

# POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria per l'Ambiente e per il Territorio**

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio della sorgente di Su Gologone**



**Relatore**

prof. Adriano Fiorucci

**Candidata**

Sara Zedda

**Correlatori**

Prof. Bartolomeo Vigna

Dott. Francesco Sanna

Anno Accademico 2022/2023





## Sommario

<b>1</b>	<b><i>Introduzione</i></b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b><i>Carsismo</i></b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b><i>Inquadramento geografico</i></b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b><i>Inquadramento geologico e meteorologico</i></b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b><i>Il sistema carsico di Su Gologone</i></b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b><i>Analisi dati</i></b>	<b>17</b>
<b>6.1</b>	<b><i>Dati monitorati</i></b>	<b>17</b>
<b>6.2</b>	<b><i>Eventi di piena</i></b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b><i>Curve di esaurimento</i></b>	<b>33</b>
<b>7.1</b>	<b><i>Boussinesq</i></b>	<b>33</b>
<b>7.2</b>	<b><i>Mangin</i></b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b><i>Idrogeochimica</i></b>	<b>40</b>
<b>9</b>	<b><i>Conclusioni</i></b>	<b>46</b>
	<b><i>Bibliografia e sitografia</i></b>	<b>47</b>

# 1 Introduzione

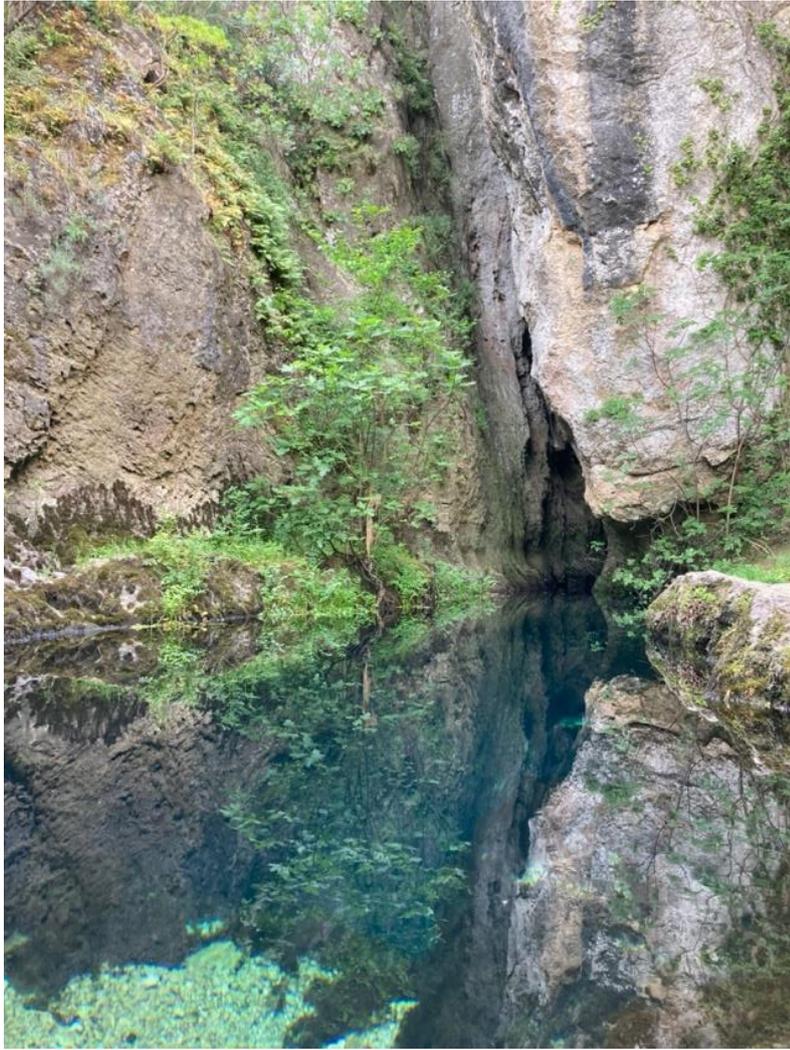
Nel parlare della sorgente di Su Gologone non possiamo esimerci dal citare il Supramonte che è tra le zone più conosciute della Sardegna.

Per le sue caratteristiche morfologiche è stato, ed è tutt'ora oggetto di studi geologici, mentre la bellezza dei suoi paesaggi spogli e rocciosi, i canyon, i corsi d'acqua che scorrono al suo interno e le vaste grotte richiamano escursionisti da ogni parte del mondo. Dolomie e calcari con la complicità del vento e dell'acqua hanno donato al Supramonte la sua attuale e inconfondibile conformazione. Tra questi ambienti si distinguono per importanza il Monte Corrasì (punta più alta con i suoi 1.463m), il Canyon di Gorroppu (il più grande d'Europa) la costa ogliastrina, la Codula di Luna e la foresta di Montes. [1]



*Figura 1: panoramica sul Supramonte [2]*

Ma il valore aggiunto del Supramonte “scorre” al suo interno dove l'acqua ha creato nei secoli una fitta rete di drenaggio che costituisce ad oggi uno degli acquiferi carsici più rilevanti d'Italia la cui sorgente principale, anche detta “sorgente perenne”, è Su Gologone.



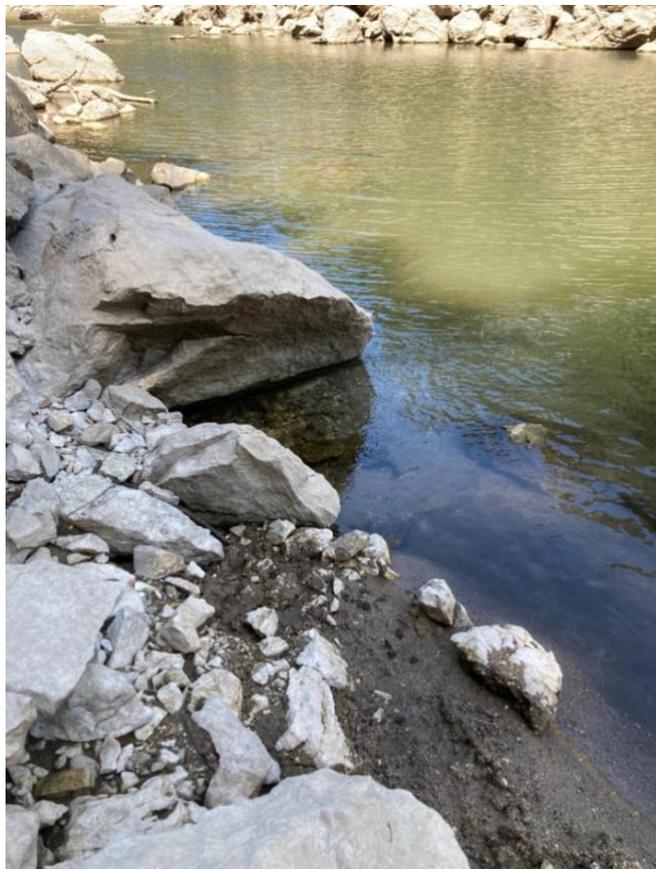
*Figura 2: Sorgente di Su Gologone*

Come tutti i sistemi carsici, anche quello del Supramonte, si basa sulla capacità dell'acqua di legarsi al calcare, trascinandolo con sé e creando così le enormi gallerie che lo costituiscono. L'acqua piovana entra negli inghiottitoi e nelle doline, attraversa la rete di drenaggio e giunge fino alla sorgente. In base alla portata in ingresso, oltre alla sorgente principale si attivano, una dopo l'altra, le cosiddette "sorgenti di troppo pieno".

Alcune sorgenti secondarie dell'acquifero del Supramonte sono: Mussin Tomasu, Sa Ohe, Sa Vena e Su Tipari. Di queste si andrà ad analizzare la correlazione con la sorgente principale, per vedere come potrebbe variare la portata di Su Gologone se si prelevasse acqua da questi punti.



*Figura 3: venuta minore di Sa Vena*



*Figura 4: emergenza di Su Tipari*

Nel processo di analisi andremo a considerare precedenti studi, in particolare quello redatto dal geologo Francesco Murgia, presentato nel libro “Il Supramonte”. Tra questi citiamo quello eseguito con i traccianti che conferma il collegamento tra vari inghiottitoi sparsi nel Supramonte e la sorgente di Su Gologone. Il tracciante immesso è arrivato a destinazione dopo circa un mese, percorrendo distanze di oltre 20 km.

Lo scopo del nostro lavoro sarà quello di trovare un metodo di captazione alternativo a quello attuale, in modo da alterare il meno possibile l’ecosistema circostante e di garantire un costante approvvigionamento agli abitanti. L’attuale sistema di captazione, infatti, crea enorme disagio alla popolazione, con una portata prelevata che varia in base alla stagione e le pompe presenti che vanno periodicamente in blocco andando a gravare economicamente sugli enti gestori.

Sfruttando la natura carsica della sorgente, l’idea da cui partiamo è quella di prelevare l’acqua prima che esca dalla sorgente creando un pozzo nei pressi di Mussin Tomasu. In questo modo l’acqua verrebbe presa direttamente dalla riserva geologica che tenderà a svuotarsi nel tempo, in attesa di nuove piogge.

Gli eventi di piena che prima causavano disagio sia dal punto di vista ambientale che alle utenze, andranno a riempire la riserva. Questo processo è chiamato **laminazione delle piene**, permette non solo di evitare problemi di straripamento nelle sorgenti, ma anche di sfruttare al meglio tutta l’acqua piovana che altrimenti andrebbe persa, fondamentale soprattutto per il periodo storico che stiamo vivendo.



*Figura 5: sorgente di Su Gologone in piena*



*Figura 6: acqua in uscita da Sa Ohe*

Gli studi qui presentati mirano a studiare gli eventi di piena e in quanto tempo vengono dissipati e il modo in cui le varie sorgenti sono collegate tra di loro per valutare la fattibilità dell'intervento.

## 2 Carsismo

Le sorgenti carsiche sono le principali sorgenti in Italia. Come detto precedentemente, questa categoria di acquiferi si basa sulla capacità dell'acqua di scavare la roccia e costruire così una rete di scorrimento. Gli ammassi rocciosi coinvolti sono composti perlopiù da rocce carbonatiche, tipicamente calcari e dolomie. L'acqua piovana tende a legarsi col calcare formando ioni di calcio e bicarbonato, la roccia viene dilavata e si formano così le doline e le gallerie da cui l'acqua penetra nell'ammasso roccioso e scorre fino ad arrivare alla sorgente.

Un sistema carsico si divide in quattro zone principali: l'area di alimentazione, la zona non satura, la zona satura e l'area di emergenza.

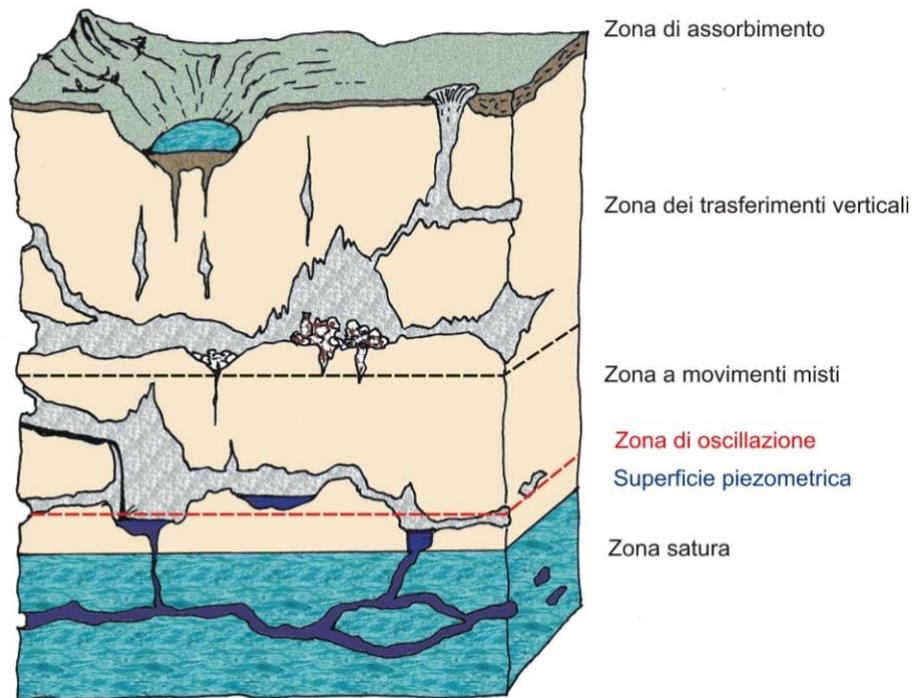


Figura 7: schema di un sistema carsico [3]

Nell'area di alimentazione l'acqua entra attraverso le doline e gli inghiottitoi, in particolare tramite l'*epicarso* che è l'area più fratturata. Attraverso la zona insatura scorre e arriva fino alla zona satura dove si deposita, qui il livello varia tra il valore di magra e quello di piena. Nell'area di emergenza troviamo infine le sorgenti che possono essere perenni o di troppo-pieno, e generalmente si trovano a un'altitudine inferiore rispetto alle altre zone.

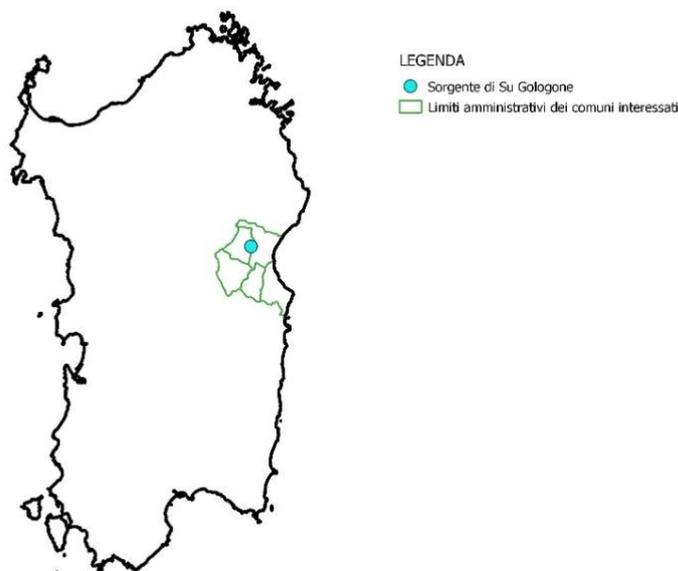
Le emergenze secondarie, trovandosi a una quota più alta rispetto a quella principale, si attivano quando l'acqua entra nell'acquifero più rapidamente di quanto non riesca ad uscire e il livello idrico tende perciò ad innalzare.

La zona di scorrimento è caratterizzata da una rete intrecciata di gallerie che fa sì che l'acqua, una volta entrata nel sistema non segua un'unica direzione di flusso ma si dirami anche nelle fratture più piccole, rallentando così il suo arrivo alla sorgente.

La grande permeabilità della roccia rende facile non solo il passaggio dell'acqua ma anche il trasporto di vari inquinanti. Questo tipo di acquiferi, infatti, è molto più vulnerabile di altri sotto tale aspetto e rende necessaria un'attenta e costante analisi al fine di valutare la potabilità dell'acqua.

### 3 Inquadramento geografico

Il Supramonte, situato nella zona centro-orientale dell'isola, si estende per circa 350 km<sup>2</sup>, toccando i comuni di Oliena, Orgosolo, Urzulei, Dorgali e Baunei. Il bacino idrologico dell'acquifero carsico, invece, occupa all'incirca 161.5 km<sup>2</sup> [4].



*Figura 8: inquadramento dei comuni occupati dal Supramonte e ubicazione della sorgente di Su Gologone*

La sorgente di Su Gologone è situata all'interno del territorio comunale di Oliena. Si trova a un'altitudine di circa 104 m s.l.m..

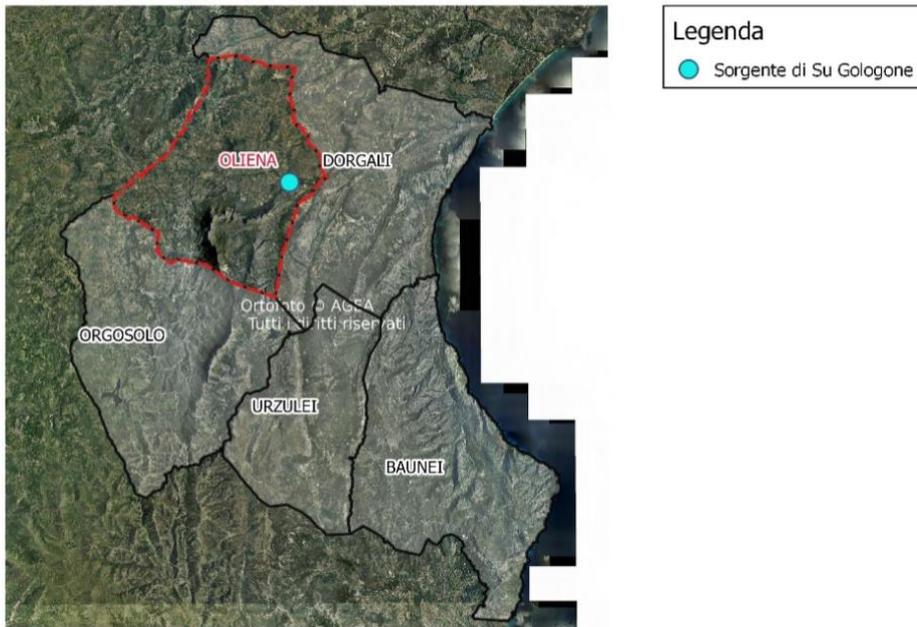


Figura 9: ubicazione della sorgente di Su Gologone

Per questo studio sono stati effettuate delle misurazioni e dei campionamenti nella sorgente principale e in alte emergenze secondarie mostrate nella Figura 10.

La Grotta di Mussin Tomasu si trova a un'altitudine di 117 m s.l.m., Sa Vena si trova all'incirca alla stessa quota di Su Gologone, Su Tipari a circa 98 m s.l.m., mentre Riu Sa Oche scorre lungo la Valle di Lanaitto sui 130 m s.l.m.. [5]



Figura 10: ubicazione delle sorgenti analizzate

## 4 Inquadramento geologico e meteoclimatico

La Sardegna è l'unica regione europea con più di 500 milioni di anni di storia geologica testimoniati dalla presenza di una vasta varietà di rocce che difficilmente si riscontra in uno spazio così contenuto.

La sorgente di Su Gologone è situata ai piedi del Monte Uddè, nel complesso carsico del Supramonte. Tale complesso, che occupa i territori di Oliena, Orgosolo, Dorgali, Urzulei e Baunei, ha origine nell'era mesozoica ed è costituito per circa l'80% da rocce carbonatiche che nel tempo hanno subito l'azione chimica dell'acqua dando origine a grotte e voragini e donando al Supramonte la sua attuale conformazione. Riferite allo stesso periodo sono gli altri affioramenti di rocce carbonatiche presenti sui Tacchi dell'Ogliastra, sulla costa falesia tra Baunei e Orosei e sul Monte Albo.

