durante il tracciamento eseguito dalla Spurga delle Acque Nere.

L'anomalia è piuttosto netta e raggiunge, con l'arrivo della piena, il massimo valore di conducibilità dell'intero periodo di monitoraggio; tuttavia, la mancanza di un vero e proprio marker, risulta non convincente ai fini del tracciamento. È perciò necessario un approfondimento del tema con l'utilizzo di un tracciante logisticamente più vantaggioso ed efficace rispetto al cloruro di sodio. L'ipotesi iniziale in ogni caso rimane più che mai valida.

5. MONITORAGGIO IDROGEOLOGICO-ACUSTICO

Prima parte del monitoraggio settembre-gennaio

-Introduzione

L'obiettivo principale, posto durante la prima parte di monitoraggio, coincide con l'interpretazione del meccanismo che governa la grotta durante gli episodi di piena e le relative differenze con i periodi di magra. Si è perciò progettato l'installazione di alcuni strumenti di monitoraggio in punti specifici della grotta (Fig. 5.1):

- Sono stati posizionati due trasduttori di pressione (HOBO), per monitorare in continuo il livello dell'altezza dell'acqua del torrente perenne, uno sopra e uno sotto il Lago Pensile.
- I due TinyTag (TH), per la raccolta dei dati riguardanti temperatura e umidità, sono stati ubicati uno in Sala Bianca e uno in Sala delle Meraviglie.
- Il rilevatore bioacustico (MICROFONO) è stato inserito, nella prima parte del rilevamento, in Sala Bianca al sicuro dall'arrivo dell'acqua.
- Si è inserito il conduttivimetro (COND1) a contatto con il torrente perenne sopra al Lago Pensile.
- È stato ubicato anche un trasduttore di pressione (PA1) in Sala delle Meraviglie per la misura della pressione atmosferica.

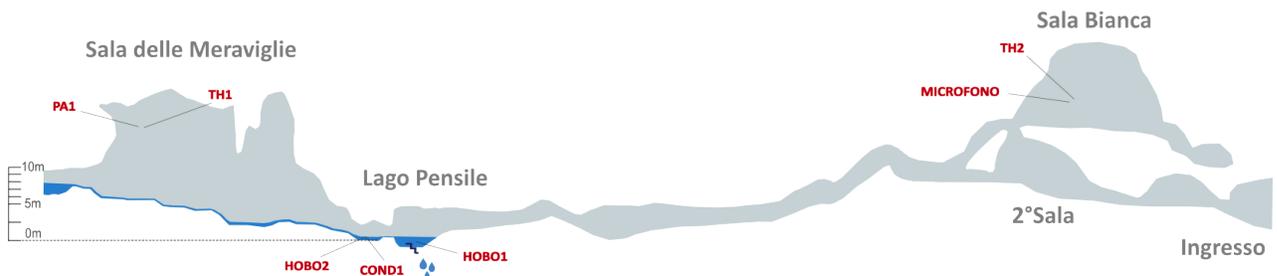


Figura 5.1 - Ubicazione degli strumenti all'interno della Spurga delle Cadene durante la prima parte di monitoraggio.

-Presentazione dati

- Livello dell'acqua

Come già precedentemente annunciato, sono stati inseriti due trasduttori di pressione nel torrente interno, uno sopra al Lago Pensile ed uno alla base, in Figura 5.1 sono stati chiamati rispettivamente HOB02 e HOB01. Ne sono stati inseriti due per avere una garanzia sul dato e per valutare eventuali differenze di pressione durante le piene. Come altezza della colonna d'acqua viene presa di riferimento, nei grafici che seguono, l'altezza sopra al Lago Pensile; essa presenta il medesimo andamento del dato di pressione al di sotto del Lago Pensile, però, visto che l'unico dato a disposizione nella seconda parte di monitoraggio è relativo al trasduttore sopra al Lago Pensile, si è scelto di tenerlo come riferimento in entrambi i periodi, così da facilitare eventuali comparazioni e analisi.

Il dato di pressione misurata all'interno del torrente è stato poi normalizzato con la pressione atmosferica misurata in Sala delle Meraviglie, per estrarre dal dato barometrico l'altezza della colonna d'acqua al di sopra dello strumento.

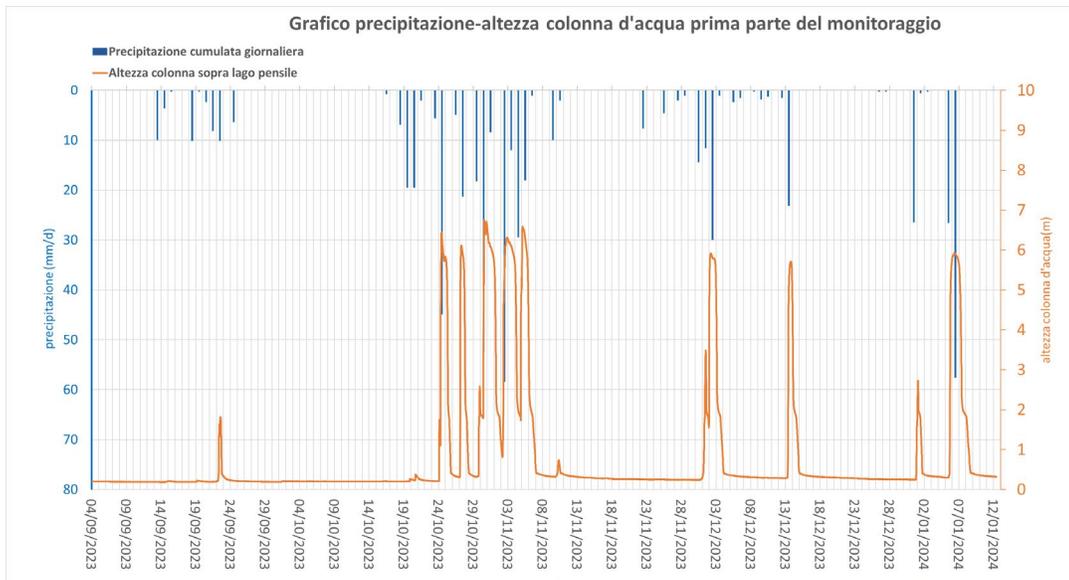


Figura 5.2 - Grafico riassuntivo del primo periodo di monitoraggio del dato di precipitazione cumulata e altezza colonna d'acqua.

Il grafico in Figura 5.2 riassume i dati di precipitazione cumulata giornaliera raccolti dalla stazione pluviometrica ¹ presente nell’abitato di Fosse, e quindi all’interno del bacino di ricarica idrologica della grotta sorgente. Si nota come ad ogni precipitazione giornaliera intensa, misurata nel bacino di ricarica, corrisponda un picco di altezza della colonna d’acqua al di sopra del trasduttore di pressione.

- Pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie

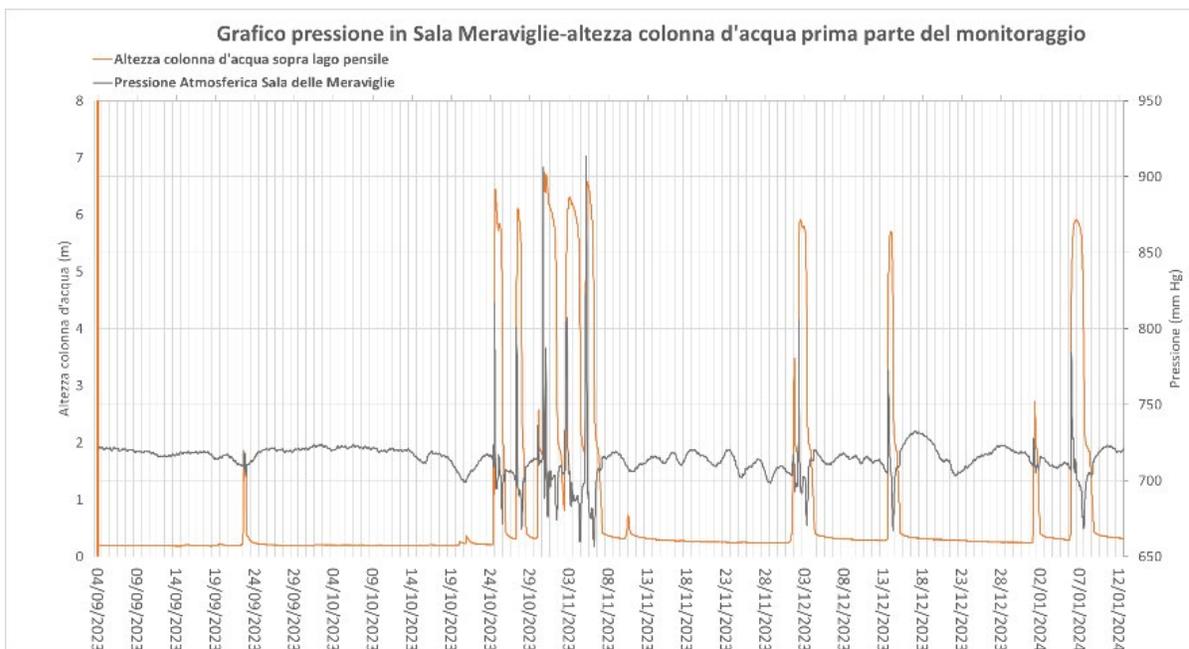


Figura 5.3 - Grafico riassuntivo del primo periodo di monitoraggio del dato di pressione atmosferica e altezza colonna d'acqua.

¹ Dati forniti da Weather Underground

Il trasduttore di pressione inserito in Sala delle Meraviglie aveva come obiettivo il monitoraggio delle variazioni di pressione atmosferica che si instaurano in questo speciale vano all'interno del reticolo carsico. Durante i periodi di normale afflusso e deflusso idrico la pressione sembra rispondere con fluttuazioni di scarsa entità facilmente collegabili a variazioni meteo climatiche. Durante i periodi di piena, invece, si possono notare picchi molto marcati che raggiungono valori di 200 mm Hg superiori ai periodi ordinari. Inoltre si può notare che ciascun picco positivo è immediatamente seguito da un picco negativo di entità più o meno pari a 50 mm Hg al di sotto del valore di pressione in condizioni non perturbate.

- Conducibilità elettrica

La conducibilità elettrica è stata misurata a partire dal 28 novembre 2023, quindi in ritardo rispetto agli altri parametri. Il conduttivimetro è stato settato per raccogliere un valore ogni 30 minuti, questa cadenza di misura in parte può penalizzare in quanto c'è il rischio di perdere dati importanti durante gli episodi di piena, ma nel caso specifico, vista la lunga durata delle piene, si è preferito preservare la memoria del dispositivo rispetto ad un più fitto monitoraggio del parametro.

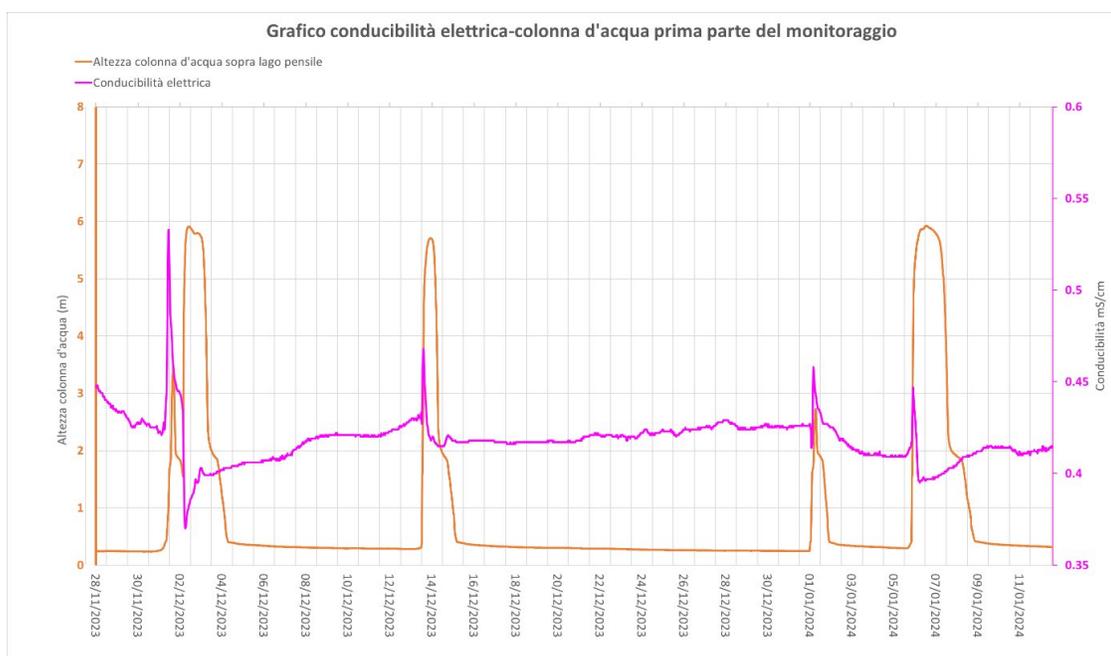


Figura 5.4 - Grafico riassuntivo del primo periodo di monitoraggio del dato di conducibilità e altezza colonna d'acqua.

Si è stati in grado, nonostante il ritardo di collocazione dello strumento, di registrare 4 impulsi di piena di entità diversa. Come si nota dal grafico presentato in Figura 5.4, anche per quanto riguarda questo parametro, i periodi di piena portano una perturbazione significativa nei dati osservati. La conducibilità presenta fluttuazioni positive seguite da fluttuazioni negative, con entità di variazione però diverse.

- Temperatura atmosferica e dell'acqua

I trasduttori di pressione inseriti all'interno della Spurga delle Cadene sono stati in grado anche di raccogliere dati riguardanti la temperatura dell'acqua corrente all'interno del reticolo idrogeologico. Nel seguente grafico (Fig. 5.5) sono stati plottati i dati riguardanti la temperatura dell'acqua misurata sopra al Lago Pensile, e la temperatura atmosferica misurata all'interno della Sala delle Meraviglie nel medesimo periodo.

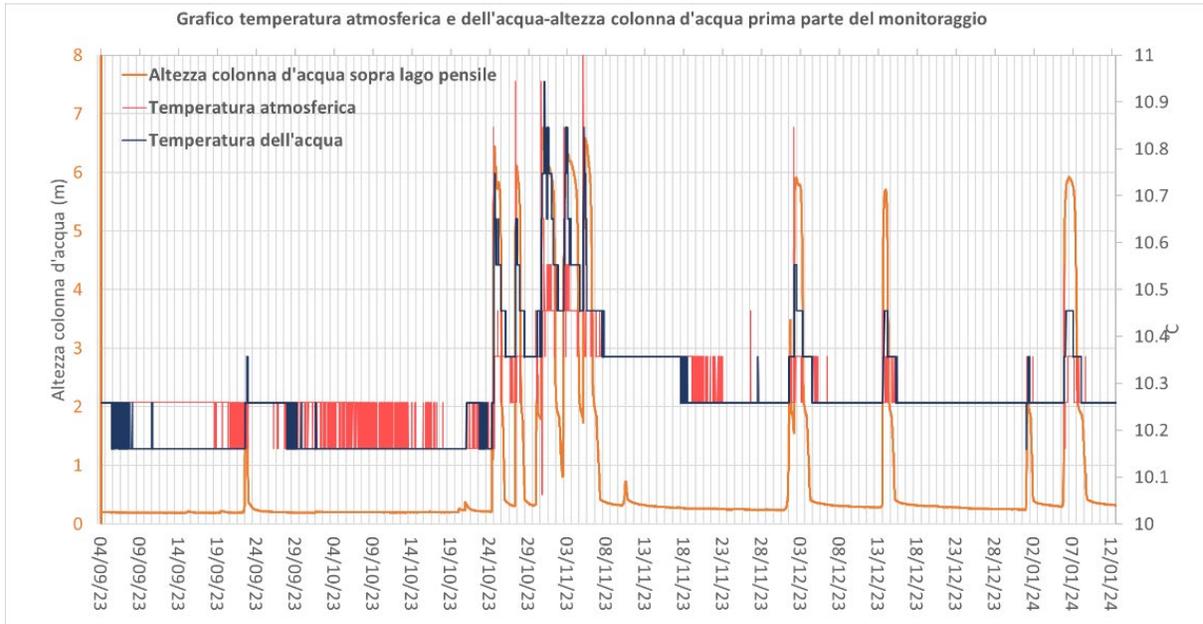


Figura 5.5 - Grafico riassuntivo del primo periodo di monitoraggio del dato di temperatura e altezza colonna d'acqua.

Le temperature, che sono perfettamente stabili nelle fasi di deflusso ordinarie, vedono ampie fluttuazioni positive nei periodi di piena. I comportamenti delle temperature verranno approfonditi più nel particolare nelle presentazioni di alcuni specifici episodi di piena.

- Monitoraggio acustico

Nella prima metà di monitoraggio il registratore bioacustico è stato posizionato in Sala Bianca dove ha avuto la possibilità di registrare chiaramente i suoni provenienti dalle profondità della grotta, ma limitando al minimo la probabilità di essere travolto dalla corrente. Grazie poi alla preziosa collaborazione con il Laboratorio di Bioacustica applicata all'Università della Catalogna, si sono potute studiare ed approfondire 3 frequenze registrate dal microfono ovvero <math>< 10\text{ Hz}</math>, 15,8 Hz e 31,6 Hz. Le prime due frequenze utilizzate non sono udibili dall'orecchio umano, che ha il limite di percezione inferiore che si attesta tra i 16 e i 18 Hz. Viene presentato di seguito un grafico di presentazione dei dati acustici misurati, riguarda la seconda metà di ottobre 2023 (Fig. 5.6).

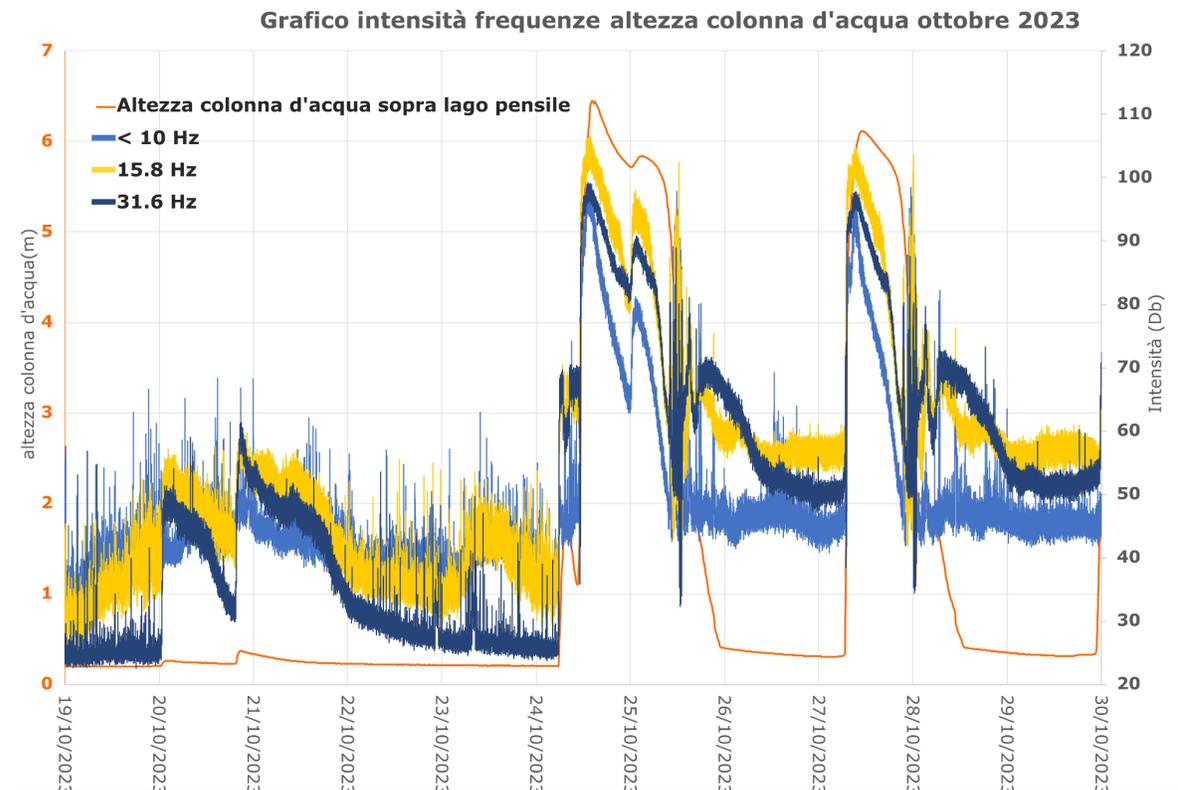


Figura 5.6 - Grafico delle intensità di frequenza e livello d'acqua riguardante la parte finale del mese di ottobre 2023.

Vista la grande quantità di dati da gestire si è preferito presentare un più ristretto intervallo di tempo, in questo modo si può anche apprezzare meglio le variazioni di intensità delle frequenze. Le intensità dei suoni registrati in Sala Bianca sembrano essere influenzate in maniera inequivocabile dalle differenze di altezza della colonna d'acqua. Verrà largamente discusso più avanti il rapporto fra questi due parametri. Alcuni picchi nelle intensità presenti nei normali periodi di deflusso possono essere collegati a rumori di gocce di stillicidio presenti nella sala. Le diverse frequenze hanno un andamento simile alla macroscala, ma guardando più nel dettaglio si possono notare invece evidenti divergenze.

-Piena di fine ottobre 2023

Tra l'ultima settimana del mese d'ottobre 2023 e l'inizio del mese di novembre si sono verificati abbondanti fenomeni di precipitazione che hanno innescato, in sequenza, una serie di 5 impulsi di piena nella Spurga delle Cadene. È un evento particolare che avviene raramente, è durato in totale più di 15 giorni ed è stato causato dai 250 mm di pioggia cumulata, che nel periodo preso in considerazione hanno investito l'area di ricarica del sistema carsico studiato.

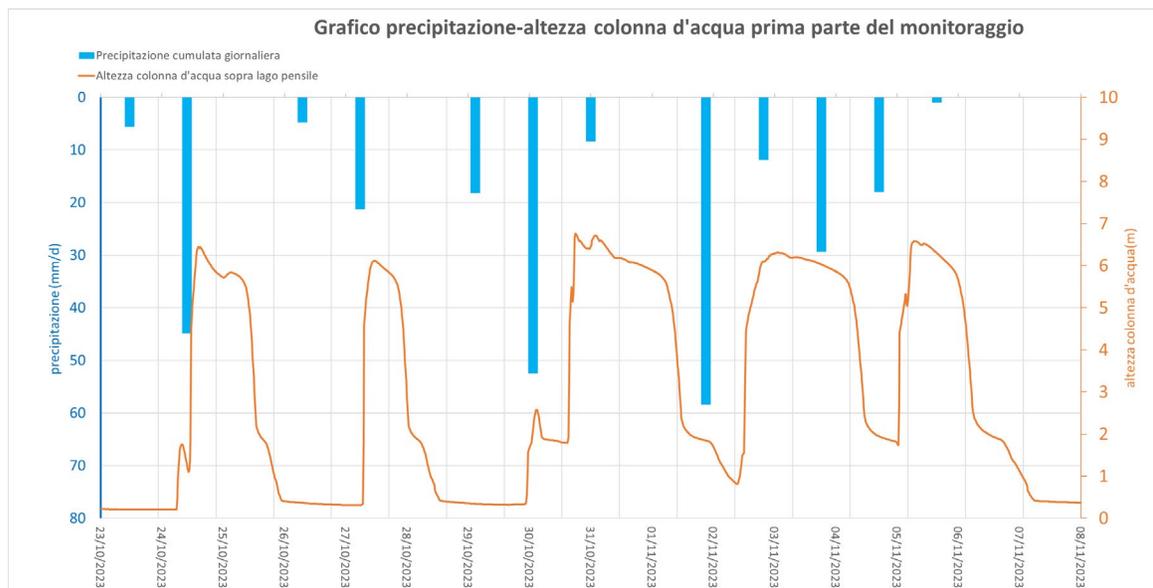


Figura 5.7 - Grafico di precipitazione cumulata giornaliera e altezza del livello d'acqua riguardante l'ultima settimana di ottobre e la prima di novembre 2023.

Il grafico in Figura 5.7 mostra lo stretto legame fra le piene registrate e la quantità di precipitazione: si nota infatti come in generale la durata delle piene dipenda dall'altezza di pioggia registrata. Per analizzare le cause di una successione di piene localizzate in un periodo così prolungato nel tempo bisogna considerare altri aspetti oltre alla quantità di precipitazione, per esempio il grado di saturazione del terreno, che ha un ruolo chiave nel calcolo del deflusso superficiale e l'infiltrazione dell'acqua. Per visualizzare meglio ciò che è avvenuto durante questa serie di piene si è deciso di approfondire uno dei picchi visualizzati in grafico.

Viene mostrato di seguito il grafico del primo impulso di piena avvenuto fra il 24 e 25 ottobre 2023.

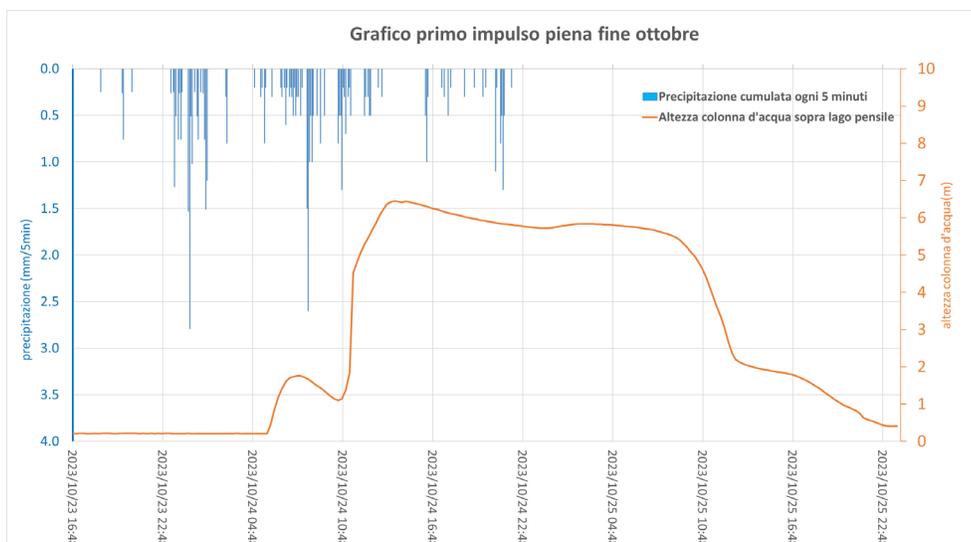


Figura 5.8 - Grafico di precipitazione cumulata e altezza colonna d'acqua riguardante l'impulso del 24 ottobre.

Osservando il grafico in Figura 5.8 si può notare come il picco della colonna d'acqua si attesti alle ore 14:15 del giorno 25 ottobre 2023 con un'altezza di 6,44 metri, mentre 4 ore prima il livello risultava ancora intorno al metro di altezza. La velocità di innalzamento del livello è particolarmente elevata inizialmente, analizzando i dati infatti si può notare come tra le 10:30 e le 11:30 il livello sia salito di 3,5 metri, con un tasso di incremento pari a 6 cm/min. La seconda parte della curva di incremento tende invece ad avere una velocità minore pari a 2,5 cm/min. Nella fase precedente all'inizio dell'incremento del livello dell'acqua sono precipitati nell'area di ricarica della grotta 37 mm di pioggia, sufficienti per innescare la piena; le precipitazioni successive invece hanno mantenuto il livello dell'acqua sopra ai 5 metri per un intervallo pari a poco meno di 24 ore consecutive.

Per quanto riguarda le variazioni di pressione atmosferica registrate in Sala delle Meraviglie durante la serie di piene considerata, vengono mostrati i dati nel seguente grafico (Fig. 5.9).

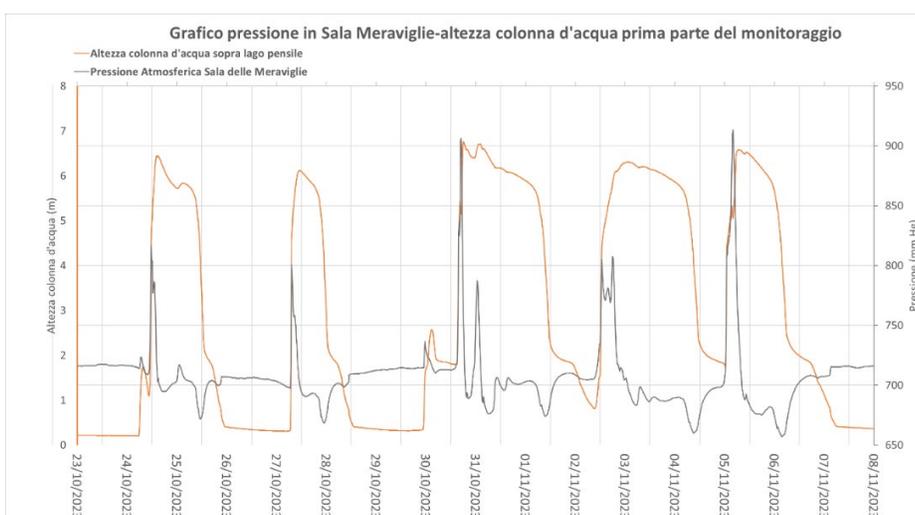


Figura 5.9 - Grafico di pressione atmosferica e altezza colonna d'acqua riguardante l'ultima settimana di ottobre e la prima di novembre 2023.

Per approfondire questo parametro si è preferito mostrare con più dettaglio un impulso di piena tra quelli in discussione, ovvero il terzo picco di piena corrispondente al 31 ottobre - 1 novembre.

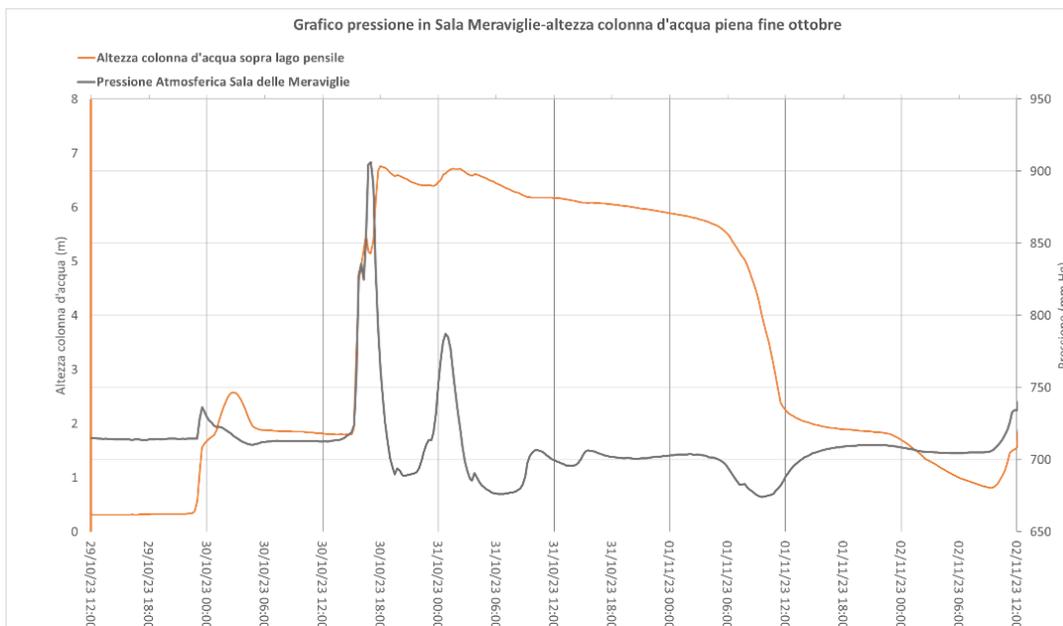


Figura 5.10 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Meraviglie e altezza colonna d'acqua riguardante l'impulso di piena del 30 ottobre.

Come si può notare in Figura 5.10, le due curve presentano la fase di crescita parallela una all'altra. Si può osservare poi come la pressione atmosferica, quando il livello dell'acqua raggiunge un certo valore, precipiti verticalmente fino a livelli inferiori alla condizione precedente la piena. Si possono notare altre fluttuazioni durante il periodo di piena, nuovi innalzamenti e discese sempre legati a variazioni del livello dell'acqua, anche se, quest'ultime, sono nell'ordine di pochi centimetri. Infatti è possibile osservare come, poco dopo mezzanotte del 31 ottobre 2023, una variazione pari a 29 cm del livello dell'acqua ha prodotto un aumento di pressione di 100 mm Hg, pari a 13,3 kPa. Verranno largamente discussi in seguito i possibili meccanismi di evoluzione e implicazioni di questo processo.

Un altro parametro misurato che risulta perturbato durante la piena di fine ottobre è la temperatura all'interno della grotta, sia per ciò che concerne la temperatura atmosferica sia per l'acqua del torrente interno. Vengono mostrati in grafico (Fig. 5.11) i dati di temperatura raccolti durante l'intera serie di piene considerata, l'andamento delle curve è senza dubbio influenzato dall'arrivo delle pulsazioni di piena.

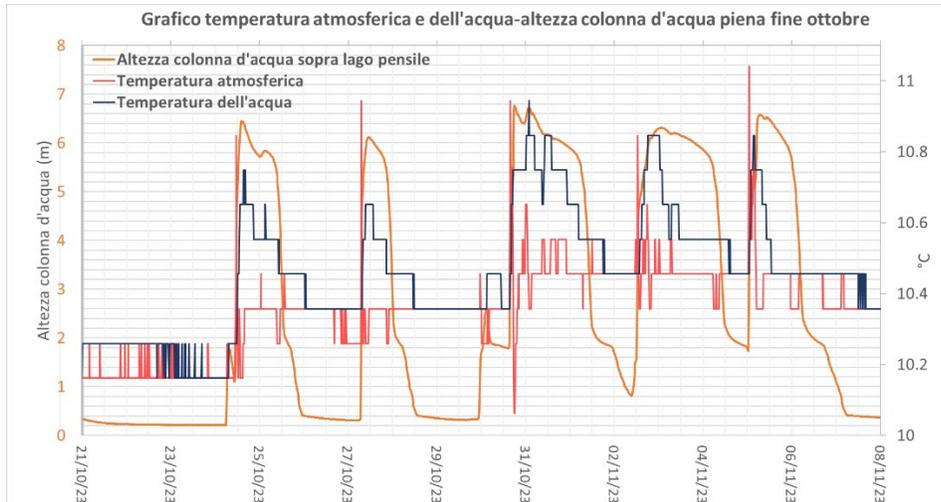


Figura 5.11 - Grafico di temperatura atmosferica, temperatura dell'acqua e altezza colonna d'acqua riguardante l'ultima settimana di ottobre e la prima di novembre 2023.

Un'escursione termica molto evidente, per esempio, è osservabile durante l'impulso di piena del 31 ottobre, dove la temperatura atmosferica in meno di due ore varia poco meno di 1 grado centigrado (Fig. 5.11). La temperatura dell'acqua mostra una marcata e rapida crescita iniziale, mentre nella fase di scarico la diminuzione risulta essere più progressiva, raggiungerà la temperatura ordinaria solo diversi giorni successivi al picco di piena. Le variazioni delle due grandezze considerate sembrano indipendenti, la temperatura atmosferica mostra nette fluttuazioni positive iniziali seguite da abbondanti picchi negativi, la temperatura dell'acqua invece aumenta con ritardo e, dopo aver raggiunto il picco, tende a decrescere gradualmente.

Si è scelto di mostrare il grafico riguardante il primo impulso della serie in oggetto (Fig. 5.12), così da poter apprezzare meglio le variazioni partendo da una condizione non perturbata e non influenzata da precedenti episodi di piena.

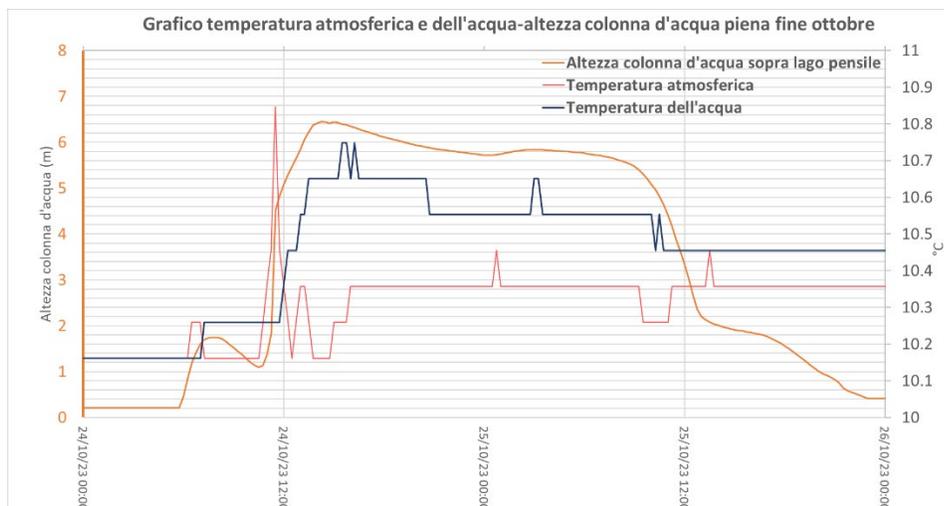


Figura 5.12 - Grafico di temperatura atmosferica, temperatura dell'acqua e altezza colonna d'acqua riguardante l'impulso del 24 ottobre 2023.

Dal grafico (Fig. 5.12) si apprezza come entrambi i dati di temperatura siano perturbati dall'arrivo della piena. In particolare risulta che la temperatura atmosferica salga molto velocemente a pari passo con l'arrivo dell'ondata di piena, raggiungendo un picco pari a $10,85^{\circ}$, $0,7^{\circ}$ in più della temperatura misurata in periodi di normale deflusso all'interno della cavità. Il picco di temperatura atmosferica nella cavità viene raggiunto in 1 ora e la curva poi mostra una discesa altrettanto rapida fino alla stabilizzazione su un valore di poco superiore allo standard. Il livello massimo di altezza della colonna d'acqua non corrisponde assolutamente con il picco di temperatura atmosferica anzi, al contrario, corrisponde a una delle temperature più basse registrate durante l'intero evento.

Analizzando invece la variazione di temperatura atmosferica in relazione con la variazione di pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie nel grafico sottostante (Fig. 5.13), si possono notare variazioni simili, sia negative sia positive.

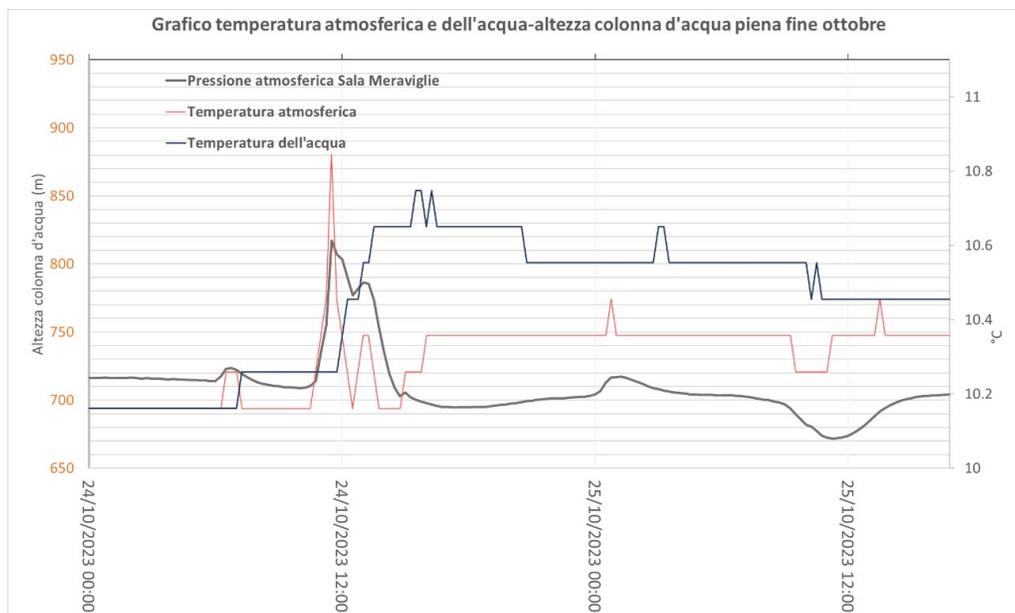


Figura 5.13 - Grafico di temperatura atmosferica, temperatura dell'acqua e pressione atmosferica riguardante l'impulso del 24 ottobre 2023.

Per ciò che riguarda la temperatura del torrente interno invece non sembrano esserci correlazioni con la pressione atmosferica, il grafico mostra infatti una fase di crescita più lenta rispetto a quella atmosferica, registrando un gradiente termico positivo pari a $0,1^{\circ}/h$. Il picco di temperatura dell'acqua è pari a $10,75^{\circ}$, ovvero $0,6^{\circ}$ in più dello standard, ed è individuato nel punto di massima altezza della colonna d'acqua. La fase di decrescita della temperatura del torrente interno durante l'impulso di piena, come mostrato in Figura 5.13, dura più di due giorni e non raggiunge la temperatura pre-evento.

Gli ultimi dati riguardanti il periodo di piena discusso in questo capitolo sono le variazioni di intensità delle frequenze registrate dal microfono ubicato in Sala Bianca. Come già annunciato, vengono visualizzate solo tre frequenze scelte appositamente per lo scopo della presente ricerca, campionate ogni 10 secondi. La mole di dati è molto elevata, vengono mostrati quindi in grafico solamente gli ultimi tre impulsi della serie di piene riferite a fine ottobre (Fig. 5.14).

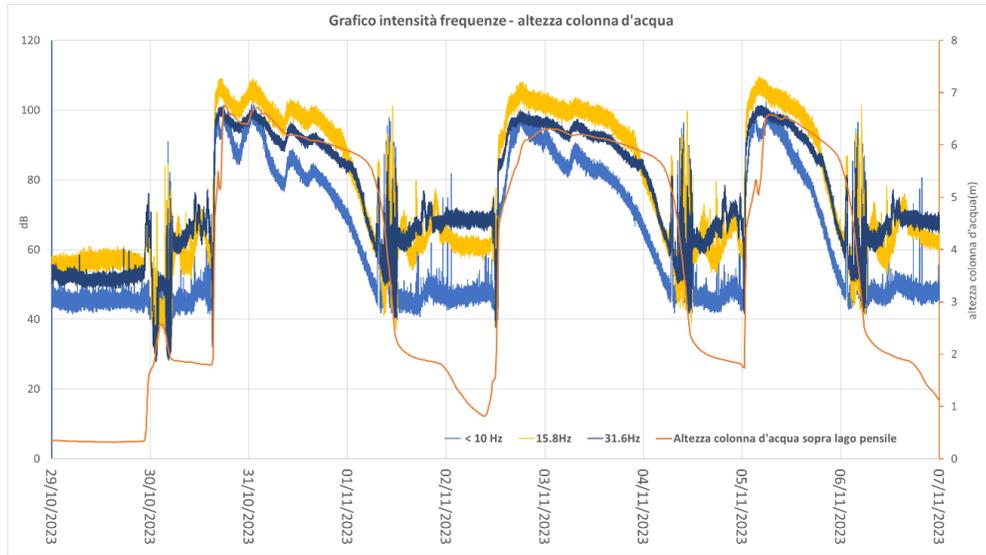


Figura 5.14 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la prima settimana di novembre 2023.

Si può notare come le intensità delle frequenze campionate aumentino molto rapidamente all'aumentare dell'altezza della colonna d'acqua e poi nella fase di decrescita tendano a diminuire più lentamente. Il percorso delle varie curve sembra coerente, presentano tutte un periodo di intensa fluttuazione che precede e segue la piena; durante la piena invece le curve di intensità mostrano differenti variazioni tra gli eventi che sembrano legate alle fluttuazioni della colonna d'acqua. Le frequenze risultano avere fluttuazioni di qualche decibel in periodi di ordinario deflusso mentre, nella fase di carico di una piena si possono notare, analizzando il grafico (Fig. 5.14), nette variazioni in cui le frequenze raggiungono addirittura il doppio del proprio valore di intensità. Nella figura seguente si è approfondito un particolare impulso riguardante la piena del 2-3 novembre 2023 (Fig. 5.15).

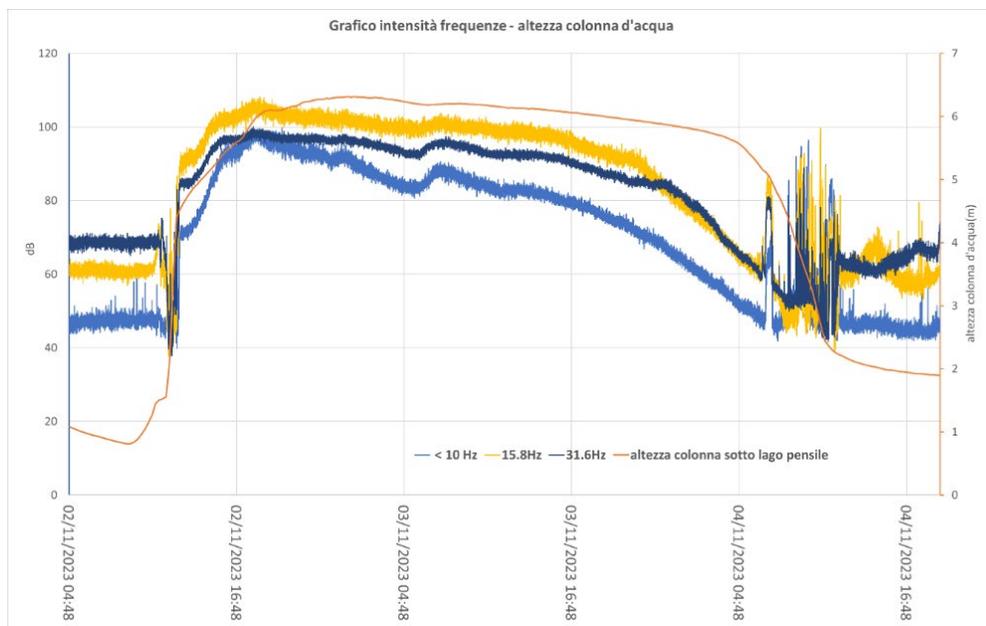


Figura 5.15 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante l'impulso del 2 novembre 2023.

Risulta evidente come l'andamento medio delle tre frequenze sia simile, ma si possono notare anche diverse divergenze. Osservando il grafico si può notare come le curve, se non le modeste fluttuazioni di pochi decibel che risultano normali in qualsiasi periodo registrato, presentano due periodi di alta variabilità, corrispondenti alla fase di carico e alla fase di scarico del sifone. Studiando nel dettaglio queste due fasi è possibile ricavare più informazioni.

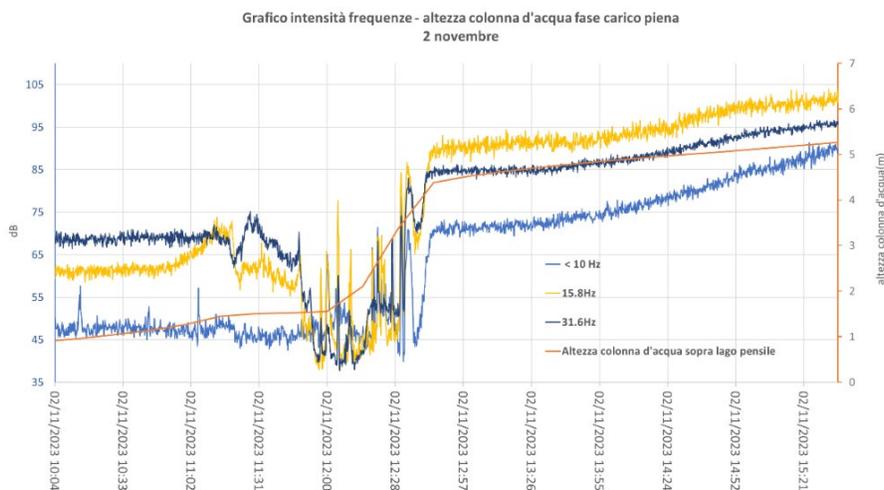


Figura 5.16 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di carico dell'impulso del 2 novembre 2023.

La fase di carico, nel caso presentato (Fig. 5.16), dura meno di un'ora: durante questo intervallo il livello dell'acqua cresce di 3 metri ed è possibile osservare grandi variazioni di intensità delle frequenze. Nella fase iniziale si nota una decrescita nelle intensità delle frequenze seguita poi da una seconda fase dove esse evidenziano un netto aumento. La terza fase è caratterizzata invece da una persistenza nell'incremento delle intensità ma con un tasso più attenuato. La fase di carico finisce quando si stabilizza l'altezza piezometrica e con essa si stabiliscono anche le intensità delle frequenze, raggiungendo il così definito plateau. La fase di scarico viene presentata nel seguente grafico (Fig. 5.17).

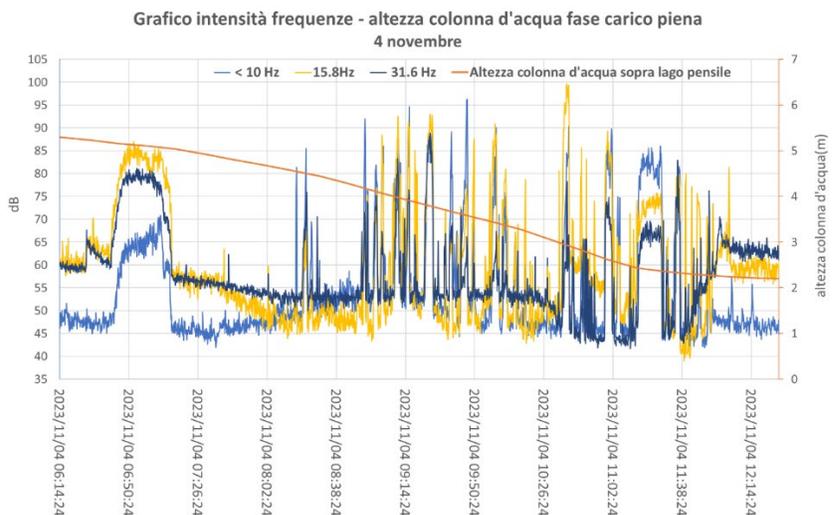


Figura 5.17 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di scarico dell'impulso del 2 novembre 2023.

Come accennato in precedenza, le intensità tendono a diminuire gradualmente, perciò non si nota un netto calo come invece ci si poteva aspettare. In Figura 5.15 si nota infatti come le intensità inizino a calare mentre l'altezza dell'acqua è ancora stabile, nel caso specifico la decrescita delle intensità anticipa la diminuzione dell'altezza della colonna d'acqua di almeno 10 ore. In grafico è mostrata la fase di scarico del sifone, dove in 6 ore la colonna d'acqua decresce di 3 metri, in questo intervallo di tempo il microfono ha registrato una notevole fluttuazione di intensità acustica. Si notano, inoltre, la presenza di picchi puntuali e picchi più lunghi che durano anche fino a 30 minuti.

Viene presentato un ulteriore grafico di scarico riguardante l'impulso di piena del 6 novembre, così da mostrare eventuali relazioni (Fig. 5.18).

