

1222·2022  
**800**  
ANNI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE

**ANALISI DEL COMPORTAMENTO IDROGEOLOGICO DELLA  
SORGENTE FORAME SITUATA NELL'AREA DEL MONTELLO  
IN PROVINCIA DI TREVISO**

Relatore. Prof. Paolo Fabbri

Laureando: Michael Marazzato (n° 2041739)

Anno Accademico 2023/2024



# INDICE

Introduzione	1
1. Il carsismo	3
1.1 Morfologia di un sistema carsico	4
1.2 Le sorgenti carsiche	7
2. Inquadramento dell'area di studio	9
2.1 Geomorfologia e Geologia del Montello	10
2.2 Forme carsiche del Montello	11
2.3 Il fiume Piave	13
2.4 Sistema carsico del Montello	15
3. Strumenti di monitoraggio e metodi impiegati	17
3.1 Idrogrammi delle precipitazioni	19
3.2 FDC (Flow Duration Curve)	19
3.3 ACF (Autocorrelation Function)	20
3.4 CCF (Cross-Correlation Function)	21
3.5 Analisi della portata di una sorgente	22
3.6 Indice V.E.S.P.A.	23
4. Analisi dati e discussione	25
4.1 Precipitazioni e temperature	25
4.2 Sorgente Forame	28
4.3 Sorgente Tavarán Lungo	35
4.4 Confronto tra le due sorgenti	42
5. Conclusioni	47
Bibliografia	49



## INTRODUZIONE

L'attuale tesi è stata concepita con l'obiettivo di condurre un'indagine idrogeologica sul comportamento carsico e sulle differenze tra la sorgente del Forame e la sorgente del Tavarano Lungo, che alimentano il fiume Piave e sono situate nell'area del Montello in provincia di Treviso.

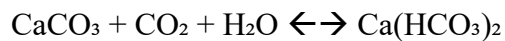
I dati necessari per le analisi sono stati raccolti mediante degli appositi strumenti di monitoraggio continuo, posizionati nelle tre sorgenti di studio e le misure sperimentali delle portate. I dispositivi sono stati programmati in maniera da memorizzare e raccogliere dati con cadenza oraria di: temperatura, conducibilità elettrica e livello dell'acqua. Grazie al rilevamento di questi parametri e attraverso l'utilizzo di un apposito software statistico (R-Studio) sono state analizzate le caratteristiche idrogeologiche di due delle tre sorgenti studiate.



## 1. IL CARSISMO

Con il termine carsismo si vuole fare riferimento all'insieme dei fenomeni di alterazione e modellamento superficiale e sotterraneo di rocce solubili, causati dall'interazione naturale con le acque di ruscellamento e d'infiltrazione. Le rocce maggiormente coinvolte sono quelle carbonatiche, ovvero rocce sedimentarie composte prevalentemente di minerali come la calcite e la dolomite, ma le forme carsiche si sviluppano anche nelle rocce evaporitiche come il gesso e il salgemma.

Le rocce carbonatiche essendo molto solubili subiscono una degradazione chimica per opera dell'acqua meteorica, che trasporta piccole concentrazioni di anidride carbonica sottratta dall'atmosfera, e reagiscono in equilibrio secondo la seguente reazione:



L'anidride carbonica atmosferica ( $\text{CO}_2$ ) a contatto con l'acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) forma un acido debole solubile, l'acido carbonico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), e scorrendo sulla roccia calcarea la soluzione acida reagisce con il carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) portando alla formazione di un composto altrettanto solubile, il bicarbonato di calcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ). La reazione sopra riportata non dipende solamente dalla concentrazione di anidride carbonica o dalla quantità di acqua presente, ma anche dalla morfologia del complesso roccioso e dalla presenza di crepe e fratture che vanno a favorire tale processo. Questa interazione che gradualmente dissolve la roccia carbonatica produce delle strutture con caratteristiche geomorfologiche tipiche degli ambienti carsici superficiali (carsismo epigeo) o sotterranei (carsismo ipogeo) (Zorzin R., 2021).

Alcuni esempi di carsismo epigeo sono i campi solcati, o carreggiati, ovvero delle scanalature parallele e rettilinee formati ad opera dello scorrimento superficiale di flussi d'acqua che portano alla formazione di solchi intervallati da creste che raggiungono lunghezze metriche. Un altro esempio sono le doline, comunemente note come sinkhole, si tratta di depressioni pressappoco circolari con svariate forme, profondità e dimensioni che possono variare da pochi metri fino a qualche chilometro. Con lo svilupparsi del processo carsico le doline possono ingrandirsi fino a formare bacini con versanti ripidi e fondo pianeggiante. La loro genesi consiste nell'asportazione di volumi rocciosi dovuto all'elevato deflusso idrico, e questo processo di formazione è detto "corrosione accelerata", ma esistono svariati processi di formazione di queste, come ad esempio il collasso del soffitto di cavità carsiche nel sottosuolo.

Esistono numerose tipologie di doline carsiche che derivano dalla loro genesi, come: doline di depressione idrogeologica, doline da crollo, doline di ricarica puntuale, ecc.... In particolare, nell'area del Montello sono più frequenti le doline da crollo e di depressione. Nelle aree carsiche più antiche è presente un inghiottitoio, metaforicamente come un collo di un imbuto, che permette il passaggio di acqua verso le profondità, ed è l'elemento fondamentale che collega il carsismo superficiale con quello del sottosuolo.

Nel sottosuolo il carsismo si forma con il progressivo deflusso d'acqua in profondità, attraverso l'azione chimica mediante la dissoluzione di rocce carbonatiche ad opera dell'acido carbonico, sia per azione meccanica come l'erosione e l'abrasione. Con il progredire del tempo l'acqua amplia le fratture nella roccia creando delle vere e proprie grotte e gallerie che possono accogliere fiumi e laghi, talvolta esplorabili da esperti speleologi. All'interno delle cavità carsiche si formano delle particolari strutture che prendono il nome di stalagmiti (concrezioni verticali che si proiettano dai pavimenti) e stalattiti (concrezioni verticali che si formano dai soffitti), le quali si originano dalla precipitazione del carbonato di calcio contenuto nella soluzione acquosa circolante nel sottosuolo.

Il carsismo si origina e si evolve nel corso di vasti intervalli di tempo come molti processi geologici. Questo perché la dissoluzione chimica delle rocce non dipende solamente dalla concentrazione di anidride carbonica che reagisce, andando ad abbassare maggiormente il pH della soluzione, oppure dalla quantità di acqua che prende parte alla reazione. Sono molteplici le caratteristiche che influiscono sulla velocità di questi processi, come: la morfologia e le dimensioni della roccia, la presenza o meno di fratture o crepe, la profondità in cui si trova la roccia, e quindi allo spessore del suolo sovrastante, la temperatura e il clima (De Waele J., 2017).

## **1.1 Morfologia di un sistema carsico**

In idrogeologia, un sistema carsico si riferisce a un insieme di forme geologiche e idrogeologiche, sia superficiali che sotterranee, che sono il risultato di processi di carsismo. Questo meccanismo svolge un ruolo fondamentale nel drenaggio delle acque. L'acqua piovana, penetrando attraverso fratture e pori della roccia, si infiltra nel sottosuolo seguendo un percorso guidato dalle strutture carsiche. Nel suo tragitto, l'acqua può dar vita a una rete complessa di



condotti sotterranei, che si collegano a caverne e sifoni, per poi confluire a una sorgente e riaffiorare in superficie sotto forma di sorgenti carsiche. Tutti questi elementi interagiscono in un equilibrio dinamico, che modella continuamente il paesaggio e regola il ciclo idrogeologico delle aree carsiche.

Generalmente, un sistema carsico può essere suddiviso verticalmente in varie zone, che presentano diverse caratteristiche idrogeologiche: (Fig. 1)

1. *Epicarso*: è la parte più superficiale di un sistema carsico, conosciuta come zona di alimentazione o di ricarica, è quella parte dell'idrostruttura che ha la funzione di raccogliere le acque meteoriche, come la pioggia o le acque di scorrimento superficiale e orientarle in profondità garantendo il continuo rifornimento delle risorse idriche sotterranee.
2. *Zona vadosa*: quest'area funge da canale di transito per l'acqua, che si muove velocemente verso le profondità del sistema carsico attraverso dei percorsi principalmente verticali. I condotti di questa zona sono spesso asciutti, ma durante i periodi di piogge intense, possono riempirsi d'acqua facilitando un rapido drenaggio verso il basso.
3. *Zona epifreatica*: è una stretta sezione interessata sia da scorrimento a pelo libero, dove l'acqua scorre lungo il fondo lasciando uno spazio d'aria sopra di essa, sia da scorrimento a pieno carico, in cui i condotti vengono totalmente riempiti d'acqua. Tali regimi idrici variano in base alle oscillazioni della superficie piezometrica.
4. *Zona freatica*: questa è la zona satura del sistema carsico che si estende fino alla base impermeabile, caratterizzata da un regime idrico stabile e costantemente riempita d'acqua con un flusso idrico prevalentemente orizzontale.

(Ferrarese F., Sauro U., Zampieri D., 2005)

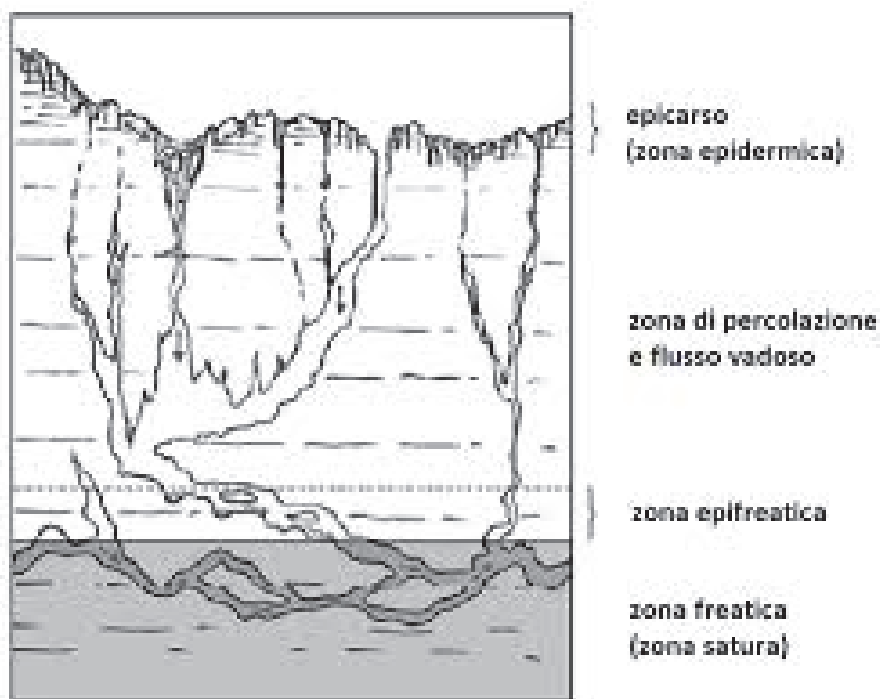


Figura 1: suddivisione verticale delle zone di un sistema carsico (De Waele e Piccinini, 2008)

Le varie zone che costituiscono il sistema carsico sono morfologicamente differenti in base a come agisce l'acqua, nelle aree più superficiali il flusso assume un ruolo di erosione meccanica; invece, nelle zone più sottostanti prevarrà la dissoluzione chimica. Man mano che il sistema progredisce, il flusso d'acqua all'interno delle cavità diventa sempre più turbolento a causa dell'allargamento progressivo degli spazi vuoti. Questo fenomeno accelera notevolmente l'evoluzione dei sistemi carsici, rendendoli molto più dinamici rispetto ai normali sistemi idrici sotterranei, quindi rapidamente mutevoli a causa delle condizioni ambientali (Agostini S., 2011).

Gli acquiferi carsici, a causa della loro elevata permeabilità derivante dagli intensi processi erosivi, sono particolarmente vulnerabili all'inquinamento. L'acqua, infatti, impiega generalmente poco tempo per spostarsi dalla zona di alimentazione alle sorgenti, andando a ridurre le capacità di autodepurazione delle acque sotterranee. Quando un inquinante raggiunge l'acquifero compromette la qualità dell'acqua per periodi prolungati, rimanendo in parte intrappolato nelle cavità della zona satura e venendo mobilizzato solo durante gli eventi di piena (Forti P., Rossi A., 2003).

## 1.2 Le sorgenti carsiche

Una sorgente è definita come un punto o un'area della superficie terrestre da cui scaturisce naturalmente, con una specifica portata, un volume d'acqua proveniente da un acquifero. In particolare, le sorgenti carsiche nascono dall'intersezione tra un acquifero carsico e la superficie terrestre, e le loro variazioni di portata nel tempo dipendono dalle caratteristiche, dalla morfologia e dal livello di carsismo dell'acquifero sottostante. Per classificare le sorgenti secondo la loro portata ci si basta sull'indice di variabilità ( $R_v$ ), formulato da Meinzer, secondo la seguente relazione:

$$R_v = (Q_{\max} - Q_{\min}) * 100 / Q_{\text{med}}$$

Andando a specificare che,  $Q_{\max}$  è la portata massima,  $Q_{\min}$  è portata minima e  $Q_{\text{med}}$  è quella media. Secondo questa metodologia le sorgenti vengono distinte in: *costanti*, se il valore di  $R_v$  ottenuto è inferiore al 25%, *sub-variabili* se  $R_v$  è compreso tra il 25 e il 100%, infine, *variabili* con un valore di  $R_v$  che supera il 100%. Questo indice è utile per identificare le sorgenti che richiedono interventi di regolarizzazione della portata per prevenire danni, anche gravi.

Un altro metodo di classificazione delle sorgenti carsiche, ideato sempre da Meinzer, si basa sulla portata media. Questo approccio classifica le sorgenti in base al volume d'acqua che rilasciano in media nel tempo, offrendo una scala di riferimento per confrontare sorgenti di diverse dimensioni.

Il comportamento di una sorgente può essere analizzato in dettaglio attraverso il suo idrogramma, un grafico che mostra come la portata della sorgente varia nel tempo. Questo strumento permette di osservare le fluttuazioni delle portate, fornendo informazioni utili sulle dinamiche dell'acquifero, come la risposta a eventi di precipitazione, l'andamento stagionale e l'effetto delle variazioni del livello freatico. L'idrogramma è quindi fondamentale per comprendere e monitorare l'evoluzione nel tempo delle sorgenti, aiutando nella gestione e protezione delle risorse idriche (Savio, Stadler, et al., 2018).



## 2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

L'area di studio è situata nel territorio del Montello (Fig. 2), una collina di rilevante interesse geografico e paesaggistico collocato nella provincia di Treviso, all'interno della regione Veneto. Il Montello si caratterizza per una forma ellittica allungata, con un'estensione di circa 13 chilometri lungo il suo asse maggiore, orientato in direzione sud-ovest/nord-est. Questa conformazione, che si sviluppa in modo prominente nel paesaggio circostante, è ulteriormente definita da un asse minore che si estende per circa 6 chilometri, con orientamento sud-est/nord-ovest (Benedetti L., et al., 2000). Questa peculiare struttura geologica conferisce al Montello un aspetto distintivo, facendolo emergere come un rilievo isolato all'interno della pianura veneta, precedendo i colli subalpini, e fungendo da transizione tra la pianura e le Alpi. Il colle copre una superficie di quasi 60 km<sup>2</sup>, con un'altitudine media di quasi 208 m s.l.m. Si innalza di circa 100 m rispetto alla pianura circostante, raggiungendo un'altezza massima di 369 m s.l.m. (Sauro U., Ferrarese F., 2005).

Recenti ricerche hanno evidenziato che il Montello rappresenta il “dorso” di una struttura geologica definita “pop-up”. Si tratta di un cuneo compresso da faglie inverse che convergono verso il basso sia sul lato nordoccidentale che su quello sudorientale. Queste faglie, sottoposte a pressioni tettoniche, spingono progressivamente il cuneo verso l'alto, determinando il sollevamento della struttura (Ferrarese F., et al., 1998).



Figura 2: Immagine satellitare del Montello (scattata in data 24/08/2024)

## 2.1 Geomorfologia e Geologia del Montello

Il Montello si è originato durante il periodo del Pleistocene, in seguito alle intense attività tettoniche e glaciali che hanno modellato l'area. La sua formazione è strettamente legata al fiume Piave, che ha depositato nel corso dei millenni grandi quantità di sedimenti fluviali e alluvionali nella zona dove oggi si trova la collina. Dal punto di vista geologico, il Montello (Fig. 3) è costituito prevalentemente da conglomerati fluivo-glaciali, che formano la base geologica della struttura. Questi conglomerati sono composti da ciottoli di dimensioni variabili, cementati da una matrice di sabbia e argilla. La presenza di conglomerati testimonia l'attività dei corsi d'acqua che hanno trasportato e depositato questi materiali durante le fasi glaciali e interglaciali. Questi elementi, spesso chiamati "Conglomerati del Montello", sono il risultato di un'antica pianura alluvionale formata dai detriti trasportati dal Piave e dai suoi affluenti. I conglomerati sono molto compatti e variano nella composizione e nelle dimensioni dei ciottoli, a seconda della distanza dalla sorgente dei detriti (le Alpi) (Ferrarese F., et al., 1998).