Il Supramonte è costituito per lo più da depositi carbonatici calcareo-dolomitici, marne e basalti che si posano su un basamento paleozoico cristallino-metamorfico. La presenza preponderante di rocce carbonatiche influenza fortemente la natura delle acque che sgorgano dalla sorgente di Su Gologone. [6], [7], [8]

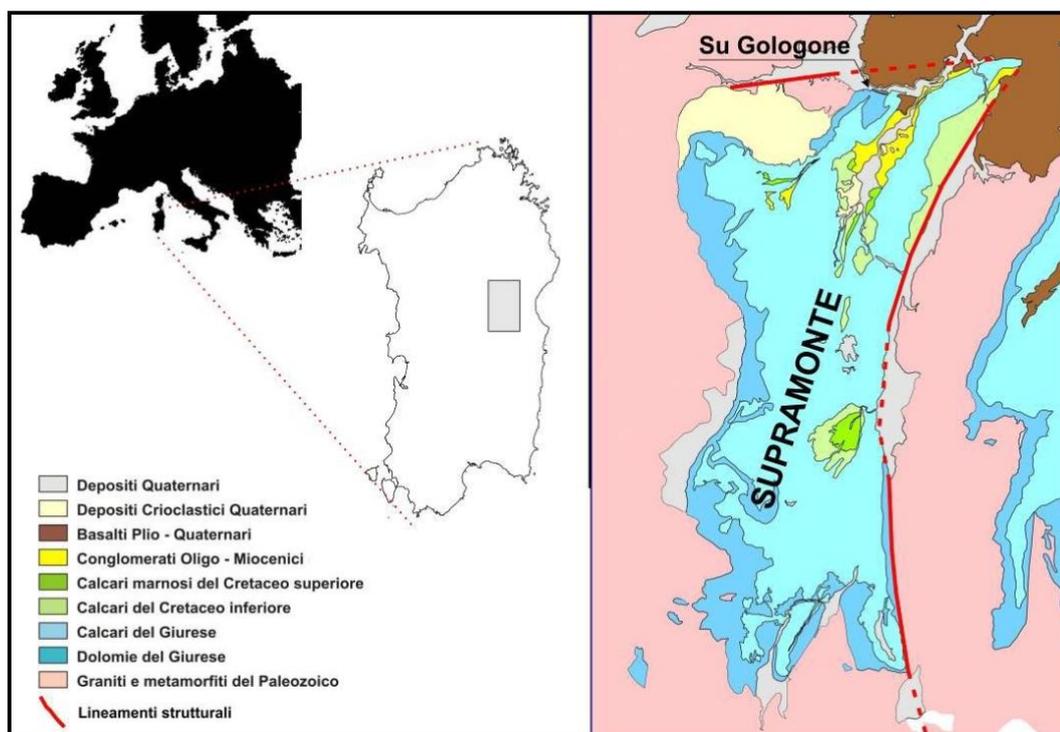


Figura 11: inquadramento territoriale e geologico strutturale [4]

Dal punto di vista meteoclimatico il territorio è soggetto a un clima mediterraneo, con inverni miti ed estati calde. Le temperature medie si aggirano intorno ai 5-7° nei mesi invernali, 20-25° nei mesi estivi, mentre nei mesi primaverili e autunnali sono molto variabili. D'inverno le temperature possono raggiungere i -10°, mentre nei mesi estivi possono superare i 40°.

Per quanto riguarda le precipitazioni si misurano negli anni valori che vanno dai 500 a oltre 1000 mm di pioggia all'anno con un totale di giorni piovosi che si attesta in media tra i 60 e i 70, ma che può superare anche i 100. Nel 2012 si sono registrate precipitazioni annuali pari a 514 mm piovuti in 64 giorni, nel mese di aprile in particolare si sono avuti circa 145 mm di pioggia. Il 2013 è risultato un anno maggiormente piovoso, con un totale di 785 mm di acqua

di cui 185 piovuti solamente il 18 novembre, giorno dell'alluvione che ha causato enormi danni in tutto il territorio sardo. Nel 2018 invece si sono registrati ben 1142 mm piovuti in 67 giorni. I mesi autunnali e primaverili sono quelli caratterizzati da maggior piovosità, mentre quelli estivi sono quelli più asciutti. [9]

## 5 Il sistema carsico di Su Gologone

Quello del Supramonte è un sistema ad alimentazione prevalentemente primaria. Le acque in ingresso, infatti, derivano principalmente dalle precipitazioni e dai periodi di fusione nivale. Tale evento è però poco frequente viste le condizioni meteo-climatiche in cui ci si trova.

In caso di massicci e repentini afflussi idrici entra in funzione anche la rete di drenaggio superficiale, caratterizzata dalla presenza di canali, le cosiddette “codule”, che partono dalle zone più elevate fino a raggiungere le valli sottostanti. In questi casi, infatti, la quantità d’acqua è tale che il sistema non riesce a farla convogliare tutta all’interno dell’acquifero e anche le condizioni di pendenza degli alvei favoriscono lo scorrimento esterno. Attraverso gli inghiottitoi, l’acqua penetra nell’ammasso roccioso e percorre la zona di scorrimento. [4]

Tra i corsi d’acqua superficiali si citano Riu Flumineddu e Riu Sa Oche.

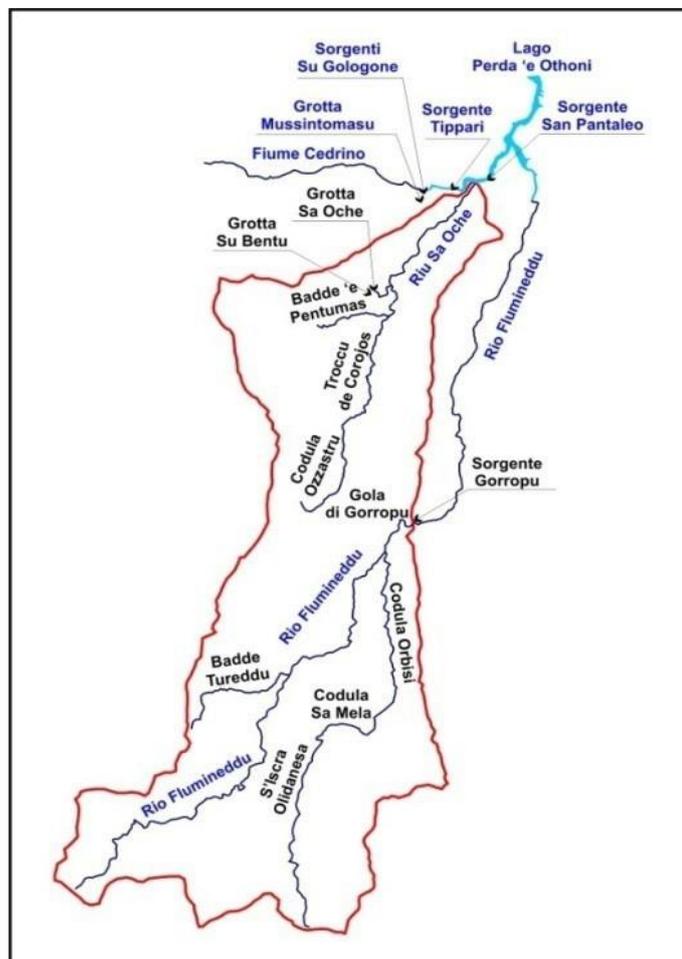


Figura 12: schema idrografico del Supramonte [4]

Lungo i canali si trovano inghiottitoi e doline che permettono l’accesso all’acquifero sotterraneo. Queste ultime, create anch’esse dal dilavamento delle rocce carbonatiche, sono caratterizzate da una visibile depressione del terreno. Una delle più importanti è quella di Su Suercone nel Supramonte di Orgosolo.



Figura 13: dolina di Su Suercone, Orgosolo (Wikipedia)

Gli studi effettuati con i traccianti uniti alle esplorazioni speleologiche hanno permesso di ricostruire, almeno in parte, il percorso che le acque compiono nell'acquifero a partire dai punti di ingresso fino alle risorgive.

Tra i principali inghiottitoi vi sono quelli di Su Mammuccone e di S'Edera, ubicati a quote comprese tra 970 e 930 m. s.l.m..

Per il secondo sono stati eseguiti degli studi con i traccianti, riportati nel libro "Supramonte" del geologo Francesco Murgia, che dimostra il suo collegamento con la sorgente di Su Gologone. Tali studi sono stati eseguiti nel 1999 e nel 2004 con la fluoresceina. Nel primo caso il tracciante è arrivato alla sorgente dopo 70 giorni dalla sua immissione, mentre nel secondo caso è stato rilevato dopo appena 20 giorni.

Con la stessa metodologia è stata studiata la connessione tra Su Gologone e altri siti come la Grotta Su Colostrargiu (2007), Grotta Su Ventu (2013), Grotta Mandara 'e S'Uru Manna (2008) e Grotta S'Orale 'e su Mudrecu (2009).

Per i primi due il test è risultato positivo, mentre è in dubbio il collegamento con le ultime due grotte che sono interconnesse tra di loro.

I risultati dei test sono riportati nella Tabella1. [4]

Tabella 1: quadro riassuntivo dei principali traccianti geochimici condotti nell'acquifero del Supramonte - IASSORGIA A. et al., 1973; 2BANDIERA F., 2000; 3SANNA L. & CABRAS S. in CROBU V. & DE

Anno	P.to di immissione	Tipo di tracciante e quantità utilizzata	Sito di monitoraggio	Esiti	Tempo di restituzione
1999	Grotta S'Edera	Na – Fluoresceina – 4 + 5 kg	Sorgenti di Su Gologone	Positivo	~ 70 giorni
2002	Grotta S'Edera	Na – Fluoresceina – 1 kg	Sorgenti di Su Gologone	Positivo	~ 20 giorni
2007	Grotta Su Colostrargiu	Na – Fluoresceina – 2 kg	Sorgenti di Su Gologone	Positivo	1115 h
2008	Grotta Mandara 'e S'Uru Manna	Na – Fluoresceina – 0.9 kg	Sorgenti di Su Gologone	Dubbio	~ 50 giorni
2009	Grotta S'Orale 'e su Mudrecu	Tinopal – 2 kg	Sorgenti di Su Gologone	Dubbio	~ 20 giorni
2013	Grotta Su Ventu	Na - Fluoresceina – 2 kg	Sorgenti di Su Gologone	Positivo	427 h



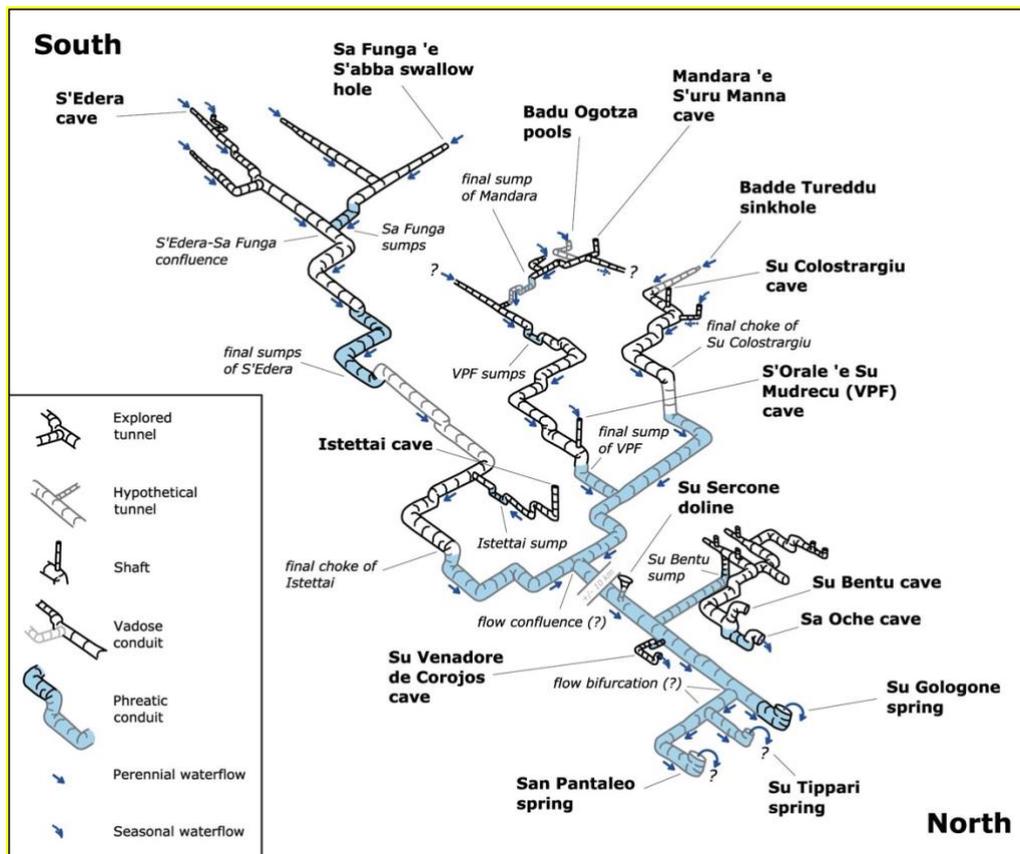


Figura 15: Schema relativo alla circolazione sotterranea del Sistema di Su Gologone [10]

Dalla Grotta di Sa Edera, situata intorno ai 900 m s.l.m., l'acqua scorre fino alla sorgente con un dislivello di circa 800 m.

Il punto più profondo raggiunto finora dalle esplorazioni speleologiche si trova a -135 m s.l.m..

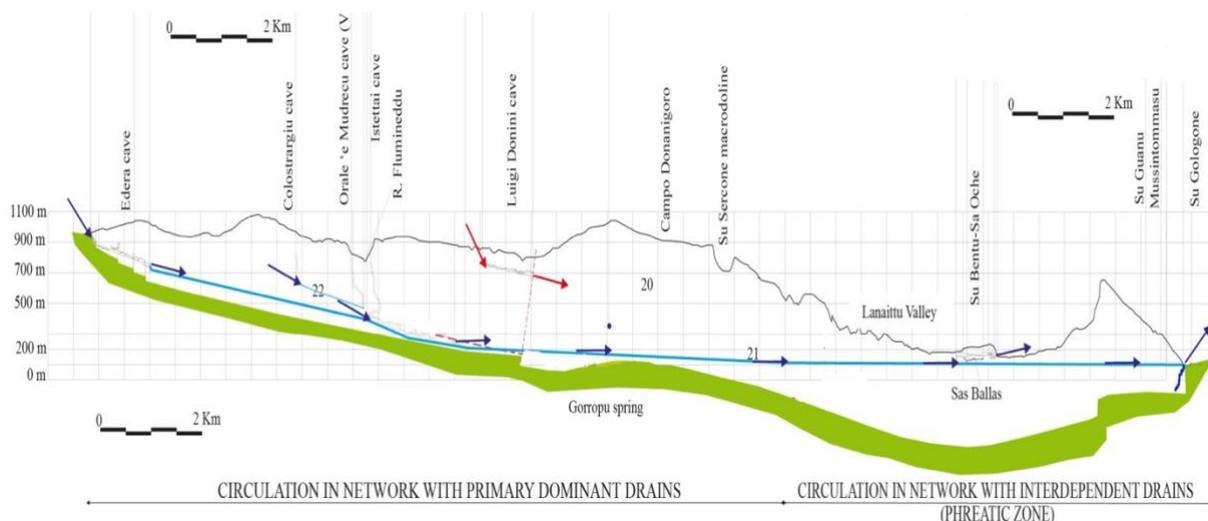


Figura 16: Sezione schematica del Sistema di Su Gologone basata sulle esplorazioni e sui tracciamenti eseguiti dagli speleologi (materiale didattico corso Idrogeologia prof. Vigna)

## 6 Analisi dati

Prima di entrare nel dettaglio dei dati, si fa un piccolo accenno alla teoria su cui si basano le considerazioni fatte in questo capitolo.

Al fine di studiare la circolazione dell'acqua all'interno del complesso carbonatico, si analizzano diversi valori che vengono acquisiti in cavità attive o presso le sorgenti. I più importanti sono i parametri idrodinamici e i cosiddetti "traccianti naturali", in questo caso temperatura e conducibilità elettrica specifica dell'acqua.

Entrambi i parametri devono essere misurati in continuo, cosa che risulta più facile per la temperatura piuttosto che per la conducibilità elettrica. Il primo parametro idrogeologico è correlato alle interazioni acqua-roccia, in particolare agli scambi termici che avvengono tra di loro, e ai tempi di residenza. Il secondo, invece, è strettamente legato alla mineralizzazione dell'acqua. Maggiore è quindi il suo valore, maggiore sarà la concentrazione degli ioni principali disciolti.

Dai valori di questi traccianti, e in particolare dalla loro variazione rispetto all'incremento della portata, si può risalire alle caratteristiche litologiche dell'ammasso roccioso, al tipo di ricarica e alle modalità di circolazione dell'acquifero.

### 6.1 *Dati monitorati*

Per questo studio si hanno a disposizione i dati delle portate d'acqua di Su Gologone (forniti dalla Regione Sardegna), quelli relativi alla temperatura esterna (stazione OLIENA PROTEZIONE CIVILE), alle precipitazioni (forniti dall'ARPAS) e alla temperatura e conducibilità elettrica dell'acqua (forniti dalla Regione Sardegna). Tutti i dati sono considerati nel periodo che va da ottobre 2021 a fine settembre 2022. Di seguito verrà descritto l'andamento nel tempo dei diversi parametri idrogeologici.

Il grafico di Figura 16 mostra l'andamento delle precipitazioni e le variazioni della portata della sorgente, al netto dei prelievi effettuati, tra l'1 ottobre 2021 e il 30 settembre 2022. È evidente una stretta correlazione tra questi due valori che sottolinea una elevata permeabilità dell'acquifero legata ad una notevole carsificazione dell'ammasso roccioso. Il valore massimo si attesta intorno ai 24.000 l/s, registrato il 20 marzo 2022, mentre quello minimo si aggira sui 90 l/s del 17 settembre 2022. Si notano, in particolare, cinque eventi di piena e due curve di esaurimento che verranno descritte in seguito.

