



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

**CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER
L'AMBIENTE**

**STUDIO IDROGEOLOGICO DELLE SORGENTI CARSICHE DEL
TAVARAN LUNGO E DEL CASSELON, UBICATE NELL'AREA
DEL MONTELLO IN PROVINCIA DI TREVISO**

Relatore: Prof. Paolo Fabbri

Laureando: Gianluca Rossi
2046019

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUZIONE | 1 |
| 1. IL FENOMENO CARSICO | 3 |
| 1.1. Struttura del sistema carsico | 4 |
| 1.2. Sorgenti carsiche | 5 |
| 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA DI STUDIO | 7 |
| 2.1. Geomorfologia del Montello | 7 |
| 2.2. Aspetti geologici e carsici del Montello | 9 |
| 2.3. Sistema idrico sotterraneo del Montello | 10 |
| 3. STRUMENTI DI MONITORAGGIO E METODI DI ANALISI | 13 |
| 3.1. Strumenti utilizzati | 14 |
| 3.2. Metodi di analisi dei dati | 17 |
| 3.2.1. Flow duration curve (FDC) | 17 |
| 3.2.2. Funzione di autocorrelazione (ACF) | 18 |
| 3.2.3. Funzione di cross-correlazione (CCF) | 19 |
| 3.2.4. Fattore e coefficiente di correlazione | 20 |
| 4. ANALISI E DISCUSSIONE DEI DATI | 23 |
| 4.1. Dati pluviometrici e di temperatura | 23 |
| 4.2. Sorgente Casselon | 26 |
| 4.3. Sorgente Tavarán Lungo | 32 |
| 4.4. Confronto tra le sorgenti | 39 |
| 5. CONCLUSIONI | 45 |
| 6. BIBLIOGRAFIA | 47 |

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni la gestione dei corpi idrici ha acquisito crescente rilevanza, in seguito all'aumento di eventi di precipitazioni estreme, che hanno causato rilevanti criticità di natura economica e di sicurezza per la popolazione. L'obiettivo di questa tesi è quello di fornire una migliore comprensione del comportamento delle sorgenti carsiche, attraverso uno studio idrogeologico delle sorgenti del Tavarano Lungo e del Casselon presenti nell'area del Montello (TV). Lo studio ha comportato la ricostruzione della scala delle portate attraverso delle misure manuali sul campo, effettuate nel corso dell'anno, tramite strumenti appositi. Queste misurazioni sono state integrate da una raccolta dati, eseguita tramite sistemi di monitoraggio posti all'interno delle sorgenti, che dal 2019 misurano con cadenza oraria livelli, conducibilità elettrica e temperatura dell'acqua. I dati raccolti sono stati poi elaborati con specifici software per l'analisi dei dati.

1. IL FENOMENO CARSICO

Il carsismo è un complesso fenomeno chimico-fisico che riguarda l'azione di dissoluzione delle rocce solubili ad opera dell'acqua, in particolare di quella piovana. Sebbene tutte le rocce possano subire processi di dissoluzione, il fenomeno carsico si manifesta prevalentemente in rocce carbonatiche, come calcari e dolomie, in rocce evaporitiche come gessi e salgemma, ed in misura minore in rocce sedimentarie come l'arenaria (Veress, 2020).

Per la formazione di un ampio sistema carsico è necessario un massiccio roccioso, preferibilmente di natura carbonatica, caratterizzato da frequenti fratturazioni e discontinuità. Queste caratteristiche facilitano l'infiltrazione e la circolazione dell'acqua, favorendo i processi di dissoluzione e limitando il drenaggio superficiale. Nel corso di migliaia di anni, tali condizioni conducono alla formazione di una vasta rete di cavità e condotti sotterranei, che permette una significativa circolazione idrica sotterranea (Del Soldato, 2015).

Nel contesto di un sistema carsico sviluppato in rocce calcaree, la reazione chimica fondamentale è quella che avviene quando l'acqua piovana entra in contatto con il carbonato di calcio (CaCO_3). Durante le precipitazioni, le gocce d'acqua attraversano l'atmosfera, assorbendo anidride carbonica (CO_2), la quale reagisce con l'acqua formando acido carbonico (H_2CO_3). Questo acido, a sua volta, reagisce con il carbonato di calcio, dissolvendolo e formando bicarbonato di calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), un composto solubile che viene trasportato via dall'acqua:



Il processo carsico è ulteriormente influenzato da vari fattori ambientali, tra cui la temperatura, l'acidità (pH) e la pressione parziale della CO_2 , oltre che dall'interazione con altre specie chimiche presenti nell'atmosfera e nel suolo. Questi elementi, interagendo tra loro, determinano la velocità e l'intensità della dissoluzione carsica, contribuendo alla formazione di complesse strutture sotterranee (De Waele & Piccini, 2008).

1.1. Struttura del sistema carsico

Un sistema carsico è un complesso idrogeologico caratterizzato da una rete interconnessa di strutture superficiali e sotterranee generate da processi carsici. Queste strutture includono condotti di dimensioni tali da garantire un flusso significativo di acque sotterranee (Piccini, 1999).

Le componenti di un sistema carsico possono essere suddivise in epigee (doline, uvale e polje) ed ipogee (condotti sotterranei, grotte, caverne...) che si differenziano per la posizione rispettivamente superficiale e sotterranea, mantenendo però un forte grado di interconnessione (Casella, 2004).

I sistemi carsici presentano inoltre una suddivisione verticale in zone (Fig. 1) caratterizzate da condizioni idrodinamiche differenti:

1. Zona vadosa: è la zona di collegamento tra la superficie (epicarso) e la zona satura. L'acqua meteorica o di scorrimento superficiale si infiltra tramite fratture o inghiottitoi portando principalmente ad un movimento verticale attraverso i pozzi presenti.
2. Zona epifreatica: è la zona situata al di sopra di quella freatica, caratterizzata dalla continua oscillazione della superficie piezometrica, che porta ad una parziale saturazione della zona.
3. Zona freatica: è la zona che rimane satura durante tutto il corso dell'anno. È caratterizzata da un flusso prevalentemente orizzontale, reso possibile dalla presenza di uno strato impermeabile sottostante (base del carsismo).

Grazie a questa suddivisione, è possibile comprendere meglio il funzionamento degli acquiferi carsici, anche se data la complessità di alcuni sistemi, non è sempre possibile identificare una netta distinzione tra le varie zone (De Waele & Piccini, 2008).

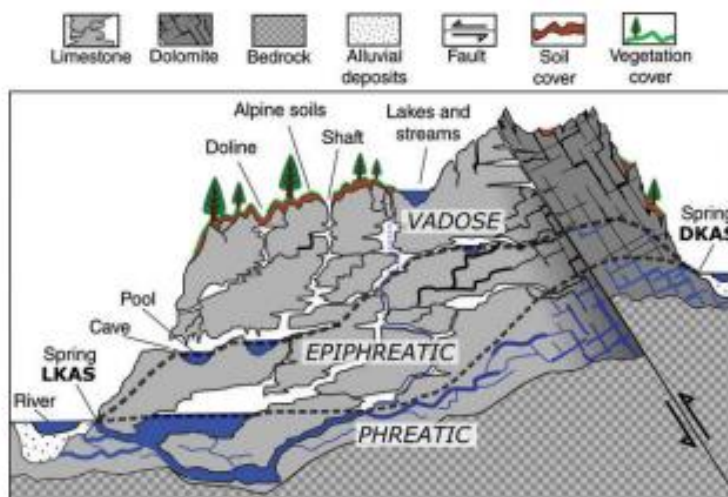


Figura 1: le diverse zone in cui è suddiviso un sistema carsico (Savio, 2018).

Conoscere la struttura di un sistema carsico è importante per comprendere come si muove l'acqua al suo interno, dato che rispetto ad altri acquiferi, la presenza di fratture e condotti abbassa notevolmente il tempo di corrivazione. Ciò assume molta importanza per diversi fattori, tra cui la forte vulnerabilità dell'acquifero nei confronti degli inquinanti e la fuoriuscita dalla sorgente di grosse quantità d'acqua in breve tempo. Entrambi questi fattori costituiscono una minaccia per l'uomo e per l'ambiente (Del Soldato, 2015).

1.2. Sorgenti carsiche

Una sorgente è un punto naturale in cui l'acqua sotterranea emerge dalla superficie del terreno. Le sorgenti si formano quando l'acqua sotterranea segue il percorso con minore resistenza verso la superficie, generalmente in corrispondenza di una frattura nella roccia, un'area di terreno più permeabile o dove la falda acquifera incontra la superficie.

Nel caso delle sorgenti carsiche, il punto di fuoriuscita dell'acqua è spesso in corrispondenza di un condotto, in quanto offre una minore resistenza rispetto a fratture o terreni porosi (Stevens, 2021).

Si possono distinguere due tipi di sorgenti carsiche:

1. Le sorgenti a regime perenne: sono sorgenti situate nella zona freatica che garantisce loro un flusso di base durante tutto l'anno.
2. Le sorgenti a regime temporaneo: sono sorgenti che non presentano un flusso di

base, in quanto si trovano nella zona epifreatica. Si attivano durante eventi di precipitazione sufficienti ad alzare il livello potenziometrico sopra il livello della sorgente (Ghasemizadeh, 2012).

Per calcolare per quanto tempo una sorgente riesce a garantire un flusso d'acqua in assenza di precipitazioni che la alimentino, si utilizza l'indice di svuotamento Q_t di Maillet che si esprime secondo l'equazione:

$$Q_t = Q_0 \times e^{-\alpha t}$$

Dove la portata al tempo t (Q_t) è uguale alla portata all'inizio della fase di scarico (Q_0) moltiplicata per e elevato al valore opposto del coefficiente di esaurimento (α) per il tempo (t). Più il coefficiente di esaurimento α è elevato, più la sorgente si esaurisce velocemente (Torresan, 2020).

Un altro elemento fondamentale per comprendere il funzionamento di una sorgente carsica è l'idrogramma. Mettendo in relazione la portata ed il tempo, si può osservare graficamente, una curva che mette in evidenza quattro fasi: una fase di crescita della curva, una fase di picco, in cui la sorgente raggiunge la portata massima e una fase di deflusso che si arresta quando viene raggiunto il flusso di base (Torresan, 2020).

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA DI STUDIO

Il Montello è un colle isolato situato in provincia di Treviso (Fig. 2). È delimitato a est dall'abitato di Nervesa della Battaglia, a ovest da Montebelluna e Crocetta del Montello, a Sud dai comuni di Volpago del Montello e Giavera del Montello e nel versante settentrionale, dal fiume Piave. Si sviluppa lungo l'asse principale per 13 km in direzione WSW-ENE e perpendicolarmente all'asse di allungamento per 5 km, ricoprendo un'area di circa 60 km². Rispetto alla pianura circostante, si eleva mediamente di 100 m, con un'altezza massima di 369 m s.l.m. La forma ad ellissoide allungato, insieme alle sue dolci pendenze, conferisce un aspetto paragonabile a un carapace di tartaruga o al dorso di una balena. Queste caratteristiche particolari conferiscono al rilievo, l'appellativo di "piccolo monte" o "basso monte" e quindi di "montello" (Ferrarese & Sauro, 2005).



Figura 2: immagine satellitare della zona del Montello.

2.1. Geomorfologia del Montello

Il rilievo del Montello è una brachianticlinale, cioè una piega anticlinale che tende a chiudersi naturalmente. Alcuni autori sostengono che il rilievo si sia formato circa 5,3 milioni di anni fa, in seguito ad un fenomeno di ripiegamento degli strati geologici,

causato dalla compressione ad opera di forze tettoniche che agiscono perpendicolarmente rispetto all'asse di allungamento del Montello (Zampieri, 2005). Recentemente alcuni studiosi hanno dimostrato che in realtà il rilievo corrisponde al dorso di una struttura "pop-up". Si tratterebbe quindi di un cuneo sospinto verso l'alto dalle forze tettoniche delle faglie inverse, presenti sul lato nord-occidentale e sud-orientale (Ferrarese & Sauro, 2005).

La morfostruttura del Montello è il risultato di complessi processi tettonici, sedimentari ed erosivi legati all'orogenesi alpina e alle variazioni del livello del mare durante il Neogene. Attualmente sono distinguibili diverse zone del rilievo caratterizzate da unità geomorfologiche differenti (Fig. 3). La zona più occidentale presenta sette terrazzi con un motivo a gradinata ed un grado di carsificazione che incrementa verso l'alto (Fig. 4). Ciò è imputabile all'azione di erosione del Piave, che anticamente scorreva lungo la paleoansa di Biadene. La parte orientale del Montello è un anticlinorio (struttura anticlinale complicata da pieghettature minori) ricco di doline che evidenziano l'aspetto carsico del rilievo. Il fiume ha influenzato anche questa zona grazie alle interrelazioni tra gli episodi di sollevamento e i processi di erosione fluviale. Si può infatti distinguere un altopiano di spianamento (Fig. 3) (Ferrarese & Sauro, 2005).

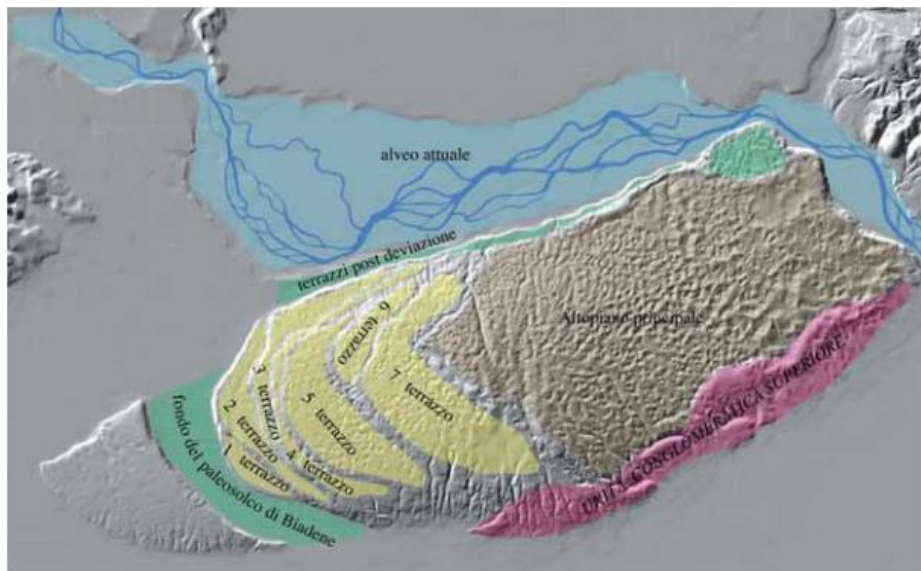


Figura 3: principali unità geomorfologiche del Montello (Ferrarese & Sauro, 2005).