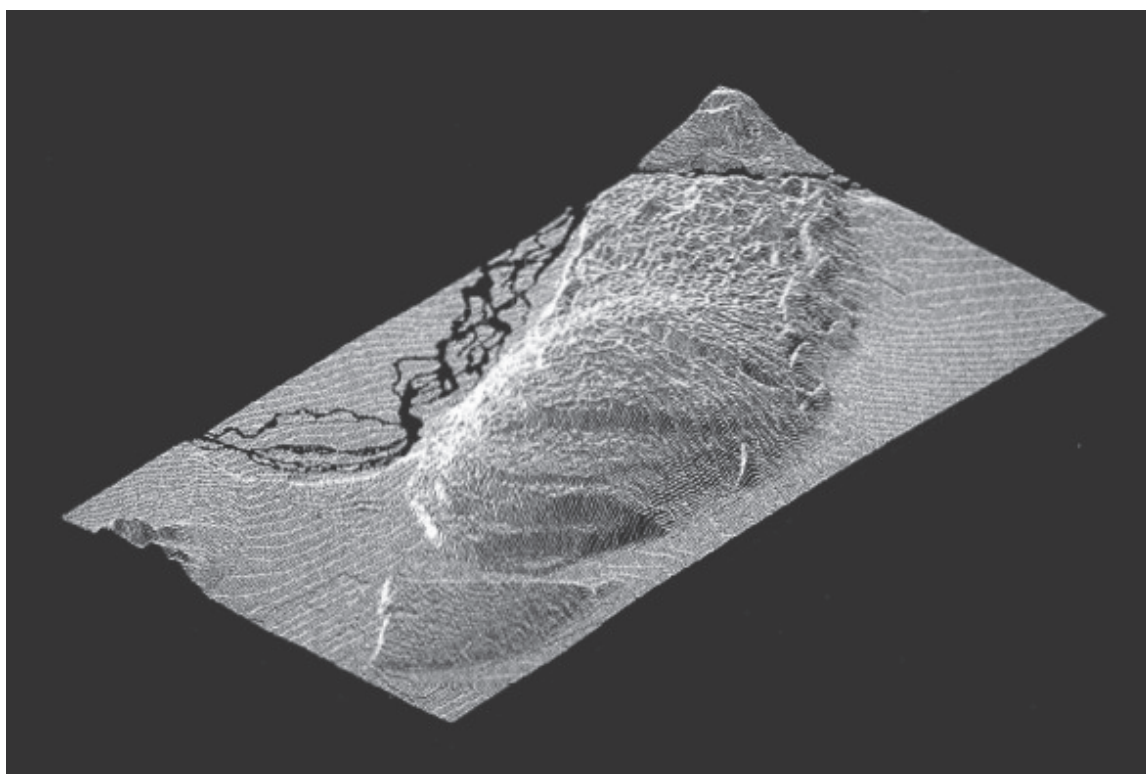


Figura 3: Modello 3D del Montello (immagine prelevata dall'articolo "The Montello Plateau: Karst evolution of an alpine neotectonic morphostructure. Z. Geomorph. N. E." di Ferrarese F. et al., 1998)

Il Montello è un piccolo monte dinamico, in continua evoluzione frutto dell'interazione tra processi endogeni ed esogeni. I processi endogeni, come la tettonica, sollevano la dorsale, mentre i processi esogeni, come l'erosione, modellano il rilievo, scolpendolo e riducendone

progressivamente la massa. Le forme create dall'erosione si suddividono principalmente in due categorie: sculture fluviali e sculture carsiche. Le sculture fluviali hanno dimensioni che possono raggiungere o superare il chilometro, mentre quelle carsiche si manifestano in dimensioni più contenute, da decine a centinaia di metri. L'erosione, oltre a generare queste forme, comporta anche una perdita di massa del rilievo, con conseguente abbassamento della superficie topografica complessiva (Sauro U., Ferrarese F., 2005).

Un aspetto interessante nell'evoluzione del rilievo del Montello (Fig. 4) è la complessità delle interazioni tra la deformazione tettonica, che ha influenzato in modo significativo la formazione dei terrazzi con la loro attuale disposizione, e i processi erosivi. Inoltre, le significative oscillazioni climatiche del Pleistocene hanno avuto un impatto concreto sui processi di spianamento, influenzando il trasporto dei sedimenti e la capacità erosiva e incisiva dei fiumi. È probabile che il Piave avesse una maggiore capacità di spianamento quando era in grado di trasportare grandi quantità di sedimenti attraverso un ampio alveo, senza però accumularli eccessivamente (Sauro U., Ferrarese F., 2005).

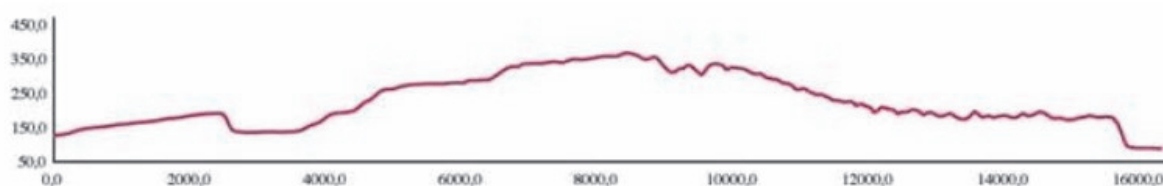


Figura 4: Sezione longitudinale, raffigurante il rilievo del Montello

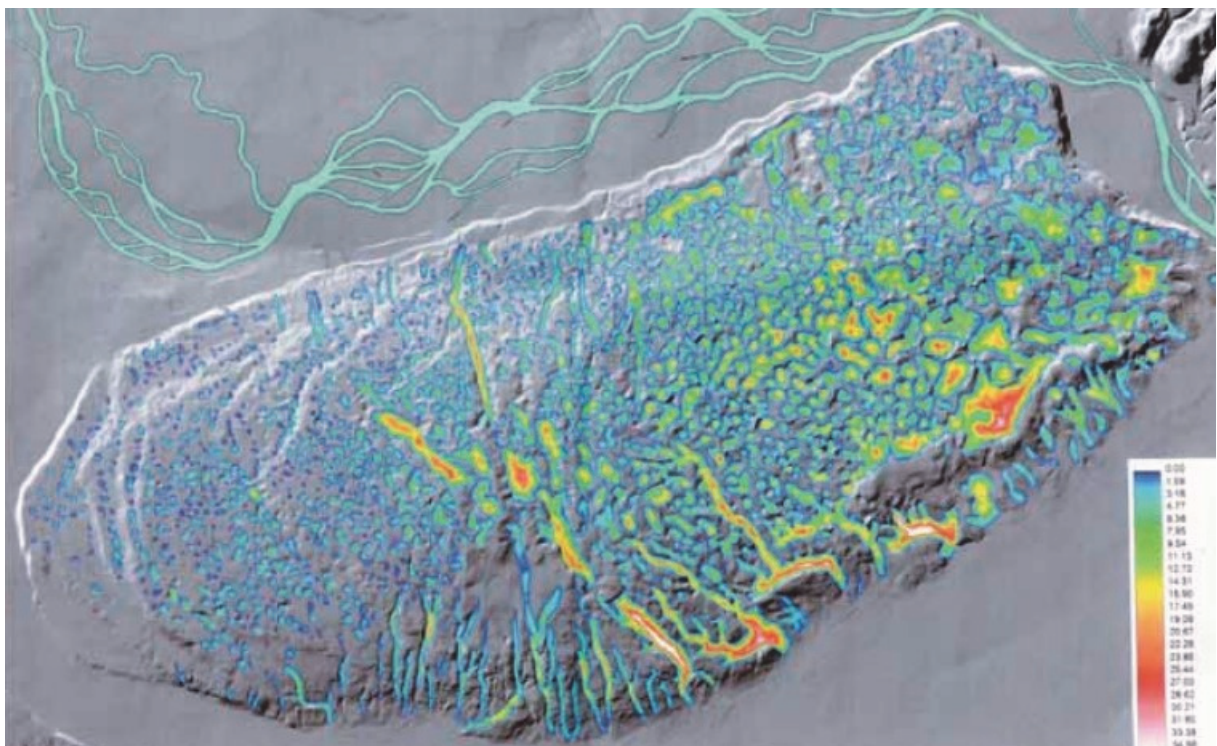
## 2.2 Forme carsiche del Montello

Nel Montello, oltre alle doline, sono presenti diverse forme fluvio-carsiche particolari, tra cui valli secche, valli cieche e valli chiuse, ciascuna con caratteristiche distintive (Fig. 5).

- *Valle secca*: è una valle poco profonda, con un fondo curvato, priva di un corso d'acqua attivo. Si forma attraverso un processo di corrosione accelerata del fondovalle, connesso all'evoluzione dell'epicarso. Questa tipologia di valli si distinguono per l'assenza di erosione fluviale continua, poiché l'acqua che un tempo scorreva nel fondovalle viene completamente assorbita dalle strutture carsiche sottostanti.

- *Valle cieca*: questa forma geomorfologica è caratterizzata da un solco attraversata da un piccolo corso d'acqua che termina la propria corsa in un inghiottitoio. Questo tipo di valle è tipico del versante meridionale del Montello dove l'acqua scompare nel sottosuolo attraverso gli inghiottitoi.
- *Valle chiusa*: una valle chiusa si contraddistingue per la presenza di un netto gradino alla base del quale sgorga una sorgente, che andrà ad alimentare un corso d'acqua. Queste valli sono il risultato di processi carsici che bloccano il deflusso superficiale, costringendo l'acqua a emergere in un punto specifico creando un corso d'acqua confinato entro la valle stessa.

Queste forme fluviocarsiche evidenziano la complessità del paesaggio del Montello, dove i processi carsici e fluviali interagiscono, dando origine a un rilievo ricco di caratteristiche geomorfologiche uniche (Sauro U., Ferrarese F., 2005).



*Figura 5: Distribuzione delle forme carsiche e fluviocarsiche del Montello con la messa in evidenza della profondità che aumenta dal blu verso il rosso (Sauro U., Ferrarese F., 2005)*

Le forme carsiche più comuni nell'area del Montello sono le doline (Fig. 6), ovvero, delle depressioni naturali che si formano principalmente a causa della dissoluzione della roccia calcarea, oppure a causa del collasso del suolo o per infiltrazione dell'acqua. Le doline si distribuiscono lungo i vari terrazzamenti del Montello (Fig. 7), ciascuna tipologia influenzata dalla specifica geologia e dai processi erosivi dell'area. Nei terrazzamenti più elevati e meno



stabili, dove la dissoluzione è più intensa, prevalgono le doline di crollo e di dissoluzione. Nei terrazzamenti più bassi e compatti, sono più comuni le doline di subsidenza e di allargamento.

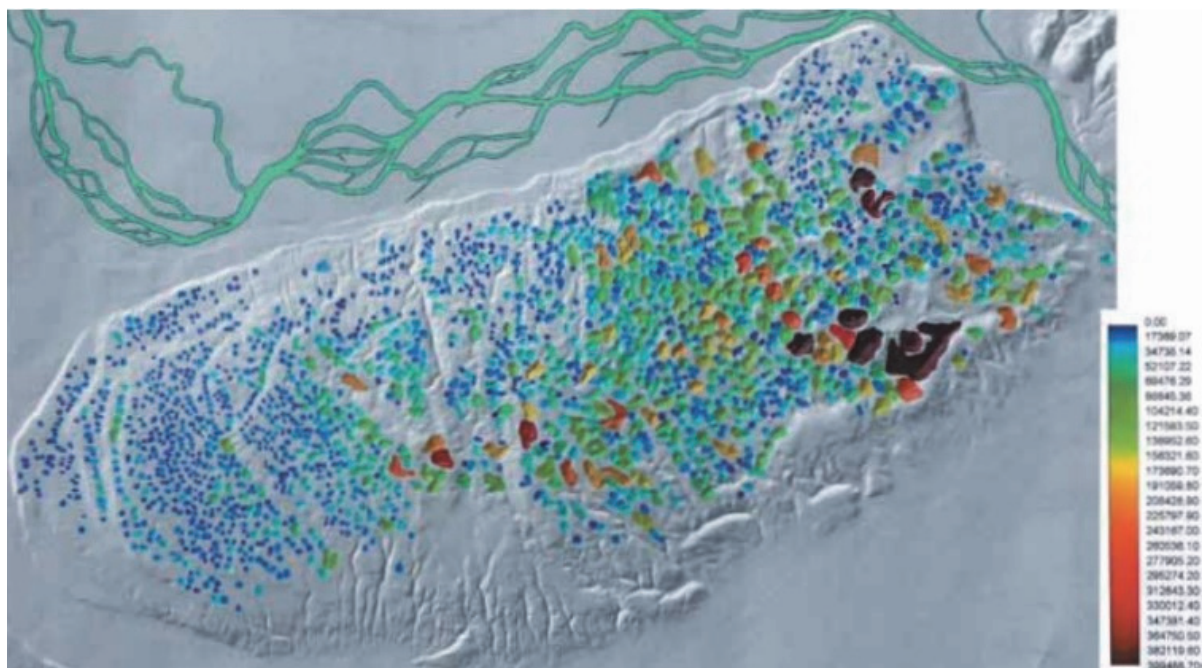


Figura 6: Distribuzione delle doline con la messa in evidenza del volume, in maniera progressiva dal blu verso il rosso scuro (Sauro U., Ferrarese F., 2005)

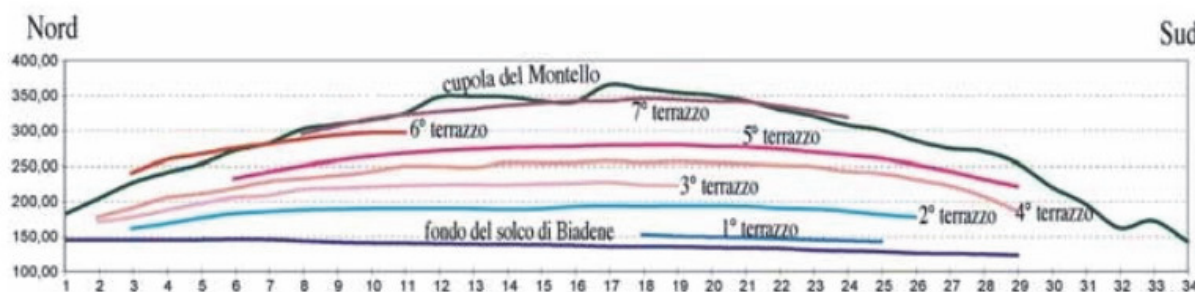


Figura 7: Sezione longitudinale del Montello raffigurante i vari terrazzamenti (Sauro U., Ferrarese F., 2005)

### 2.3 Il fiume Piave

L'azione del fiume Piave (Fig. 8) ha avuto un ruolo significativo nella modellazione del paesaggio del Montello, influenzando sia la morfologia del rilievo sia i processi di sedimentazione ed erosione nella regione. La formazione del Montello è strettamente legata ai processi tettonici e fluviali che hanno interessato l'area nel corso dei millenni, come:

- *Deposizione sedimentaria*: durante il periodo del Quaternario, il fiume Piave ha trasportato una grande quantità di sedimenti dalle Alpi verso la pianura veneta. Infatti, il Montello è formato da strati sedimentari accumulati nel tempo, in parte grazie all'azione del Piave.
- *Erosione e modellamento del rilievo*: le piene del fiume hanno eroso principalmente i margini del versante orientale e meridionale, creando solchi e valli, e definendo la morfologia attuale del Montello.
- *Terrazzamenti fluviali*: il Piave ha contribuito alla formazione dei terrazzamenti fluviali lungo il Montello. Si sono originati quando il fiume, variando il suo corso e il suo livello nel tempo, ha depositato sedimenti a diverse altitudini.
- *Influenza sulla circolazione delle acque sotterranee*: l'interazione tra il fiume e le strutture carsiche del Montello ha favorito la formazione di risorgive e di un complesso sistema idrico sotterraneo, che drena le acque verso il Piave (Ferrarese F., Sauro U., 2005).



Figura 8: Piena del fiume Piave registrata in data 02/04/2024, con al centro lo strumento sonar per il rilevamento del livello del fiume

## 2.4 Sistema carsico del Montello

Nel Montello i processi di sviluppo del carsismo ipogeo sono stati indubbiamente influenzati dal progressivo sollevamento del colle. Il sollevamento ha portato variazioni nelle condizioni idrogeologiche, favorendo l'erosione e la dissoluzione delle rocce calcaree in profondità, e quindi la formazione di cavità e grotte. Questi processi hanno modellato la struttura del sottosuolo, contribuendo alla complessa morfologia carsica che caratterizza la zona. Infatti, è il dislivello creato dalla combinazione fra i processi tettonici e i fenomeni di incisione fluviale che determina l'energia potenziale dell'acqua (Ferrarese F., Sauro U., Zampieri D., 2005).