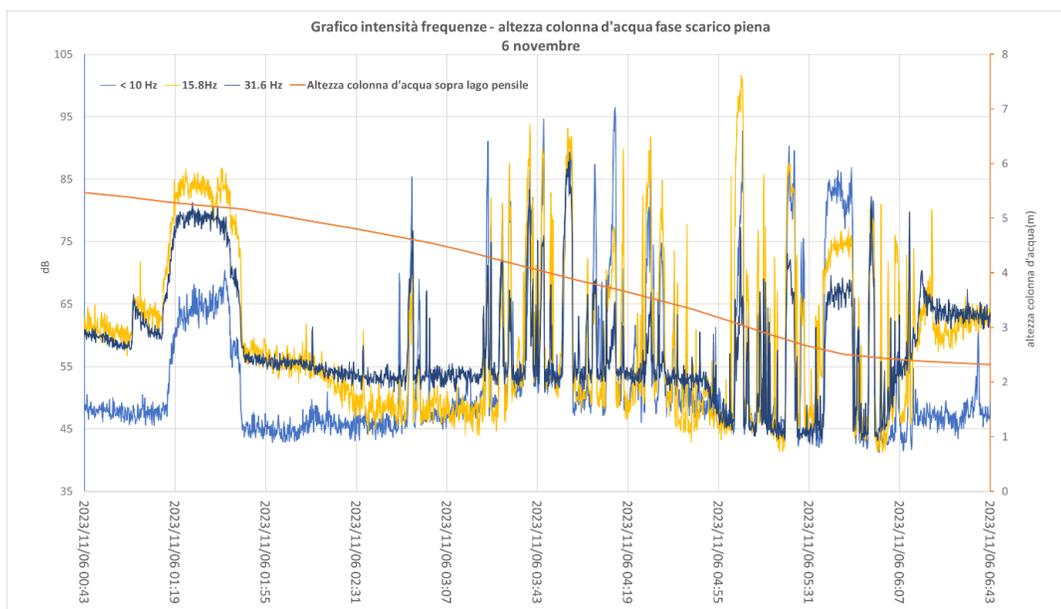


Figura 5.18 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di scarico dell'impulso del 6 novembre 2023.

Come si può notare dal grafico, le oscillazioni delle intensità e la presenza di picchi più o meno puntuali sono osservabili anche durante la fase di scarico del 6 novembre. Questa peculiarità verrà largamente discussa nel prossimo capitolo.

È stato creato un QR code, legato ad un link su dropbox, dove è possibile ascoltare la fase di carico e la fase di scarico dell'impulso di piena avvenuto il 30 ottobre (Fig. 5.19). Si è scelto di offrire questa possibilità per fornire ulteriori informazioni e per rendere più coinvolgente la trattazione presentata. Anche tramite la registrazione si può constatare come la fase di carico sia decisamente improvvisa mentre la fase di scarico tenda ad essere più progressiva e dilazionata nel tempo. Il file audio relativo alla fase di carico rivela inoltre i suoni molto intensi a basse frequenze che anticipano la piena anche di diverse ore.



Figura 5.19 - QR code relativo alla fase di carico e alla fase di scarico della piena avvenuta il 30 ottobre 2023.

-Piena del 2 dicembre

Tra la sera del 30 novembre e la giornata del 1 dicembre 2023 sono state registrate precipitazioni intense distribuite in un lasso di tempo relativamente lungo, che hanno innescato la genesi di una piena nella Spurga delle Cadene: di seguito viene mostrato il relativo grafico (Fig. 5.20).

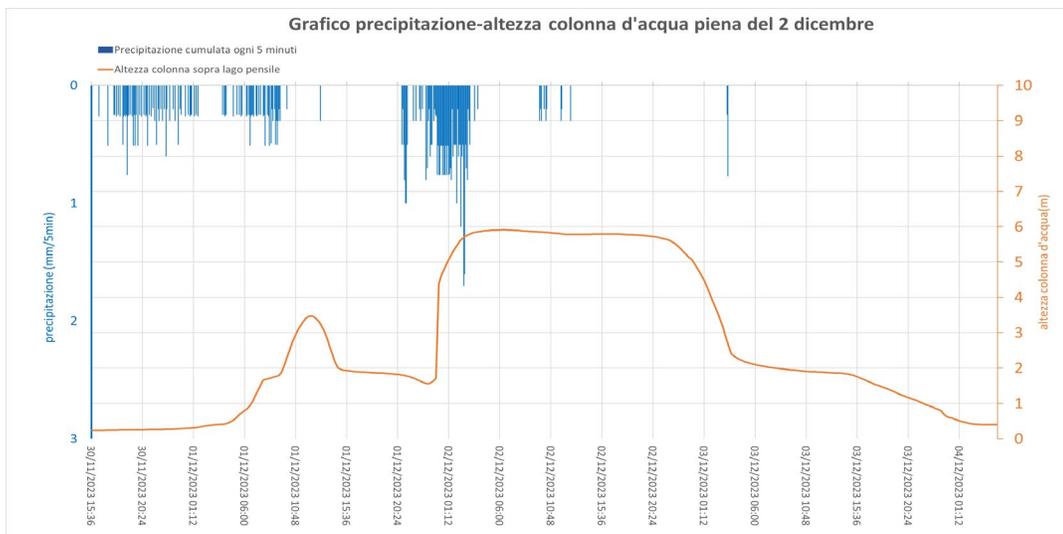


Figura 5.20 - Grafico di precipitazione cumulata ogni 5 minuti e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 2 dicembre.

La piena in oggetto ha dimensioni ridotte rispetto ad altre misurate durante il monitoraggio, non raggiunge infatti i 6 metri di altezza della colonna d'acqua sopra al Lago Pensile. Si è formata in seguito ai 36 mm di pioggia precipitati nell'area di ricarica del sistema. Sebbene la pioggia non sia stata particolarmente intensa, la piena è stata attivata dall'accumulo di acqua dilazionata nei due giorni precedenti. La curva, come si può vedere in Figura 5.20, mostra un primo impulso che non ha ricevuto sufficiente afflusso da monte per riuscire a innescare un'effettiva ondata, seguito da un secondo impulso propiziato da ulteriori precipitazioni di intensità maggiore, che hanno, invece, fornito l'energia necessaria per far avvenire la piena e farla perdurare per 24 ore consecutive.

Per quanto riguarda la pressione atmosferica registrata in Sala delle Meraviglie, relativa alla piena presentata, si osservano dei caratteri leggermente diversi rispetto a ciò che è stato osservato nella piena di fine ottobre (Fig. 5.21).

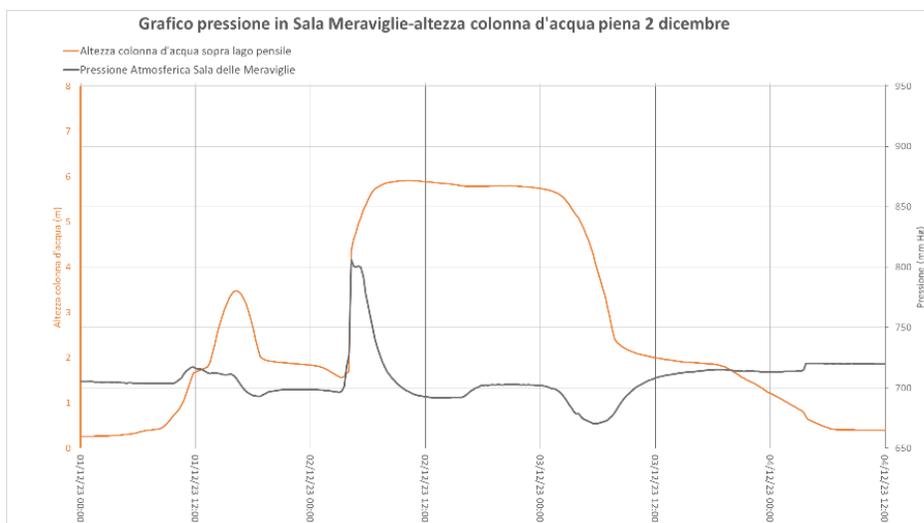


Figura 5.21 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Meraviglie e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 3 dicembre 2023.

Come nel caso precedente, anche in questo episodio di piena la pressione in Sala delle Meraviglie è aumentata seguendo esattamente la curva dell'altezza della colonna d'acqua. Si può notare, analizzando il grafico, come l'entità di variazione della pressione atmosferica misurata sia minore rispetto a ciò che è stato osservato precedentemente. Per quanto riguarda l'aumento di pressione è facile osservare come una variazione di un metro nell'altezza della colonna d'acqua (come nel caso studiato in Figura 5.10) consegua un aumento di pressione atmosferica di 100 mm Hg, corrispondenti a 13,3 kPa. La depressurizzazione misurata nella fase di decrescita dell'evento anche in questo caso raggiunge un valore sui 670 mm Hg.

Un ulteriore dato che viene presentato per questo evento, e che in precedenza non era stato monitorato, è la conducibilità elettrica del torrente interno alla grotta (Fig. 5.22).

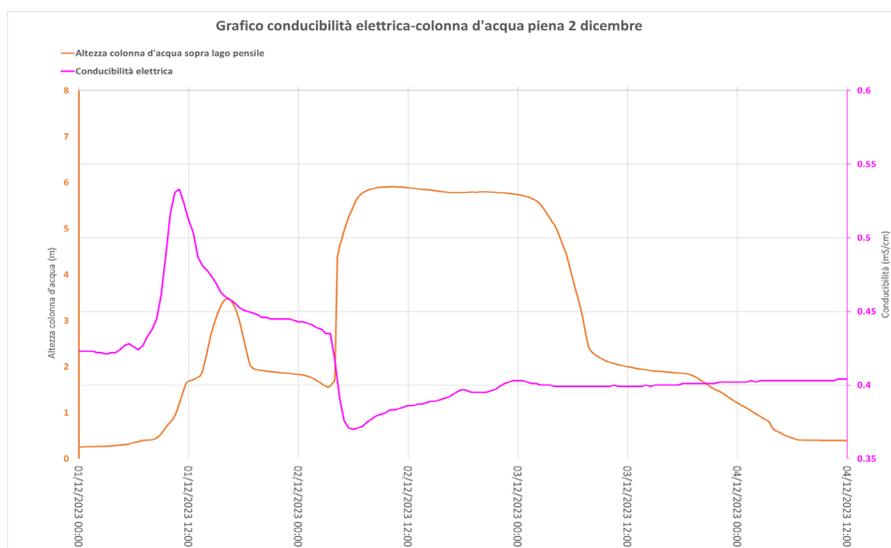


Figura 5.22 - Grafico di conducibilità elettrica e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 2 dicembre 2023.

La conducibilità mostra un picco durante la prima fase di risalita del livello idraulico, per poi avere una rapida decrescita con l'avanzare della piena che raggiunge livelli abbondantemente inferiori

rispetto alle condizioni ordinarie. Al seguito del picco negativo la curva tende a restaurare lentamente, in crescita lineare, i livelli precedenti la perturbazione.

Per ciò che riguarda le variazioni di temperatura, mostrate in Figura 5.23, si può osservare un trend simile a ciò che si è notato precedentemente, la temperatura atmosferica e dell'acqua aumentano con il sopraggiungere della piena; è evidente tuttavia una notevole differenza di variazione della temperatura d'acqua con la piena di fine ottobre mostrata in Figura 5.12.

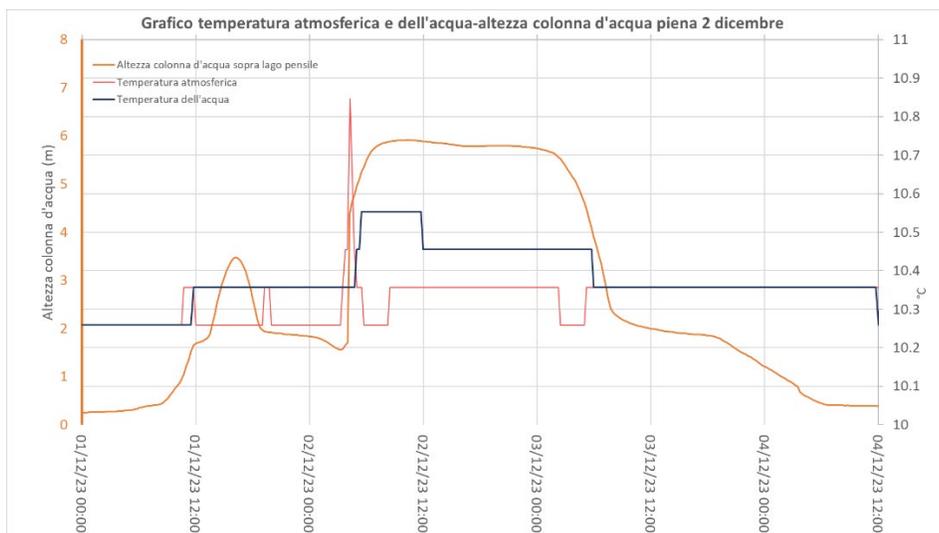


Figura 5.23 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con l'altezza piezometrica riguardante la piena del 3 dicembre 2023.

Infatti, mentre il percorso della temperatura atmosferica è sovrapponibile tra i due grafici dove raggiungono in entrambi i casi 10,85°, la temperatura dell'acqua mostra invece importanti differenze. La variazione di temperatura dell'acqua, nella piena in oggetto, è pari solamente +0,3°.

Analizzando la relazione fra pressione atmosferica e temperatura atmosferica, anche in questo caso si può inferire che le due grandezze sembrano essere correlate. Il medesimo discorso non vale invece per la temperatura dell'acqua (Fig. 5.24).

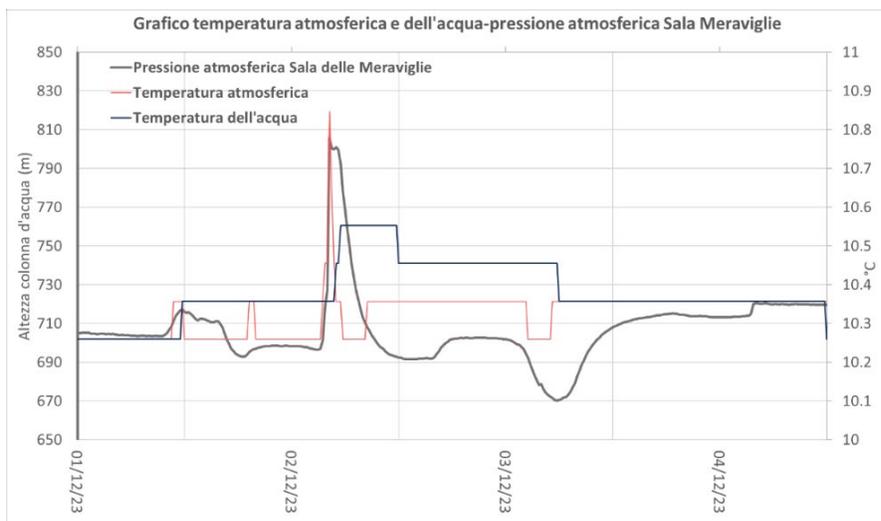


Figura 5.24 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con la pressione atmosferica riguardante la piena del 3 dicembre 2023.

Per quanto riguarda il monitoraggio fonico vengono mostrati i risultati ottenuti di seguito (Fig. 5.25).

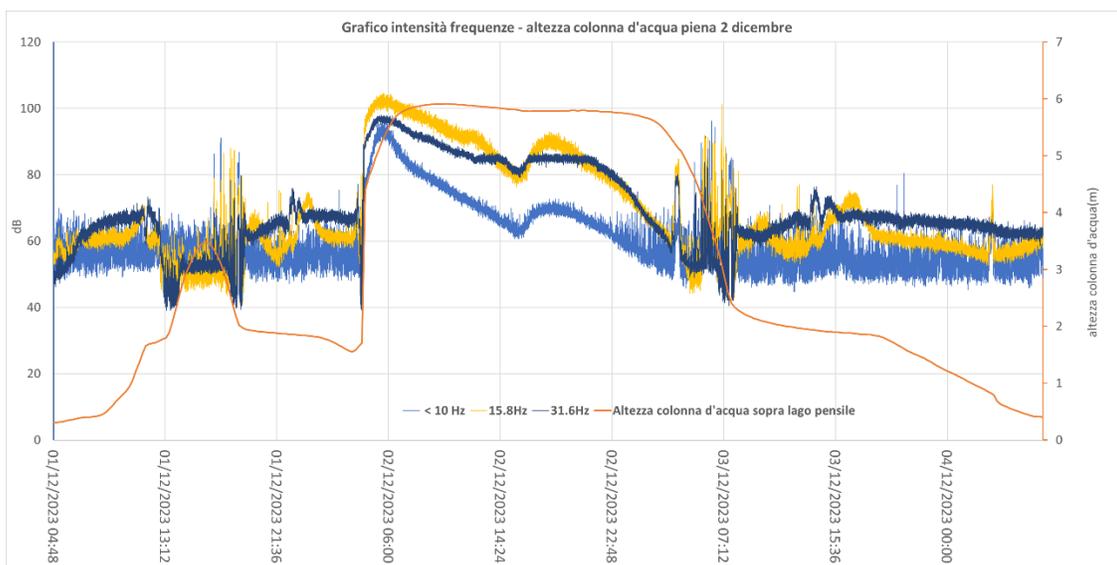


Figura 5.25 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 2 dicembre 2023.

La visione generale è coerente con i grafici precedenti, si nota il medesimo pattern di caratteristiche nelle 3 curve ovvero i due intervalli di alta perturbazione delle intensità ubicati nella fase di carico e nella fase di scarico, il rapido aumento di intensità nella fase di crescita del livello idraulico e invece la più lenta e progressiva diminuzione di intensità delle frequenze relative all'abbassamento del livello dell'acqua.

In Figura 5.26 è mostrata la fase di carico con maggior dettaglio:

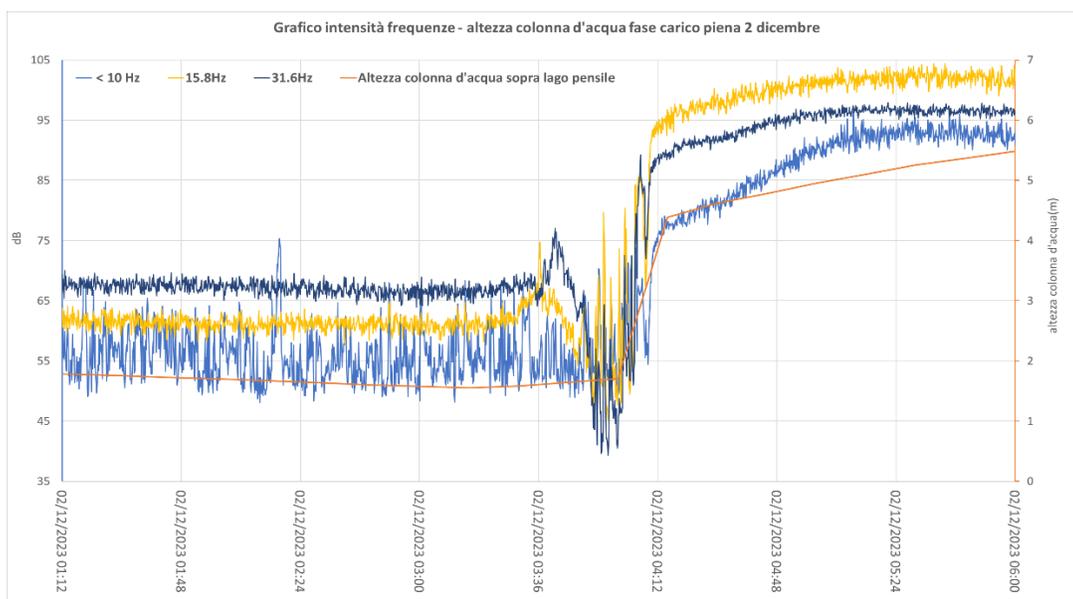


Figura 5.26 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di carico della piena 12 dicembre 2023.

Durante la fase di carico si osserva una diminuzione delle intensità che anticipa l'incremento del livello dell'acqua, segue poi un netto aumento fino a raggiungere il doppio del valore iniziale. Oltre

a queste caratteristiche, che sembrano ripetersi nelle fasi di carico osservate, la morfologia delle curve di intensità non sembra esattamente omogenea comparata ai grafici precedentemente visionati. La fase di scarico invece, come è possibile notare in Figura 5.27, risulta essere coerente con i grafici precedenti.

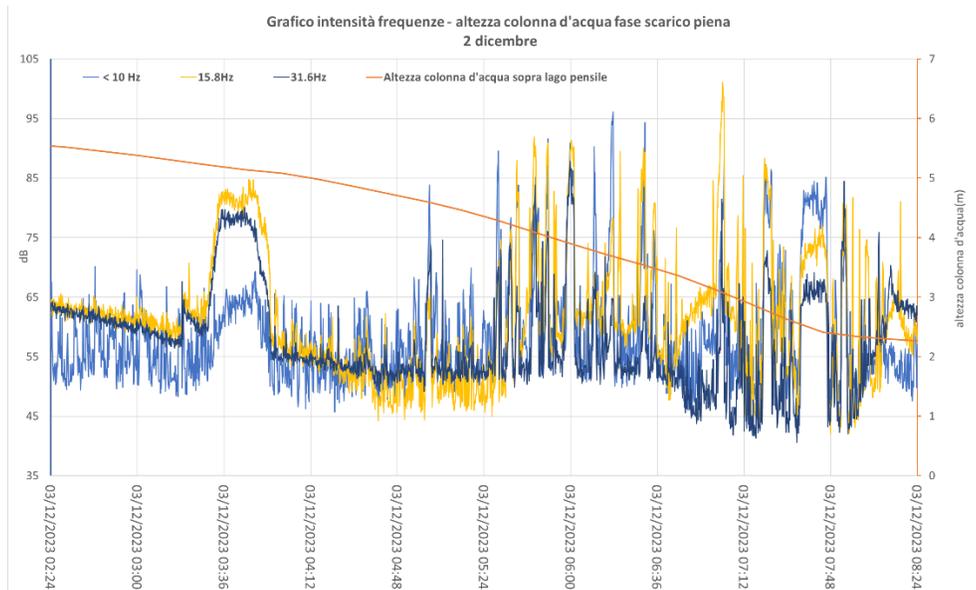


Figura 5.27 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di scarico della piena del 2 dicembre 2023.

Nel grafico in Figura 5.27 si può notare come, oltre alla forma delle curve delle frequenze, anche il decremento della colonna d'acqua mantenga una velocità comparabile con i casi precedenti, nell'ordine dei 3 metri in 6 ore. Un dettaglio particolare che si vuole sottolineare, relativo alla piena in oggetto, risiede nell'impulso di più modesta entità che ha preceduto la piena di sole 12 ore, viene mostrato in Figura 5.28.

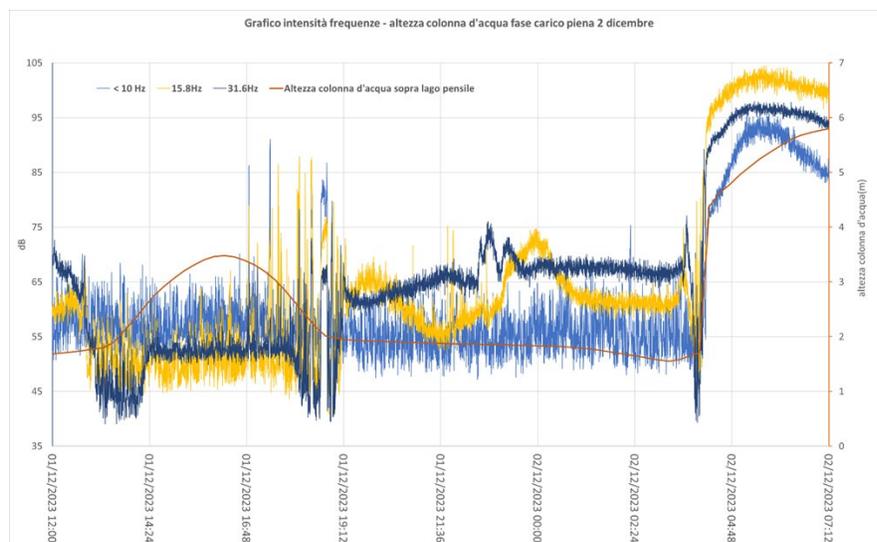


Figura 5.28 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante un impulso di minore entità che ha anticipato di 12 ore la piena del 2 dicembre 2023.

I dati relativi alla suddetta variazione nel livello dell'acqua mostrano un livello massimo raggiunto pari a 3,5 metri al di sopra del trasduttore di pressione e presentano una fase di ascesa e una fase di discesa del livello simmetriche tra di loro, all'interno di un intervallo temporale totale di 3 ore. La peculiarità di questo evento risiede però nella fase di scarico (Fig. 5.29).

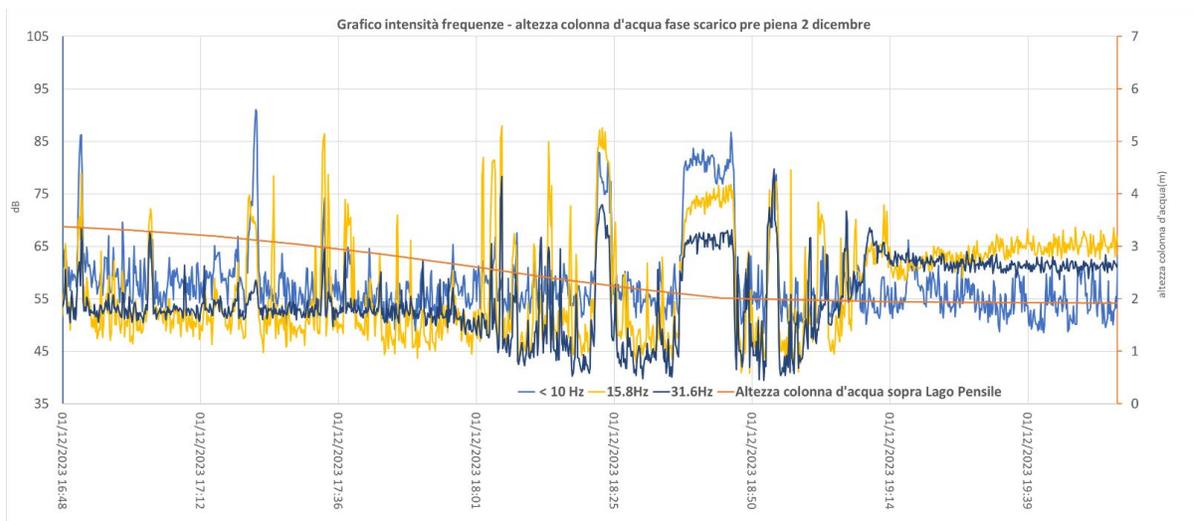


Figura 5.29 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di scarico di un impulso di minore entità che ha anticipato la piena del 2 dicembre 2023.

Sebbene si tratti di un episodio di minore entità, nel grafico in Figura 5.29 si possono ritrovare elementi coerenti alle precedenti fasi di scarico osservate. Questo può essere un dato utile per una successiva discussione del tema.

Durante il monitoraggio si sono registrate tutte le frequenze dello spettro, vengono mostrati in grafico i dati relativi ad ulteriori frequenze scelte come rappresentanti di varie fasce di intensità.

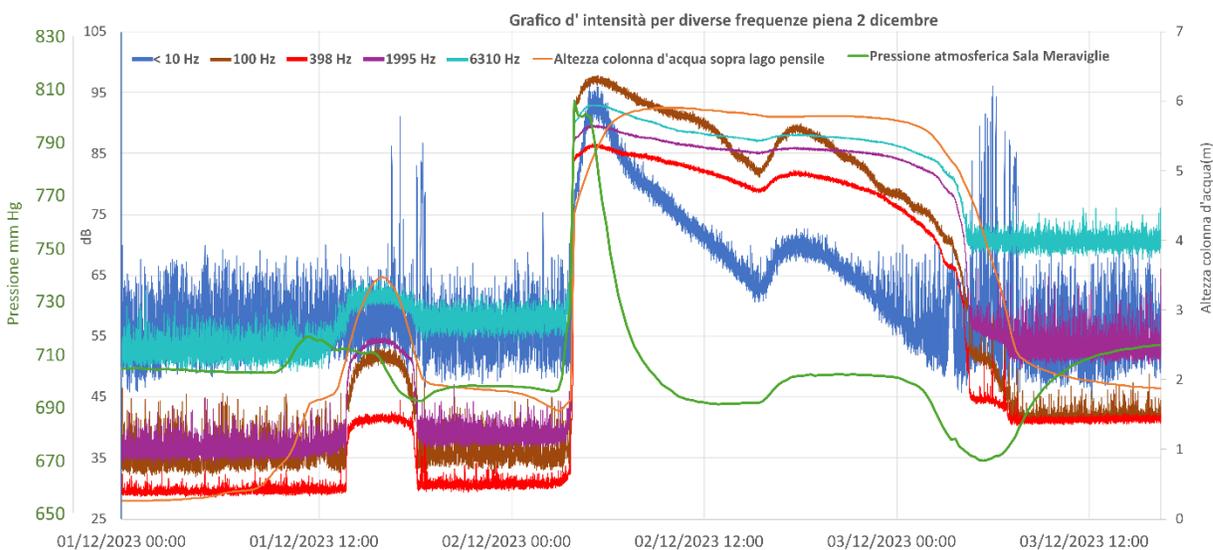


Figura 5.30 - Grafico di intensità di varie frequenze dello spettro, altezza colonna d'acqua e pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie riguardanti la piena del 2 dicembre.

Si è scelto di inserire anche la frequenza <10Hz così da poter comparare le curve con i precedenti grafici. Nella visualizzazione generale si può notare come siano presenti differenze nette fra le

curve. Si osserva come le frequenze più basse mostrino i valori più elevati nella fase iniziale, esse tendono poi a diminuire più velocemente rispetto alle alte frequenze che rimangono invece più costanti. Le basse frequenze sono anche molto più reattive e dipendenti dalle variazioni di pressione atmosferica all'interno di Sala delle Meraviglie. Vengono mostrati in dettaglio le fasi di carico (Fig. 5.31) e scarico dell'evento (Fig. 5.32).

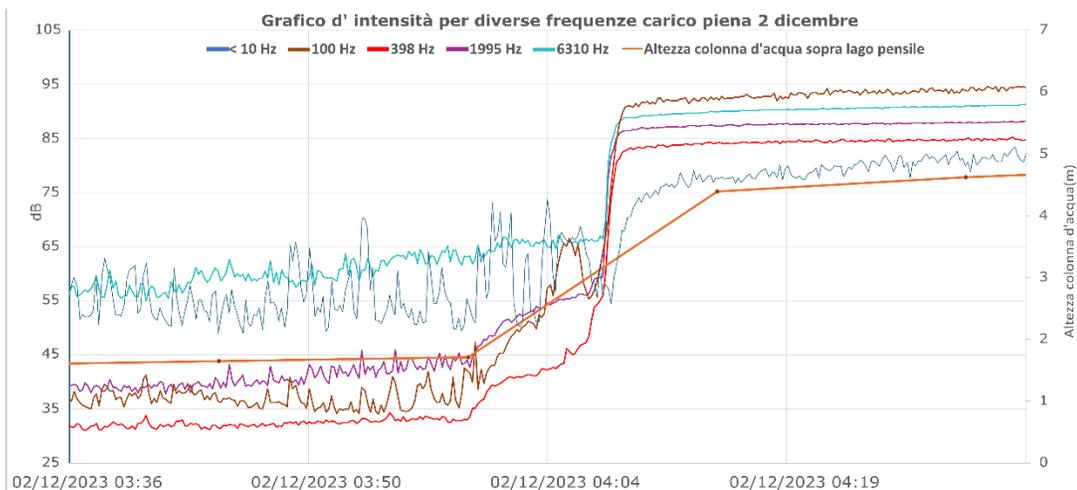


Figura 5.31 - Grafico di intensità di frequenza e altezza della colonna d'acqua riguardanti il carico della piena del 2 dicembre.

Si nota come le frequenze più elevate si presentino decisamente meno disturbate e volubili rispetto alla frequenza <10Hz. Le frequenze presenti in grafico infatti mostrano diverse divergenze con ciò che è stato mostrato nei grafici precedenti: le intensità, nelle più alte frequenze, mostrano un netto aumento, durante la fase di carico, pari a 50 dB in un intervallo di 120 secondi. Quest'aumento di intensità coincide con l'arrivo della piena lungo il canale superiore, esso avviene quando l'altezza dell'acqua sopra il Lago Pensile si trova tra gli 1,70 metri e i 4,38 metri.

La fase di scarico viene presentata nel grafico seguente:

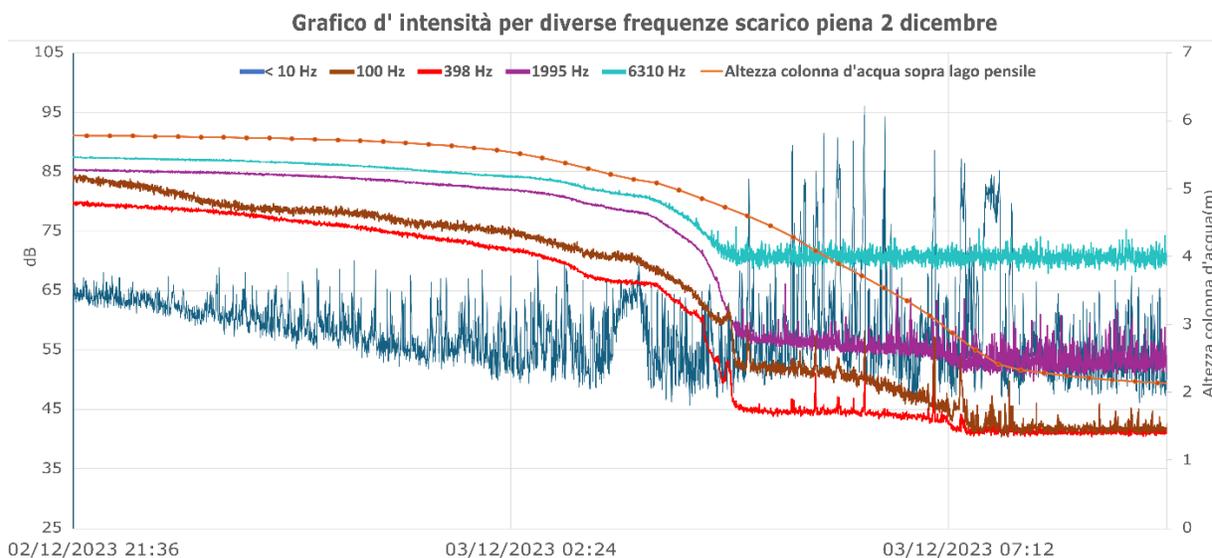


Figura 5.32 - Grafico di intensità di frequenza e altezza della colonna d'acqua riguardanti lo scarico della piena del 2 dicembre.

Osservando il grafico si nota come le intensità della frequenza <10Hz tendono a diminuire progressivamente dopo aver raggiunto l'iniziale picco, mentre le frequenze più alte diminuiscono nettamente solo durante l'abbassamento del livello piezometrico. Si può evincere dal grafico come la piena si concluda in concomitanza di una netta diminuzione di intensità registrata in tutte frequenze più elevate, che si attesta ad un'altezza del livello dell'acqua pari a 4,70 metri sopra il Lago Pensile. Non si notano pattern di picchi nelle frequenze mostrate in grafico, se non nella curva <10Hz già commentata in precedenza.

-Piena del 14 dicembre

Durante la prima metà della giornata del 13 dicembre il pluviometro ubicato nell'abitato di Fosse ha registrato precipitazioni di entità pari a 23 mm. Questo valore di pioggia è risultato sufficiente per innescare la piena visualizzata nel grafico. L'impulso di piena di interesse è durato più di 24 ore, ma il livello si è mantenuto al di sopra dei 2 metri per 15 ore, dato tra i più bassi registrati lungo l'intero periodo di monitoraggio (Fig. 5.33).

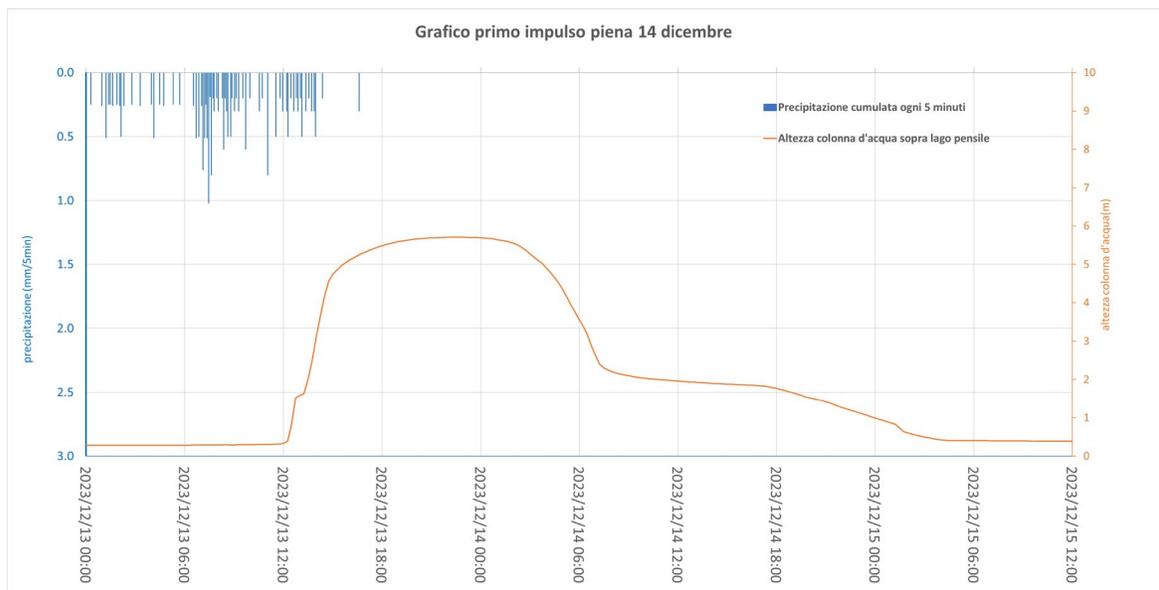


Figura 5.33 - Grafico di precipitazione cumulata ogni 5 minuti e altezza colonna d'acqua riguardante l'impulso del 14 dicembre 2023.

Seppur di ridotte dimensioni, la piena mostra tutti gli aspetti caratteristici osservati nei precedenti episodi.

Il dato riguardante la pressione atmosferica della piena in oggetto viene mostrato nel seguente grafico (Fig. 5.34).

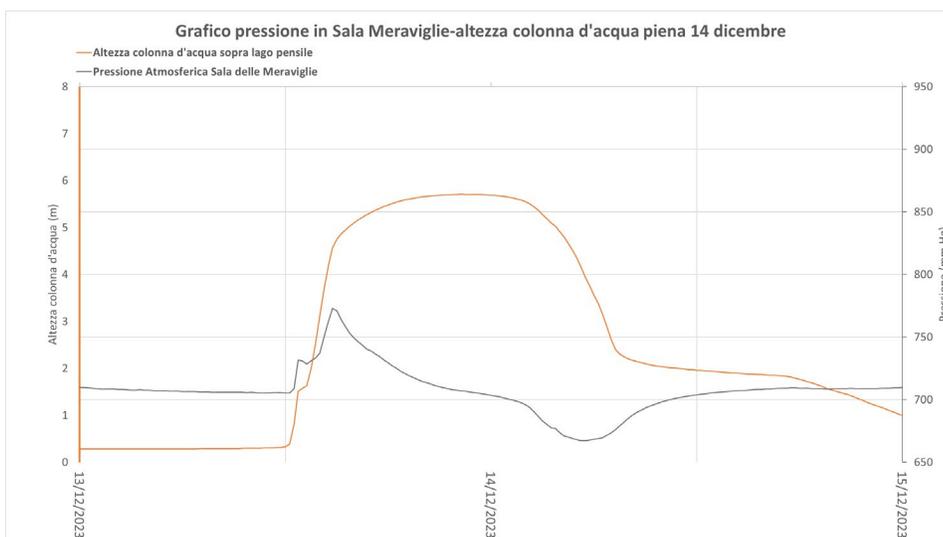


Figura 5.34 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Meraviglie e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 14 dicembre 2023.

La pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie cresce nella fase di carico raggiungendo il picco di 772 mm Hg prima di diminuire progressivamente fino a mostrare la caratteristica depressurizzazione durante la fase di scarico. Il picco di bassa pressione raggiunge il valore di 667 mm Hg, dopodiché i valori ritornano al livello ordinario.

Le condizioni di conducibilità elettrica, registrate durante la piena del 14 dicembre vengono mostrate nel seguente grafico (Fig. 5.35).

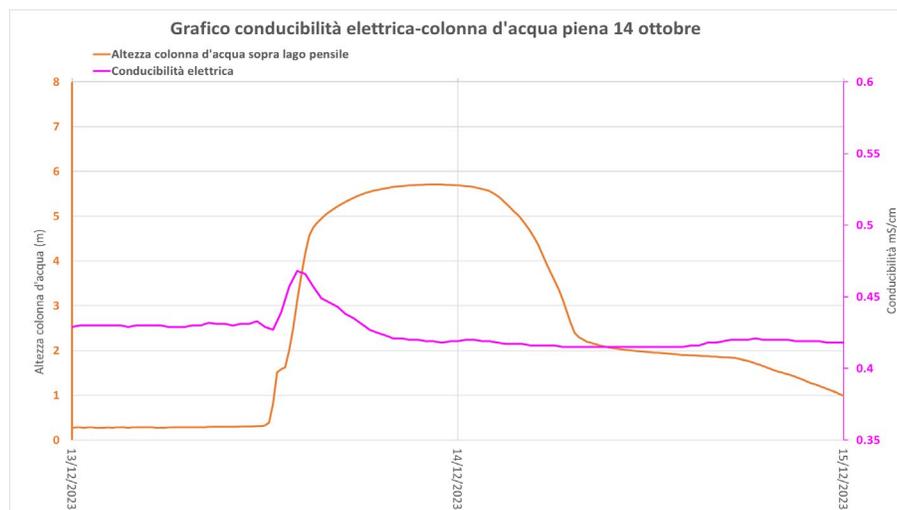


Figura 5.35 - Grafico di conducibilità elettrica e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 14 ottobre 2023.

I valori registrati relativi alla conducibilità elettrica mostrano un chiaro incremento nella prima fase della piena, durante l'innalzamento del livello piezometrico. Il parametro poi decresce senza mostrare un vero e proprio picco negativo, ma solo una progressiva diminuzione fino ad un livello inferiore a quello ordinario. La conducibilità, dopo l'evento, non riesce a ristabilizzarsi rapidamente sui valori precedenti alla piena, impiegherà infatti diversi giorni per raggiungerli nuovamente.

La temperatura atmosferica in Sala delle Meraviglie e la temperatura dell'acqua nel Lago Pensile vengono mostrate nel seguente grafico (Fig. 5.36), comparate con l'altezza del livello dell'acqua.

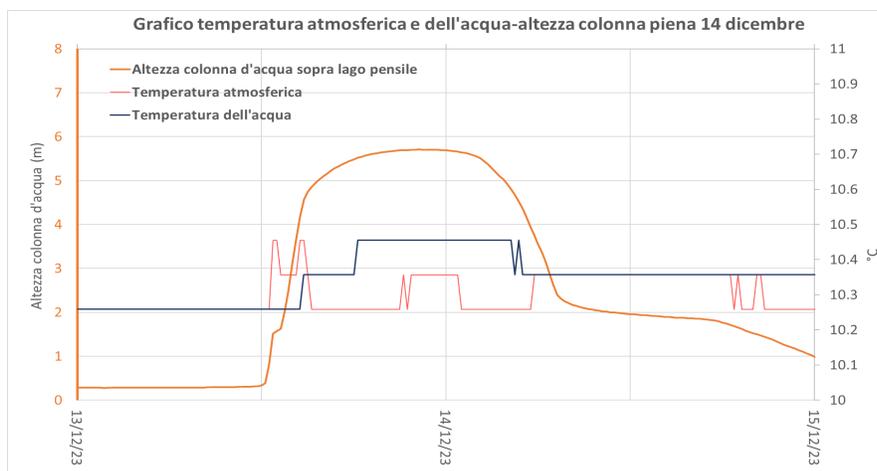


Figura 5.36 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con l'altezza piezometrica riguardante la piena del 14 dicembre 2023.

La curva della temperatura atmosferica, in Figura 5.36, mostra un aumento iniziale pari a $0,2^{\circ}$, per poi segnalare diverse pulsazioni che non sembrano essere correlate con le variazioni del livello piezometrico. La temperatura dell'acqua invece cresce con un marcato ritardo rispetto all'aumento del livello idrico, presenta poi un plateau durante la fase centrale della piena prima di raggiungere valori più freddi durante la fase di scarico. La temperatura dell'acqua sembra avere un legame con le variazioni della portata, mentre la temperatura atmosferica a prima vista risulta indipendente. Viene proposto il grafico tra le suddette temperature e la pressione atmosferica registrata in Sala delle Meraviglie (Fig. 5.37).

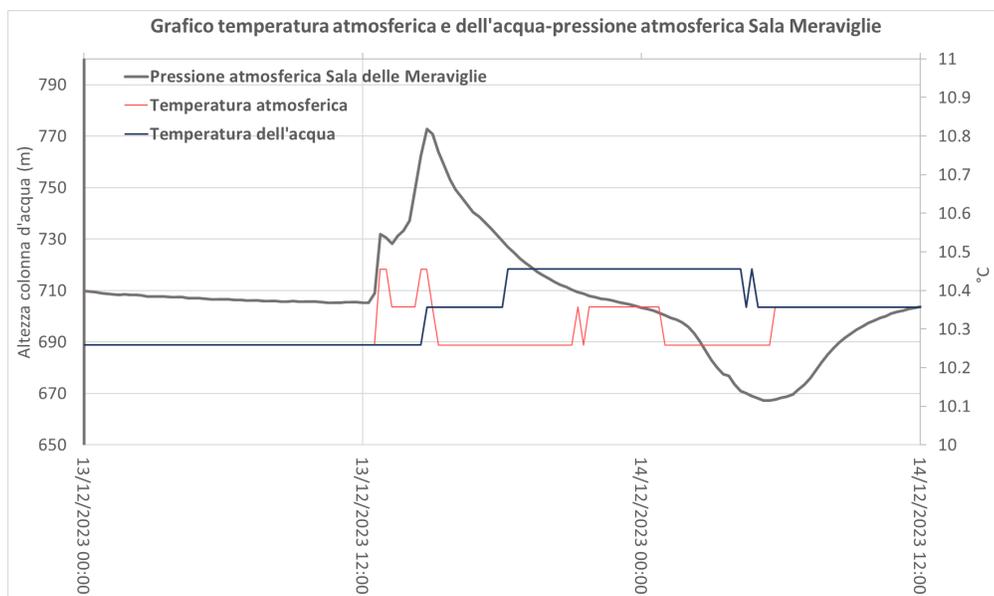


Figura 5.37 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con la pressione atmosferica riguardante la piena del 14 dicembre 2023.

Seppur non chiaramente, si nota come la temperatura atmosferica sembri maggiormente correlabile alla pressione atmosferica misurata. La temperatura atmosferica mostra infatti due picchi positivi iniziali che corrispondono ai due picchi di pressione atmosferica, mentre le fasi più fredde corrispondono bene ai periodi di depressurizzazione della sala. La temperatura dell'acqua invece non sembra avere nessuna correlazione con le variazioni di pressione atmosferica.

Come per le precedenti piene vengono mostrati, nelle seguenti figure, i risultati delle registrazioni acustiche eseguite per l'evento in fase di discussione (Fig. 5.38 - 5.40).

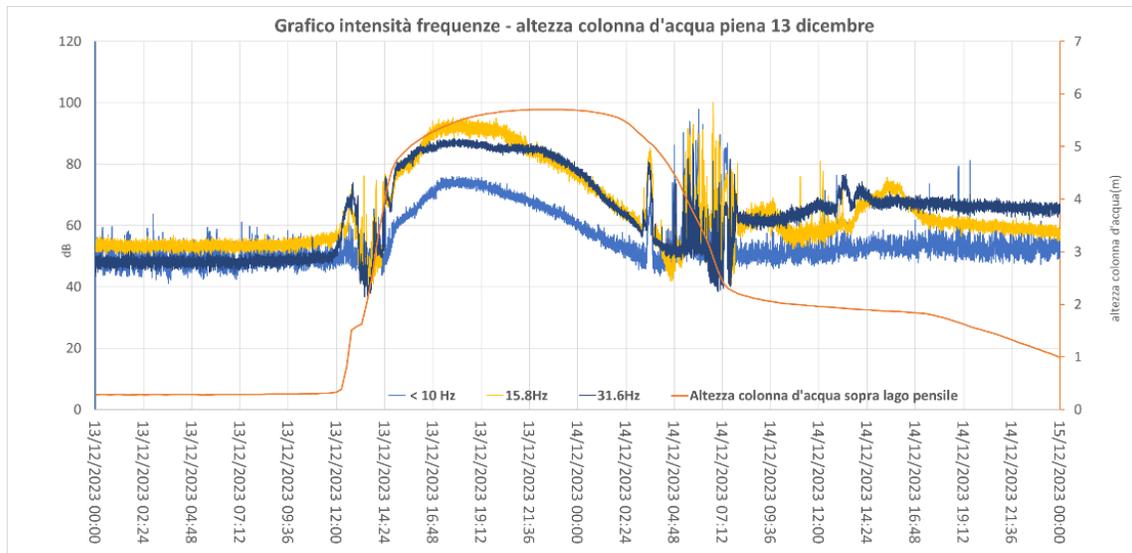


Figura 5.38 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 13 dicembre 2023.

Complessivamente si può osservare come le frequenze mostrino uno spettro di intensità simile a quelli precedentemente presentati. La piena in oggetto è di entità modesta, si può notare infatti come le intensità rimangano relativamente basse, non superando mai i 100 dB. Le curve di frequenza non raggiungono mai il plateau osservato invece per altri eventi: conseguito un certo valore infatti tendono quasi immediatamente a diminuire. Le fasi di carico e scarico presentano, anche in questo caso, periodi di intense perturbazioni delle intensità. La fase di carico, osservata più in dettaglio, viene mostrata nella Figura 5.39.

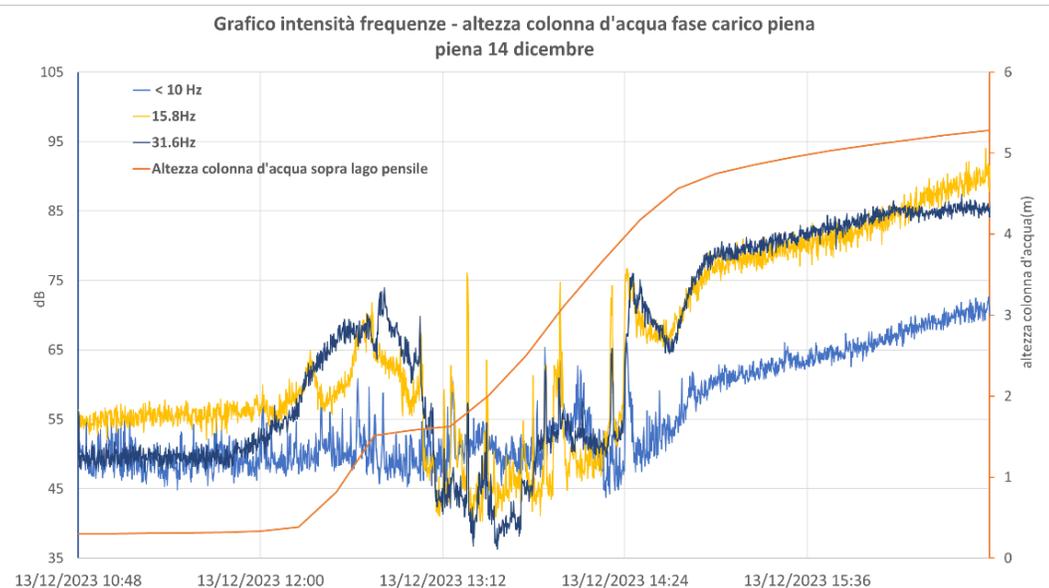


Figura 5.39 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase carico della piena del 13 dicembre 2023.