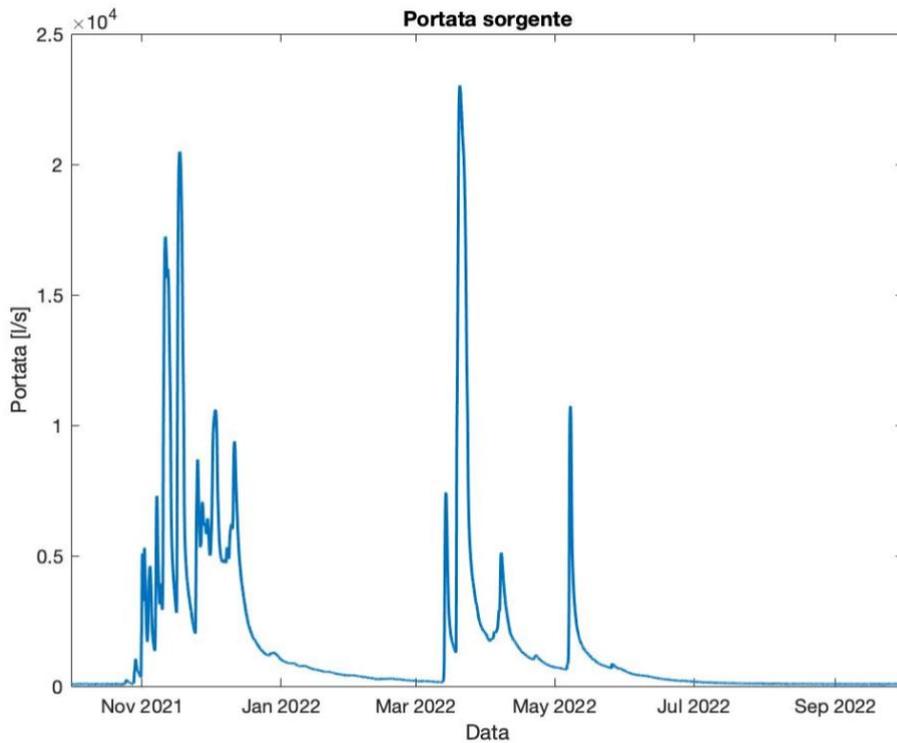


Figura 17: variazione della portata nel tempo tra il 1° ottobre 2021 e il 30 settembre 2022

Nel grafico in Figura 17 si mettono a confronto le variazioni di portata e pioggia nel periodo ottobre 2021 e settembre 2022. La portata aumenta quando le precipitazioni si intensificano e decresce quando queste invece diminuiscono o addirittura si annullano. Il sistema studiato, come detto prima è caratterizzato da un'alimentazione primaria e secondaria; perciò, la ricarica dell'acquifero avviene sia dalle precipitazioni che dagli apporti dei corsi d'acqua superficiali attraverso gli inghiottitoi.

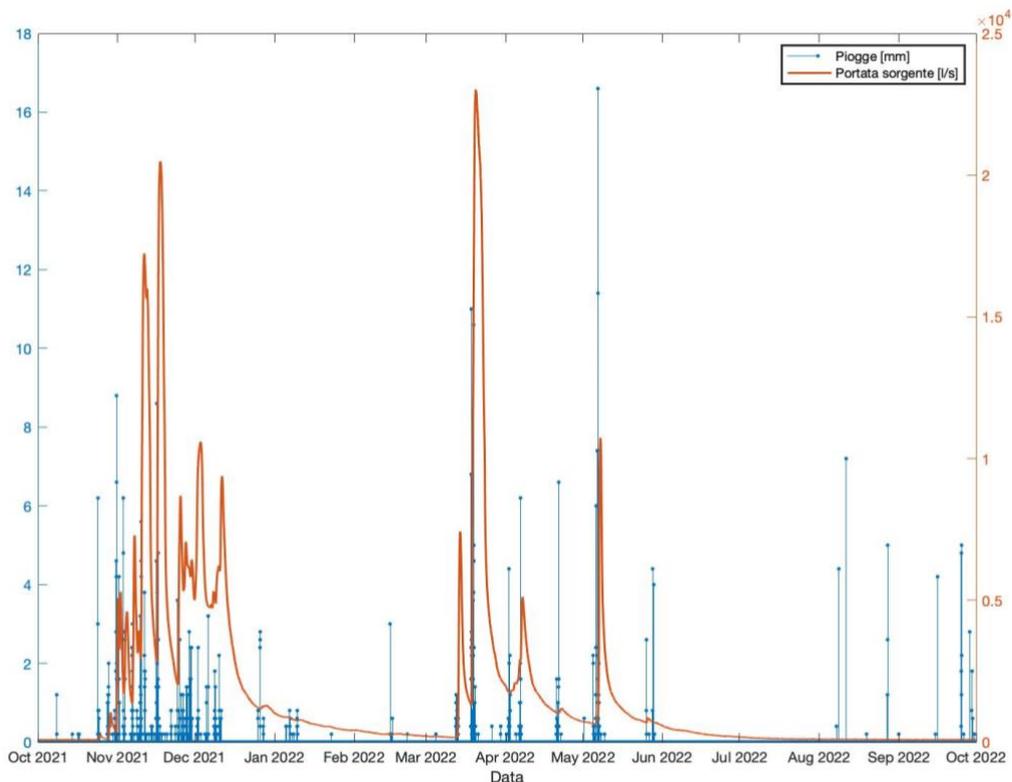


Figura 18: idrogramma e pluviometria dal 1° ottobre 2021 al 30 settembre 2022

Nei grafici di Figura 19 e 20 si mettono in relazione i dati della portata e della conducibilità elettrica e di portata-temperatura delle acque sorgive. Da tali grafici risulta un'evidente diminuzione dei valori di conducibilità elettrica e della temperatura delle acque in seguito all'aumentare della portata.

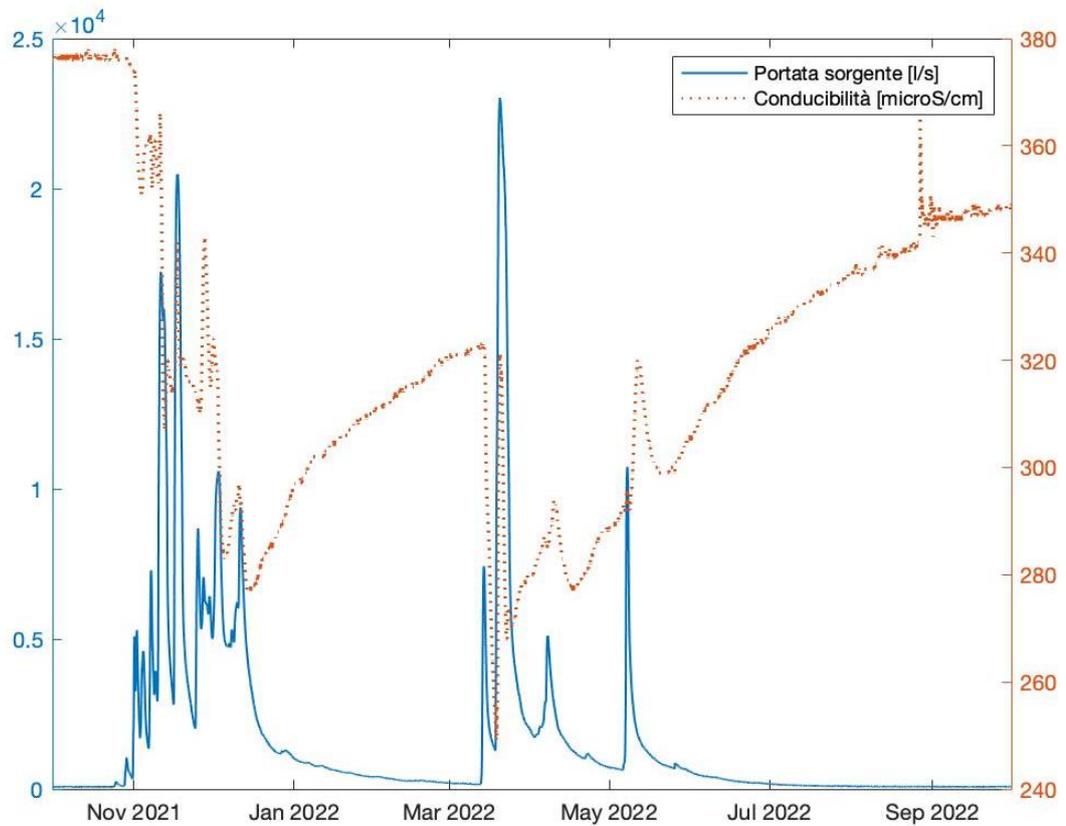


Figura 19: variazione di portata e conducibilità nel tempo

Stesse considerazioni si possono fare per la temperatura. In questo caso, un altro fattore importante è la temperatura esterna. Benché si stia analizzando acque sotterranee, si possono notare variazioni di circa 2° nell'arco di tempo considerato.

Queste variazioni sono dovute all'arrivo alla sorgente delle acque di neoinfiltrazione meno mineralizzate ed in genere più fredde rispetto a quelle presenti nell'acquifero.

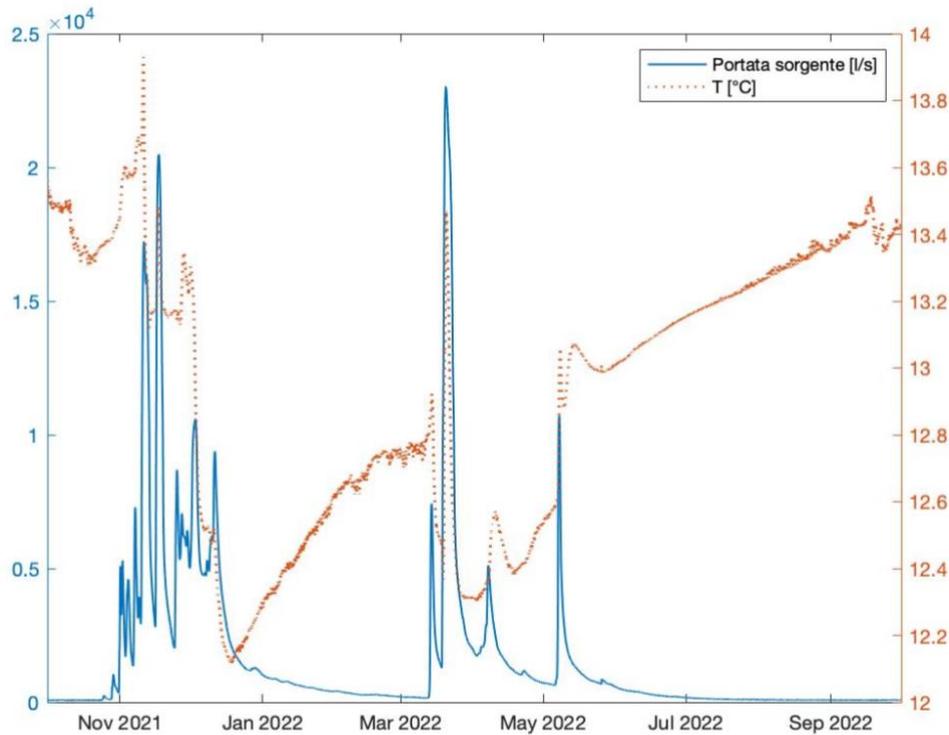


Figura 20: variazione di portate e temperatura dell'acqua nel tempo

Nella Figura 21 e 22 vengono confrontati, per ogni evento di piena la temperatura e la conducibilità elettrica con la pluviometria. Dai diagrammi non si nota una reale correlazione tra piogge e temperatura, giustificato dal fatto che si ha una parziale miscelazione delle acque in ingresso con quelle già presenti nell'acquifero.

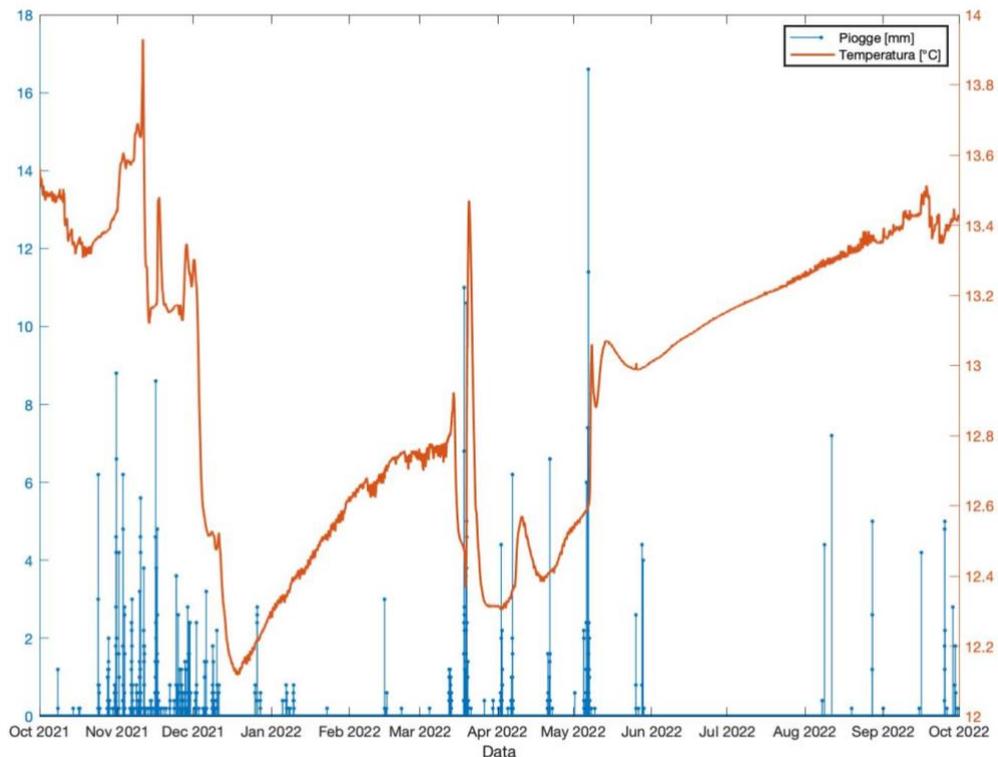


Figura 21: variazione della temperatura dell'acqua nel tempo e pluviometria

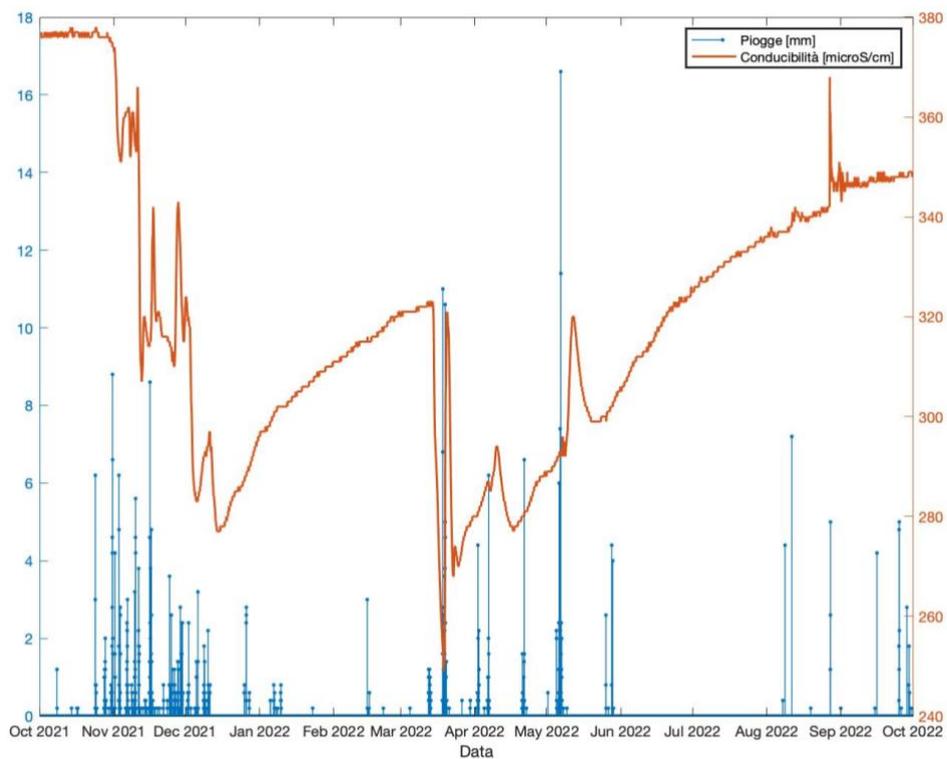


Figura 22: variazione di conducibilità nel tempo e pluviometria

Dalla Figura 23 si può notare come l'andamento della temperatura dell'acqua sia coerente con la tendenza della temperatura esterna.

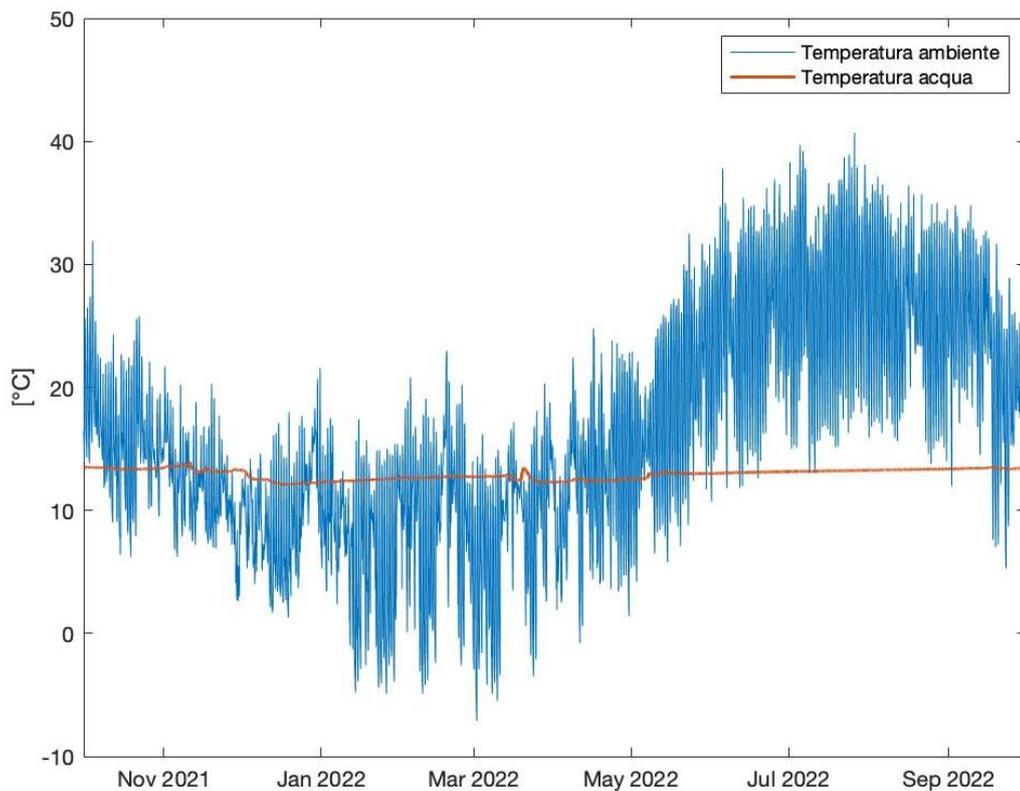


Figura 23: variazione di temperatura esterna e temperatura dell'acqua nel tempo

## 6.2 Eventi di piena

Ora si analizzeranno i singoli eventi di piena. In particolare, si andranno a vedere i valori massimi raggiunti di portata e la durata dell'evento. Verranno inoltre confrontate le curve di conducibilità e temperatura dell'acqua con quelle della portata.