Naturalmente l'acqua penetra all'interno della massa rocciosa e si apre dei passaggi che le consentono di fuoriuscire nei punti più bassi del rilievo carsico, situati ai margini. Questi punti di fuoriuscita, noti come livello di base locale, rappresentano il punto topograficamente più basso in cui l'acqua può emergere. Nel suo percorso sotterraneo (Fig. 9), l'acqua segue le linee di minor resistenza, dissolvendo e modellando la roccia, fino a raggiungere il livello di base dove può risalire in superficie, completando così il suo ciclo.

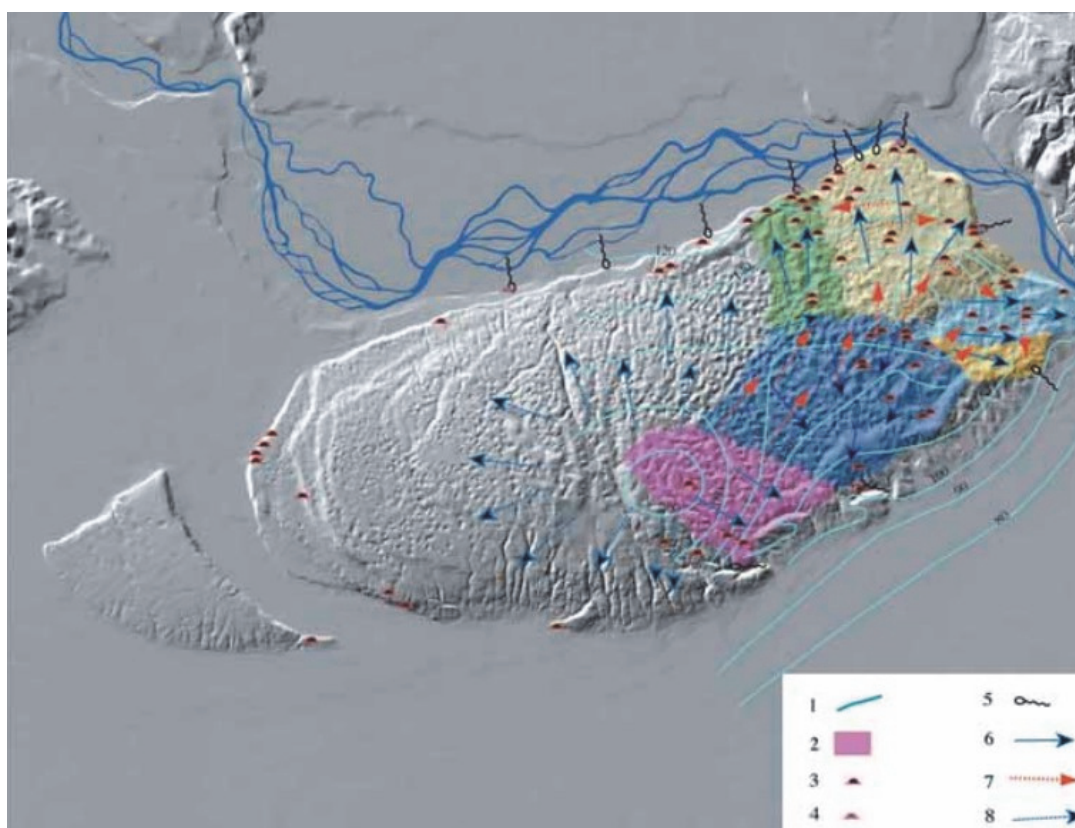


Figura 9: Schematizzazione delle direzioni del flusso d'acqua sotterraneo, con evidenziate alcune forme carsiche a sud-est del rilievo (immagine prelevata da Ferrarese F., Sauro U., Zampieri D., 2005)



### 3. STRUMENTI DI MONITORAGGIO E METODI IMPIEGATI

Il progetto idrogeologico ha incluso un sistema di monitoraggio in continuo tramite appositi sensori multiparametrici (CTD-Diver), installati in prossimità delle tre sorgenti analizzate: Forame, Casselon e Tavarano Lungo (Fig. 10). Questi sensori sono stati utilizzati per raccogliere dati con cadenza oraria da giugno 2019 fino a luglio 2024, permettendo un'analisi approfondita delle condizioni idrologiche nelle aree di interesse.



Figura 10: Messa in risalto delle tre sorgenti: 1) Tavarano Lungo, 2) Casselon, 3) Forame

I parametri rilevati dai 3 strumenti sono:

- *Livello dell'acqua*: indicato come la distanza in centimetri tra il pelo libero dell'acqua e il sensore, può variare da 0 a 1000 cm. La misura ha un'accuratezza di  $\pm 0,5$  cm e una risoluzione di 0,2 cm.
- *La temperatura dell'acqua*: espressa in gradi Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), può variare da  $-20$   $^{\circ}\text{C}$  a  $100$   $^{\circ}\text{C}$ . La misurazione ha una precisione di  $\pm 0,1$   $^{\circ}\text{C}$  e una risoluzione di 0,01  $^{\circ}\text{C}$ .

- *La conducibilità elettrica (EC) dell'acqua*: misurata a 25 C° in mS/cm, con un intervallo che va da 0 mS/cm a 30 mS/cm. La precisione della misurazione è ± 1% e la risoluzione della lettura è dello 0,1%.



Figura 11: CTD-Diver

Il CTD-Diver (Fig. 11) misura la pressione totale che include sia la pressione idrostatica (dovuta dalla colonna d'acqua sopra il sensore) sia la pressione atmosferica. Poiché il CTD-Diver non è compensato, la pressione atmosferica deve essere sottratta dal valore totale registrato dallo strumento al fine di ottenere la pressione idrostatica reale. Questo si fa monitorando la pressione atmosferica con un barometro esterno e poi applicando la formula:

$$P_{idrostatica} = P_{totale} - P_{atmosferica}$$

Questa correzione assicura che la lettura della pressione idrostatica riguardi solo la variazione di profondità del sensore. I valori della pressione atmosferica sono stati desunti dalla stazione Arpav (Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto) di Cavallino Treponti (stazione numero 160). Anche i dati pluviometrici e le temperature sono stati presi dal sito Arpav, e le stazioni considerate sono: Volpago del Montello, Conegliano, Castelfranco Veneto e Cavallino Treponti. Per le sorgenti Casselon e Forame, i CTD-Diver sono installati in un'area esterna, esposta a fattori atmosferici come la temperatura stagionale e le precipitazioni. Per proteggerli da detriti e impurità, sono stati racchiusi in tubi protettivi. Diversamente, per la sorgente Tavarano Lungo, lo strumento è collocato all'interno di una vasca situata alla fine della grotta, dove i dati rilevati risentono meno delle variazioni di temperatura esterna e delle precipitazioni.

Durante il periodo di tesi, sono state effettuate delle misurazioni manuali con cadenza mensile (da gennaio 2024 a luglio 2024) della temperatura dell'acqua utilizzando un termometro, della conducibilità elettrica attraverso un conduttivimetro e della portata. Per quest'ultima, abbiamo costruito per ognuna delle tre sorgenti una sezione trasversale al flusso, e misurato la velocità con un mulinello e la profondità mediante un'asta graduata. Successivamente, moltiplicando la velocità dell'acqua per l'area della sezione liquida di misura, è stata calcolata la portata della sorgente in quel giorno e quindi confrontata con il livello registrato dagli strumenti alla stessa data.

I dati raccolti dal monitoraggio delle tre sorgenti, insieme a quelli prelevati manualmente, sono stati analizzati utilizzando il software “R-studio” (RStudio Team 2024), un’interfaccia grafica che supporta diversi linguaggi. Nel nostro caso si è operato nell’ambiente open source di R (R Core Team 2024), progettato specificatamente per le analisi statistiche. Con questo software, sono state create rappresentazioni grafiche delle diverse serie temporali e calcolate le statistiche sommarie, come valori massimi, minimi, medi e quartili. Inoltre, il software ha permesso di calcolare l’autocorrelazione delle singole serie di dati (ACF), di generare curve di durata del deflusso (FDC) e di esaminare la cross-correlazione tra serie di dati differenti (CCF). Invece, per quanto riguarda la costruzione delle scale delle portate l’interpretazione si è svolta in ambiente Excel.

### **3.1 Idrogrammi delle precipitazioni**

Gli istogrammi delle piogge mostrano i valori delle precipitazioni orarie dal 2019 al 2024. I dati raccolti dalle stazioni pluviometriche selezionate sono rappresentati in istogrammi, dove l’asse delle ordinate indica i valori di pioggia in mm e l’asse delle ascisse il tempo.

### **3.2 FDC (Flow Duration Curve)**

La curva di durata del deflusso (FDC) rappresenta la percentuale di portate superiori ad un certo valore (Longobardi A., Villani P.). Per costruire questa curva, i dati di portata delle sorgenti vengono ordinati dal valore più alto al più basso, indipendentemente dalla sequenza cronologica, e riportati su un grafico. In questo grafico, l’asse delle ordinate mostra le portate, mentre l’asse delle ascisse rappresenta la percentuale cumulata di tali portate nel periodo di monitoraggio.

La forma della curva FDC offre informazioni preziose sulle caratteristiche del sistema carsico analizzato. In particolare, le pendenze della curva riflette lo sviluppo del sistema: pendenze ripide indicano significative variazioni di livello e suggeriscono un sistema carsico ben sviluppato, in grado di drenare rapidamente l’acqua. Al contrario, pendenze meno accentuate indicano un basso grado di carsificazione, tipico di sistemi poco carsici o fratturati che trattengono l’acqua per periodi più prolungati (Fabbri P., Torresan F., 2020).

### 3.3 ACF (Autocorrelation Function)

La funzione di autocorrelazione valuta la dipendenza lineare tra valori consecutivi all'interno di una serie di dati, confrontando la serie con una versione ritardata di sé stessa di un determinato intervallo di tempo, noto come "lag time" (in questo caso, un'ora). L'autocorrelogramma risultante mostra, sull'asse delle ordinate, il coefficiente di autocorrelazione (valore compreso nell'intervallo +1 -1, se assume valore positivo ci sarà una correlazione positiva, invece se assume valore negativo ci sarà una correlazione negativa, per un valore pari a 0 indica assenza di correlazione), e sull'asse delle ascisse il lag time. L'ACF è utile per valutare la "memoria" del sistema, ovvero quanto tempo impiega a "dimenticare" le condizioni iniziali (Fabbri P., Torresan F., 2020). Questo viene misurato attraverso il "decorrelation lag time", il tempo necessario affinché la funzione di autocorrelazione scenda al di sotto di un valore soglia, tipicamente compreso tra 0,1 e 0,2.

In idrogeologia, l'autocorrelogramma può fornire indicazioni sulla carsificazione e sulle riserve di deflusso sotterraneo di un acquifero. In un sistema con un forte comportamento carsico, i valori di autocorrelazione in una serie temporale diminuiscono rapidamente, mostrando una curva molto inclinata e un breve tempo di decorrelazione. Questo indica una memoria corta del sistema. Al contrario, un acquifero carsico meno sviluppato, con un significativo accumulo di acque sotterranee, presenta una memoria più lunga, con un autocorrelogramma che mostra una pendenza più graduale (Chen X., et al., 2013).

Dal punto di vista matematico, l'ACF può essere definita come:

$$r(K) = \frac{c(K)}{c(0)} \quad (1)$$

tramite:

$$c(K) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad [K= 0,1,2,3..., (n - 1)] \quad (2)$$

$$c(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \quad (3)$$

Dove, K rappresenta l'intervallo di tempo (ora), n è definita come la lunghezza della serie temporale, t è il tempo, x è descritto come la misurazione di un singolo valore e  $\bar{x}$  esprime la media dei valori della serie di dati (Fabbri P., Torresan F., 2020).



### 3.4 CCF (Cross-Correlation Function)

La funzione di cross-correlazione confronta due diverse serie di dati per analizzare la relazione tra input, come le precipitazioni, e output, come la portata delle sorgenti. Le correlazioni positive indicano che entrambe le serie aumentano o diminuiscono insieme (i due parametri sono direttamente proporzionali), mentre le correlazioni negative indicano che, quando una serie aumenta, l'altra diminuisce (i due valori sono inversamente proporzionali). Per evitare errate interpretazioni dovute all'elevate autocorrelazioni di una singola serie, i dati vengono filtrati sottraendo ogni valore dal precedente, rendendo la serie meno autocorrelata (Quinghan M., Liting X., et al.). La cross-correlazione misura quindi la correlazione tra due serie di dati in funzione dei tempi di ritardo tra di loro.

La funzione di covarianza è definita come:

$$C_{uy} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (u_t - \bar{u})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad [K=0,1,2,3, \dots, (n-1)] \quad (4)$$

$$C_{uy} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (u_t - \bar{u})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad [K=0,1,2,3, \dots, (n-1)] \quad (5)$$

$\bar{u}$  e  $\bar{y}$  sono le medie dei valori di input e output

Per tanto, la CCF è determinata come:

$$r_{uy}(k) = \frac{c_{uy}(k)}{\sqrt{c_{uu}(0)c_{yy}(0)}} \quad (6)$$

La CCF viene rappresentata graficamente attraverso un cross-correlogramma; dove l'asse delle ordinate indica il valore di correlazione, compreso tra -1 e +1, mentre l'asse delle ascisse mostra il ritardo tra le due serie di dati (lag time). Nel grafico sono presenti due bande di confidenza, che definiscono il livello al di sotto del quale la correlazione è considerata poco significativa. Se due serie di dati sono correlate, il valore di correlazione deve superare queste bande di confidenza (definite come:  $-\frac{1,96}{\sqrt{n}}$  e  $+\frac{1,96}{\sqrt{n}}$ ).

Le analisi di cross-correlazione sono state applicate ai parametri monitorati (portata, temperatura e conducibilità elettrica) e le precipitazioni; ovvero sono state messe a confronto: portata/precipitazioni, portata/temperatura, portata/conducibilità elettrica. Il confronto tra le precipitazioni (input) e la portata (output) consente di valutare il tempo necessario affinché l'acqua meteorica attraversi la zona satura, scorra entro l'acquifero e raggiunga la sorgente

provocando un aumento di portata. Questo permette di ottenere informazioni sulle dimensioni del sistema carsico (Fabbri P., Torresan F., 2020).

### 3.5 Analisi della portata di una sorgente

L'analisi della portata di una sorgente è essenziale per comprendere il comportamento idrogeologico di un sistema, specialmente per sorgenti carsiche. L'obiettivo principale è monitorare e interpretare il flusso d'acqua nel tempo, valutando variazioni stagionali, risposta a eventi di precipitazione e la capacità di ricarica del sistema acquifero.

Per determinare la portata (espressa in L/s) è stato utilizzato un mulinello idrometrico, necessario per la misurazione delle velocità del flusso, e un'asta graduata per ricavare la profondità (in cm) del livello dell'acqua. Successivamente è stata individuata una sezione trasversale adeguata (in cui non ci fossero molti ostacoli come alberi caduti o grandi massi) e suddivisa in conci (Fig. 12). Misurata la velocità e ricavata l'area del concio è stato possibile determinare la portata attraverso le seguenti formule:

Portata per ogni singolo concio:

$$Q_i = v_i A_i \quad (7)$$

dove,  $Q_i$  è la portata di un singolo concio,  $v_i$  la velocità del flusso nel concio e  $A_i$  è l'area del concio.

Calcolo della portata totale:

$$Q_{totale} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (8)$$

dove  $n$  è il numero totale dei conci.

Ripetendo nel tempo le misure sperimentali di portata e confrontandole con i livelli ricavati dal monitoraggio sarà possibile elaborare una relazione sperimentale tra la portata della sorgente e l'altezza idrometrica (livello dell'acqua) misurata dagli strumenti, ossia sarà possibile ricavare la scala delle portate:

$$Q = ah^b \quad (9)$$

dove  $a$  e  $b$  sono le costanti specifiche per quella stazione, ed  $h$  è l'altezza idrometrica.

Nel grafico della scala delle portate verranno riportate sull'asse delle ascisse l'altezza idrometrica, invece sull'asse delle ordinate le portate. Una volta ottenuti i dati sperimentali sarà infatti possibile ricavare i valori delle costanti  $a$  e  $b$ , per poi utilizzare la relazione ottenuta per risalire alla portata della sorgente conoscendo solamente l'altezza dell'acqua, senza più effettuare necessariamente delle misure. Per fare ciò sarebbe opportuno che la sezione trasversale fosse fissa, poiché se questa cambia, cambierà anche la scala delle portate.