La fase di innalzamento del livello dell'acqua corrisponde ad un iniziale aumento delle intensità delle frequenze, seguito poi da una contigua e modesta diminuzione. Le intensità aumentano poi

parallelamente alla curva dell'altezza della colonna d'acqua, durante questa fase le curve di frequenza presentano alcuni picchi di alta intensità riconoscibili.

La fase di scarico invece viene visualizzata nella Figura 5.40.

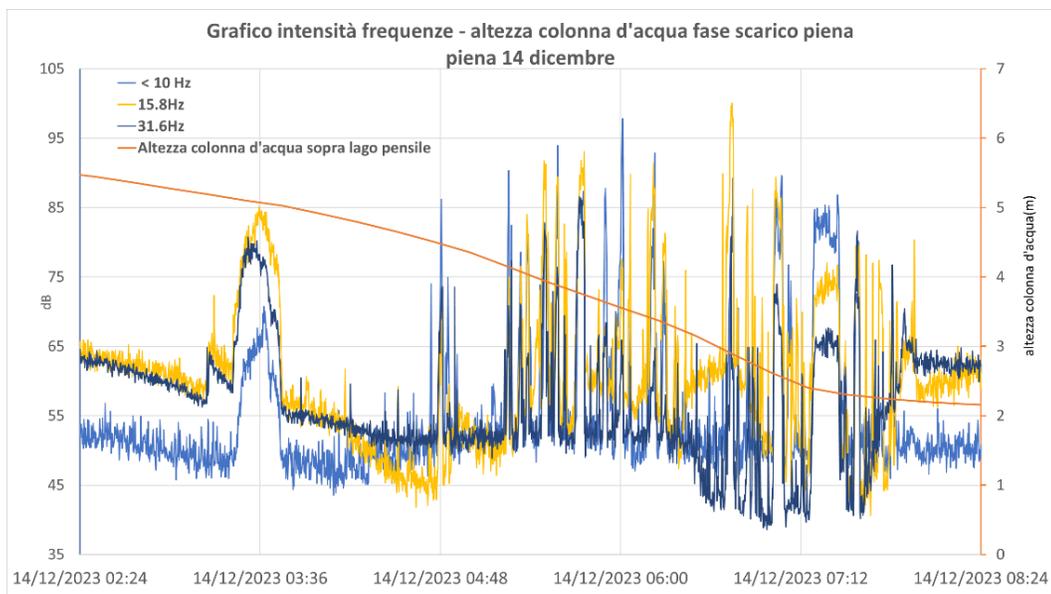


Figura 5.40 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase scarico della piena del 13 dicembre 2023.

Le curve mostrano un'evidente fase di perturbazione arricchita da picchi di elevata intensità di tutte le frequenze presentate. Risulta chiaro come la fase di discesa dia origine a suoni ad alta intensità: è infatti in questa particolare parte della piena che si registra l'unico dato superiore ai 100 dB. Verranno investigate adeguatamente in seguito possibili interpretazioni dei dati qui presentati.

Seconda parte del monitoraggio gennaio-maggio

-Introduzione

Nella seconda parte del monitoraggio si è approfondito lo studio delle dinamiche che si instaurano all'interno della Spurga delle Cadene. In seguito ai dati raccolti nei 5 mesi precedenti si è deciso di modificare la disposizione interna della strumentazione con l'obiettivo di collezionare un maggior numero di informazioni e indagare nuove aree della cavità.

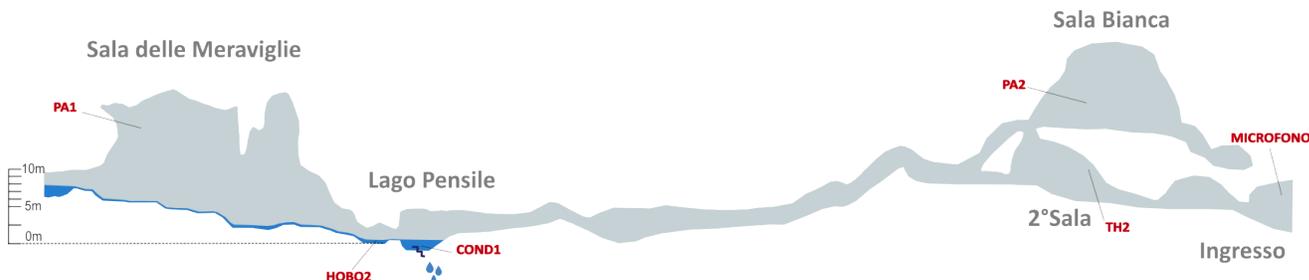


Figura 5.41 - Ubicazione degli strumenti in grotta durante il secondo periodo di monitoraggio.

Come si nota dalla schematizzazione in Figura 5.41, la quasi totalità degli strumenti ha cambiato posizione, l'unico ad essere rimasto nella medesima ubicazione risulta essere HOBO2, ovvero il trasduttore di pressione sopra al Lago Pensile che verrà utilizzato come punto di riferimento e ponte di connessione con la prima parte del monitoraggio. Il trasduttore di pressione precedentemente chiamato HOBO1 è stato inserito in Sala Bianca, così da valutare eventuali variazioni di pressione atmosferica all'interno di questo vano durante le piene, ed è stato battezzato PA2. Il conduttivimetro è stato trasferito poco più a valle, dove si trova una vasca di scolo dell'acqua e dove il dato potrebbe mostrare una variazione più lenta rispetto alla posizione precedente. Un altro importante cambiamento riguarda la collocazione del microfono, il quale è stato inserito in posizione frontale all'entrata della grotta, così da avere la possibilità di registrare eventuali suoni udibili dall'esterno della grotta.

-Presentazione dati

-Livello dell'acqua

Il livello dell'acqua del torrente interno è stato misurato, nella seconda metà del monitoraggio, dal solo trasduttore di pressione HOBO2. Il dato di pressione è stato normalizzato, anche in questo caso, con la pressione atmosferica misurata in Sala delle Meraviglie. La rilevazione copre un intervallo di tempo che spazia tra il 28 gennaio e il 6 giugno 2024 (Fig. 5.42).

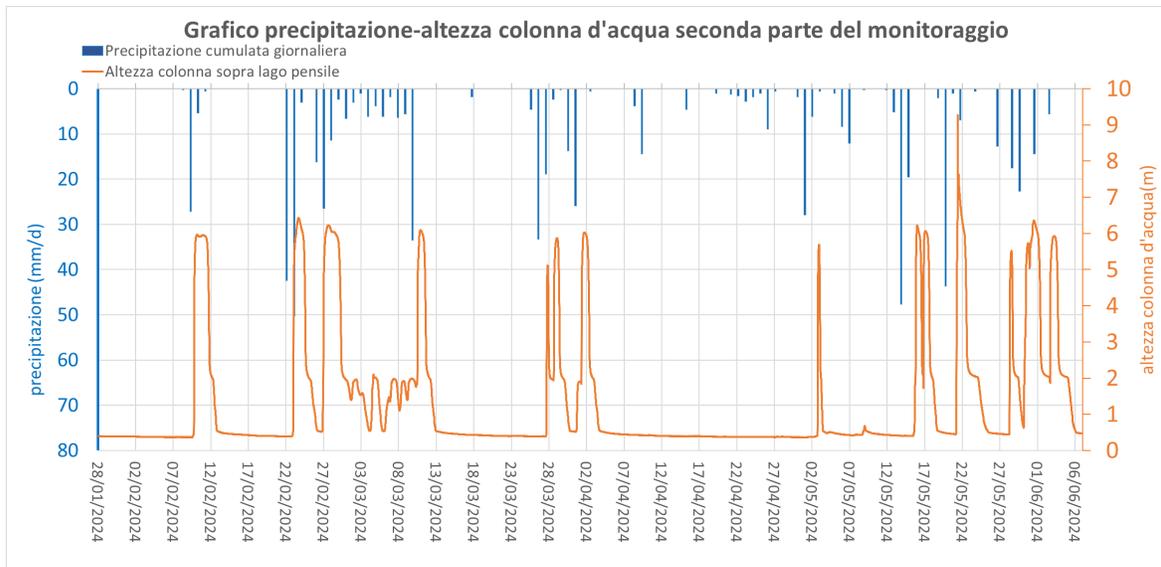


Figura 5.42 - Grafico riassuntivo del secondo periodo di monitoraggio del dato di precipitazione cumulata e altezza colonna d'acqua.

Nel secondo periodo di monitoraggio si sono registrati 14 picchi di piena, alcuni prossimi e legati fra loro, altri invece indipendenti. È doveroso sottolineare l'evento avvenuto il 21 maggio dove gli strumenti hanno registrato un'altezza della colonna d'acqua pari a 9,3 metri, il dato più elevato di tutto il periodo di monitoraggio. In seguito verrà analizzato a parte con più dettaglio.

-Pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie

Il dato riguardante la pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie è fondamentale per investigare ciò che avviene all'interno del reticolo carsico in oggetto, le differenze di pressione che si instaurano in questa sala verranno largamente discusse per provare a formulare un'ipotesi di funzionamento della grotta sorgente.

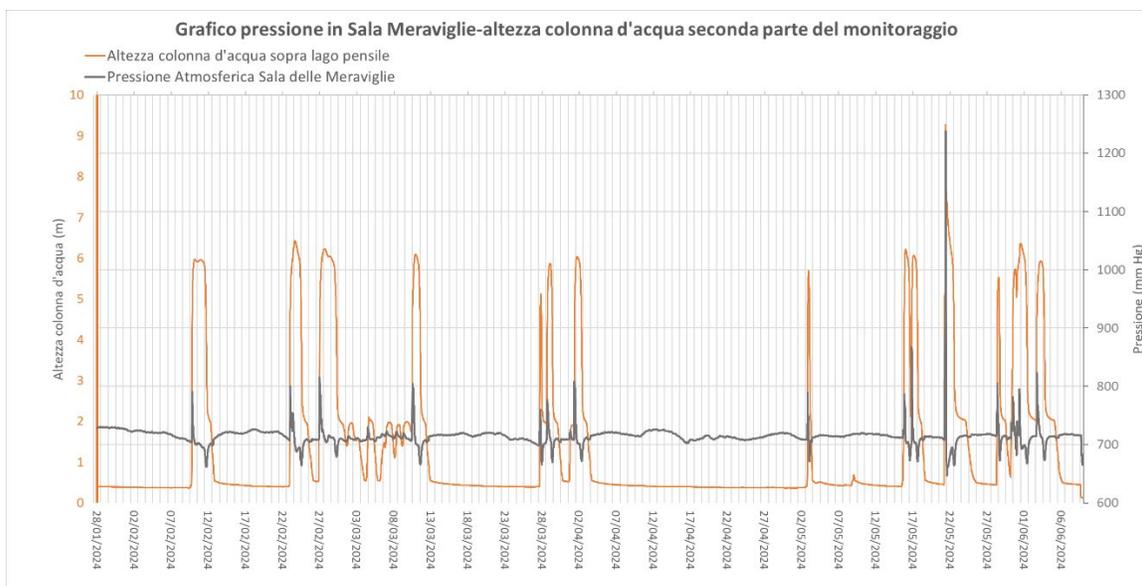


Figura 5.43 - Grafico riassuntivo del secondo periodo di monitoraggio del dato di pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie e altezza colonna d'acqua.

Nella Figura 5.43 è possibile osservare come, anche in questa seconda metà di monitoraggio, ad ogni piena corrisponda una perturbazione della pressione atmosferica, inizialmente con un picco positivo e a seguire un picco negativo. I picchi positivi rilevati non sembrano registrare grandi entità, risultano infatti minori di quelli riportati nella prima parte di monitoraggio, ciò non vale per la piena registrata il 21 maggio. Durante questo evento record infatti, si può notare come la pressione sia cresciuta enormemente, arrivando a toccare livelli di 1237 mm di mercurio, pari a 67 kPa in più rispetto ad una situazione di pressione atmosferica ordinaria.

-Pressione atmosferica Sala Bianca

Una delle novità della seconda parte di monitoraggio riguarda lo studio delle dinamiche che interessano la Sala Bianca, un grande ambiente di grotta che sovrasta il canale superiore e che non è mai raggiunto dalle ondate di piena che vi scorrono al di sotto. A primo impatto si osservano alcune fluttuazioni nella pressione atmosferica interna di questo vano, che sembrano però essere maggiormente caratterizzate da picchi negativi rispetto a quelli positivi. Eccezion fatta, anche in questo caso, per la piena del 21 maggio dove è evidente la presenza di un picco positivo di pressione che supera i 900 mm Hg seguito da un marcato picco negativo; analizzando l'intero set di dati però sembrerebbe un'anomalia più che una regola (Fig. 5.44).

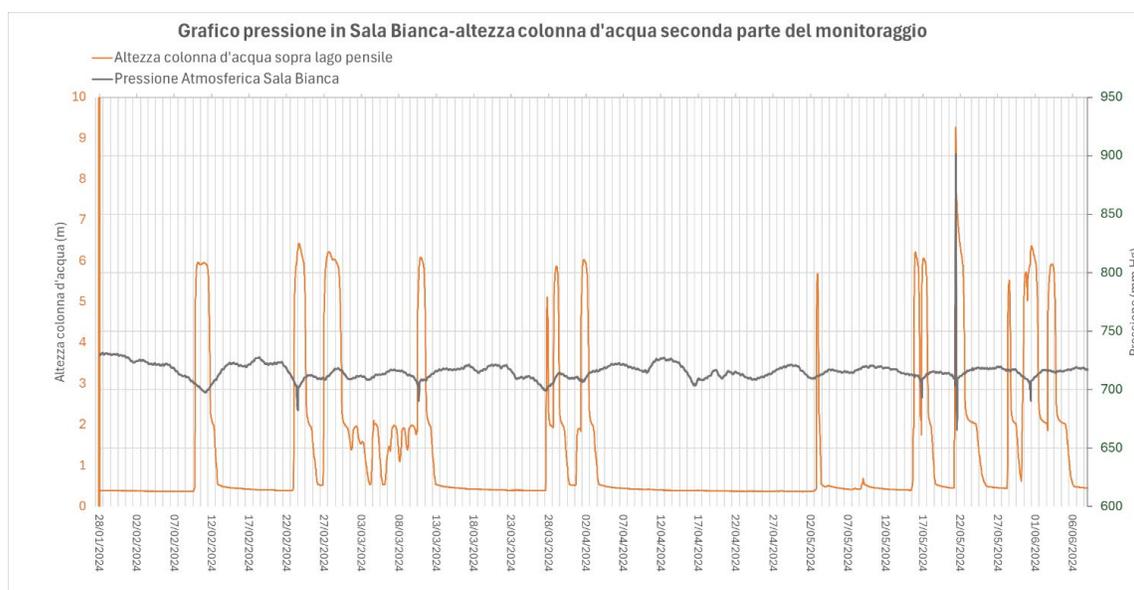


Figura 5.44 - Grafico riassuntivo del secondo periodo di monitoraggio del dato di pressione atmosferica in Sala Bianca e altezza colonna d'acqua.

Leggendo il grafico è infatti facile notare come gli unici dati che superano 750 mm Hg nei 5 mesi di monitoraggio visualizzati lì si può trovare esclusivamente il 21 maggio, dove la pressione atmosferica presenta un'eccezionale variazione.

-Conducibilità elettrica

Il parametro di conducibilità elettrica è stato monitorato per l'intero periodo: in Figura 5.45 si può notare come esso sia altamente perturbato dall'arrivo delle piene. Durante i periodi in cui non avvengono eventi di piene si osserva come la conducibilità tenda ad aumentare progressivamente.

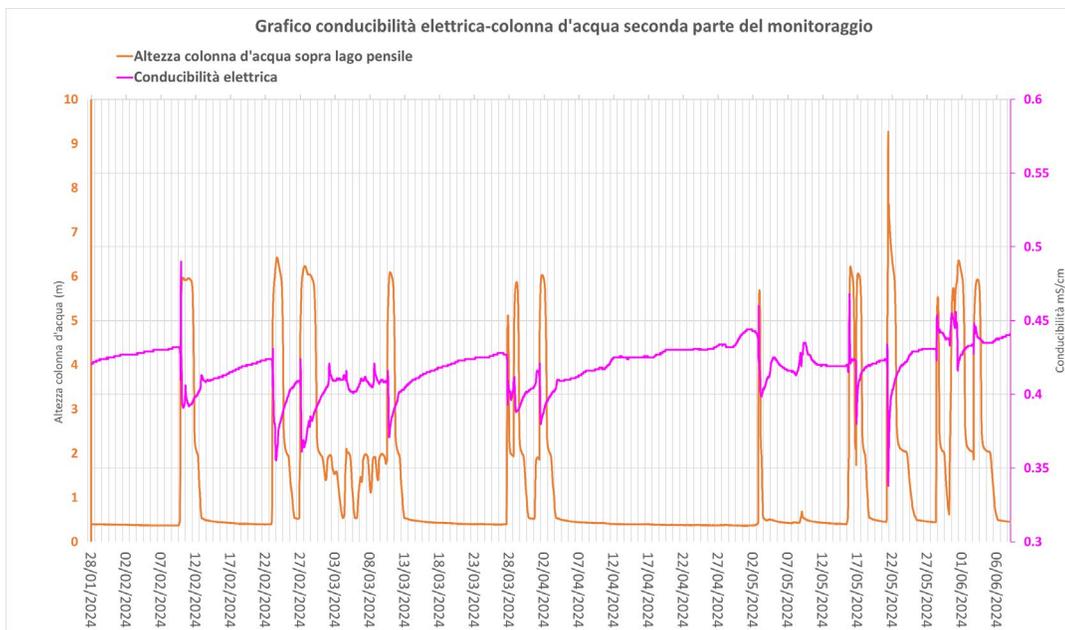


Figura 5.45 - Grafico riassuntivo del secondo periodo di monitoraggio del dato di conducibilità elettrica e altezza colonna d'acqua.

Durante la piena dell'8 febbraio si è registrato il valore più alto di conducibilità, mentre il minore è stato registrato durante la piena record del 21 maggio.

- Temperatura atmosferica e dell'acqua

La temperatura, anche in questo secondo periodo di monitoraggio, mostra un'intensa variazione in concomitanza con la sopraggiunta degli eventi di piena. Come si nota dalla Figura 5.46, la temperatura atmosferica varia maggiormente rispetto a quella dell'acqua.

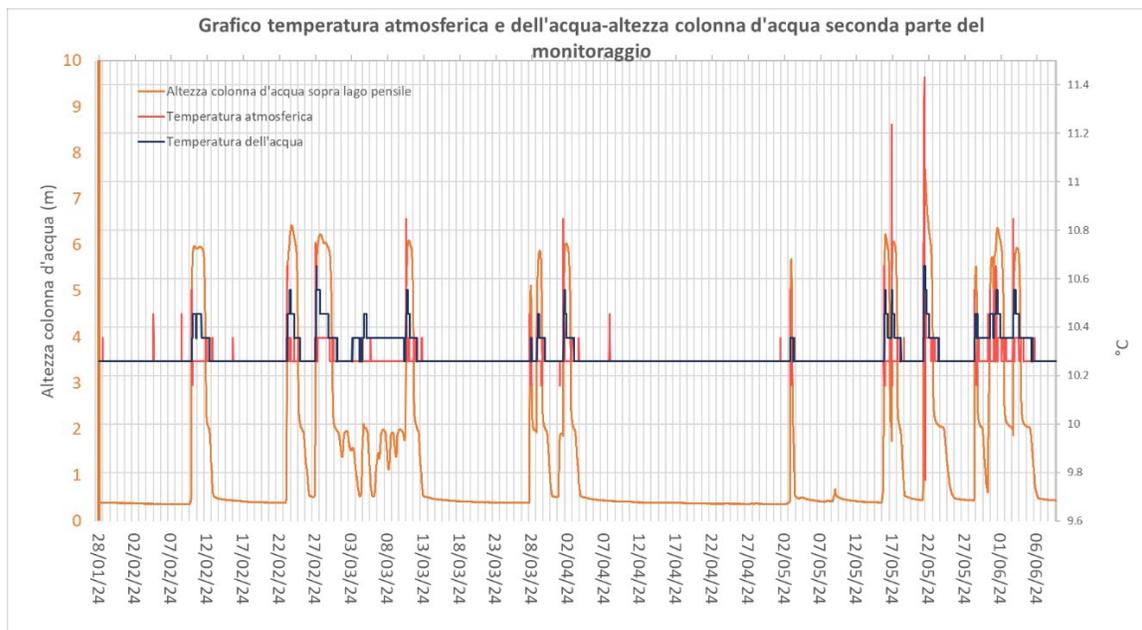


Figura 5.46 - Grafico riassuntivo del secondo periodo di monitoraggio del dato di temperatura atmosferica, temperatura dell'acqua e altezza colonna d'acqua.

I massimi e i minimi di temperatura registrati durante il monitoraggio coincidono anche in questo caso con la piena registrata il 21 maggio: l'escursione termica riguardante la temperatura atmosferica varia, durante questo evento, più di 1,5 gradi in due ore. Questo evento anomalo esibisce un picco positivo molto evidente seguito da un picco negativo altrettanto eccezionale.

- Monitoraggio acustico

Nella seconda metà di monitoraggio il microfono è stato ubicato nella zona d'ingresso della grotta vicino al varco d'entrata, questa posizione ha permesso di registrare i suoni prodotti dalla grotta e udibili dall'esterno, senza rischio di essere travolto dall'ondata di piena. Lo strumento ha registrato in continuo per tutta la durata del monitoraggio e si sono poi analizzate, in fase di rielaborazione, le medesime frequenze rispetto alla fase precedente, ovvero <10 Hz, 15,8 Hz e 31,6 Hz. Viene mostrato di seguito un grafico di presentazione delle frequenze prese in esame, in particolare esso riguarda due piene registrate nella seconda metà del mese di febbraio 2024 (Fig. 5.47).

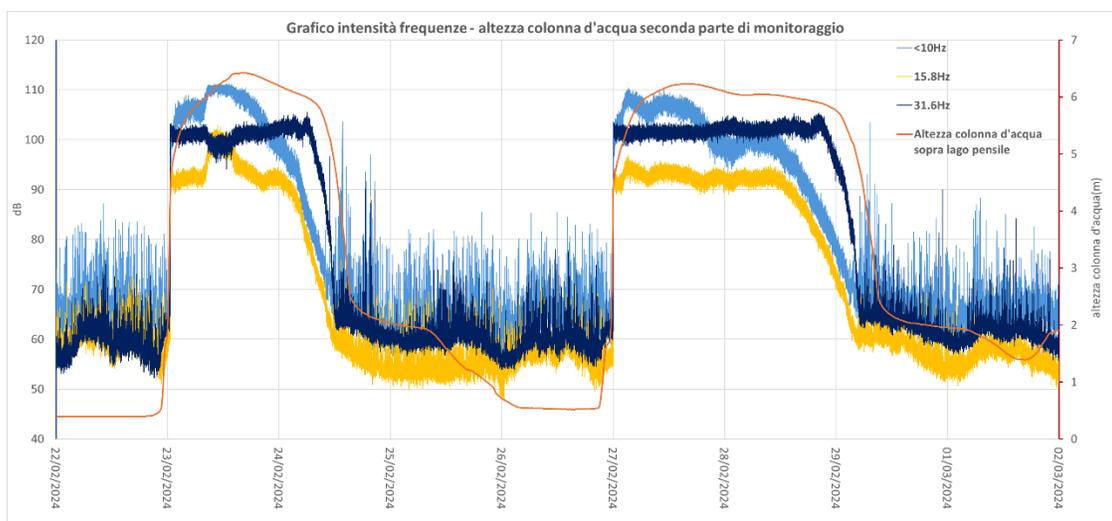


Figura 5.47 - Grafico del dato di intensità di frequenza e altezza colonna d'acqua riguardante l'ultima settimana di febbraio 2024.

Il grafico non presenta l'intero periodo di monitoraggio bensì un intervallo di tempo pari a 10 giorni poiché risulta complicato riuscire a gestire i tanti dati presenti; in seguito verranno mostrati in dettaglio i dati riguardanti specifici eventi di piena. Anche variando la posizione del microfono lo spettro di intensità sembra simile a prima vista: si può notare infatti come le tre frequenze aumentino di intensità con il sopraggiungere delle piene e che durante la fase di carico l'accrescimento sia repentino mentre la diminuzione sia più graduale nella fase di scarico.

-Piena del 23 febbraio

La piena registrata verso la fine del mese di febbraio è stata innescata dalle intense precipitazioni, registrate a partire dal giorno 22 febbraio, che hanno coinvolto il bacino di ricarica della Spurga delle Cadene.

Viene mostrato in Figura 5.48 il grafico relativo alla piena, si può osservare come il collegamento tra le precipitazioni e la salita del livello dell'acqua in grotta sia molto veloce. Il picco della colonna d'acqua si attesta alle ore 14:30 del giorno 23 febbraio 2024 con un'altezza di 6,4 metri. La velocità di innalzamento del livello è particolarmente elevata inizialmente, studiando i dati infatti si può notare come tra le 22:30 del 22 febbraio e le 00:45 del 23 febbraio il livello sia salito da 0,5 a 4,7 metri, con un tasso di incremento medio pari a 3,1 cm al minuto. La precipitazione cumulata, che ha coinvolto l'area di ricarica nella fase precedente alla crescita del livello piezometrico sopra al Lago Pensile, è pari a 25 mm di pioggia, ed è stata sufficiente per innescare la piena.

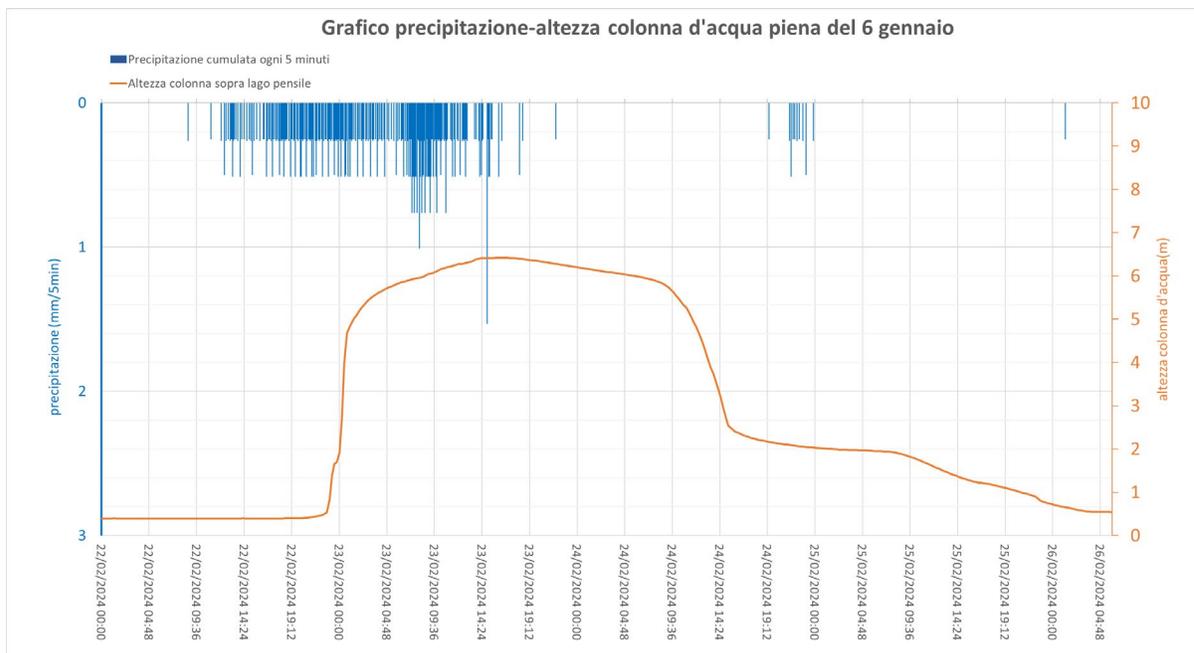


Figura 5.48 - Grafico di precipitazione cumulate ogni 5 minuti e altezza colonna d'acqua riguardante l'impulso del 6 gennaio 2024.

L'impulso di piena presenta una fase di decrescita rapida fino al raggiungimento di un livello pari a 2 metri di altezza, a partire da questo valore poi la diminuzione appare più progressiva e maggiormente dilazionata nel tempo. L'intervallo in cui la piena si è mantenuta al di sopra di due metri di altezza si attesta a più di 40 ore, durata che è stata propiziata dalle intense precipitazioni che hanno continuato a verificarsi mentre la piena era già in atto.

Per quanto riguarda il parametro della pressione atmosferica all'interno della Sala delle Meraviglie è possibile notare dalla Figura 5.49 come sia stato evidentemente perturbato, il massimo valore di pressione raggiunto risulta però relativamente basso, sfiorando gli 800 mm Hg.

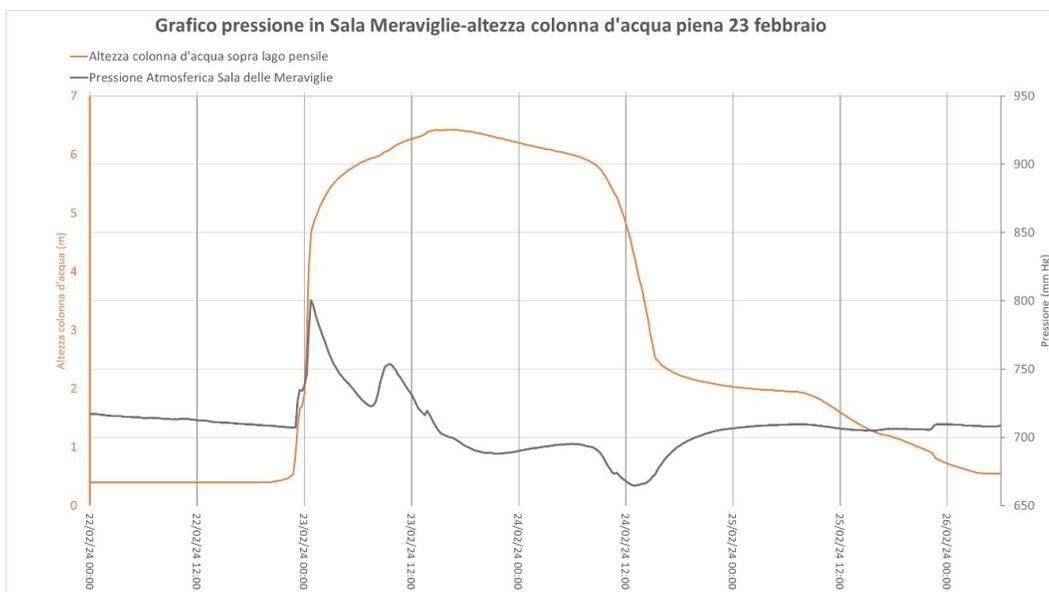


Figura 5.49 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Meraviglie e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 25 febbraio 2024.

In Figura 5.49 si può osservare anche un secondo picco di pressione atmosferica positivo, meno pronunciato, che segue il primo. La depressione viene registrata, anche in questo caso, durante la fase di scarico dell'evento di piena e presenta un valore pari a 670 mm Hg che è coerente con i casi precedentemente esaminati. Il valore di pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie si ristabilisce su valori ordinari mentre il livello dell'acqua sta ancora decrescendo.

Il dato della pressione, in questa seconda metà di monitoraggio, è arricchito dal trasduttore inserito in Sala Bianca, un grande ambiente di grotta ubicato al di sopra del canale superiore. In questa Sala la pressione atmosferica registrata mostra un comportamento totalmente diverso, di seguito viene mostrato il grafico riguardante la piena in oggetto (Fig. 5.50).

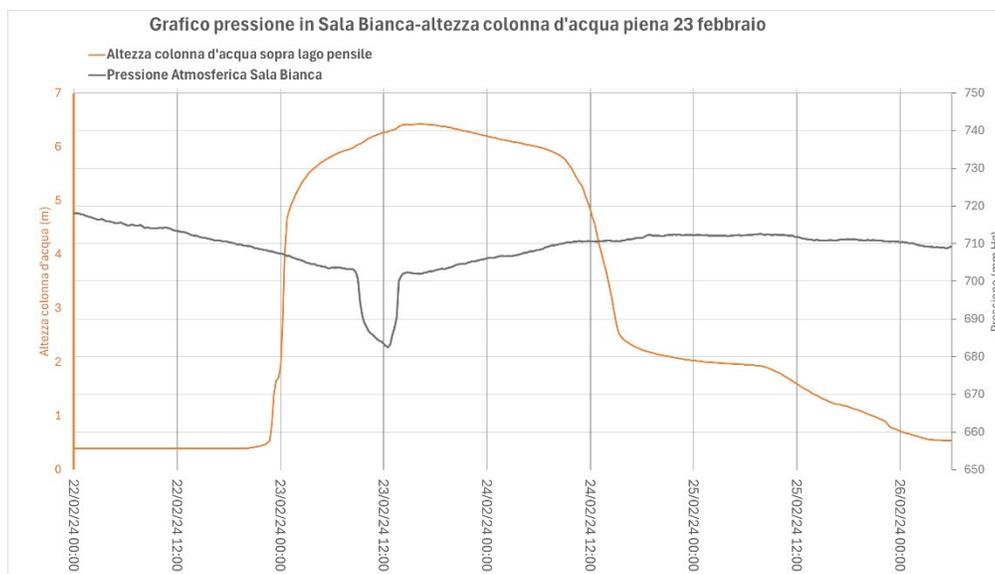


Figura 5.50 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Bianca e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 25 febbraio 2024.

La scala di misura della pressione nel grafico è stata diminuita così da enfatizzare le variazioni presenti. Si può notare che, rispetto ai periodi ordinari, non avviene nessun aumento di pressione, anzi è presente un'importante diminuzione marcata in particolare dal picco negativo che si attesta alle ore 12 del 23 febbraio. Dopo una progressiva e lenta diminuzione di pressione, registrata durante la fase di carico della piena, si osserva un rapido decremento di 20 mm Hg seguito da una ancor più rapida risalita di pressione di ugual entità. Il picco negativo più pronunciato mostra una durata totale pari a 5 ore e ha inizio nel momento in cui l'acqua sopra al Lago Pensile raggiunge un'altezza pari a 6 metri.

Durante l'evento il dato relativo alla conducibilità elettrica mostra diverse perturbazioni, esibisce un picco positivo relativamente modesto seguito da una diminuzione fino al raggiungimento del valore di 0,355 mS/cm, di 0,07 mS/cm minore del valore indisturbato (Fig. 5.51).

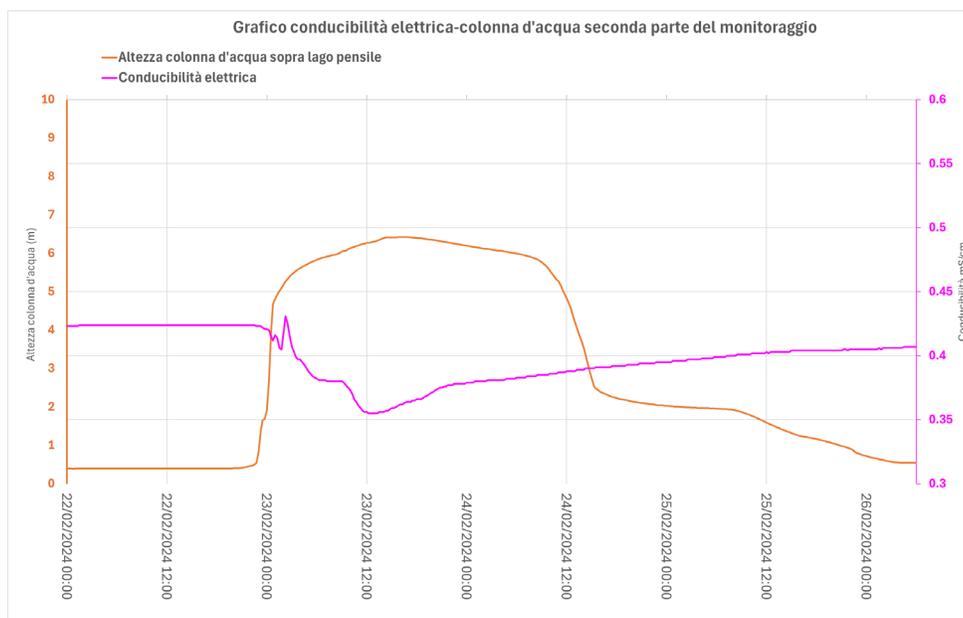


Figura 5.51 - Grafico di conducibilità elettrica e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 23 febbraio 2024.

Le differenze di conducibilità sono osservabili in tutti gli eventi di piena registrati, presentando variazioni di diversa entità. In questo caso l'abbassamento del parametro è nettamente più evidente rispetto all'aumento. Il valore si ristabilisce a valori ordinari solo giorni dopo l'evento di piena.

Nell'evento considerato, le temperature presentano una minor variazione rispetto ad altri eventi approfonditi in precedenza, mostrano tuttavia caratteristiche comuni. Come si può notare in Figura 5.52, la temperatura dell'aria varia prima della temperatura dell'acqua, sono presenti infatti due picchi di temperatura atmosferica che si localizzano nel momento dell'arrivo della piena stessa.

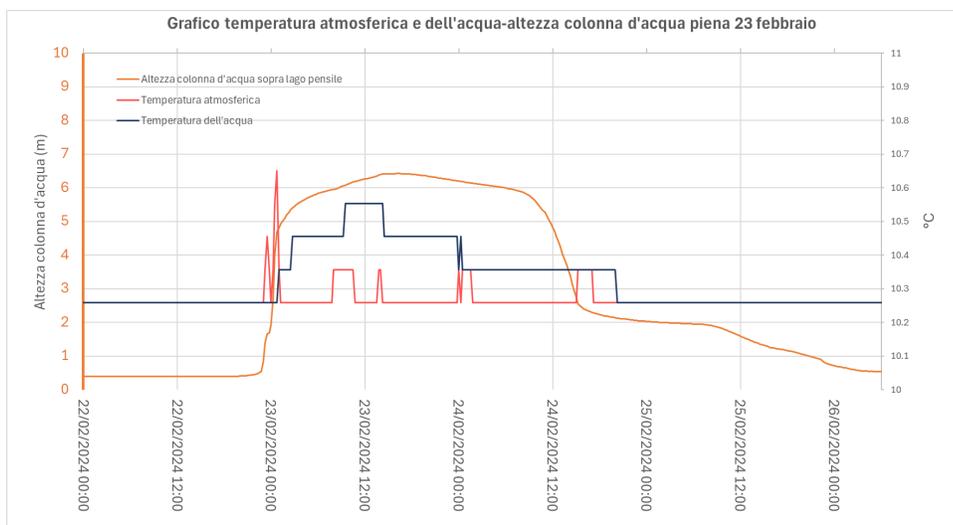


Figura 5.52 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con l'altezza piezometrica riguardante la piena del 26 febbraio 2024.

La temperatura dell'acqua aumenta fino a raggiungere un picco di +0,3° rispetto alla temperatura standard, in linea con le osservazioni fatte nei precedenti casi, e si ristabilisce su valori ordinari una volta passata l'onda di piena. Anche in questo caso i picchi di temperatura atmosferica sono correlabili all'aumento di pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie, informazione importante per una futura interpretazione delle dinamiche.

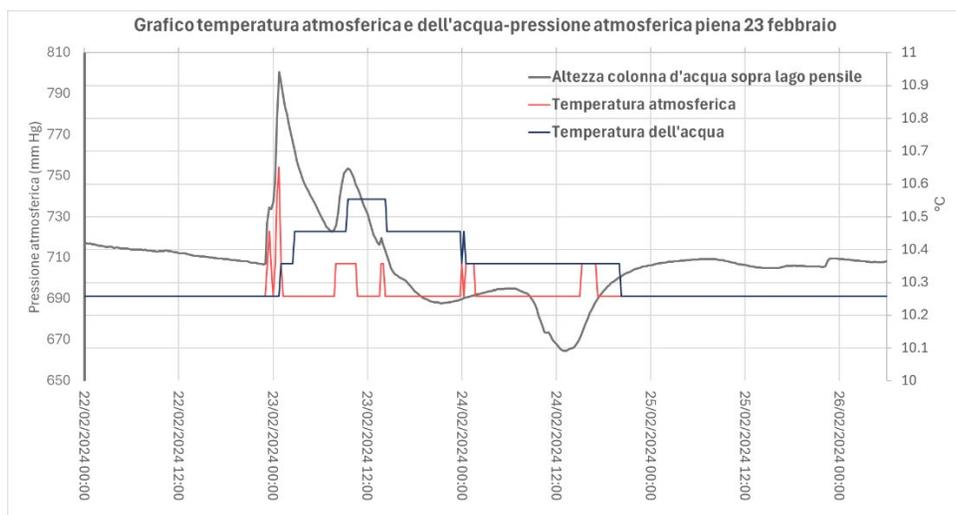


Figura 5.53 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con la pressione atmosferica riguardante la piena del 26 febbraio 2024.

In Figura 5.53 si può osservare come la temperatura dell'acqua non sembra avere relazioni con l'andamento della pressione atmosferica, mentre la temperatura atmosferica presente in Sala delle Meraviglie mostra delle caratteristiche coerenti. I primi due picchi di temperatura infatti seguono esattamente la morfologia della curva di pressione. In questo caso però, la diminuzione di pressione non sembra dare luogo a nette diminuzioni di temperatura.

Il monitoraggio delle frequenze, eseguito durante la piena in esame, mostra curve con caratteristiche diverse rispetto a quelle precedentemente osservate. Questo è legato al cambio di posizione del microfono tra il primo e il secondo periodo di raccolta dati. A causa della variazione

di ubicazione del microfono, in particolare più distante dal sifone, i suoni registrati si presentano diversamente. Inoltre, avendo inserito lo strumento nei pressi dell'ingresso del sistema carsico, esso è stato, in questo periodo, più soggetto a eventuali disturbi ambientali durante le precipitazioni, come per esempio tuoni o rumori esterni.

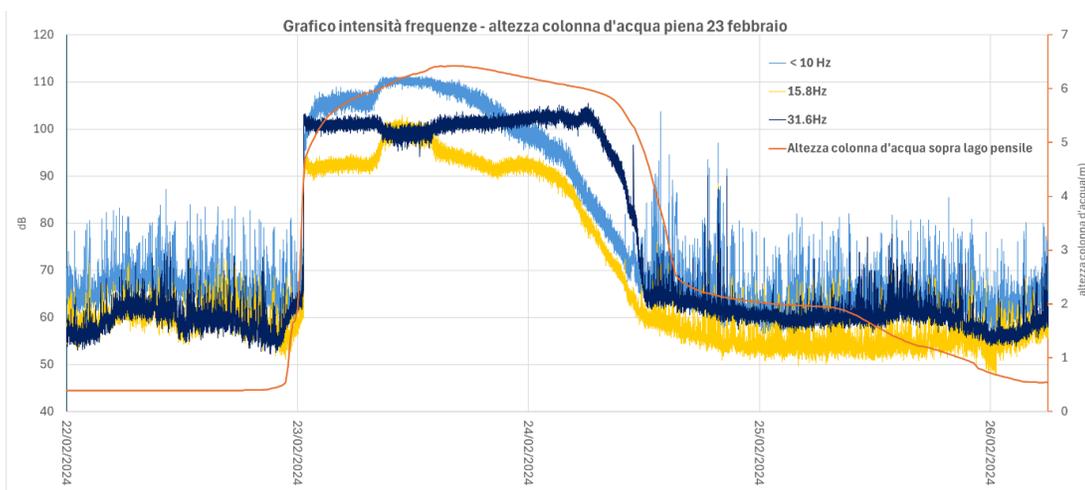


Figura 5.54 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 23 febbraio 2024.

Dal grafico (Fig. 5.54) non si riescono più a distinguere chiaramente i due intervalli di alta perturbazione delle intensità, ubicati nella fase di carico e nella fase di scarico, che caratterizzavano i grafici delle frequenze nella prima parte del monitoraggio. Si può osservare come le intensità siano molto disturbate nel periodo pre e post piena, con variazioni puntuali maggiori di 20 dB; nella fase centrale della piena invece il disturbo è minore. Le intensità crescono bruscamente nel momento in cui l'altezza dell'acqua sopra Lago Pensile raggiunge un valore pari a 4,3 metri, raggiunto questo livello tutte le frequenze mostrano un aumento equivalente a 50 dB o più. Il relativo abbassamento delle intensità è più progressivo e inizia quando il livello piezometrico è ancora elevato. Sono mostrate più in dettaglio, nei grafici seguenti, i periodi di carico (Fig. 5.55) e scarico (Fig. 5.56).

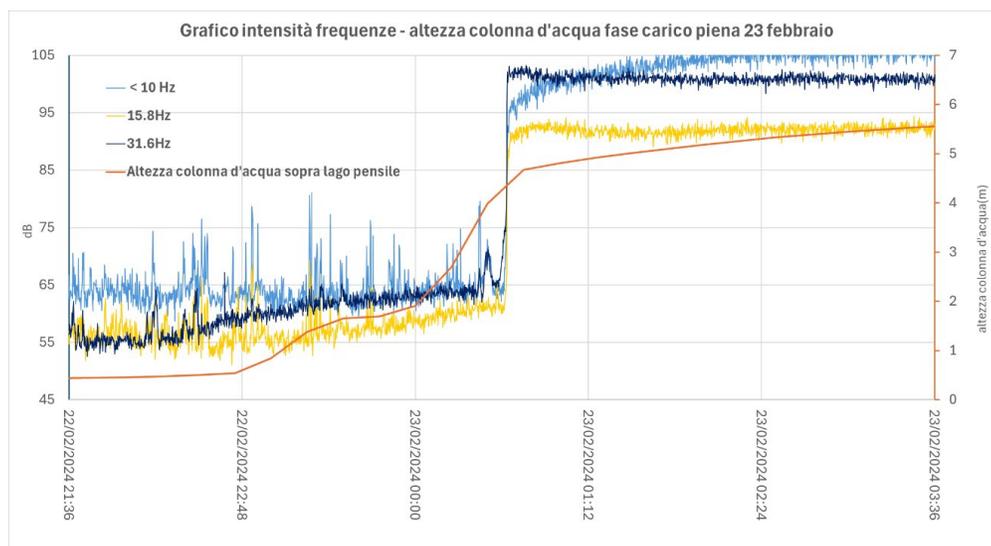


Figura 5.55 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di carico della piena del 23 febbraio 2024.

Nel grafico di carico (Fig. 5.55) si può osservare come l'incremento delle intensità sia netto e avvenga in pochi secondi. Questa caratteristica è una differenza ben definita rispetto ai grafici precedenti ed è conseguente alla variazione di posizione del microfono che implica una ricezione di segnali diversi. In Sala Bianca i suoni vengono infatti ricevuti fin da subito, appena il livello piezometrico inizia a variare; all'ingresso questo non avviene, bensì iniziano a registrarsi suoni solamente nel momento in cui l'acqua supera la differenza di quota e inizia a fluire nel canale superiore fino a fuoriuscire dal varco d'entrata.

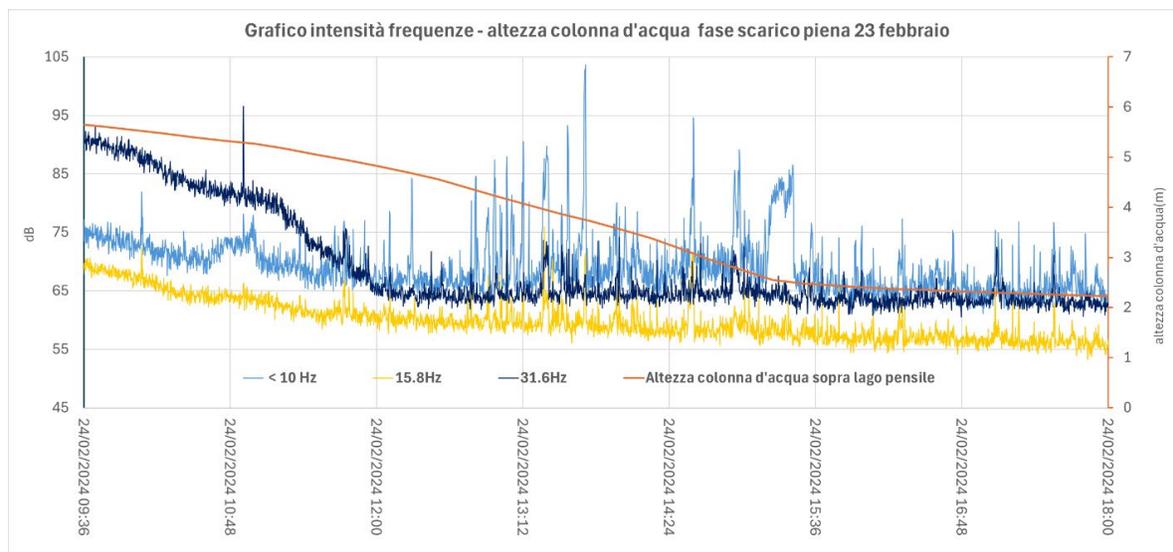


Figura 5.56 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di scarico della piena del 23 febbraio 2024.

La fase di scarico della piena, come già osservato, è progressivo senza nette diminuzioni di intensità (Fig. 5.56). Inoltre, comparando le curve precedenti con il grafico di scarico della piena in questione, si può osservare come gli andamenti siano tendenzialmente simili, senza però la marcata perturbazione che caratterizzava i suoni registrati dalla Sala Bianca.

Per la piena del 23 febbraio 2024 si è scelto di fornire la possibilità di ascoltare i suoni registrati durante la fase di carico e scarico tramite QR code (Fig. 5.57). In questo modo è possibile analizzare i grafici precedenti e i successivi possedendo un'idea di ciò che avviene durante le piene all'interno della Spurga delle Cadene. Anche in questa seconda metà di monitoraggio si nota l'improvvisa sopraggiunta dell'onda di piena nella fase di carico e la più progressiva diminuzione di vigore durante la fase di scarico; nel file audio riguardante la fase di scarico è infatti risultato complicato individuare una diminuzione percepibile ad orecchio.



Figura 5.57 - QR code relativo alla fase di carico e alla fase di scarico della piena avvenuta il 23 febbraio 2024.

-Piena del 10 febbraio

Nei giorni intercorsi tra il 9 e il 13 febbraio è stato registrato un evento di piena all'interno della Spurga delle Cadene. Il 9 febbraio sono precipitati 27 mm di pioggia sopra al bacino idrologico, permettendo così la formazione della piena. In Figura 5.58 si può notare la distribuzione delle precipitazioni nelle ore antecedenti la fase di carico. Il carico è stato veloce, in 2 ore il livello dell'acqua è salito di 4,5 metri, raggiungendo un tasso di innalzamento pari a 3,75 cm/min (Fig. 5.58). La fase di piena massima è poi durata per 48 ore consecutive prima di intraprendere la fase di scarico.

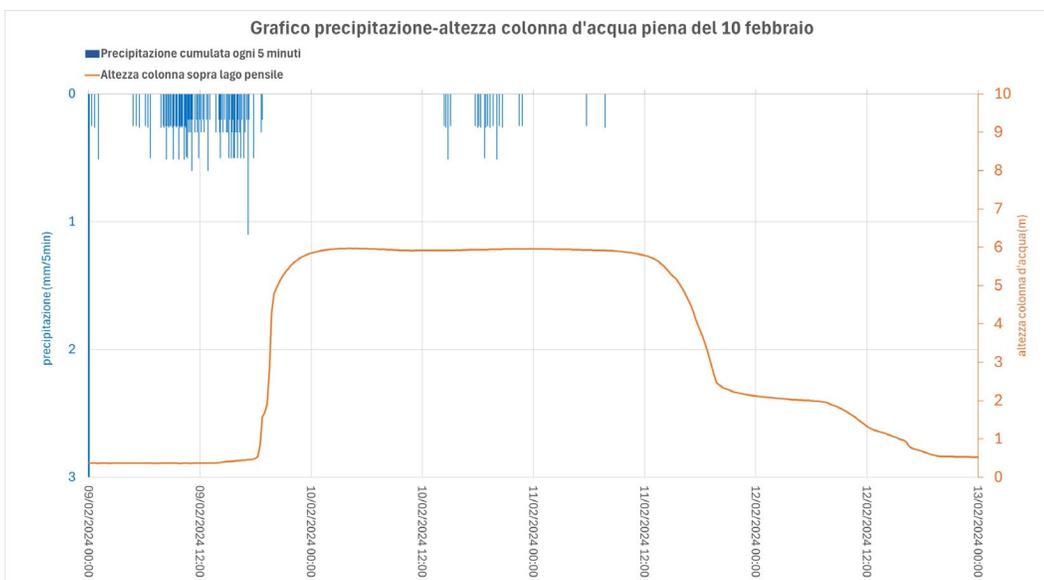


Figura 5.58 - Grafico di precipitazione cumulate ogni 5 minuti e altezza colonna d'acqua riguardante l'impulso del 12 febbraio 2024.