### - Primo evento

Nel grafico di Figura 24 si vedono importanti oscillazioni a partire dal 28 ottobre 2021. L'evento più rilevante si ha dal 10 al 16 novembre 2021. La portata arriva a valori di circa 18.000 l/s, mentre le precipitazioni oscillano tra i 2 e i 6 mm/h.

La portata tende a risalire immediatamente dopo precipitazioni che superano i 2 mm/h, mentre tende a diminuire, seppur più lentamente, quando queste cessano.

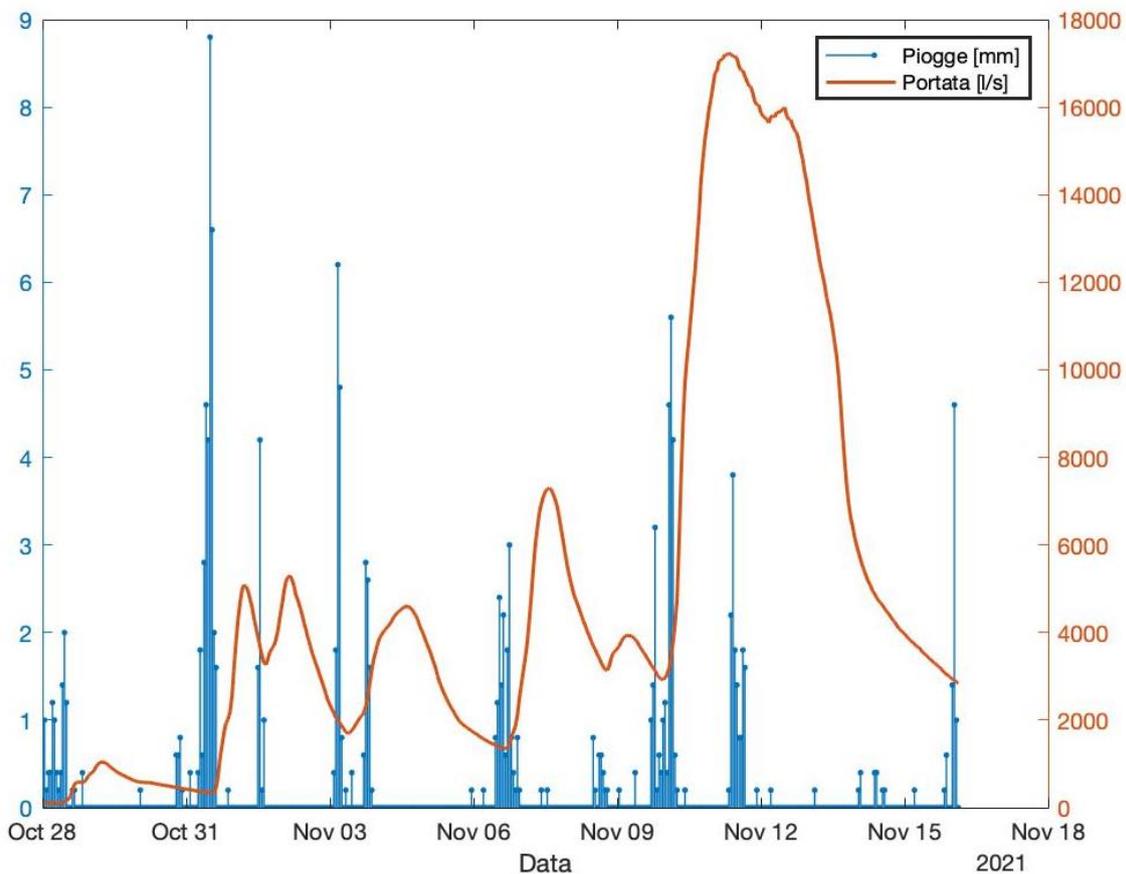


Figura 24: primo evento di piena dal 28 ottobre al 16 novembre 2021

In Figura 25 si mettono a confronto conducibilità e portata. Dal grafico si capisce che le acque in uscita sono acque dell'acquifero parzialmente miscelate con quelle di neoinfiltrazione. Ciò spiega, in particolare, la riduzione della conducibilità subito dopo la piena dell'11 novembre.

Stesso ragionamento si fa per la temperatura, il cui andamento rispetto alla portata è riportato in Figura 26. L'apporto delle acque di neoinfiltrazione, infatti, diminuisce la temperatura dell'acqua in uscita essendo più fredde rispetto a quelle già presenti all'interno dell'ammasso roccioso.

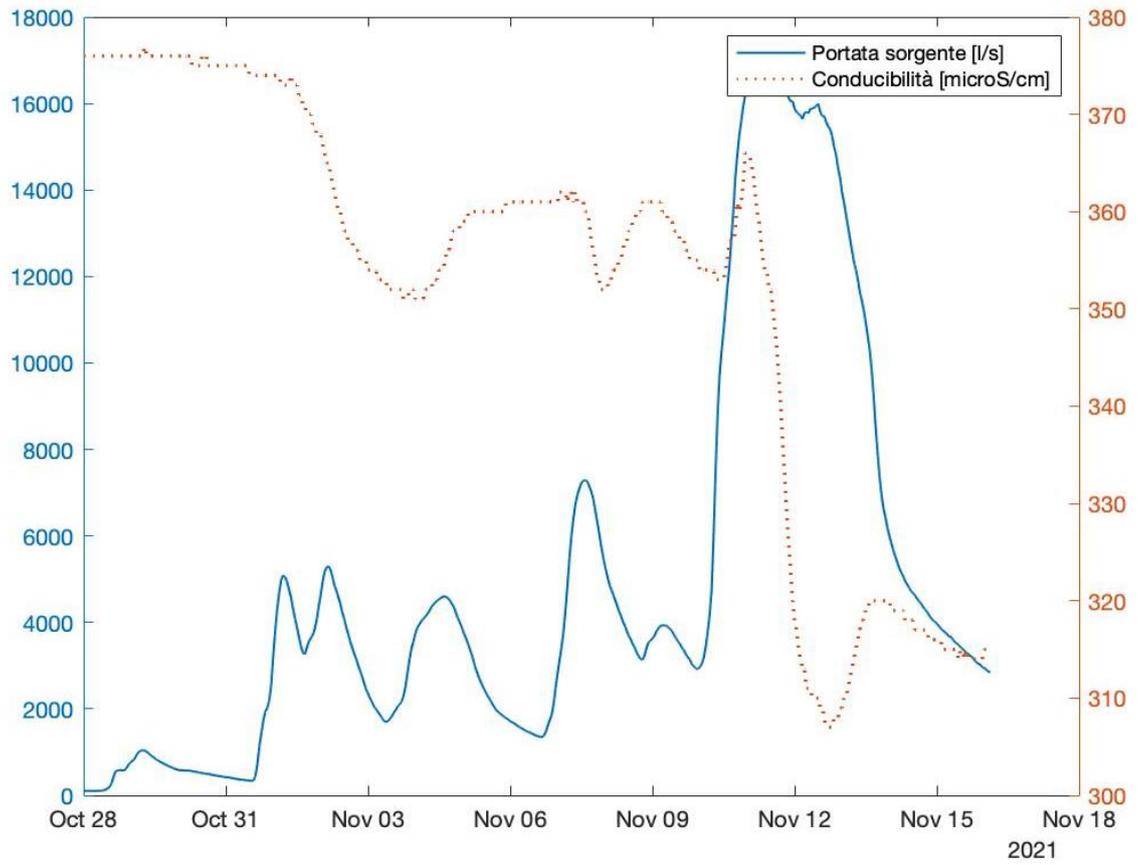


Figura 25: portata e conducibilità elettrica dal 28 ottobre al 16 novembre 2021

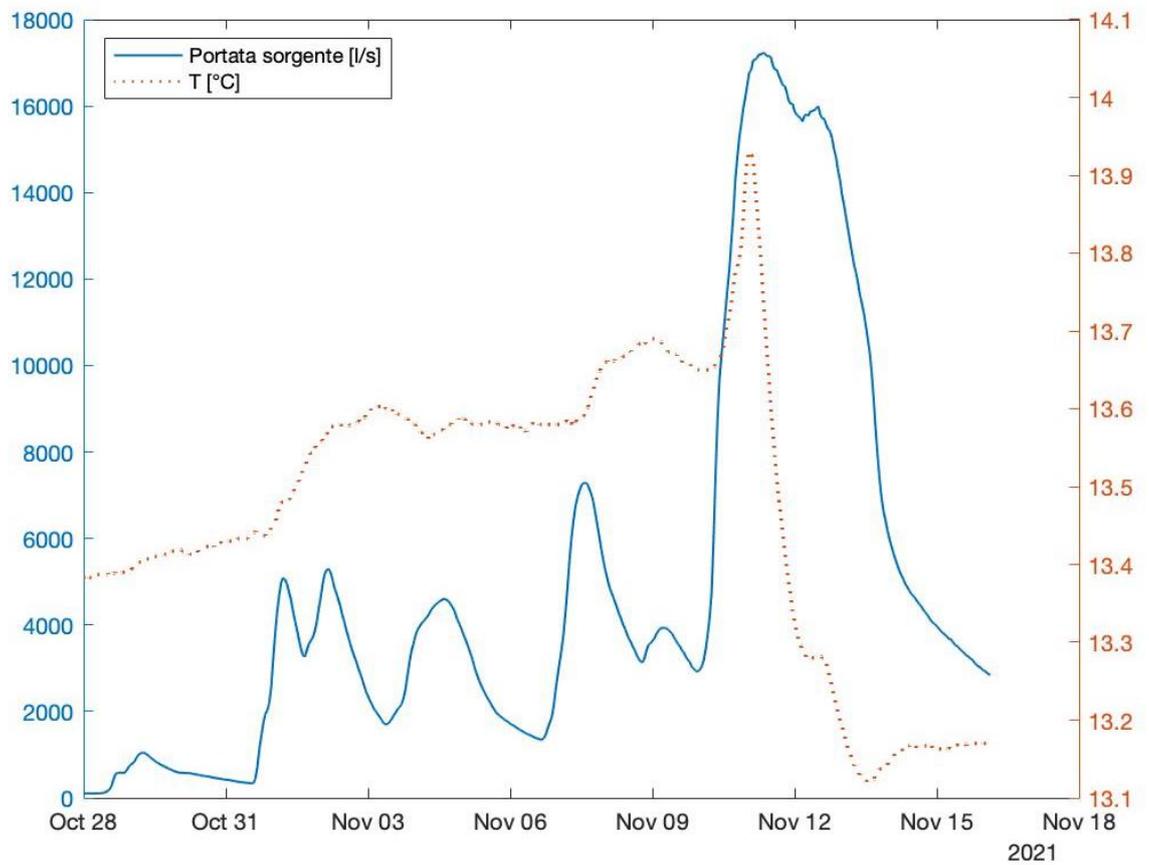


Figura 26: portata e temperatura dell'acqua dal 28 ottobre al 16 novembre 2021



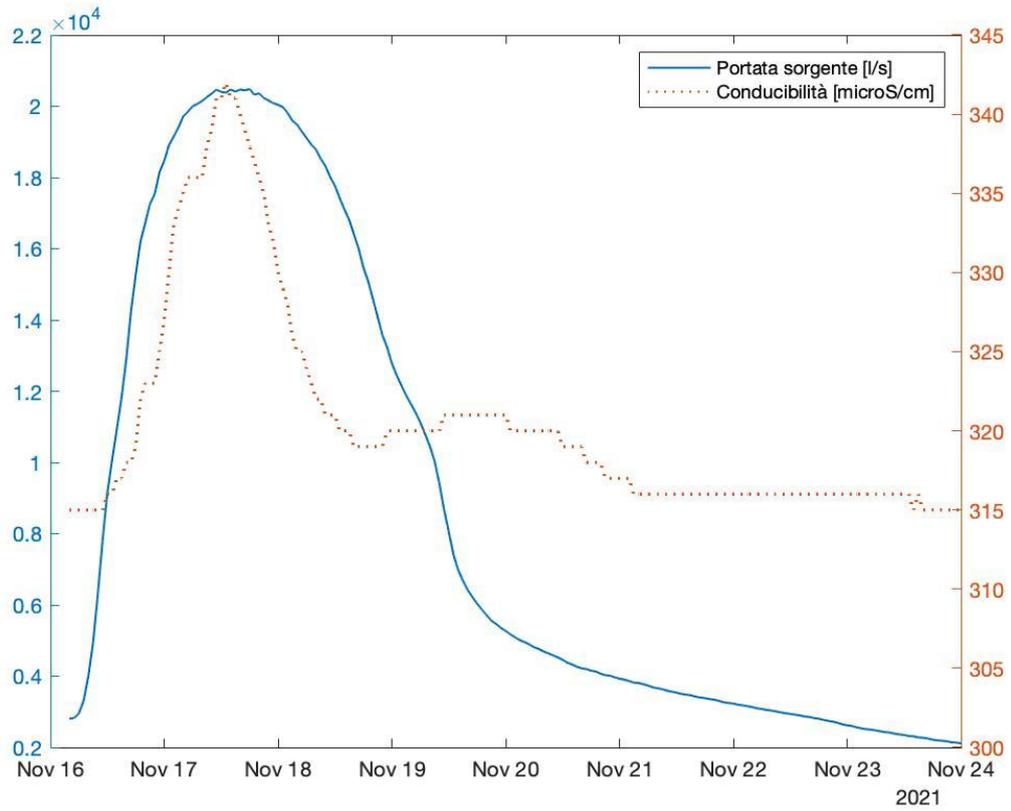


Figura 28: portata e conducibilità elettrica dal 16 al 24 novembre 2021

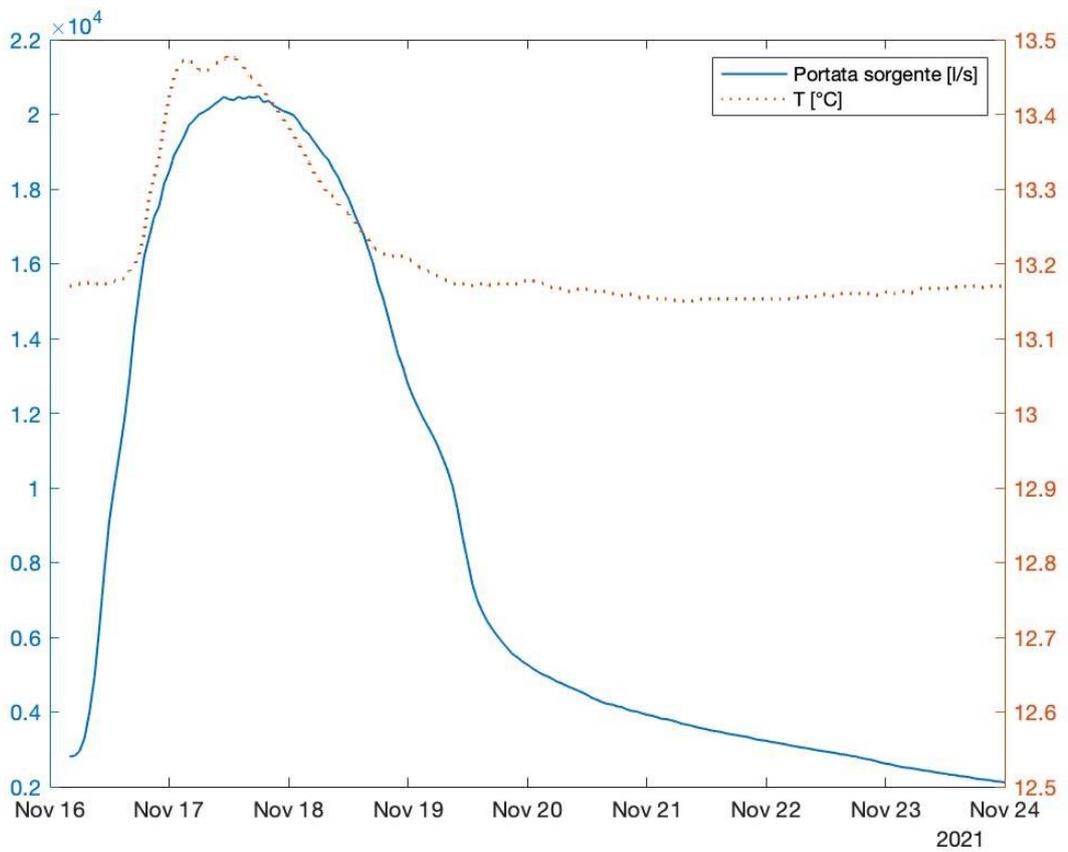


Figura 29: portata e temperatura dell'acqua dal 16 al 24 novembre 2021

- Terzo evento

Il terzo evento è caratterizzato da numerose oscillazioni della portata dovute a continue precipitazioni avvenute tra novembre e dicembre 2021. Rispetto ai casi precedenti, si nota che i valori di portata sono quasi dimezzati, così come per le precipitazioni che, seppur molto frequenti, superano solo di poco i 3,5 mm/h.

Questa volta però è notevole la durata dell'evento, con una curva di esaurimento che si protrae oltre marzo 2022. Durante questo periodo le piogge sono rare e non rilevanti.

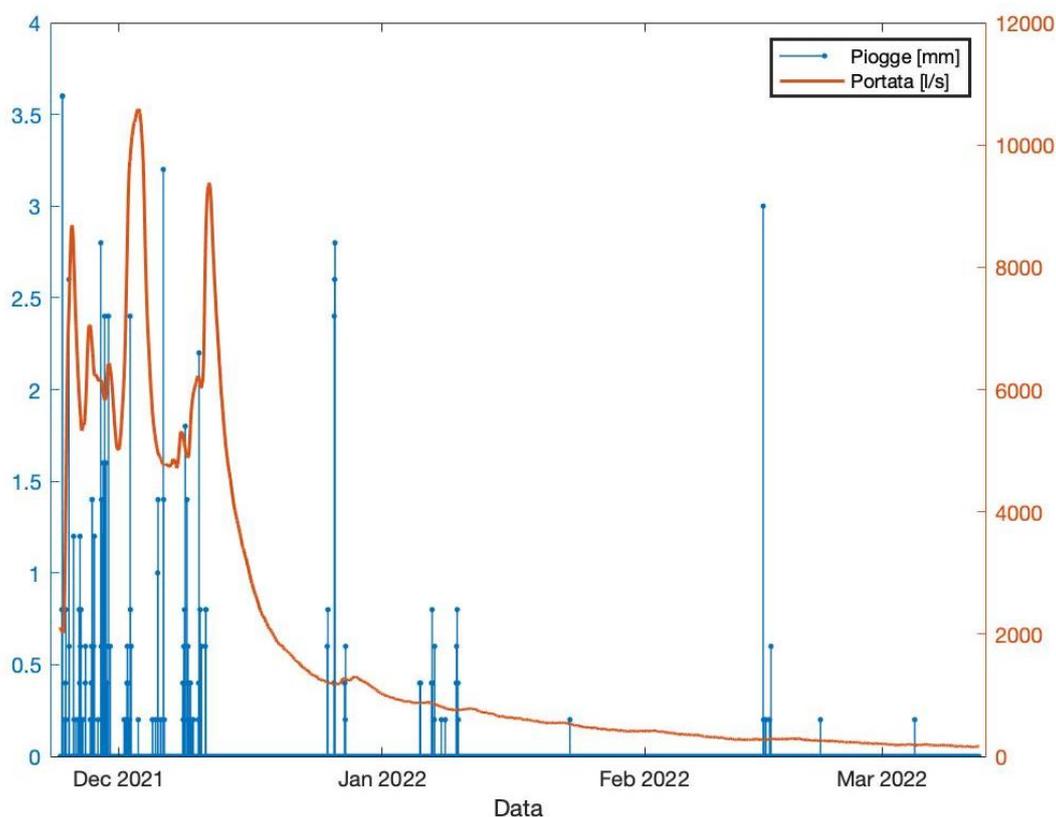


Figura 30: terzo evento di piena dal xx dicembre 2021 al xx marzo 2022

Nella Figura 31 la conducibilità, rispetto alla portata, segue inizialmente una tendenza simile, mentre si contrappone dal 14 dicembre 2021 in poi, ossia quando ha inizio la curva di esaurimento. Si ha inizialmente una parziale miscelazione dell'acqua piovana con quella presente nel bacino sotterraneo. Quando la portata scende sotto i 4000 l/s e la conducibilità aumenta escono le acque che erano già in equilibrio con il sistema.