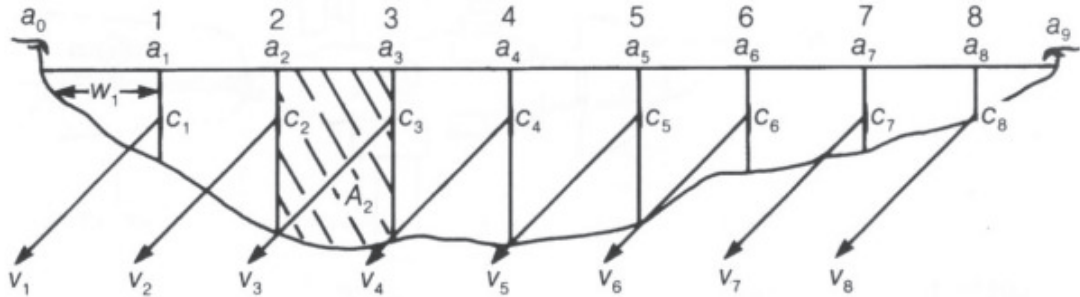


Figura 12: Suddivisione in concetti della sezione trasversale al flusso dell'acqua

### 3.6 Indice V.E.S.P.A.

È stata utilizzata la metodologia dell'indice V.E.S.P.A. (Vulnerability Estimation for Spring Protection Areas) per valutare il comportamento del sistema acquifero. Si basa sull'uso combinato delle misurazioni di portata e conducibilità elettrica ottenute dal monitoraggio periodico della sorgente.

Il fattore di correlazione  $c(\rho)$  è determinato secondo la seguente espressione:

$$c(\rho) = [\mu - (-\rho) + \alpha\mu(\rho)]|\rho| \quad (10)$$

quindi è necessario calcolare prima il coefficiente di correlazione:

$$\rho = \frac{\sum(Q_i - Q_m)(\sigma_i - \sigma_m)}{\sqrt{\sum(Q_i - Q_m)^2} \sqrt{\sum(\sigma_i - \sigma_m)^2}} \quad (11)$$

$Q$  è la portata e  $\sigma$  è la conducibilità elettrica misurati nella sorgente; invece,  $i$  corrisponde alla singola misura oraria, e  $m$  rappresenta la media dell'intervallo di tempo considerato. Considerando che i parametri di portata e conducibilità elettrica crescano entrambi, si avrà un valore positivo di  $\rho$ , invece se uno dei due valori diminuisce e l'altro aumenta il valore di  $\rho$  sarà negativo (Giovanni M. 2021). Una volta determinato  $\rho$  si potrà calcolare  $\mu(\rho)$  attraverso una "funzione ad interruttore", ovvero:

$$\mu(\rho) = \begin{cases} 1, & \rho \geq 0 \\ 0, & \rho < 0 \end{cases}$$

Ovvero, se  $\rho$  sarà  $\geq 0$  allora  $\mu(\rho)$  è 1, invece se  $\rho$  è  $< 0$   $\mu(\rho)$  varrà 0.

Infine, è necessario definire  $\alpha$ , il coefficiente di ridimensionamento che solitamente varia tra 0 e 1.

Per quanto riguarda il coefficiente di correlazione ( $\rho$ ), ci suggerisce tre comportamenti differenti delle sorgenti (Tab. 1), ciascuno caratterizzato da specifiche dinamiche (Giovanni M. 2021):

Tipologia di sorgente	Coefficiente di correlazione
Tipo A - Sostituzione	$-1 < \rho < -0,2$
Tipo B - Pistonaggio	$0,2 < \rho < 1$
Tipo C - Omogeneizzazione	$-0,2 < \rho < 0,2$

Tab. 1: Tipologia di sorgente mediante il coefficiente di correlazione

Di seguito descritti brevemente i tre comportamenti che può assumere un acquifero in risposta agli eventi di ricarica (come eventi di precipitazione):

- *Tipo A- Sostituzione*: il fenomeno della sostituzione indica un sistema carsico altamente sviluppato e permeabile, dove le acque appena infiltrate raggiungono rapidamente la sorgente, causando un abbassamento della conducibilità elettrica, un aumento di portata, e di conseguenza un aumento di vulnerabilità.
- *Tipo B – Pistonaggio*: la reazione a pistone si verifica in un sistema carsico con un'ampia zona satura, dove l'acqua che si infiltra spinge fuori l'acqua che era già presente precedentemente, e aumentando temperatura e conducibilità elettrica della sorgente. La vulnerabilità è mediamente alta.
- *Tipo C – Omogeneizzazione*: il comportamento per omogeneizzazione si verifica in un sistema carsico/fratturato, con un'ampia zona satura. Le acque appena infiltrate si muovono lentamente, causando lievi fluttuazioni di portata, mentre temperatura e conducibilità elettrica rimangono costanti (Nistor M., 2016). Con questo tipo di comportamento la sorgente ha una bassa vulnerabilità.

## 4. ANALISI DATI E DISCUSSIONE

I prossimi sottocapitoli evidenzieranno alcuni aspetti meteorologici e il comportamento delle sorgenti prese in analisi per la realizzazione di questa tesi sperimentale.

### 4.1 Precipitazioni e temperature

I dati delle precipitazioni rilevati dalle quattro stazioni pluviometriche prese in esame (Castelfranco Vento, Conegliano, Cavallino Treporti e Volpago del Montello) sono stati inseriti nel software statistico RStudio, analizzati e riportati nella seguente tabella (Tab. 3):

	Castelfranco	Conegliano	Volpago	Treporti	$P_{atm}$
Minimo	0,00	0,00	0,00	0,00	1003
1° quartile	0,00	0,00	0,00	0,00	1031
Mediana	0,00	0,00	0,00	0,00	1036
Media	0,13	0,14	0,14	0,09	1036
3° quartile	0,00	0,00	0,00	0,00	1041
Massimo	53,20	37,20	48,80	78,20	1065

Tab. 3: Dati statistici delle precipitazioni e della pressione atmosferica misurata a Cavallino Treporti

L'unità di misura delle precipitazioni è in mm, invece per la pressione atmosferica in cm. L'intervallo di tempo considerato va dal 06/08/2019 fino al 31/07/2024.

I grafici delle precipitazioni (Fig. 13) mostrano un andamento a simile per via delle stagionalità (sono più frequenti le precipitazioni in autunno e primavera) e per la vicinanza tra le stazioni, fatta ad esclusione per la stazione pluviometrica di Cavallino Treporti che non presenta delle notevoli corrispondenze con le altre tre.

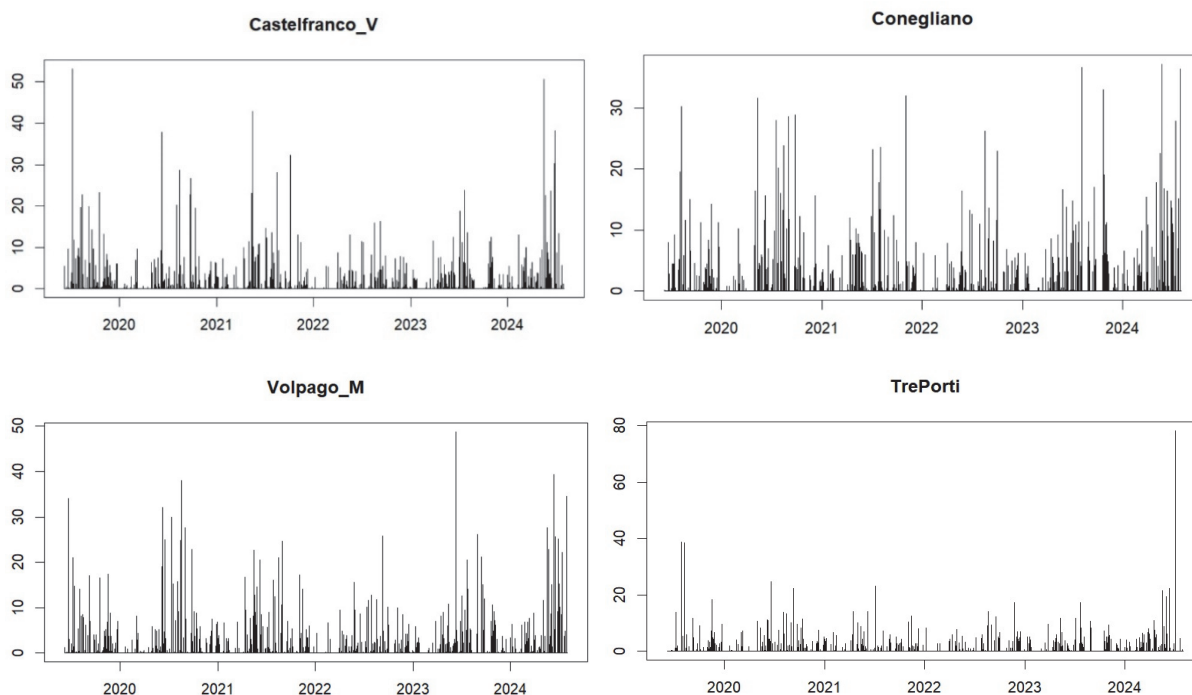


Figura 13: eventi pluviometrici, nell'asse delle ordinate è riportata l'intensità di pioggia espressa in mm, invece nell'asse delle ascisse il tempo in anni.

Negli istogrammi delle precipitazioni (Fig. 14) si osserva che la frequenza degli eventi piovosi è rappresentata in funzione della loro intensità. Poiché vengono registrate anche le precipitazioni con intensità pari a 0mm, è normale che le frequenze maggiori si concentrino tra 0 e 5 mm, di conseguenza, andando a sovrastare visivamente le precipitazioni con intensità maggiore di 10 mm.

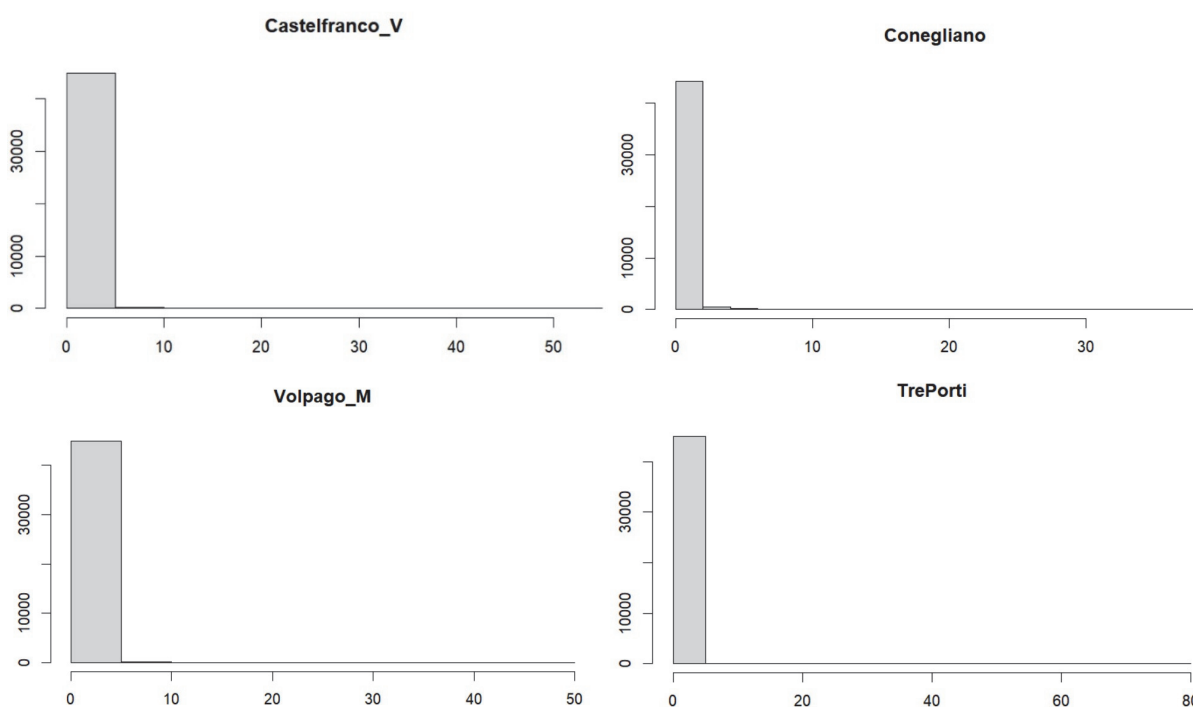


Figura 14: Istogrammi delle precipitazioni, dove nelle ordinate c'è la frequenza delle piogge, e nelle ascisse la quantità di piogge in mm.

Oltre alle precipitazioni, sono stati considerati anche i valori delle temperature, per permettere, se necessario, un confronto tra le variazioni della temperatura esterna e i valori della temperatura dell'acqua rilevati dai sensori di monitoraggio. Durante i periodi di secca, per esempio, si possono trovare delle correlazioni tra la temperatura misurata dalle stazioni meteorologiche e quelle registrate dagli strumenti.

I valori statistici delle quattro stazioni meteorologiche (Tab. 4) e i grafici delle temperature (Fig. 15) sono di seguito riportati:

	Castelfranco	Conegliano	Volpago	Treporti
Minimo	-6,70	-3,30	-4,90	-3,90
1° quartile	7,50	8,90	8,20	8,40
Mediana	14,20	14,90	14,20	14,80
Media	14,46	15,56	14,74	15,17
3° quartile	21,10	22,00	21,00	22,10
Massimo	38,10	37,30	37,00	35,40

Tab. 4: Dati statistici delle temperature registrate nelle quattro stazioni, nell'arco di tempo analizzato

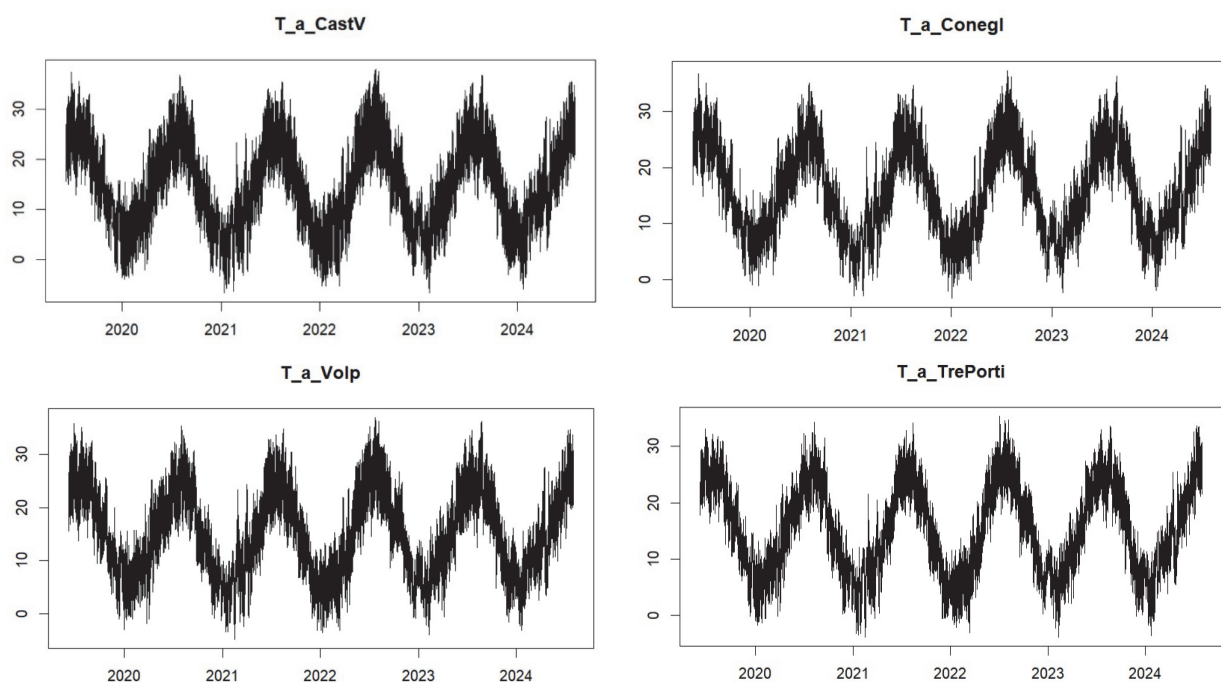


Figura 15: Dati delle temperature registrate dalle stazioni meteo, nell'asse delle ordinate sono riportati i valori delle temperature in C°, invece nelle ascisse la serie cronologica.

Si nota con molta chiarezza la variazione stagionale delle temperature in tutte e quattro le stazioni meteorologiche, con temperature basse che arrivano addirittura al di sotto dello zero termico nei mesi invernali, e temperature alte che superano tranquillamente i 30C° nei mesi estivi.

## 4.2 Sorgente Forame

La sorgente Forame, situata in una valle sul versante meridionale del Montello, rappresenta il punto di origine del torrente Giavera. Nel 1973, un grave incidente ambientale ha compromesso la qualità dell'acqua: un notevole sversamento di idrocarburi proveniente da un deposito militare nelle vicinanze ha inquinato le acque della sorgente. Nonostante gli sforzi compiuti con un intervento di bonifica di vasta portata, le acque della sorgente sono rimaste contaminate e non sono ancora potabili (Sauro U., Castiglioni B., 2005). Il sensore CTD-Diver (Fig. 16) installato presso la sorgente è esposto all'ambiente esterno e agli agenti atmosferici, ma protetto da un tubo di copertura. Tuttavia, a metà maggio dell'anno corrente, un'alluvione ha provocato un'eccezionale piena che è riuscita a staccare il sensore dal suo ancoraggio. Fortunatamente è stato successivamente ritrovato a qualche decina di metri di distanza dalla posizione precedente.