L'evento in discussione risulta essere anomalo rispetto ai precedenti e potrebbe fornire indizi utili per una comprensione più approfondita del ruolo idrogeologico della grotta. Come già notato infatti, si può osservare come la piena sia durata per un periodo relativamente lungo, per 48 ore consecutive ha registrato un livello dell'acqua intorno ai 6 metri. Le precipitazioni segnalate dal pluviometro di Fosse danno una spiegazione ragionevole per l'innesco della piena, con 27 mm di pioggia precipitati prima della fase di carico della curva, ma a prima vista sembrano troppo esigui per giustificare il relativo protrarsi della stessa per un periodo così lungo. La questione è anomala e necessita un'analisi e spiegazione approfondita. In fase di elaborazione dati verrà esaminata la questione nel dettaglio.

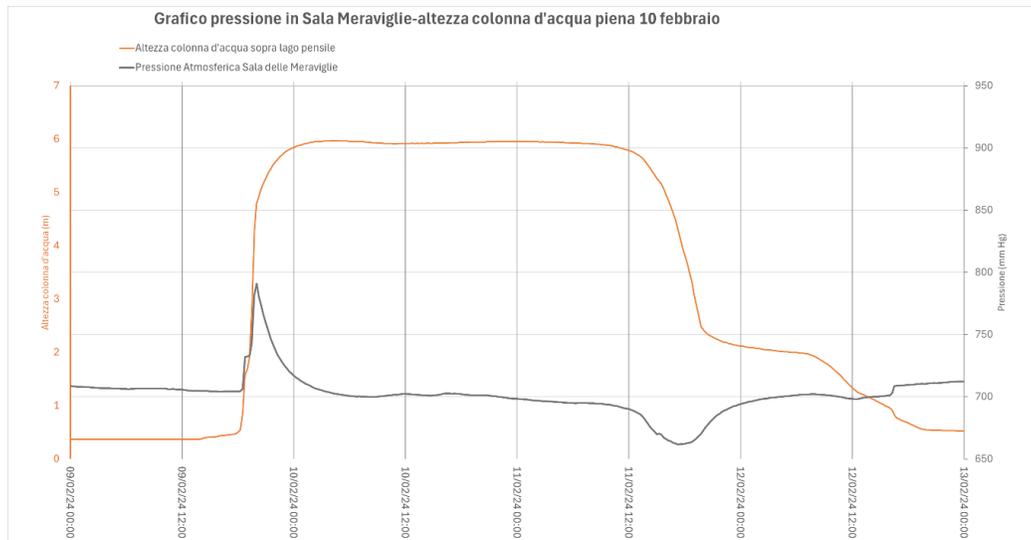


Figura 5.59 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Meraviglie e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 10 febbraio 2024.

Per quanto riguarda la pressione atmosferica registrata in Sala delle Meraviglie, si può osservare dal grafico (Fig. 5.59) come essa segua il medesimo pattern già riscontrato in altri eventi; presenta quindi un picco positivo, durante la fase di innalzamento del livello idraulico, che in questo caso raggiunge valori relativamente bassi pari a 790 mm Hg, e un picco negativo durante la fase di scarico che raggiunge il valore di 661 mm Hg, dato inferiore confrontato con i precedenti casi.

Il trasduttore di pressione in Sala Bianca non ha registrato invece nessuna notevole variazione di pressione durante l'evento in questione (Fig. 5.60).

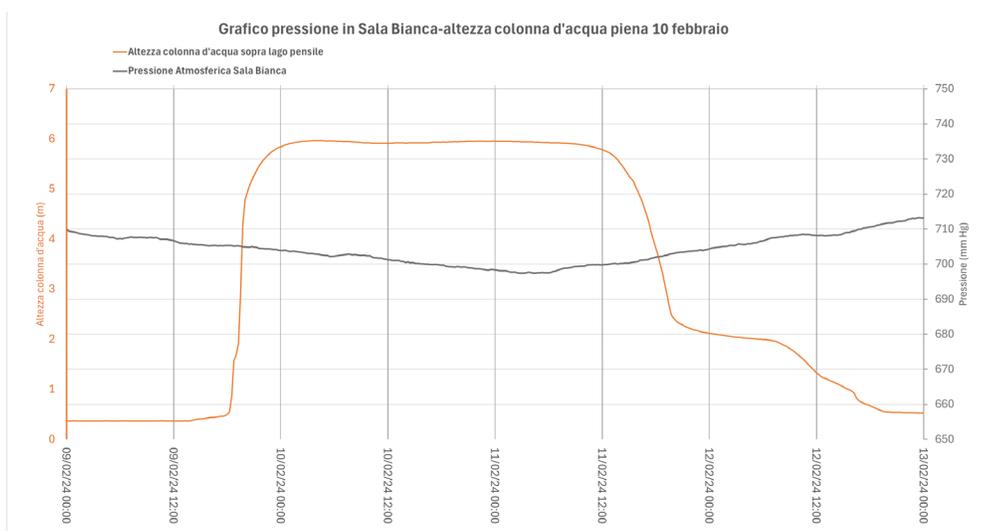


Figura 5.60 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Bianca e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 10 febbraio 2024.

Come si può notare dal grafico la pressione atmosferica, seppur di poco, è variata mostrando una diminuzione progressiva del valore fino a raggiungere 697 mm Hg, ovvero 15 mm Hg in meno rispetto alle condizioni precedenti all'evento. Questo comportamento si distingue rispetto alla piena del 23 febbraio, mostrata in Figura 5.50.

Il dato di conducibilità, durante la piena del 10 febbraio e presentato in Figura 5.61, mostra un picco positivo marcato che raggiunge un valore di 0,49 mS/cm ben 0,06 mS/cm superiore al dato imperturbato. Il picco negativo invece non è evidenziato come in altri eventi ma è tuttavia presente registrando un valore di 0,391 mS/cm, di 0,04 mS/cm minore del valore indisturbato.

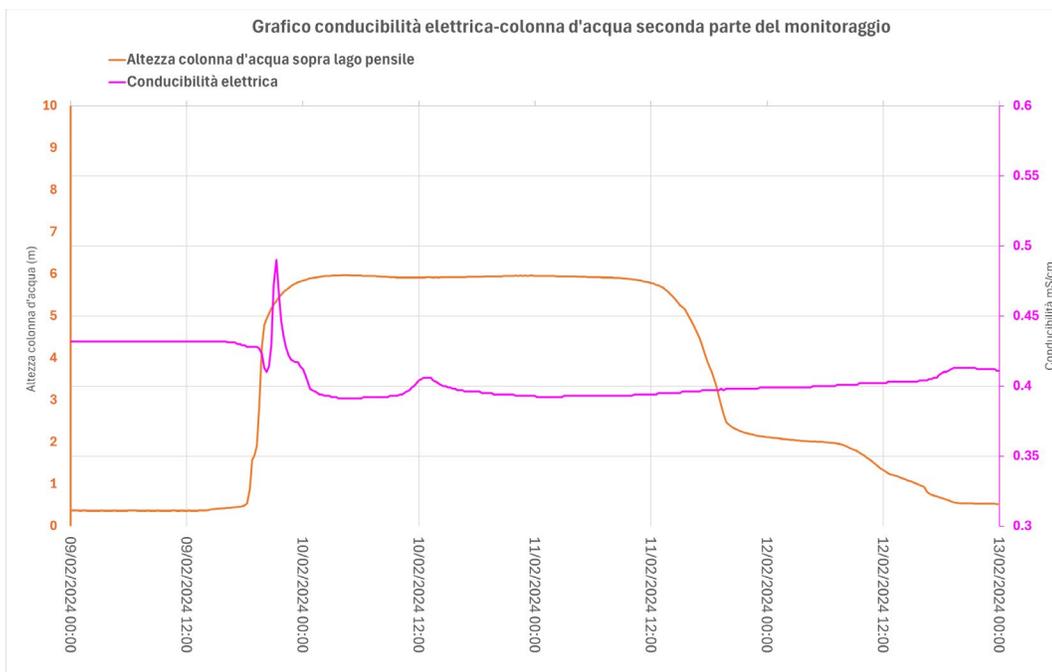


Figura 5.61 - Grafico di conducibilità elettrica e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 12 febbraio 2024.

La temperatura registrata per questo evento è coerente con ciò che è stato già mostrato. Si può osservare, studiando i dati raccolti (Fig. 5.62), come la temperatura atmosferica e dell'acqua abbiano valori massimi leggermente minori rispetto ai precedenti. Sono inoltre presenti alcuni valori di temperatura atmosferica minori delle condizioni precedenti alla piena, concomitanti alla fase di crescita della tavola d'acqua.

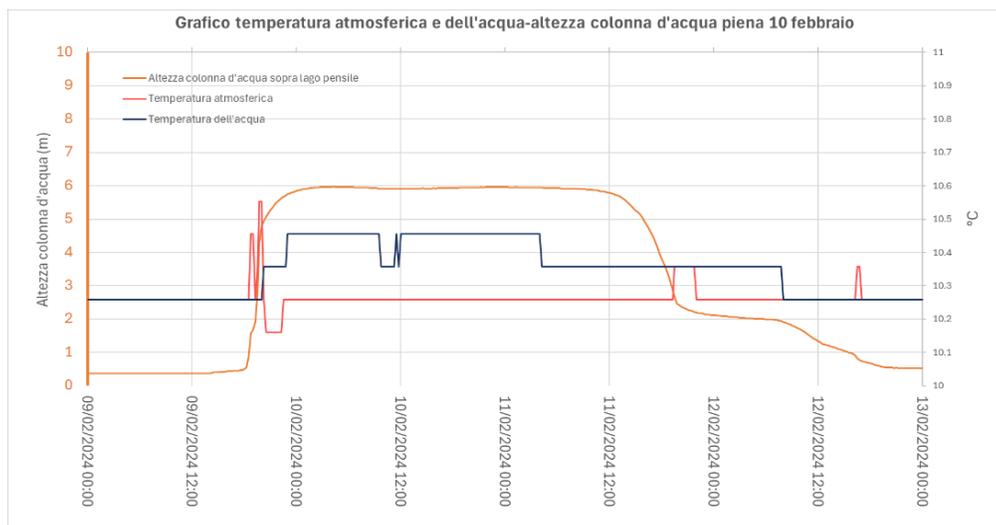


Figura 5.62 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con l'altezza piezometrica riguardante la piena del 13 febbraio 2024.

La temperatura atmosferica vede due picchi iniziali con un aumento pari a $0,3^{\circ}$, seguiti da una diminuzione netta con un salto termico di $-0,5^{\circ}$, si stabilisce poi sui $10,28^{\circ}$ per tutta la durata dell'evento. La temperatura dell'acqua invece mostra un massimo aumento più modesto, pari a $0,2^{\circ}$, per poi intraprendere la fase di raffreddamento durante lo scarico della piena.

Le temperature registrate, messe in relazione con la pressione atmosferica registrata in Sala delle Meraviglie, mostrano invece comportamenti diversi (Fig. 5.63).

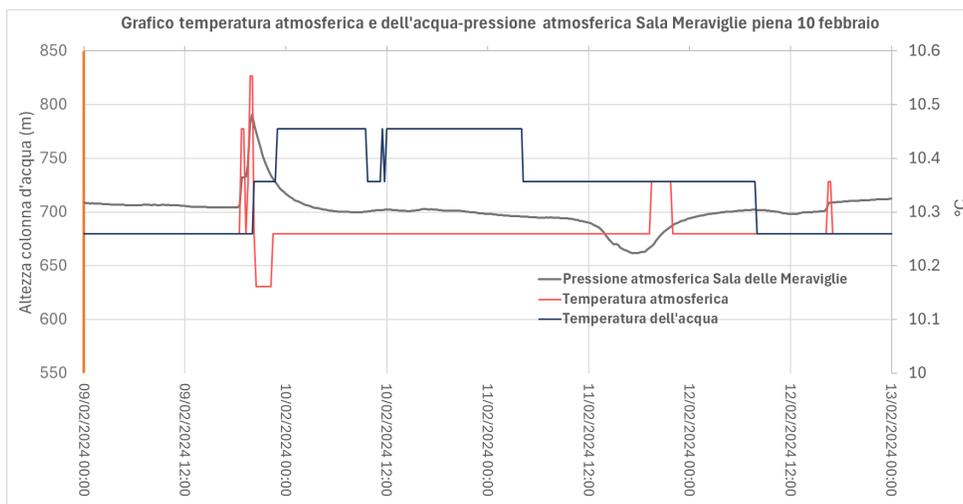


Figura 5.63 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con la pressione atmosferica riguardante la piena del 12 febbraio 2024.

La temperatura atmosferica, come già notato in altri eventi, segue tendenzialmente le variazioni di pressione atmosferica mentre, per quanto riguarda la temperatura dell'acqua, i parametri sembrano completamente indipendenti l'uno dall'altro.

Le frequenze acustiche registrate durante la piena in oggetto sono mostrate in Figura 5.64.

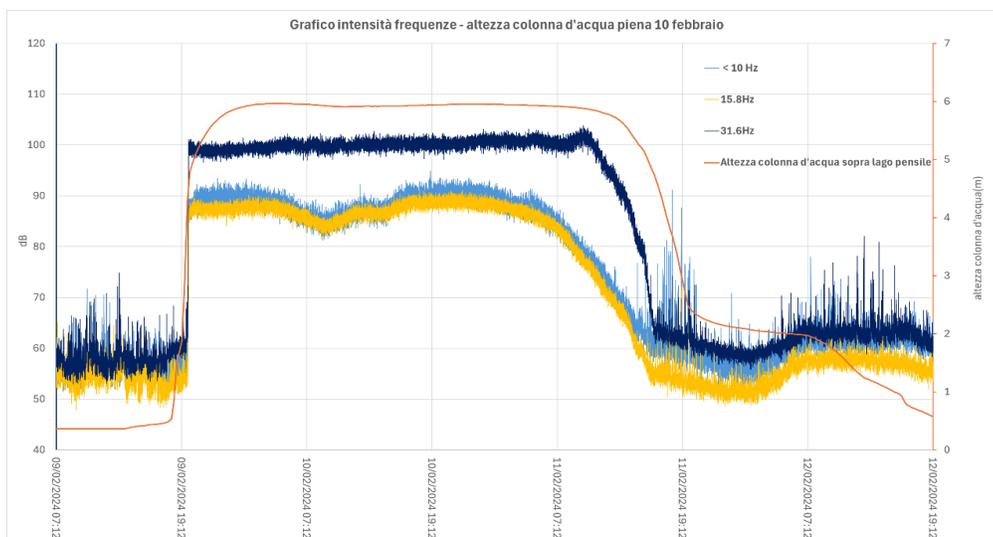


Figura 5.64 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 12 febbraio 2024.

Si può osservare nel grafico presentato la relazione tra il livello dell'acqua e le intensità delle frequenze: entrambi crescono molto rapidamente nella fase iniziale. Durante la fase finale della

piena, con la diminuzione della portata in input, il suono tendenzialmente diminuisce, in particolare le frequenze più basse che anticipano la decrescita del livello dell'acqua sopra al Lago Pensile.

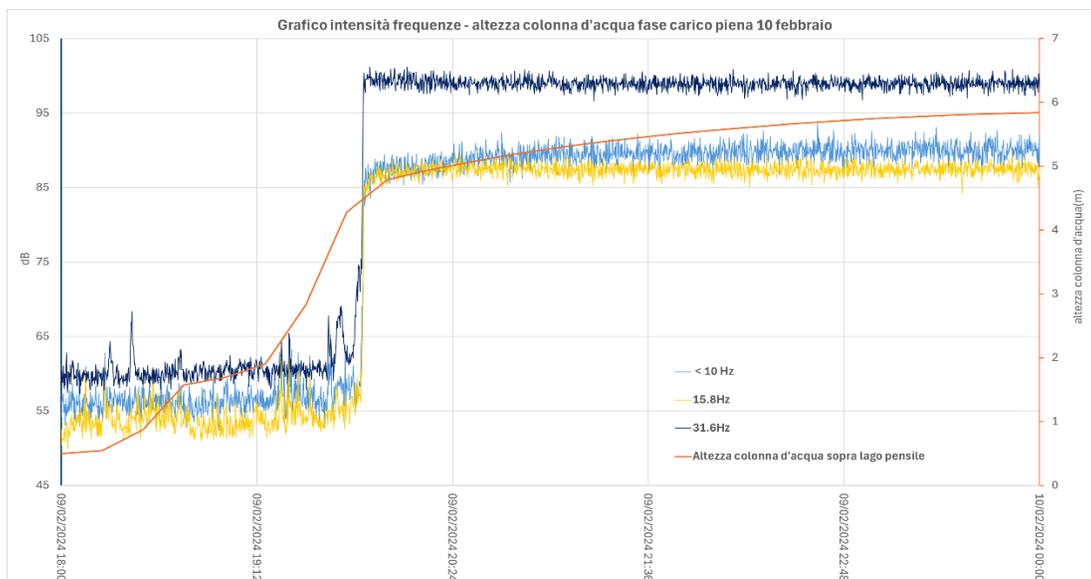


Figura 5.65 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di carico della piena del 12 febbraio 2024. In Figura 5.65 è possibile osservare la fase di carico della piena: nel momento in cui il livello dell'acqua raggiunge l'altezza di 4,3 metri, le intensità subiscono una improvvisa e decisa fase di crescita. In questo caso la frequenza 31,6 Hz mostra un aumento maggiore rispetto alle altre frequenze, questo distacco verrà mantenuto durante l'intero evento.

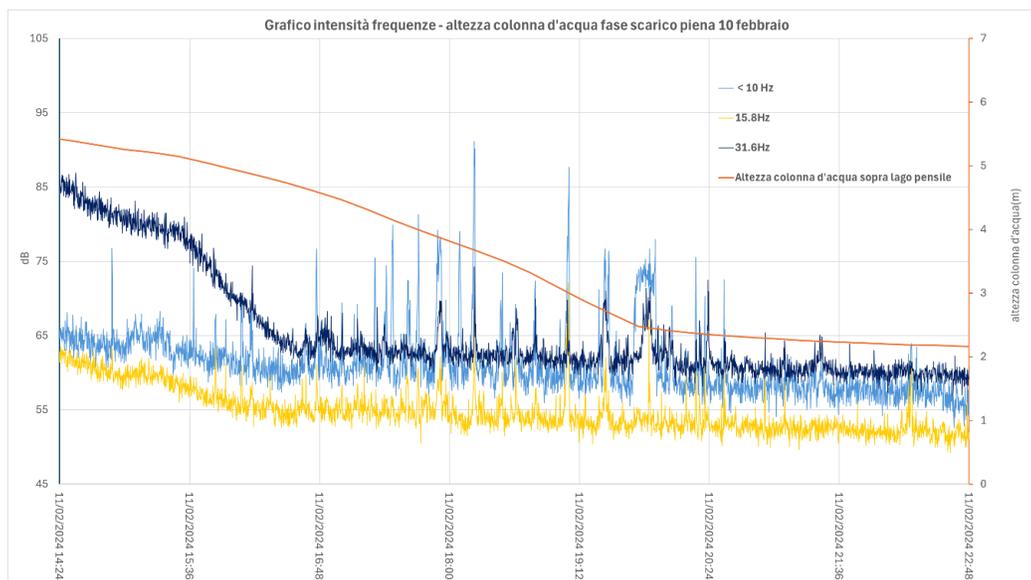


Figura 5.66 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di scarico della piena del 23 febbraio 2024.

La fase di scarico, anche in questa seconda metà di monitoraggio, sembra mostrare caratteristiche comuni tra i diversi episodi di piena (Fig. 5.66). Inoltre, pur presentando un pattern diverso, i grafici mostrati sembrerebbero comparabili con quelli della prima metà di monitoraggio.

Vengono presentati di seguito alcuni grafici relativi ai dati acustici, registrati per la piena in esame, riguardanti frequenze di un ampio spettro di fasce, da molto basse a molto alte (Fig. 5.67 - 5.69).

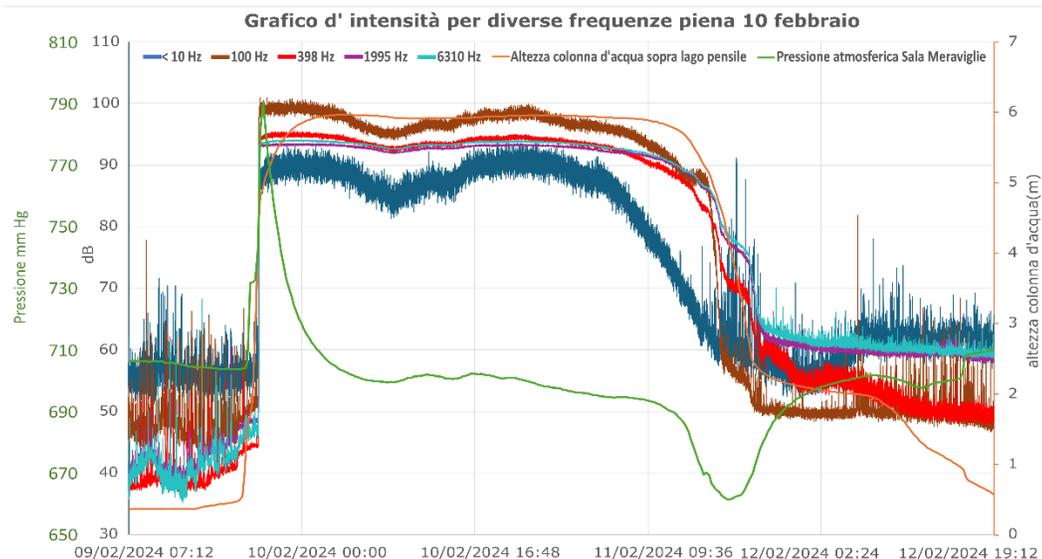


Figura 5.67 - Grafico di intensità di diverse frequenze dello spettro, altezza colonna d'acqua e pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie riguardanti la piena del 10 febbraio 2024.

Il grafico in Figura 5.67 mostra le intensità delle frequenze campionate durante la piena del 10 febbraio, si nota come la frequenza <10 Hz sia la più disturbata tra le curve e inoltre la meno intensa. Essa diminuisce anticipando tutte le altre frequenze, quando il livello piezometrico risulta ancora elevato e stabile sopra il Lago Pensile.

La fase di carico viene mostrata nel seguente grafico (Fig. 5.68):

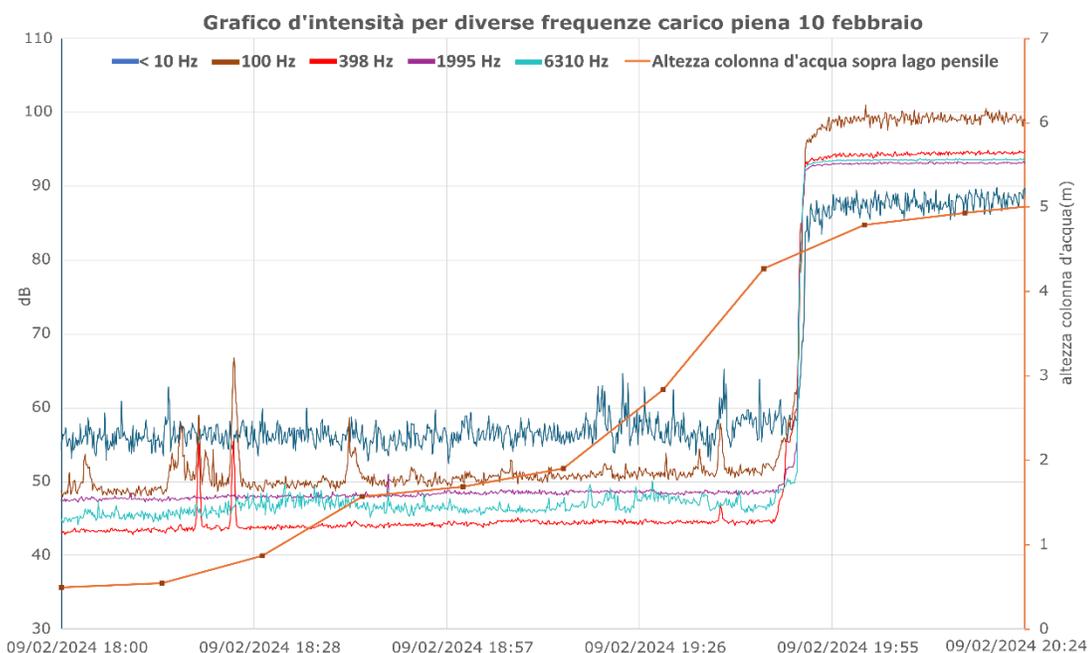


Figura 5.68 - Grafico di intensità di frequenza e altezza della colonna d'acqua riguardanti il carico della piena del 10 febbraio 2024.

La crescita delle intensità di frequenza avviene molto rapidamente, alcune di esse crescono di 50 dB al minuto. Questo notevole aumento indica il sopraggiungere dell'onda di piena attraverso il varco d'ingresso, e coincide con un'altezza sopra il Lago Pensile tra 4,27 e 4,7 metri secondo i dati registrati.

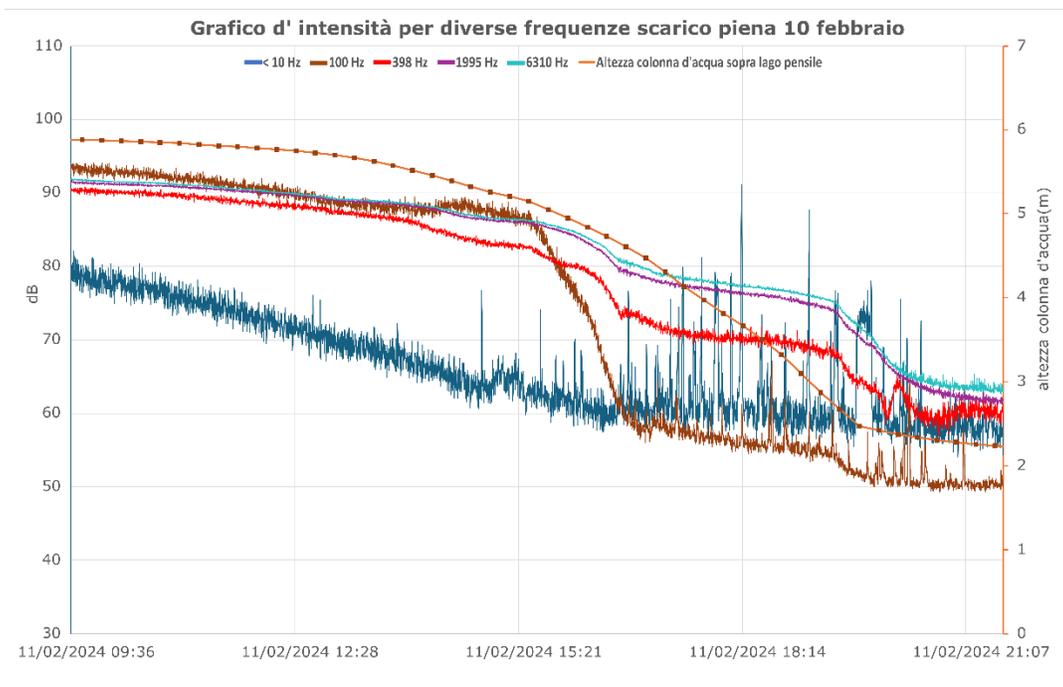


Figura 5.69 - Grafico di intensità di frequenza e dell'altezza della colonna d'acqua riguardanti lo scarico della piena del 10 febbraio 2024.

La fase di scarico viene mostrata in Figura 5.69: si osserva come la curva <10Hz inizi la fase decrescente anticipando di diverse ore le altre frequenze. Le frequenze più elevate esibiscono alcune diminuzioni nette, la più evidente è quella che corrisponde con la fine del flusso principale all'interno del condotto superiore che si attesta ad un'altezza della colonna d'acqua pari a 4,7 metri.

-Piena del 28 marzo

L'evento di piena che si è verificato a fine marzo 2024 è stato preceduto da copiose precipitazioni nella zona di Fosse corrispondente al bacino di ricarica del torrente interno. Come si nota dal grafico in Figura 5.70, l'evento è diviso in due impulsi, il primo durato circa 6 ore ha raggiunto un'altezza di 5 metri, la relativa fase di decrescita si è poi arrestata mantenendo comunque un livello pari a due metri di colonna d'acqua al di sopra del trasduttore. La seconda pulsazione invece è iniziata 15 ore dopo la fine della precedente, si osserva come il livello abbia raggiunto i 6 metri di altezza e che l'ondata di piena sia durata per più di 18 ore. Segue poi una lenta decrescita del livello idraulico che impiegherà più di un giorno a ristabilirsi su un livello ordinario.

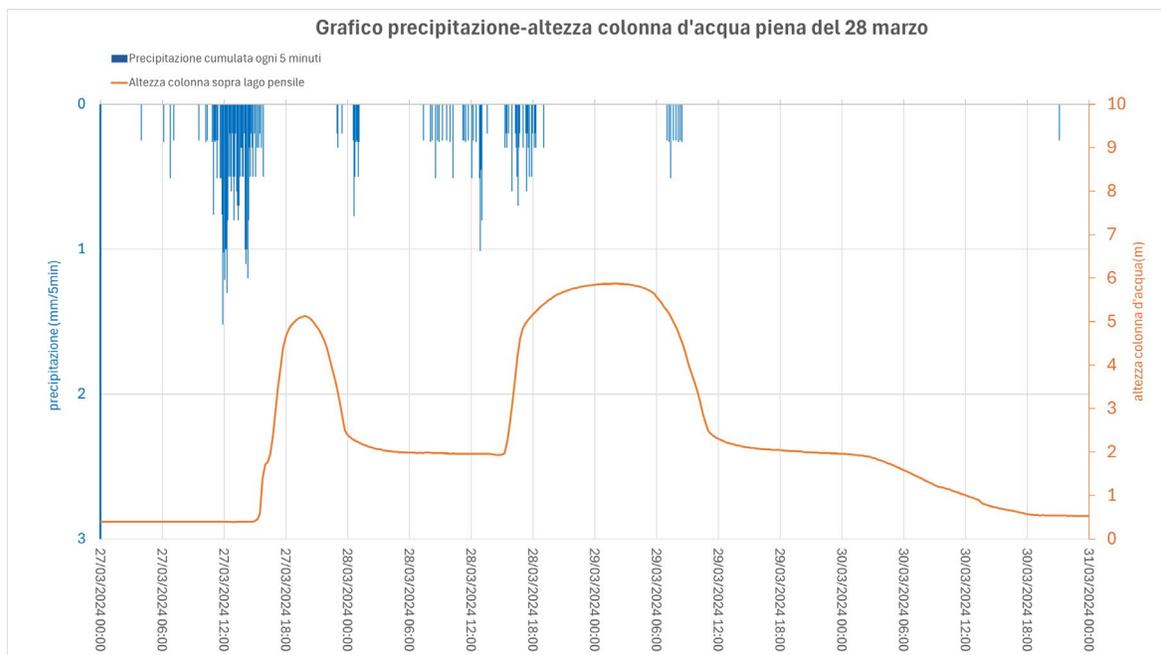


Figura 5.70 - Grafico di precipitazione cumulate ogni 5 minuti e altezza colonna d'acqua riguardante l'impulso del 28 marzo 2024.

Durante il periodo che ha preceduto il primo impulso di piena, le precipitazioni registrate dal pluviometro di Fosse si attestano sui 32 mm, sufficienti per innescare un evento, seppur di minore entità. È doveroso sottolineare come prima della precipitazione discussa, nell'area di ricarica non siano state registrate piogge per più di due settimane (Fig. 5.42). Il secondo evento, che risulta essere il principale, è stato propiziato dalla precipitazione di ulteriori 21 mm di acqua durante la giornata del 28 marzo.

La pressione atmosferica registrata in Sala Bianca e relativa all'evento in discussione è mostrata in Figura 5.71.

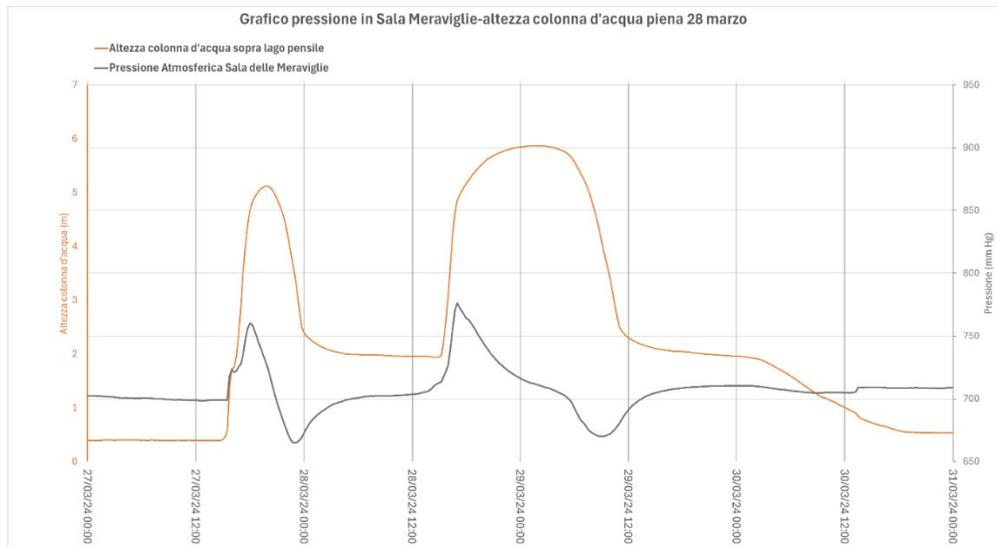


Figura 5.71 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Meraviglie e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 28 marzo 2024.

Entrambi gli impulsi registrati mostrano conseguenti variazioni di pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie, prima come anomalia positiva e successivamente come negativa. Si nota come i picchi di pressione positiva raggiungono diverse entità, infatti la seconda pulsazione raggiunge un valore di 772 mm Hg rispetto alla prima che si attesta sui 759 mm Hg. Il valore di bassa pressione invece raggiunge livelli minori durante la prima ondata di piena, toccando un livello di 665 mm Hg, rispetto alla seconda con 669 mm Hg.

La pressione atmosferica in Sala Bianca, durante l'evento del 24 marzo, mostra esigue variazioni, si osserva una leggera diminuzione che anticipa il primo impulso e un altrettanto leggero aumento corrispondente al secondo impulso (Fig. 5.72).

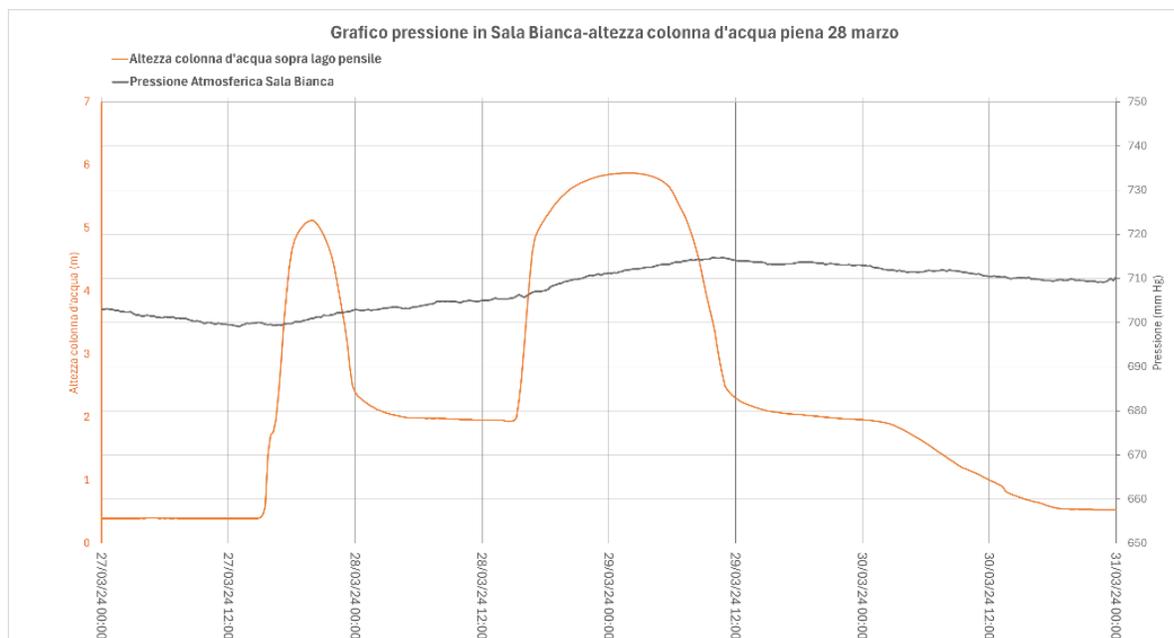


Figura 5.72 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Meraviglie e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 28 marzo 2024.

Durante la piena in oggetto la conducibilità mostra solamente picchi negativi relativi ai due impulsi di piena registrati. Il primo picco si presenta come più netto rispetto al secondo, ma, vista la mancata ristabilizzazione delle condizioni ordinarie tra i due impulsi, il secondo picco raggiunge un valore di conducibilità minore (Fig. 5.73).

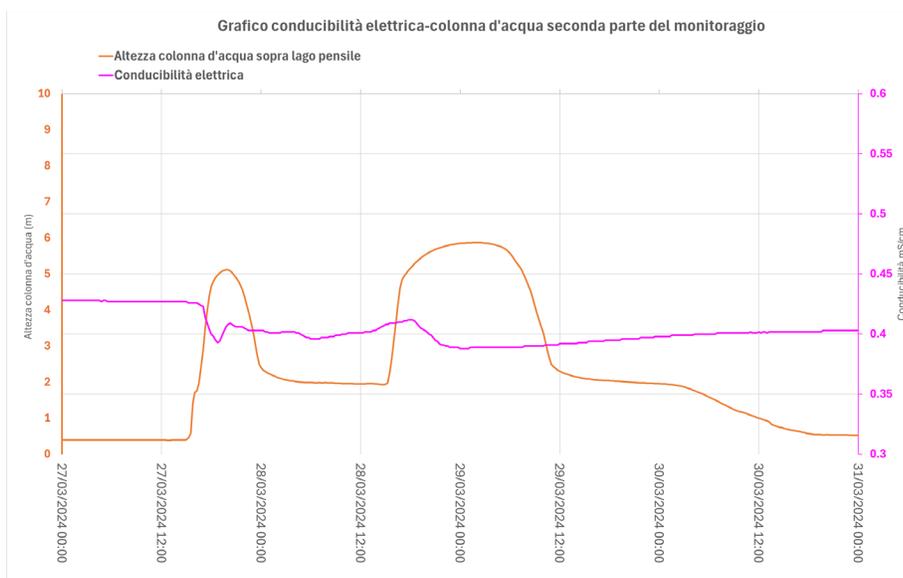


Figura 5.73 - Grafico di conducibilità elettrica e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 28 marzo 2024.

Il primo picco negativo mostra una diminuzione più netta seguita da un'immediata, seppur non sufficiente, risalita della conducibilità; il secondo invece presenta una fase di decrescita più lenta senza un recupero immediato, il valore pre-piena infatti impiegherà giorni a restaurarsi.

Vengono presentati di seguito i valori misurati per ciò che concerne i parametri di temperatura atmosferica e dell'acqua del torrente interno (Fig. 5.74).

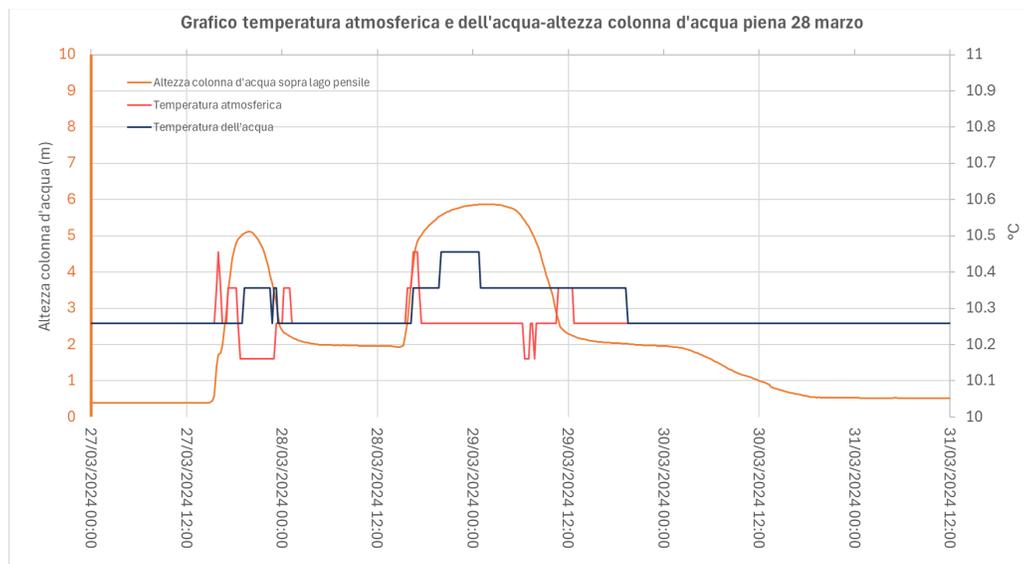


Figura 5.74 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con l'altezza piezometrica riguardante la piena del 28 marzo 2024.

Nei due impulsi che caratterizzano questa piena è possibile notare come avvengano in successione gli stessi eventi, ovvero un aumento della temperatura atmosferica che precede ed è contemporanea alla fase di carico, segue una fase di valori ordinari o addirittura minori, per poi mostrare un altro piccolo balzo positivo prima di restaurare il valore pre-piena. La temperatura dell'acqua cresce durante la fase centrale della piena per poi tornare ai valori precedenti appena conclusa. Temperatura dell'acqua e altezza del livello dell'acqua sembrano essere legate l'una all'altra.

Viene mostrato il grafico relativo al parametro della temperatura in relazione al parametro della pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie (Fig. 5.75).

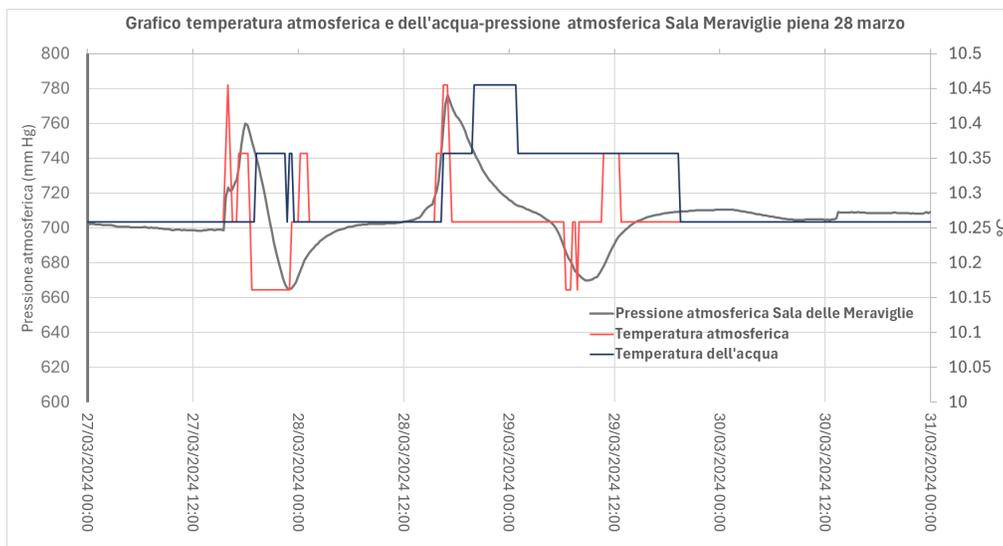


Figura 5.75 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con la pressione atmosferica riguardante la piena del 28 marzo 2024.

Il grafico mostra con chiarezza la relazione fra pressione atmosferica e temperatura atmosferica; le curve di questi due parametri infatti sembrano essere strettamente legate. Si osserva come all'aumento di una corrisponde un aumento dell'altra, e in ugual modo durante la decrescita. Ciò invece che sembra completamente indipendente, anche in questo caso, è la temperatura dell'acqua che non segue le variazioni della pressione atmosferica.

Il monitoraggio delle frequenze, riguardanti la piena in esame, mostra caratteristiche simili, la frequenza <10 Hz sembra comportarsi in maniera leggermente diversa mostrando intensità più elevate e picchi positivi molto elevati (Fig. 5.76).

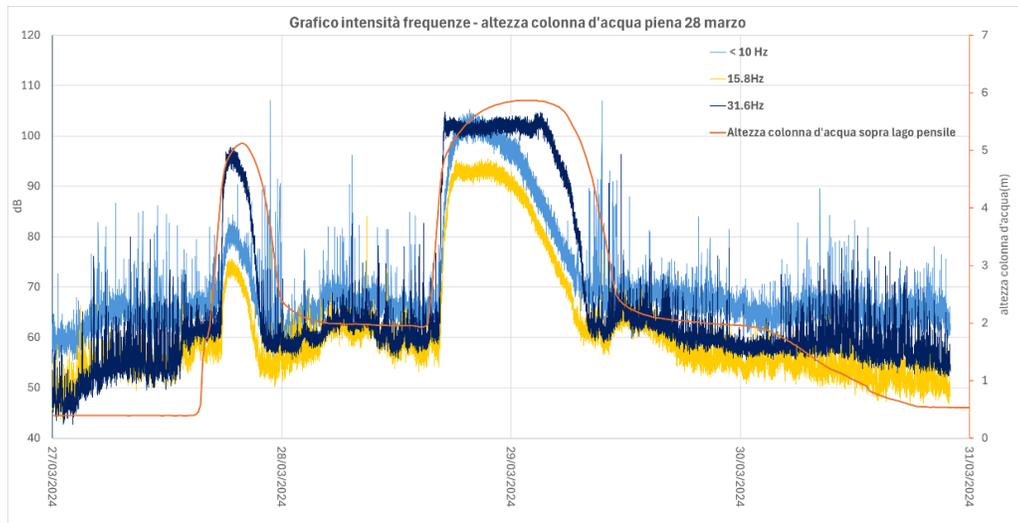


Figura 5.76 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 30 marzo 2024.

Per fornire una visione più dettagliata riguardante i dati acustici registrati si procede come al solito alla costruzione di grafici di minor intervallo temporale.

Per quanto riguarda il primo impulso di minore entità, il grafico di dettaglio (Fig. 5.77) mostra alcune caratteristiche riconoscibili soprattutto nella fase di scarico.

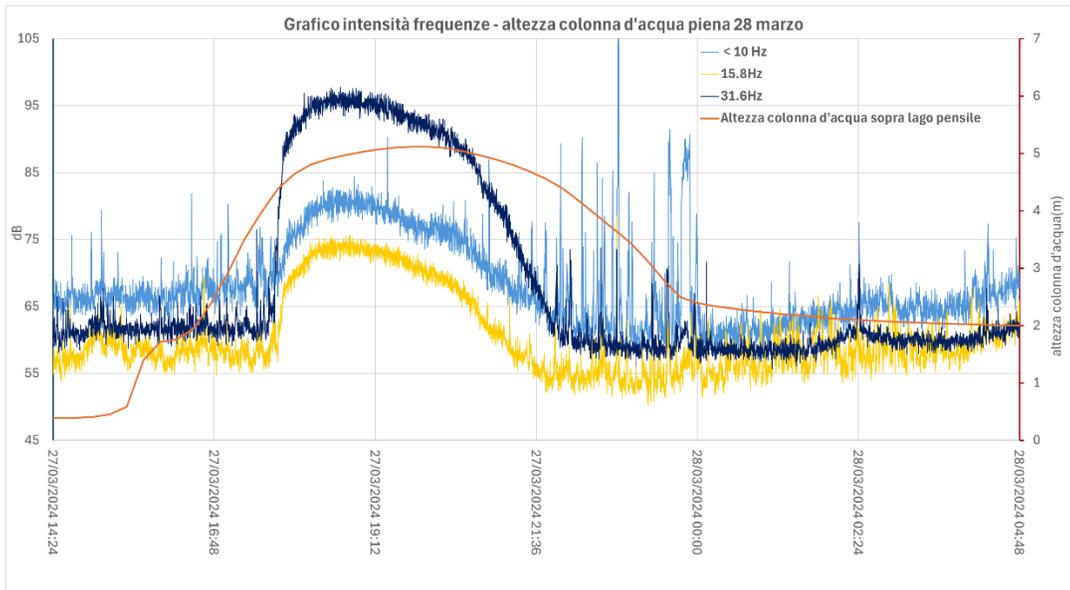


Figura 5.77 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante un impulso di piena di minor entità che ha anticipato la piena del 28 marzo 2024.

La fase di carico mostra una salita meno netta delle intensità rispetto a ciò che si è potuto vedere precedentemente, oltre al mancato raggiungimento dei livelli attesi. Questo è probabilmente influenzato dall'entità modesta dell'evento di piena considerato

L'impulso principale di piena mostra una crescita delle intensità meno netta rispetto ad altri esempi, si può notare infatti, rispetto alla Figura 5.65, come le frequenze 15,8 e <10 Hz aumentino più gradualmente.

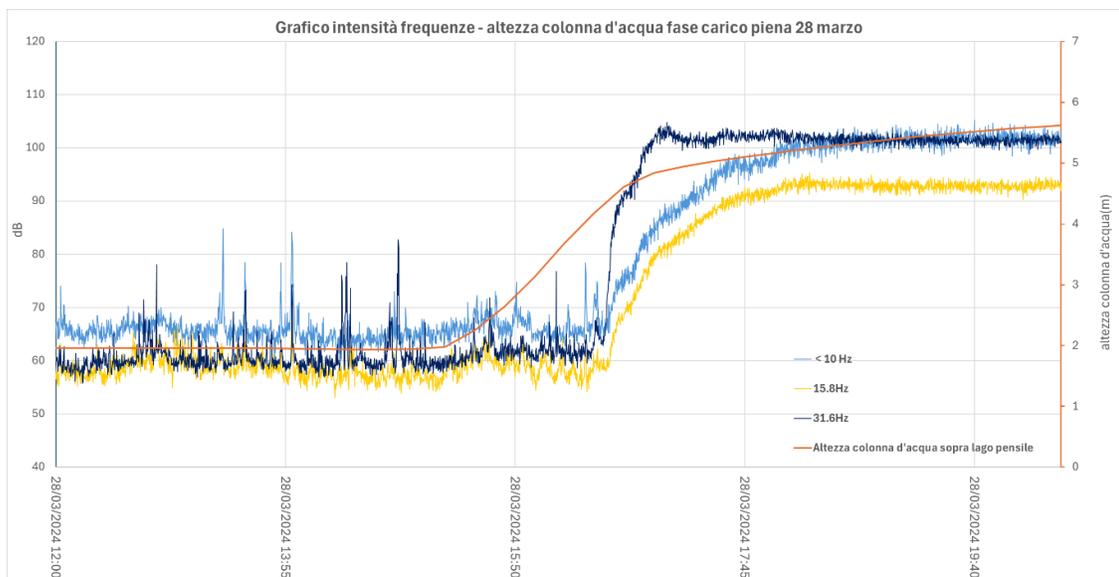


Figura 5.78 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di carico della piena del 28 marzo 2024.