Figura 4: profilo longitudinale del Montello con evidenziati i terrazzi, e il fondo del solco di Biadene (Ferrarese & Sauro, 2005).

È importante notare come le superfici di spianamento fluviale ovvero i sette terrazzi, hanno assunto nel tempo la caratteristica forma ad arco che evidenzia ancor meglio il ripiegamento ad anticlinale della struttura (Ferrarese & Sauro, 2005).

2.2. Aspetti geologici e carsici del Montello

Dal punto di vista litologico il Montello è una formazione alluvionale clastica costituita prevalentemente da conglomerati che si alternano ad arenarie e siltiti. I banchi conglomeratici sono poligenici con clasti costituiti da calcari o dolomie di dimensioni molto variabili, di forma arrotondata e legati da cemento calcitico (Stoch & Tomasin, 2002). La forte solubilità di questi materiali e la struttura conglomeratica ha facilitato la formazione di forme carsiche sia superficiali che profonde. Le forme carsiche profonde, si sviluppano in una complessa rete di condotti, nella quale si identificano almeno sette piani di sviluppo delle cavità, riconducibili ai sette terrazzi di erosione del Montello. Nella zona superficiale, si distinguono diverse forme fluviocarsiche (Fig. 5) tra cui fratture, grotte, valli secche, valli cieche, valli chiuse e soprattutto doline. Il colle presenta infatti oltre 2000 doline che si distribuiscono tra i terrazzi e l'altopiano di spianamento (Zampieri, Ferrarese & Sauro, 2005).

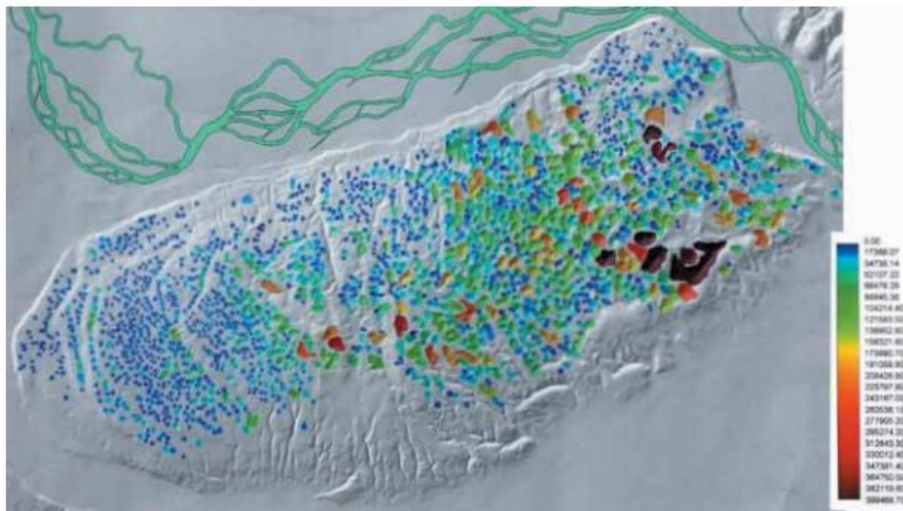


Figura 5: distribuzione delle doline e forme carsiche superficiali nel rilievo del Montello con riferimento ai volumi (Ferrarese & Sauro, 2005).

2.3. Sistema idrico sotterraneo del Montello

Una caratteristica importante del Montello è l'assenza di un reticolo idrografico superficiale. Solo durante eventi di precipitazioni intense e prolungate si formano dei piccoli corsi d'acqua temporanei. Ciò è dovuto ai processi carsici, che nel tempo hanno creato vie di deflusso sotterranee che convogliano gran parte dell'acqua meteorica in una fitta rete di camere e condotti (Fig. 6) (Ferrarese & Sauro, 2005).

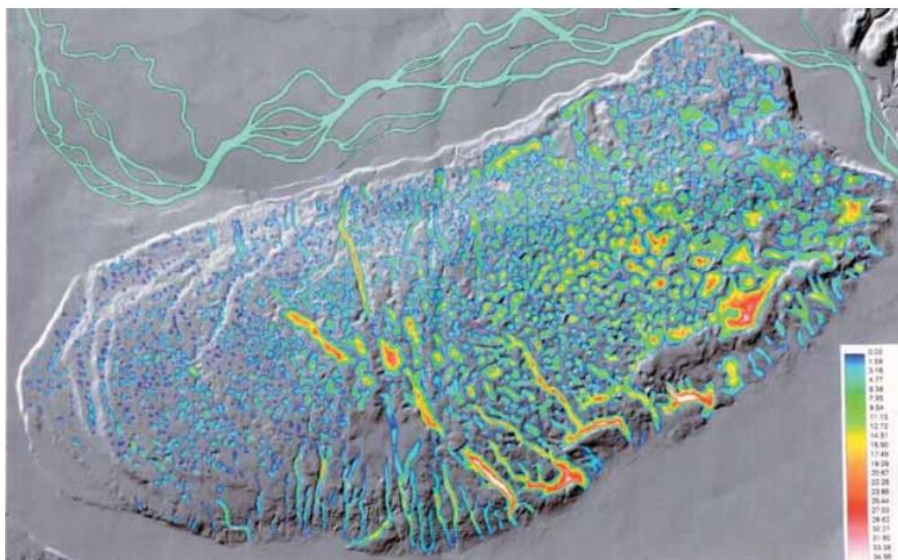


Figura 6: forme carsiche e fluviokarsiche del Montello con riferimento alla profondità (Ferrarese & Sauro, 2005).

In seguito, l'acqua defluisce in profondità e viene poi drenata verso l'esterno del colle, emergendo in sorgenti a ridosso del Piave e della pianura (Fig. 7) (Zampieri, Ferrarese & Sauro, 2005).

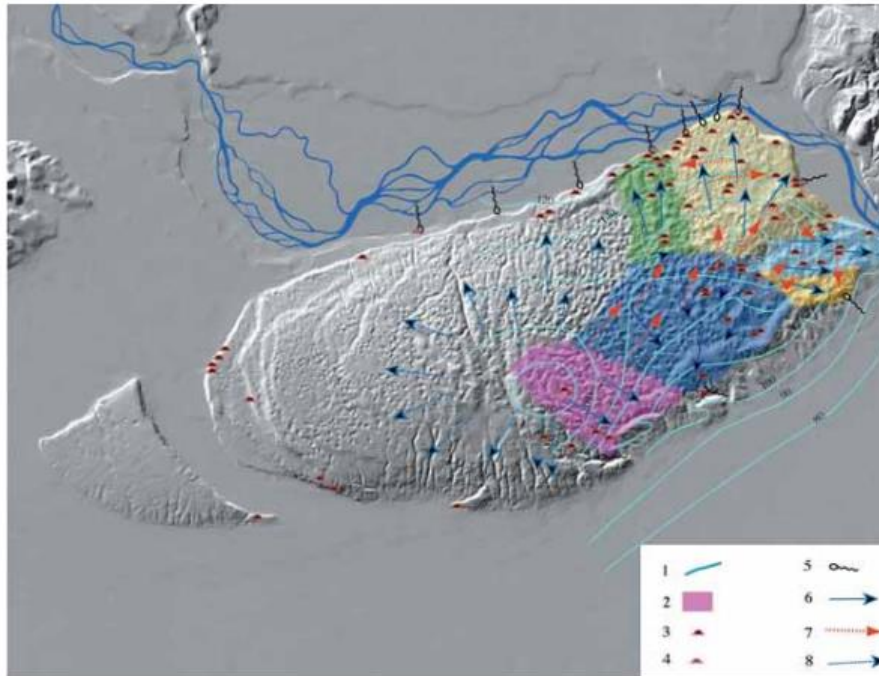


Figura 7: schizzo dell'idrologia carsica del Montello con evidenziate linee isofreatiche (1), principali sorgenti (5) e direzioni di flusso (6-7-8) (Zampieri, Ferrarese & Sauro, 2005).

3. STRUMENTI DI MONITORAGGIO E METODI DI ANALISI

In questo studio sono state analizzate due sorgenti del Montello: Il Tavarano Lungo e il Casselon (“Tavarano Longo e Casseon” in dialetto) situate rispettivamente a nord e ad est del rilievo (Fig. 8).

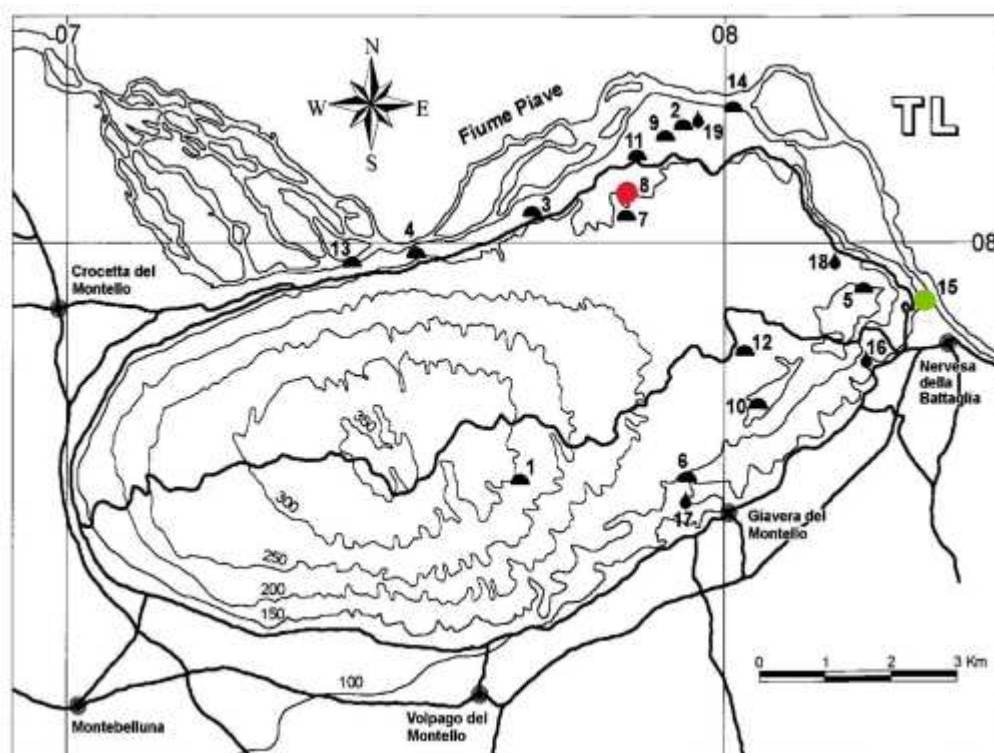


Figura 8: mappa del Montello con evidenziate in rosso la sorgente del Tavarano e in verde la sorgente del Casselon (Stoch & Tomasin, 2002).

In una prima fase sono stati raccolti dati riguardanti temperatura, conducibilità elettrica e livello dell’acqua in uscita della sorgente tramite degli strumenti automatici (CTD-Diver). I dati ricavati comprendono un periodo di 5 anni, da agosto 2019 fino a luglio 2024. Questi dati sono stati poi integrati, durante il periodo di tesi, con misure sperimentali della portata delle sorgenti effettuate in campo tramite mulinello idrometrico e con i dati di livello, temperatura e conducibilità elettrica riguardanti il periodo di tesi. Successivamente, i dati di portata sono stati elaborati per la costruzione della “scala delle portate” delle due sorgenti considerate. Tutti i dati disponibili di livello, temperatura e

conducibilità elettrica, sia quelli pregressi, sia quelli da me raccolti sono stati elaborati tramite il software statistico R-studio.

3.1. Strumenti utilizzati

Per la misura di portata è stato utilizzato il mulinello idrometrico (Fig. 9), ovvero uno strumento composto da un corpo fisso a cui è agganciata un'elica che, grazie alla sua rotazione misura la velocità della corrente in m/s e la trasmette al display posto in cima all'asta. Il mulinello presenta un'ottima efficienza se viene utilizzato in una parte del corso d'acqua con sezione fissa di forma rettangolare. Nel nostro caso l'assenza di una sezione fissa ha richiesto una misura manuale della sezione del fiume con cordella metrica per la larghezza e metro a stecca per la profondità.



Figura 9: mulinello idrometrico "Global Water FP111/FP211 Flow Probes".

Per definizione la portata è il flusso del vettore velocità attraverso una sezione trasversale o più semplicemente velocità per area secondo l'equazione:

$$Q = v \cdot A$$

Ma dato che sia la sezione che la velocità di un corso d'acqua non sono costanti, è stato

utilizzato il metodo volgarmente chiamato “metodo dei conci”. Questo metodo consiste nello scegliere un’adeguata sezione trasversale al flusso dell’acqua, dove sono presenti poche turbolenze, c’è una bassa pendenza, ed una profondità e velocità della corrente adeguate ad un corretto utilizzo del mulinello. Si divide la sezione in un numero sufficiente di punti opportunamente distribuiti. Si misura la profondità sui punti, in modo da ottenere dei “conci”, ovvero delle sub-sezioni approssimate a dei trapezi di cui si calcola l’area con le misure raccolte (Fig. 10). Si misura la velocità della corrente tra un concio e l’altro tramite il mulinello idrometrico (Bolognesi, 2006). E infine si calcola la portata attraverso l’equazione:

$$Q = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(h_i + h_{i+1}) \cdot b_i}{2} \cdot \frac{v_i + v_{i+1}}{2}$$

Dove:

n è il numero totale dei punti;

h_i è la profondità dell’ i -esimo punto;

b_i è la distanza tra due punti successivi;

v_i è la velocità misurata nell’ i -esimo punto.