Figura 16: CTD-Diver della sorgente Forame racchiuso nel tubo di protezione.

### ➤ Analisi di portata della sorgente

La scala delle portate è un utile grafico per andare a determinare la portata della sorgente andando a misurare solamente il livello dell'acqua. Il grafico (Fig. 22) mostra una forte correlazione lineare tra i due parametri. Con un coefficiente di correlazione ( $R^2$ ) pari a 92,27%, la relazione lineare è molto ben definita e i parametri sono proporzionali tra loro. I due valori negativi delle altezze idrometriche sono stati ricavati sottraendo la pressione totale che misurava il CTD-Diver nella sorgente e la pressione atmosferica della stazione meteorologica di Cavallino Treporti. In realtà, la pressione atmosferica nella sorgente sarebbe minore rispetto a quella misurata della stazione a Cavallino perché è ad un'altitudine maggiore (ed è per questo che i valori sono risultati leggermente negativi). I due valori negativi dei livelli dell'acqua sono



stati comunque utilizzati per la rappresentazione del grafico essendo in linea con la retta (più punti ci sono, maggiore è l'accuratezza del grafico).

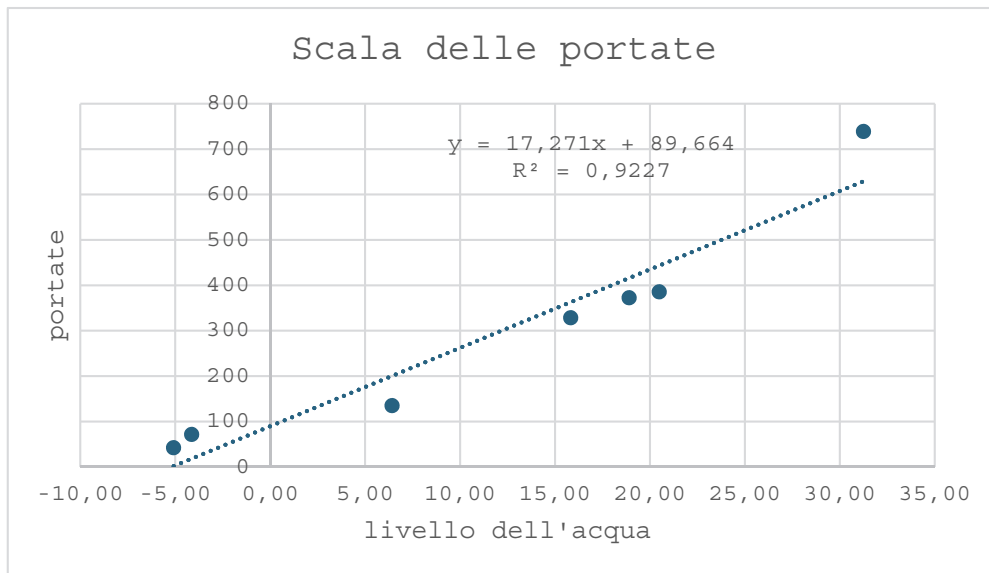


Figura 22: Scala delle portate della sorgente Forame.



Figura 23: Cospicuo flusso d'acqua della sorgente Forame



Figura 24: Misurazione della velocità del flusso mediante mulinello idrometrico.

## ➤ Valori statistici e serie temporali dei parametri analizzati

Di seguito vengono riportati i valori statistici della sorgente misurati dal 06/08/2019 al 31/07/2024 (Tab. 5):

	Minimo	1° quartile	Mediana	Media	3° quartile	Massimo
Livello (cm)	0,00	2,13	4,83	8,09	10,29	91,47
Portata (L/s)	89,68	126,52	173,14	229,35	267,41	1669,48
Temperatura (°C)	7,07	1,99	12,06	12,04	12,13	16,44
EC (mS/cm)	0,00	0,51	0,53	0,52	0,54	0,72

Tab. 5: Valori statistici della sorgente Forame analizzati rilevati nell'arco di tempo analizzato.

Il monitoraggio dei quattro parametri della sorgente ha generato i seguenti grafici (Fig. 17):

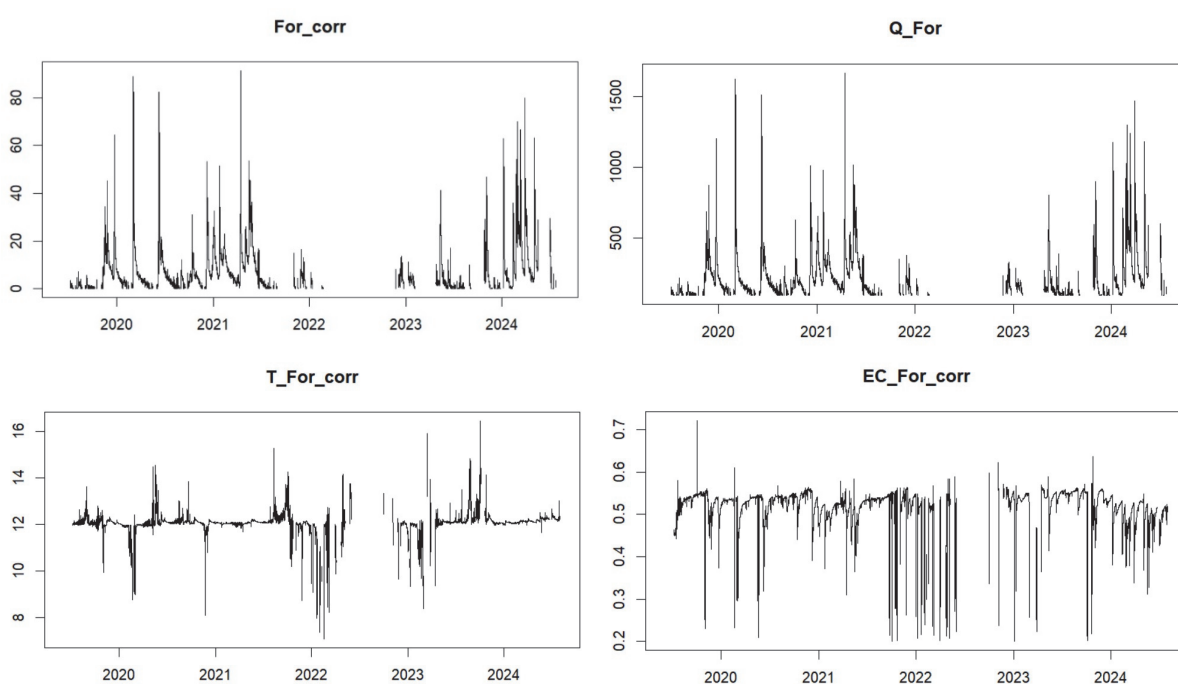


Figura 17: Serie temporali dei valori registrati nel monitoraggio della sorgente.

Il grafico “*For\_corr*” riporta i valori del livello dell’acqua (cm) nell’asse delle ordinate, e la serie temporale nell’asse delle ascisse. Si possono notare con chiarezza i periodi di secca, per esempio tra il 2022 e il 2023 c’è stato un periodo prolungato dove non venivano registrati i valori del livello.

Nel grafico “*Q\_For*” vengono rappresentate nell’asse delle ordinate i valori di portata (L/s) e le serie temporali nell’asse delle ascisse. Questi primi due grafici hanno un andamento a simile perché il grafico delle portate ha una relazione lineare con il grafico dei livelli di flusso, con l’aumentare del primo valore, aumenta linearmente anche il secondo.

Il grafico “*T\_For\_corr*” riporta le temperature (°C) nelle ordinate e sempre la serie temporale nelle ascisse. Il tratto vuoto nel grafico si riconduce ai periodi di secca, durante i quali il sensore ha rilevato la temperatura dell’aria anziché quella dell’acqua, Questi dati sono stati rimossi per evitare di compromettere l’accuratezza dei risultati.

Nell’ultimo grafico “*EC\_For\_corr*” sono riportati i valori di conducibilità elettrica (mS/cm) nell’asse delle ordinate e sempre la serie temporale nell’asse delle ascisse. I picchi “negativi” registrano dei bassi valori di EC coincidono con gli aumenti delle portate.

### ➤ FDC (Flow Duration Curve)

Nel grafico FDC (Fig. 18) vengono rappresentate nelle ordinate le portate (L/s) in ordine decrescente, senza tener conto della serie cronologica, invece nell’asse delle ascisse la percentuale di portate superiori a quel determinato valore. L’analisi del grafico ha rilevato una chiara pendenza iniziale (fino a circa il 15%), che indica una rapida risposta del sistema carsico. Successivamente, la pendenza della curva si attenua raggiungendo i valori più bassi, e quindi, suggerendo la presenza di un flusso di base legato alla componente più fratturata del sistema (Narda G., 2011). Per capire meglio il grafico, prendiamo come esempio il 20% che corrisponde a circa 500 L/s; ciò vuol dire che per il 20% delle portate, la sorgente possiede una portata maggiore di 500 L/s.

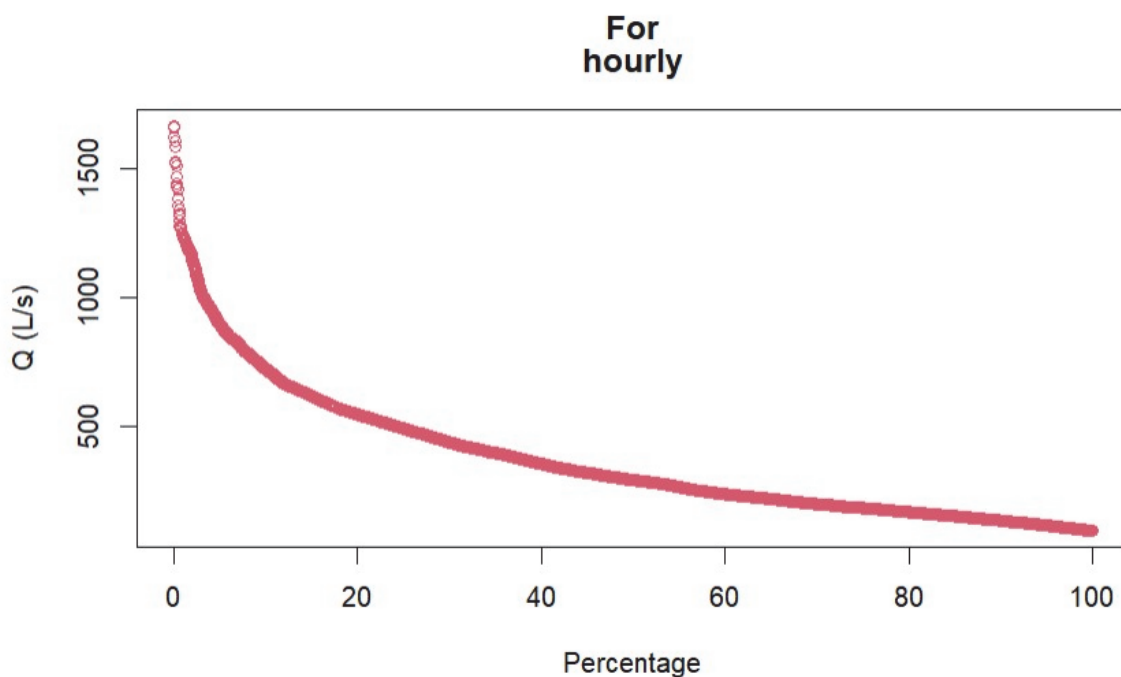


Figura 18: FDC della sorgente Forame.

### ➤ ACF (Autocorrelation Function)

Nel grafico ACF (Fig. 19) è riportato il coefficiente di correlazione nell'asse delle ordinate e il periodo di tempo (lag time) nell'asse delle ascisse. La forte pendenza iniziale (fino a circa 200 ore) testimonia la scarsa memoria della sorgente, ovvero il sistema risponde rapidamente alle variazioni esterne, come piogge o siccità, senza un effetto prolungato nel tempo. Invece, nel tratto costante (da circa 200 a 280 ore) si evidenzia un sistema con un grado di carsismo limitato, dotato quindi di una lunga memoria, e andando a conservare le acque del sottosuolo ritardandone la fuoriuscita. Al di sotto della linea tratteggiata "Decorrelation lag time" i dati non sono più correlati.

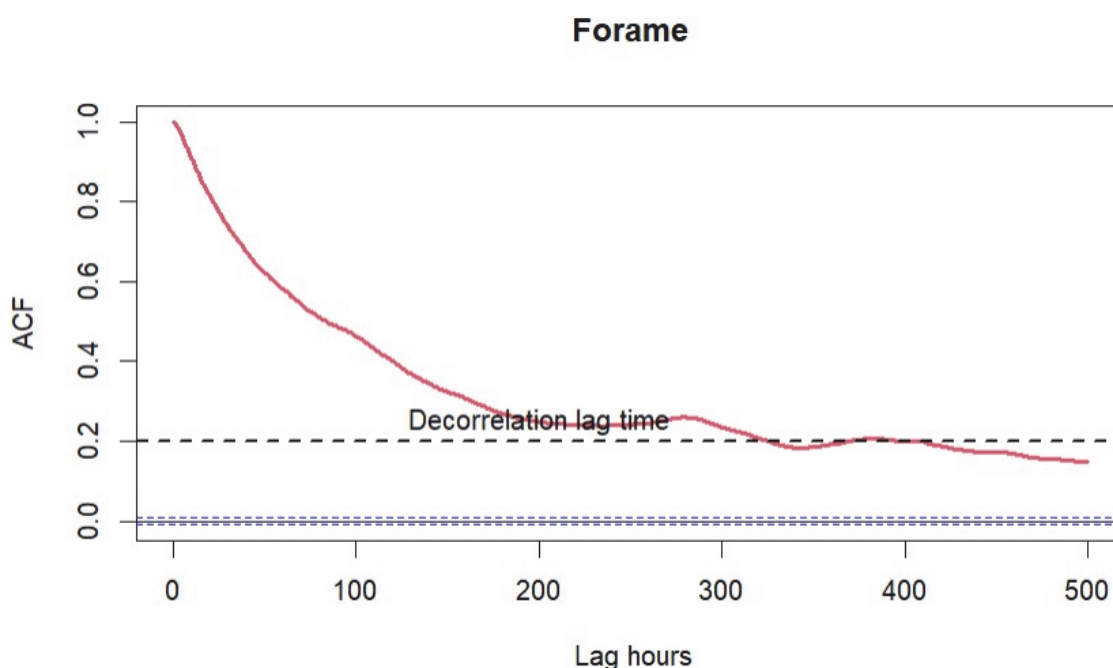


Figura 19: ACF della sorgente Forame

### ➤ CCF (Cross-Correlation Function)

Nei grafici CCF (Fig. 20) viene rappresentata la relazione tra le precipitazioni nelle quattro stazioni meteorologiche e la portata della sorgente Forame. Nell'asse delle ordinate viene riportato il coefficiente di correlazione (se il valore del coefficiente è positivo, significa che esiste una correlazione positiva tra i due valori, ovvero all'aumentare delle precipitazioni aumenta la portata; al contrario, se il coefficiente è negativo le due serie di valori sono inversamente proporzionali), invece, nell'asse delle ascisse il tempo. Analizzando i grafici, che hanno un andamento iniziale a simile, si osserva un primo picco positivo intorno alla terza ora dall'evento di ricarica, ovvero dall'inizio delle precipitazioni. Questo indica che l'acqua

impiega circa tre ore a raggiungere la sorgente e a sgorgare, a partire dal momento in cui si verifica la pioggia nell'area di ricarica. Le linee tratteggiate racchiudono un intervallo di valori del coefficiente intorno allo zero, dove, all'interno del quale i dati non sono più correlati, quindi, insignificanti.