La fase di scarico dell'impulso principale sembra seguire il trend dei precedenti grafici, si può notare infatti un pattern simile, seppur decisamente disturbato con fluttuazioni non correlabili molto abbondanti (Fig. 5.79).

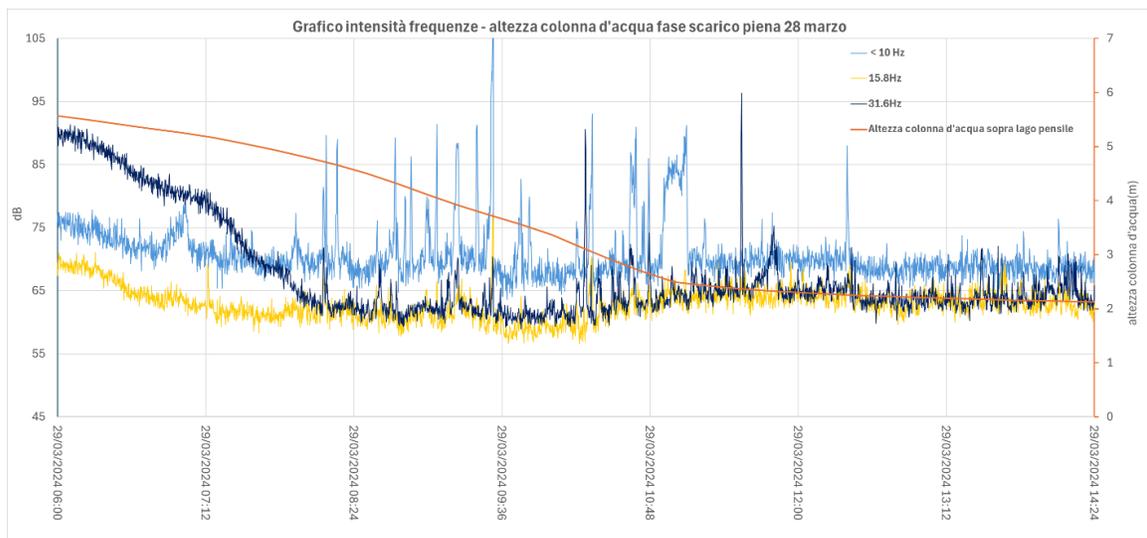


Figura 5.79 - Grafico di intensità di frequenze e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di scarico della piena del 29 marzo 2024.

Piena del 21 maggio 2024

Si è deciso di fare un capitolo a parte sulla piena avvenuta il 21 maggio 2024 per sottolineare la sua unicità e perché nasconde dettagli fondamentali che si aggiungono alle informazioni fin qui riportate. La piena in oggetto è una piena storica, ha comportato seri danni al paese di Peri ubicato in Vallagarina al di sotto della Spurga delle Cadene, chiamata appunto anche Spurga di Peri. I giornali locali, ma anche nazionali, hanno scritto a riguardo vari articoli, ne viene presentato uno stralcio in Figura 5.80. Le precipitazioni straordinarie registrate nei giorni tra il 20 e il 21 maggio 2024 hanno accumulato, nell'altopiano Lessinico, una grande quantità d'acqua, che è scesa poi a valle creando importanti danni ad abitazioni e infrastrutture. Il torrente Rì scorre lungo una valle che dall'altopiano della Lessinia raggiunge la Val d'Adige proprio in località Peri e, a detta del sindaco di Dolcè Massimiliano Adamoli, è tombato da 400 anni; a causa delle straordinarie precipitazioni avvenute sull'altopiano, il Rì ha rotto dal basso il canale e l'asfalto che lo contenevano ed è esondato per la prima volta dopo secoli. Come ci si può immaginare e come si può vedere dalle foto ha creato importanti danni al paese, oltre ad avere bloccato la circolazione stradale e ferroviaria del Brennero, una delle arterie principali di trasporto dell'intera penisola. Quei giorni sono state evacuate per precauzione 50 persone, i lavori sono proseguiti poi per diverse settimane prima di tornare ad una condizione di equilibrio.

ROVERETO E VALLAGARINA

Esonda un torrente a Peri, bloccata la statale del Brennero e chiusa temporaneamente la ferrovia



Figura 5.80 - Stralcio di articolo di Repubblica riguardante l'esondazione del torrente Rì nel paese di Peri il 21 maggio 2024.

L'esondazione del torrente Rì è stata causata dall'enorme quantità di materiale roccioso sceso dalla Lessinia a valle nella notte e nella mattinata del 21 maggio che ha causato la chiusura dei canali che scorrono sotto il paese. Il torrente Rì si trova nella valle parallela al Vaio della Spurga dove rilascia l'acqua nei periodi di piena la Spurga delle Cadene. Il torrente in cui fluisce la grotta non è tombato perché la quantità di acqua che vi scorre durante le precipitazioni intense è troppo elevata, nell'ordine dei migliaia di litri al secondo come approssimazione. È interessante in ogni caso riportare questa notizia di cronaca per sottolineare il fatto che tra il 20 e 21 maggio si sono verificate condizioni di precipitazioni assolutamente straordinarie proprio nell'area lessinica intorno a Peri, Fosse e Corno d'Aquilio. Il torrente Rì è infatti esondato per la prima volta dopo 400

anni di tombamento. Si può ora analizzare l'idrogramma di questo evento registrato dagli strumenti presenti in grotta e dal pluviometro presente a Fosse (Fig. 5.81).

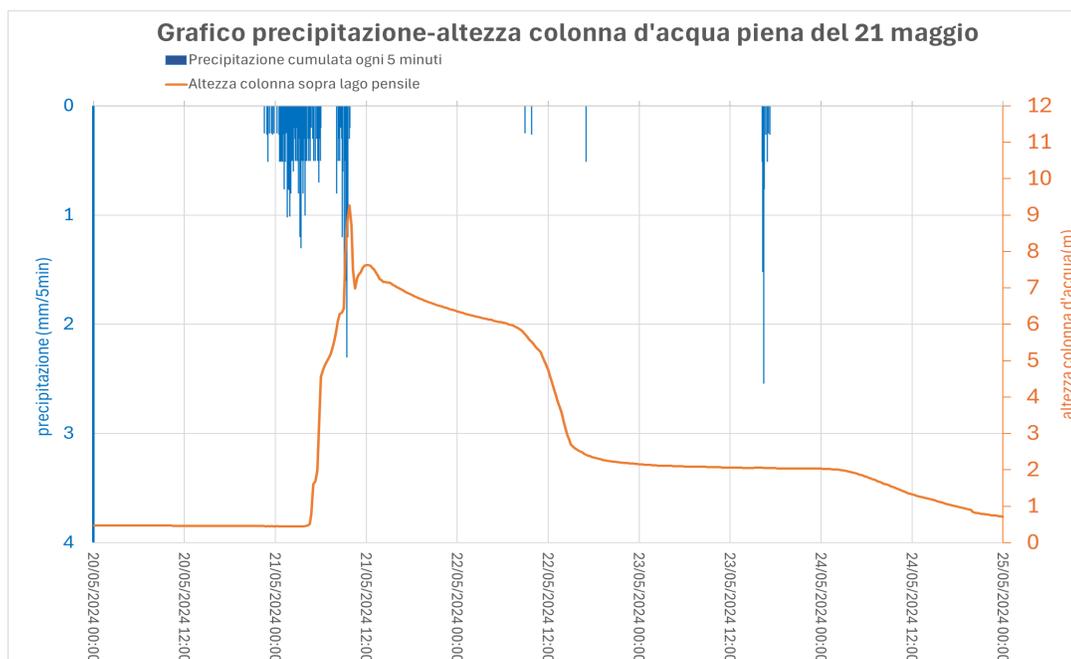


Figura 5.81 - Grafico di precipitazione cumulata ogni 5 minuti e altezza colonna d'acqua riguardante l'impulso del 21 maggio 2024.

A primo impatto salta subito all'occhio l'altezza della colonna d'acqua registrata, il livello ha raggiunto i 9,3 metri sopra al lago pensile. L'evento registrato è senza dubbio molto raro viste le conseguenze registrate nel paese di Peri. Il dato dell'altezza della colonna d'acqua supera di almeno 3 metri qualsiasi altro impulso di piena osservato durante il periodo di monitoraggio. La precipitazione cumulata che ha innescato l'evento si attesta sui 27 mm, ma la pioggia ha continuato ad accumularsi fino a raggiungere, prima del picco, 45 mm; come si può notare dal grafico (Fig. 5.82) questi si sono concentrati in circa 12 ore, con intensità massima 0,46 mm/min. La tavola d'acqua dai 6 metri raggiunge il valore più alto del monitoraggio pari a 9,3 m con estrema velocità, la più alta registrata ovvero 6,26 cm/min, per poi diminuire fino ai 7 metri con una velocità leggermente inferiore pari a 5 cm/min. L'altezza poi lentamente decresce prima di raggiungere un'altra accelerazione che però risulta più comune essendo ricorrente anche in altri episodi di piena presentati.

Studiando i dati però sorge un dubbio, sebbene sia vero che la precipitazione rilevata nei giorni in questione sia elevata, è anche vero che non è stata l'unica di quest'entità registrata nel periodo di monitoraggio, anzi sono presenti valori anche ben più alti. Quindi urge capire, e cercare di spiegare, cosa possa aver influenzato la sopraggiunta dei valori di livello registrati e quindi di portata all'interno della Spurga delle Cadene. Verrà analizzata approfonditamente la questione in fase di discussione.

Nell'evento straordinario del 21 maggio, oltre al dato dell'altezza dell'acqua, si sono registrati anche altri dati molto notevoli. L'andamento della pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie è mostrata in Figura 5.82.

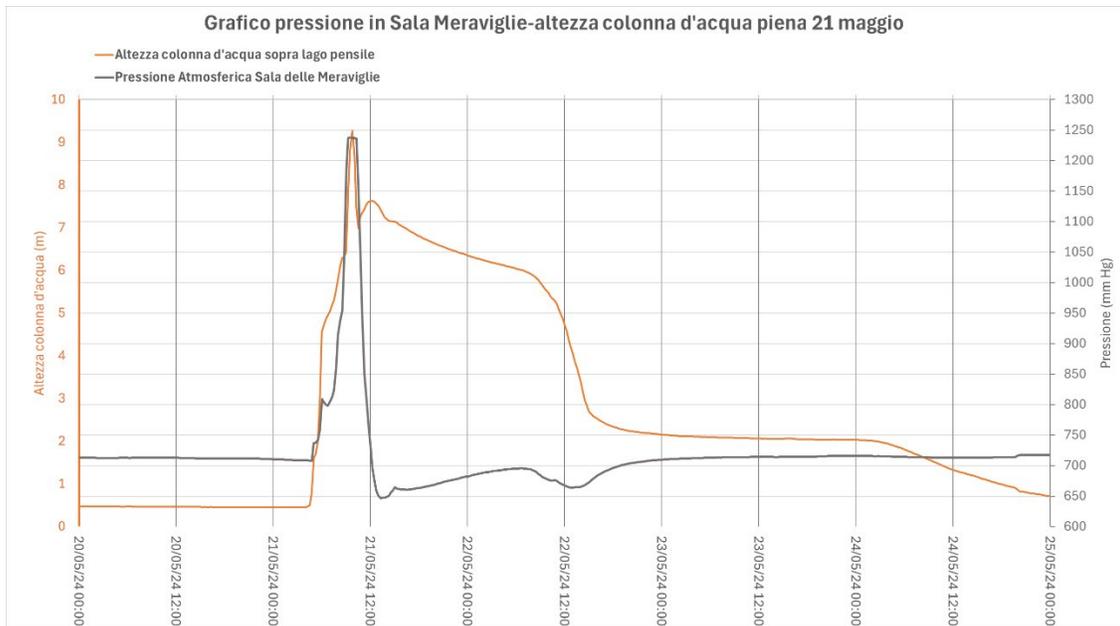


Figura 5.82 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Meraviglie e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 21 maggio 2024.

Si può notare come l'andamento della pressione atmosferica è completamente diverso rispetto a ciò che è stato mostrato fino ad ora. La pressione raggiunge un valore di 1237 mm Hg, più di 500 mm Hg superiore ai periodi ordinari, dato più alto dell'intero monitoraggio. L'andamento è coerente con la fase di carico del sifone. Nel momento in cui l'altezza della colonna d'acqua inizia a diminuire la pressione crolla con un balzo negativo di 600 mm Hg in poco più di 3 ore, registrando il dato più basso di pressione dell'intero monitoraggio, ovvero 647 mm Hg.

Un altro dato molto interessante registrato durante l'evento di piena in discussione riguarda la pressione atmosferica in Sala Bianca (Fig. 5.83).

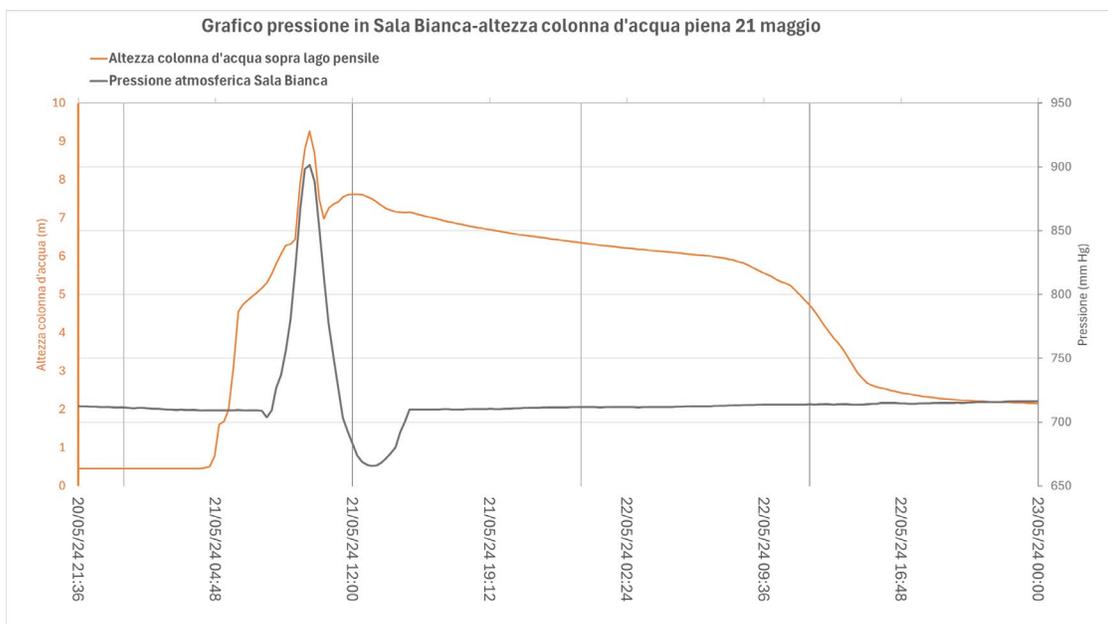


Figura 5.83 - Grafico di pressione atmosferica in Sala Bianca e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 21 maggio 2024.

Seguendo la curva della pressione mostrata in grafico si nota come inizialmente essa presenti una diminuzione di piccola entità seguita da una crescita molto veloce ovvero di 0,25 kPa/min fino al raggiungimento del picco posto a 901 mm Hg. Lo scarico di pressione registrato è anch'esso relativamente veloce con un tasso di 0,16 kPa/min fino ad un valore di 665 mm Hg, ben al di sotto del valore di pressione ordinario. Per la prima volta si può quindi notare una variazione positiva della pressione atmosferica in Sala Bianca, verranno discusse poi le possibili spiegazioni del fenomeno.

La conducibilità registrata per questo straordinario evento mostra delle caratteristiche particolari. Appena 4 giorni prima dell'evento si è verificato un altro intenso periodo di piena, che con altre condizioni avrebbe avuto come conseguenza una mancanza totale del picco positivo di conducibilità, invece come si può osservare dal grafico un picco positivo, seppur debole, è presente (Fig. 5.84).

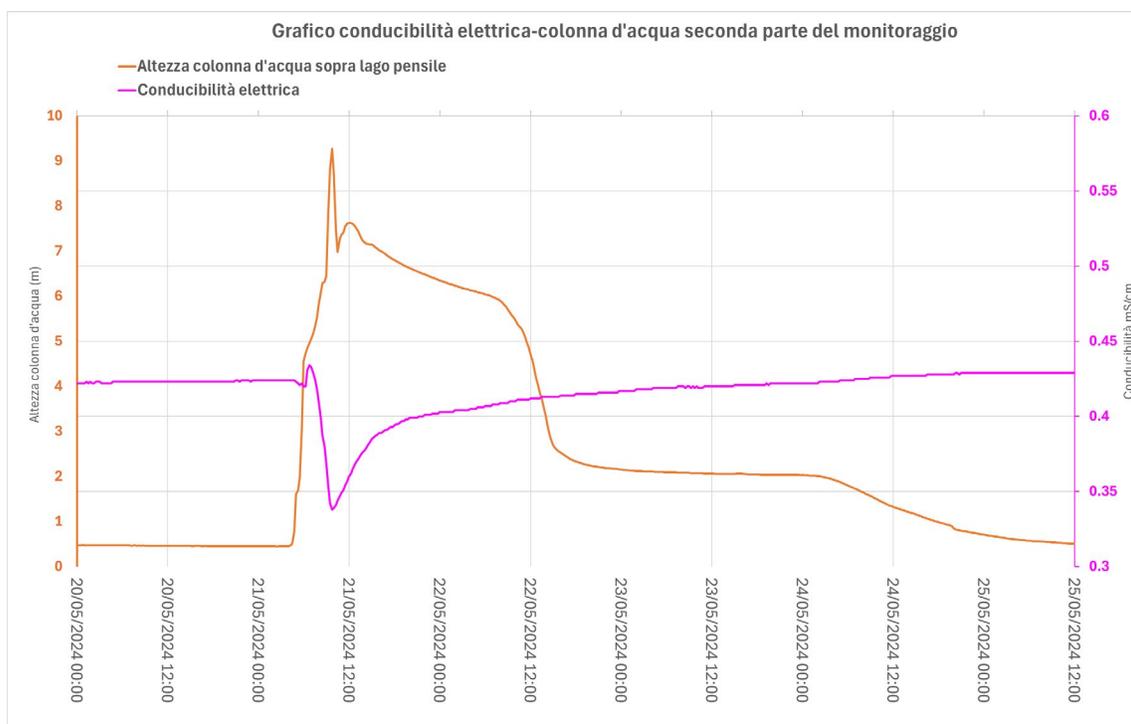


Figura 5.84 - Grafico di conducibilità e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 21 maggio 2024.

Ciò che però è ancor più interessante è la presenza del minor valore di conducibilità registrato lungo tutto il periodo di monitoraggio, ovvero 0,339 mS/cm, che distacca di 0,02 mS/cm il secondo valore più basso registrato nella piena del 22 febbraio. Questa informazione è un dato in più che sottolinea la quantità enorme di acqua che è precipitata e che ha dato vita a questo evento record.

Il dato della temperatura atmosferica mostra diversi picchi, i primi due positivi sono comuni anche nei precedenti grafici, anticipano la fase di carico. Il picco principale è individuato a 11,43°, ben 1,2° superiore al dato di equilibrio, questo valore è stato misurato 30 minuti prima del livello più elevato di colonna d'acqua (Fig. 5.85). Nel momento di massimo livello della tavola d'acqua infatti la temperatura atmosferica era già in fase di discesa. La fase di decrescita si arresta ad una

temperatura di 9,76°. I due estremi di temperatura registrati durante l'evento di piena in discussione rappresentano il valore maggiore e il valore minore di tutto il periodo di monitoraggio.

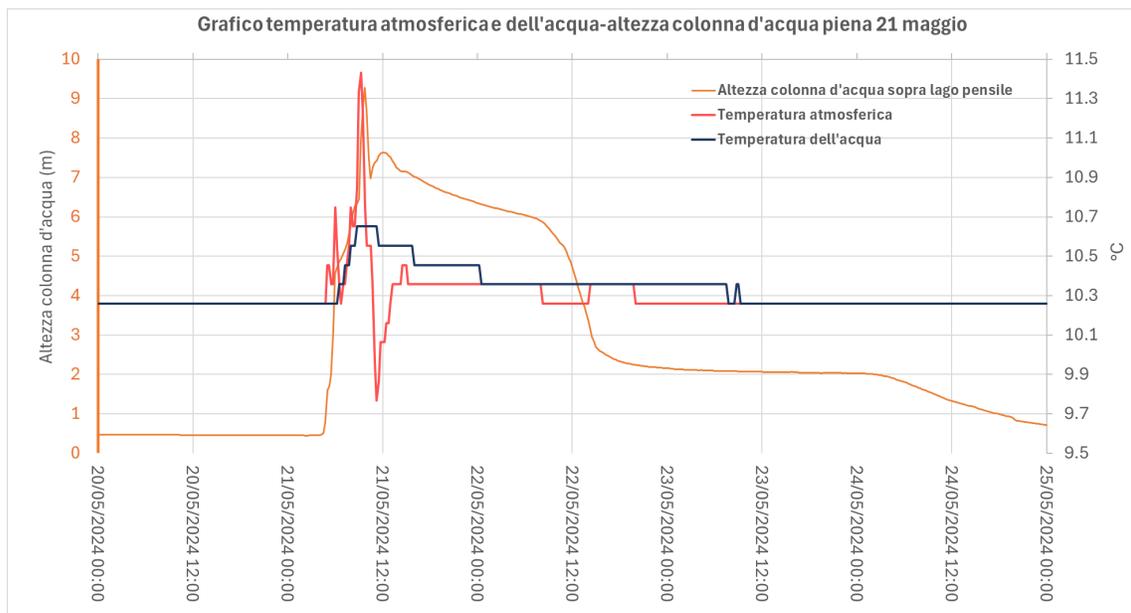


Figura 5.85 - Grafico di temperatura atmosferica e dell'acqua con l'altezza piezometrica riguardante la piena del 21 maggio 2024.

La temperatura dell'acqua invece mostra il classico trend di aumento di temperatura più repentino e poi una diminuzione più progressiva. Raggiunge il valore di 10,65°, ovvero 0,4° maggiore rispetto allo standard.

Il dato del monitoraggio acustico di questa piena purtroppo non è stato registrato in quanto il microfono era stato già prelevato per analizzare i dati contenuti all'interno.

Nei primi giorni di giugno con una spedizione si è raggiunta la grotta per estrarre i trasduttori di pressioni posizionati diversi mesi prima, si è potuto così osservare da vicino i danni che una piena di questa magnitudo può causare alla Spurga delle Cadene. Vengono mostrate alcune prove fotografiche dei danni che la grotta ha subito in seguito a questa straordinaria piena, così da sottolineare un'ulteriore volta la rarità dell'evento.

La zona esterna, dove il flusso d'acqua sgorga con volumi e velocità elevatissime durante i periodi di piena, si presentava molto perturbata. Come mostrato nelle immagini in Figura 5.86 e Figura 5.87, il terreno, formato da ghiaia e ciottoli, presente a una decina di metri davanti l'entrata della grotta, era stato asportato almeno per mezzo metro. Probabilmente l'acqua in pressione compiva, durante la piena, un salto di diversi metri prima di atterrare al di sopra di quest'area, erodendo e trasportando una grande quantità di materiale. Si riescono a riconoscere nella foto le zone che sono state esposte dalla piena tramite il colore più chiaro e non alterato.



Figura 5.86 - Asportazione di materiale da parte della piena del 21 maggio 2024 nella zona frontale alla grotta, sguardo verso Ovest.

Figura 5.87 - Asportazione di materiale da parte della piena del 21 maggio 2024 nella zona frontale alla grotta, sguardo verso Est.

Le condizioni osservate all'interno della grotta risultavano coerenti con quelle rilevate all'entrata. Ovunque sulle pareti erano presenti indizi del passaggio della piena, l'energia con cui è passata all'interno della cavità durante questo evento è così elevata da rompere ed erodere tutto ciò che trova lungo il percorso. Vengono riportati due esempi di come si presentavano i segni all'interno della grotta, ma si potevano scorgere piccole o grandi rotture, materiale asportato o accumulato in tutte le zone della grotta (Fig. 5.88 - 5.89). Nulla di ciò che si è notato era paragonabile ad eventi precedentemente osservati.



Figura 5.88 - Erosione delle rocce interne alla cavità carsica a seguito della piena del 21 maggio, area prossima all'entrata.

Figura 5.89 - Erosione delle rocce interne alla cavità carsica a seguito della piena del 21 maggio, area interna alla 2° Sala.

6. INTERPRETAZIONE DEI DATI DI MONITORAGGIO

Durante il periodo di monitoraggio della Spurga delle Cadene è stato possibile osservare 24 ondate di piena, con variabilità dei picchi di altezza piezometrica abbondante, da 2,5 a 9,4 metri. Analizzando i dati acquisiti è possibile constatare come i periodi di piena siano direttamente legati alle precipitazioni riscontrate nell'area di ricarica al di sopra della cavità carsica. Le precipitazioni raggiungono la cavità con velocità diversa, essa dipende strettamente dalla quantità e dall'intensità di pioggia, dal grado di saturazione del terreno, ovvero quanto e se ha piovuto nei giorni precedenti all'evento e dipende, in parte, anche dalla temperatura atmosferica che influenza l'evapotraspirazione. Analizzando i dati si può affermare che precipitazioni abbondanti ma meno intense e più dilazionate nel tempo impiegano tra le 10 e le 11 ore, dalla prima pioggia registrata, a raggiungere il Lago Pensile. Come esempi si possono menzionare le piene di fine ottobre, del 10 febbraio 2023 (Fig. 5.58) e del 23 febbraio 2024 (Fig. 5.48). Se invece le precipitazioni risultano essere estremamente abbondanti e intense, il tempo di arrivo della prima pioggia registrata al Lago Pensile si accorcia, stabilendosi nell'ordine delle 6 ore, come esempio si possono menzionare le piene del 28 marzo (Fig. 5.70) e del 21 maggio 2024 (Fig. 5.81).

Bacino idrogeologico

Nella presentazione dei dati in più casi è sorto il dubbio riguardo la provenienza dell'acqua del torrente interno al condotto carsico, ovvero se il relativo bacino idrogeologico coincida solamente con la zona di Fosse o sia invece più ampio. Non è facile formulare una risposta certa, ma i dati rilevati possono essere di grande aiuto. Durante la fase di presentazione sono risultate fuori dalla norma perlomeno due piene. Il primo episodio menzionato è avvenuto il 10 febbraio 2024, dove si è verificata una piena perdurata per 48 ore consecutive; il dato anomalo però è relativo alla precipitazione, in quanto la piena è stata innescata e alimentata solamente da 32 mm di pioggia. Questo valore di precipitazione potrebbe giustificare un impulso di piena, ma analizzando gli idrogrammi e gli ietogrammi di tutti gli altri eventi, una durata così persistente della piena sembra essere difficilmente motivata.

Per dimostrare fisicamente l'anomalia che si registra nell'episodio del 10 febbraio 2024 si è deciso di compararlo con un altro evento che presenta condizioni molto simili. Il 2 maggio 2024 infatti si è verificata una condizione equivalente, come si può notare dall'idrogramma generale (Fig. 5.42). In entrambi i casi nelle 3 settimane precedenti non è stata segnalata nessuna piena e, nel caso di febbraio, perfino le precipitazioni in quell'intervallo risultano praticamente nulle. Nell'evento di maggio invece si sono verificate, la settimana precedente, deboli precipitazioni nell'ordine di qualche millimetro, ma di importanza molto limitata per ciò che si vuole dimostrare. Un'altra caratteristica simile fra i due eventi è la quantità di precipitazione caduta prima e durante l'evento, per chiarezza è preferibile far riferimento ai grafici.

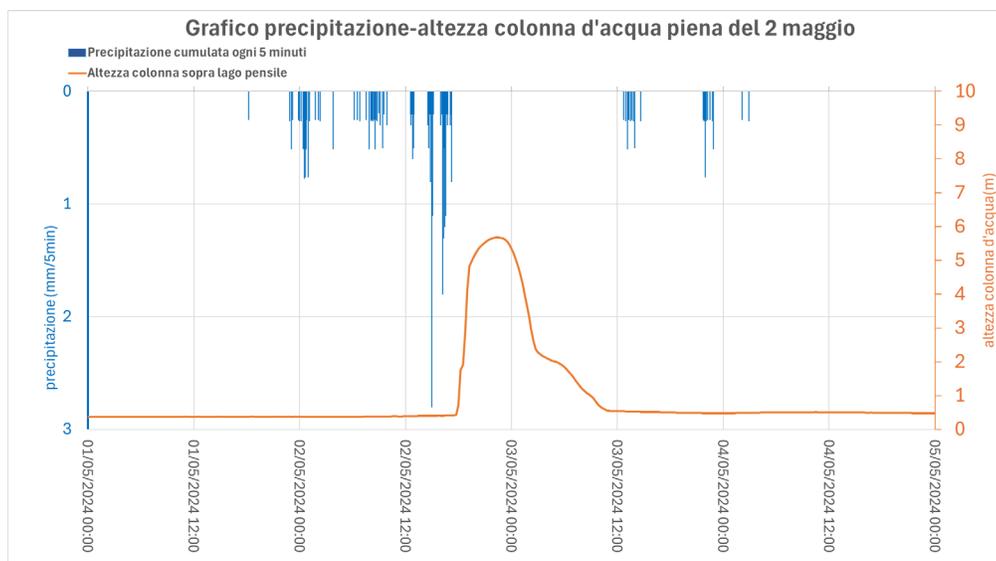


Figura 6.1 - Grafico di precipitazione cumulata ogni 5 minuti e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 2 maggio 2024.

Iniziando dalla piena del 2 maggio si può constatare che la precipitazione registrata prima dell'inizio della fase di carico della curva è pari a 29,43 mm, mentre la precipitazione totale registrata è uguale a 36,04 mm (Fig. 6.1). Si possono notare solamente due valori di precipitazione cumulata decisamente elevati, ma la restante intensità è inferiore al valore di 0,2 mm/min. La piena presentata inizia la fase di carico alle ore 17:45 del 2 maggio e conclude la fase di scarico ristabilendosi ad un livello ordinario alle ore 10:45 del 3 maggio, registrando una durata totale dell'evento di 17 ore, con un intervallo al di sopra del livello piezometrico di 5 metri pari a 4 ore e mezza.

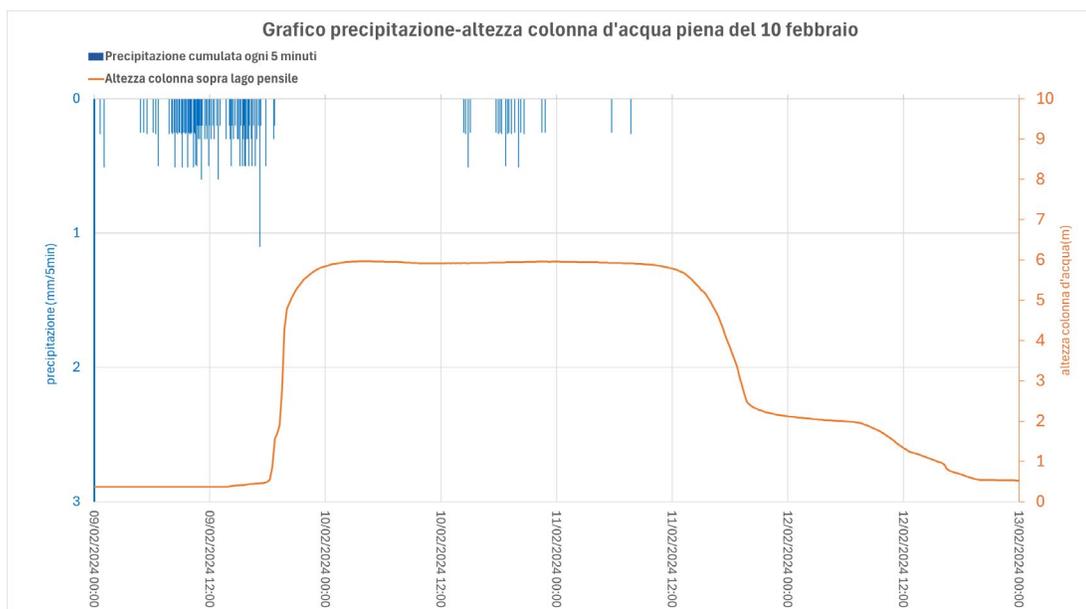


Figura 6.2 - Grafico di precipitazione cumulata ogni 5 minuti e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 10 febbraio 2024.

Si ripropone l'idrogramma della piena del 10 febbraio (Fig. 6.2), così da rendere più chiaro il percorso logico. La piena del 10 febbraio è stata già presentata precedentemente, la fase di carico

è stata anticipata da 20,05 mm di pioggia, mentre la precipitazione totale risulta essere di 32,69 mm, entrambi i valori minori della piena avvenuta il 2 maggio. La piena inizia la fase di carico alle ore 17:45 del giorno 9 febbraio e conclude lo scarico, tornando all'altezza d'acqua indisturbata, alle ore 19:45 del giorno 12 febbraio, registrando una durata totale di 74 ore e stabilendosi per più di 43 ore al di sopra dei 5 metri (Fig. 6.2). Come si può notare le differenze nelle curve di piena sono enormi, mentre le condizioni al contorno dei due eventi invece sono molto simili.

Riassumendo vengono presentate due piene con condizioni molto simili, quindi con precipitazioni coerenti e saturazione del terreno equivalente, ma con l'andamento delle piene completamente diverso. La piena avvenuta il 2 maggio 2024, seppur presentando una precipitazione totale e in particolare pre-picco maggiore, mostra una durata di piena pari al 1/5 rispetto a quella avvenuta il 10 febbraio. Inoltre il tempo in cui l'altezza del livello dell'acqua supera i 5 metri sopra al Lago Pensile risulta essere addirittura 1/10 tra i due eventi.

Per interpretare questa anomalia si è ricorso all'utilizzo di un pluviometro² presente a Passo Fittanze, a Nord di Fosse (Fig. 6.3), che risulta essere indicativo dell'area dei monti Corno d'Aquilio e Corno Mozzo sovrastanti l'altopiano di Fosse.

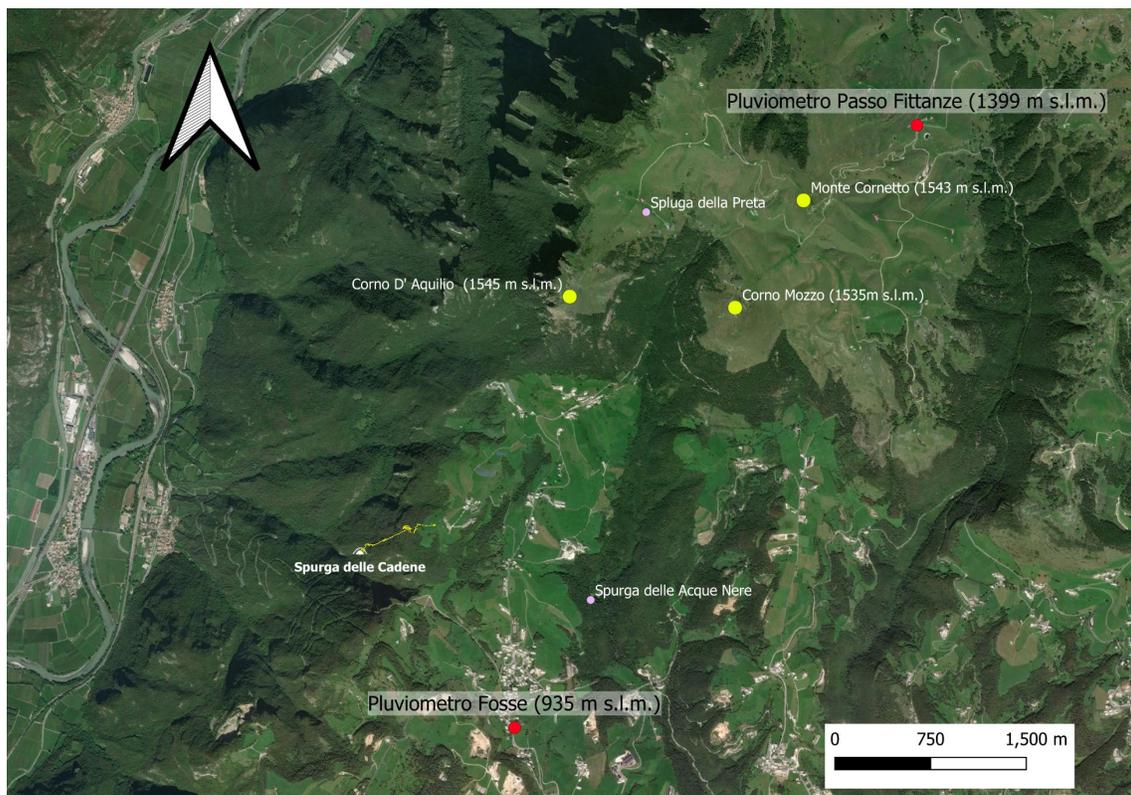


Figura 6.3 - Foto satellitare dell'area di studio con ubicazione dei pluviometri menzionati nel testo.

Analizzando questi nuovi dati sembra poter esserci una possibile soluzione dell'anomalia. Prima della conclusione dell'evento di piena del 2 maggio, sui monti Corno d'Aquilio e Corno Mozzo sono

² Dati forniti da Weather Underground.

precipitati 38 mm di pioggia (Fig. 6.4), dato leggermente più elevato rispetto a ciò che è piovuto nella zona di Fosse nel medesimo intervallo.

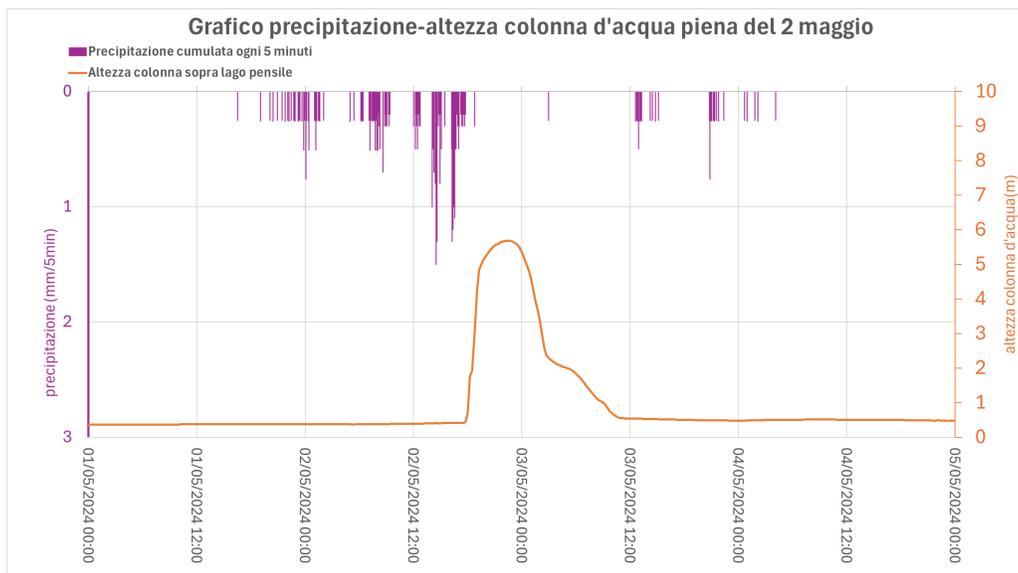


Figura 6.4 - Grafico di precipitazione cumulata ogni 5 minuti ricavata dal pluviometro di Passo Fittanze e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 2 maggio 2024.

Per ciò che concerne la piena del 10 febbraio invece, prima della fase di scarico, il pluviometro ubicato a Passo Fittanze ha registrato una precipitazione cumulata pari a 89,5 mm, un valore quasi 3 volte superiore rispetto a ciò che è stato misurato nella zona di Fosse nel medesimo periodo (Fig. 6.5).

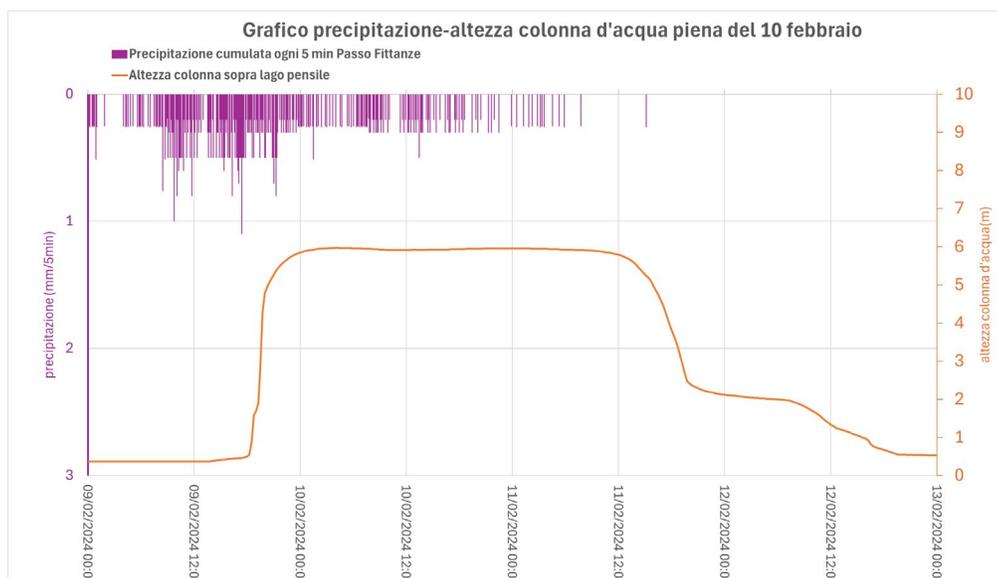


Figura 6.5 - Grafico di precipitazione cumulata ogni 5 minuti ricavata dal pluviometro di Passo Fittanze e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 10 febbraio 2024.

La precipitazione è perdurata anche durante la fase centrale della piena, e potrebbe spiegare così la sua resistenza e perseveranza lunga più di tre giorni (Fig. 6.5). Analizzando i dati presentati

sembra chiaro un coinvolgimento della zona del Corno d'Aquilio all'interno dell'area di ricarica durante le abbondanti precipitazioni.

Un altro esempio, che può essere utile nel chiarire definitivamente il dubbio riguardante il bacino idrogeologico della Spurga delle Cadene durante gli episodi di piena, si cela dietro all'evento più importante registrato durante il periodo di monitoraggio, ovvero quello del 21 maggio 2024. La piena del 21 maggio è un evento estremamente raro, ha raggiunto un'altezza della colonna d'acqua del 30% maggiore a qualsiasi altro evento osservato durante il monitoraggio. Analizzando i dati però era sorto, fin dal principio, un dubbio riguardo l'entità della precipitazione misurata dal pluviometro di Fosse. Il dato di precipitazione cumulata precedente al picco del livello d'acqua, come si può vedere dalla Figura 5.81, è di 45,63 mm. Il valore è elevato ma non sufficiente per giustificare un'anomalia così importante come quella registrata durante l'evento. Per motivare l'affermazione è possibile osservare i grafici generali dei due periodi di monitoraggio in Figura 5.2 e Figura 5.42, sono presenti infatti diverse giornate con precipitazioni decisamente più elevate.

Tra i dati collezionati durante il periodo di monitoraggio, le giornate che hanno registrato precipitazioni giornaliere superiori a 40 mm sono riportate in tabella:

Data	Precipitazione giornaliera cumulata (mm/24h)	Precipitazione giornaliera cumulata (mm/24h)
	Pluviometro Fosse	Pluviometro Passo Fittanze
24-10-23	44,9	69
30-10-23	52,5	66
02-11-23	58,4	70,14
06-01-24	57,6	20,83
22-02-24	42,4	26
23-02-24	50,2	61
15-05-24	47,7	44
21-05-24	43,6	90,42

Tabella 3 - Dati di precipitazione cumulata giornaliera estratti dal pluviometro di Fosse e dal pluviometro di Passo Fittanze durante diverse giornate lungo il periodo di monitoraggio.

Sono presenti 8 giornate con precipitazioni maggiori di 40 mm, ma in tutti i casi, se non quello in discussione, l'altezza dell'acqua durante le piene si è fermata a valori intorno ai 6 metri sopra al Lago Pensile.

Una settimana prima dell'evento del 21 maggio si sono registrate abbondanti precipitazioni nella zona di Fosse quindi, seppur presente un'elevata evapotraspirazione nel mese di maggio, è probabile che il suolo avesse un medio grado di saturazione. Studiando i dati si possono trovare però altri episodi di piena sia con condizioni di saturazione sia con precipitazioni più elevate, come

ad esempio la piena del 30 ottobre, del 2 novembre 2023 o del 23 febbraio 2024, ma nessuno degli eventi citati ha risposto agli input come invece è avvenuto nel caso del 21 maggio 2024.

Una possibile soluzione potrebbe celarsi nuovamente nei dati del pluviometro di Passo Fittanze, rappresentativo della zona dell'Alta Lessinia di cui fanno parte il Corno d'Aquilio e Corno Mozzo e già menzionata precedentemente (Fig. 6.3). Analizzando i valori registrati dal pluviometro durante l'evento di piena del 21 maggio risulta probabile che la pioggia precipitata nel sovrastante altopiano possa aver avuto un ruolo chiave. Viene riportata nel grafico in Figura 6.6 l'idrogramma della piena legato allo ietogramma delle precipitazioni misurate a Passo Fittanze durante l'evento.

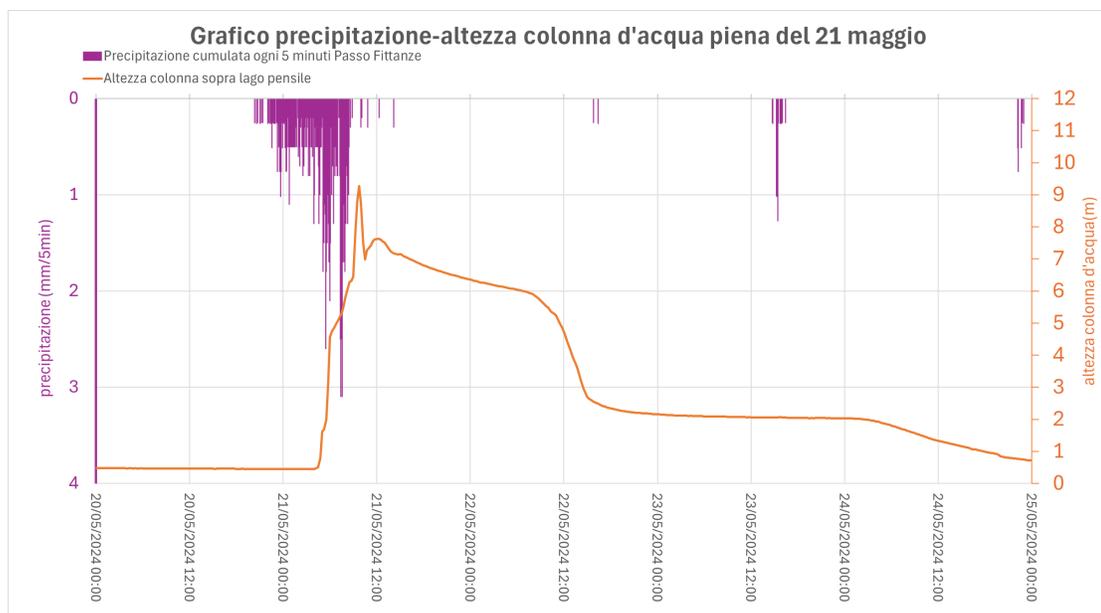


Figura 6.6 - Grafico di precipitazione cumulata ogni 5 minuti ricavata dal pluviometro di Passo Fittanze e altezza colonna d'acqua riguardante la piena del 21 maggio 2024.

Comparando il grafico con l'idrogramma presente in Figura 5.81 si può notare una marcata differenza nelle precipitazioni. Prima del raggiungimento del picco di altezza del livello idraulico nella zona tra il Corno d'Aquilio e il Corno Mozzo, sono state registrate precipitazioni pari a 93 mm, ovvero più del doppio rispetto alle precipitazioni avvenute nella zona di Fosse. Si notano dei picchi di intensità addirittura superiori a 0,6 mm/min.

Analizzando i dati riportati nella discussione, l'ipotesi che si viene a comporre è di un bacino idrogeologico ordinario ubicato nell'altopiano di Fosse, che risponde alle precipitazioni moderate. La zona che sovrasta l'altopiano invece, ovvero il Corno d'Aquilio e il Corno Mozzo, sembra entri in gioco solamente quando le precipitazioni risultano essere molto intense, ovvero quando il reticolo idrogeologico dell'Alta Lessinia non è in grado di smaltire l'acqua precipitata; l'acqua in eccesso, per deflusso superficiale e tramite reticolo carsico, sopraggiunge così nel sistema idrogeologico della Spurga delle Cadene. Questa sorgente, quindi, si potrebbe comportare come esattore di troppo pieno di un reticolo ben più grande e articolato dell'Alta Lessinia.

Meccanismo a stantuffo

Il monitoraggio idrogeologico della Spurga delle Cadene aveva previsto, tra gli obiettivi principali, l'interpretazione del meccanismo che governa la cavità durante gli episodi di piena. Si è costruito un modello semplificato della grotta per poter mostrare e spiegare più chiaramente i risultati ottenuti (Fig. 6.7).

Il modello presentato di seguito restituisce un'idea generale di come si presenti il condotto carsico in periodi di magra. L'acqua proviene da monte, oltrepassa Sala delle Meraviglie e viene poi intercettata dalle fratture presenti sotto il Lago Pensile che, in condizioni di magra, riescono a drenare la totalità di acqua che arriva in input.



Figura 6.7 - Modello della Spurga delle Cadene durante periodi di magra idrogeologica.

Quando invece le precipitazioni nell'area di ricarica sono abbondanti in poche ore l'acqua raggiunge il Lago Pensile, alzando il livello della superficie piezometrica. Aumenta quindi la portata in entrata, che da Qin1 diventa Qin2, il surplus di acqua proveniente da monte non riesce ad essere smaltita efficacemente dalla frattura sotto il Lago Pensile. Il livello idraulico perciò cresce, la velocità di questa fase è fortemente dipendente dalla quantità di acqua in arrivo. Durante la piena del 23 febbraio 2024, per esempio, il livello d'acqua si è alzato con una velocità pari a 3,1 cm/min, mentre nella piena del 21 maggio si è raggiunto il tasso massimo di 6,26 cm/min.

Si può notare come in tutti i grafici di piena le curve del livello dell'acqua mostrino una diminuzione di velocità di crescita della colonna d'acqua intorno all'altezza di 4,4 metri. Il secondo modello mostra la situazione che si trova quando la superficie piezometrica raggiunge un livello di 4 metri sopra al Lago Pensile (Fig. 6.8).

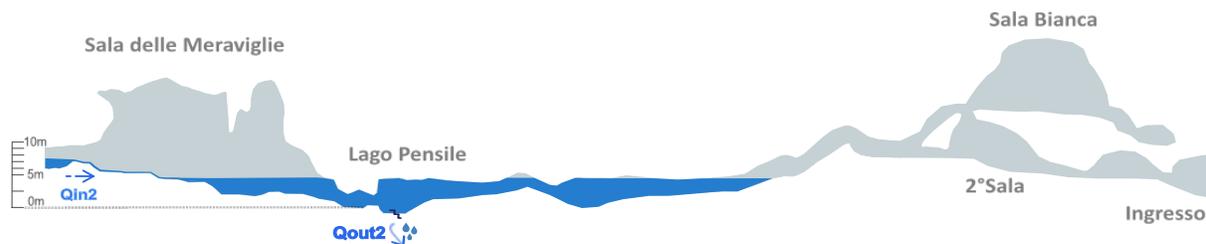


Figura 6.8 - Modello della Spurga delle Cadene con un'altezza dell'acqua pari a 4 metri sopra il Lago Pensile.