Dalla Figura 32 si possono fare ragionamenti analoghi. All'inizio la temperatura diminuisce, quindi sono principalmente le acque di neoinfiltrazione, più fredde rispetto a quelle già presenti nel sistema, ad uscire dalla sorgente.

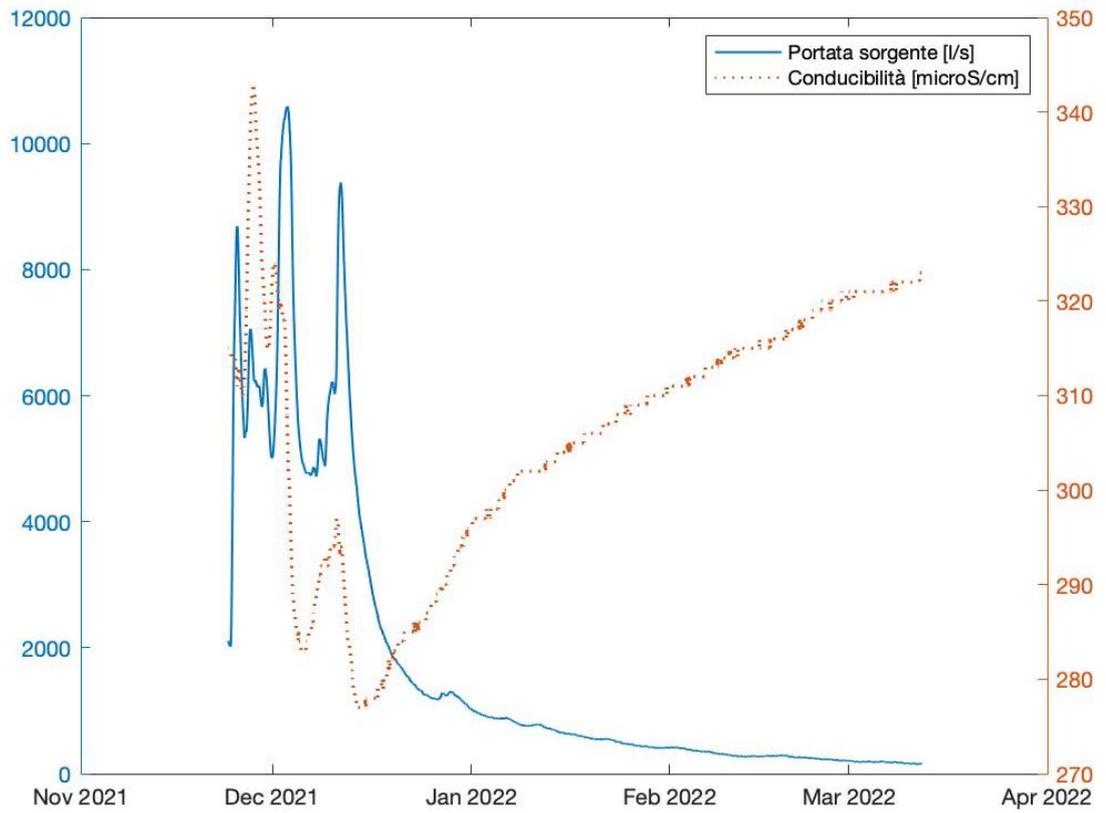


Figura 31: portata e conducibilità elettrica durante il terzo evento di piena

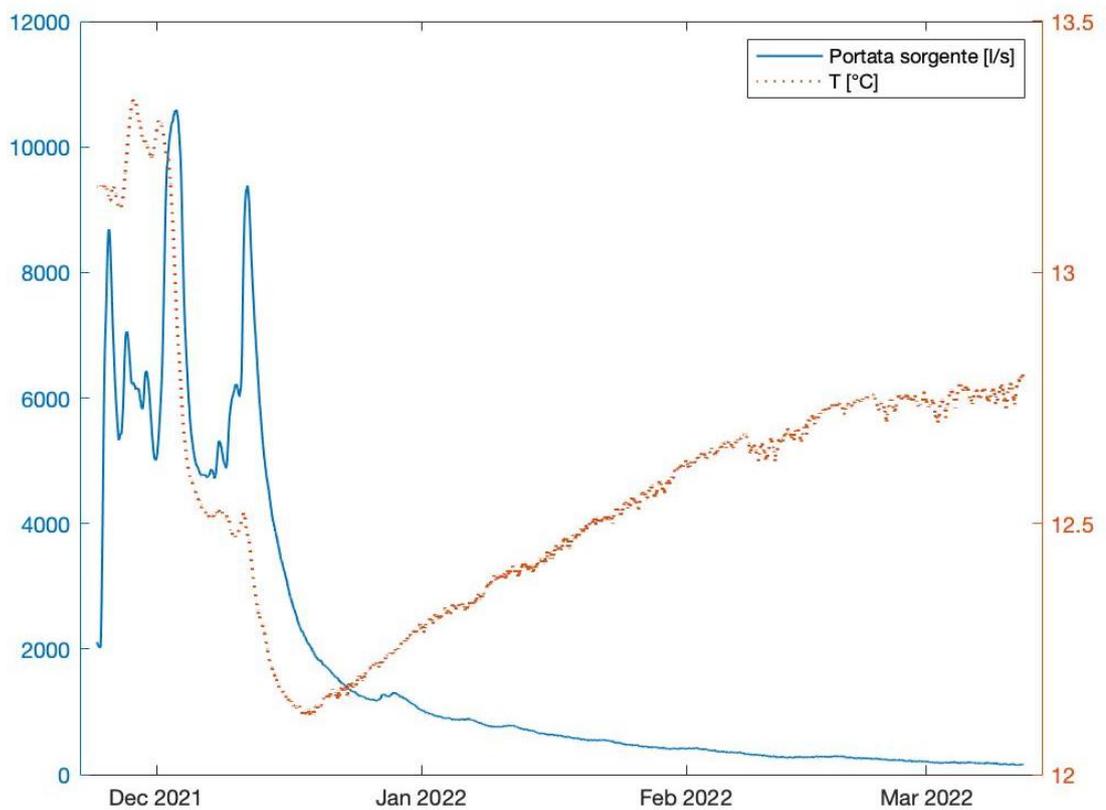


Figura 32: portata e temperatura dell'acqua durante il terzo evento di piena

- *Quarto evento*

Il quarto evento è quello più importante tra quelli visti fino a ora con una portata in uscita che tocca i 21.000 l/s.

Qui le precipitazioni più importanti vengono registrate nel periodo che intercorre tra il 18 e il 20 marzo, superando gli 11 mm/h. Proprio il 20 marzo si raggiunge il picco massimo e immediatamente dopo inizia lo svuotamento della sorgente che si interrompe ad aprile, precisamente il 9, per poi riprendere e proseguire fino a maggio.

Si può evidenziare come le precipitazioni concentrate e intense del 12 e 18 marzo hanno portato a un rapido incremento della portata, seguito da un altrettanto rapido svuotamento legato invece all'assenza di pioggia nei giorni successivi. Questa risposta della sorgente è indice del fatto che la fratturazione dell'acquifero è molto elevata, come ci si aspetta da un sistema carsico. A partire dal 26 marzo, con la ripresa delle precipitazioni, la curva di esaurimento tende a rallentare la decrescita e prosegue poi fino a maggio.

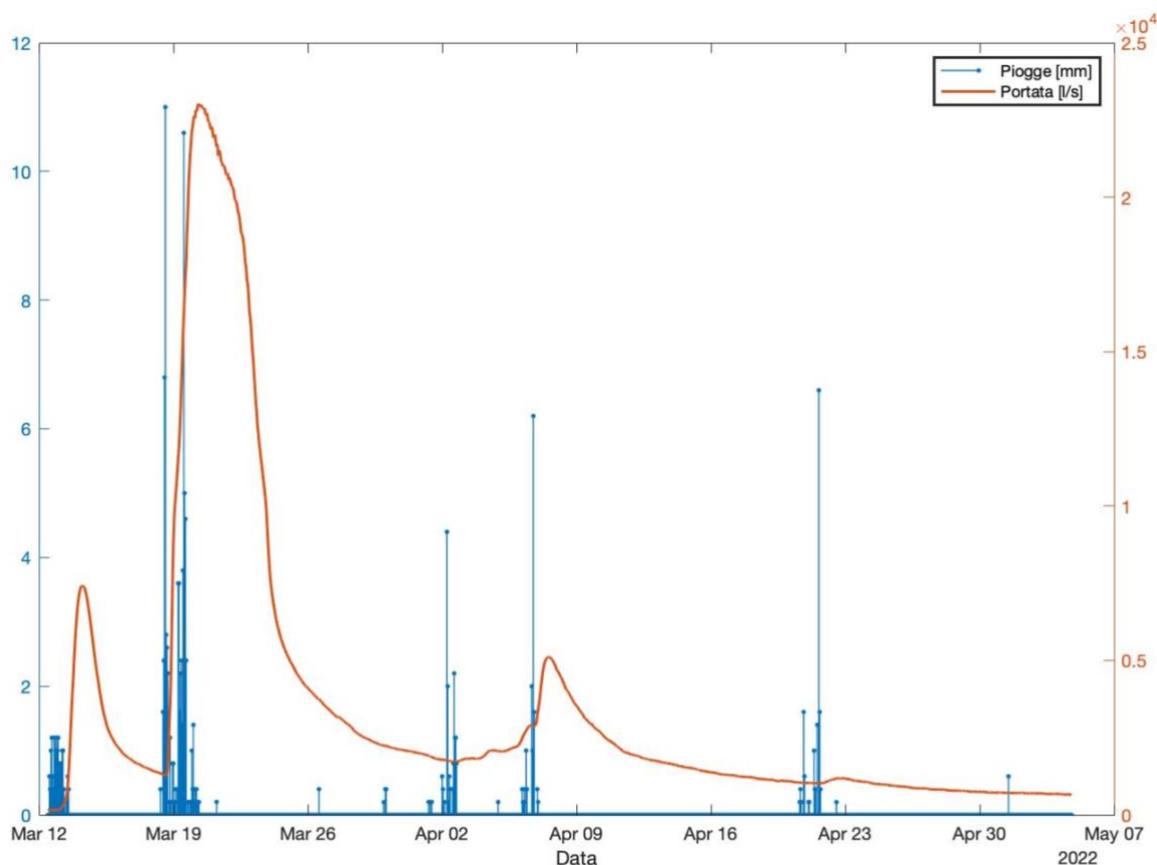


Figura 33: quarto evento di piena dal 12 marzo al 5 maggio 2022

In Figura 34 e 35 i trend delle curve comparate sono praticamente gli stessi, segno che le acque escono dall'acquifero per pistonaggio.

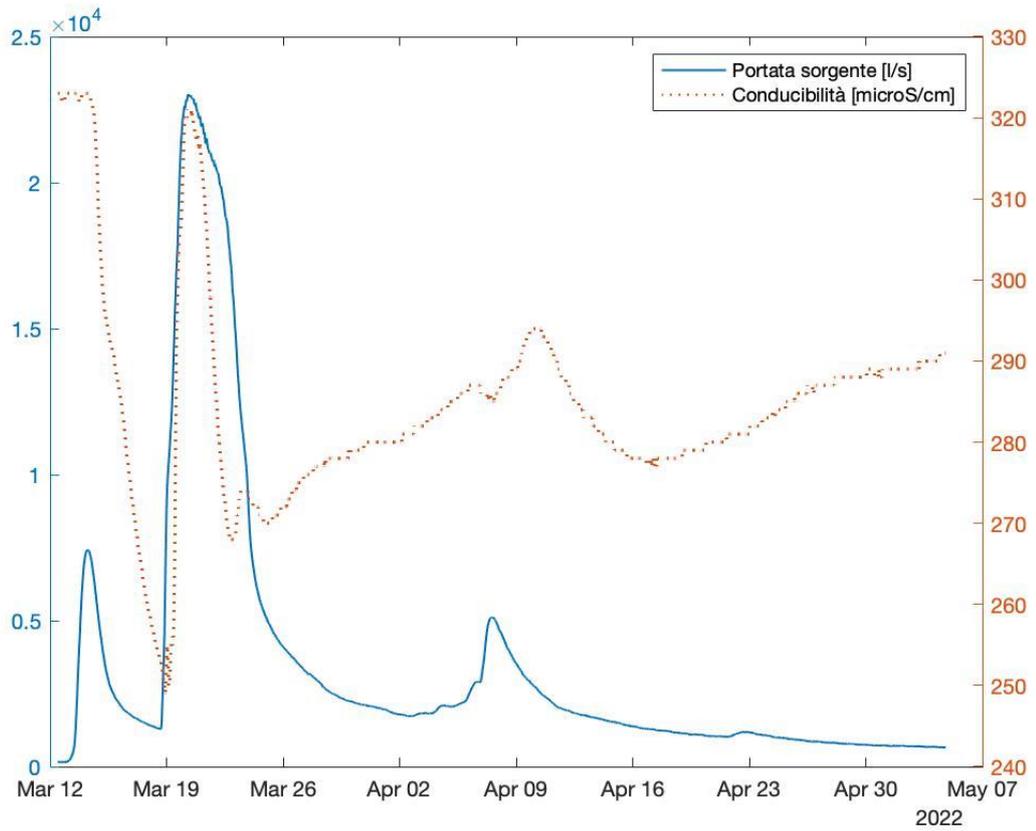


Figura 34: portata e conducibilità dal 12 marzo al 5 maggio 2022

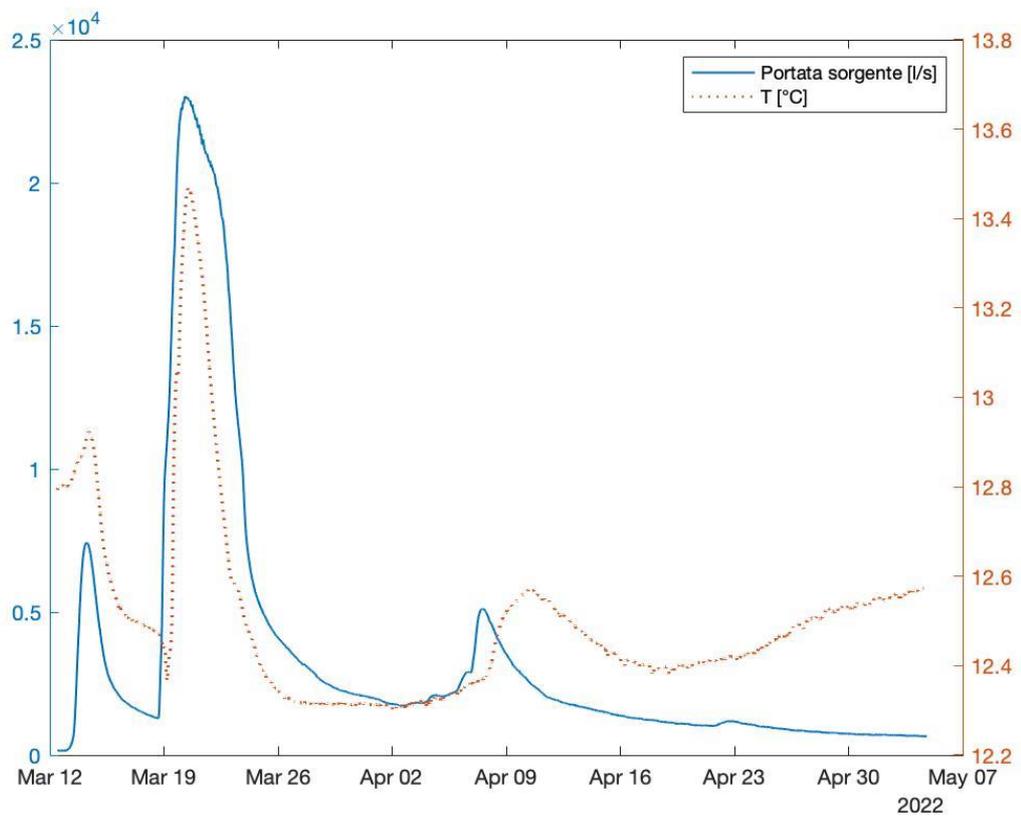


Figura 35: portata e temperatura dell'acqua dal 12 marzo al 5 maggio 2022

- *Quinto evento*

L'ultimo evento di piena del periodo considerato si verifica ai primi di maggio, dove la portata tocca gli 11.000 l/s, mentre le precipitazioni raggiungono il loro massimo sfiorando i 17 mm/h. In questo caso, la curva di esaurimento si protrae per tutto il periodo estivo, con una portata che resta pressoché costante intorno agli 80 l/s. Le precipitazioni sono praticamente nulle a partire dall'8 maggio fino a settembre.