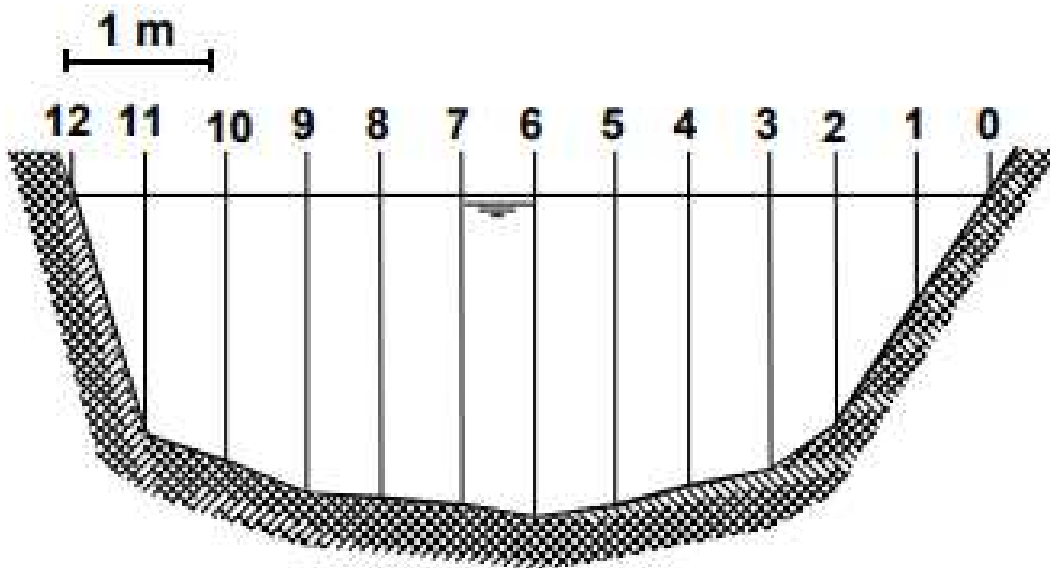


Figura 10: esempio di suddivisione di una sezione trasversale (Bolognesi, 2006).

Le misure di portata sono necessarie per la costruzione della “scala delle portate”, ossia una relazione funzionale che legni l’altezza del livello dell’acqua e la portata di un corso d’acqua o sorgente. Per costruirla è anche necessario misurare con continuità il livello

dell'acqua in prossimità della sorgente (Bolognesi, 2006). Nel nostro caso studio sono stati utilizzati due sensori multiparametrici (CTD-Diver) posti in prossimità delle due sorgenti (Fig. 11).



Figura 11: foto di un CTD-Diver, evidenziato in rosso, mentre vengono scaricati i dati su un PC portatile.

Gli strumenti sono entrati in funzione a partire dal 6/08/2019 ed hanno memorizzato i dati, con cadenza oraria per un periodo di 5 anni fino al 31/07/2024. Le nostre misure vanno dal 12/01/2024 al 31/07/2024. I parametri rilevati sono:

- 1) La pressione espressa in cm di H₂O della colonna d'acqua soprastante lo strumento, che ingloba la pressione atmosferica (strumento non compensato);
- 2) La temperatura (T) dell'acqua espressa in °C;
- 3) La conducibilità elettrica dell'acqua (EC) espressa in mS/cm.

Per calcolare il livello della colonna d'acqua sopra il sensore, è stato necessario sottrarre alla pressione misurata dal sensore, la pressione atmosferica. Perciò sono stati utilizzati i valori di pressioni (convertiti da mbar a cm di H₂O) della stazione Arpav di Cavallino Treporti.

I dati ricavati dal CTD-Diver sono stati utilizzati sia per il calcolo della scala delle portate, sia elaborati tramite il software statistico R-Studio insieme ai dati pluviometrici forniti

dalle stazioni Arpav di Castelfranco Veneto, Conegliano, Volpago del Montello e Cavallino Treporti.

3.2. Metodi di analisi dei dati

I dati ottenuti dagli strumenti di monitoraggio (CTD-Diver) e i valori delle piogge forniti dalle stazioni pluviometriche sono stati elaborati tramite il software open-source R-Studio (RStudio Team, 2024), un ambiente di sviluppo integrato (IDE), che lavora tramite il linguaggio di programmazione R (R Core Team, 2024). Attraverso un codice sorgente il software è stato in grado di fornire le statistiche sommarie delle diverse sorgenti e la rappresentazione grafica delle serie temporali, delle curve di durata del deflusso (FDC), dell'autocorrelazione delle serie di dati (ACF) e della cross-correlazione tra serie diverse (CCF).

3.2.1. Flow duration curve (FDC)

La curva di durata del deflusso o “flow duration curve” è una curva di frequenza cumulativa che mostra la percentuale di tempo in cui la portata di una sorgente è stata uguale o superiore ad uno specifico valore, in un determinato periodo di tempo. Il grafico presenta nell'asse delle ascisse la percentuale cumulativa dei valori di portata, ordinati dal maggiore al minore e nell'asse delle ordinate la portata (Q).

Questo grafico ci permette di formulare delle ipotesi sulle diverse sorgenti. In particolare, la pendenza della curva ci fornisce delle indicazioni sul livello di carsismo del sistema preso in esame. Una curva con una forte pendenza indica un deflusso altamente variabile, con portate che cambiano rapidamente, tipiche di un sistema con un elevato grado di carsificazione. Al contrario, una curva con una pendenza ridotta suggerisce una maggiore stabilità del deflusso, con portate che variano poco nel tempo. Queste caratteristiche indicano invece un sistema con un basso grado di carsificazione (Torresan & Fabbri, 2020).

3.2.2. Funzione di autocorrelazione (ACF)

La funzione di autocorrelazione è una misura normalizzata della dipendenza lineare tra valori successivi in un determinato periodo di tempo. In parole più semplici l'ACF calcola il coefficiente di correlazione ($-1 \leq R \leq 1$) tra una serie di dati e se stessi, traslando di un lag per volta la serie di dati analizzata. Nel nostro caso ogni lag (ritardo) equivale ad 1 ora. Il grafico di una funzione di autocorrelazione prende il nome di correlogramma e presenta nell'asse delle ascisse il lag time (nel nostro caso in ore) e nell'asse delle ordinate il coefficiente di autocorrelazione. Nel caso delle sorgenti, l'ACF viene spesso utilizzato per valutare la "memoria" di un sistema. La memoria si definisce attraverso il "decorrelation lag time" (tempo di ritardo di decorrelazione), ovvero il tempo che deve trascorrere per fare in modo che le portate del sistema non siano più correlate con le portate delle ore precedenti. Graficamente ciò accade quando la funzione di autocorrelazione scende al di sotto di un valore prossimo allo zero (generalmente 0,1 o 0,2).

La funzione di autocorrelazione ACF è descritta dalla relazione:

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)}$$

in cui:

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

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

dove k è il time lag (ritardo), t è il tempo, x è una singola misura dell'evento, \bar{x} è la media delle misurazioni degli eventi ed n è la lunghezza della serie temporale (Zhang & Chen, 2013).

La funzione di autocorrelazione (ACF) può fornire delle valide ipotesi sul grado di

carsificazione di un sistema, e sulle riserve idriche che presenta. Una funzione con una lieve pendenza e quindi un alto decorrelation lag time è indice di un basso grado di carsificazione e abbondanti riserve idriche. Al contrario una funzione con forti pendenze e un basso decorrelation lag time indica la presenza di un sistema carsico ben sviluppato con scarse riserve idriche (Torresan & Fabbri, 2020).

3.2.3. Funzione di cross-correlazione (CCF)

La cross-correlazione (o correlazione incrociata) è una misura statistica che calcola il coefficiente di correlazione lineare tra due serie temporali in relazione al ritardo temporale (lag time) applicato a una di esse. In altre parole, consente di determinare quanto una serie di dati è correlata con un'altra serie quando una delle due è ritardata nel tempo rispetto all'altra. Il grafico di una funzione di cross-correlazione prende in nome di cross-correlogramma, in cui il lag time è riportato nell'asse delle ascisse, mentre il valore di correlazione nell'asse delle ordinate. Il valore di correlazione è compreso tra +1 e -1, dove +1 indica una correlazione diretta tra le due serie di dati, -1 indica una correlazione inversa e 0 indica che non c'è nessuna correlazione. I dati prossimi allo zero presentano un grado molto basso di correlazione; perciò, sono state definite due bande di confidenza (poste a $+\frac{1,96}{\sqrt{n}}$ e $-\frac{1,96}{\sqrt{n}}$) al di sotto delle quali la correlazione non è significativa (Torresan & Fabbri, 2020).

In idrogeologia la funzione di cross-correlazione viene spesso utilizzata per analizzare le relazioni tra segnali di input e output. Ad esempio, viene utilizzata per calcolare il tempo di corruzione utilizzando le precipitazioni quale input e la portata della sorgente come output. La CCF dove u è l'input e y l'output è descritta dalle equazioni:

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

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

dove \bar{u} è la media dei parametri in input e \bar{y} in output.

La CCF è definita come:

$$r_{uy}(k) = \frac{C_{uy}(k)}{\sqrt{C_{uu}(0)C_{yy}(0)}}$$

Nel nostro caso studio è stata effettuata la cross-correlazione tra i parametri misurati: portata (Q), conducibilità elettrica (EC), temperatura (T) e livello di pioggia caduto. I dati sono stati “filtrati”, lavorando sulle differenze tra un dato della serie e quello successivo onde evitare interpretazioni errate dovute al forte grado di autocorrelazione delle portate Q. I cross-correlogrammi di confronto tra precipitazioni (input) e portata (output) sono stati quindi analizzati per ricavare il tempo di corrvazione, ossia il tempo che impiega l’acqua piovana a uscire dal sistema carsico tramite la sorgente considerata (Torresan & Fabbri, 2020).

3.2.4. Fattore e coefficiente di correlazione

Un ulteriore analisi è stata condotta tramite il fattore di correlazione $c(\rho)$ ed il coefficiente di correlazione ρ che sono posti in relazione tra loro tramite l’equazione:

$$c(\rho) = [u(-\rho) + \alpha u(\rho)]|\rho|$$

dove ρ è il coefficiente di correlazione tra Q ed EC (varia tra -1 e +1), e $u(\rho)$ è dato da (Banzato & Vigna, 2011):

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

Attraverso ρ e $c(\rho)$, Galleani et al. (2011) hanno proposto tre diversi tipi di fenomeni predominanti delle sorgenti (Tab. 1):

Tabella 1: tipologie di sorgenti in base a ρ e $c(\rho)$ (Galleani & Vigna, 2011):

| Tipologia di sorgente: | Coefficiente di correlazione ρ : | fattore di correlazione $c(\rho)$: |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo A: sostituzione | $-1 \leq \rho \leq -0,2$ | $0,2 \leq c(\rho) \leq 1$ |
| Tipo B: pistonaggio | $0,2 \leq \rho \leq 1$ | $0,1 \leq c(\rho) \leq 0,5$ |
| Tipo C: omogeneizzazione | $-0,2 \leq \rho \leq 0,2$ | $0 \leq c(\rho) \leq 0,2$ |

Questi tre fenomeni caratterizzano le risposte delle sorgenti, ma sono frutto di sistemi carsici con caratteristiche ben definite (Fig. 12):

- A. Sostituzione:** i sistemi con comportamento a sostituzione sono caratterizzati da una serie di condotti e fratture ben sviluppate che permettono all'acqua di raggiungere velocemente la sorgente. L'acqua non si accumula nell'acquifero ma esce subito dal sistema provocando un aumento della portata e una diminuzione della conducibilità elettrica.
- B. Pistonaggio:** i sistemi con comportamento a pistone sono caratterizzati da una modesta carsificazione, ed un'ampia zona satura che consente l'accumulo d'acqua. Perciò l'acqua piovana che subentra nel sistema funziona come un pistone che spinge via l'acqua già presente in acquifero, provocando un aumento della temperatura e della conducibilità elettrica rilevato in sorgente.
- C. Omogeneizzazione:** i sistemi con comportamento a omogeneizzazione sono caratterizzati da una carsificazione quasi assente, che si traduce in una zona satura molto sviluppata che trattiene l'acqua per un tempo prolungato. La scarsa velocità di movimento causa basse variazioni di portata, non correlate con la temperatura e la conducibilità elettrica (Galleani & Vigna, 2011).

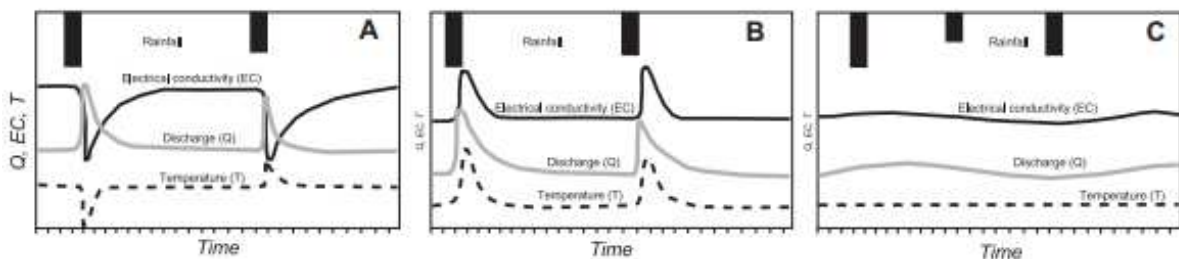


Figura 12: esempi ipotetici delle risposte dei diversi tipi di sorgenti all'infiltrazione di acqua nel sistema (Galleani & Vigna, 2011).

4. ANALISI E DISCUSSIONE DEI DATI

4.1. Dati pluviometrici e di temperatura

Le analisi dei dati pluviometrici e di temperatura sono state realizzate in un intervallo di tempo di cinque anni, dal 06/06/2019 al 31/07/2024. I dati delle stazioni meteorologiche di Castelfranco Veneto, Conegliano, Volpago del Montello e Cavallino Treporti sono stati analizzati tramite il software R-Studio ed hanno fornito risultati qui riportati (Tab. 2). I valori delle precipitazioni si riferiscono alla quantità di pioggia caduta espressa in mm (Fig. 13, Fig. 14, Tab. 2).

Tabella 2: valori statistici delle precipitazioni espressi in mm.

| | Castelfranco | Conegliano | Volpago | Cavallino T. |
|----------------|--------------|------------|---------|--------------|
| Minimo | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Primo quartile | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Mediana | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Media | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,09 |
| Terzo quartile | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Massimo | 53,20 | 37,20 | 48,80 | 78,20 |

Come si può notare dai grafici, le stazioni hanno un andamento simile, ma con variazioni importanti sulla quantità di pioggia caduta in un determinato momento. Questo è dovuto alla discreta distanza tra le stazioni. Può infatti accadere che piova simultaneamente in tutte le stazioni, ma con intensità differenti (Fig. 13).