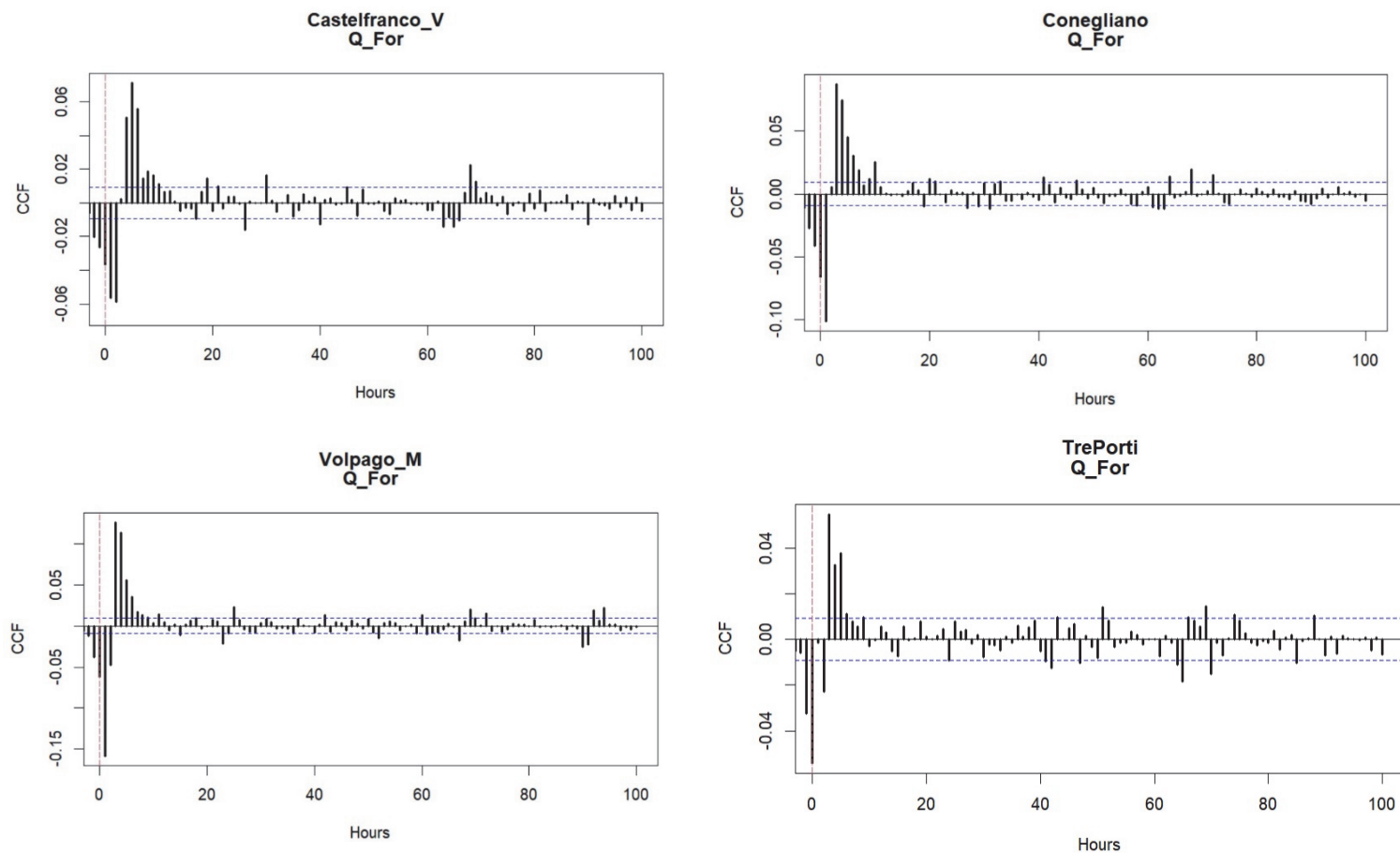


Figura 20: CCF tra le precipitazioni registrate dalle quattro stazioni pluviometriche e la portata della sorgente Forame.

Nei grafici che seguono vengono riportate le CCF tra Q vs T e Q vs EC (Fig. 21):

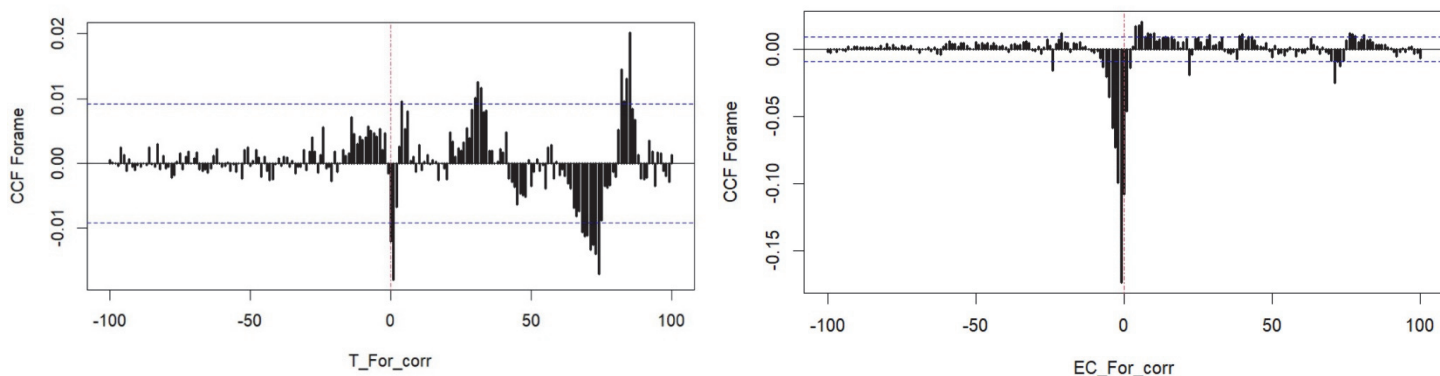


Figura 21: Nel grafico a sinistra è riportata la relazione tra la Q e la T; invece, nel grafico a destra è rappresentata la relazione tra la Q e la EC.

Nel grafico a sinistra si compara la portata (L/s) con la temperatura dell'acqua (°C), dove i picchi positivi rappresentano una correlazione positiva tra i due parametri, invece, quelli negativi una relazione inversamente proporzionale. Nello specifico, i picchi negativi intorno al tempo 0 indicano che all'aumentare o al diminuire della temperatura, la portata reagisce in senso opposto.

Invece, nel grafico a destra si mette a confronto la portata con la conducibilità elettrica nel tempo. Si nota con chiarezza il principale picco negativo attorno al tempo zero, suggerendo quindi una correlazione negativa tra i due parametri. Un esempio pratico potrebbe essere: a seguito di un evento di precipitazione, l'aumento della portata della sorgente porta ad una diminuzione della conducibilità elettrica, poiché l'acqua piovana, che contiene meno ioni rispetto all'acqua di falda, diluisce quest'ultima, riducendo la conducibilità complessiva.

### ➤ **Indice VESPA**

I valori del coefficiente e del fattore di correlazione (Tab. 6) sono stati calcolati mediante le formule descritte nel capitolo precedente e di seguito riportati:

	$\rho$	$c(\rho)$
Forame	-0,867	0,867

Tab. 6: Valori determinanti della dinamica della sorgente Forame

Il valore del coefficiente di correlazione  $\rho$  compreso tra -1 e -0,2 indica che il comportamento della sorgente è di tipo "sostituzione"; quindi, è presente un sistema carsico molto sviluppato e l'acqua appena infiltrata impiega poco tempo per arrivare alla sorgente. L'intervallo di tempo considerato per il calcolo di questi due parametri va dal 12/01/2024 al 31/07/2024, periodo in cui la sorgente non è andata in secca.

### 4.3 Sorgente Tavarano Lungo

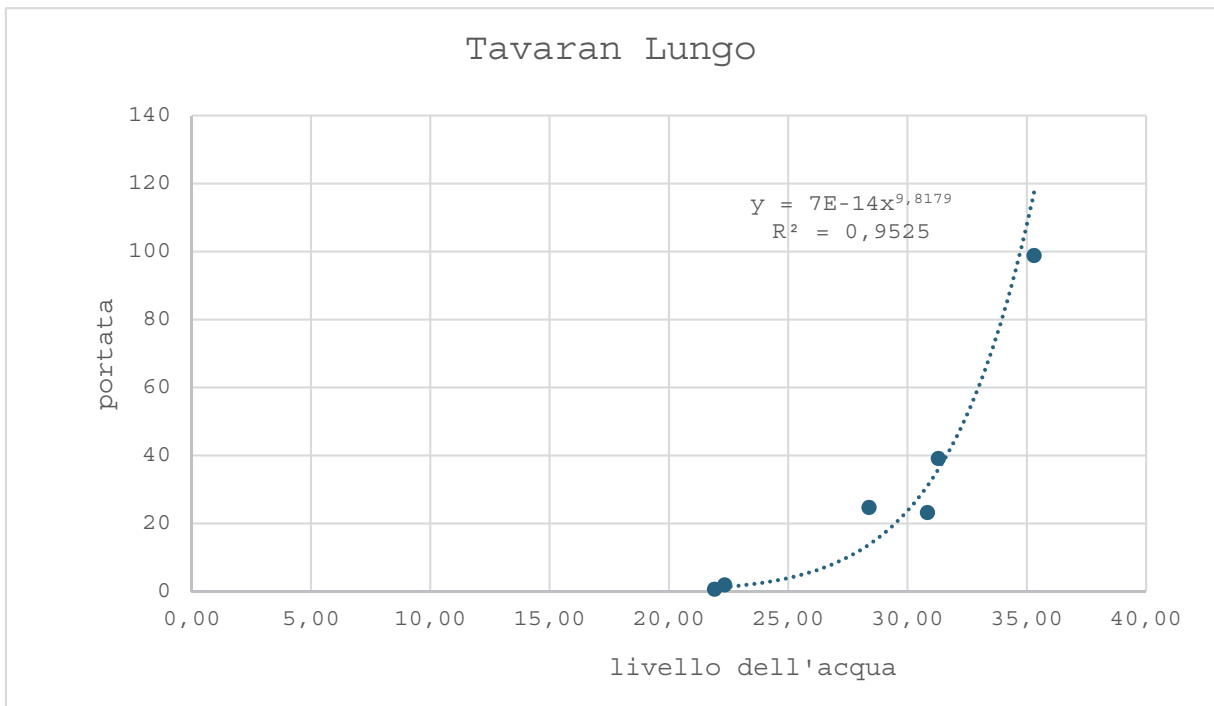
La sorgente del Tavarano Lungo (Fig. 25) è collocata lungo il lato nord del Montello, poco distante dal fiume Piave. La sorgente ha origine all'interno di una grotta profonda circa 300 metri, e accessibile solamente da esperti con attrezzature adeguate. La cavità si apre sul fondo di una dolina che raccoglie l'acqua di un ruscello perenne. Questo ruscello esce dall'imbocco della grotta, e dopo pochi metri, scompare all'interno di un cunicolo sotterraneo, probabilmente come una consecuzione naturale del sistema carsico. In questa sorgente, il sensore CTD-Diver era originariamente posizionato all'interno di una vasca di contenimento, situata alla fine della grotta. Successivamente, è stato spostato all'ingresso della cavità, protetto da un tubo, per facilitarne il recupero.



*Figura 25: Apertura della cavità per raggiungere l'inizio della sorgente Tavarano Lungo*

#### ➤ **Analisi di portata della sorgente**

La scala delle portate è un utile grafico per andare a determinare la portata della sorgente andando a misurare solamente il livello dell'acqua. Il grafico (Fig. 31) mostra una forte correlazione tra i due parametri. Con un coefficiente di correlazione ( $R^2$ ) pari a 97,02%, la relazione è molto ben definita. Come nella sorgente Forame, sono stati utilizzati i valori delle portate e dei livelli dell'acqua monitorati manualmente con cadenza circa mensile.



*Figura 31: Scala delle portate sorgente Tavaran Lungo.*



*Figura 32: Sezione costruita per il calcolo della portata nella sorgente del Tavaran Lungo.*



## ➤ Valori statistici e serie temporali dei parametri analizzati

Di seguito vengono riportati i valori statistici della sorgente misurati dal 06/08/2019 al 31/07/2024 (Tab. 7):

	Minimo	1° quartile	Mediana	Media	3° quartile	Massimo
Livello (cm)	17,00	20,78	22,85	23,10	24,68	46,08
Portata (L/s)	0,08	0,60	1,54	6,25	3,28	1504,08
Temperatura (°C)	11,35	12,39	12,50	12,52	12,62	14,27
EC (mS/cm)	0,22	0,41	0,44	0,45	0,49	0,53

Tab. 7: Valori statistici della sorgente Tavarano Lungo analizzati rilevati nell'arco di tempo analizzato.

Il monitoraggio dei quattro parametri della sorgente ha generato i seguenti grafici (Fig. 26):

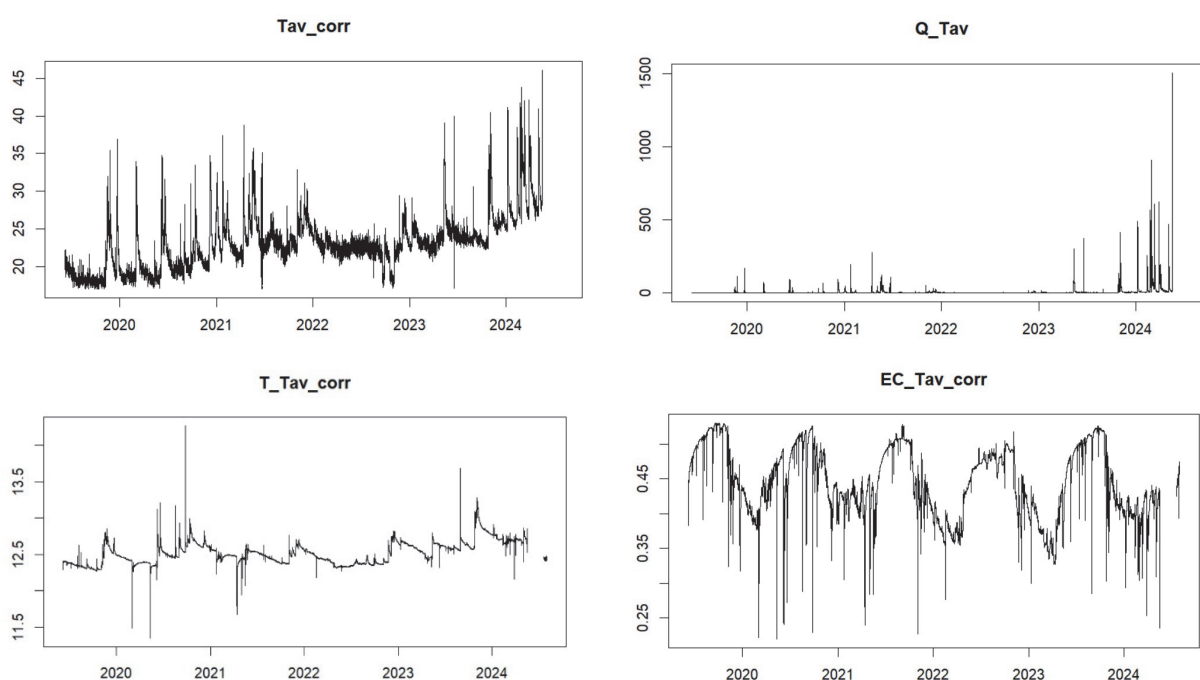


Figura 26: Serie temporali dei valori registrati nel monitoraggio della sorgente.

Il grafico “*Tav\_corr*” riporta i valori del livello dell’acqua (cm) nell’asse delle ordinate, e la serie temporale nell’asse delle ascisse. Si può notare una linea di tendenza con dei picchi “positivi” che rappresentano l’aumento dell’altezza idrometrica e, verso la fine del grafico (dal 2024) una crescita della media del livello d’acqua della sorgente.

Nel grafico “*Q\_Tav*” vengono rappresentate nell’asse delle ordinate i valori di portata (L/s) e le serie temporali nell’asse delle ascisse. All’inizio e a metà grafico c’è un andamento costante che misura portate nell’intervallo tra 0,5 e 2 L/s e mai pari a zero, dovuto dal fatto che

è una sorgente perenne. Solamente nell'ultimo periodo si sono registrati delle piene anomale (circa 1500 L/s) rappresentate dagli alti picchi, intorno al 17 maggio 2024.

Il grafico "*T\_Tav\_corr*" riporta le temperature (°C) nelle ordinate e sempre la serie temporale nelle ascisse. La linea principale ha un andamento abbastanza costante ma presenta dei picchi "positivi" e "negativi" che rappresentano lo sbalzo di temperatura dell'acqua.

Nell'ultimo grafico "*EC\_Tav\_corr*" sono riportati i valori di conducibilità elettrica (mS/cm) nell'asse delle ordinate e sempre la serie temporale nell'asse delle ascisse. I picchi "negativi" si nota che coincidono con gli eventi di innalzamento del livello dell'acqua dovuti alle precipitazioni, che anch'esse a loro volta vanno a diminuire la conducibilità elettrica della sorgente.

Un piccolo accorgimento: si può notare che nel grafico della temperatura e in quello della conducibilità ci sono dei valori in fondo al grafico separati da quelli precedenti; invece, per il grafico del livello e della portata i dati si fermano prima. Questo perché il sensore è stato spostato dalla vasca di contenimento all'apertura della cavità, andando a rilevare dei valori falsati di livello e portata (dunque sono stati rimossi quei valori per analizzare meglio i grafici).