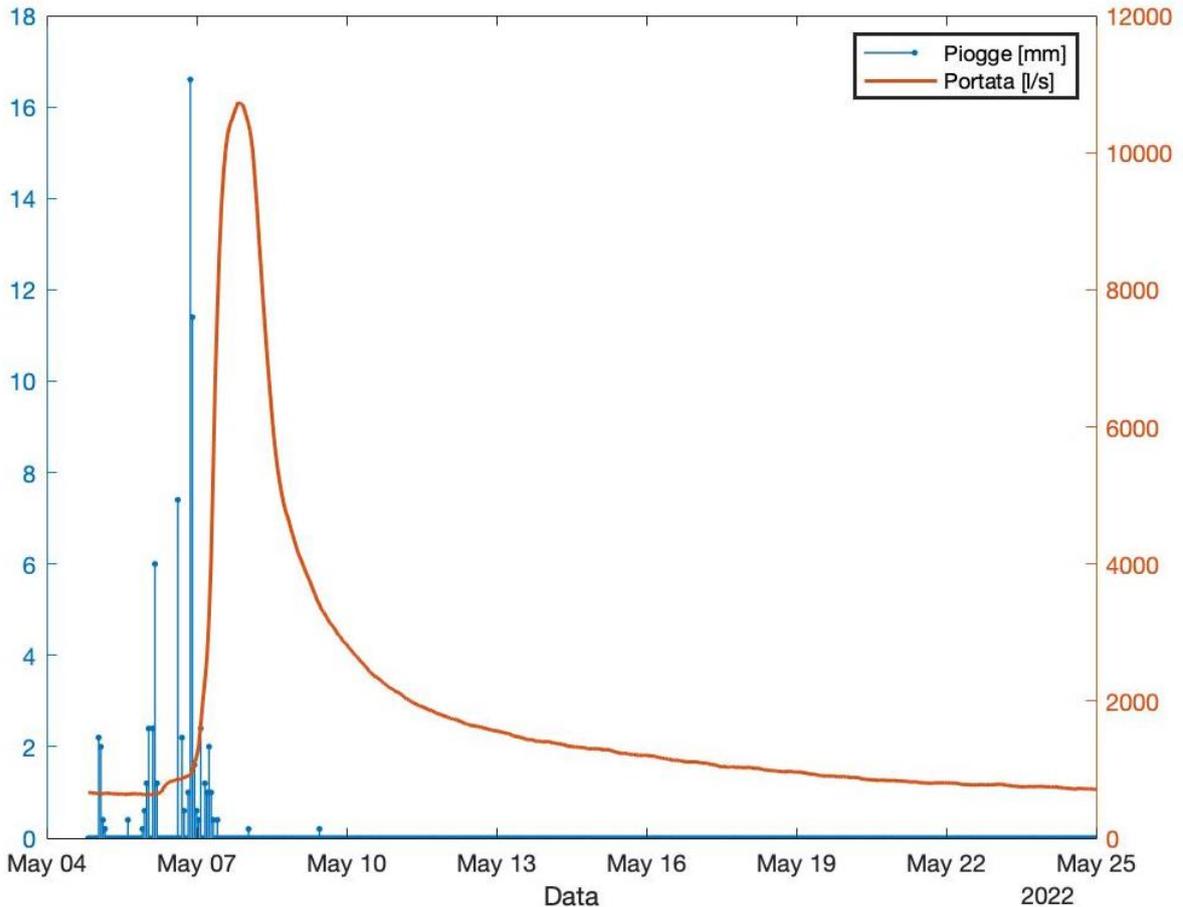


Figura 36: quinto evento di piena dal 5 al 25 maggio 2022

Così come è rapido l'incremento della portata con l'arrivo delle piogge, all'inizio è altrettanto rapido il suo svuotamento. Successivamente tende a rallentare e l'esaurimento prosegue più lentamente nelle settimane successive.

Le Figure 37 e 38 mostrano conducibilità elettrica e temperatura a confronto con la portata. In questo caso l'aumento dei due traccianti è successivo all'aumento della portata. Questo è giustificato dal fatto che ad un iniziale miscelazione parziale delle acque di neoinfiltrazione con quelle già presenti nell'acquifero, segue un pistonaggio che porta quindi all'uscita delle acque della riserva regolatrice.

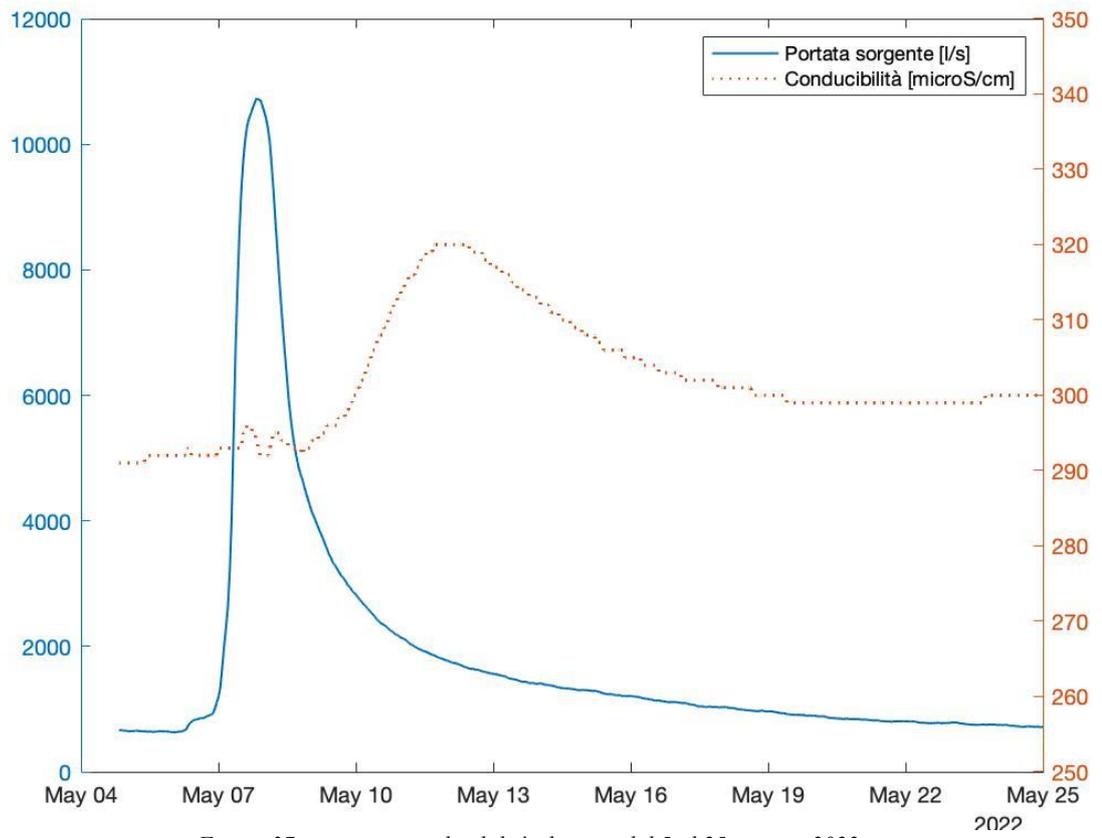


Figura 37: portata e conducibilità elettrica dal 5 al 25 maggio 2022

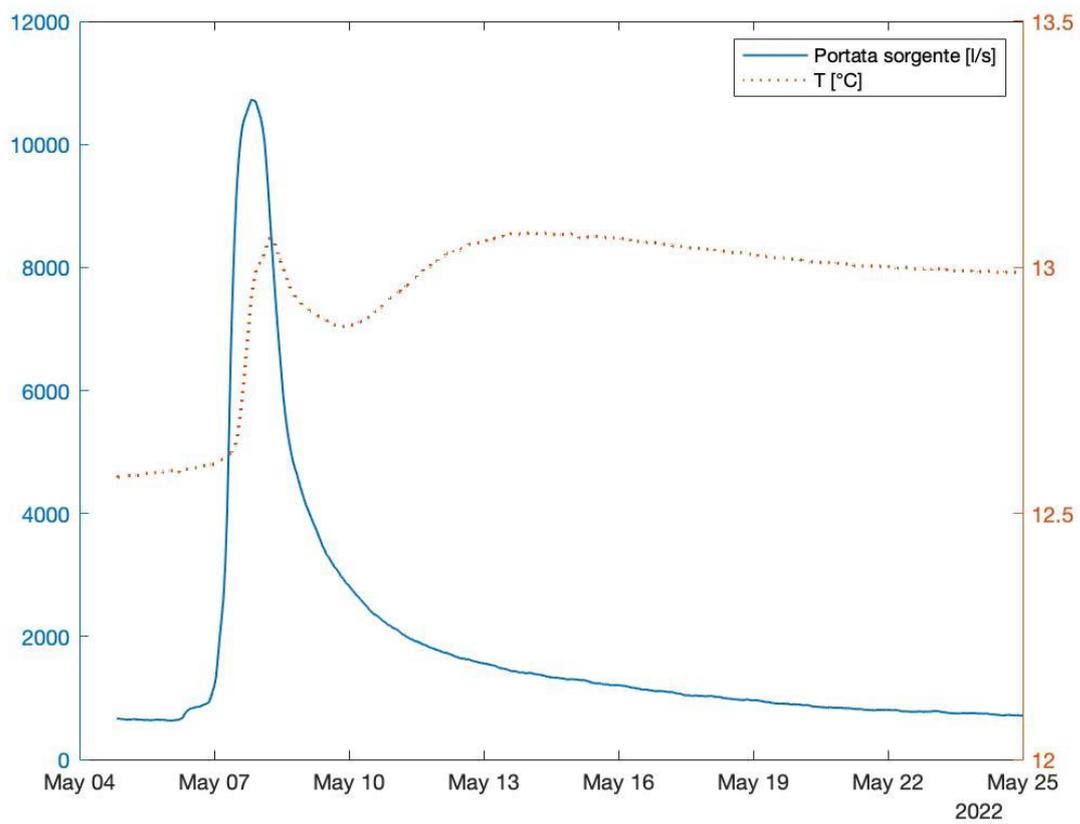


Figura 38: portata e temperatura dell'acqua dal 5 al 25 maggio 2022

## 7 Curve di esaurimento

Si studiano ora le curve di svuotamento che si possono vedere nell'idrogramma in Figura 39. Per farlo si utilizzano due metodi. Il primo di Boussinesq, basato su un modello iperbolico e l'altro di Mangin, che combina un modello iperbolico con uno rettilineo. Si sceglie quello che approssima meglio le curve e che si può utilizzare per fare previsioni sull'andamento della piena anche per i dati che non si hanno a disposizione.

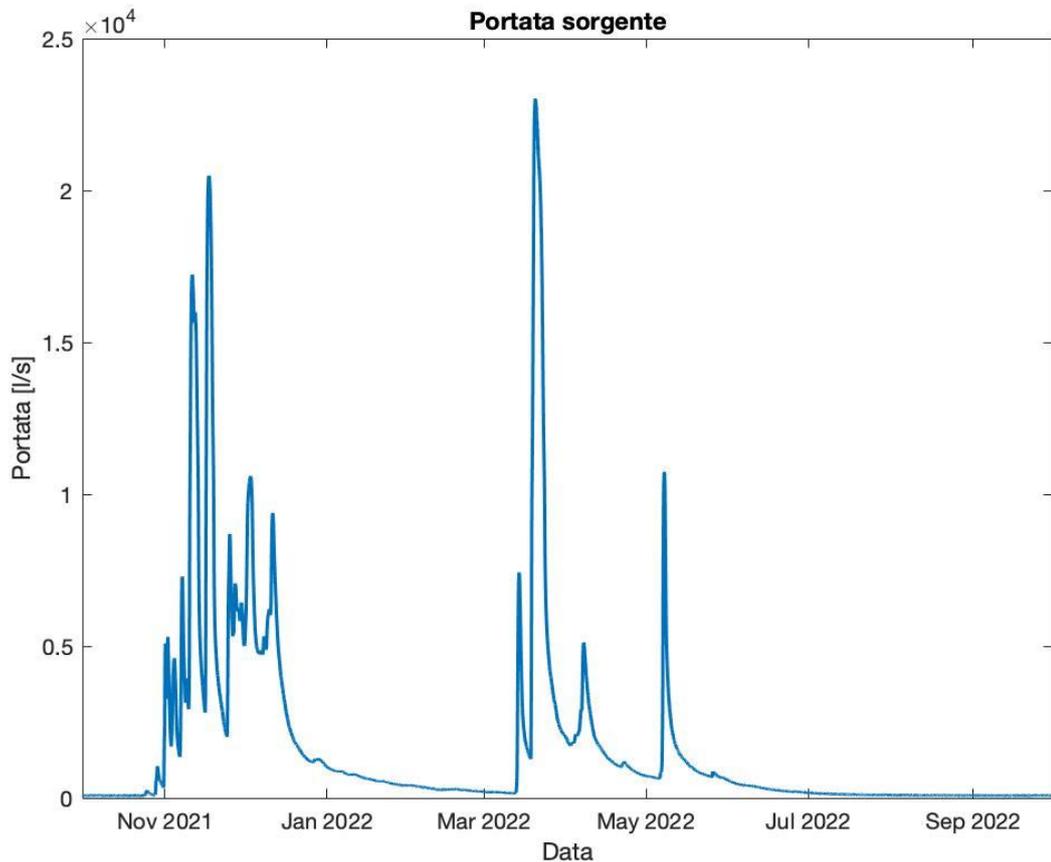


Figura 39: idrogramma dal 1° ottobre 2021 al 30 settembre 2022

La prima curva parte a dicembre 2021 e prosegue fino a metà marzo 2022. La seconda invece ha inizio a metà maggio 2022 e prosegue oltre fine settembre 2022.

### 7.1 Boussinesq

Il primo metodo utilizzato è quello di Boussinesq e l'equazione è la seguente:

$$Q_t = \frac{Q_0}{[1 + \alpha t]^n} \quad (1)$$

In cui:

- $Q_t$  = portata al tempo  $t$  [ $m^3/s$ ]
- $Q_0$  = portata all'inizio del periodo di esaurimento [ $m^3/s$ ]
- $t$  = tempo [d] (giorni)
- $\alpha$  = coefficiente di esaurimento [ $d^{-1}$ ]

Il coefficiente  $\alpha$  dipende dalla trasmissività dell'acquifero e dalla ritenzione specifica. Tale valore si ricava dai valori di portata e tempo imponendo la seguente uguaglianza:

$$\frac{\log\left(\frac{Q_0}{Q_1}\right)}{\log\left(\frac{Q_0}{Q_2}\right)} = \frac{\log(1 + \alpha t_1)}{\log(1 + \alpha t_2)} \quad (2)$$

Dove:

- $Q_1$  = portata al tempo  $t_1$  [ $m^3/s$ ]
- $Q_2$  = portata alla fine dello svuotamento [ $m^3/s$ ]
- $t_2$  = tempo di fine svuotamento [d]

Dal coefficiente di esaurimento si calcola il valore dell'esponente  $n$ , utilizzando una delle due formule seguenti:

$$n = \frac{\log\left(\frac{Q_0}{Q_1}\right)}{\log(1 + \alpha t_1)} \quad (3)$$

$$n = \frac{\log\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)}{\log\left(\frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2}\right)} \quad (4)$$

Si considera un solo dato giornaliero di portata, che questo caso è il valore misurato alle ore 12.00. Le prime tre misurazioni vengono scartate. Nella Tabella2 vengono riportati i valori di  $\alpha$  e  $n$  ottenuti per le due curve e i grafici ottenuti dall'interpolazione effettuata.

Tabella 2: valori di  $\alpha$  e  $n$  per le due curve di esaurimento

	$\alpha$	$n$
1° curva	0.0923	1.3313
2° curva	0.1482	1.0848

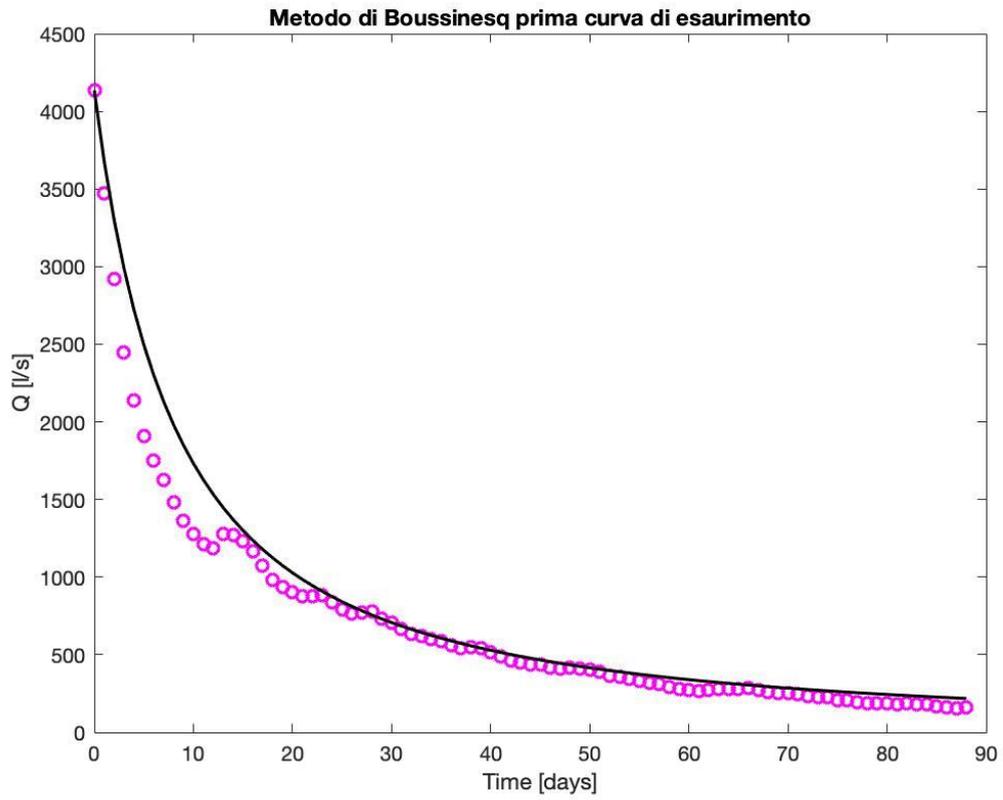


Figura 40: prima curva di svuotamento con metodo Boussinesq

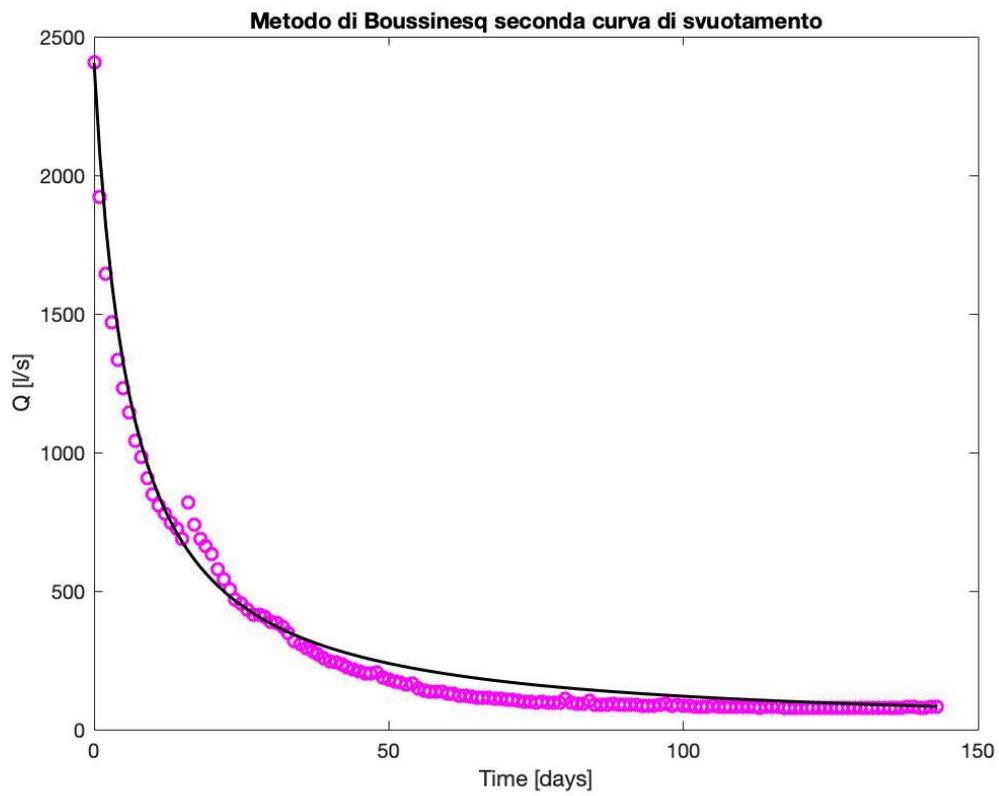


Figura 41: seconda curva di svuotamento con metodo Boussinesq

Dall'equazione della curva di esaurimento è possibile calcolare il volume di acqua immagazzinata nell'acquifero al di sopra della quota della sorgente. Questo volume, calcolabile in ogni istante successivo all'inizio dello svuotamento, si ricava dall'equazione:

$$V_t = \frac{Q_0}{\alpha(n-1)} \left[ 1 - \frac{1}{(1+\alpha t)^{n-1}} \right] \cdot 86400 \quad (5)$$

La moltiplicazione per 86400 è fatta per convertire i dati di tempo da giornalieri in secondi.