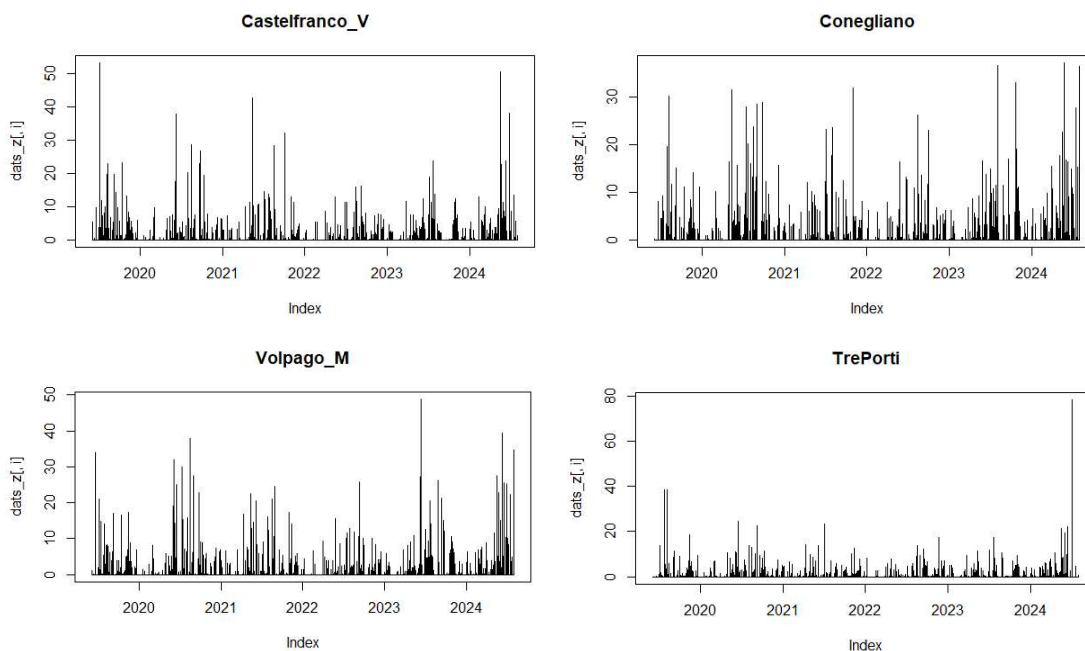


Figura 13: grafici delle precipitazioni con scala temporale nelle ascisse e mm di pioggia caduti nelle ordinate.

Negli istogrammi è visibile una frequenza preponderante di precipitazioni con valori nulli (non ha piovuto) o di pochi millimetri. La frequenza è tale da nascondere i valori di precipitazione più elevati (Fig. 14).

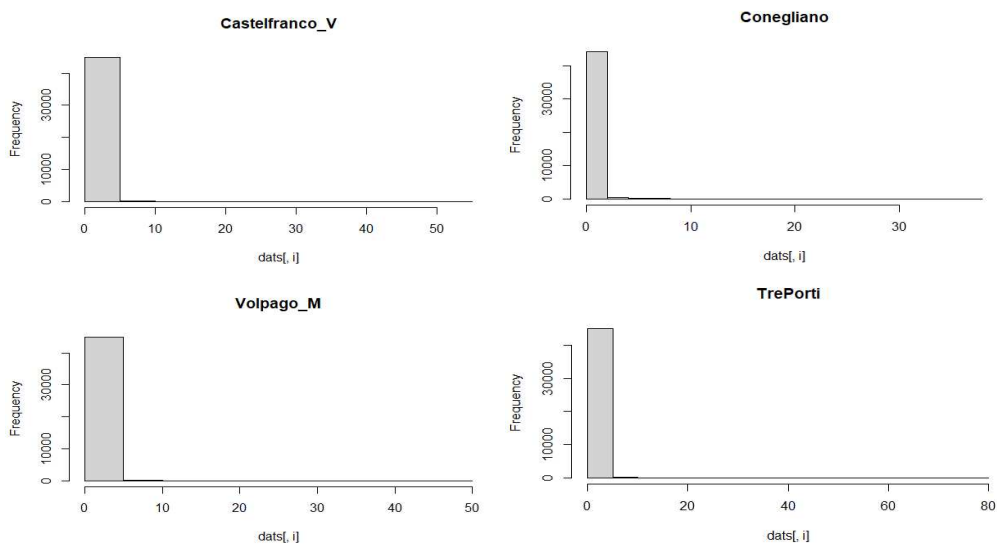


Figura 14: istogrammi delle piogge con valori di pioggia in mm sulle ascisse e frequenza dell'evento nelle ordinate.

I valori di temperatura si riferiscono alla temperatura misurata dalle stazioni meteorologiche a 2 metri d'altezza e sono espressi in °C (Fig. 15, Tab. 3).

Tabella 3: valori statistici delle temperature espressi in °C.

| | Castelfranco | Conegliano | Volpago | Cavallino T. |
|----------------|--------------|------------|---------|--------------|
| Minimo | -6,7 | -3,3 | -4,9 | -3,9 |
| Primo quartile | 7,5 | 8,9 | 8,2 | 8,4 |
| Mediana | 14,2 | 14,9 | 14,2 | 14,8 |
| Media | 14,5 | 15,6 | 14,7 | 15,2 |
| Terzo quartile | 21,1 | 22,0 | 21,0 | 22,1 |
| Massimo | 38,1 | 37,3 | 37,0 | 35,4 |

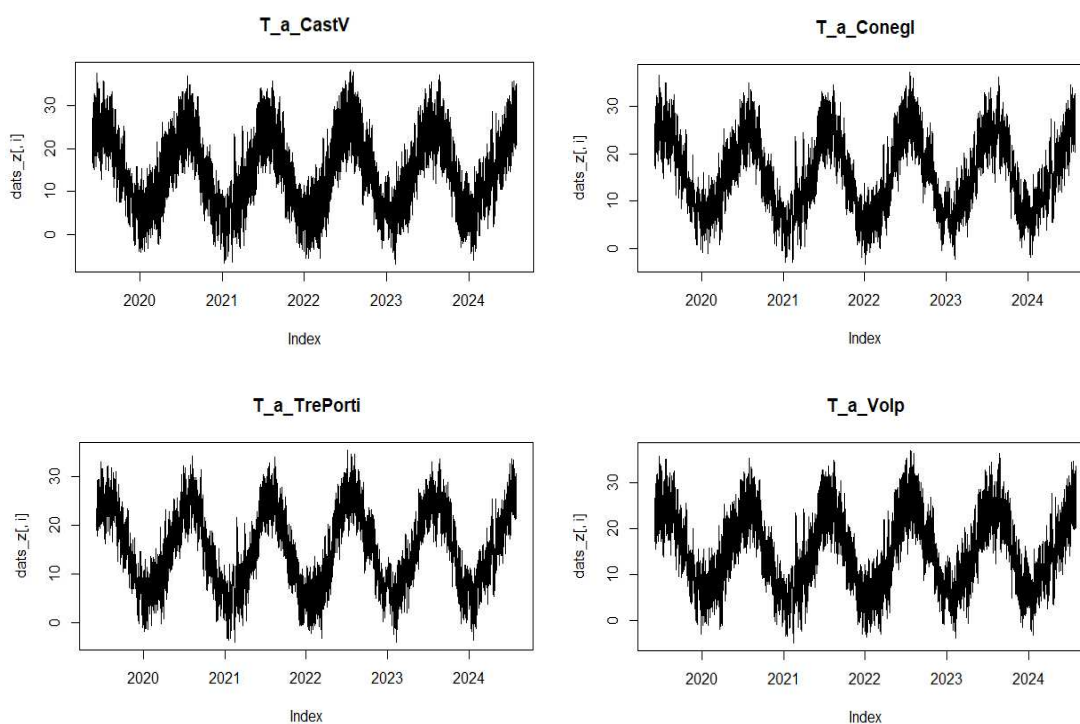


Figura 15: grafici delle temperature con scala temporale nelle ascisse e temperatura in °C nelle ordinate.

4.2. Sorgente Casselon

La sorgente del Casselon è situata ad est del Montello, in un punto molto vicino al Piave (Fig. 8). Il CTD-Diver è posto all'interno di un tubo forato, che ne garantisce stabilità e protezione da agenti esterni. Il 19/06/2024 il tubo è stato sostituito e spostato in un punto più stabile della sorgente (Fig. 16). Ciò ha richiesto una correzione dei dati relativi all'ultimo periodo.



Figura 16: involucro contenete il CTD-Diver nella sorgente del Casselon.

I dati statistici riguardanti il livello dell'acqua, la temperatura e la conducibilità della sorgente sono stati riassunti nella seguente tabella (Tab. 4):

Tabella 4: statistiche sommarie della sorgente Casselon.

| | Min. | Primo quartile | Mediana | Media | Terzo quartile | Max. |
|--------------|-------|----------------|---------|-------|----------------|--------|
| Livello (cm) | 0,01 | 7,02 | 9,57 | 13,08 | 15,80 | 105,10 |
| EC (mS/cm) | 0,275 | 0,633 | 0,696 | 0,678 | 0,725 | 0,855 |
| T (°C) | 11,5 | 12,7 | 12,9 | 12,9 | 13,0 | 14,0 |

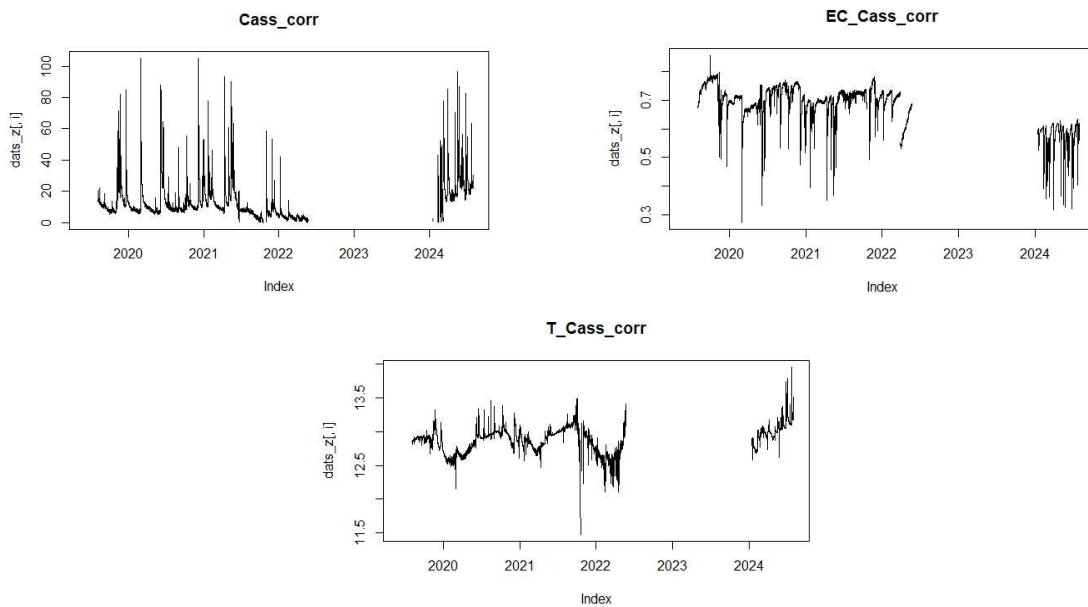


Figura 17: grafici relativi alle serie temporali di livello, T ed EC della sorgente del Casselon.

I grafici riportati (Fig. 17) evidenziano l'assenza di dati nel periodo compreso tra il 21/05/2022 e il 12/01/2024. Questo è dovuto alla rottura del sistema di lettura dati del CTD-Diver. Nei primi mesi del 2022, le precipitazioni sono state molto scarse (Fig. 13). Questo ha coinciso con valori bassi di temperatura (essendo inverno) e di livello, oltre a dei periodi in cui la sorgente è andata in secca. I valori registrati nei periodi di secca, non sono stati inclusi nell'analisi, in quanto il sensore ha misurato la temperatura e la conducibilità dell'aria. Nei primi mesi del 2024 c'è stato invece un forte numero di eventi di precipitazione molto intensi (Fig. 13). Nella figura 17 si può notare come i valori di livello e temperatura siano alti, mentre i valori di conducibilità elettrica molto bassi rispetto alla media dell'intero periodo. Queste caratteristiche ci danno le prime indicazioni di un sistema carsico ben sviluppato, con portata variabile e correlata alla temperatura e conducibilità elettrica (Fig. 12).

Le misure di portata effettuate sul campo sono state impiegate per costruire la "scala delle portate", un diagramma che mette in relazione il livello dell'acqua con la portata (Fig. 18). Mettendo in relazione i dati del CTD-Diver con i valori di portata misurati in campo è stato possibile ottenere dei punti, che attraverso una linea di tendenza ci hanno fornito una funzione ($Q = 0,0456h^{2,2418}$). Applicando questa funzione ai dati orari del livello,

è stato possibile ricavare le portate della sorgente con cadenza oraria (Fig. 19).