Viene mostrata nel grafico la fase di carico della piena avvenuta il 2 dicembre 2023 in cui, oltre all'altezza della colonna d'acqua sopra al Lago Pensile, è stato aggiunto anche il dato della pressione atmosferica misurato in Sala delle Meraviglie e alcune frequenze di suono registrate contemporaneamente in Sala Bianca (Fig. 6.9). Si può notare come la pressione atmosferica inizi la fase decrescente allo stesso momento della decelerazione del tasso di crescita del livello piezometrico. La concomitanza dei 2 fenomeni è certamente legata all'arrivo delle acque di piena

nel canale superiore. Come si nota dal grafico in Figura 6.9 infatti, e come è stato fatto notare in precedenza, le intensità di frequenza crescono enormemente in un intervallo di pochi secondi. La cadenza delle misure di pressione dell'acqua e della pressione atmosferica purtroppo non concede la possibilità di rilevare l'esatta correlazione, ma le evidenze, comparando i vari grafici, sono chiare. I tre eventi, ovvero la diminuzione di pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie, la decelerazione della velocità di incremento del livello piezometrico e l'arrivo dell'ondata di piena nel canale superiore, avvengono tutte nel medesimo momento. Questa combinazione di eventi non è una coincidenza, si ripete infatti in maniera regolare in tutte le piene registrate. La salita del livello dell'acqua è molto veloce, anche di 3 metri in 15 minuti, ma i dati registrati dagli strumenti non sono in grado di chiarire precisamente le dinamiche e i tempi di risalita dell'acqua. Tuttavia si è notato, tramite le registrazioni, come la piena superi il sifone molto velocemente, in un intervallo di 100 secondi le intensità aumentano addirittura di 50 dB. È ipotizzato che anche l'incremento del livello dell'acqua possa essere molto veloce. Dall'analisi di tutte le piene registrate durante il monitoraggio si è potuto evincere come il livello dell'acqua a cui corrisponde la simultaneità dei 3 eventi menzionati è intorno ai 4,3 metri, è possibile però che questo possa variare in base alla velocità di arrivo dell'acqua da monte. A quest'altezza le intensità sono già nettamente aumentate, le frequenze più elevate manterranno un'intensità costante lungo tutto l'evento, quella <10Hz invece risulterà molto variabile, con aumenti e abbassamenti gradualmente guidati dal livello dell'acqua.

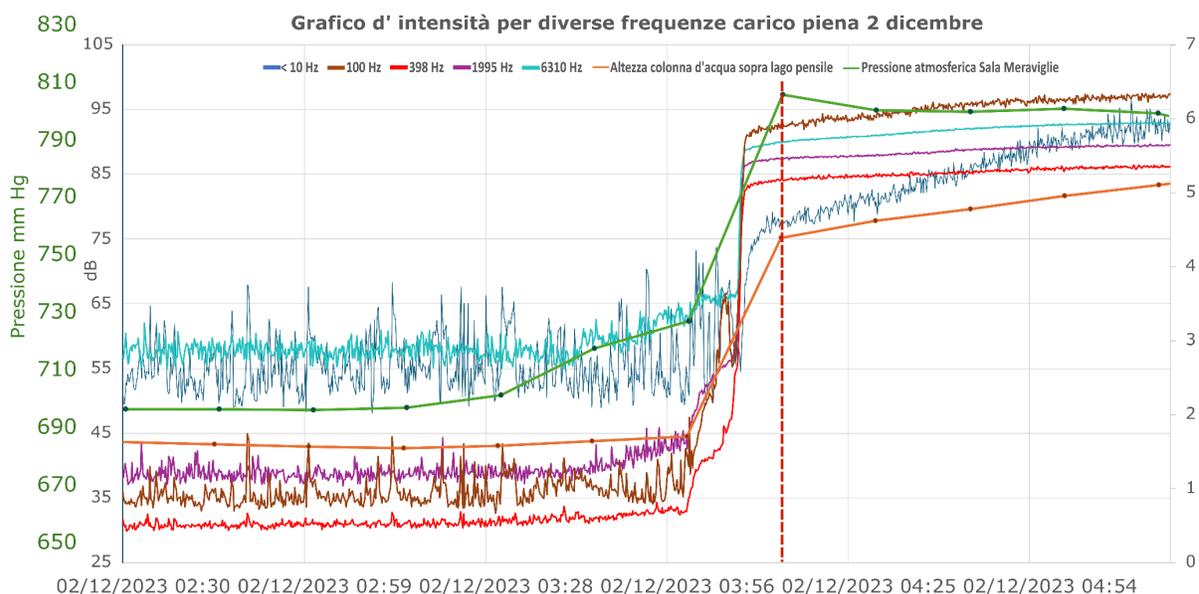


Figura 6.9 - Grafico di intensità di frequenze, altezza piezometrica e pressione atmosferica misurata in Sala delle Meraviglie durante la fase di carico della piena del 14 dicembre 2023.

Come si nota dalla Figura 6.10, le piene presentano un pattern simile e ciclico fra loro, con qualche differenza dovuta alle diverse velocità di carico. La pressione atmosferica mostra movimenti molto simili tra i vari impulsi: presenta un innalzamento iniziale con picco massimo variabile e coincidente con l'inizio della piena, poi una fase di scarico e ristabilizzazione su valori ordinari. Il ripristino del valore standard di pressione atmosferica anticipa invece una fase di depressurizzazione che coincide con la conclusione della piena e la cessazione del flusso di acqua nel canale superiore.

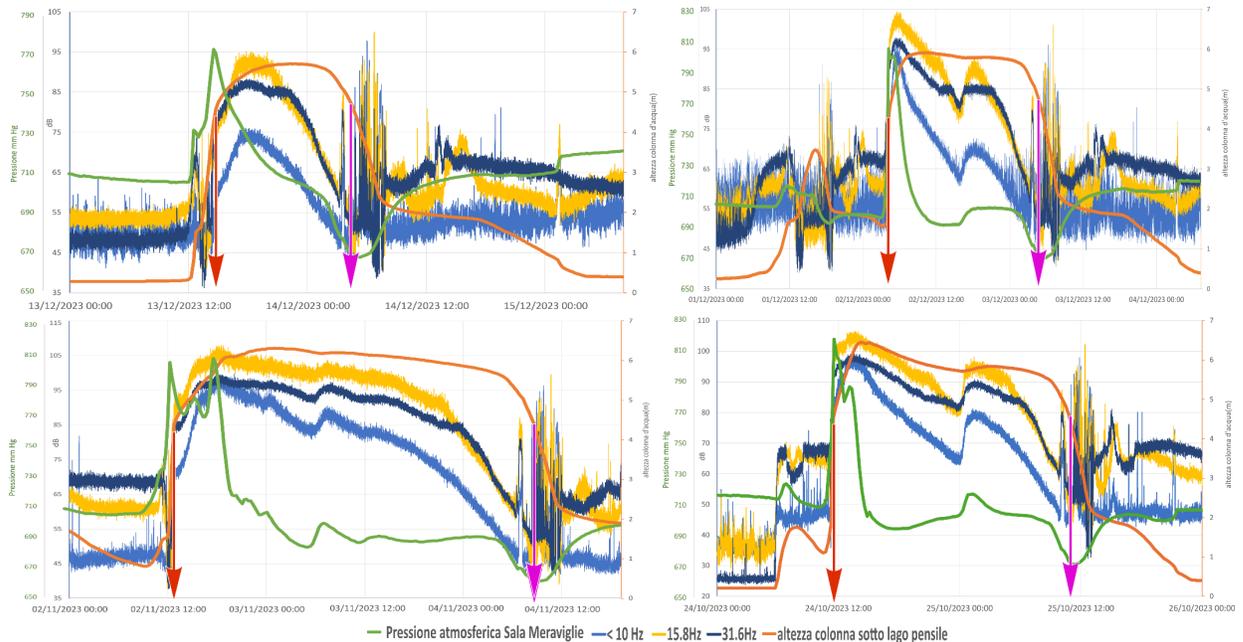


Figura 6.10 - Grafico di intensità di frequenze, altezza piezometrica e pressione atmosferica misurata in Sala delle Meraviglie durante la fase di carico di diverse piene appartenenti al primo periodo di monitoraggio. La freccia rossa indica l'arrivo della piena nel canale superiore, la freccia viola invece indica la fine dello scorrimento nel canale superiore.

Dalla visualizzazione generale presentata si può osservare come l'inizio della piena coincida, in tutti gli eventi, con il massimo valore di pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie (Fig. 6.10). Tutti gli eventi mostrano l'inizio dell'evento corrispondente ad un'altezza della colonna d'acqua intorno ai 4,3 metri, mentre la conclusione coincide invece con un'altezza intorno ai 4,7 metri. In ogni episodio registrato quindi la piena si esaurisce ad un'altezza piezometrica più elevata rispetto a quella registrata nel momento iniziale dell'evento. Si osserva inoltre come ad ogni variazione della pressione atmosferica risulti una marcata variazione delle intensità di frequenza e, in particolare, delle più basse frequenze registrate (Fig. 5.30). Un'altra informazione importante da estrapolare dal grafico è che la conclusione dell'evento coincide con la fase più depressurizzata della Sala delle Meraviglie.

Analizzando con più dettaglio ciò che avviene in Sala delle Meraviglie si può notare come nella fase di carico il livello dell'acqua cresce e di conseguenza comprime l'aria imprigionata all'interno della stanza (Fig. 6.11). Questo repentino incremento della colonna d'acqua perciò aumenta la pressione atmosferica nella Sala, il meccanismo è evidenziato con chiarezza in qualsiasi delle piene riportate come esempio in precedenza.

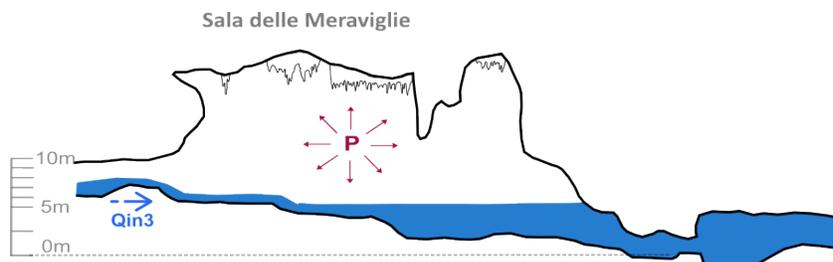


Figura 6.11 - Modello schematico della Sala delle Meraviglie durante la fase di aumento del livello piezometrico.

In Sala delle Meraviglie la pressione atmosferica inizia ad aumentare nel momento in cui il livello della colonna d'acqua sopra al Lago Pensile supera gli 0,8 metri, ovvero quando l'acqua ostruisce la strettoia tra la Sala e il Lago Pensile e quindi il collegamento con gli altri vani del condotto. Come si osserva nel grafico sottostante (Fig. 6.12), il livello massimo di pressione raggiunto dipende dalla velocità di crescita del livello dell'acqua, e quindi dalla portata in input proveniente da monte.

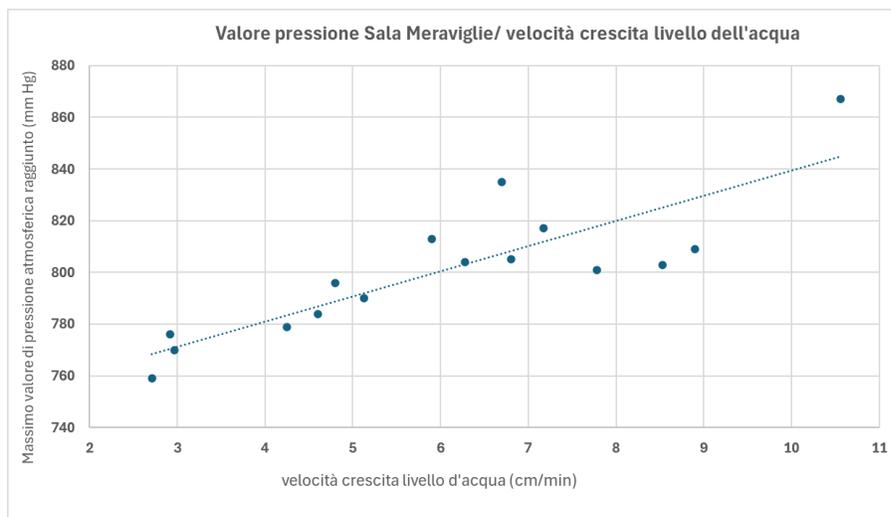


Figura 6.12 - Grafico di velocità di crescita del livello correlato al massimo valore di pressione atmosferica raggiunto.

Dal grafico si può estrapolare anche come la velocità di salita del livello piezometrico, e quindi l'arrivo dell'acqua da monte, sia variabile. È però necessario sottolineare come il picco di pressione atmosferica registrato dipenda molto dalla cadenza di misura del trasduttore, che può coincidere con la massima pressione generata all'interno della Sala o anche ad una fase di diminuzione del valore. Il dato chiave per la comprensione del meccanismo risiede nei dati di pressione atmosferica raccolti. La pressione atmosferica che si instaura in Sala delle Meraviglie si stabilisce probabilmente anche in diverse altre zone della grotta, come fratture o sale minori lungo il condotto carsico e, come si è osservato, l'aria intrappolata raggiunge pressioni elevate. L'ipotesi che si avanza nella presente discussione è che la pressione atmosferica, raggiunto un valore sufficiente, possa dare inizio all'evento di piena nel canale superiore. Questo effetto consiste nella spinta da parte delle sacche d'aria sotto pressione ai danni dell'acqua ed è spiegato dalla Legge di Pascal. Quello di pressione è un concetto centrale nella meccanica dei fluidi, siano essi liquidi o aeriformi. Considerando una forza F che agisce perpendicolarmente ad una superficie S , la pressione P è definita come il rapporto tra la forza e la superficie:

$$P = F/S \text{ (Pascal)}$$

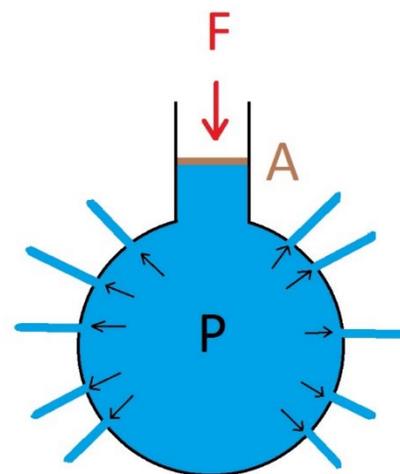


Figura 6.13 - Principio di Pascal.

Il principio di Pascal afferma che una pressione esercitata in un punto di una massa fluida si trasmette in ogni altro punto e in tutte le direzioni con la stessa intensità (Fig. 6.13). Secondo

questo principio quindi, se in un punto di un fluido la pressione è variata di una certa quantità, tale variazione si trasmette in ogni altro punto del fluido stesso. In pratica si può concludere quindi che una forza applicata sulla superficie di un fluido si trasmette in tutte le direzioni all'interno del fluido con la stessa intensità su superfici uguali.

Un ulteriore fenomeno fisico che possiede un ruolo importante nel meccanismo di funzionamento della grotta è il principio dei vasi comunicanti secondo il quale un liquido contenuto in due o più contenitori comunicanti tra loro, in presenza di medesima pressione, raggiunge lo stesso livello originando un'unica superficie equipotenziale. Nelle condizioni osservate all'interno della Spurga delle Cadene però la pressione non risulta essere equivalente nei vani interni. Si presenta in Figura 6.14 una schematizzazione di ciò che può avvenire all'interno della cavità.

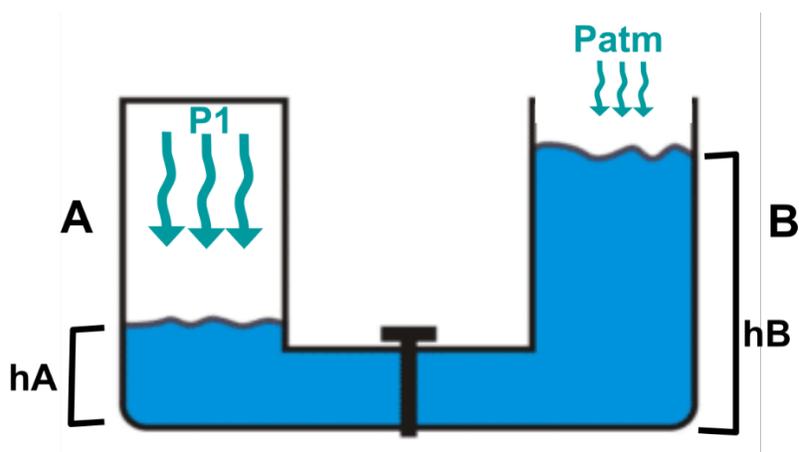


Figura 6.14 Principio dei vasi comunicanti in condizioni di differenza di pressione atmosferica agente in superficie.

L'apparato strumentale è formato da due braccia chiamate rispettivamente A e B dove A è sottoposta ad una pressione P_1 e B ad una pressione P_{atm} , in cui $P_1 \gg P_{atm}$. Per il principio di Pascal, la pressione esercitata sulla superficie di separazione, essendo il fluido in equilibrio, deve essere uguale in entrambi i lati: $p_A = p_B$. La magnitudine di questa pressione è indicata dalla legge di Stevino:

$$P_1 + \rho g h_A = P_{atm} + \rho g h_B$$

Per mostrare un esempio concreto di ciò che avviene all'interno della cavità vengono utilizzati i dati relativi alla piena avvenuta il 30 ottobre 2023. Durante le fasi di avvio della suddetta piena la strumentazione ha misurato una pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie pari a 830 mm Hg, corrispondenti a 110657 Pa. La pressione atmosferica lungo il canale superiore si attestava sui 95058 Pa, mentre l'altezza h_A risultava essere pari a 4,52m. Viene applicata la legge di Stevino con l'obiettivo di calcolare il valore di h_B :

$$110657 \text{ Pa} + (1000 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * 4,52 \text{ m}) = 95058 \text{ Pa} + (1000 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * h_B)$$

$$h_B = (15599 + 44341) / 9810 = 6,12 \text{ m}$$

La pressurizzazione della Sala delle Meraviglie, durante la piena del 30 ottobre 2023, ha causato un aumento di altezza della colonna d'acqua lungo la verticale B pari a 1,6 metri.

Secondo le leggi fisiche presentate quindi l'acqua, che nel frattempo continua a crescere di livello, subisce una spinta addizionale data dalla pressione atmosferica che, in un breve lasso di tempo, le consente di raggiungere l'altezza tale da superare l'ostacolo costituito dalla differenza di quota con il canale superiore. L'ondata di piena in arrivo scorre, fin dal principio, con un flusso decisamente poderoso (registrazione in Fig. 5.19) attraverso il canale superiore fino a fuoriuscire dal varco d'entrata della grotta. Una volta innescato il meccanismo esso proseguirà fino a che il livello del bacino d'acqua in Sala delle Meraviglie rimarrà superiore al livello di scarico rappresentato dal varco d'entrata della grotta.

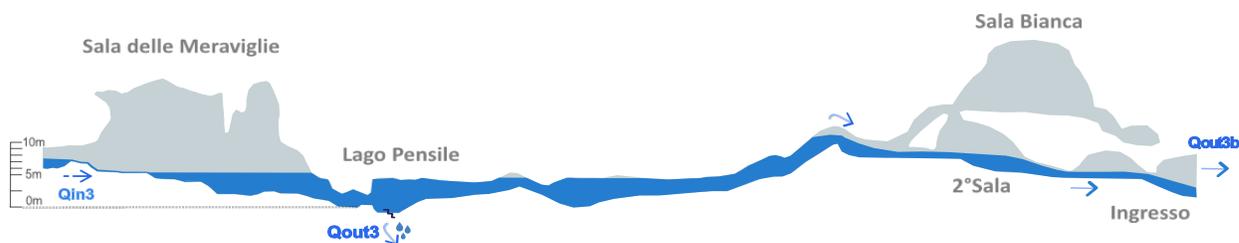


Figura 6.15 - Modello della Spurga delle Cadene con un'altezza dell'acqua pari a 4,6 metri sopra il Lago Pensile.

Ovviamente, la raffigurazione mostrata in Figura 6.15 è schematica e non restituisce la dinamica reale, ma è utile per restituire un'idea di come la grotta si presenti morfologicamente e come possa comportarsi un evento di piena al suo interno. Il processo che governa i periodi di piena verrà chiamato effetto stantuffo, dove il motore del meccanismo è proprio quest'aumento di pressione che si verifica in Sala delle Meraviglie. La Sala delle Meraviglie è probabilmente la zona di genesi di questo meccanismo, non è da escludere però che esistano altre zone della grotta dove volumi d'aria intrappolati formino sovrappressioni anche maggiori. La pressione atmosferica tende ad aumentare fino a raggiungere un valore tale da riuscire a innescare il meccanismo. Come già notato nei grafici infatti, la pressione atmosferica nella sala raggiunge il suo picco nel momento dell'arrivo dell'ondata di piena nel canale superiore, dopodiché essa progressivamente diminuirà. È proprio l'aumento della pressione registrato che rende possibile il superamento del dislivello tra i due canali. Analizzando la Figura 6.12 si desume che l'effetto stantuffo non è direttamente correlabile con il livello di pressione raggiunto in Sala delle Meraviglie, e neppure con la velocità di incremento del livello, è invece sempre legato all'altezza del livello dell'acqua intorno a quota 4,3 metri.

Ascoltando le registrazioni collezionate all'interno della grotta è evidente come l'ondata di piena arrivi improvvisamente, in un intervallo di pochi secondi si può udire l'avvicinamento dell'onda verso il microfono fino allo scrosciare dell'acqua all'interno della 2° Sala che, fin dal principio, risulta essere un suono forte e intenso. Dopo pochi minuti il rumore si intensifica fino a risultare assordante per l'orecchio umano. Si ha la sensazione di essere davanti ad un fenomeno molto vigoroso, con una portata del flusso nell'ordine di diverse centinaia fino al migliaio di litri al secondo. Le sacche d'aria che vengono isolate all'interno del condotto imprimono una pressione all'acqua determinante per il meccanismo in discussione. Le zone in cui vengono intrappolati questi volumi d'aria potrebbero essere numerose lungo l'interezza del condotto: durante la fase di incremento del livello piezometrico innumerevoli cupole, fratture e anfratti potrebbero dare luogo a zone di sovrappressioni. Studiando i dati registrati nel periodo sembra però chiaro che Sala delle Meraviglie abbia un ruolo centrale e incontestabile per quanto riguarda l'innescò del meccanismo.

Sala delle Meraviglie è stata scelta come zona di monitoraggio della pressione atmosferica in quanto rappresenta una sala di grandi dimensioni verticali in cui era possibile alloggiare il trasduttore di pressione senza pericolo di essere sommerso; inoltre rappresenta uno dei vani più grandi dell'intera grotta e, in fase preliminare, era stato ipotizzato un suo ruolo chiave come motore del meccanismo che governa il condotto. Per la legge di Pascal, la pressione impressa dall'aria all'interno della Sala si distribuisce uniformemente all'interno del fluido che in questo modo tende ad essere indirizzato verso l'unica direzione in cui non è confinato da pressioni, ovvero verso l'uscita della grotta. Contemporaneamente all'innescò del meccanismo, il livello di pressione atmosferica misurato dentro alla grande sala inizia gradualmente a calare. Questa diminuzione del livello di pressione è ancora oggetto di discussione, può essere legato all'incorporazione di volumi d'aria all'interno del flusso d'acqua durante il processo di sifonamento, o alla fuoriuscita dell'aria in pressione tramite frattura. Infatti è possibile che, raggiunto l'altezza piezometrica di 4,3 metri l'acqua raggiunga una frattura dell'ammasso roccioso e innesci un fenomeno di sifonamento che porti fuori gradualmente parte dell'aria presente nella Sala e la indirizzi in un'altra zona della grotta. Un'altra possibilità è la presenza di una frattura piena d'acqua, non a contatto con il livello piezometrico, dove la pressione, una volta superato il valore di resistenza che la presenza dell'acqua nella frattura impone, riesca a crearsi una via attraverso essa e usarla come valvola di sfogo. Questa soluzione potrebbe spiegare i diversi valori di pressione in cui la pressione crolla, ma sarebbe indipendente dall'altezza del livello dell'acqua e, visto che in ogni piena la pressione crolla o subisce uno smorzamento coincidentemente al sopraggiungere della piena, l'ipotesi risulta un po' ambigua. La pressione atmosferica inizia a diminuire nell'esatto momento del raggiungimento del canale superiore da parte dell'ondata di piena. È come se, una volta raggiunto lo sfogo rappresentato dal raggiungimento del canale superiore, essa potesse rilassare e aumentare il proprio volume. Una terza ipotesi valutata è che il flusso di acqua, che si viene a creare a valle del Lago Pensile verso l'uscita della grotta, incorpori aria presente all'interno di canali secondari e piccole salette presenti, e formi così zone depressurizzate. L'aria presente all'interno di Sala delle Meraviglie, che invece risulta in pressione durante questa fase, e che è in collegamento tramite fratture a queste salette e canali depressurizzati, tende così a essere richiamata per gradiente di pressione. Questa perdita di aria per frattura potrebbe spiegare la diminuzione di pressione graduale interna alla Sala.

Osservare le frequenze registrate nella seconda metà di monitoraggio può fornire informazioni utili in più per comprendere ciò che accade. L'evento registrato il 23 febbraio 2024 (Fig. 6.16) è un buon esempio di come si presentano le intensità registrate in questa fase, come si osserva dalle curve di intensità mostrate in grafico, la piena arriva quindi improvvisamente nel giro di pochi secondi. Anche nella seconda metà di monitoraggio il momento di arrivo dell'acqua nel canale superiore coincide quasi perfettamente con il massimo livello di pressione atmosferica, la mancanza dell'esatta contemporaneità è motivata dal lasso temporale di 15 minuti settato tra una misura e la successiva.

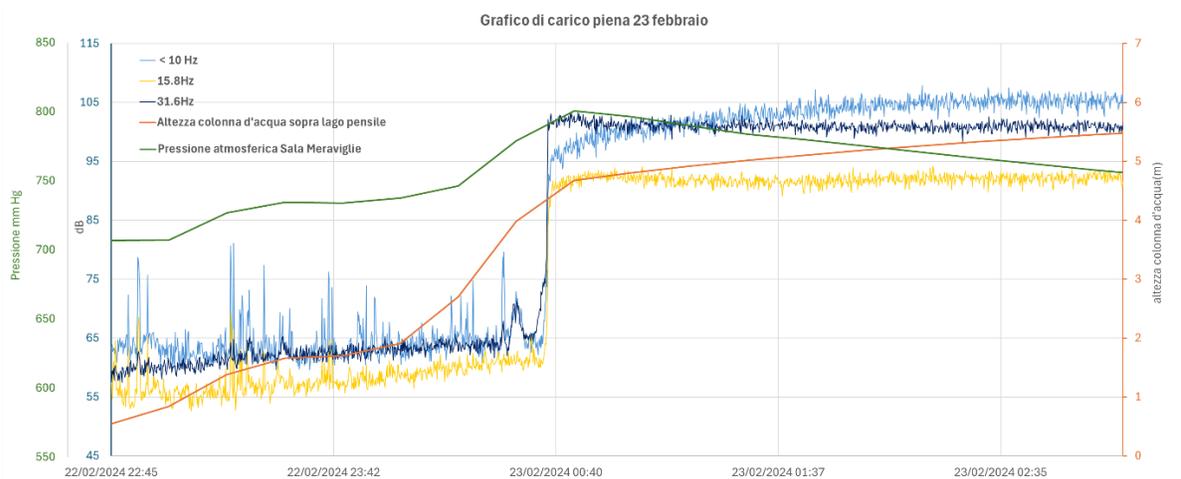


Figura 6.16 - Grafico di intensità di frequenze, pressione atmosferica e altezza colonna d'acqua riguardante la fase di carico della piena del 23 febbraio 2024.

In Figura 6.17 viene evidenziata, con una linea verticale rossa tratteggiata, una variazione della pressione atmosferica accompagnata da un aumento di intensità di frequenza. È interessante osservare come ad una variazione di pressione all'interno della Sala delle Meraviglie corrisponda direttamente un aumento di intensità delle frequenze che testimonia, di conseguenza, un aumento di portata passante dal canale superiore. Questo fattore sottolinea l'importanza della Sala delle Meraviglie nel meccanismo di funzionamento della grotta, e di quanto quest'ultimo sia dipendente dalla variazione della pressione atmosferica che si instaura all'interno. In Figura 5.30 si è evidenziato inoltre come ad una differenza di pressione atmosferica consegua un'intensa variazione nelle basse frequenze che si attenua verso le più alte.

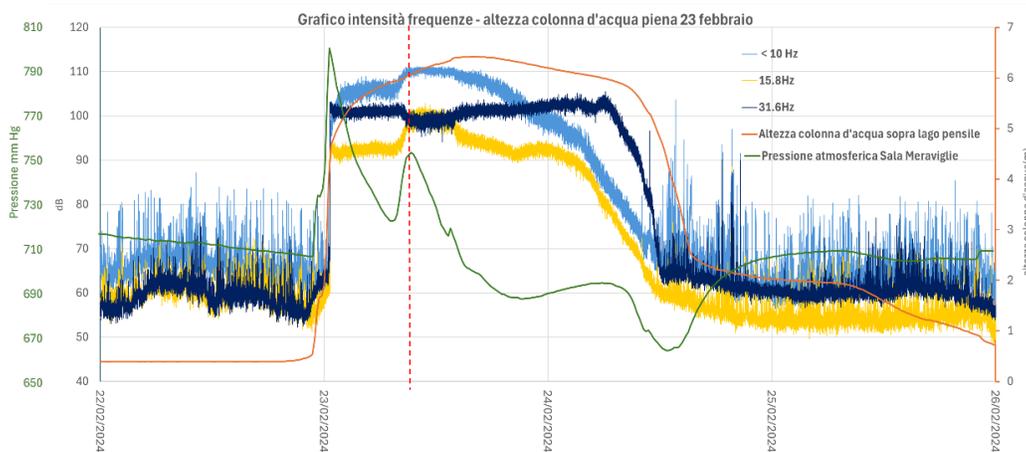


Figura 6.17 - Grafico di intensità di frequenze, pressione atmosferica e livello dell'acqua riguardante la piena del 23 febbraio 2024.

In generale il grafico mostra caratteristiche analoghe a ciò che è stato osservato per il primo periodo. La pressione inizialmente cresce e avvia l'effetto stantuffo che spinge l'acqua dalla parte inferiore del sifone al canale superiore. Come si può notare dal grafico le intensità crescono vertiginosamente e in maniera repentina, con aumenti fino a 40 Hz in pochi secondi, questo avviene senza eccezioni ad un livello di altezza della colonna d'acqua sopra il Lago Pensile circa

pari a 4,3 metri. Le intensità crescono vertiginosamente nella fase di carico, esse in pochi minuti raggiungono il valore massimo. Con il passare del tempo invece le intensità, soprattutto le più basse, tendono a diminuire, registrando la fase di decrescita mentre il livello è ancora decisamente alto e costante sopra il Lago Pensile.

Oltre ai dati acustici si ha la possibilità di correlare alcune osservazioni eseguite nell'entrata della grotta a seguito di forti precipitazioni durante diverse fasi dell'evento di piena. Correlando l'orario dell'osservazione e i dati del trasduttore di pressione è stato possibile valutare direttamente le entità di portata durante diverse fasi dell'evento. In tabella 4 vengono riportati i dati relativi a due osservazioni eseguite fisicamente sul campo, una avvenuta il 28 febbraio 2024 e l'altra il 16 maggio 2024.

<p>-Data e ora 16-05-24 21:18</p> <p>-Livello acqua 5,52m</p> <p>-Valore pressione 791 mm Hg</p>		
<p>-Data e ora 28-02-24 16:14</p> <p>-Livello acqua 5,98m</p> <p>-Valore pressione 711 mm Hg</p>		

Tabella 4 - Vengono comparate due osservazioni eseguite fisicamente durante due episodi di piena differenti (ma con la medesima prospettiva) con i relativi dati acquisiti tramite la strumentazione presente all'interno della cavità (foto E. Nicolini).

In tabella 4 si può osservare come due diverse fasi di un episodio di piena si presentino all'entrata della grotta in differenti condizioni, le due fotografie all'interno della tabella mostrano precisamente la medesima prospettiva. La fotografia realizzata il 16 maggio corrisponde ad una fase iniziale dell'evento calamitoso, la piena ha raggiunto il canale superiore solamente da 90 minuti circa. La pressione atmosferica è ancora elevata, seppur si trovi in fase avanzata di decrescita, mentre il livello dell'acqua si attesta sui 5,52 metri. Il materiale fotografico e video in possesso mostra un enorme vigore, energia e rumore proveniente dal copioso volume d'acqua che fuoriesce dall'entrata della grotta. Il secondo evento osservato riguarda invece l'evento registrato

il 28 febbraio 2024. Le condizioni al contorno in questo caso risultano differenti, la piena è già in atto da 40 ore, la pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie si è riequilibrata nuovamente, mentre il livello d'acqua sopra il Lago Pensile risulta essere intorno ai 6 metri. Le osservazioni eseguite fisicamente, e documentate con materiale fotografico, riportano una quantità d'acqua nettamente inferiore, così come risultavano inferiore rumore e vigore del flusso. Queste osservazioni sono state inserite nella discussione per mostrare come la portata in uscita nel canale superiore, e quindi l'effetto stantuffo, sia strettamente legato alla pressione atmosferica, ben più di quanto invece sia legato al livello d'acqua nel Lago Pensile. Durante la fase intermedia di una piena osservata il 28 febbraio 2024, ad un più elevato valore di altezza piezometrica, corrisponde una portata, nel varco d'entrata, visibilmente inferiore rispetto alla portata legata ad una fase iniziale di un evento, nonostante il livello di altezza piezometrica fosse decisamente inferiore. Dai risultati mostrati in questa relazione viene evidenziato come la fase iniziale di una piena nella Spurga delle Cadene sia il momento di massima energia e portata, questo è sottolineato dalle intensità delle frequenze e da osservazioni fisiche documentate nella tabella soprastante.

La quasi totalità delle piene osservate durante il monitoraggio hanno raggiunto un'altezza del livello dell'acqua sopra al Lago Pensile intorno ai 6 metri, solo in qualche caso hanno raggiunto i 6,5 metri di altezza come ad esempio durante la piena del 30 ottobre 2023.

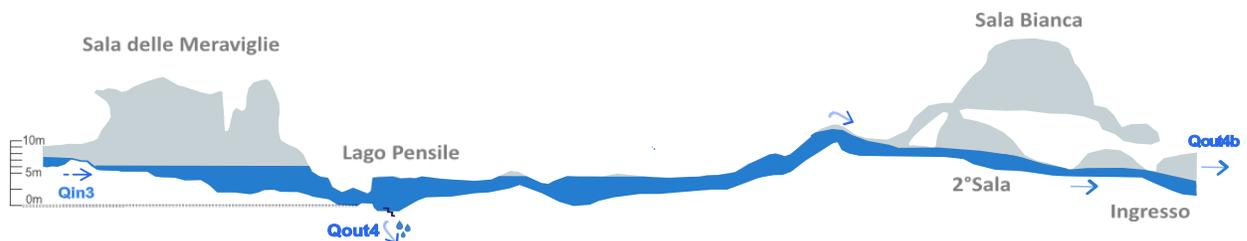


Figura 6.18 - Modello della Spurga delle Cadene con un'altezza della colonna d'acqua pari a 6 metri sopra il Lago Pensile.

La Figura 6.18 mostra la schematizzazione della grotta nel momento di massimo livello piezometrico registrato durante la maggioranza delle piene, pari a 6 metri. Quando il livello dell'acqua ha raggiunto questo valore il flusso nel canale superiore è già in atto da diverse ore.

Il meccanismo a stantuffo ha mostrato la sua massima espressione durante la piena del 21 maggio 2024, quando il livello dell'acqua ha raggiunto i 9,4 metri.

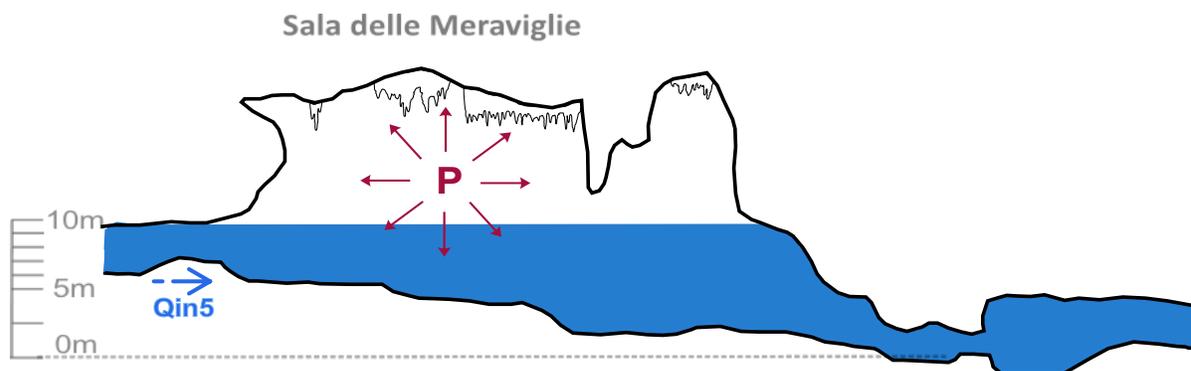


Figura 6.19 - Modello della Sala delle Meraviglie durante la massima altezza misurata durante il monitoraggio, ovvero i 9,4 metri sopra il Lago Pensile misurati durante la piena del 21 maggio 2024.

La pressione in Sala delle Meraviglie, durante questa piena, ha raggiunto valori molto elevati pari a 1236 mm Hg, questo valore è rimasto stabile per più di un'ora, fino a quando il livello dell'acqua non è sceso al di sotto degli 8 metri, a quel punto è iniziata la fase di scarico barico (Fig. 6.20).

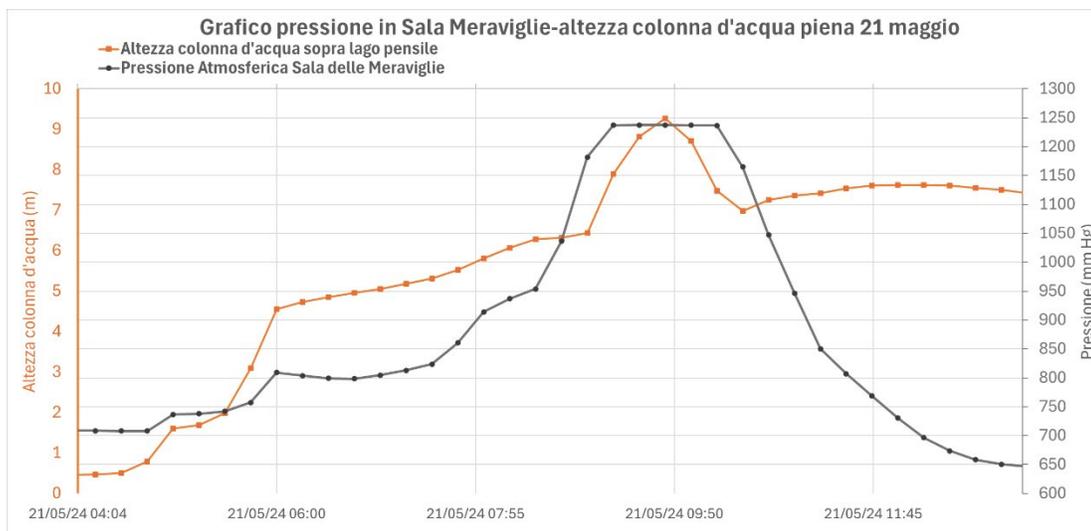


Figura 6.20 - Grafico di pressione atmosferica e altezza della colonna d'acqua durante il picco della piena del 21 maggio 2024.

La fase di scarico di pressione, durante l'evento di piena del 21 maggio 2024, impiega meno di 3 ore a raggiungere il valore minimo, praticamente dimezzando la propria dimensione con un balzo negativo di 600 mm Hg, registrando così il dato più basso di pressione dell'intero monitoraggio, ovvero 647 mm Hg raggiunto quando ancora il livello piezometrico era pari a 7,7m (Fig. 6.20). La variazione di pressione osservata è molto ampia, i valori di millimetri di mercurio registrati e convertiti in atmosfere spaziano dalla pressione riscontrabile a -4400 metri s.l.m. ai +1350 metri s.l.m. in meno di 180 minuti, una variazione così marcata e così veloce potrebbe avere conseguenze nefaste per la salute umana.

La caduta di pressione durante la fase conclusiva della piena avviene sistematicamente in tutte le piene osservate, raggiungendo nella maggior parte dei casi un valore intorno ai 670 mm Hg, come ad esempio si può osservare in Figura 5.34 e Figura 5.49. Tutte le curve di pressione atmosferica presentano il valore più basso in corrispondenza dell'altezza del livello piezometrico pari a 4,15 metri durante la fase di scarico. Alla depressurizzazione coincide anche la conclusione dello scorrimento del flusso d'acqua nel canale superiore.

Il picco negativo di pressione che si registra è conseguenza dell'espansione della sacca d'aria presente all'interno della Sala delle Meraviglie (Fig. 6.21). L'aria rimasta intrappolata nella Sala, vista la fuoriuscita di una parte durante la fase di carico, è in quantità minore rispetto a quella inizialmente presente perciò, durante la decrescita del livello, essa ha più volume da occupare, tanto da creare una depressurizzazione. Raggiunto il picco di depressione entra in gioco la liberazione di alcune fratture collegate con altre zone della grotta. È infatti probabile che a seguito dell'abbassamento del livello dell'acqua vengano esposte fratture che in precedenza si trovavano al di sotto del livello piezometrico. La depressurizzazione a questo punto richiama aria, tramite le suddette fratture da altri vani del sistema carsico, ristabilendo così un valore di pressione atmosferica di equilibrio.

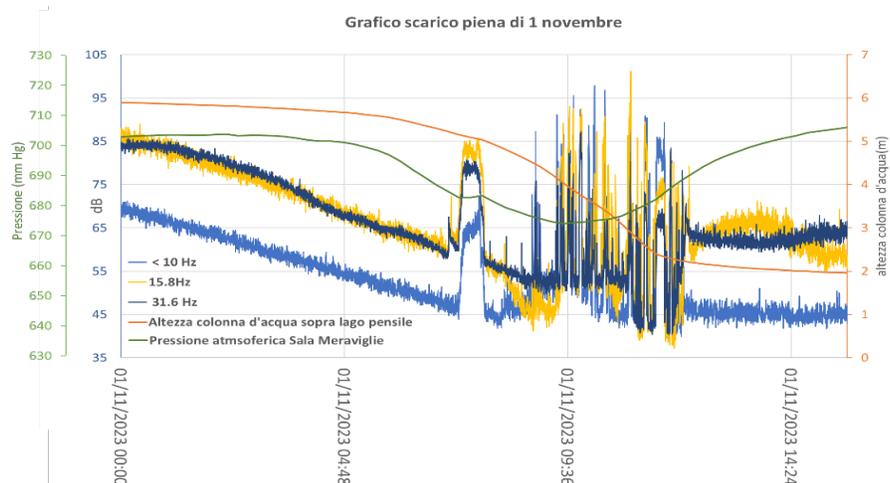


Figura 6.21 - Grafico di intensità di frequenza, altezza colonna d'acqua e pressione atmosferica riguardante la fase di scarico della piena del 1 novembre.

Il valore di depressurizzazione record registrato durante la piena del 21 maggio 2024 è dovuto semplicemente alla minore quantità di aria presente all'interno del volume della sala. La piena ha raggiunto altezze della colonna d'acqua molto elevate, pari a 9,4 metri sopra al Lago Pensile, in questo modo l'aria è stata compressa raggiungendo alti valori di pressione nella fase di carico. Parte dell'aria, in questa situazione, riesce ad evadere tramite frattura o tramite l'inglobamento nel flusso del sifone. Una volta che il livello diminuisce, la poca aria rimasta nella sala ha molto volume da occupare, potendo così espandersi come mai è stato osservato in precedenza. La piena in questione presenta infatti due picchi negativi, uno relativo alla prima decrescita del livello piezometrico dai 9 ai 6 metri, e l'altro dai 5 ai 2 metri; entrambi, dopo la fase depressa, tendono a ristabilire la pressione tramite richiamo di aria per frattura (Fig. 5.82).

Un'altra interessante serie di dati raccolta riguarda la pressione atmosferica in Sala Bianca, campionata nella seconda parte di monitoraggio. La Sala Bianca si trova nel canale superiore al di sopra della 2° Sala, divisa da essa tramite un diaframma costituito da breccia, già in precedenza descritta, nel quale sono presenti alcune vie di comunicazione fra i due vani. Il canale superiore, partendo dalla Sala Bianca verso l'entrata della grotta, presenta due restringimenti alti all'incirca un metro che possono fungere da barriera in caso sopraggiunga sufficiente acqua dal sifone. Durante le normali piene si possono notare, nel grafico in Figura 5.50, alcune piccole perturbazioni della pressione in Sala Bianca, principalmente però esse presentano variazioni negative, con diminuzioni nell'ordine dei 10-20 mm Hg. Durante la piena del 21 maggio è avvenuto però qualcosa di inaspettato. Come si può notare dal grafico in Figura 5.83, l'anomala quantità d'acqua presente durante l'evento ha completamente occluso i restringimenti nel canale superiore e ha innalzato così il livello dell'acqua in modo imprevisto nella 2° Sala. L'aria intrappolata in Sala Bianca ha quindi subito un intenso fenomeno di compressione, infatti la pressione atmosferica interna al vano, durante questo preciso evento di piena, ha raggiunto livelli superiori a quelli misurati durante la totalità delle piene ordinarie in Sala delle Meraviglie.

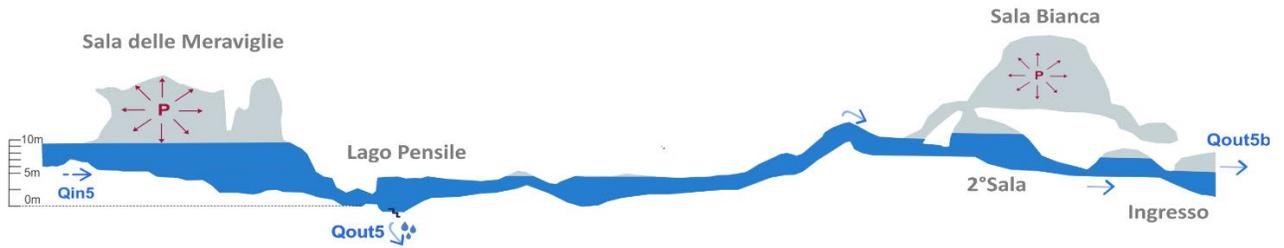


Figura 6.22 - Modello della Spurga delle Cadene durante l'evento del 21 maggio 2024. L'altezza della colonna d'acqua ha raggiunto i 9,4 metri sopra il Lago Pensile.

Si può supporre che l'acqua abbia raggiunto un'altezza di svariati metri nella 2° Sala, fattore che non si era mai preso in considerazione prima di analizzare i dati dell'evento in questione (Fig. 6.22). La pressione atmosferica ha quindi raggiunto i 900 mm Hg prima di diminuire vertiginosamente fino al valore di 666 mm Hg solamente 3 ore dopo. Certamente quello appena descritto è un fenomeno raro, ma nella scala dei tempi geologici è avvenuto migliaia di volte, assumendo un ruolo importante nella modellazione della odierna morfologia.

Le diminuzioni di pressione registrate in Sala Bianca sono giustificate con l'incorporazione di aria, presente nel condotto superiore, all'interno del flusso d'acqua che scorre ad alta velocità; l'aria persa in tal modo non può essere supplita da entrate esterne, visto che durante il massimo periodo di flusso di piena la 2° Sala è un sistema isolato, perciò l'aria proveniente dalla soprastante Sala Bianca si espande creando così una depressurizzazione. Il canale superiore, quando il flusso d'acqua diminuisce, riesce a comunicare con l'esterno tramite l'intercapedine tra il torrente in piena e le strettoie, ristabilendo così molto in fretta l'equilibrio barico fra esterno ed interno. Il fenomeno è simile anche a ciò che avviene in Sala delle Meraviglie, dove le depressioni durante la fase di scarico sono state registrate per ogni piena.

La trattazione presentata espone come la grotta, durante gli eventi di piena, sia governata dalle sovrappressioni che si generano all'interno dei suoi vani. Il vano principale, in questo contesto, risulta essere Sala delle Meraviglie, la quale può essere considerata il motore del processo. Questa Sala applica all'acqua la pressione sufficiente per dare avvio all'effetto stantuffo. L'acqua viene spinta verso il canale superiore e dà avvio all'ondata di piena che inizialmente presenta il massimo vigore e poi, seppur il livello dell'acqua rimane elevato, tende a diminuire di intensità e portata. Il flusso passante per il canale superiore procede finché il livello idraulico della Sala delle Meraviglie è superiore al livello idraulico di fuoriuscita dall'ingresso della grotta. L'innalzamento del valore di pressione atmosferica è dovuto all'incremento del livello dell'acqua con la conseguente compressione dell'aria, la sua ripida caduta invece è spiegabile in diversi modi, ma il più probabile è la fuoriuscita di aria tramite frattura quando le differenze di pressione sono sufficienti da stabilire una via di comunicazione all'interno di quest'ultima. La depressurizzazione di Sala delle Meraviglie, durante la decrescita del livello piezometrico, è riconducibile all'espansione dell'aria rimasta all'interno della Sala. La depressurizzazione riscontrata in Sala Bianca è dovuta invece all'incorporamento di parte dell'aria all'interno del flusso durante la fase più vigorosa dell'evento, quando il flusso occlude i portali di comunicazione della sala con l'esterno rendendo la parte più interna del canale superiore un ambiente isolato.

La conservazione dell'energia

Analizzando i dati raccolti si è riconosciuto un particolare meccanismo riguardante la temperatura atmosferica in Sala delle Meraviglie. I dati riguardanti la temperatura atmosferica mostrano una perfetta sincronia con le fluttuazioni di pressione atmosferica, come si può notare in grafico (Fig. 6.23).

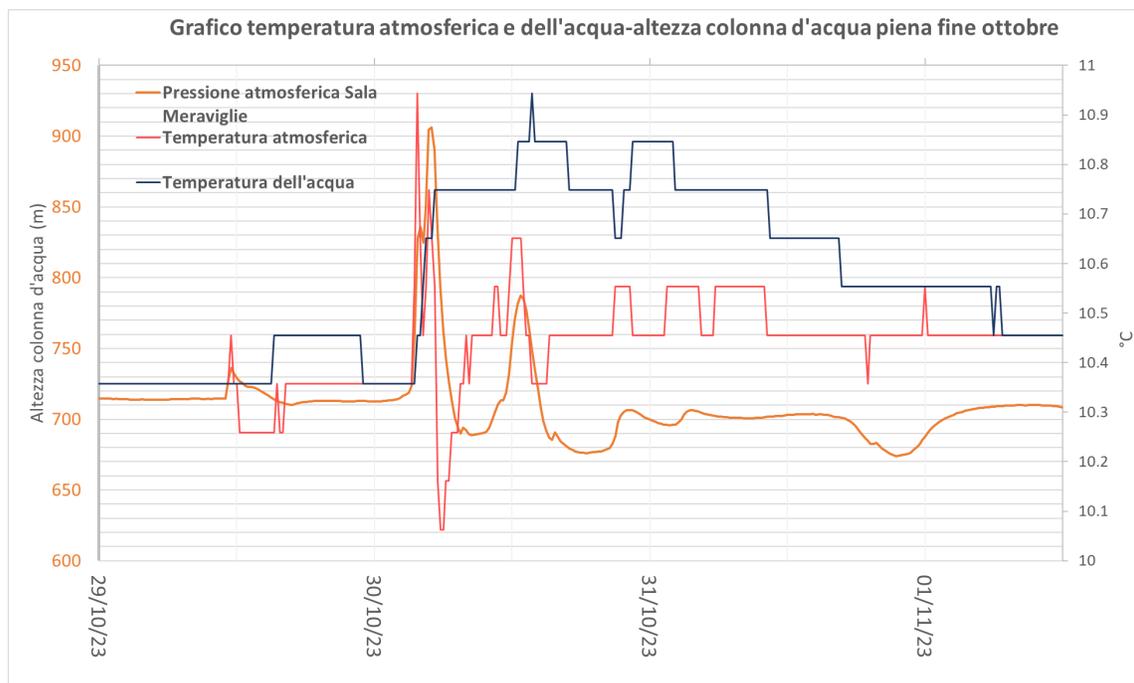


Figura 6.23 - Grafico di temperatura dell'acqua, temperatura atmosferica e pressione atmosferica misurata in Sala delle Meraviglie durante l'evento di piena del 30 ottobre 2023.