### ➤ FDC (Flow Duration Curve)

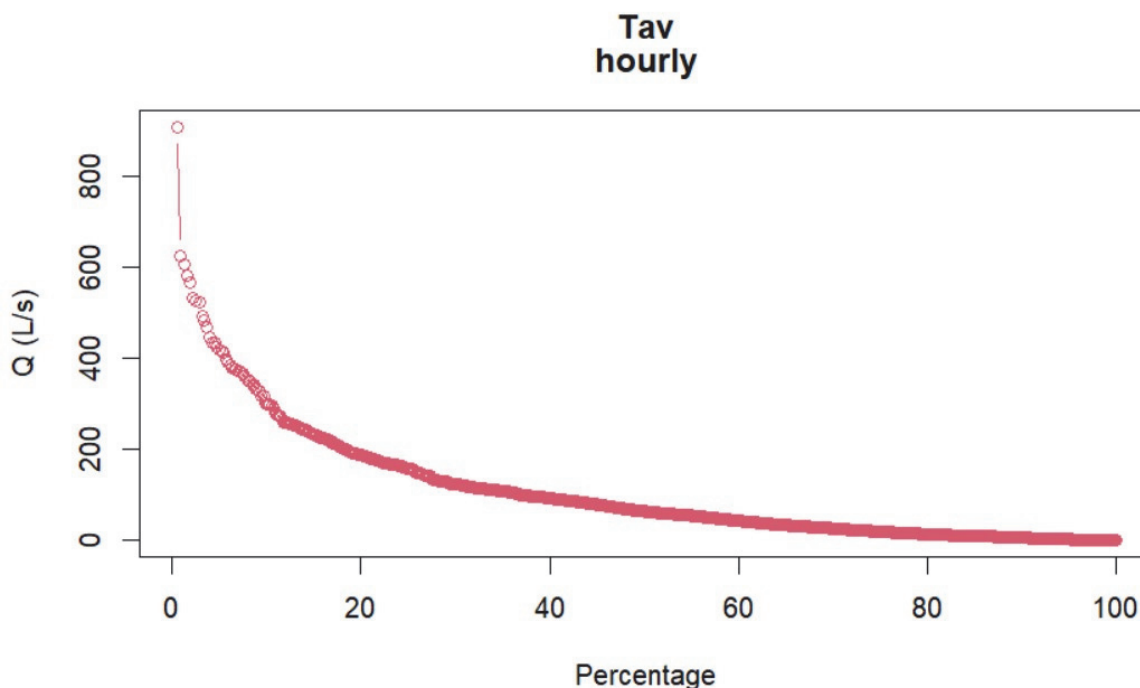


Figura 27: FDC della sorgente Tavarano Lungo.

Nel grafico FDC (Fig. 27) vengono rappresentate nelle ordinate le portate (L/s) in ordine decrescente, senza tener conto della serie cronologica, invece nell'asse delle ascisse la loro percentuale. Il punto più alto (attorno a 1000 L/s) è dovuto dall'anomala alluvione avvenuta a maggio 2024, che nel grafico sottostante porta una pronunciata pendenza iniziale, descrivendo un buon sistema carsico con un rapido svuotamento delle acque. Successivamente la pendenza della curva è molto lieve, e ciò sta ad indicare una bassa permeabilità dell'acquifero con un comportamento da flusso di base ed un maggior immagazzinamento.

### ➤ ACF (Autocorrelation Function)

Nel grafico ACF (Fig. 28) è riportato il coefficiente di correlazione nell'asse delle ordinate e il periodo di tempo nell'asse delle ascisse. La curva mostra una pendenza appena accennata, con un'inclinazione che risulta poco pronunciata. Questo sta ad indicare che gli eventi che succedono nel presente possono influenzare la sorgente per un periodo prolungato (lunga memoria dell'acquifero), definendo il sistema poco carsificato e con una componente fratturata di maggior intensità. Un'altra informazione che ci riferisce questo grafico è che le portate della sorgente Tavarano Lungo sono molto simili tra loro nel tempo, definendola una sorgente perenne.

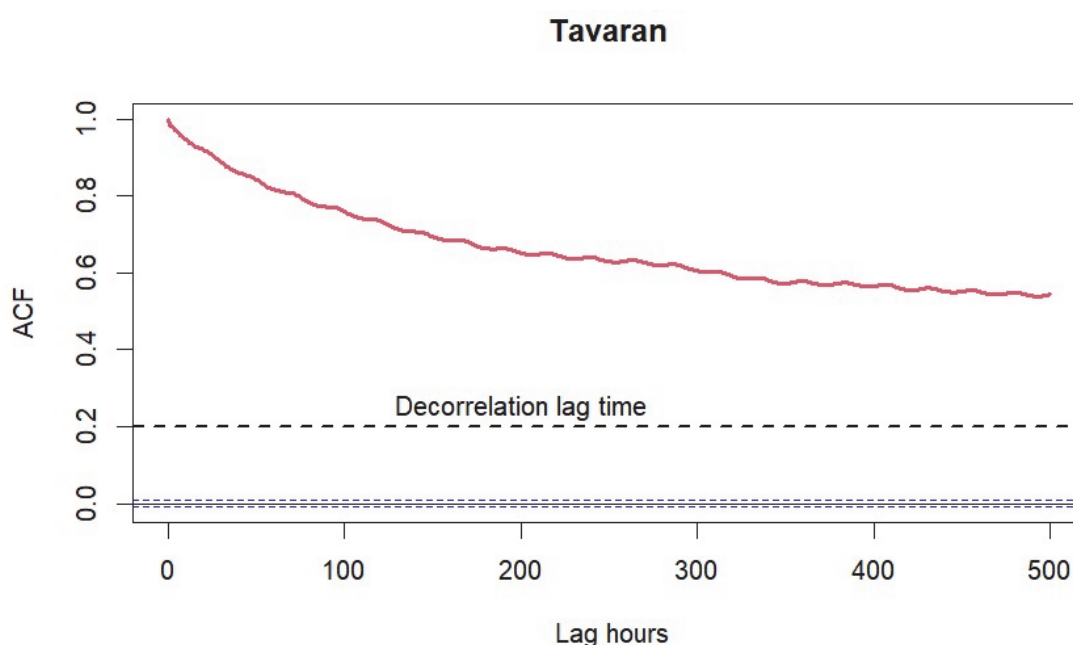


Figura 28: ACF della sorgente Tavarano Lungo.

## ➤ CCF (Cross-Correlation Function)

Nei grafici CCF (Fig. 29) viene rappresentata la relazione tra le precipitazioni nelle quattro stazioni meteorologiche e la portata della sorgente Tavarano Lungo. Nell'asse delle ordinate viene riportato il coefficiente di correlazione, invece, nell'asse delle ascisse il tempo di corruzione (quanto tempo passa prima che l'acqua piovana si infiltri e raggiunga la sorgente). Osservando i grafici si nota un picco negativo attorno a lag 0, ovvero una correlazione negativa tra i due parametri, ma dopo circa tre ore ci sono picchi positivi che definiscono una proporzionalità diretta.

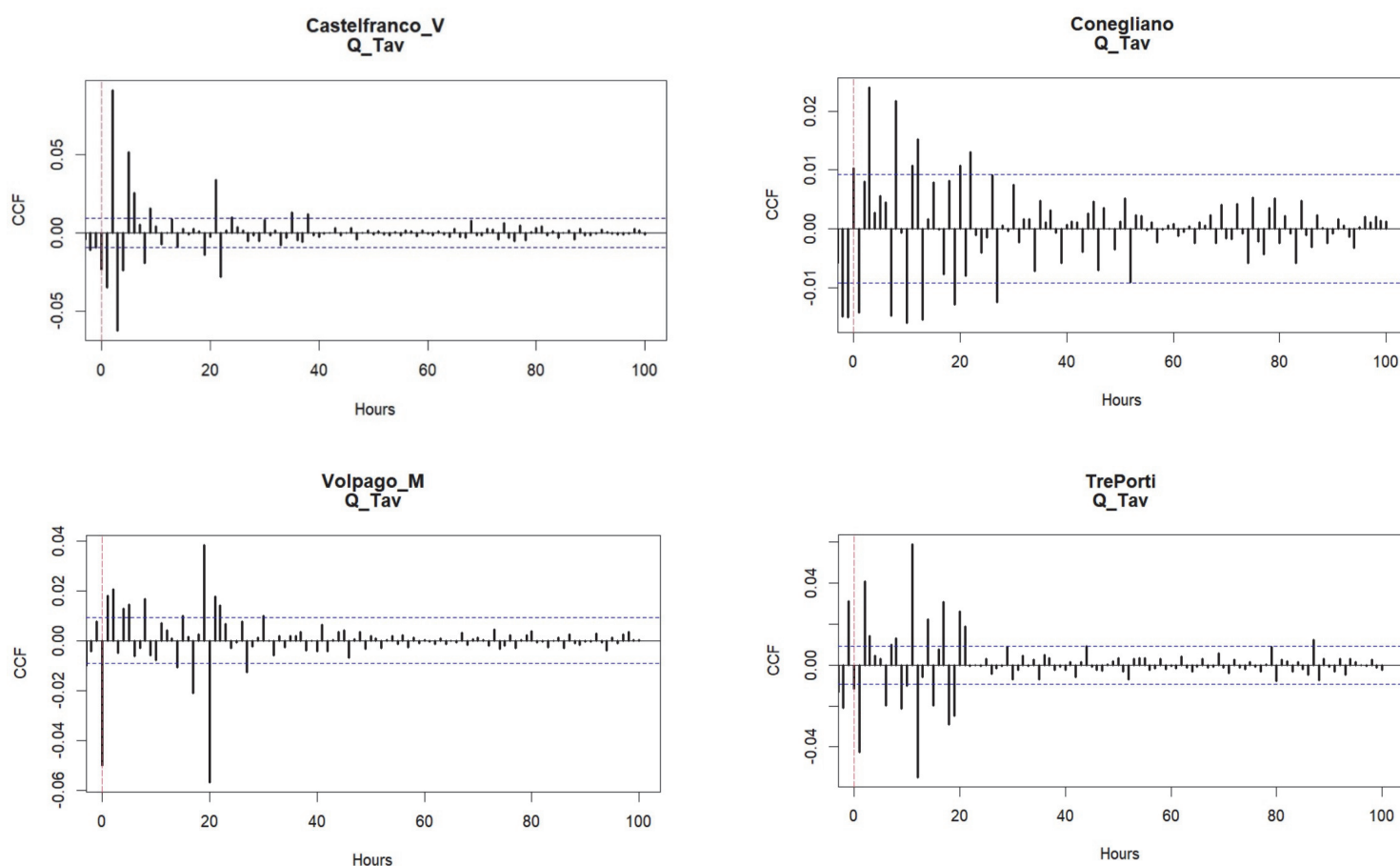


Figura 29: CCF tra la portata della sorgente Tavarano Lungo e le precipitazioni registrate dalle quattro stazioni pluviometriche.

Nei grafici che seguono vengono riportate le CCF tra Q vs T e Q vs EC (Fig. 30):

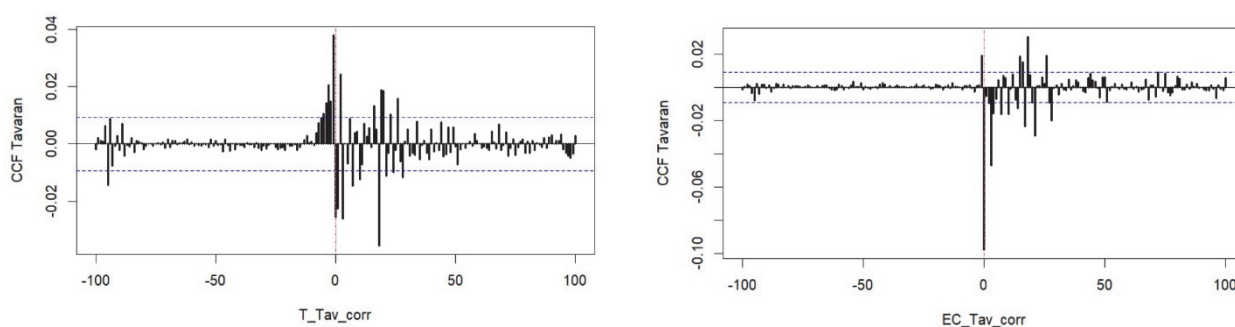


Figura 30: CCF nel grafico a sinistra tra temperatura e portata; CCF nel grafico a destra tra conducibilità elettrica e portata.

Nel grafico a sinistra dove si compara la temperatura dell'acqua con la portata della sorgente si osservano dei picchi negativi a lag 0, suggerendo una correlazione negativa tra i due parametri, suggerendo un comportamento di spiazzamento. Inizialmente all'aumentare o diminuire della temperatura, la portata reagisce in senso opposto, successivamente viene raffigurata un'alternanza di picchi positivi e negativi ma di bassa intensità, quindi insignificanti.

Nel grafico a destra si mette a confronto la portata della sorgente con la conducibilità elettrica dell'acqua. Analizzando il grafico si osserva un principale picco negativo a lag 0, evidenziando quindi una correlazione negativa; ovvero, un aumento di portata dovuto per esempio ad un evento di precipitazioni porta ad una diminuzione della conducibilità elettrica, fino a circa 20 ore dopo l'evento al tempo 0.

### ➤ **Indice VESPA**

I valori del coefficiente e del fattore di correlazione (Tab. 8) sono stati calcolati mediante le formule descritte nel capitolo precedente e di seguito riportati:

	$\rho$	$c(\rho)$
Tavarani Lungo	-0,731	0,731

Tab. 8: Valori determinanti della dinamica della sorgente Tavarani Lungo

Il valore del coefficiente di correlazione  $\rho$  compreso tra -1 e -0,2 indica che il comportamento della sorgente è di tipo sostituzione. L'intervallo di tempo considerato per il calcolo dell'indice VESPA va dal 12/01/2024 al 31/07/2024.

## 4.4 Confronto tra le due sorgenti

Il confronto del comportamento tra le due sorgenti carsiche presentate è molto utile per comprendere la dinamica idrogeologica, ovvero, come le sorgenti possono rispondere in seguito a eventi di precipitazioni o periodi di secca (quindi valutare la velocità di risposta e i cambiamenti di portata). Studiando le differenze tra le due sorgenti è possibile determinare la vulnerabilità all'inquinamento, oppure quale delle due sia più sostenibile per l'uso umano a lungo termine. Un ulteriore approfondimento potrebbe essere utile per osservare come i cambiamenti climatici stiano influenzando il ciclo idrologico locale, e quindi adattare un uso sostenibile delle risorse idriche.

### ➤ Differenze tra serie temporali

Nel grafico sottostante (Fig. 33) viene messo a confronto il livello delle due sorgenti.

Nella prima sorgente sono stati registrati periodi di secca tra il 2022 e il 2023; invece, ciò non è accaduto per la seconda sorgente. Un'ulteriore differenza risiede nell'intensità dei valori registrati, con picchi nel Forame che hanno raggiunto un'altezza doppia rispetto a quelli osservati nel Tavarán.

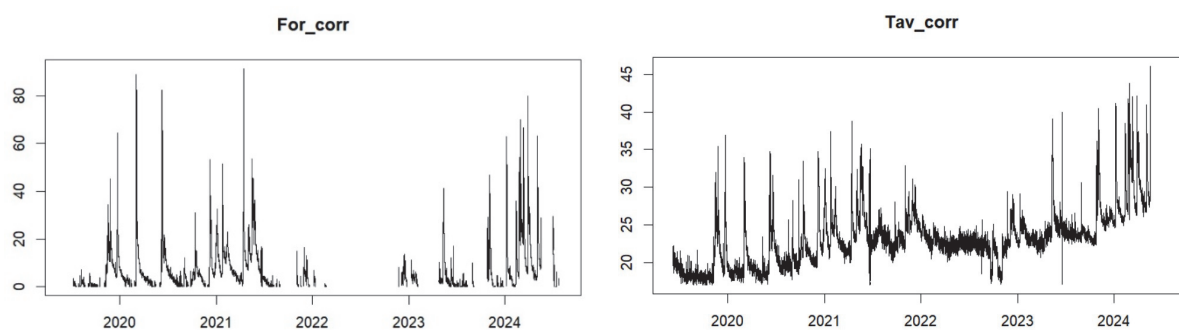


Figura 33: Differenze di livello tra le due sorgenti.

Il confronto tra le portate delle due sorgenti (Fig. 34) ha confermato un andamento discontinuo per il Forame, e un andamento più costante per il Tavarán. Per entrambe le sorgenti l'ultimo periodo ha segnato un aumento delle portate a causa delle forti piogge avvenute ad aprile e maggio di quest'anno. Purtroppo, a seguito di un evento anomalo di precipitazione dell'ultimo periodo il sensore CTD-Diver del Forame si è staccato dall'ancoraggio e i dati sono andati perduti.