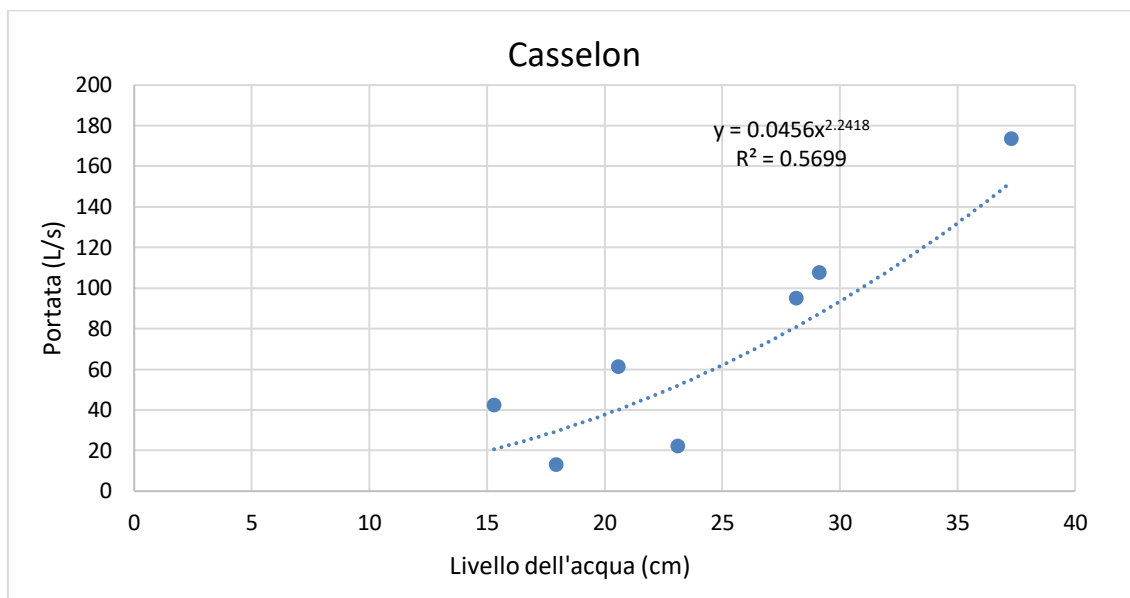


Figura 18: scala delle portate della sorgente Casselon.

Nel grafico soprastante (Fig. 18) si può notare come alcuni valori si discostino rispetto agli altri. Questo avviene perché le misure di portata effettuate sono soggette a diversi errori casuali e di inaccuratezza del metodo. L'assenza di una sezione fissa e la variabilità delle condizioni della sorgente rendono infatti difficile effettuare delle misurazioni accurate.

L'analisi statistica dei dati di portata ha prodotto questi risultati (Tab. 5):

Tabella 5: statistiche sommarie delle portate della sorgente Casselon.

| | Min. | Primo quartile | Mediana | Media | Terzo quartile | Max. |
|---------|------|----------------|---------|-------|----------------|---------|
| Q (L/s) | 0,00 | 3,59 | 7,21 | 30,93 | 22,18 | 1552,49 |

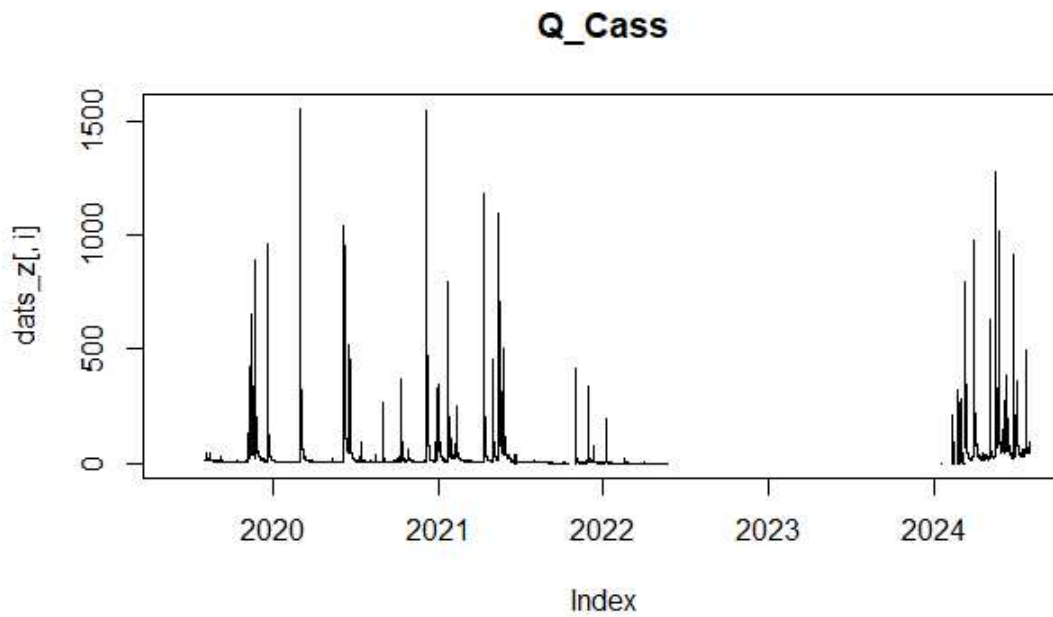


Figura 19: grafico relativo alla serie temporale di portata del Casselon.

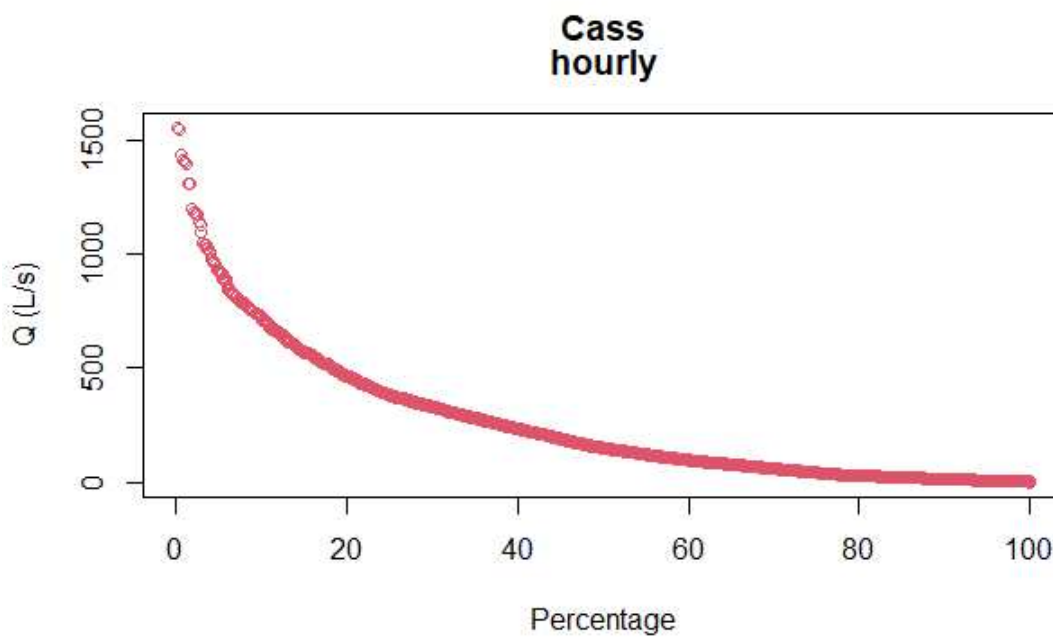


Figura 20: grafico della flow duration curve (FDC) della sorgente Casselon.

Nel grafico della flow duration curve (FDC) della sorgente (Fig. 20) si può notare una forte pendenza iniziale, che va poi a decrescere lungo la curva. Questo ci indica che la sorgente ha un comportamento variabile, con portate che diminuiscono rapidamente in

risposta agli eventi metereologici nella fase iniziale, per poi stabilizzarsi a portate più basse e costanti nel tempo. In sintesi, questa FDC suggerisce che la sorgente ha un buon livello di carsificazione, ma presenta comunque un certo grado di immagazzinamento.

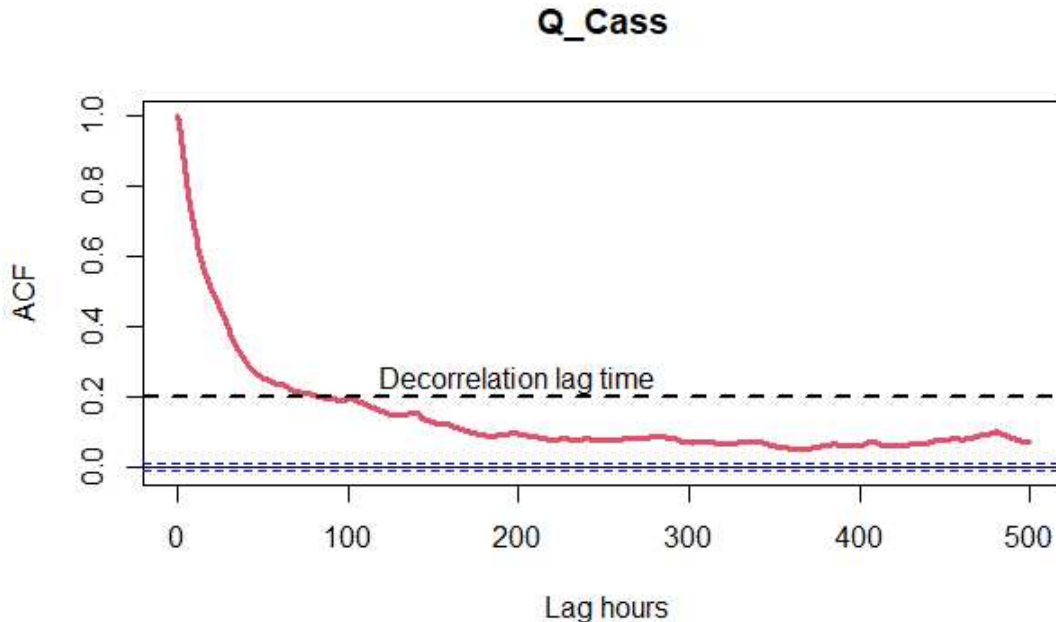


Figura 21: correlogramma delle portate della sorgente Casselon.

Anche il grafico della funzione di autocorrelazione (correlogramma) delle portate (Fig. 21) suggerisce che il sistema reagisce agli eventi di precipitazione in modo rapido attraverso un sistema con un buon grado di carsificazione. Mentre con il passare del tempo, la sorgente si stabilizza garantendo un flusso più costante proveniente da zone di immagazzinamento.

Le cross-correlazioni tra portata e precipitazioni ci forniscono importanti indizi sul tempo di corrivazione, ossia il tempo impiegato dall'acqua piovana ad attraversare il sistema. Analizzando le cross-correlazioni tra la portata del Casselon e le precipitazioni a Volpago del Montello e Conegliano (Fig. 22), notiamo che c'è una correlazione positiva a lag 2. Ciò significa che dopo due ore dall'evento di precipitazione si registra un aumento di portata. Un tempo di corrivazione così basso suggerisce la presenza di un sistema carsico ben sviluppato, capace di drenare l'acqua alla sorgente in poche ore.

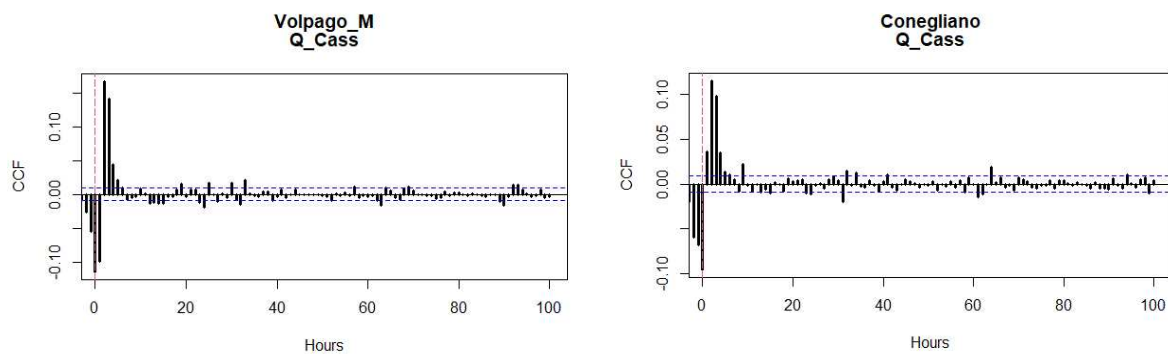


Figura 22: cross-correlogrammi tra la portata della sorgente Casselon e le precipitazioni di due stazioni pluviometriche.

I grafici riguardanti le cross-correlazioni tra Q e temperatura della sorgente (T_Cass_corr), Q e EC e tra Q e temperatura a Volpago del Montello (T_a_Volp) ci forniscono ulteriori ipotesi riguardo alla sorgente (Fig. 23):

- 1) La cross-correlazione tra Q e temperatura della sorgente mostra un picco positivo a lag 0, seguito da una serie di valori di CCF negativi. Questo potrebbe indicare che l'acqua piovana (più fredda) entrando nel sistema funge da pistone, andando a spingere fuori l'acqua immagazzinata dal sistema (più calda). Quando l'acqua precedentemente immagazzinata viene spinta fuori, si iniziano a registrare i primi valori con correlazione negativa. Ipotesi però contrastante con le precedenti.
- 2) La cross-correlazione tra Q e EC mostra una correlazione negativa a lag 0 e 1, per poi diventare positiva a lag 3. Questo conferma l'ipotesi di un sistema carsico sviluppato con discreto immagazzinamento dato che l'acqua piovana povera di ioni causa un abbassamento della EC, che si rialza dopo qualche ora quando l'acqua immagazzinata viene rilasciata.
- 3) La cross-correlazione tra Q e temperatura a Volpago mostra oltre alla ciclicità delle temperature giorno-notte, un picco negativo a lag 2. Il picco indica che due ore dopo l'abbassamento di temperatura causato probabilmente dalla pioggia, si rileva un aumento di portata. Fenomeno che richiama la cross-correlazione tra portata e precipitazioni.