Questo fenomeno si spiega con il primo principio della termodinamica, ovvero la legge di conservazione dell'energia, che afferma:

“L'energia interna di un sistema termodinamico isolato è costante”

Questo principio cardine della termodinamica permette di inferire che se compie lavoro su un volume in condizioni adiabatiche l'energia interna del sistema aumenta e, nel caso di gas perfetti (e con una buona approssimazione l'aria è considerata un gas perfetto), si traduce immediatamente in aumento della temperatura. Un sistema compie una trasformazione adiabatica quando evolve da uno stato iniziale a uno stato finale senza scambi di calore con l'ambiente. Per realizzare una trasformazione adiabatica è necessario che il sistema sia chiuso all'interno di pareti isolanti, dette appunto adiabatiche, che impediscono lo scambio di calore tra sistema e ambiente, nel caso specifico la roccia carbonatica ha una conducibilità termica molto bassa. Nella pratica una trasformazione si considera adiabatica quando avviene in tempi brevi rispetto a quelli necessari al sistema per scambiare con l'ambiente quantità apprezzabili di calore. Quando si comprime un gas si compie lavoro, quindi si inserisce energia nel sistema costituito dal gas e dal contenitore, come un pistone e cilindro. Nel caso specifico il pistone è formato dal livello

dell'acqua che si alza e si abbassa, mentre il cilindro è costituito dalla grotta stessa, che funge da contenitore all'aria intrappolata al suo interno.

La temperatura dell'acqua invece è legata semplicemente al processo di sopraggiunta della precipitazione meteorica più calda rispetto all'acqua contenuta nei pori la quale ha avuto tempo di disperdere energia. Analizzando i dati si può notare come la temperatura dell'acqua aumenti dalle 2 alle 4 ore dopo l'inizio dell'incremento del livello piezometrico sopra al Lago Pensile, anche se questo intervallo varia ed è strettamente legato al livello di saturazione del terreno e alla quantità di precipitazione registrata. L'iniziale aumento del livello è legato principalmente alla spinta dell'acqua meteorica che, per pressione, induce l'acqua già presente all'interno delle fratture e dei pori dell'acquifero a muoversi e sportarsi verso il condotto principale. L'acqua già presente nei pori ha una temperatura coerente con la temperatura del torrente presente in periodi ordinari all'interno della cavità carsica.

La conducibilità elettrica del torrente interno, durante un episodio di piena, mostra un'iniziale crescita. Questa dinamica è giustificata dall'infiltrazione conseguente alle intense precipitazioni, l'acqua già presente nei pori, quindi più ricca di sali disciolti dalla roccia, subisce un aumento di pressione proveniente dall'alto, l'effetto pistone ben conosciuto negli acquiferi carsici (Lastennet & Mudry, 1997). L'acqua di poro, in questo modo, viene espulsa in favore del condotto carsico principale e raggiunge il Lago Pensile facendo risultare inizialmente un più alto valore di conducibilità. La decrescita della conducibilità invece è legata alla sopraggiunta dell'acqua piovana povera di sali che, al contrario, non ha avuto tempo di immagazzinarli durante il suo breve percorso a contatto con la roccia. Analizzando i dati si può inferire quindi che l'acqua piovana raggiunge il Lago Pensile dalle 3 alle 5 ore dopo l'inizio dell'incremento del livello. Le diverse entità dei picchi sono indicative del tempo trascorso dalla piena precedente. Infatti più tempo l'acqua rimane a contatto con la roccia nei pori, più acquisisce sali e presenta una conducibilità maggiore. Per esempio, nel grafico in Figura 5.61, relativo alla piena del 10 febbraio 2024, si può notare un marcato picco positivo; prima del suddetto evento infatti non è stata registrata una piena per più di un mese. L'evento avvenuto il 23 febbraio (Fig. 5.51) ha registrato invece un periodo imperturbato di soli 10 giorni prima della piena, e mostra infatti un aumento di conducibilità molto meno pronunciato. La piena registrata il 28 marzo 2024 può rappresentare un esempio ancor più evidente (Fig. 5.73). Durante l'evento menzionato infatti la conducibilità mostra solamente picchi negativi relativi ai due impulsi di piena registrati. La mancanza di picchi positivi è legata alla vicinanza di diverse fasi di perturbazione del livello piezometrico nel periodo precedente al verificare della suddetta piena, perciò l'acqua nei pori non ha avuto il tempo di arricchirsi sufficientemente di sali. Il comportamento a pistone avviene in un sistema carsico con permeabilità media e dotato di un'ampia zona satura. Il medio grado di carsificazione determina un drenaggio moderato e un accumulo di acqua nell'acquifero, quindi le acque neoinfiltrate agiscono come un pistone mobilitando le acque già presenti nei pori, che provocano un aumento della temperatura e della conducibilità misurate in sorgente. Questo accumulo di acqua nell'acquifero è dovuto principalmente alla estesa presenza della Maiolica all'interno del bacino idrogeologico. Mentre, come già presentato, la permeabilità nelle formazioni giurassiche risulta invece molto elevata.

La voce che chiama

Un altro obiettivo che il presente lavoro di tesi si era inizialmente posto era approfondire lo studio dei suoni e rumori provenienti dalla grotta che vengono percepiti anche a lunga distanza durante le forti precipitazioni che si abbattono sulla zona soprastante. Come già mostrato, si è quindi proceduto a monitorare in continuo, tramite un registratore acustico, i suoni della grotta, con particolare attenzione agli eventi di piena. È da sottolineare come non ci sia nulla in letteratura riguardante il monitoraggio acustico idrologico in ambiente ipogeo, perciò, essendo questo un approccio pionieristico è probabile che, con l'eventuale perfezionamento delle tecniche, gli stessi dati possano essere utilizzati in miglior modo nel futuro.

I grafici mostrati nella sezione risultati restituiscono un'idea di ciò che è stato rilevato dal microfono, ma ascoltare la registrazione spiega il motivo del fascino e la curiosità della popolazione che abita e ha abitato l'area. Si possono percepire suoni molto bassi che provengono dalle profondità della successione carbonatica dei Monti Lessini, essi anticipano, seguono e accompagnano tutti gli episodi di piena. Studiando i grafici, soprattutto relativi alla prima parte del monitoraggio, ci si accorge di alcune caratteristiche peculiari.

-Fase di carico

In Figura 6.24 sono mostrati i grafici riguardanti la fase di carico di 4 diversi impulsi di piena osservati tra novembre e dicembre 2023. Si è scelto di plottare solamente la frequenza 31,6 Hz per motivi grafici e per rendere più chiara la visualizzazione. Ognuno dei grafici mostrati è contenuto in un intervallo di 90 minuti e comprende la salita del livello dell'acqua approssimativamente da 1,7 m a 4,8 m, che coincide con l'intervallo di altezze d'acqua relativo al meccanismo a stantuffo.

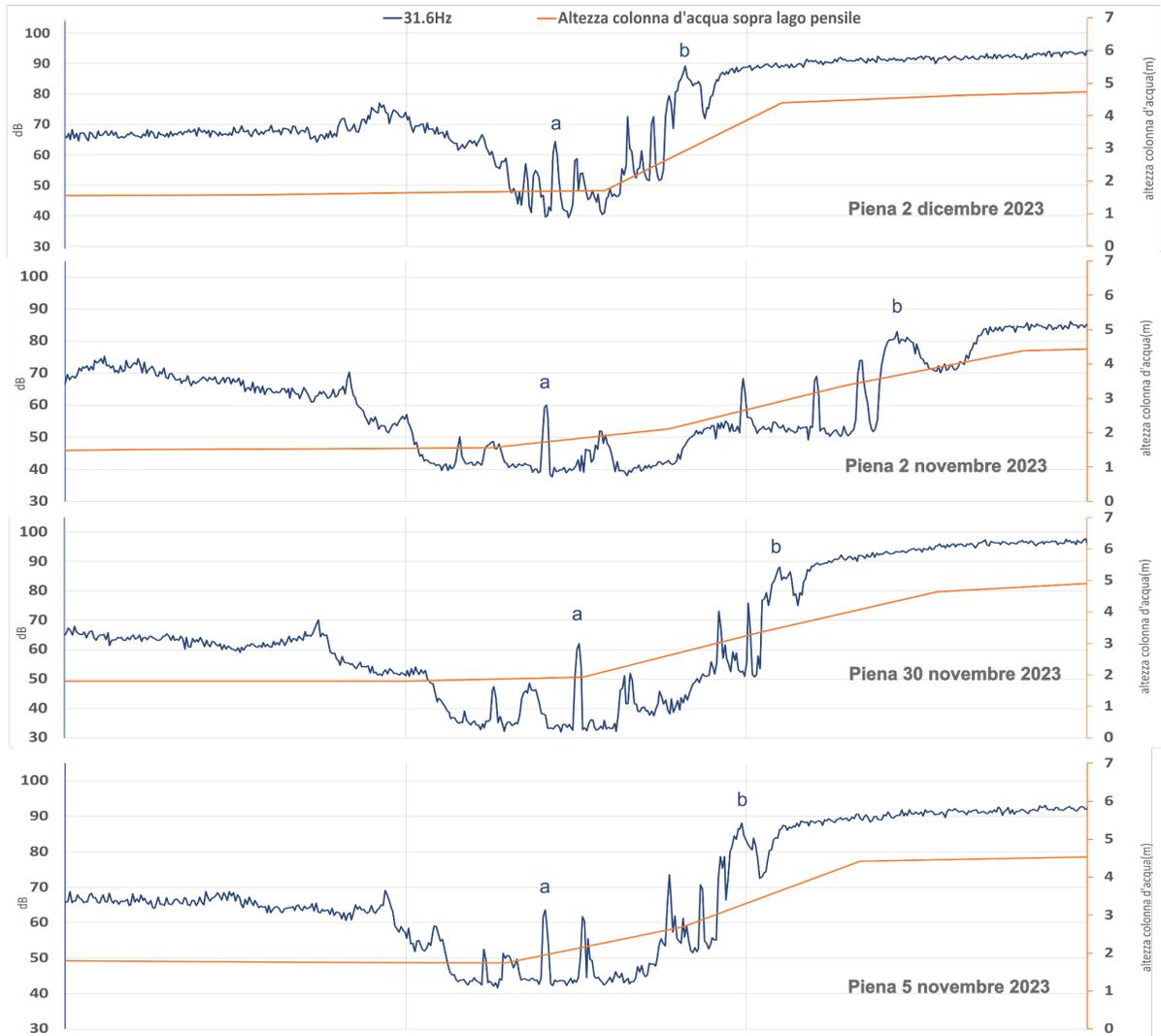


Figura 6.24 - Grafico dello spettro di intensità riguardante la frequenza 31,6Hz in diversi episodi di piena registrati nella prima parte di monitoraggio. Le lettere indicano alcuni picchi dello spettro che si ripetono ad ogni piena.

Durante la fase di carico, nei vari impulsi di piena, si sono registrati spettri di intensità che hanno caratteristiche comuni per tutte le frequenze considerate. In alcuni casi gli spettri sono quasi analoghi, come tra la piena del 5 novembre e quella del 30 novembre 2023, in altri casi invece si nota un pattern simile ma sono presenti tuttavia evidenti differenze. La piena del 2 dicembre 2023 è un esempio di pattern evidentemente simile agli altri ma con differenze che sono legate alla velocità di risalita del livello piezometrico. Si può notare infatti come, durante la suddetta piena, il tasso di crescita sia molto elevato, pari a 18 cm/min nel momento di massima velocità, valore notevole che triplica il tasso degli altri eventi presentati in Figura 6.24. La grande differenza di velocità comporta un accostamento dei picchi nello spettro che, in questo modo, vengono compressi all'interno di un intervallo di tempo relativamente minore, quasi la metà rispetto agli altri eventi. Per visualizzare meglio la questione e renderla matematicamente significativa si è proceduto nella costruzione di un grafico. Il grafico in Figura 6.25 presenta sull'asse delle x l'intervallo di tempo tra il picco di intensità a e il picco b indicati in Figura 6.24, mentre sulle y il tasso di incremento del livello dell'acqua (tra due livelli prefissati) durante ciascuna piena.

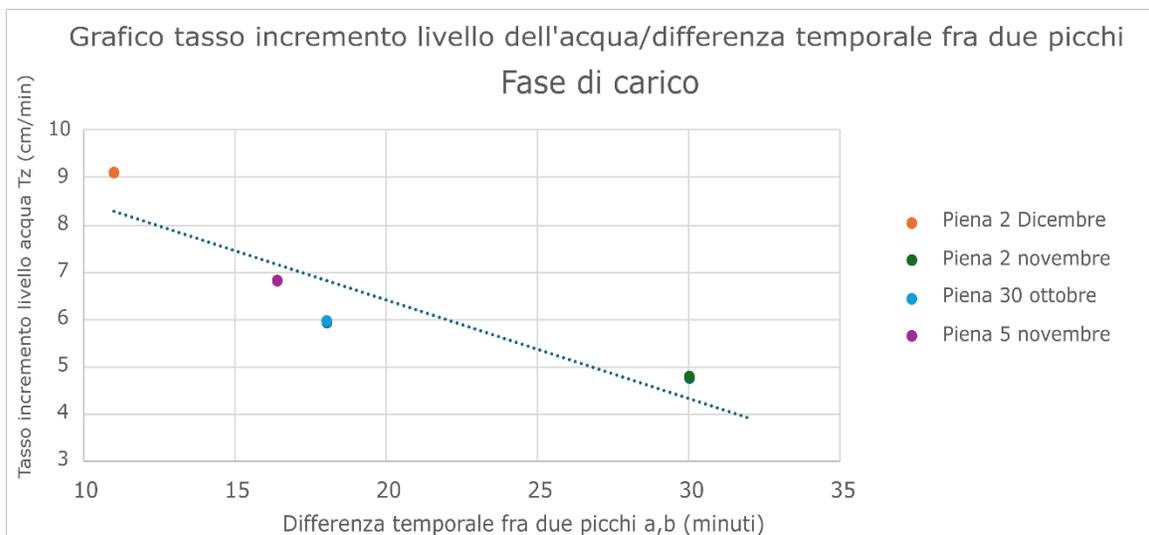


Figura 6.25 - Grafico tra la differenza temporale fra due picchi e il tasso di incremento del livello dell'acqua nella fase di carico di diversi episodi di piena.

Dal grafico si può constatare come la vicinanza fra i picchi sia chiaramente dipendente dalla velocità di incremento del livello piezometrico (Fig. 6.25). All'aumentare del tasso di incremento piezometrico, aumenta la vicinanza dei picchi di intensità. Un'altra informazione interessante, osservata analizzando i dati di carico, risiede nel valore d'intensità dei suddetti picchi.

Piena	Tasso di incremento livello	dB picco a	dB picco b
2 dicembre	9,13	64	89
2 novembre	4,76	60	83
30 ottobre	5,93	62	87
5 novembre	6,8	63	88

Tabella 5 - Differenza di intensità dei picchi in base a differenze di tassi di incremento del livello.

Si osserva, dai dati presentati in Tabella 5, come ad un più elevato tasso di incremento di livello piezometrico corrisponda una più alta intensità in entrambi i picchi di frequenza campionati. I dati mostrano la relazione tra l'aumento della velocità di crescita del livello sia con la distanza fra i picchi del suono registrato, sia con l'intensità del medesimo suono. Perciò si può afferire che esista un pattern di intensità che si ripete durante la fase di carico della piena, questa si ripropone ad ogni evento in quanto viene prodotto dall'interazione fra la salita del livello dell'acqua e la morfologia della cavità carsica. L'esatta composizione dello spettro, in particolare della adiacenza e distanza fra i picchi di intensità, è altamente dipendente dal tasso di incremento del livello piezometrico, così come lo è l'intensità degli stessi picchi.

In Figura 6.26 invece viene mostrata la fase di carico di alcune piene riguardanti la seconda fase di monitoraggio. Si può osservare un aumento molto più netto e improvviso delle intensità rispetto ai grafici del primo periodo, questo è dovuto al cambio di posizione del microfono, inserito in questa seconda parte di monitoraggio all'ingresso della grotta. I grafici coprono un intervallo di 3 ore e mezza, anche in questo caso è stato scelto di graficare la frequenza 31,6 Hz per motivi grafici.

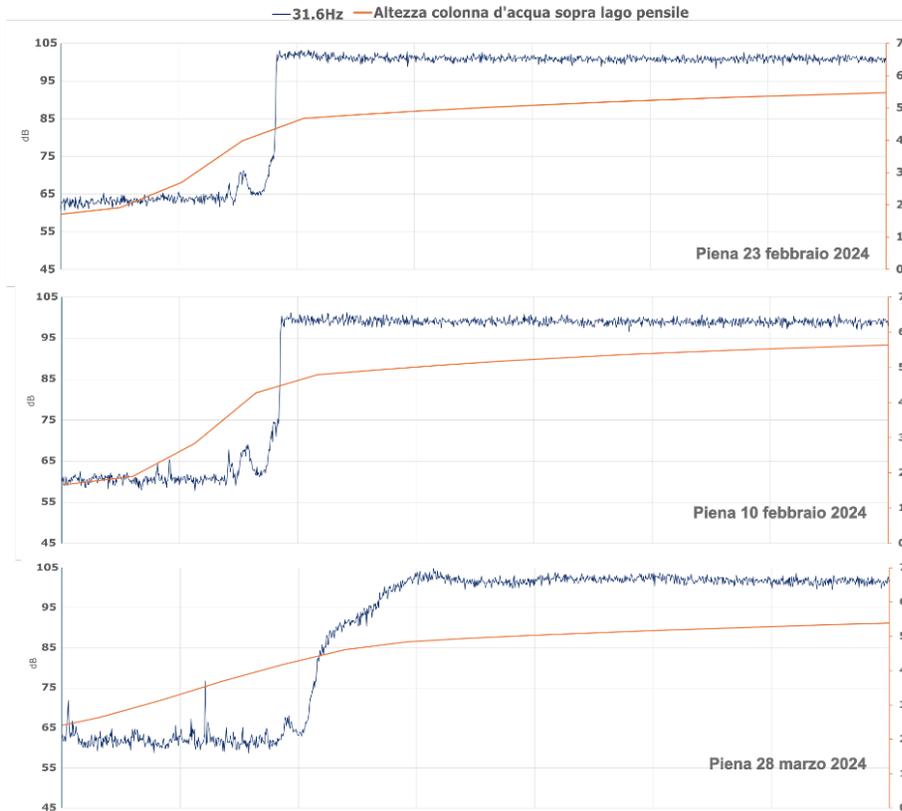


Figura 6.26 - Grafico dello spettro di intensità riguardante la frequenza 31,6Hz in diversi episodi di piena registrati nella seconda parte di monitoraggio.

Si può notare come i grafici mostrino comportamenti simili, ma non si riescono ad individuare correlazioni esatte tra i picchi nei diversi impulsi, se non immediatamente prima della crescita delle intensità dove si riconosce una leggera somiglianza. L'ubicazione frontale del microfono ha restituito dati in cui i suoni più flebili risultano inquinati, quindi la presenza di rumori esterni come tuoni, animali o vegetazione ha potuto disturbare la registrazione. Inoltre i suoni, provenienti dalle profondità del sistema carsico, risultano troppo distanti e attutiti per raggiungere l'ingresso della Spurga delle Cadene in modo nitido come invece è stato possibile constatare nella prima parte di monitoraggio quando il microfono era installato in Sala Bianca. Le intensità aumentano quando il fronte di piena raggiunge l'imboccatura della grotta, questa improvvisa crescita corrisponde ad un livello dell'acqua sopra al lago pensile di 4,3 metri. La piena del 28 marzo mostra una crescita dell'intensità meno netta rispetto alle altre presentate in figura, questo è legato alla minore velocità di crescita del livello piezometrico (Fig. 6.26).

-Fase di scarico

La fase di scarico invece, come già notato nella presentazione dei dati, riserva qualcosa di spettacolare e mai visto. Qualunque piena osservata tra settembre e gennaio infatti presenta una fase di scarico assolutamente analoga. In Figura 6.27 vengono mostrati 5 impulsi di piena indipendenti fra loro, in questo caso si è deciso di considerare la frequenza <math><10\text{Hz}</math> per una maggior chiarezza nella visualizzazione, ma i risultati valgono allo stesso modo per tutte e tre le frequenze considerate. Nei grafici viene valutato un intervallo pari a 5 ore. Gli spettri presentati in Figura 6.27

sono esattamente sovrapponibili fra loro, senza nessuna difficoltà è infatti possibile seguire e ritrovare ognuno dei tanti picchi tra le diverse piene. Si tratta quindi di una vera e propria firma spettrale caratteristica di questa grotta.

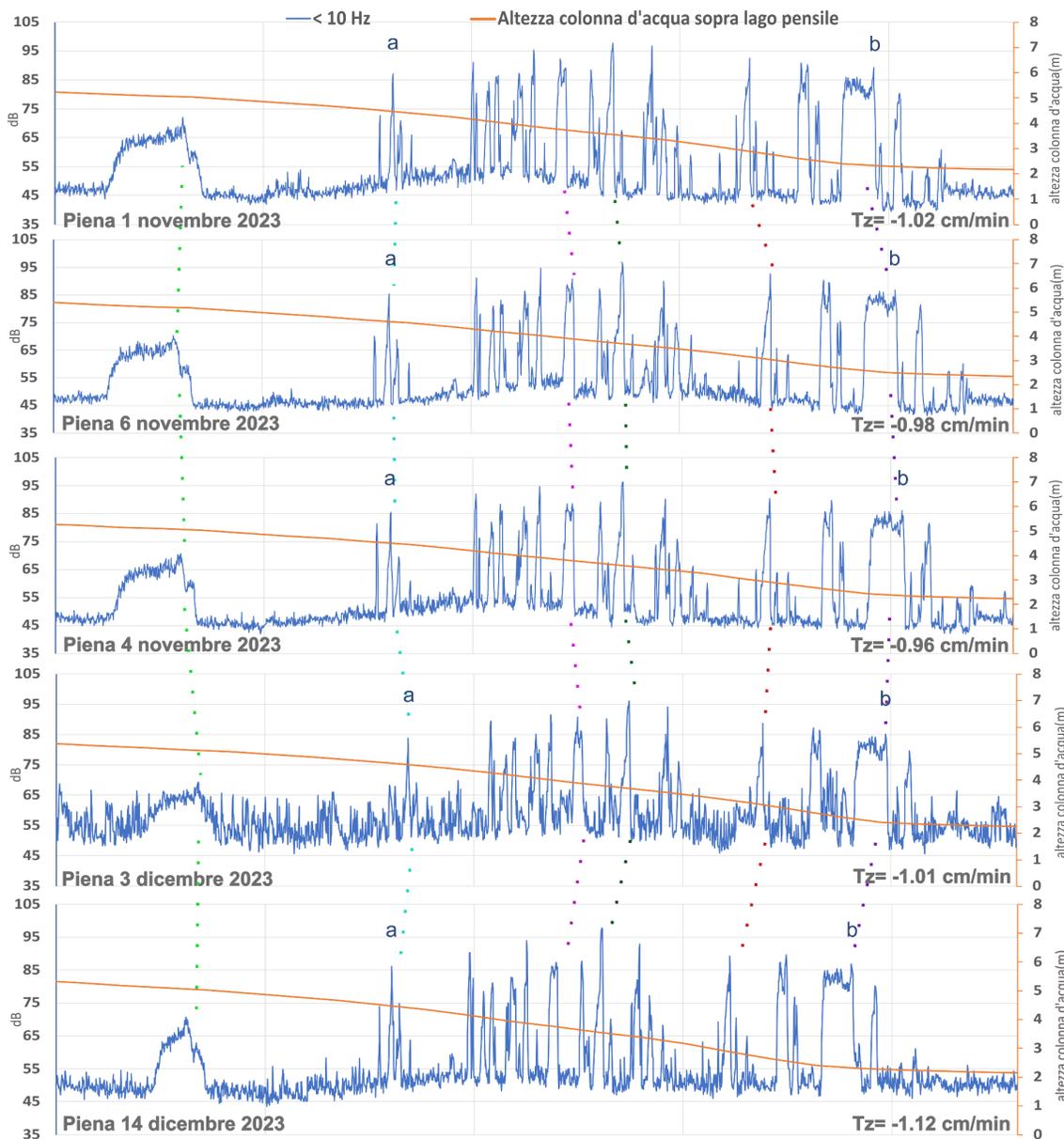


Figura 6.27 - Grafico dello spettro di intensità riguardante la frequenza 10Hz nella fase di scarico in diversi episodi di piena registrati nella prima parte di monitoraggio. Viene indicato anche il tasso di decremento dei diversi episodi.

Per ogni impulso di piena mostrato è stato calcolato il relativo tasso di decrescita del livello piezometrico, indicato con Tz. Il tasso di decrescita è simile per le piene considerate, varia di pochi valori decimali. Possiamo notare però come lo spettro risenta di queste, seppur minime, variazioni di velocità: durante l'evento registrato il 14 dicembre 2023, infatti, si può osservare come ad una maggiore velocità Tz consegue una leggera compressione dei picchi di intensità. Questa caratteristica è evidenziata in particolare modo nella piena avvenuta il 27 ottobre del 2023.

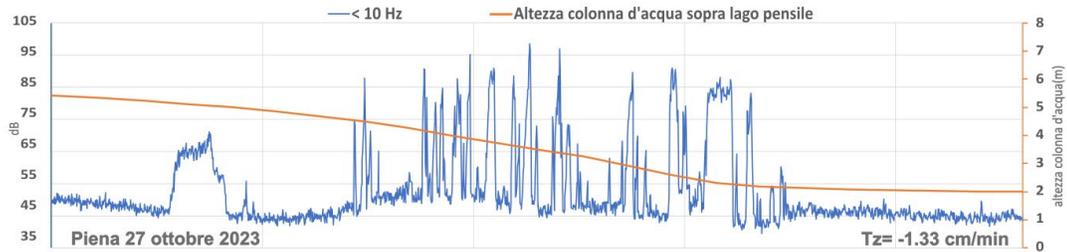


Figura 6.28 - Grafico di scarico della piena del 27 ottobre 2023 con le intensità di frequenza <10Hz registrata nel medesimo intervallo.

Come si può notare dal grafico in Figura 6.28, la piena avvenuta il 27 ottobre presenta un tasso Tz più elevato del 30% rispetto ai precedenti che ha avuto la conseguenza di comprimere le variazioni di intensità seppur mantenendo comunque il caratteristico pattern di picchi. Per mostrare numericamente questa tendenza notata nelle intensità si è deciso di costruire un grafico comprendente tutti gli episodi di piena discussi, simile a quello eseguito per la fase di carico. Viene inserito sull'asse delle x l'intervallo di tempo intercorso tra il picco a e il picco b, individuati nel grafico in Figura 6.27, mentre sull'asse delle y Tz, ovvero il tasso di decremento del livello piezometrico misurato sopra il Lago Pensile.

Grafico tasso incremento livello dell'acqua/differenza temporale fra i picchi Fase scarico

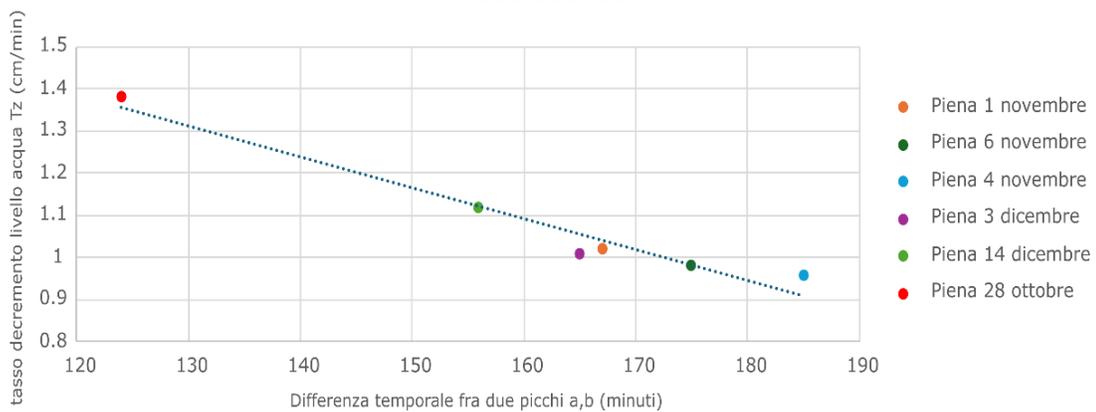


Figura 6.29 - Grafico tra la differenza temporale fra due picchi e il tasso di decremento del livello dell'acqua nella fase di scarico di diversi episodi di piena.

Come si nota dal grafico, è presente una linearità molto accentuata fra la velocità di decremento del livello piezometrico e la distanza temporale fra il picco a e il picco b. I grafici osservati precedentemente mostrano come i picchi siano esattamente analoghi fra le piene (Fig. 6.27), il grafico in Figura 6.29 invece mostra come essi si differenzino solo in base alla velocità di decremento del livello. All'aumentare della velocità diminuisce, anche per più di un'ora, la distanza temporale fra i picchi. Confrontando il grafico con quello presente in Figura 6.25 risulta facile notare la differenza del tasso di velocità dell'acqua. Durante la fase di carico si rientra nell'ordine dei 6 cm/min con ampia variabilità fino a ± 4 cm/min. Durante la fase di scarico la grandezza è invece intorno a -1 cm/min con massima variazione di $\pm 0,4$ cm/min. Questo simboleggia come la fase di carico sia ampiamente dipendente dall'acqua in arrivo da monte, e quindi molto variabile, la velocità della fase di scarico invece, una volta concluso il flusso attraverso il canale superiore, dipende unicamente dalla capacità delle fratture, al di sotto del

Lago Pensile, di drenare l'acqua. La minima variabilità riscontrata nella fase di scarico dipende ancora una volta dalla quantità di acqua che proviene da monte, che può far variare di una piccola percentuale la velocità di decrescita. La variazione delle intensità dei picchi in questo caso non è molto significativa, la spiegazione risiede ancora una volta nella velocità, mentre nella fase di carico le velocità variano abbondantemente e si nota un legame fra intensità e tasso di incremento, nella fase di scarico questa non si nota proprio perché le velocità hanno variazioni esigue nell'ordine dei decimali.

L'analisi delle frequenze, nelle fasi di scarico della prima parte di monitoraggio, hanno restituito risultati inaspettati evidenziando la reiterazione di una medesima firma spettrale. I picchi si formano per ogni piena alla medesima altezza della colonna d'acqua, evidenziando come l'unica variabile che può condizionare la sequenza sia la velocità di discesa del livello piezometrico, il quale può aumentare o diminuire il tempo in cui il pattern di intensità si dispiega.

La fase di scarico nella seconda parte di monitoraggio mostra spettri di frequenza ancora una volta con caratteristiche simili fra le diverse piene (Fig. 6.30).

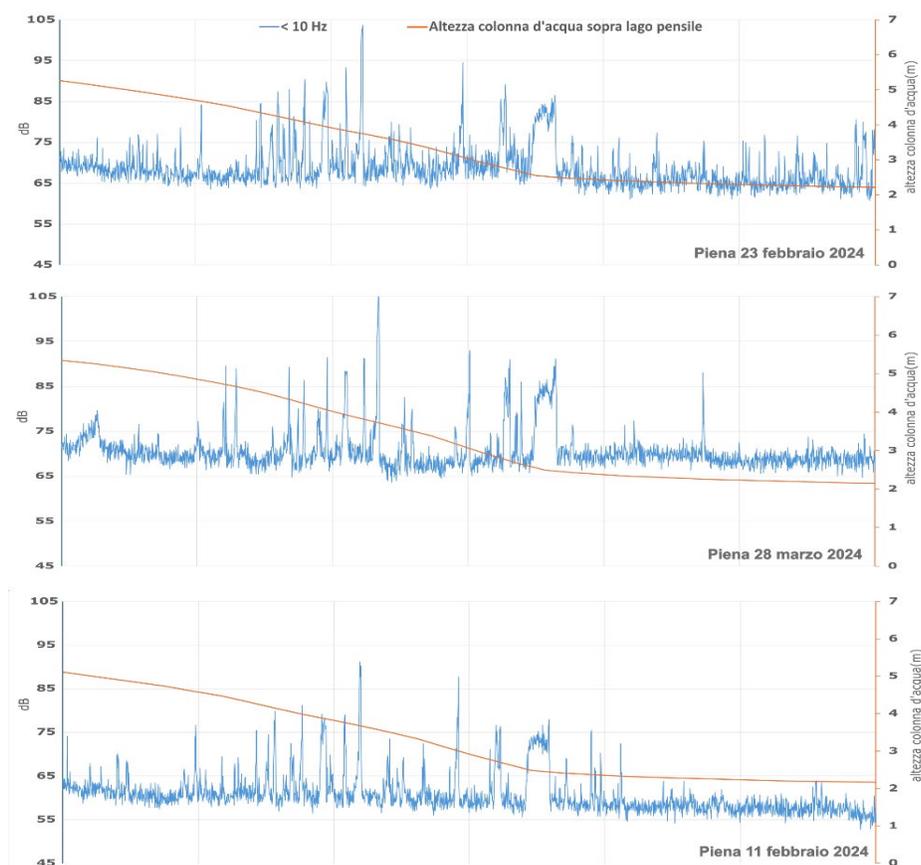


Figura 6.30 - Grafico dello spettro di intensità riguardante la frequenza 10Hz durante la fase di scarico in diversi episodi di piena registrati nella seconda parte di monitoraggio.

Si può notare come, al contrario della fase di carico, le intensità delle frequenze raggiungono valori bassi anticipando di diverse ore la decrescita del livello dell'acqua nel Lago Pensile (Fig. 6.30). Infatti nella fase di scarico, quando ancora il livello piezometrico è stabile a 5,5 metri, l'intensità è

diminuita di 40 dB rispetto al periodo di piena più intenso. Questo fenomeno è ricorrente in tutti i grafici di intensità presentati nella presente relazione. Le intensità crescono vertiginosamente nella fase di carico: esse in pochi minuti raggiungono il valore massimo. Le frequenze più elevate addirittura impiegano pochi secondi per raggiungere il valore più elevato, mantenendolo stabile fino all'inizio della decrescita del livello d'acqua. Le frequenze più basse invece, approfondite nella relazione, mostrano un comportamento differente. Lungo la seconda metà dell'evento di piena infatti le relative intensità tendono a diminuire, registrando una progressiva decrescita mentre il livello è ancora decisamente elevato sopra il Lago Pensile (Fig. 5.30). Questo si correla con le osservazioni eseguite in Tabella 4, si può quindi dedurre una relazione molto stretta fra i decibel misurati dal microfono e la portata del torrente che scorre lungo il canale superiore.

Alcuni picchi sembrano ripresentarsi in tutti i grafici, ma è anche presente un abbondante disturbo che copre e ostacola l'interpretazione dello spettro. La posizione del rilevatore acustico all'ingresso della grotta ha dato risultati contrastanti, da una parte ha dato un'idea di cosa possa sentirsi all'esterno del condotto carsico, dall'altra però ha restituito risultati incerti e ricchi di interferenze.

Un'ultima considerazione che si aggiunge alla trattazione risiede nel grafico mostrato in Figura 6.31.

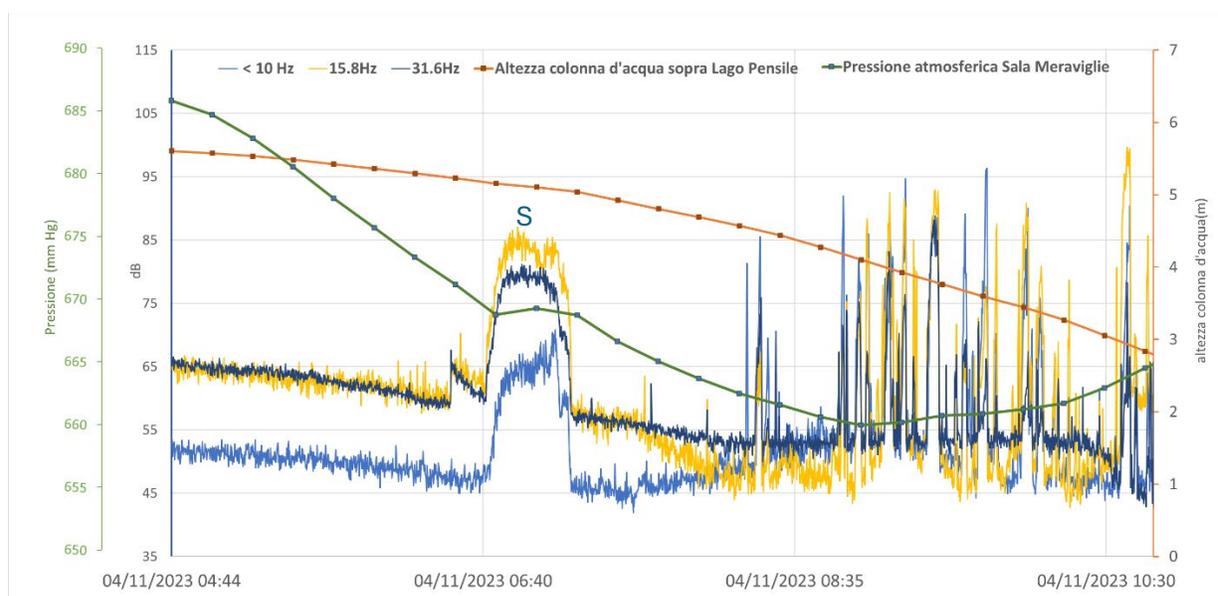


Figura 6.31 – Grafico di pressione atmosferica, altezza Colonna d'acqua e intensità di frequenza registrata per la fase di scarico della piena del 4 novembre 2023.

Nei grafici mostrati precedentemente si osserva come i singoli picchi registrati nella fase di carico e scarico presentano dimensioni differenti. Sono presenti picchi puntuali, dalla durata di pochi secondi, fino a picchi dalla durata superiore a 30 minuti. Nel grafico in Figura 6.31 si osserva come il picco più duraturo denominato S, e presente in tutte le fasi di scarico registrate (Fig. 6.27), coincida con una stabilizzazione del dato di pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie. In questa fase la pressione atmosferica diminuisce in conseguenza dell'abbassamento del livello piezometrico in Sala delle Meraviglie ma, contemporaneamente alla registrazione del picco S, la curva della pressione atmosferica presenta un appiattimento. Questo comportamento viene

interpretato come un risucchio di aria, all'interno di Sala delle Meraviglie, tramite fratture che diventano in quel momento transitabili all'aria, mentre poco prima erano ancora allagate. Il rumore che viene generato è dovuto all'aria che scorre molto rapidamente attraverso una piccola apertura nella roccia, in questo modo il flusso comprimibile del gas genera moto turbolento e irregolare che produce suoni. Il motivo della sua ripetitività nei diversi episodi è dipendente dalla morfologia della Sala, infatti il livello dell'acqua decrementa e libera una frattura che mette in comunicazione la sala con un altro vano della grotta in pressione. Il vano pressurizzato in questo modo scarica pressione in Sala delle Meraviglie, bilanciando la depressurizzazione che nel frattempo prosegue all'interno della Sala. Una volta che le due sale si bilanciano, ovvero 32 minuti dopo l'inizio del picco, la pressione in Sala delle Meraviglie torna a decrescere. Questo particolare picco è originato quindi da movimenti d'aria, guidati da un gradiente barico, tra i vani tramite strette fessure ricche d'acqua che entrano in comunicazione ciclicamente ogni volta che il livello piezometrico raggiunge una data quota. È possibile che anche altri picchi si possano spiegare con il medesimo sistema, per definire meglio il processo è necessario però avere a disposizione una serie di dati con cadenza più fitta.

-Un primo passo per comprendere la “voce” degli acquiferi carsici

I risultati presentati riguardo al monitoraggio acustico restituiscono un'idea di quanto sia particolare e rara la Spurga delle Cadene nel panorama carsico mondiale. Durante gli eventi di piena si producono suoni che coprono un enorme intervallo di frequenze da <10 Hz fino a >25000Hz per quanto è stato monitorato in questo studio, ma è probabile possa raggiungere frequenze ancor maggiori. La gamma massima di frequenze udibili da un essere umano spazia dai 20 ai 20000 Hz. Per quanto riguarda le intensità invece, sebbene l'intervallo udibile sia compreso tra 0 e 120 dB, qualsiasi rumore oltre gli 85 dB è considerato dannoso e potrebbe recare danni all'apparato acustico, mentre 120 dB è considerata la soglia del dolore. Durante i periodi di piena si raggiungono intensità ben superiori a 85 dB come già osservato, e il suono registrato all'interno della cavità risulta alienante per lo spettatore. Il suono crea una sensazione uditiva legata alla natura delle vibrazioni delle particelle del mezzo di trasmissione, è quindi una successione di micro compressioni ed espansioni tra le sue molecole (pressione sonora), che dalla sorgente sonora lo fa giungere al nostro apparato uditivo. Due suoni emessi da due strumenti diversi che possiedano stessa intensità e stessa altezza differiscono per il caratteristico timbro, che è determinato dalla forma dell'onda prodotta dallo strumento. Uno strumento musicale, per esempio una chitarra, emette un suono complesso, la cui onda è determinata dalla sovrapposizione di più onde, ovvero di più armoniche. L'onda corrisponde invece ad un rumore quando risulta composta da un elevato numero di onde sonore che si sovrappongono disordinatamente, assumendo così un aspetto molto irregolare. La scienza ha una definizione esatta: la fisica acustica precisa infatti che ciò che sembra caratterizzare il suono rispetto al rumore è la forma dell'onda sonora. L'onda sonora può infatti essere regolare, ed in questo caso emette un suono intonato, oppure può essere irregolare ed emettere un suono non intonato e casuale, detto appunto rumore. La Spurga delle Cadene emette ciò che si potrebbe classificare come rumore, e in particolare un rumore bianco ovvero un tipo di rumore caratterizzato dall'insieme di tutte le possibili frequenze presenti nello spettro sonoro, aventi lo stesso livello di ampiezza, ma senza la periodicità nel tempo. La caratteristica più impressionante, messa in evidenza da questo studio, è proprio la ciclicità e quindi la non casualità del rumore prodotto, che lo porta ad essere una via di mezzo tra suono e rumore, per dargli un nome lo si chiamerà “voce”.

Il timbro della voce identifica ogni persona come un'impronta digitale, comprende gli aspetti più intangibili della voce umana. Il timbro vocale è la qualità e il cosiddetto "colore" del tono che definiscono una determinata voce. Proprio come i diversi strumenti musicali vengono distinti e percepiti in modo diverso l'uno dall'altro anche quando suonano la stessa nota, così la voce umana si distingue dalle altre voci a seconda di vari fattori. Si può descrivere usando moltissimi aggettivi: dolce, secca, aspra, squillante, esile... Il corpo umano può essere paragonato a un risonatore, il volume di ogni cavità od organo molle, situati nelle vicinanze dell'apparato digerente, le dimensioni e la struttura ossea di un individuo interferiscono nella fonazione dei suoni linguistici, modificando le ampiezze delle armoniche. La voce umana è quindi unica non solo per la forma e le dimensioni delle corde vocali, ma anche per le dimensioni e la forma del corpo. Gli esseri umani hanno corde vocali molto diverse che possono allentarsi, stringersi o cambiare spessore e sulle quali il respiro può essere trasferito a pressioni variabili. La forma del torace e del collo, la posizione della lingua e la tensione di muscoli, ognuna di queste azioni determina una variazione dell'altezza, del volume, del timbro o del tono del suono prodotto.

Possiamo così paragonare il timbro della voce caratteristico di ciascun essere umano alla voce della Spurga delle Cadene. Essa è prodotta dalla morfologia del condotto carsico, ogni stanza, fessura, frattura, anfratto modella il suono finale, creando un timbro caratteristico della grotta. Lo spettro infatti, ripulito da interferenze dovute a rumori estemporanei e casuali, si ripete nel tempo, nella fase di carico e nella fase di scarico di ogni piena, in modo identico. Ciò che cambia è solo la velocità di riproduzione del timbro, che è dipendente dalla velocità di crescita e di decrescita del livello piezometrico, così come varia la velocità di parlata in un essere umano in base alle situazioni. Durante le piene, in fase di carico e in particolar modo nella fase di scarico, la grotta emette la propria voce, che ripete, per le frequenze campionate, il medesimo spettro acustico, il medesimo canto. Questo suono è conseguenza, nella fase di carico, della chiusura di fratture e cupole con relativa compressione e veloce spostamento dell'aria tramite feritoie, o bolle d'aria che si creano e tornano in superficie. La fase di discesa ha un funzionamento simile ma lungo il percorso contrario, quindi diminuendo il livello dell'acqua si liberano camere e pertugi precedentemente sommersi, emettendo gorgoglii dovuti alla liberazione di aria intrappolata e sottopressione. Le sale maggiori e minori, in questa fase, si trovano in condizioni di depressurizzazione; durante il decremento del livello dell'acqua si liberano fratture e anfratti tra cui avvengono scambi di aria, quindi risucchio di aria attraverso fratture e movimenti di pressione mediante esse che danno luogo a rumori molto intensi e spesso duraturi. La piena, compiendo ogni volta l'identico percorso di risalita e di discesa del livello piezometrico, incontra sempre la medesima morfologia, creando rumori spettralmente identici ad ogni impulso. La caratteristica più rilevante da sottolineare è che gli stessi picchi, nelle varie piene, si formano ad un ugual livello piezometrico; si può paragonare così la grotta ad uno spartito e l'acqua ad un pianista, dove, per esempio durante la fase di scarico, egli suona per ciascun evento la medesima canzone, a volte aumentando il ritmo, a volte invece ad un ritmo un po' più lento.

Cavitazione

Un altro elemento che il monitoraggio acustico ha dato la possibilità di ipotizzare è il fenomeno della cavitazione. La cavitazione è un fenomeno di formazione, accrescimento e implosione di bolle di vapore in un liquido a temperature inferiori rispetto al punto di ebollizione. Esso genera microambienti caratterizzati da temperature localmente elevatissime e intense onde di pressione e getti idraulici. Solitamente questo fenomeno viene accostato a elementi meccanici come turbine, ventole e eliche: in letteratura non è mai stata ipotizzata la presenza di questo fenomeno in una grotta. Il suo funzionamento, nel caso specifico, è strettamente legato alla presenza di un altro fenomeno idrodinamico, l'effetto Venturi. L'effetto Venturi, all'interno di un circuito idraulico chiuso, avviene quando un liquido in movimento viene forzato a passare attraverso una strozzatura nel condotto che impone al liquido una variazione di velocità e una conseguente variazione di pressione (Fig. 6.32).

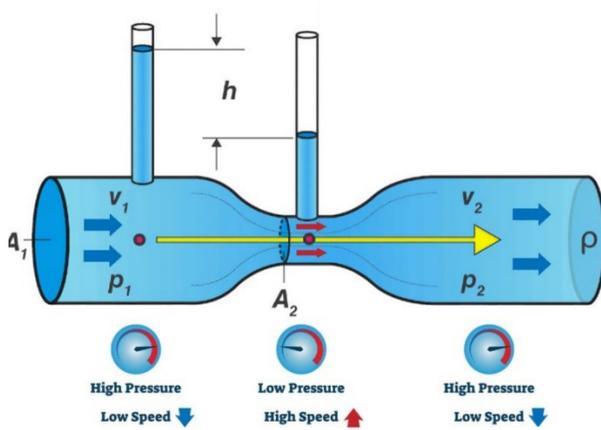


Figura 6.32 - Schema semplificato del meccanismo di funzionamento dell'effetto Venturi (da AquaPortail).

Il controllo del fenomeno è dunque strettamente legato alla geometria del condotto che presenta una zona più stretta, è possibile verificare sperimentalmente la variazione di pressione di un liquido in un condotto utilizzando tubi manometrici. L'esperimento dimostra che il liquido raggiunge, nei tubi sperimentali, carichi idraulici diversi: minori dove la sezione si rimpicciolisce (in cui aumenta la velocità) e maggiore dove la sezione si allarga (ovvero quando la velocità diminuisce). Assunto che la pressione del liquido aumenta all'aumentare dell'altezza raggiunta dal liquido nei tubi manometrici, è possibile dire che ad un aumento della velocità corrisponde una diminuzione della pressione e viceversa, cioè all'aumento della pressione corrisponde una diminuzione della velocità. L'effetto Venturi viene anche chiamato paradosso idrodinamico poiché intuitivamente si può pensare che la pressione aumenti in corrispondenza delle strozzature; tuttavia, per la legge della portata, in corrispondenza delle strozzature è la velocità ad aumentare. Da questo nasce il paradosso idrodinamico, conseguenza della Legge di Bernoulli.

Partendo dalle condizioni appena mostrate è possibile descrivere il fenomeno della cavitazione. All'interno di un circuito idraulico, quindi, si può assumere che in una strettoia la pressione del liquido cali e, in alcune zone aderenti alle pareti, si possano trovare aree con pressione estremamente bassa (Fig. 6.38).

L'abbassamento locale della pressione fa sì che si raggiunga la tensione di vapore del liquido, il quale subisce così un cambiamento di fase a gas, formando bolle contenenti vapore acqueo. La temperatura ha una notevole influenza sulla cavitazione, poiché altera la tensione di vapore. Se la temperatura aumenta, la maggiore tensione di vapore facilita la cavitazione. Ciò che forma la bolla è quindi l'improvvisa diminuzione della pressione dell'acqua, nonostante la temperatura e la tensione di vapore restino costanti. Per questo motivo la bolla da cavitazione resiste solo finché non esce dalla zona di bassa pressione idrostatica; appena essa ritorna nella sezione del condotto con diametro più largo, la pressione di vapore non è sufficiente a contrastare la pressione idrostatica e la bolla implode immediatamente. Implodendo essa libera energia in varie forme, come emissione di rumore, alta temperatura, turbolenza e onde d'urto, queste ultime possono essere estremamente intense e possono produrre tremolii simili a onde sismiche.

Cavitation

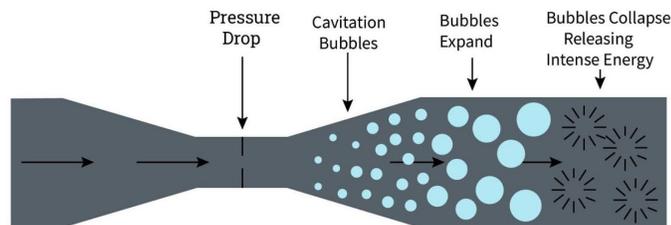


Figura 6.33 - Fenomeno della cavitazione all'interno di un tubo di Venturi (da IQSdirectory).

La temperatura raggiunta all'interno di una bolla di cavitazione può essere molto elevata, tale da poter generare il fenomeno della sonoluminescenza seppur per lungo tempo sia risultata difficile da misurare. Le stime spettroscopiche valutano la temperatura che può essere raggiunta durante questo processo come simile a quella della fotosfera solare, sui 11700°C. Il collasso delle bolle genera un getto di liquido ad alta velocità che può provocare nel lungo periodo seri danni agli elementi meccanici o, nel caso della grotta, alla roccia (Fig. 6.34).

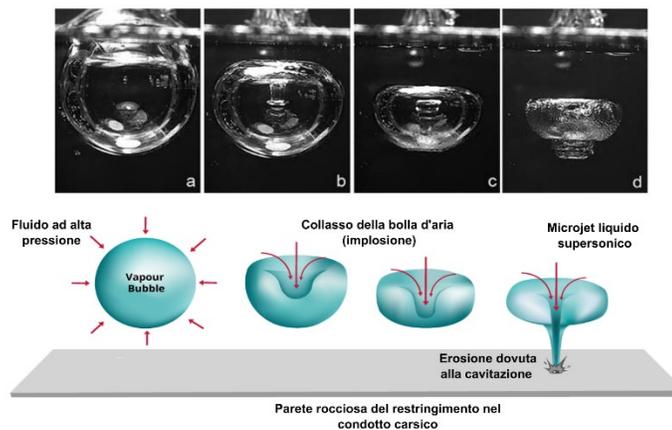


Figura 6.34 - Osservazione delle fasi di implosione di una bolla da cavitazione (modif. da Hutli, 2017).

La cavitazione presenta anche un'altra importante caratteristica molto peculiare: l'implosione delle bolle genera un rumore caratteristico che può diventare estremamente forte in casi di alta velocità del flusso.

In primo luogo è stata ipotizzata la presenza del fenomeno della cavitazione nella Spurga delle Cadene in quanto erano risultate strane alcune differenze di valore di pressione nella prima parte di monitoraggio confrontando i dati dei trasduttori posizionati sopra e sotto il Lago Pensile. Si tratta solo di pochi centimetri di sfasamento, ma abbastanza per innescare la curiosità per approfondire possibili motivazioni.

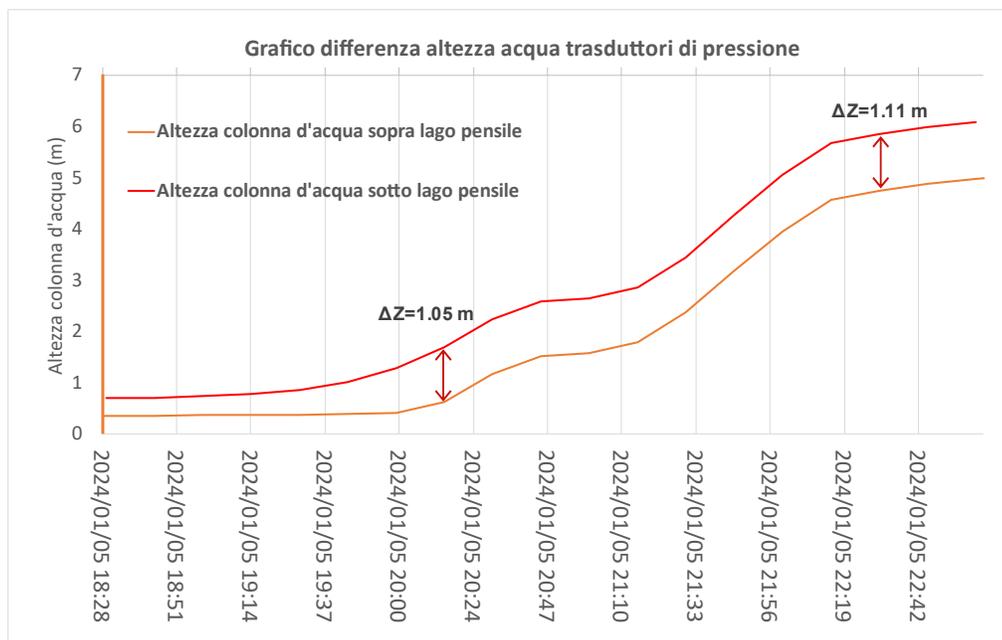


Figura 6.35 - Grafico delle differenze di livello dell'acqua nei due trasduttori segnalate durante la piena del 5 gennaio 2024.

Il grafico, in Figura 6.35, fa riferimento alla piena registrata il 6 gennaio 2024, l'ultima rilevata per quanto concerne il primo periodo di monitoraggio. Si può notare come le curve inizialmente seguano due percorsi separati: questo si spiega con l'ubicazione del trasduttore HOBO1 sotto al Lago Pensile posto in una posizione inferiore rispetto a quella del trasduttore HOBO2 sopra al Lago Pensile. Studiando le varie piene si è dedotto che la differenza di altezza delle posizioni dei due strumenti ammonta a 1,05 metri. Anche nel grafico si può notare come la curva della colonna d'acqua sopra al Lago Pensile inizia ad aumentare il suo valore alle ore 20:00, segno che il livello dell'acqua tra sopra e sotto il Lago Pensile si era appianato. Con il passare del tempo e dell'incremento del livello dell'acqua, la differenza fra i due livelli è progressivamente aumentata, fino a raggiungere, alle ore 22:30, un valore pari a 1,11m, 6 cm più elevato rispetto alle reali condizioni. Come già annunciato il valore in sé è modesto, ma risultava interessante capire cosa poteva averlo generato. L'effetto Venturi, già la prima volta, è sembrato poter rispondere bene ai dati presentati. Esso, come già mostrato, spiega una possibile diminuzione di pressione e aumento della velocità all'interno di una strettoia. Il restringimento localizzato nel Lago Pensile tra i due trasduttori potrebbe comportarsi proprio in questo modo e creare condizioni vantaggiose per la comparsa del suddetto effetto Venturi.

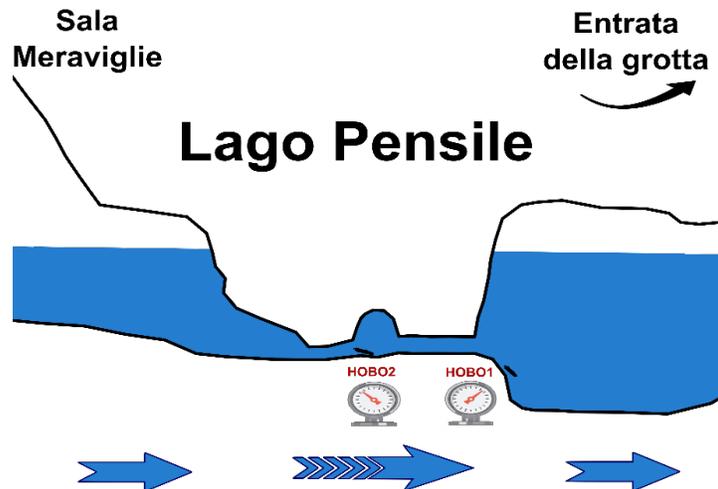


Figura 6.36 - Schematizzazione del Lago Pensile dove è stato ipotizzato possa aver luogo il fenomeno della cavitazione.

La Figura 6.36 rappresenta il Lago Pensile nel momento in cui il livello piezometrico raggiunge i 4 metri di altezza misurati da HOB02. Il condotto lungo il Lago Pensile è alto dai 30 ai 40 cm e, come si può notare dallo schema stilizzato, rappresenta una zona decisamente più stretta rispetto alle aree limitrofe. Lungo questo restringimento della grotta è ipotizzato possano verificarsi le condizioni teorizzate dall'effetto Venturi.

Un altro dato che risulta essere solidale con questa ipotesi riguarda il dato della temperatura misurata dai due trasduttori di pressione (Fig. 6.37).

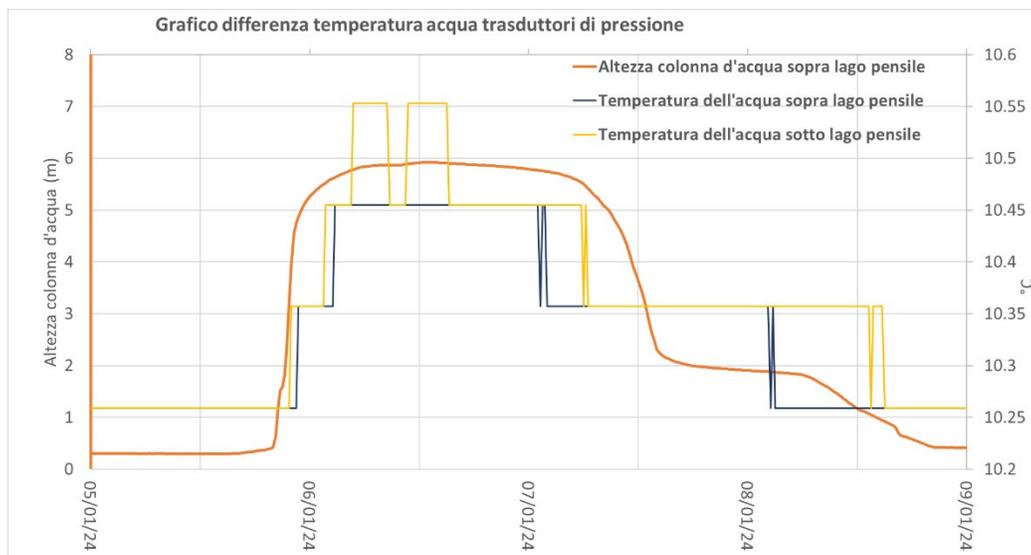


Figura 6.37 - Grafico delle differenze della temperatura dell'acqua nei due trasduttori segnalata durante la piena del 6 gennaio 2024.

Anche il grafico fa riferimento alla piena del 6 gennaio 2024, così da poter correlare meglio le osservazioni presentate con la precedente trattazione. Come si può notare, sono evidenti le differenze fra i dati misurati. Si può osservare come gli aumenti della temperatura dell'acqua vengano registrati sempre prima dal trasduttore presente sotto al Lago Pensile rispetto a quello posto più a monte, rilevando ritardi anche superiori ad un'ora. Questo fattore non è secondario, in

quanto il trasduttore sopra il Lago Pensile, ubicandosi più a monte, dovrebbe registrare prima i cambiamenti di temperatura, o in caso estremo subito dopo. Si osserva poi che il trasduttore sotto al Lago Pensile registra, in due picchi separati, una temperatura di 10,55 °C, per un intervallo totale di quasi 8 ore. Quindi per 8 ore, intervallate da un periodo in cui la temperatura cala, il trasduttore a valle misura una temperatura di 0,11°C maggiore rispetto a monte. Le osservazioni nel grafico proseguono con la fase di decrescita della temperatura in cui si possono notare degli sfasamenti molto marcati tra i due strumenti. Il trasduttore ubicato sopra il Lago Pensile anticipa sempre la fase di decrescita dello strumento al di sotto del Lago Pensile, nel primo gradino osservabile il ritardo è pari a 5 ore mentre per il secondo vengono raggiunte addirittura le 10 ore.

I due trasduttori in linea d'aria sono separati da circa tre metri alle due estremità del restringimento, risulta improbabile un riscaldamento lungo uno spazio così limitato. Le uniche spiegazioni fisiche al fenomeno sono o il miscelamento con acqua più calda proveniente da un'altra sorgente, fattore non improbabile ma complicato vista la posizione del trasduttore, o una fonte di energia molto potente capace di riscaldare, seppur di poco, un enorme volume di acqua in un tempo molto breve, definizione che rientra perfettamente nel fenomeno della cavitazione. Bisogna però sottolineare come la differenza di temperatura sia debole ed è possibile che il problema sia legato ad un errore di misura o calibrazione dello strumento. Però, vista la coerenza dei dati durante i periodi di magra e di piena e la perfetta coerenza con la teoria e l'idea preliminare, si è pensato di presentare l'anomalia come possibile argomento in favore della presenza del fenomeno della cavitazione.

Distribuzione di alcuni parametri durante la cavitazione in tubo di Venturi

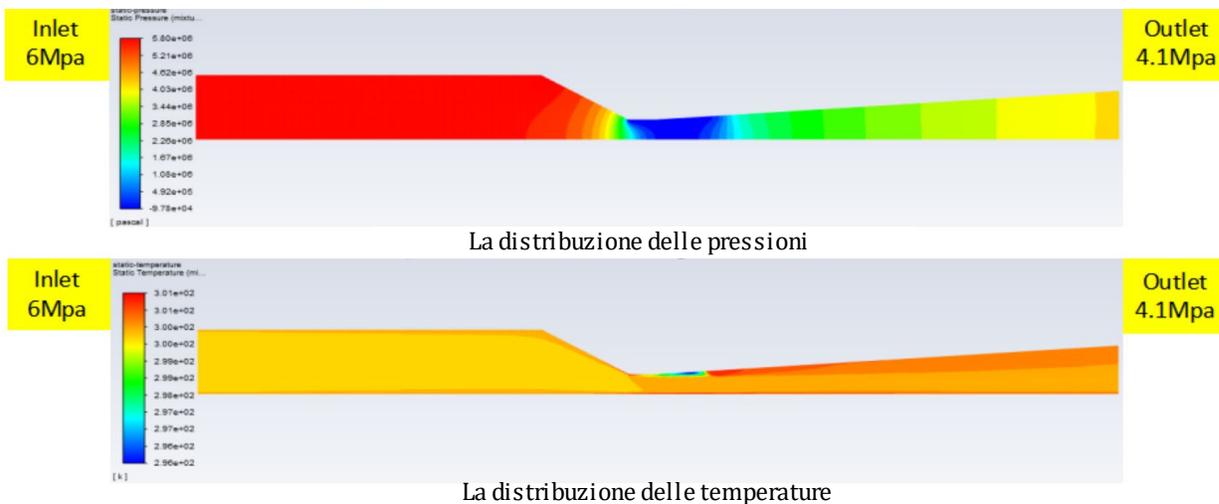


Figura 6.38 - Distribuzione delle pressioni e delle temperature all'interno dell'acqua in un esperimento condotto in Cina (modif. da Zhou et al. 2022).

Un esperimento eseguito da scienziati dell'Università di Scienze e Ingegneria Aereospaziale di Changsha in Cina mostra come le temperature e le pressioni, in tubi di Venturi in cui avviene il fenomeno della cavitazione, presentino distribuzioni comparabili a ciò che è stato mostrato dai dati collezionati all'interno della Spurga delle Cadene. Ovviamente, per confermare o smentire

l'ipotesi, sono necessari altri tipi di verifiche con sensori e strumenti molto più precisi di quelli che aveva a disposizione il presente progetto di tesi.

Un ultimo dato a favore dell'argomentazione è il suono. Il collasso violento e catastrofico delle bolle dovute alla cavitazione, oltre al danno alle superfici solide, causa la produzione di rumore come conseguenza dell'elevata pressione momentanea generata quando il contenuto delle bolle è fortemente compresso. Viene fornito, tramite QR code, un link su dropbox in cui si offre la possibilità di comparare il suono prodotto dal fenomeno della cavitazione rilevato in laboratorio con un sistema idraulico a pompa centrifuga e la registrazione della fase più vigorosa della piena

avvenuta il 5 novembre 2023. È da sottolineare però come le due registrazioni siano state eseguite in ambienti e con dinamiche completamente diversi. La registrazione in laboratorio è avvenuta a pochi centimetri dalla centrifuga e non era presente nessun tipo di disturbo ambientale. Il file audio rilevato all'interno della Spurga delle Cadene è invece stato registrato a decine di metri dall'ipotetica area di nucleazione del fenomeno, inoltre il suono è altamente inquinato dallo scroscio del torrente in piena attraverso il canale superiore. La registrazione della grotta è stata rifinita tramite equalizzatore in modo che risaltassero le frequenze basse e medie rispetto a quelle più elevate. Un'altra differenza da sottolineare è la discrepanza nell'apparato sperimentale: il suono registrato in laboratorio è stato generato da una centrifuga di ridotte dimensioni, la

cavitazione ipotizzata nel Lago Pensile invece viene generata dalla presenza di una geometria tipo Venturi, con dimensioni ben più ampie e dinamiche diverse. Nonostante questo è stato verificato che il suono della cavitazione risulta simile nei diversi ambienti in cui avviene il fenomeno; esso tende però a presentare intensità maggiori per frequenze più basse quando aumenta il diametro del restringimento nel tubo di Venturi. Tenendo quindi conto delle premesse, è possibile constatare che la comparazione dei due file audio risulta essere accomunabile. Si percepiscono suoni simili, ma è necessaria una registrazione più prossima al punto di genesi per poter meglio confrontare le registrazioni.

La grotta durante i periodi di piena, da quando il livello sopra il Lago Pensile inizia a crescere, produce suoni molto bassi e profondi, di intensità via via sempre maggiore. I suddetti suoni, nella fase iniziale, risultano deboli e distaccati. Quando il livello raggiunge i 50 centimetri invece il suono sembra diventare più intenso e continuo, questi rumori sono caratteristici e inconfondibili nei vari impulsi di piena. Quando si innesca l'effetto stantuffo, in 10 minuti il livello d'acqua passa dai 1,8 metri ai 4,5 metri. Durante questo intervallo di tempo si nota una ripetizione simile dei picchi (Fig. 6.24), è ipotizzato infatti che in questa fase di carico sia più determinante la geometria della grotta e i suoni prodotti dalla rapida salita del livello d'acqua e il conseguente movimento delle masse d'aria tra le fratture e le cupole del condotto, rispetto ad un possibile rumore da cavitazione, che comunque potrebbe essere presente ma solo come sottofondo. Questa ipotesi è suffragata dagli spettri osservati fino ad ora, in cui nella fase di carico, così come nella fase di scarico, sono



Figura 6.39 – QR code relativo al confronto fra due file audio riguardanti il fenomeno della cavitazione, uno registrato durante la piena del 5 novembre 2023 e uno registrato in laboratorio.

presenti picchi di intensità di breve durata caratteristici di rumori puntuali e non continui, come ci si può aspettare da rumori di aria compressa.

Oltre al livello d'acqua, in questa fase, aumentano rapidissimamente anche le intensità dei suoni, che da 65 dB passano a 95 dB. La fase iniziale della piena, come già discusso, presenta la massima portata lungo il canale superiore. In questa fase la velocità all'interno del Lago Pensile è massima, e quindi dovrebbe coincidere con il massimo sviluppo del fenomeno della cavitazione. Il rumore nel periodo iniziale è molto elevato, supera i 100 dB nella quasi totalità delle piene, che corrisponde all'intensità registrata durante un concerto rock ma, ascoltando con attenzione solamente i suoni a bassa frequenza tramite un equalizzatore, si riescono a percepire ancora i rumori precedentemente descritti.

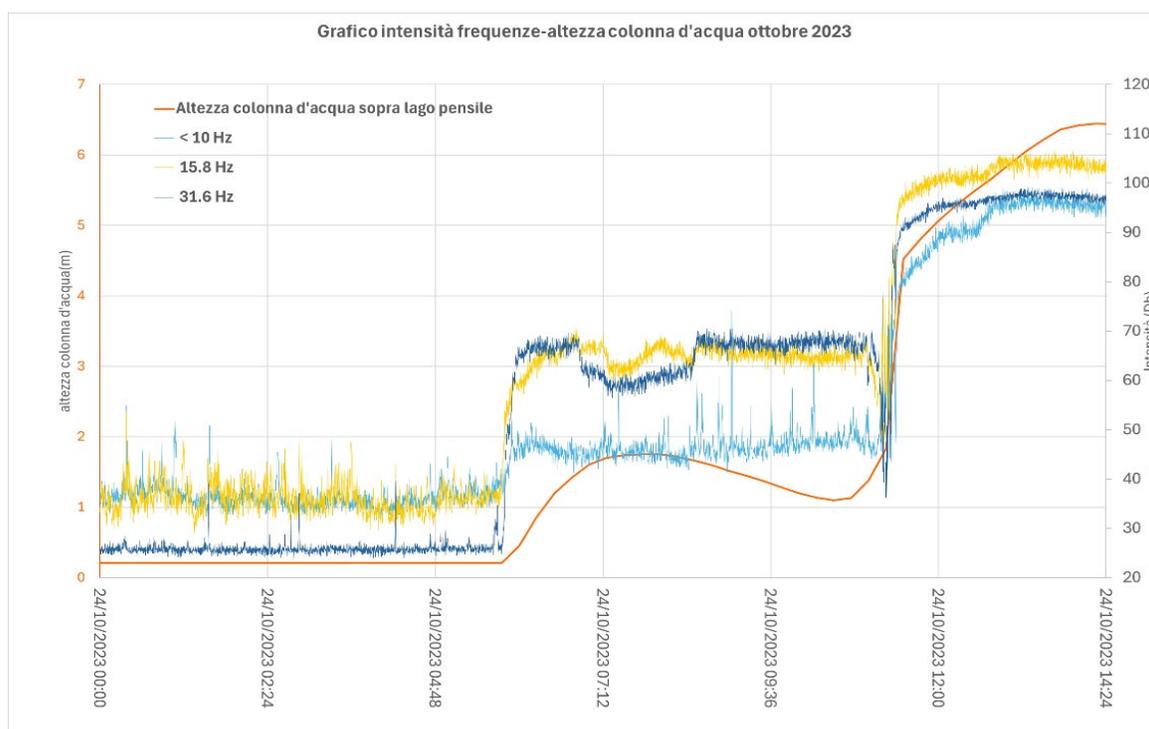


Figura 6.40 - Fase di carico piena del 24 ottobre 2023 con relative intensità di frequenza registrate.

Si osserva inoltre come una qualsiasi perturbazione del livello piezometrico si traduca immediatamente in un aumento o diminuzione delle intensità delle basse frequenze, un esempio è riportato in Figura 6.41 dove, durante la fase di piena del 24-25 ottobre 2023, un incremento di appena 12 cm del livello dell'acqua ha causato un aumento dell'intensità delle frequenze di ben 15 dB, una differenza addirittura udibile ad orecchio. La fase in cui la piena presenta la massima velocità corrisponde all'intervallo in cui la cavitazione ipotizzata esibisce la sua massima espressione.

Seppur in maniera decisamente più attenuata, anche le frequenze più elevate sembrano variare (Fig. 5.30). Il fatto che una così lieve differenza possa far variare del 20% le intensità di frequenze potrebbe essere un indizio di quanto il rumore sia proporzionale alla velocità di flusso.

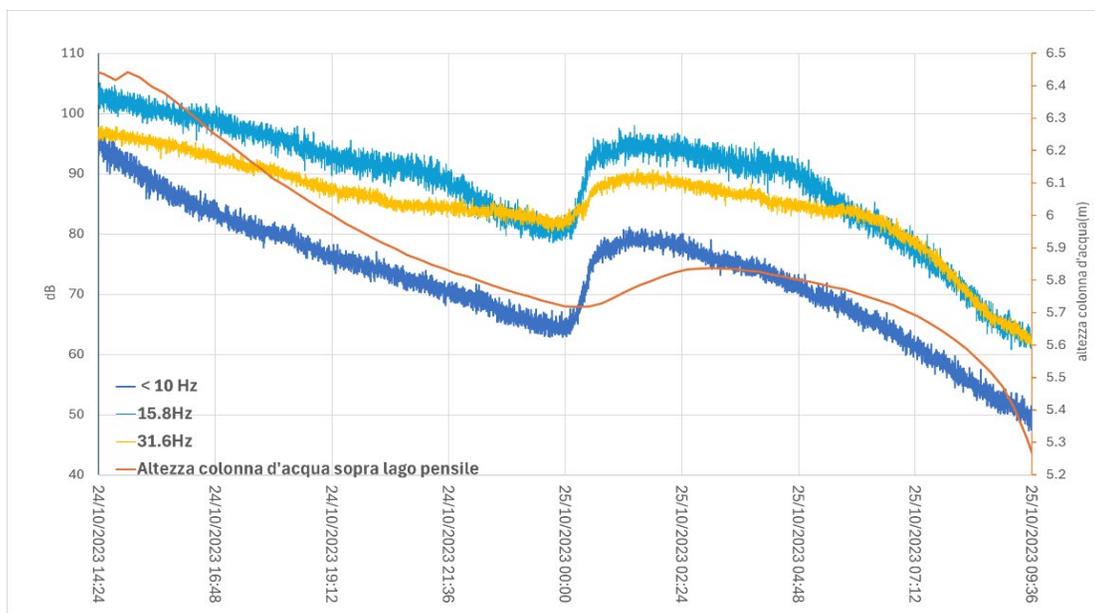


Figura 6.41 - Grafico riguardante una fase intermedia della piena del 24 ottobre con dati di livello dell'acqua e di intensità di frequenze.

La fase di scarico, come già visto nel grafico in Figura 6.27, mostra un periodo di intensi picchi dovuti allo svuotamento delle camere, quindi alla geometria della grotta, che si ripete ad ogni piena. La fase di rumore persistente, evidenziato dai grafici, procede come procede anche la decrescita del livello dell'acqua. Vista la mancanza di scroscio nel canale superiore e nel Lago Pensile, in quanto la strettoia risulta completamente sommersa in questa fase, il suono registrato potrebbe essere spiegato con il fenomeno della cavitazione. Ovviamente in questa fase, vista la mancanza di una portata in uscita abbondante come durante la piena, la velocità del flusso attraverso il Lago Pensile è minore, limitando così l'entità del fenomeno, e di conseguenza diminuendo l'entità dei dB prodotti. Va sottolineato come, seppur le fasi precedenti e successive alla piena abbiano intensità di frequenze simili, la fase di carico sia relativamente breve mentre la fase di scarico invece persista per un periodo molto più lungo: il livello dell'acqua infatti si ristabilisce al valore ordinario solo dopo diverse ore dalla fine della piena. Ultima aggiunta alla trattazione è la probabile presenza di tremolio in grotta durante gli eventi di piena, questo non è suffragato da nessun dato ma le registrazioni sembrano aprire a quest'ulteriore informazione che, a questo punto, sarebbe difficile da spiegare in altri modi.

Le informazioni mostrate nella presente relazione riguardo la presenza della cavitazione non sono sufficienti, anche perché il monitoraggio non aveva previsto la possibilità di verificare la presenza di un fenomeno del genere. Si sottolinea il fatto che tutta quest'ultima trattazione è ipotizzata, ci sono alcuni elementi che sembrano indicare questa direzione ma serve uno studio approfondito condito da un monitoraggio costruito appositamente, progetto che verrà minuziosamente programmato nei prossimi mesi.

Per concludere si può dire che i suoni prodotti all'interno della grotta, uditi anche a lunga distanza dagli abitanti della Val Lagarina e del soprastante paese di Fosse, possono essere spiegati da un insieme di fattori, sicuramente la grande quantità d'acqua di per sé già crea una gran parte del rumore registrato durante la piena, poi sono presenti le sacche d'aria e flussi regolati dal gradiente

barico che in fase di carico e scarico hanno un ruolo importante, e come ultima ipotesi, non ancora verificata, la presenza di un fenomeno molto particolare e mai provato in precedenza, la cavitazione. I rumori provenienti da questa grotta sorgente, da cui ha preso il nome Spurga delle Cadene, hanno finalmente una spiegazione, seppur ancora parziale.

7. CONCLUSIONI

Il lavoro qui presentato descrive una grotta molto peculiare, ricca di caratteristiche rare se non uniche. Il periodo di monitoraggio progettato ed eseguito per il presente lavoro di tesi ha riservato importanti risultati. Vengono esposti di seguito i punti principali:

Il meccanismo: La grotta risulta avere due comportamenti molto diversi fra loro. Il primo avviene durante i periodi di magra, dove essa agisce come un condotto di passaggio dell'acqua proveniente dal bacino di ricarica ubicato nell'area soprastante che coincide con l'altopiano di Fosse. Il torrente sotterraneo in questi periodi presenta una portata variabile dagli 0,5 l/s fino ai 5 l/s, esso viene completamente drenato da alcune fratture presenti nella zona sottostante al Lago Pensile. Durante i periodi di piena invece il comportamento della Spurga delle Cadene si trasforma. Quando si verificano precipitazioni moderate l'acqua del torrente interno verosimilmente deriva, per la maggior parte, dall'altopiano di Fosse ed impiega dalle 7 alle 10 ore a raggiungere il Lago Pensile. Durante le forti precipitazioni invece l'acqua arriva più velocemente e in quantità, seppur attualmente incalcolabili, molto elevate. È stato dimostrato come quest'acqua non possa derivare solamente dall'altopiano di Fosse, ma che provenga anche dalla zona individuata nel Corno d'Aquilio e Corno Mozzo. L'acqua giunge nel Lago Pensile, le fratture presenti ne drenano una parte ma non riescono a farla defluire completamente, perciò essa inizia ad accumularsi ed a innalzare il livello piezometrico. A questo punto entra in gioco la morfologia della grotta, infatti l'innalzamento del livello dell'acqua ostruisce alcuni passaggi all'interno del condotto, imponendo un isolamento forzato a particolari sale. Il più importante isolamento evidenziato dalla presente relazione è identificato nel Lago Pensile. La sommersione del passaggio, alto poco più di 40 centimetri, estromette dalla comunicazione con l'esterno un'importante vano, Sala delle Meraviglie. Questa speciale Sala è stata identificata come motore principale del meccanismo di funzionamento della grotta durante i periodi di piena. Il meccanismo che governa il condotto durante gli episodi di piena è stato chiamato meccanismo a stantuffo. Il meccanismo è peculiare per la grotta studiata, ma è verosimile che possa essere utilizzato per spiegare il comportamento di molte altre cavità presenti nel mondo. Sala delle Meraviglie, come detto, viene isolata dall'innalzamento del livello piezometrico, il livello persiste nella crescita e in questo modo comprime l'aria rinchiusa all'interno del vano. La pressione atmosferica registrata in Sala delle Meraviglie aumenta e, insieme ad altre sovrappressioni presenti all'interno del condotto, per il principio di Pascal imprime una forza suppletiva al volume d'acqua tale da farle superare il dislivello, pari a 7 metri, con il canale superiore. Il meccanismo a stantuffo è perciò governato dalle sovrappressioni che si instaurano all'interno del condotto, dove Sala delle Meraviglie rappresenta il motore principale. Raggiunto quindi un livello d'acqua di 4,3 metri sopra al Lago Pensile, la piena inizia a scorrere attraverso il canale superiore e da lì fuoriesce tramite il varco d'entrata della grotta. La pressione atmosferica in Sala delle Meraviglie decresce una volta che la piena è iniziata, questo suo comportamento necessita verifiche più approfondite ma è probabile che la diminuzione sia dovuta ad uno scarico tramite frattura, il flusso d'acqua a valle del Lago Pensile crea delle depressurizzazioni locali che richiamano aria in pressione dalla Sala. Sala Bianca invece, un grande vano che sovrasta il canale superiore, durante gli eventi mostra dati di depressurizzazione dovuta ad incorporazione di aria da parte del flusso. In casi di eventi estremi, come quello del 21 maggio 2024, si è osservato un incremento di pressione anche in Sala Bianca, con picchi decisamente elevati dovuti all'aumento del livello dell'acqua nella

2°Sala in conseguenza all'enorme quantità di flusso che, in questi casi, ostruiscono il passaggio verso l'entrata della cavità. L'evento di piena perdura anche per diversi giorni finché il livello piezometrico sopra al Lago Pensile risulta più elevato rispetto all'ingresso della grotta. Una volta che la portata da monte, e di conseguenza il livello piezometrico, diminuisce, il flusso di piena nel canale superiore decresce finché non possiede più il carico idraulico sufficiente per scorrere. La diminuzione di livello a questo punto è legata, per quanto è noto, solamente al drenaggio delle fratture presenti sotto il Lago Pensile. Durante la decrescita del livello piezometrico l'aria racchiusa all'interno di Sala delle Meraviglie tende ad espandersi registrando di conseguenza una depressurizzazione della pressione atmosferica. È stato dimostrato inoltre come gli episodi di piena abbiano inizialmente una fase di elevatissimo vigore, presentando la massima portata, e poi tendenzialmente diminuiscano nonostante la costanza del livello dell'acqua misurata sopra al Lago Pensile. La durata degli episodi di piena è direttamente conseguente alla quantità di acqua precipitata sul bacino idrogeologico che si estende, in condizioni di forti precipitazioni, anche all'area sommitale della Valle Liana corrispondente alla zona tra il Corno d'Aquilio e Corno Mozzo. Seguiranno nei prossimi mesi approfondimenti per verificare l'esatta estensione della sopra indicata area.

I suoni: I rumori registrati dal monitoraggio acustico organizzato all'interno della grotta hanno conseguito risultati inaspettati. Come dimostrato, i suoni nella fase di carico e scarico della grotta risultano analoghi per ogni episodio di piena. Essi sono dovuti alla geometria della cavità carsica ed è stato dimostrato come i picchi di intensità avvengano, senza eccezione, alla medesima altezza di livello. I suoni hanno origine da volumi di aria intrappolati all'interno della geometria carsica che nella fase di carico e scarico danno luogo a rumori dovuti al flusso di aria e alle differenze di pressioni che si instaurano. Questo è ricavabile proprio dalla reiterazione dei medesimi spettri, segno di un fenomeno guidato dall'unica caratteristica che non può cambiare mai, ovvero la morfologia del condotto. L'unica variabile presente che può far variare lo spettro di intensità è la velocità di innalzamento e decrescita del livello piezometrico. Infatti, all'aumentare della velocità gli spettri risultano più condensati, quindi con i picchi più ravvicinati. Le velocità sono decisamente più variabili durante la fase di carico rispetto alla fase di scarico, questo è conseguente all'acqua in arrivo da monte altamente dipendente dalle precipitazioni che si registrano nel bacino di ricarica. Questa differenza di velocità spiega anche la maggior somiglianza degli spettri registrati durante la conclusione degli eventi di piena comparati con quelli di inizio. L'alta variabilità della velocità della fase di carico ha un'ulteriore conseguenza, ovvero l'intensità dei picchi; è stato infatti dimostrato come alte velocità di incremento del livello piezometrico producano picchi con più alto valore di intensità. Questo fattore, se calibrato con prudenza, potrebbe servire in futuro a correlare l'intensità di frequenza con le portate della piena. Così come potrebbe essere possibile correlare la distanza temporale fra due specifici picchi nello spettro con la velocità di deflusso e quindi ancora una volta con la portata. Alcuni suoni molto bassi e i probabili tremolii registrati nella cavità si ritiene possibile siano imputabili al fenomeno della cavitazione. La grotta presenta infatti una geometria che potrebbe dare luogo a questo fenomeno fisico particolare. Il restringimento del condotto, rappresentato dal Lago Pensile, può fungere da tubo di Venturi. Lungo questo restringimento avviene un aumento della velocità del flusso con conseguente diminuzione di pressione del fluido. In conseguenza alla diminuzione di pressione avviene la nucleazione di bolle di aria ricche in vapore acqueo che esplodono poco dopo, rilasciando enormi quantità di energia sotto varie forme. Sono state mostrate alcune prove

indiziarie sulla presenza del fenomeno, come una differenza di pressione tra due trasduttori, una differenza di temperatura, il suono registrato simile a esperimenti in laboratorio. Ovviamente è solo un'ipotesi, il progetto di monitoraggio eseguito non ha gli strumenti per riuscire a definire con certezza la presenza o assenza di un fenomeno mai descritto in una cavità naturale. Detto questo si aggiunge che, perché avvenga la cavitazione è necessario ci sia un flusso sviluppato, producendo così alte velocità lungo il restringimento, perciò viene ipotizzato possa avvenire quando la piena è già in atto. Questo non esclude però che il fenomeno possa materializzarsi anche in certe condizioni durante la fase che precede e segue la piena e che possa spiegare i picchi che perdurano per diverso tempo. Questo fenomeno, se dimostrata la sua presenza, potrebbe spiegare molte manifestazioni di suoni e tremolii registrati in giro per l'Italia e per il mondo che ad oggi risultano inspiegati. Verrà approfondita la questione più nel dettaglio nel prossimo futuro.

Considerazioni suppletive: I dati presentati mostrano una relazione univoca fra l'aumento di pressione in Sala delle Meraviglie con il relativo aumento di temperatura atmosferica, generando così una trasformazione adiabatica naturale. La conducibilità invece presenta caratteristiche comuni di un acquifero carsico ben sviluppato ma con la presenza di una litologia meno carsificata che invece svolge la funzione di serbatoio idrogeologico e dilaziona l'acqua nel tempo mantenendo perenne il torrente interno.

Ipotesi speleogenetica: L'ipotesi di genesi della grotta che si è arrivati a formulare alla fine di questo anno di monitoraggio è relativamente lineare. Il reticolo idrogeologico è influenzato dalla litologia e dalla tettonica dell'area. La Spurga delle Cadene segue una lineazione ENE-WSW pressoché lungo l'intero suo sviluppo. L'acqua proveniente dall'altopiano di Fosse, e in parte dalla zona del Corno d'Aquilio-Corno Mozzo, tramite fratture, ha iniziato a intercettare la lineazione della Spurga aumentandone la dimensione. Le glaciazioni e il loro relativo scioglimento hanno introdotto una grossa quantità di acqua che ha modellato e cambiato la morfologia superficiale, e ancor più intensamente hanno modificato e ampliato i condotti carsici presenti all'interno dell'altopiano lessinico. La Valle Liana ha avuto, secondo l'ipotesi formulata, un ruolo fondamentale nel convogliare grosse quantità di acque, provenienti dallo scioglimento dei ghiacciai dell'Alta Lessinia, attraverso condotti carsici presenti sull'altopiano di Fosse. In questa interpretazione è stato ipotizzato anche un ruolo importante del neck basaltico pervenuto nella zona bassa della Valle. Esso fungeva da barriera idrogeologica per l'acqua che scorreva attraverso la Valle Liana proveniente dall'Alta Lessinia. L'acqua intercettata in questo modo può aver, lungo centinaia di migliaia di anni, eroso e scavato al di sotto dell'altopiano di Fosse fino ad ottenere la morfologia che oggi possiamo apprezzare all'interno della grotta. La Spurga delle Cadene si apre all'interno di una grande sinclinale con al nucleo il relativo materiale deformato, perciò poteva risultare una via preferenziale di fuga per l'acqua proveniente da monte. Il dato che l'acqua oggi derivi in parte dall'Alta Lessinia è un fattore importante per contestualizzare il ruolo della grotta all'interno del sistema carsico dell'area. La Spurga ha attualmente e ha avuto nel passato un ruolo fondamentale nella circolazione idrogeologica della zona tra l'altopiano di Fosse, il Corno d'Aquilio e il Corno Mozzo.

Deposit: Durante il periodo di tesi sono stati analizzati diversi sedimenti che testimoniano un'importante attività glaciale all'interno della cavità. La grotta, probabilmente durante l'Ultimo

Massimo Glaciale, si trovava completamente sommersa e interamente riempita di un sedimento con granulometria molto fine chiamato varva, un tipo di ritmite. Questo sedimento, all'interno della 2° Sala, presentava uno spessore minimo di 10 metri, è stato poi eroso e trasportato via in seguito alla deglaciazione. La breccia presente nel canale superiore invece è possibile potesse essere una morena laterale glaciale appartenente ad un periodo molto più antico rispetto alla varva: alcune ipotesi sono state formulate ma necessitano analisi più approfondite per poter comprendere meglio la sua genesi. Il materiale magmatico analizzato corrisponde invece ad un basalto alcalino parzialmente idrotermalizzato messo in posto in condizioni sottomarine nell'Eocene medio.

Analizzando i dati e le osservazioni accumulate, in conclusione si può afferire che la grotta sembra non essersi ancora adattata ad una nuova configurazione ereditata recentemente. Le fratture sotto al Lago Pensile risultano ancora poco erose e allargate, presentando così una capacità di drenaggio limitata. Questo risulta sospetto viste le grandi dimensioni della cavità, perciò è stato ipotizzato che questa morfologia sia relativamente giovane e che un evento abbia modificato l'equilibrio precedentemente instaurato. È possibile che la grotta, prima dell'ultimo glaciale, fosse completamente satura e il portale d'ingresso fosse la più importante zona di drenaggio dell'acquifero. Poi, come dimostrato, nell'ultima fase glaciale il canale superiore si presentava completamente riempito da depositi, fattore che ha occluso totalmente la via principale di flusso. Durante la fase di scongelamento dei ghiacciai, l'acqua passante per il condotto ha dovuto così trovare una nuova via di drenaggio, iniziando a fluire tramite le fratture al di sotto del Lago Pensile. Perciò ora il canale superiore viene investito dall'acqua solamente durante i periodi di intensa precipitazione. Un'altra ipotesi vedrebbe un coinvolgimento delle strutture tettoniche che bordano questa prima parte di cavità. È possibile che un movimento della prima faglia abbia creato la differenza di quota fra i due canali e così il flusso, che precedentemente seguiva il condotto, abbia dovuto trovare una nuova via di flusso attraverso le fratture sotto il Lago Pensile.

8. BIBLIOGRAFIA

- Angelucci D., 2016. La valle dell'Adige: genesi e modificazione di una grande valle alpina come interazione tra dinamiche naturali e fattori antropici. In: Rovigo V. (a cura di), *Il fiume, le terre, l'immaginario : l'Adige come fenomeno storiografico complesso*, Edizioni Osiride, Rovereto, pp. 9-43.
- Artoni A., Rebesco M., 1990. Deformazioni per thrusting nei Lessini nord occidentali (Verona-Italia settentrionale). *Neogene thrust tectonics*: 131-137.
- Audra P., Bini A., Gabrovšek, F., Häuselmann P., Hobléa F., Jeannin P.-Y., Kunaver J., Monbaron M., Šušteršič F., Tognini P., Trimmel H., Wildberger A., 2006. Cave genesis in the Alps between the Miocene and today: a review. *Z. Geomorphology* 20: 153–176.
- Ballesteros D., Jiménez-Sánchez M., Giralt S., DeFelipe I., García-Sanseguendo J., 2017. Glacial origin for cave rhythmite during MIS 5d-c in a glaciokarst landscape, Picos de Europa (Spain). *Geomorphology* 286: 68-77.
- Bartoli O., Meli S., Bergomi M.A., Sassi R., Magaraci D., Liu D.Y., 2014. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of magmatic enclaves in trachytes from the Euganean Hills (NE Italy): further constraints on Oligocene magmatism in the eastern Southern Alps. *European Journal of Mineralogy* 27: 161-174.
- Bartolomé M., Sancho C., Benito G., Medialdea A., Calle M., Moreno A., Leunda M., Luetscher M., Muñoz A., Bastida J., Cheng H., Edwards R.L., 2021. Effects of glaciation on karst hydrology and sedimentology during the Last Glacial Cycle: The case of Granito cave, Central Pyrenees (Spain). *Catena* 206.
- Bassetti M., Borsato A., 2005. Evoluzione geomorfologica della Bassa Valle dell'Adige dall'Ultimo Massimo Glaciale: sintesi delle conoscenze e riferimenti ad aree limitrofe. *Acta Geologica* 82: 31-42.
- Beccaluva L., Bianchini G., Bonadiman C., Coltorti M., Milani L., Salvini L., Siena F., Tassinari R., 2007. Intraplate lithospheric and sublithospheric components in the Adriatic domain: Nephelinite to tholeiite magma generation in the Paleogene Veneto Volcanic Province, Southern Alps. *Geological Society of America* 418: 131-152.
- Berlusconi A., Ferrario M.F., Livio F., Michetti A., Violante C., Esposito E., Porfido S., Fiaccavento P., Ripamonti L., Roncoroni M., 2013. Quaternary Faults and Seismic Hazard in the Lake Garda Area. *Ingegneria sismica* 30: 10-35.
- Bertotti G., Picotti V., Bernoulli D., Castellarin A., 1993. From rifting to drifting: tectonic evolution of the South-Alpine upper crust from the Triassic to the Early Cretaceous. *Sedimentary Geology* 86: 53-76.
- Borsi S., Ferrara G., Piccoli G., 1969. Determinazioni col metodo K/Ar dell'età delle eruzioni euganee. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia* 25: 27- 34.

- Brombin V., Bonadiman C., Jourdan F., Roghi G., Coltorti M., Webb L. E., Callegaro S., Bellieni G., De Vecchi G., Sedeà R., Marzoli A., 2019. Intraplate magmatism at a convergent plate boundary: The case of the Cenozoic northern Adria magmatism. *Earth-Science Reviews* 192: 355-378.
- Bull P.A., 1981. Some fine-grained sedimentation phenomena in caves. *Earth Surface Processes Landforms* 6: 11–22.
- Cargnel M., 1969. Spurga delle Cadene. Relazione ciclostilata, Verona.
- Carminati E., Cavazza D., Scrocca D., Fantoni R., Scotti P., Doglioni C., 2010. Thermal and tectonic evolution of the southern Alps (northern Italy) rifting: Coupled organic matter maturity analysis and thermokinematic modeling. *AAPG bulletin* 94: 369-397.
- Castellarin A., Farabegoli E., 1974. Cicli sedimentari di spiaggia nell'Oligocene di Cavalo. *Giornale di Geologia* 2: 393-409.
- Castellarin A., Cantelli L., 2000. Neo-Alpine evolution of the Southern Eastern Alps. *Journal of Geodynamics* 30: 251-274.
- Castiglioni B., 1940. Atlante Fisico-economico d'Italia, Milano: Tav. 3.
- Corrà G., 1969. Nuovi elementi per lo studio della tettonica nei Monti Lessini. Volume « I cento anni dell'Istituto Tecnico A. M. Lorgna », Verona.
- Correggiari A., Roveri M., Trincardi F., 1996. Late Pleistocene and Holocene evolution of the North Adriatic Sea. *Italian Journal of Quaternary Sciences* 9: 697-704.
- De Vecchi G., Sedeà R., 1995. The Paleogene basalts of the Veneto region (NE Italy). *Memorie di Scienze Geologiche* 47: 253-374.
- Doglioni C., Bosellini A., 1987. Eoalpine and mesoalpine tectonics in the Southern Alps: *Geol. Rundsch.* 76: 735 - 754.
- Gonzato, G., Ferrari A., 2022. Depositi morenici atesini nei Lessini occidentali. *La Lessinia-leri oggi domani Quaderno culturale* 45: 59-66.
- Habbe K. A., 1960. Zur Klimatischen Morfologie des Alpensudolrands-Untersuchungen in den Morenaamphitheatern der Etsch und Gardasee. *Nachr. Akad. Wiss. Gottingen, II Math. Phys. Kl.* 10: 179-203.
- Hutli E., Nedeljkovic M. S., Bonyár A., Légrády D., 2017. Experimental study on the influence of geometrical parameters on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets. *Experimental Thermal and Fluid Science* 80: 281-292.
- Lastennet R., Mudry, J., 1997. Role of karstification and rainfall in the behavior of a heterogeneous karst system. *Environmental Geology* 32: 114-123.
- Luetscher, M., 2022. Glacial Processes in Caves. In: Shroder, J.J.F. (Eds), *Treatise on Geomorphology*, vol. 4. Elsevier, Academic Press, San Diego, CA, pp. 569–578.

Macera P., Gasperini D., Piromallo C., Blichert-Toft J., Bosch D., Del Moro A., Martinsauro S., 2003. Geodynamic implications of deep mantle upwelling in the source of Tertiary volcanics from the Veneto region (Southern-Eastern Alps). *Journal of Geodynamics* 36: 563-590.

Maire R., 1990. La haute montagne calcaire. Msc Thesis: Nice University, Nizza, 731 p.

Markússon S.H., Stefánsson A., 2011. Geothermal surface alteration of basalts, Krýsuvík Iceland. Alteration mineralogy, water chemistry and the effects of acid supply on the alteration process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 206: 46-59.

Mattioli, M., Cenni M., Raffaelli G., 2008. I Minerali del Veronese. Le mineralizzazioni secondarie delle rocce vulcaniche dei Monti Lessini 2 ed., Memorie del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, Verona, pp. 196-207.

Menichetti M., Rossi G., Zorzin R., 2011. Idrogeologia e Carsismo dell'Area della Spluga della Preta. In: *La Spluga Della Preta. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia* 25: 93-118.

Mietto P., Sauro U., 2000. Le Grotte del Veneto: paesaggi carsici e grotte del Veneto 2nd ed. La Grafica Editrice, Vago di Lavagno Verona, 480 p.

Mihevc A., 2009. Cryoturbation of the sediments at the cave entrances—case studies from Skednena jama, Potočka zijalka and Bestâzovca cave. In: Steguweit L. (Eds), Hugo Obermaier Society for Quaternary Research and Archaeology of the Stone Age, 51st Annual Meeting in Ljubljana, pp. 26–27.

Mihevc A., 2018. Ice caves in Slovenia. In: Persoiu A., Lauritzen S., (Eds), *Ice Caves 1*, Elsevier, Amsterdam, pp. 691–703.

Pasa A., 1940. Contributi alla conoscenza dei depositi quaternari della Regione veronese, *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano* 20, Torino.

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis J., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M., 1999. Climate and Atmospheric History of the Last 420,000 Years from the Vostock Ice-Core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436.

Riviere, A., 1977. Méthode granulométrique. Techniques et interprétations (Granulometric method. Technic and interpretations). Masson, Paris, 167 p.

Rossi G., 1987. Risultati dei test idrogeologici in relazione ai fenomeni di inquinamento della Spurga delle Cadene. Dattiloscritto inedito. Commissione Gruppi Grotte Veronesi.

Rossi G., Zorzin R., 2011. Lo studio idrogeologico della spurga delle cadene. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia* 25: 119-128.

Sauro F., Piccini L., Menichetti M., Cascone G., 2011. Aspetti morfo-strutturali e ipotesi sull'evoluzione della Spluga della Preta. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia* 25: 69-92.

Sauro U., 1974. Aspetti dell'evoluzione carsica legata a particolari condizioni litologiche e strutturali negli Alti Lessini. *Bollettino Società Geologica Italiana* 93: 945-969.

Sauro U., 2005 - Dal ghiacciaio al fiume. In: Turri E., Ruffo S. (a cura di), Adige, il fiume, gli uomini, la storia. Cierre, Verona, pp. 23-59.

Savelli C., Lipparini E., 1979. Età K/Ar di basalti del vicentino e la scala dei tempi del Paleogene. Bollettino della Società Geologica Italiana 98: 375-385.

Schroeder J., Ford D. C., 1983. Clastic Sediments in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada. Arctic and Alpine Research 15: 451- 461.

Szczygiel J., Wróblewski W., Mendecki M.J., Hercman H., Bosák P., 2020. Soft-sediment deformation structures in cave deposits and their possible causes (Kalacka Cave, Tatra Mts., Poland). Journal of Structural Geology 140.

Viganò A., Bressan G., Ranalli G., Martin S., 2008. Focal mechanism inversion in the Giudicarie–Lessini seismotectonic region (Southern Alps, Italy): Insights on tectonic stress and strain. Tectonophysics 460: 106-115.

Visonà D., Caironi V., Carraro A., Dallai L., Fioretti A.M., Fanning M., 2007. Zircon megacrysts from basalts of the Venetian Volcanic Province (NE Italy): U-Pb, oxygen isotopes and REE data. Lithos 94: 168-180.

Zantedeschi C., 1994. New Rb-Sr radiometric data from Colli Euganei (North Eastern Italy). Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova 46: 17-22.

Zampieri D., 2000. Segmentation and linkage of the Lessini Mountains normal faults, Southern Alps, Italy. Tectonophysics 319: 19-31.

Zhou Z., Li Q., Liang T., Gong S. 2022. The Numerical Simulation of Cavitation Phenomenon in a Venturi Tube. Journal of Physics: Conference Series 2022.

SITOGRAFIA

AquaPortail. Venturi: Définition et explications. (2010, 19 agosto).
<https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/7983/venturi>

IQSdirectory. Homogenizer : What is it? Uses and types. (n.d.).
<https://www.iqsdirectory.com/articles/mixer/homogenizer.html>

Wheather Underground. (2014). <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ISANTA1006>

Geoportale Regione Veneto. (2020). <https://idt2.regione.veneto.it/>

Catasto regionale delle grotte del Veneto. (2017). <http://www.catastogrotteveneto.it/>