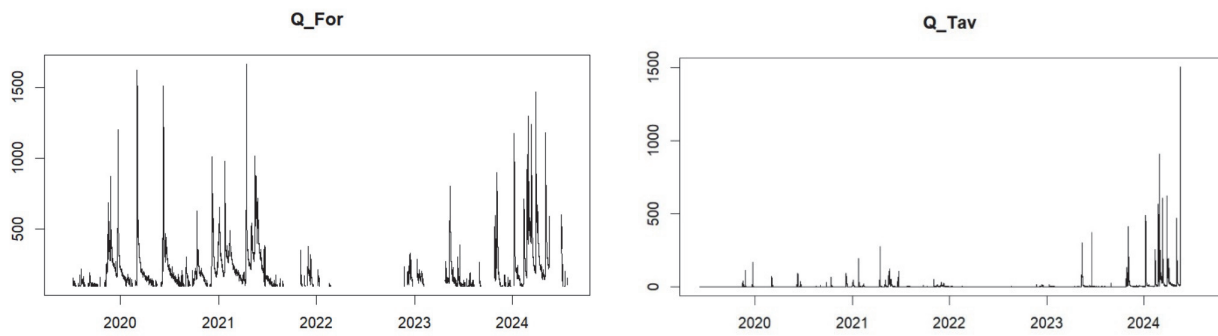


Figura 34: Differenze di portate tra le due sorgenti.

### ➤ Differenze tra le FDC

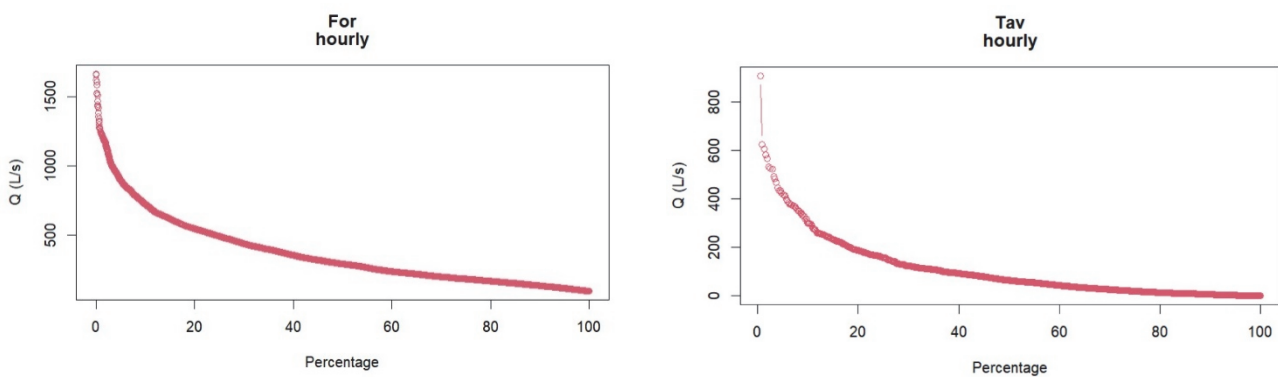


Figura 35: Differenze delle FDC tra le due sorgenti.

Mettendo a confronto i due grafici delle FDC (Fig. 35) si può chiaramente vedere che la sorgente del Forame ha una portata molto maggiore rispetto al Tavarano. Inoltre, la pendenza della curva nel primo grafico è più accentuata, suggerendo più sbalzi di portata. Prendendo come esempio il 20% in entrambi i grafici: per la sorgente del Forame, il 20% delle portate superano circa i 500L/s, invece per il Tavarano il 20% delle portate superano circa i 200L/s. Quindi il maggior afflusso idrico che alimenta il Piave è ad opera della sorgente Forame.

### ➤ Differenze tra le ACF

In questo tipo di grafico (Fig. 36) si possono notare molto facilmente le differenze tra le due sorgenti. Nella funzione di autocorrelazione (ACF) del Forame si nota una brusca pendenza iniziale che sta ad indicare le elevate differenze tra le portate, e quindi dei condotti carsici molto sviluppati che fanno defluire velocemente l'acqua piovana; invece, nell'ACF del Tavarano lungo la pendenza della curva è poco pronunciata, indicandoci che le portate sono molto simili

tra loro, quindi mantenendo più memoria rispetto al Forame. Anche il Tavarano Lungo, come il Forame, è un sistema carsico, ma si differenzia per la predominanza di un sistema fratturato dotato di maggiore immagazzinamento. Questo consente all'acqua piovana di infiltrarsi e di essere rilasciata lentamente nella falda acquifera, garantendo un flusso idrico più graduale e continuo rispetto al Forame, dove i condotti carsici favoriscono una circolazione più rapida.

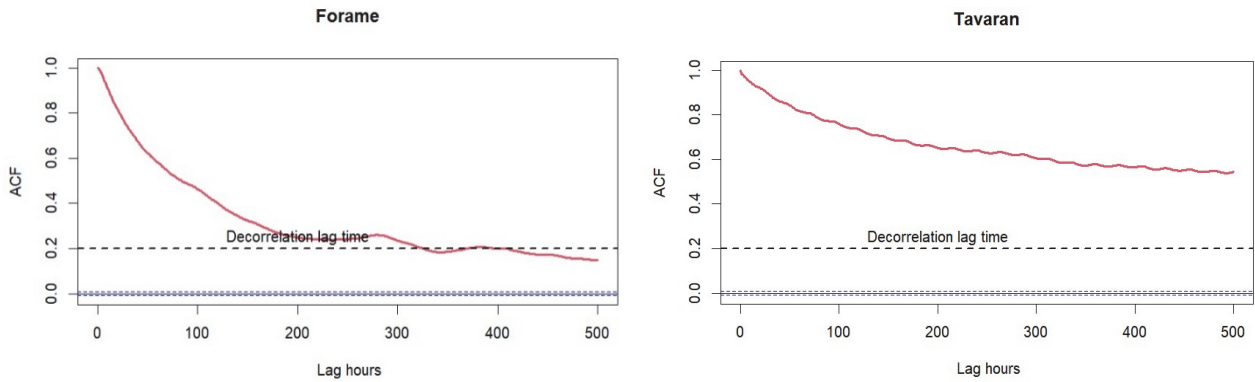


Figura 36: Differenze delle ACF tra le due sorgenti.

### ➤ Differenze tra le CCF

Nei seguenti grafici (Fig. 37) si nota che la sorgente del Tavarano Lungo scarica circa una o due ore prima rispetto alla sorgente Forame. Questo dovrebbe indicare che il Tavarano ha un sistema carsico più sviluppato rispetto al Forame dato che l'acqua arriva prima nella sorgente; però, i picchi positivi successivi a quello maggiore ci suggeriscono che il Tavarano sta ancora scaricando dopo l'evento di precipitazione.

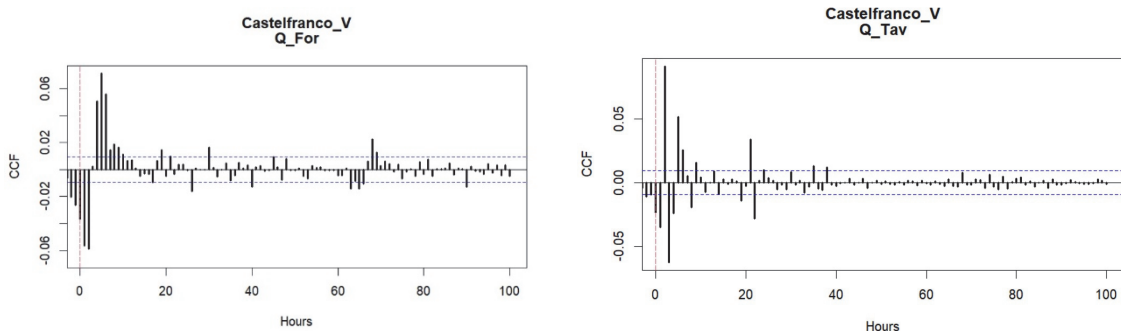


Figura 37: Differenze delle CCF a Castelfranco tra le due sorgenti.

Stessa cosa vale per il grafico sottostante (Fig.38), dove si considerano le precipitazioni a Conegliano, mostrando un la sorgente del Tavarano più complessa, con un'alternanza di picchi



positivi e negativi fino a poco dopo le 20 ore. Invece, nel Forame la situazione si stabilizza nelle prime dieci ore circa.

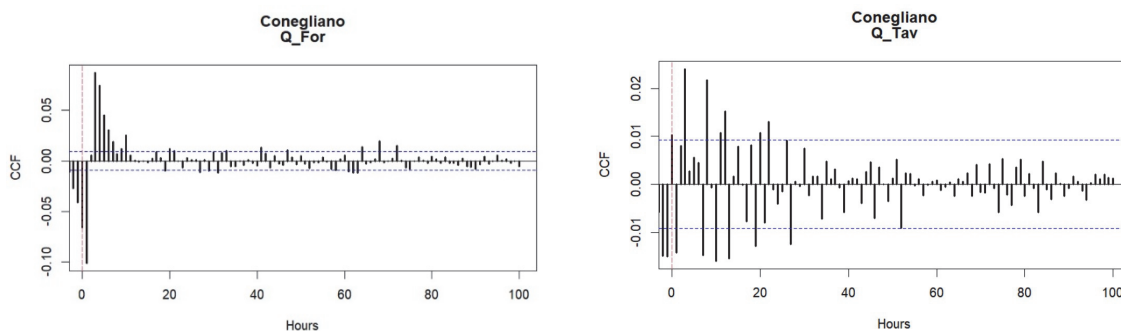
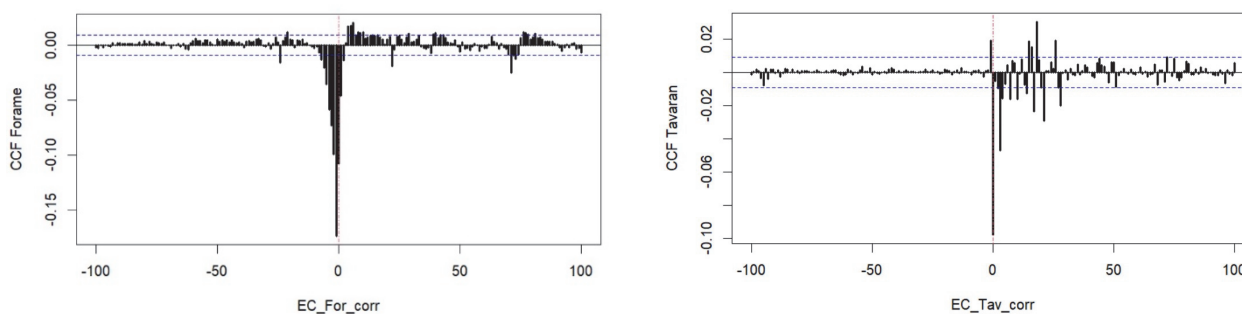


Figura 38: Differenze delle CCF a Conegliano tra le due sorgenti.

Di seguito vengono riportati i grafici che rappresentano le differenze tra la conducibilità elettrica e la portata delle due sorgenti (Fig. 39):



I due grafici mostrano una forte correlazione negativa al tempo zero, dovuta probabilmente ad un evento di precipitazioni che causano un aumento di portata con un abbassamento di conducibilità elettrica. Mentre nel grafico del Forame la situazione si stabilizza dopo poche ore; nel grafico del Tavarano la situazione è irregolare dopo il tempo 0 indicandoci che l'acqua viene accumulata all'interno della falda per un periodo più prolungato prima di sgorgare dalla sorgente.



## 5. CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di comprendere in maniera dettagliata il comportamento che assumono le due sorgenti carsiche (Forame e Tavarano Lungo) monitorate periodicamente dal 2019. Il rilevamento dei dati è stato effettuato attraverso dei sensori CTD-Diver installati nelle sorgenti, e misuravano i parametri di livello (cm), temperatura (°C) e conducibilità elettrica dell'acqua (mS/cm).

Il grafico FDC esprime la % delle portate che superano un certo valore, e quindi la memoria della sorgente: la sorgente del Forame ha delle portate molto più cospicue (quasi il doppio) rispetto alla sorgente del Tavarano Lungo.

L'ACF mostra la lunghezza della memoria della sorgente, ovvero le variazioni di portata nel tempo. Nel caso del Tavarano Lungo le portate sono molto simili tra loro (anche in periodi di magra) per l'azione del continuo deflusso di base, quindi la pendenza della curva sarà poco pronunciata. Invece, il Forame ha una memoria molto più corta perché l'acqua appena infiltrata sgorga velocemente dalla sorgente, comportando grosse variazioni di portata.

I grafici delle CCF tra le portate e le precipitazioni, tra le portate e le temperature e tra le portate e la conducibilità elettrica hanno evidenziato il tempo di risposta dell'acquifero ad un evento di precipitazione. Tempi di risposta più brevi per la sorgente del Forame, e tempi di risposta più lunghi per la sorgente del Tavarano Lungo.

In definitiva, il comportamento della sorgente del Forame rispecchia bene quello di un sistema carsico con dei condotti molto ampi, andando a scaricare velocemente l'acqua accumulata dalla falda e mostrando delle grosse variazioni di portata. Per quanto riguarda il comportamento della sorgente del Tavarano Lungo la situazione è più complicata perché, anch'esso come il Forame è un sistema carsico, però presenta una parte rilevante di sistema fratturato. Ciò significa che in periodi di precipitazioni intense il Tavarano assumerà un comportamento molto simile al Forame andando a scaricare velocemente l'acqua infiltrata; invece, nei periodi di siccità, il Tavarano riesce a mantenere una portata minima grazie al deflusso di base garantito dal sistema fratturato, che rilascia l'acqua in maniera più graduale. Questo meccanismo non è presente nel Forame, il quale, in assenza di precipitazioni, tende invece a prosciugarsi, registrando periodi di secca. Con una situazione di precipitazioni regolari la differenza tra le due sorgenti sta nel fatto che il Forame scarica velocemente l'acqua infiltrata, invece, il Tavarano la trattiene per più tempo all'interno del sistema.



## BIBLIOGRAFIA

1. Agostini S., 2011, *Lineamenti geomorfologici della grotta di Lamalunga*.
2. Benedetti L., Tapponnier P., Geoffrey C. P. King, Bertrand M., Manighetti I., 2000, *Growth folding and thrusting in the Monetllo region, Veneto, northern Italy*.
3. Chen X., Zhang Z., Chen X., Shi P., 2013, *Quantifying time lag of epikarst-spring hydrograph response to rainfall using correlation and spectral analyses*, *Hydrogeology Journal*, pp. 1619-1631.
4. De Waele, J., 2017, *Karst processes and landforms. The International Encyclopedia of Geography*: New York, John Wiley and Sons.
5. De Weale J., Piccini L., 2008, *Speleogenesi e morfologia dei sistemi carsici in rocce carbonatiche*, *Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello di Geomorfologia Carsica*, pp. 24-58.
6. Fabbri P., Torresan F., et al., 2020, *Defining the hydrogeological behavior of karst springs through an integrated analysis: a case study in the Berici Mountains area (Vicenza, NE Italy)*, *Hydrogeology Journal*, pp. 1229- 1247.
7. Ferrarese F., Sauro U., Tonello C.,1998, *The Montello Plateau: Karst evolution of an alpine neotectonic morphostructure*. *Z. Geomorph. N. E.*, pp. 41-62.
8. Forti P., Rossi A., 2003, *Le aree carsiche gessose d'Italia*, pp. 66-76.
9. Giovanni M., 2021, *Caratterizzazione del regime idrologico e del bacino di alimentazione di due sorgenti situate nelle pendici sudoccidentali del Cansiglio*, pp. 16-19.
10. Giovanni Narda, 2011, *Regime dei deflussi idrici in alto Adige: analisi regionale e ricerca di possibili trend*, pp. 4-8.
11. Longobardi A., Villani P., 2014, *Un approccio regionale per la definizione delle curve di durata in un ambiente ad elevata permeabilità*.
12. Nistor M., 2016, *Vulnerabilità delle sorgenti idriche in relazione al cambiamento climatico nel sud-est dell'Europa: focus sulla regione Emilia-Romagna*.
13. Quinghan M., Liting X., et al., 2021, *Time-lag characteristics of the response of karst springs to precipitation in the northern China*.
14. RStudio Team (2024). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, <https://posit.co/>
15. Sauro U., Castiglioni B. 2005, *Il Montello: uno sguardo d'insieme*, pp. 141-145.
16. Sauro U., Ferrarese F.,2005, *Montello; La Geomorfologia del Montello*, *3KCL*, pp. 27-38.

17. Zampieri D., Ferrarese F., Sauro U., 2005, *Montello; Aspetti della speleogenesi del Montello*, 3KCL, pp. 39-42.
18. Zorzin R., 2021, *Carsismo e Paleocarsismo della zona collinare di Verona*, pp. 31-38.

## RINGRAZIAMENTI

Ci tengo a ringraziare il professor Paolo Fabbri per il prezioso supporto e insegnamento che mi ha trasmesso sia durante il corso sia durante l'acquisizione e il trattamento dei dati per la stesura della tesi. Le sue competenze e la sua disponibilità mi hanno consentito di approfondire le mie conoscenze sul tema dell'elaborato e di sviluppare un interesse per la materia trattata.

Inoltre, desidero esprimere gratitudine al dott. Nico Dalla Libera per avermi guidato personalmente nel rilevamento dei dati, fornendomi importanti informazioni da attuare in fase di raccolta dei dati.

Infine, voglio ringraziare la mia famiglia per avermi supportato sia economicamente sia emotivamente durante tutto il mio percorso di laurea.