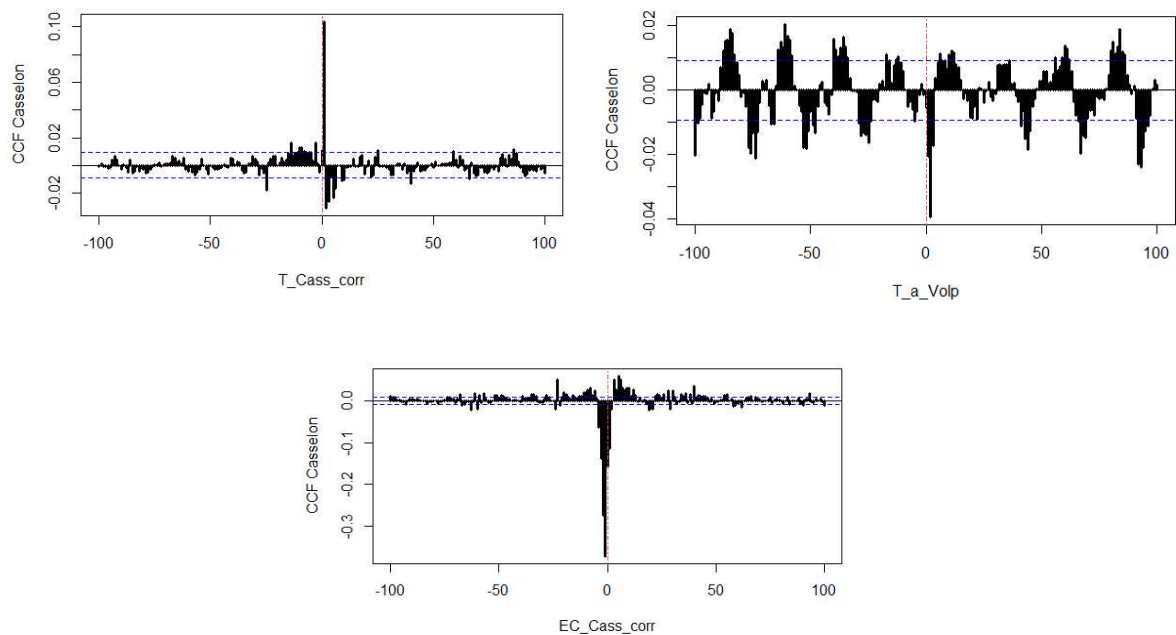


Figura 23: cross-correlogrammi tra Q e $T_{sorgente}$, $T_{volpagor}$, EC della sorgente Casselon.

Un ultimo dato che può fare chiarimento sulle ipotesi formulate è il fattore di correlazione $c(\rho)$. $c(\rho)$ e ρ della sorgente sono risultati rispettivamente $+0,71$ e $-0,71$ per il periodo che va dal 12/01/2024 al 31/07/2024, e $+0,55$ e $-0,55$ per il periodo che va dal 06/06/2019 al 31/07/2024.

Secondo il modello proposto da Galleani et al. (2011), e i valori da noi ricavati in entrambi gli intervalli di tempo, la sorgente Casselon è una sorgente con fenomeni predominanti di “sostituzione” (Tab. 1).

4.3. Sorgente Tavarano Lungo

La sorgente del Tavarano Lungo è situata nella zona nord del Montello (Fig. 8), ed è accessibile dal fondo di una dolina di crollo. Il CTD-Diver è stato spostato il 19/06/2024 all’interno di un tubo forato posto all’ingresso della grotta che ne garantisce stabilità e protezione da agenti esterni (Fig. 24). Inizialmente però, il sensore era posto dentro una vasca artificiale, all’interno di una grotta lunga all’incirca 300 metri.



Figura 24: a sinistra la dolina di crollo di accesso alla sorgente, a destra il CTD-Diver posto all'entrata della sorgente Tavarano Lungo.

I dati statistici riguardanti il livello dell'acqua, la temperatura e la conducibilità della sorgente sono stati riassunti nella seguente tabella (Tab. 6):

Tabella 6: statistiche sommarie della sorgente Tavarano Lungo.

| | Min. | Primo quartile | Mediana | Media | Terzo quartile | Max. |
|--------------|-------|----------------|---------|-------|----------------|-------|
| Livello (cm) | 17,00 | 20,78 | 22,85 | 23,10 | 24,68 | 46,08 |
| EC (mS/cm) | 0,219 | 0,409 | 0,443 | 0,446 | 0,491 | 0,531 |
| T (°C) | 11,35 | 12,39 | 12,50 | 12,52 | 12,62 | 14,27 |

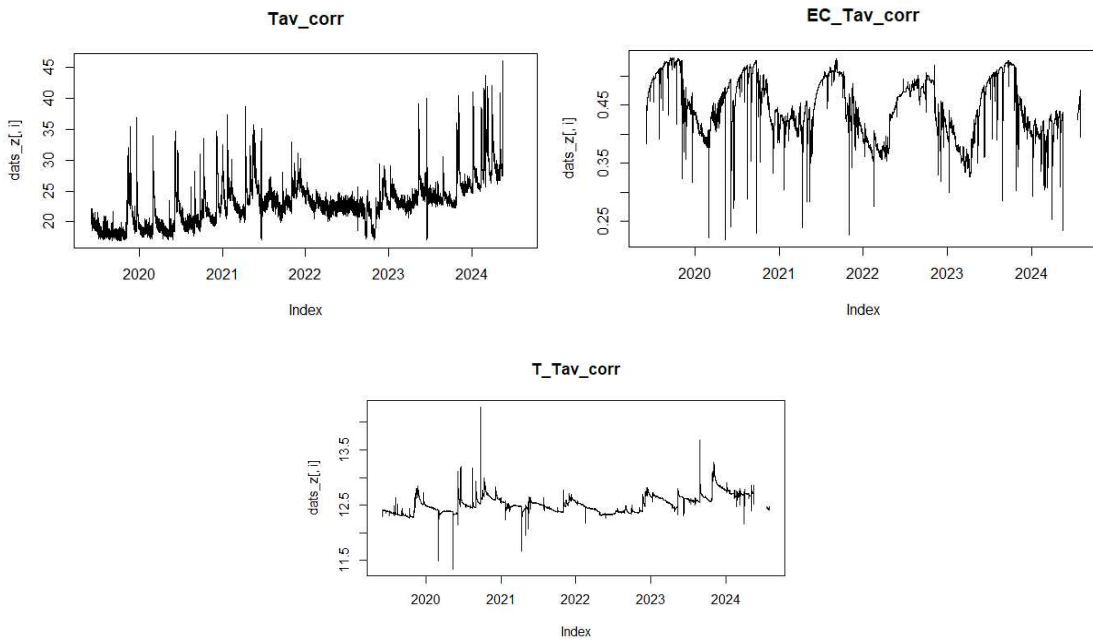


Figura 25: grafici relativi alle serie temporali di livello, T ed EC della sorgente del Tavarano Lungo.

I grafici riportati (Fig. 25) presentano delle caratteristiche particolari: Il grafico relativo al livello dell'acqua presenta dei valori minimi e stabili a livelli bassi di circa 17-20 cm (Tab. 6). Mentre quando le portate sono alte, i valori del livello risultano molto variabili in un breve lasso di tempo. Questo può indicare un comportamento carsico quando si osservano valori elevati di portata, mentre valori bassi di livello (e quindi portata) suggeriscono un comportamento tipico di un acquifero fratturato con un lento deflusso di base. Temperatura e conducibilità elettrica invece mantengono un andamento stagionale, relativo ai cambiamenti delle condizioni climatiche e meteorologiche.

Il grafico della “scala delle portate” del Tavarano Lungo mostra una buona correlazione tra le misure di portata effettuate (Fig. 26). La funzione della linea di tendenza è $Q = 7^{-14}h^{9,8179}$. Applicando questa funzione ai dati orari del livello, è stato possibile ricavare le portate (Fig. 27). È inoltre possibile notare come i livelli partano da un valore minimo di 17. Ciò è dovuto alla posizione iniziale dello strumento, che essendo all'interno di una vasca, ha sempre misurato un livello dell'acqua più alto.

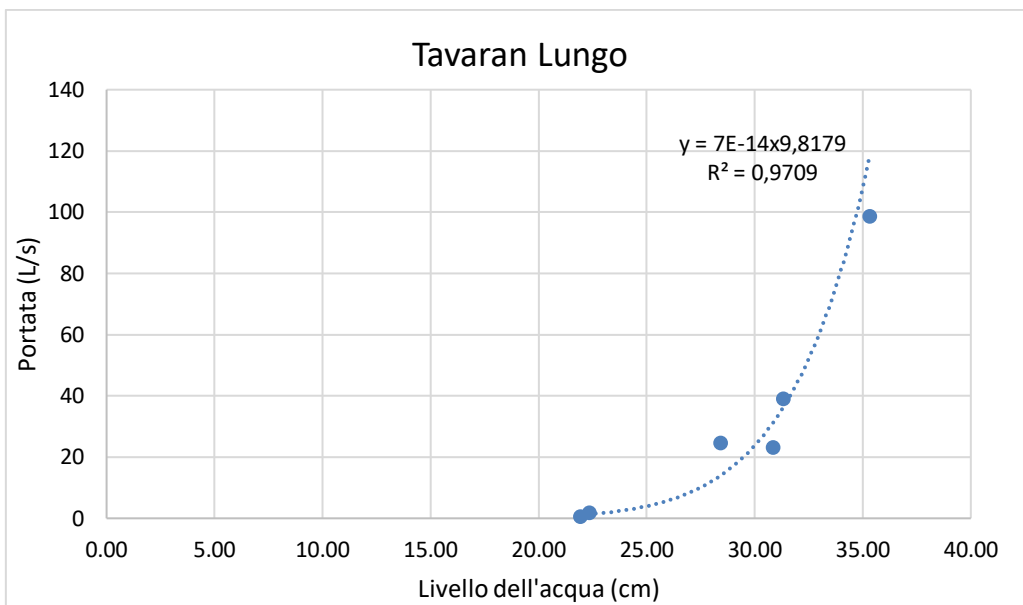


Figura 26: scala delle portate della sorgente Tavaran Lungo.

L'analisi statistica dei dati di portata ha prodotto questi risultati (Tab. 7):

Tabella 7: statistiche sommarie delle portate della sorgente Tavaran Lungo.

| | Min. | Primo quartile | Mediana | Media | Terzo quartile | Max. |
|---------|------|----------------|---------|-------|----------------|---------|
| Q (L/s) | 0,08 | 0,60 | 1,53 | 6,25 | 3,28 | 1504,08 |

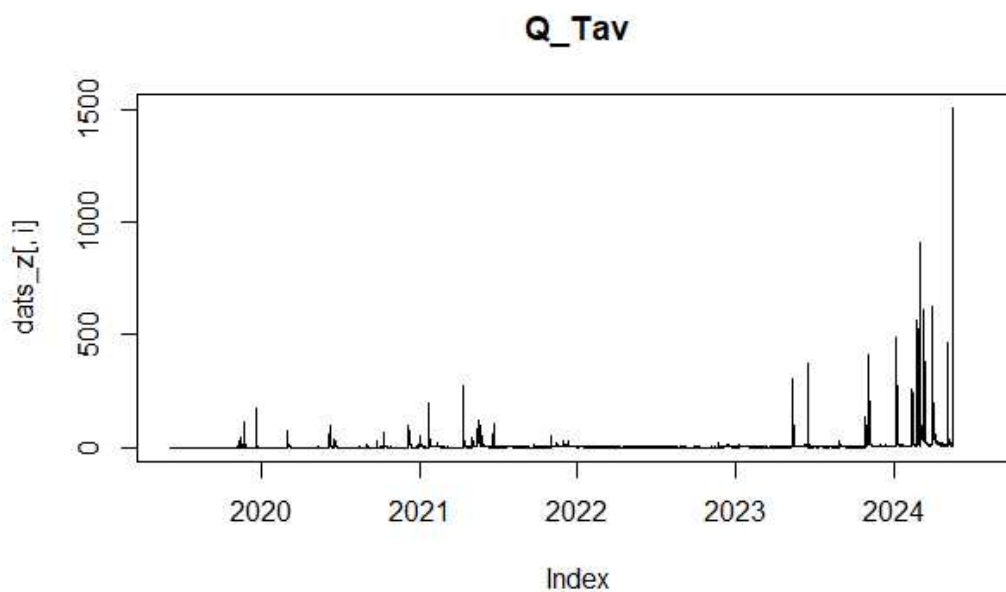


Figura 27: grafico relativo alla serie temporale di portata del Tavaran Lungo.

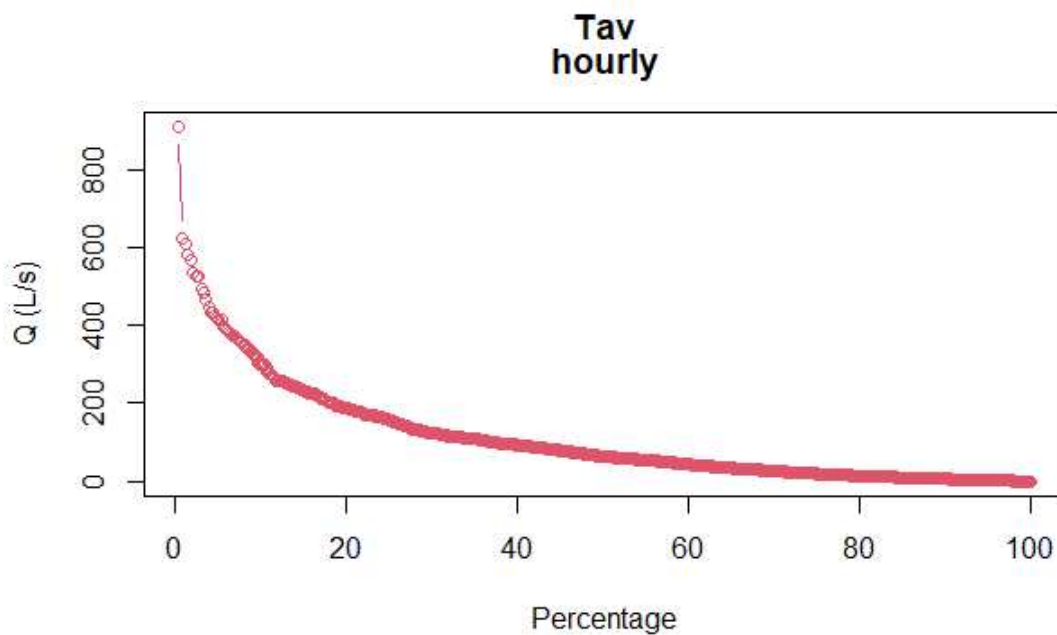


Figura 28: grafico della flow duration curve (FDC) della sorgente Tavarano Lungo.

La FDC del Tavarano mostra inizialmente una pendenza pronunciata che va poi a decrescere lungo la curva (Fig. 28). Le forti variazioni di portata sono indice di un comportamento carsico in risposta ad alti volumi di acqua nel sistema. Mentre in periodi di assenza di piogge il comportamento risulta essere più simile ad un acquifero fratturato, con un deflusso di base proveniente da zone ad elevato immagazzinamento.

Ipotesi che viene confermata dal grafico di autocorrelazione (ACF) delle portate (Fig. 29).