## 7.2 Mangin

Il secondo metodo, che è quello più corretto, è chiamato Metodo di Mangin e prevede la divisione della curva di esaurimento in due parti: la prima approssimata da un'equazione esponenziale, anche conosciuta come Equazione di Maillet, mentre la seconda da una retta. La formula è la seguente [11]:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} + q_0 \frac{(1 + \eta' t)}{1 + \varepsilon t} \quad (6)$$

In cui:

- $q_0$  corrisponde alla differenza tra  $Q_0$  e la portata  $Q_{R0}$  trovata dall'intersezione dell'asse y con la retta  $Q = Q_{R0} e^{-\alpha t}$
- $\eta' = 1/t_i$
- $\varepsilon$  è il *coefficiente di eterogeneità*

Il coefficiente di eterogeneità caratterizza l'importanza della concavità della curva di esaurimento. Un valore elevato corrisponde a uno svuotamento rapido all'inizio che però tende ad assestarsi velocemente. L'equazione di tale coefficiente è:

$$\varepsilon = \frac{q_0 - q^*}{q^* t} - \frac{\eta' q_0}{q^*} \quad (7)$$

Dove  $q^*$  è l'equazione che approssima la prima parte della curva, come mostrato nella Figura 42.

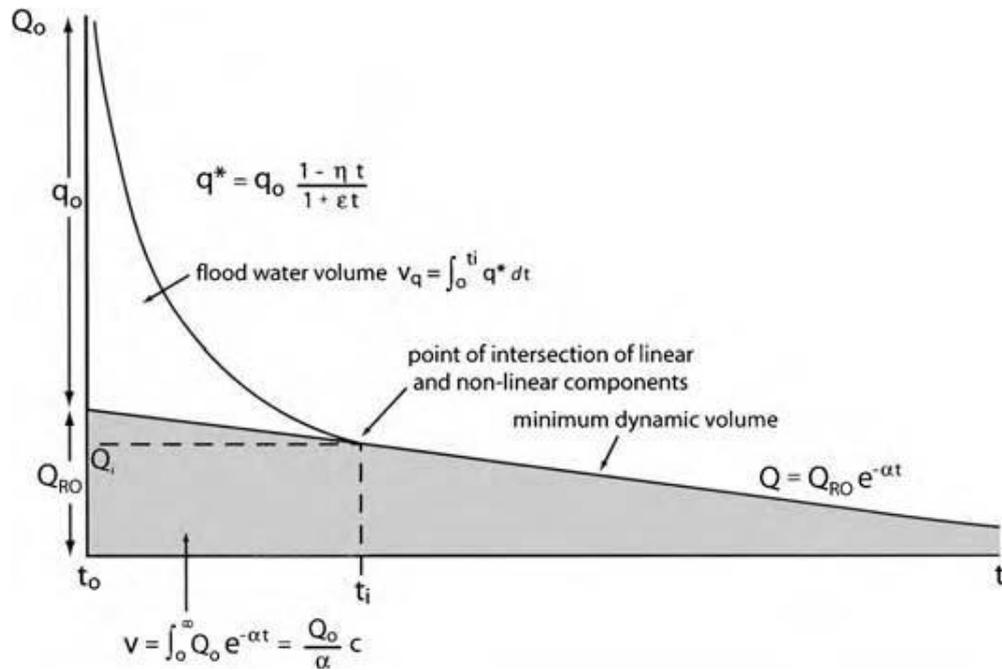


Figura 42: Analisi curva di esaurimento secondo Mangin

Per calcolare  $\varepsilon$  si è partiti dalla formula del tempo di dimezzamento della portata:

$$t_{0.5} = \frac{1}{\varepsilon + 2\eta'} \quad (8)$$

E quindi:

$$\varepsilon = \frac{1}{t_{0.5}} - 2\eta' \quad (9)$$

Il valore del coefficiente  $\alpha$  si calcola analogamente al caso di Boussinesq, secondo l'Equazione (2). Anche per questo metodo si considera il dato di portata misurato alle 12.00 di ogni giorno, ma questa volta viene scartato solo il primo valore perché dovuto ai moti turbolenti.

Nella Tabella3 sono mostrati i valori ottenuti per i diversi coefficienti.

Tabella 3: valori ottenuti per le due curve di esaurimento.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$\eta'$
<b>1° curva</b>	0.025	0.454	0.011
<b>2° curva</b>	0.014	0.812	0.07

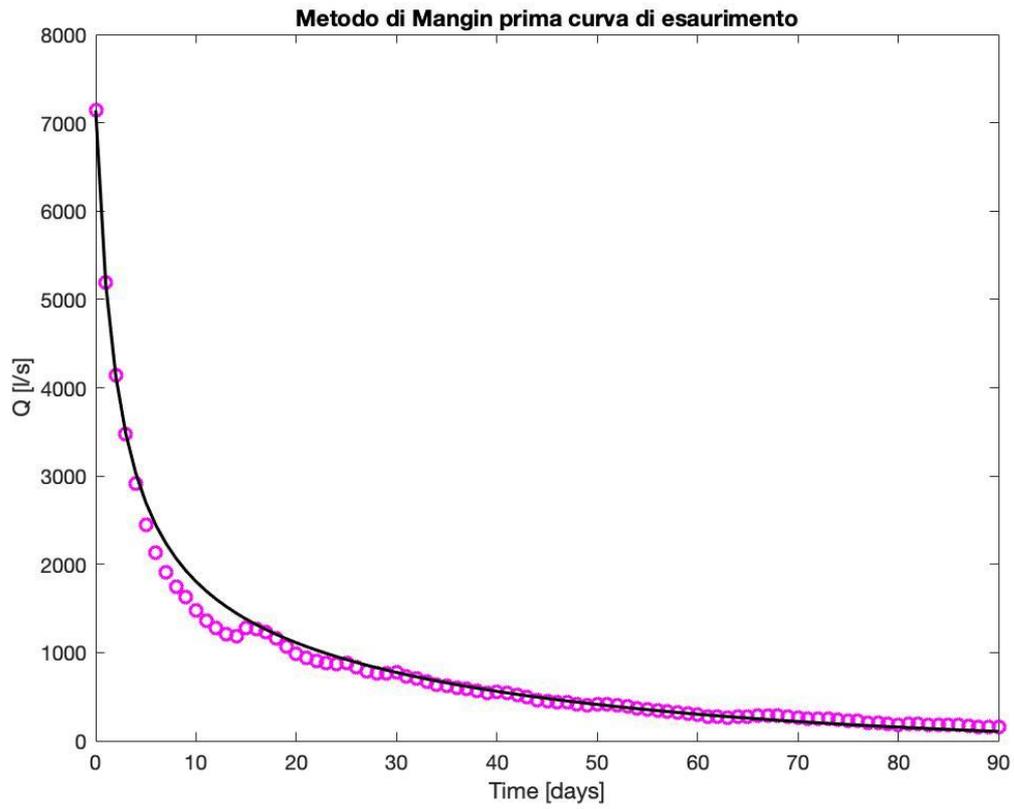


Figura 43: prima curva di svuotamento con metodo Mangin

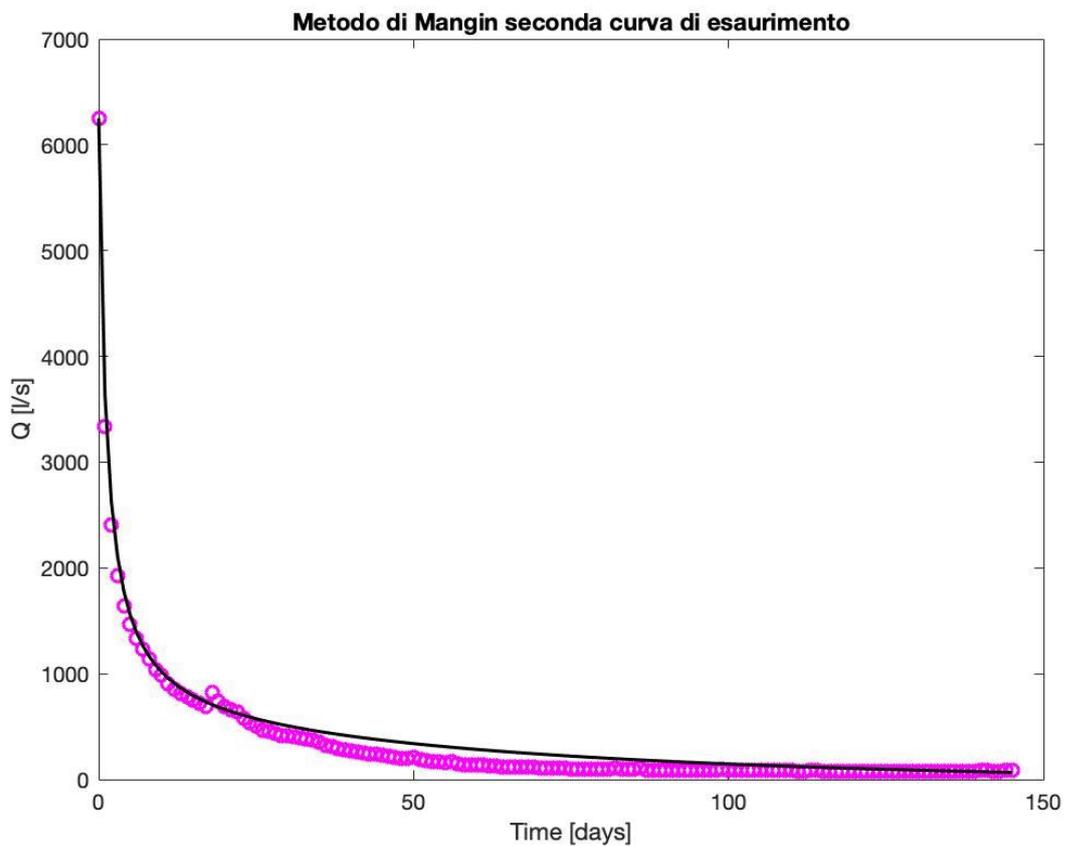


Figura 44: seconda curva di svuotamento con metodo Mangin

Anche in questo caso è possibile calcolare il volume d'acqua attraverso la formula:

$$V = \int_0^{\infty} Q_0 e^{-\alpha t} = \frac{Q_0}{\alpha} \cdot 86400 \quad (10)$$

Per le due curve si ottengono rispettivamente:  $2.4 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$  e  $3.9 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ .

Dall'equazione ottenuta con quest'ultimo metodo di interpolazione possiamo effettuare una previsione e valutare come si svuoteranno piene future, in particolare in quanto tempo queste verranno dissipate.

## 8 Idrogeochimica

In questo capitolo si va a studiare la natura chimica dell'acqua.

Come detto prima, l'acqua piovana entrando in contatto con la roccia, tende a mineralizzarsi. Lo studio di questi minerali ci aiuta a capire la natura dell'acquifero e a ripercorrere il tragitto dell'acqua.

Negli acquiferi carsici la reazione chimica che avviene tra rocce carbonatiche e acque è la seguente:



Si ottiene così una produzione di ioni di calcio e bicarbonato che si ritrovano infatti nelle acque del Supramonte.

Durante gli anni sono state effettuate misurazioni in situ e sono stati analizzati campioni relativi a diversi punti del bacino idrografico.

Una volta ottenuti i risultati dell'analisi chimica, è stata prima valutata la loro accettabilità e successivamente, è stato creato il diagramma di Schoeller per ciascun campione. In tale diagramma semilogaritmico vengono riportate le quantità di ioni di calcio, magnesio, alcalini (somma di ioni di sodio e potassio), cloruri, solfati, bicarbonati (ioni carbonato e bicarbonato) e i nitrati, anche se per la loro modesta quantità questi ultimi non vengono sempre inseriti.

I siti considerati in questo studio sono: la sorgente di Su Gologone (SG), la venuta minore di Sa Vena (SV), la grotta di Mussin Tomasu (MT), l'emergenza di Su Tipari e il Riu Sa Oche (RO).

In Tabella4 vengono riportati i valori di Durezza Totale (TH) e Solidi Totali Disciolti (TDS) per i vari campioni,

Tabella 4: valori di TH e TDS dei campioni

Campione	Data	TH [°f]	TDS [mg/l]
SG-a	24/06/2015	15.93	7.832
SV-a	24/06/2015	15.78	8.436
SG-b	15/11/2015	17.33	6.918
MT-d	5/01/2018	19.03	9.420
SG-d	5/01/2018	15.72	8.096
VM-d	5/01/2018	15.88	7.657
MT1	19/08/2022	19.12	9.697
RO	19/08/2022	19.88	13.398
SG	19/08/2022	17.88	7.110
ST	19/08/2022	20.32	7.195
SV	19/08/2022	19.16	6.713

Dai dati in tabella si vede l'affinità tra i campioni che presentano valori simili, dello stesso ordine di grandezza. La durezza totale, legata alla presenza di ioni di calcio e magnesio, indica le acque analizzate come acque a durezza discreta (12-18 °f) e acque dure (18-30 °f).

Nella Figura 45 è riportato il diagramma logaritmico di Schoeller per i campionamenti eseguiti in quattro date: 24 giugno 2015 (-a), 15 novembre 2015 (-b), 24 novembre 2017 (-c) e 5 gennaio 2018 (-d).

Nella Figura 36, invece i dati sono relativi all'ultimo campionamento eseguito il 19 agosto 2022.

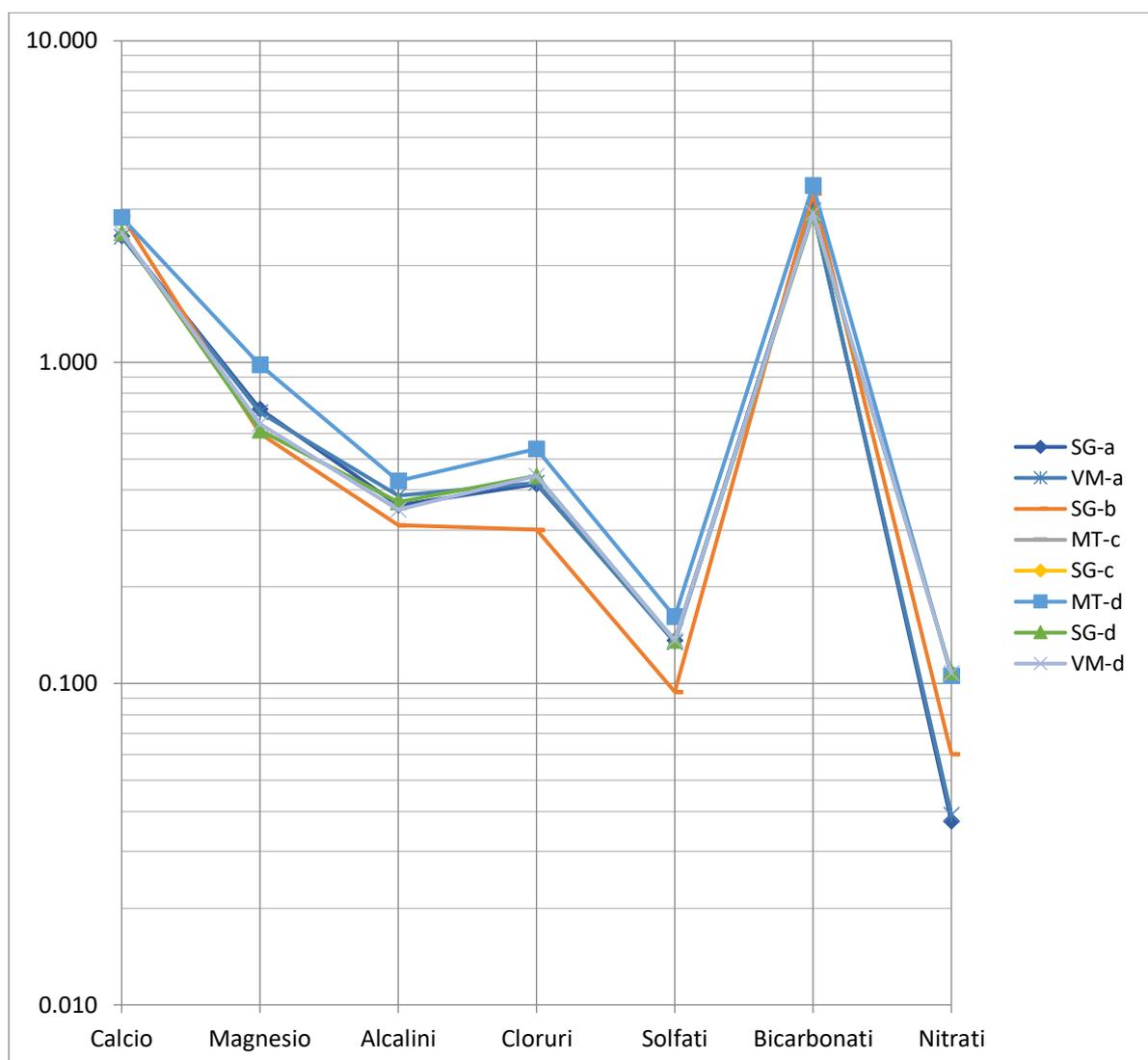


Figura 45: diagramma di Schoeller dei campioni relativi al 2015, 2017 e 2018

I valori ottenuti sono praticamente identici per tutti i campioni, con una facies primaria che è, come atteso, bicarbonato calcico. Il campione prelevato a Su Gologone il 15 novembre 2015 risulta essere leggermente meno mineralizzato, con valori di alcalini, cloruri e solfati inferiori rispetto agli altri siti. I valori di nitrati sono praticamente trascurabili, così come molto bassi risultano essere anche quelli dei solfati.