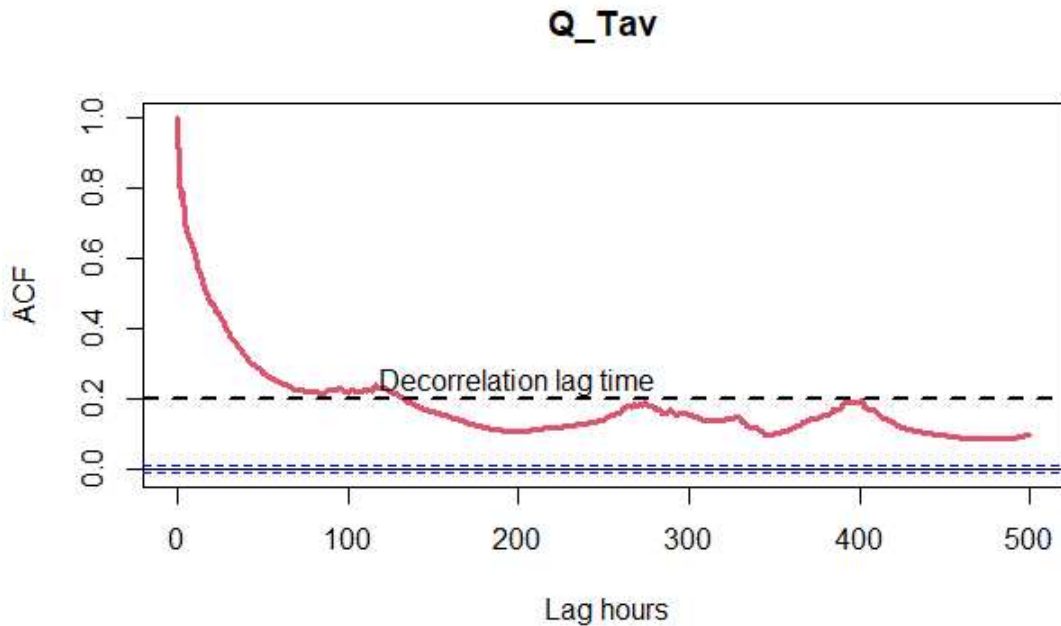


Figura 29: correlogramma delle portate della sorgente Tavarano Lungo.

Qui è infatti molto evidente la differenza di pendenza tra le prime ore ed il periodo intorno alle cento ore, in cui la curva tende a “risalire”. Ciò indica una scarsa memoria nelle prime ore seguenti un evento di precipitazione, che va poi ad assestarsi intorno alle 100 ore dove possiamo ipotizzare la presenza di un deflusso di base.

Le cross-correlazioni tra portata e precipitazioni mostrano dei risultati di difficile interpretazione (Fig. 30). In entrambi i casi troviamo dei picchi positivi, a lag 1 e 2 nel grafico di Volpago e a lag 0 e 3 nel grafico di Conegliano, che potrebbe indicare il tempo di corrivazione della sorgente. I picchi negativi invece sono presenti nel grafico di Volpago a lag 0 e 20 e nel grafico di Conegliano a lag 1, 7 e successivi quasi a formare un’alternanza di picchi positivi e negativi. I dati a disposizione non sono sufficienti per fornire una spiegazione adeguata. Possiamo solo ipotizzare che il “doppio” comportamento della sorgente osservato nei grafici precedenti possa andare ad influire sui cross-correlogrammi, portando alla comparsa di picchi negativi di correlazione.

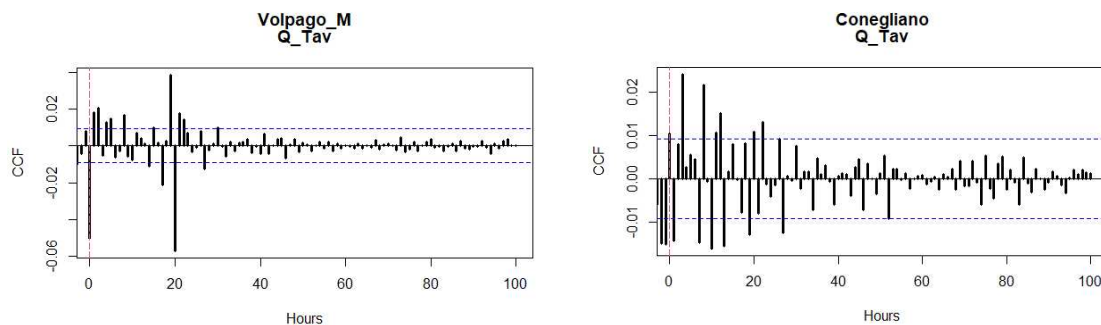


Figura 30: cross-correlogrammi tra la portata della sorgente Tavarán e le precipitazioni di due stazioni pluviometriche.

I grafici di cross-correlazione tra Q e temperatura della sorgente (T_{Tav_corr}), Q e EC e tra Q e temperatura a Volpago del Montello (T_{a_Volp}) (Fig. 31) ci forniscono un pattern simile a quello visto in precedenza (Fig. 30). Possiamo infatti osservare che la cross-correlazione tra Q e temperatura della sorgente presenta inizialmente dei picchi negativi che vanno ad alternarsi con un picco positivo (lag 2), mentre dopo una decina di ore si presentano dei picchi positivi interrotti da un picco negativo (lag 18). Escludendo i picchi a lag 2 e 18 si otterrebbe un chiaro pattern di correlazione negativa iniziale, che si trasforma poi in correlazione positiva. Fenomeno tipico di un sistema carsico ben sviluppato, con un discreto immagazzinamento che viene “scaricato” lentamente. I picchi che si oppongono al pattern potrebbero essere causati da particolari dinamiche di movimento dell’acqua interne al sistema. Discorso simile vale per la cross-correlazione tra Q e EC , che mostra un pattern di correlazioni inizialmente negative, che poi dopo qualche ora diventano positive, con qualche picco che si oppone alla tendenza.

La cross-correlazione tra Q e temperatura a Volpago invece mostra oltre alla ciclicità delle temperature giorno-notte, un picco negativo a lag 1, riconducibile ad un abbassamento della temperatura esterna dovuto alle precipitazioni.

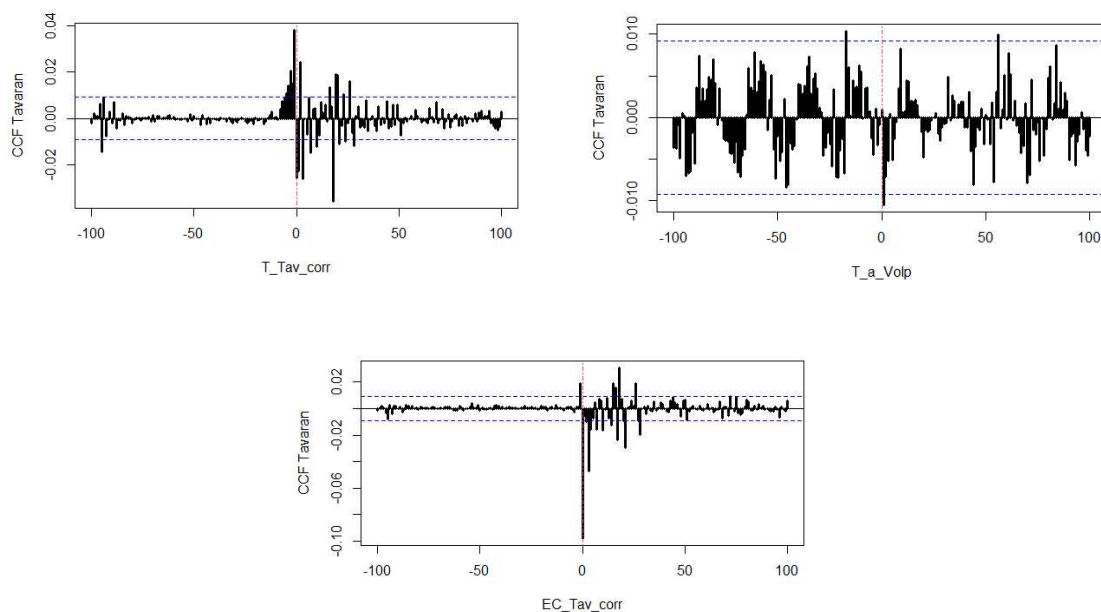


Figura 31: cross-correlogrammi tra Q e $T_{sorgente}$, $T_{volpago}$, EC della sorgente Tavarán Lungo.

Il fattore di correlazione $c(\rho)$ e il coefficiente di correlazione ρ della sorgente sono risultati rispettivamente $+0,73$ e $-0,73$, per il periodo che va dal 12/01/2024 al 31/07/2024 e $+0,27$ e $-0,27$, per il periodo che va dal 06/06/2019 al 31/07/2024.

Secondo il modello proposto da Galleani et al. (2011), nel periodo in cui noi abbiamo effettuato le analisi della sorgente (dal 12/01/2024 al 31/07/2024), nel Tavarán Lungo predominano fenomeni di “sostituzione” (Tab. 1). Se invece si va a considerare tutto l’intervallo di tempo, si riscontra un comportamento misto tra fenomeni di “sostituzione” e “pistonaggio”. Questa differenza è dovuta dal periodo in cui abbiamo effettuato le analisi, caratterizzato da abbondanti precipitazioni (Fig. 13) che hanno favorito il comportamento carsico del sistema.

4.4. Confronto tra le sorgenti

Confrontando i grafici relativi a portata (Fig. 32), conducibilità elettrica (Fig. 33) e temperatura della sorgente (Fig. 34) possiamo notare che:

- 1) La portata del Casselon risponde in modo carsico in relazione agli eventi di precipitazione (Fig. 13), mentre nel Tavarán questo accade solo nell’ultimo periodo di monitoraggio. Inoltre, le piene tendono a scaricarsi più velocemente nel Tavarán.

- 2) La conducibilità del Tavarán presenta variazioni cicliche e regolari, rispetto alla conducibilità del Casselon che sembrerebbe essere influenzata maggiormente dalle portate.
- 3) La sorgente Casselon è soggetta a sbalzi di temperatura stagionali maggiori rispetto al Tavarán.

Queste informazioni suggeriscono un comportamento carsico molto accentuato nel Casselon, visibile a tutti i livelli di portata. Mentre nel Tavarán, con portate alte e lunghi periodi di precipitazioni è evidente un forte comportamento carsico. Invece nei periodi di scarse precipitazioni con eventi di piena isolati, la sorgente presenta un comportamento tipico di acquiferi con un basso grado di carsismo e importanti riserve d'acqua.

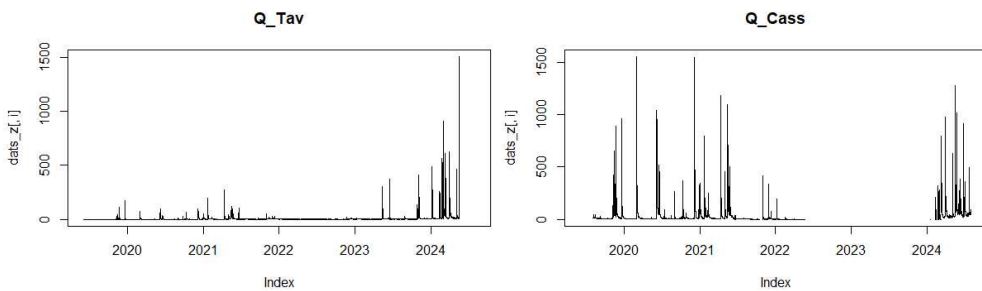


Figura 32: confronto delle portate delle sorgenti Tavarán e Casselon.

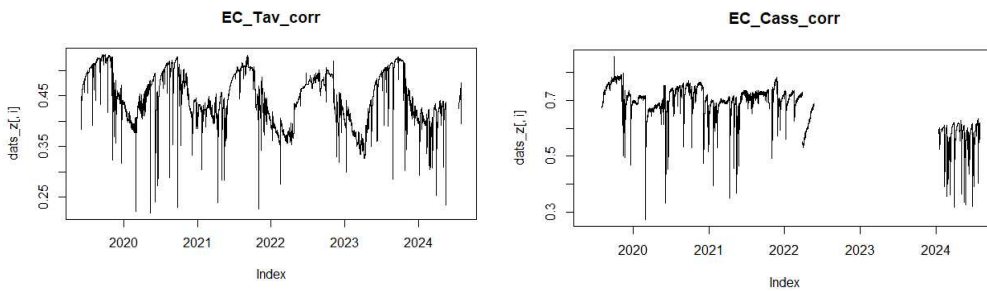


Figura 33: confronto della conducibilità elettrica delle sorgenti Tavarán e Casselon.

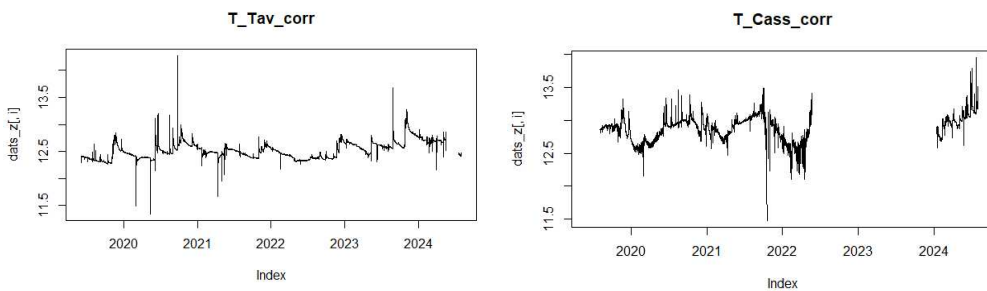


Figura 34: confronto della temperatura dell'acqua delle sorgenti Tavarán e Casselon.

Nei grafici relativi alla FDC (Fig. 35) e alle ACF (Fig. 36), si denota un comportamento simile a quello appena descritto. In entrambe le curve, infatti, il Tavarán presenta una pendenza iniziale piú accentuata, che si riduce piú rapidamente rispetto al Casselon. Ne risulta un comportamento piú carsico nel Tavarán a livelli di portata alti, e nel Casselon a livelli di portata medio-bassi.

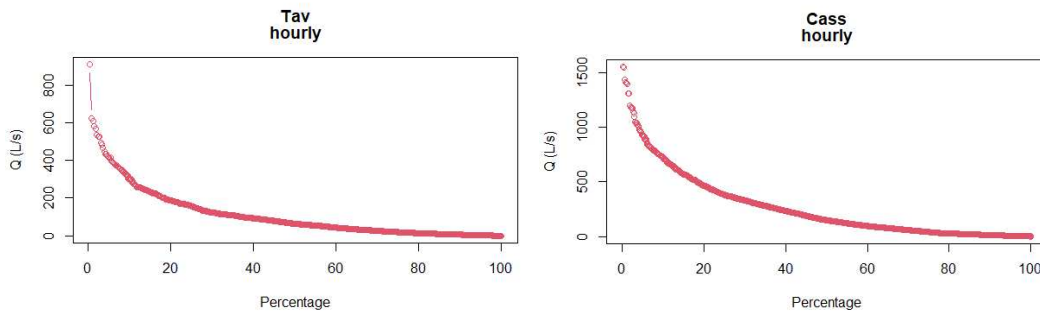


Figura 35: confronto delle FDC della portata delle sorgenti Tavarán e Casselon.

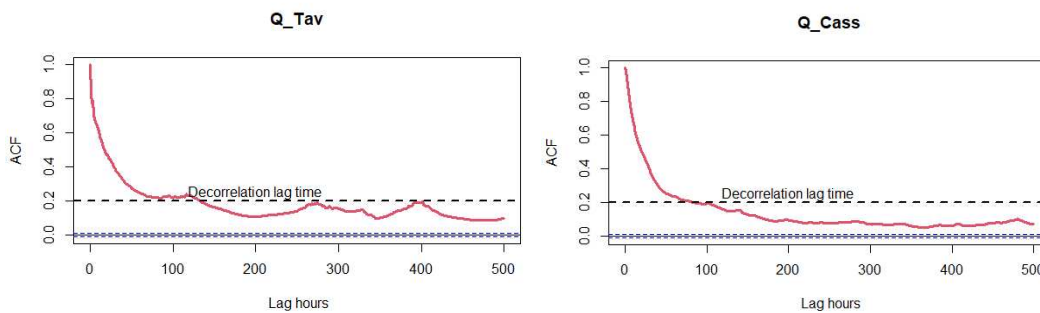


Figura 36: confronto delle ACF della portata delle sorgenti Tavarán e Casselon.

L'ipotesi di un maggior grado di carsificazione a portate alte viene confermata dal confronto tra i cross-correlogrammi delle portate (Fig. 37). Si può notare infatti, che il tempo di corruzione della sorgente Tavarán (circa 1 ora) risulta minore rispetto alla sorgente Casselon (circa 2 ore).

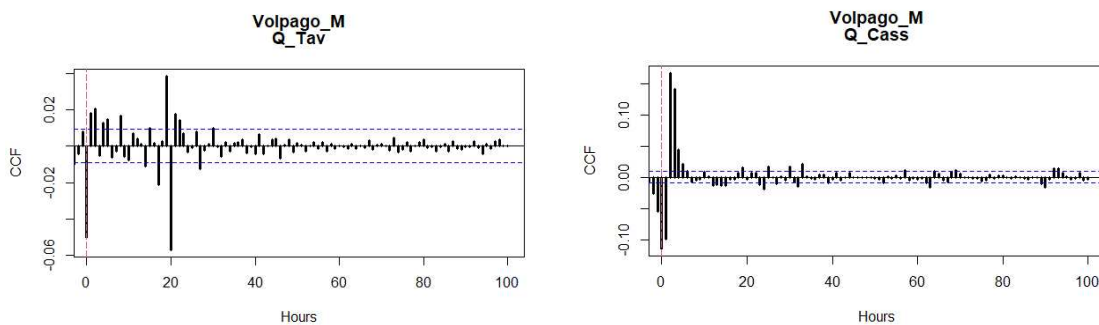


Figura 37: confronto delle CCF precipitazioni-portata delle sorgenti Tavarán e Casselon.

Analizzando invece le altre cross-correlazioni (Fig. 38, Fig. 39, Fig. 40) si denota una forte somiglianza tra i grafici, che però mostrano una risposta “pulita” e coerente da parte del Casselon e una risposta più “disturbata” da parte del Tavarán. Lo si può notare osservando i vari picchi, che nella sorgente del Tavarán sembrano essere meno correlati tra loro.

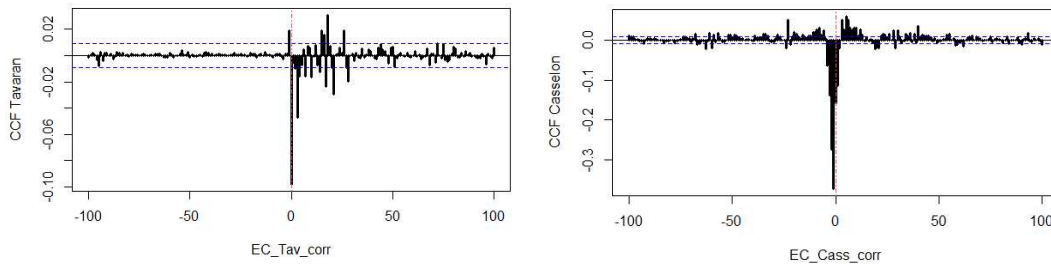


Figura 38: confronto delle CCF conducibilità elettrica-portata delle sorgenti Tavarán e Casselon.

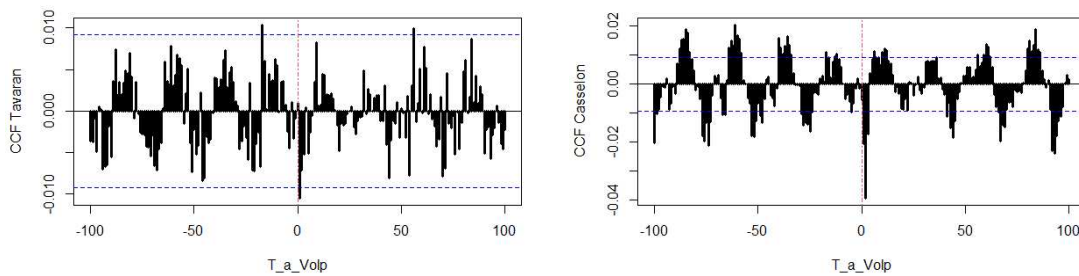


Figura 39: confronto delle CCF $T_{volpago}$ -portata delle sorgenti Tavarán e Casselon.

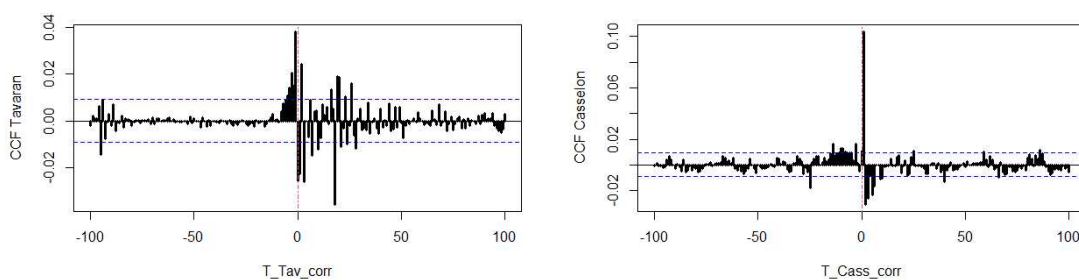


Figura 40: confronto delle CCF $T_{sorgente}$ -portata delle sorgenti Tavarán e Casselon.

Le conferme di quanto detto fino ad ora si ritrovano nel confronto tra $c(p)$ e ρ delle sorgenti. Nella tabella di confronto il periodo A va dal 12/01/2024 al 31/07/2024 e il periodo B va dal 06/06/2019 al 31/07/2024 (Tab. 8). Si può osservare come nel periodo A, caratterizzato da precipitazioni intense (Fig. 13) il comportamento delle due sorgenti risulta simile, con fenomeni prevalenti di “sostituzione”. Nel periodo B in cui le

precipitazioni medie sono state più basse (Tab. 2), la sorgente Casselon mantiene un comportamento carsico con “sostituzione” prevalente. La sorgente Tavarán invece, presenta un coefficiente di correlazione (e fattore) che indica sempre una prevalenza di fenomeni di “sostituzione”, ma con un contributo importante di fenomeni di “pistonaggio”. Questo va a rafforzare la tesi secondo cui il Casselon presenta un sistema carsico molto sviluppato, con un basso immagazzinamento d’acqua, mentre il Tavarán presenta un sistema carsico ben sviluppato, ma con una zona di immagazzinamento importante che garantisce un deflusso di base in assenza di precipitazioni.

Tabella 8: confronto tra $c(\rho)$ e ρ delle sorgenti Tavarán e Casselon.

| | $c(\rho)$ periodo A | ρ periodo A | $c(\rho)$ periodo B | P periodo B |
|----------|---------------------|------------------|---------------------|-------------|
| Casselón | +0,71 | -0,71 | +0,55 | -0,55 |
| Tavarán | +0,73 | -0,73 | +0,27 | -0,27 |

5. CONCLUSIONI

Lo studio ha previsto l'analisi di due sorgenti carsiche situate nel rilievo del Montello (TV), con l'obiettivo di comprenderne il comportamento in relazione al sistema carsico di cui fanno parte.

Per lo svolgimento di questo lavoro sono stati utilizzati i dati provenienti dalle stazioni pluviometriche (Arpav), i dati registrati dal sistema di monitoraggio e le misure sperimentali di portata effettuate sulle sorgenti.

Il confronto e l'analisi dei grafici della curva di durata del deflusso (FDC), di autocorrelazione (ACF) e di cross-correlazioni (CCF) tra le portate della sorgente e i valori di precipitazioni, temperatura e conducibilità elettrica dell'acqua hanno permesso di ottenere informazioni qualitative sul comportamento delle sorgenti. Inoltre, il coefficiente di correlazione e il fattore di correlazione hanno fornito delle ipotesi sul tipo di risposta delle due sorgenti.

Le informazioni ricavate dalle analisi svolte permettono di delineare un modello concettuale idrogeologico per ciascuna sorgente, utile a descrivere le principali caratteristiche del sistema carsico. In particolare, la sorgente Casselon ha mostrato un comportamento di sostituzione, che indica un buon grado di carsificazione con bassi livelli di immagazzinamento. Mentre la sorgente Tavarano Lungo ha mostrato un duplice comportamento di sostituzione in presenza di portate elevate e pistonaggio in presenza di portate ridotte.

Un'analisi più approfondita potrebbe essere realizzata confrontando l'impatto delle precipitazioni sul comportamento delle sorgenti carsiche nei diversi anni in cui sono state monitorate. Inoltre, proseguendo il monitoraggio delle sorgenti per un periodo prolungato, sarebbe possibile esaminare come il cambiamento climatico stia influenzando il loro comportamento e valutare se questo possa costituire un potenziale rischio per il futuro.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Banzato C., Vigna B., Galleani L., & Lo Russo S. (2011). *Application of the Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas (VESPA index) in mountain Quaternary aquifers*, Intervento presentato al convegno GeoHydro2011.
2. Bolognesi A. (2006). *Indagine sperimentale sulle misure di portata mediante tracciante nelle correnti a pelo libero ed applicazioni ingegneristiche ai sistemi fognari*, tesi di laurea.
3. Casella, L. (2004). *Cavità di collasso recenti e antiche nel bacino lacustre di Posta Fibreno (Frosinone)*, Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio, Atti Convegno 21-22 maggio 2004, Roma, pp. 709.
4. De Waele, 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.
5. Del Soldato M. (2015). *Le vie del carsismo ... a passeggio nelle meraviglie del mondo ipogeo alle origini dei Liguri*, Guida alle escursioni, Editrice Il Cigno, pp. 30-47.
6. Ferrarese F., & Sauro U. (2005). *La Geomorfologia del Montello*, Montello, 3KCL, 2005, pp. 27-38.
7. Galleani L., Vigna B., Banzato C., & Lo Russo S. (2011). *Validation of a Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas: The VESPA index*, Journal of Hydrology, 396, pp. 233–245.
8. Ghasemizadeh, R., Hellweger, F., & Butscher, C. (2012). *Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico*, Hydrogeology Journal, 20, pp. 1441-1461.
9. Piccini L. (1999). *Geomorfologia e speleogenesi carsica*, Quaderni Didattici SSI, pp. 1-22.
10. R Core Team (2018). *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
11. RStudio Team (2023). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC,

Boston.

12. Savio D., Stadler P., & Reischer G. H. (2018). *Opening the black box of spring water microbiology from alpine karst aquifers to support proactive drinking water resource management*, WIREs Water, pp. 1-5.
13. Stevens, L. E., Schenk, E. R., & Springer, A. E. (2021). *Springs ecosystem classification*, Ecological Applications, Ecological Society of America, 31(1).
14. Stoch F., & Tomasin G. (2002). *La fauna delle acque carsiche sotterranee del Montello*, Speleologia Veneta, 10, pp. 41-58.
15. Torresan F., Fabbri P., & Piccinini L. (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, 28, pp. 1229-1247.
16. Veress, M. (2020). *Karst Types and Their Karstification*, Journal of Earth Science, 31, pp. 621–634.
17. Zampieri D. (2005). *Elementi di Geologia*, Montello, 3KCL, pp. 21-25.
18. Zampieri D., Ferrarese F., & Sauro U. (2005). *Aspetti della speleogenesi del Montello*, Montello, 3KCL, pp. 39-42.
19. Zhang Z., Chen X., Chen X., & Shi P. (2013). *Quantifying time lag of epikarst-spring hydrograph response to rainfall using correlation and spectral analyses*, Hydrogeology Journal, 21, pp. 1619-1631.

RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere il mio più sentito ringraziamento al Prof. Paolo Fabbri, per avermi dato l'opportunità di realizzare questo progetto, una tesi sperimentale che mi ha permesso di approfondire i metodi e le procedure di analisi per lo studio dei sistemi carsici. La sua disponibilità e il suo costante supporto sono stati fondamentali per la buona riuscita di questo lavoro.

Un sincero ringraziamento va anche al Dott. Nico Dalla Libera per la sua grande disponibilità e professionalità nel guidarmi durante le uscite al Montello. Grazie ai suoi preziosi insegnamenti, ho potuto apprendere le modalità di acquisizione e raccolta dei dati, competenze che hanno arricchito in modo significativo il mio percorso di ricerca.