L'andamento analogo che seguono i diversi segmenti è indice della stretta correlazione tra le acque prelevate, prelevate in diversi siti ma evidentemente provenienti dallo stesso acquifero.

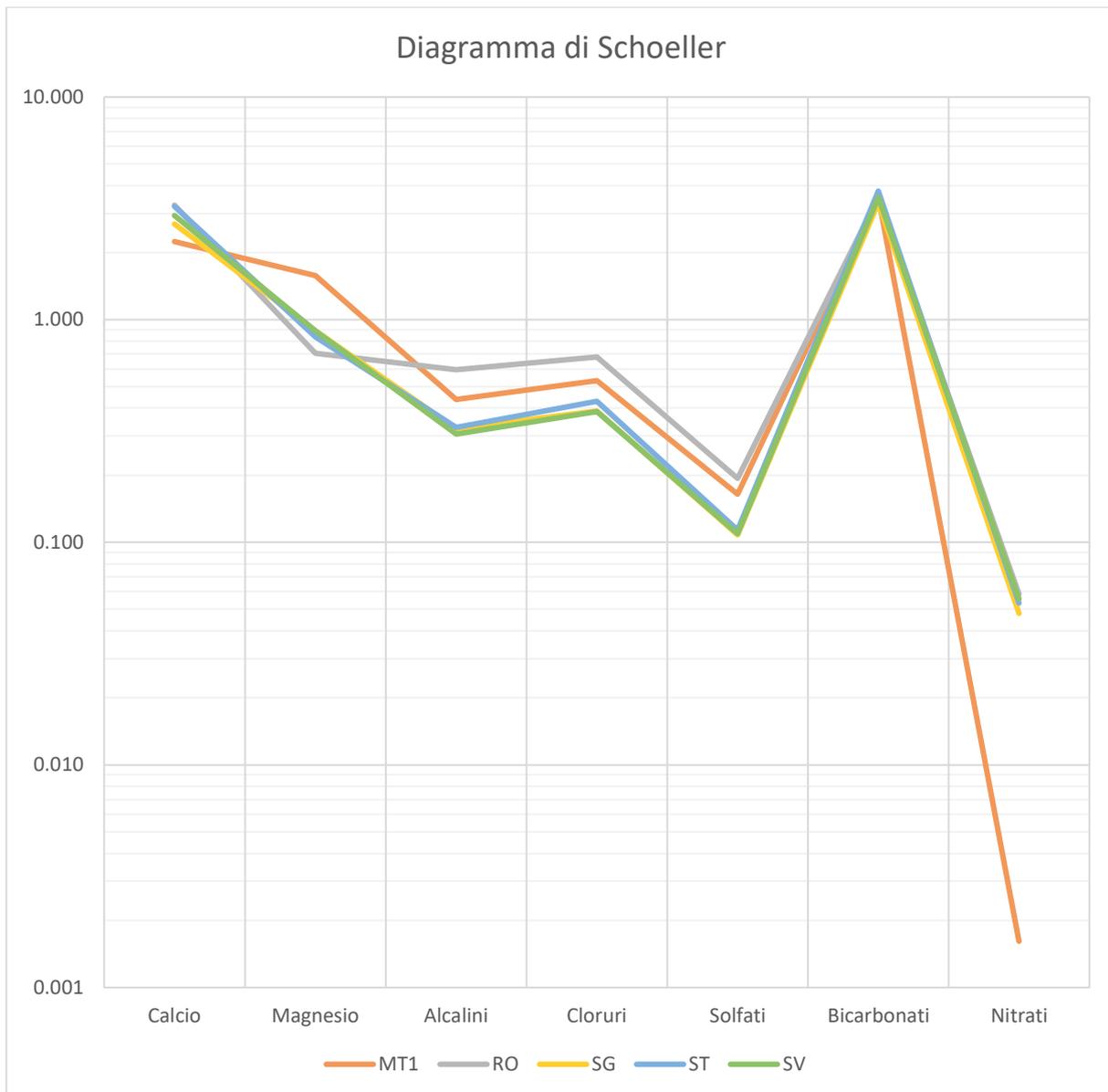
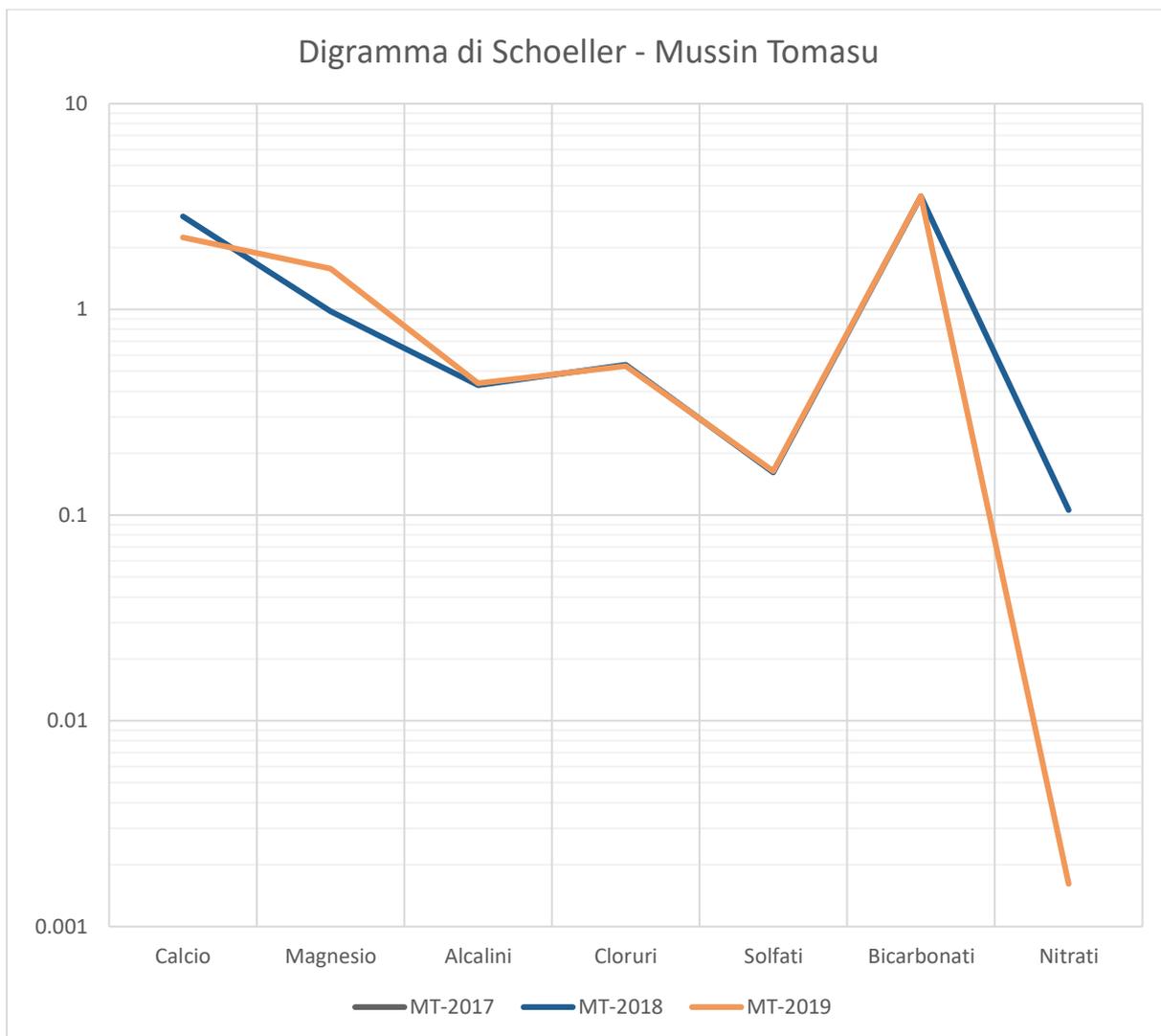


Figura 46: diagramma di Schoeller relativo ai campionamenti del 19 agosto 2022

La facies primaria è ovviamente sempre bicarbonato calcica e i valori sono in linea con quelli dei precedenti risultati, eccetto che per le acque prelevate dalla grotta di Mussin Tomasu. Le acque del Riu Sa Oche risultano essere più ricche di ioni alcalini, cloruri e solfati, ma più povere di magnesio rispetto agli altri campioni. I valori di nitrati sono trascurabili per tutti i siti, per Mussin Tomasu sono praticamente nulli.

Per la sorgente di Su Gologone, Sa Vena e Su Tipari i valori di solfati sono piuttosto bassi, più alti invece per il Riu Sa Oche e Mussin Tomasu.

In Figura 46 sono messi a confronto i risultati ottenuti per le acque prelevate nella grotta nel 2017, 2018 e 2022.



*Figura 47: diagramma di Schoeller campioni Mussin Tomasu 2017, 2018 e 2022*

Dalla figura si nota come i campioni relativi al 2017 e 2018 sono praticamente sovrapposti con valori identici. In confronto al 2022, invece, è evidente un incremento degli ioni di magnesio, una leggera diminuzione degli ioni di calcio e una drastica diminuzione dei nitrati. Questo è il caso analizzato in cui i valori degli ioni di magnesio si avvicinano di più a quelli del calcio.

In Figura 48 si confrontano invece i vari campioni relativi alla sorgente principale di Su Gologone.

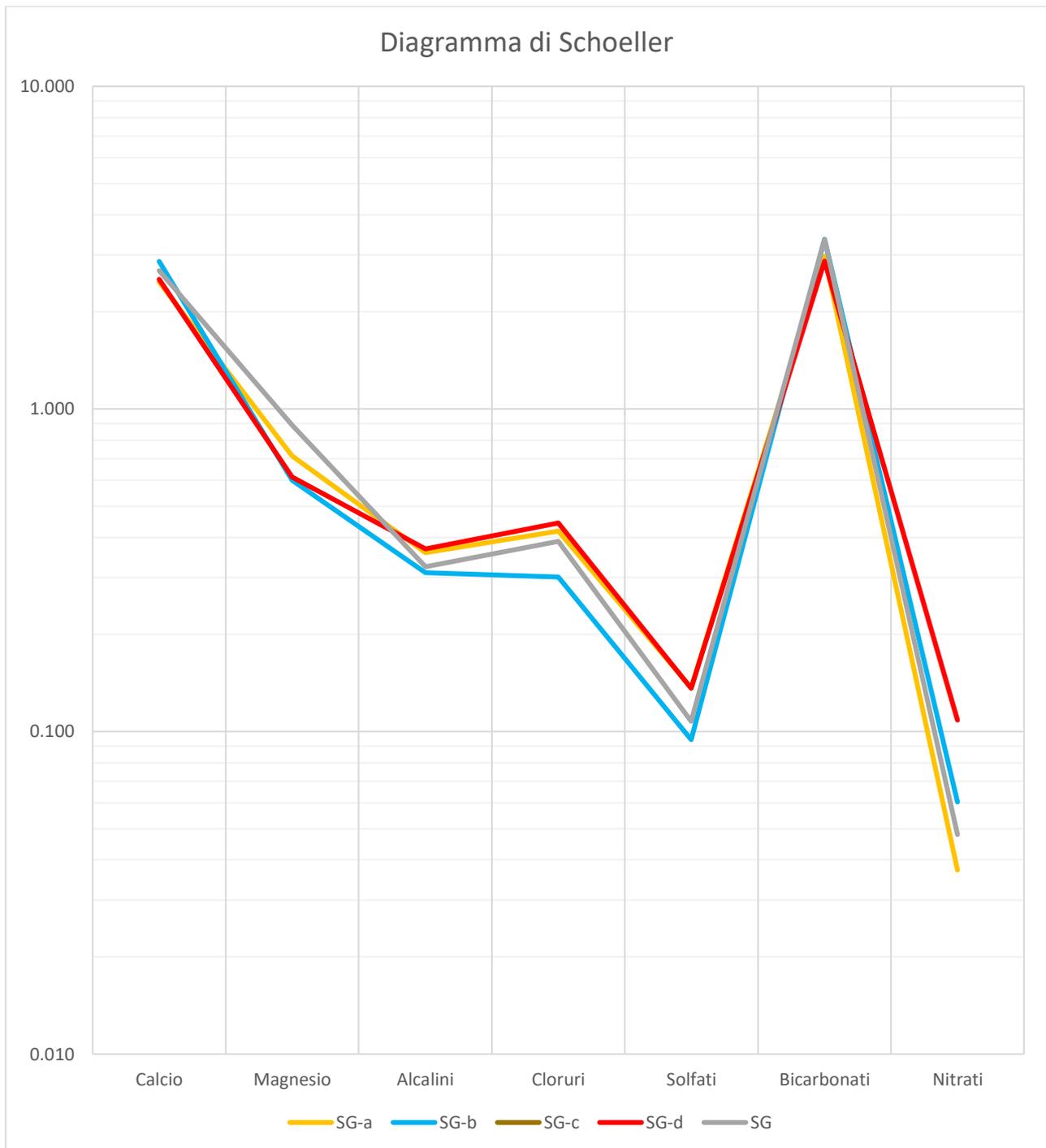


Figura 48: diagramma di Schoeller relativo ai 5 campioni di Su Gologone

In questo caso i valori restano piuttosto invariati. Gli ultimi campioni prelevati presentano dati leggermente più alti per gli ioni di magnesio, ma in linea con gli altri. Il campione del 15 novembre 2015 è quello che riporta i valori più bassi di magnesio, alcalini, cloruri e solfati. La mineralizzazione delle acque in uscita dalla sorgente resta comunque pressoché costante durante gli anni.

Oltre ai minerali, durante i campionamenti sono stati registrati, in situ, i valori di conducibilità, temperatura dell'acqua, pH e concentrazione di ossigeno disciolto. In Tabella5 vengono riportati i valori misurati il 19 agosto 2022.

Tabella 5: valori misurati alla sorgente.

	T [°C]	pH	CE [ $\mu$ S/cm]	O <sub>2</sub> [mg/l]
<b>Su Gologone</b>	13.4	7.8	360	10.21
<b>Sa Vena</b>	13.4	7.8	365	10.44
<b>Su Tipari</b>	13.8	8.6	396	10.71
<b>Mussin Tomasu</b>	15.7	7.5	564	9.53
<b>Riu Sa Oche</b>	24.2	7.6	598	8.3

Dai valori ottenuti si nota una evidente correlazione tra la sorgente di Mussin Tomasu e Riu Sa Oche, mentre risultano più affini i dati di Su Tipari, Su Gologone e Sa Vena, questi ultimi due in particolare hanno valori praticamente identici. Queste affinità sono sintomo di una stretta connessione tra le sorgenti.

Tutti i dati sono comunque molto piuttosto simili, ad eccezione dell'ossigeno disciolto che è presente in concentrazioni inferiori per gli ultimi due punti e la temperatura che al contrario è più elevata in questi due casi. Soprattutto per il Riu Sa Oche questo è dovuto al fatto che le acque campionate sono superficiali e quindi molto influenzate dalle temperature esterne che, vista la stagione, erano elevate pari a circa 35°.

## 9 Conclusioni

Dal lavoro eseguito si possono trarre diverse conclusioni.

Le sorgenti studiate sono tutte collegate tra loro e se questo, da una parte, ci permette di prelevare acqua da una delle risorgive alternative, dall'altra pone un vincolo ambientale in relazione al Deflusso Minimo Vitale (DMV) che dev'essere sempre garantito a Su Gologone.

L'idrogeochimica conferma che le acque analizzate sono molto mineralizzate con una durezza totale intorno ai 15-20 °f che le caratterizza come acque a durezza discreta e acque dure. La mineralizzazione è rimasta pressoché costante durante gli anni. La sorgente di Su Gologone e la venuta minore di Sa Vena presentano sempre, come atteso, valori praticamente identici. Le acque campionate nella Grotta di Mussin Tomasu e nel Riu Sa Oche risultano essere quelle più mineralizzate, segno della maggiore permanenza all'interno dell'acquifero.

Dallo studio degli eventi di piena si evince che la fratturazione all'interno della massa rocciosa è profonda e particolarmente fitta. Questo permette all'acqua un passaggio rapido e diffuso nell'acquifero, sia in entrata che in uscita. Dai grafici analizzati si è visto come le acque in uscita fossero sempre parzialmente miscelate con quelle di neoinfiltrazione, così come è evidente anche la presenza del pistonaggio, in alcuni casi più rilevante che in altri, che ha smosso le acque bloccate nelle fratture interne meno permeabili e le ha spinte verso l'esterno.

Dal punto di vista idraulico, dall'analisi delle curve di svuotamento si vede come l'acquifero più che a svuotarsi tenda a raggiungere un valore di portata minimo, che si aggira attorno ai 90 l/s., che resta pressoché costante fino all'arrivo di nuove piogge. Sono necessari approfondimenti per una migliore valutazione delle modalità di esaurimento della piena.

Un altro aspetto importante da analizzare è quello geotecnico, non trattato in questo studio, ma fondamentale per la progettazione dell'opera. Sono propedeutici, in questo caso, studi per capire se lo svuotamento della riserva potrebbe alterare le caratteristiche geomeccaniche e geostrutturali. L'acqua presente nella zona satura, infatti, esercita una spinta sulla roccia e il suo prelievo altererebbe l'equilibrio delle forze, col rischio di creare possibili cedimenti.

Bisogna sempre tener conto che il sito di Su Gologone è molto fragile e ogni azione da parte dell'uomo può alterare in maniera irreversibile l'ecosistema.

A prescindere dalla richiesta d'acqua da parte della popolazione, la priorità è sempre quella di creare un'opera che preservi l'ambiente circostante. Essenziale in questo caso è effettuare una valutazione di impatto ambientale, che ci permetta di capire se e quanto, l'eventuale opera, potrà avere ripercussioni sul territorio.

## Bibliografia e sitografia

- [1] <https://www.sardegnaturismo.it/it/esplora/supramonte>
- [2] <https://www.hotelgabbianoazzurro.com/it/Blog/Supramonte-of-Sardinia>
- [3] <http://www.gslunense.it/index.php/speleogenesi?start=3>
- [4] “Supramonte” di Francesco Murgia
- [5] <https://www.google.it/intl/it/earth/>
- [6] Barrocu G., Vernier A., 2004. Hydrogeology of the island of Sardinia (Italy). Field Trip Guide Book. Volume n°5 from P37 to P54.
- [7] Cabras S, De Waele J., Sanna L., 2008. Caves and karst aquifer drainage of Supramonte (Sardinia, Italy): a review.
- [8] Sanna F. et al, 2019. Sustainable karst groundwater management in a semiarid region: the case of Su Gologone spring (Sardinia, Italy).
- [9] <https://www.sardegnaambiente.it/index.php?xsl=611&s=21&v=9&c=93749&esn=Primo+piano&na=1&n=10>
- [10] Sanna F., Vernier A., Vigna B., 2001. Le sorgenti di Su Gologone nel contesto della idrostruttura carbonatica del Supramonte: rapporti tra carsismo ed idrogeologia
- [11] Ford D., Williams P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology